

Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Bernd Propfe
aus Boppard

Hauptberichter: **Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich**
Institut für Fahrzeugkonzepte, DLR Stuttgart

Mitberichter: **Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen**
Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik, TU München

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2015

Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart

Angefertigt am
Institut für Fahrzeugkonzepte, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e. V.

2016

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Ich bedanke mich herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich für die gewährte Unterstützung und den Hauptbericht.

Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Bei Simone Ehrenberger, Dr.-Ing. Stephan Schmid, Doruk Özdemir sowie allen ehemaligen Kollegen des DLR möchte ich mich für den wissenschaftlichen Austausch bedanken.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, vor allem meinen Eltern, meiner Patentante und meiner Frau für ihre unermüdliche Unterstützung und Motivation.

Stuttgart, im Dezember 2015

Bernd Propfe

Kurzfassung

Die deutsche Bundesregierung hat das Ziel ausgegeben, bis zum Jahr 2020 einen Bestand von einer Million Elektrofahrzeugen in der deutschen Fahrzeugflotte zu erreichen. Bis zum Jahr 2030 soll der Bestand bis auf sechs Millionen Elektrofahrzeuge ansteigen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Arbeit das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte quantifiziert. Darüber hinaus werden kritische technische, politische und ökonomische Einflussfaktoren identifiziert, welche den Markterfolg von Elektrofahrzeugen maßgeblich beeinflussen können. Hierbei werden die Berechnungen für den deutschen PKW-Markt im Zeithorizont bis zum Jahr 2040 durchgeführt. Um die Szenariorechnungen auf einer fundierten Datenbasis aufzubauen, werden zudem neue Berechnungsmodelle entwickelt, welche die notwendigen Eingangsdaten für die Simulationen liefern. Hierzu gehören neben einem Ladeinfrastrukturmodell Kostenmodelle für Traktionsbatterien und E-Maschinen sowie für Instandhaltungskosten und Wiederverkaufserlöse elektrifizierter Fahrzeugkonzepte.

Das neu entwickelte Ladeinfrastrukturmodell ermöglicht die Bewertung der Wechselbeziehung der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur und der Darstellbarkeit deutscher Fahrprofile durch Batteriefahrzeuge. In den Szenariorechnungen kann gezeigt werden, dass aus technischer Sicht der Aufbau von Ladeinfrastruktur wichtiger ist, als die Steigerung der realen elektrischen Reichweiten von Batteriefahrzeugen über 150 km hinaus.

Mit Hilfe der neu entwickelten Modelle zur Berechnung der Produktionskosten von Traktionsbatterien und Elektromaschinen kann neben der Quantifizierung des Einflusses von Rohstoffpreisen sowie des Einflusses unterschiedlicher Zellchemien bzw. Aufbauarten gezeigt werden, welche Kostenentwicklungen in Abhängigkeit der kumulierten Produktionsmengen zu erwarten sind. So lassen sich für eine beispielhafte Lithium-Ionen-Batteriekonfiguration langfristige Produktionskosten für die gesamte Traktionsbatterie von 180 €/kWh ableiten. Für die gewählte beispielhafte permanenterregte Synchronmaschine werden minimale Kosten von 8 €/kW berechnet.

Die Ergebnisse des neu entwickelten Instandhaltungskostenmodells zeigen, dass die Kosten pro gefahrenem Kilometer deutlich in Abhängigkeit des Antriebsstrangs variieren, wobei alle betrachteten elektrifizierten Fahrzeugkonzepte geringere Instandhaltungskosten aufweisen als konventionell angetriebene Fahrzeuge. So fallen die Instandhaltungskosten für ein exemplarisches Batteriefahrzeug 30% niedriger aus, als die des vergleichbaren konventionell angetriebenen Fahrzeugs.

Die auf Basis der vorangegangenen Ergebnisse durchgeführte Simulation des Marktpotentials elektrifizierter Fahrzeuge zeigt auf, dass die klassische Zweiteilung des deutschen Neufahrzeugmarktes, bestehend aus Benzin- und Dieselfahrzeugen, einem Portfolio unterschiedlicher, elektrifizierter Triebstränge weichen kann. Das Simulationsergebnis zeigt, dass hybride Triebstränge eine Übergangstechnologie hin zu höheren Elektrifizierungsgraden darstellen, sodass im Ausgangsszenario der Anteil rein-elektrisch angetriebener Fahrzeuge bis zum Jahr 2040 auf 39% steigt.

Abschließend werden mit Hilfe von 80 technischen, politischen und ökonomischen Sensitivitätsrechnungen sechs kritische Einflussfaktoren abgeleitet. Hierbei handelt es sich um die Kostenentwicklung von Traktionsbatterien und Elektromaschinen, die Höhe der CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge, die Einführung einer Fahrstromsteuer, die Ölpreisentwicklung sowie im kurzfristigen Zeithorizont um die Einführung staatlicher Subventionszahlungen. In den Simulationsrechnungen wird deutlich, dass das Millionenziel der Bundesregierung erreichbar erscheint und dass das avisierte Ziel von sechs Millionen Elektrofahrzeugen sogar übertroffen werden kann.

Abstract

The German government has announced the goal of putting 1 million electric vehicles on German roads by 2020. Until 2030 the amount should rise to 6 million vehicles.

Against this background, the present thesis quantifies the market potential of electric vehicles. Additionally, critical technical, political, and economical influencing factors, which might have a crucial impact on the market potential of electric vehicles, are identified. All calculations are carried out for the German passenger car market up to the year 2040. In order to base the scenario calculations on profound data input, new computational models are developed. These models include a charging infrastructure model as well as cost models for traction batteries and electric motors. Furthermore, calculation models for maintenance cost and resale values of electric vehicles are developed.

The newly developed model for charging infrastructure assesses the interdependency between available charging infrastructure and the suitability of battery electric vehicles for German driving patterns. The calculations show that - from a technical point of view - the build-up of charging infrastructure has a significantly greater impact on the suitability of electric vehicles than increasing the real-world electrical range beyond 150 km.

The newly developed cost models for traction batteries and electric motors quantify the influence of raw material prices and different technical design patterns as well as the long-term production cost as a function of cumulated produced units. For an exemplary lithium-ion battery configuration, minimal production cost of 180 €/kWh are calculated. The exemplary configuration of a permanently excited synchronous electric motor shows minimal production cost of 8 €/kW.

The results of the newly developed maintenance cost model show a strong dependency between the cost per mileage driven and the layout of the powertrain. In general, electric vehicles show lower maintenance cost than combustion engine powered vehicles. Specifically, the maintenance cost of an exemplary battery electric vehicle are 30% lower than the cost of a comparable conventional vehicle.

Based on the preceding results, the simulation of the market potential of electric vehicles shows that the classical separation of the German passenger car market into diesel and gasoline vehicles evolves into a diversified portfolio of electrified drivetrains. The simulation results show that hybrid drivetrains act as a bridging technology towards all-electrical vehicles. Accordingly, in the baseline scenario, solely electrically propelled vehicles represent 39% of the new vehicle fleet in 2040.

Conclusively, by calculating 80 technical, political, and economical sensitivity scenarios critical influence factors are identified. These factors consist of the production cost of traction batteries and electric motors, CO₂-regulations, a tax on electricity used for traction, the oil price, and - in the short term - government subsidies for electric vehicles. The calculations show that the announced target of 1 million vehicles appears reachable, whereas the goal of 6 million vehicles by 2030 might even be exceeded.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	I
ABSTRACT	II
INHALTSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VIII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XV
VERZEICHNIS DER EINHEITEN	XVII
VERZEICHNIS DER PARAMETER	XVIII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.2.1 Einfluss der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur	2
1.2.2 Kosten von Antriebsstrangkomponenten	2
1.2.3 Instandhaltungskosten und Wiederverkaufserlöse	9
1.2.4 Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte	11
1.3 Zielsetzung der Arbeit	13
1.4 Struktur der Arbeit	14
2 GRUNDLAGEN	16
2.1 Technologiebewertung	16
2.2 Simulationsmodell VECTOR21	17
2.2.1 Ursprüngliches Modell	17
2.2.2 Neuerungen am Simulationsmodell	18
2.3 Elektrifizierte Antriebsstrangarchitekturen	22
2.3.1 Hybridfahrzeuge	22
2.3.2 Batteriefahrzeuge	27
2.3.3 Brennstoffzellenfahrzeuge	28
2.4 Elektrifizierte Antriebsstrangkomponenten	29
2.4.1 Traktionsbatterien	29
2.4.2 Elektromaschinen	38
2.4.3 Brennstoffzellen	43

3	EINFLUSS DER VERFÜGBARKEIT VON LADEINFRASTRUKTUR	48
3.1	Vergleich realer Reichweiten	48
3.1.1	Quantifizierung des Einflusses der Altersstruktur	48
3.1.2	Quantifizierung des Einflusses der Siedlungsstruktur	49
3.2	Entwicklung des Berechnungsmodells	51
3.3	Analyse des Einflusses von Ladeinfrastruktur	53
3.3.1	Szenario 1: Identische Entwicklung der Ladeinfrastruktur für alle Siedlungstypen	54
3.3.2	Szenario 2: Unterschiedliche Entwicklung der Siedlungstypen.....	56
3.3.3	Szenario 3: Laden ausschließlich zu Hause	58
3.4	Interpretation der Ergebnisse	59
4	PRODUKTIONSKOSTEN VON TRAKTIONSBATTERIEN UND ELEKTROMASCHINEN	61
4.1	Berechnung der Produktionskosten von Traktionsbatterien	61
4.1.1	Identifikation der Fertigungsprozesse.....	61
4.1.2	Identifikation der relevanten Rohstoffe	64
4.1.3	Entwicklung des Kostenmodells für Traktionsbatterien.....	68
4.1.4	Analyse der Batteriekosten und Kostentreiber	75
4.1.5	Ableitung von Lernkurven.....	84
4.1.6	Ableitung von Übertragungseffekten.....	87
4.1.7	Einordnung der Berechnungsergebnisse.....	89
4.2	Berechnung der Produktionskosten von Elektromaschinen	90
4.2.1	Identifikation der Fertigungsprozesse.....	90
4.2.2	Entwicklung des Kostenmodells für Elektromaschinen	92
4.2.3	Analyse der Kosten von Elektromaschinen und Kostentreiber	95
4.2.4	Einordnung der Berechnungsergebnisse.....	102
5	INSTANDHALTUNGSKOSTEN UND WIEDERVERKAUFSERLÖSE ELEKTRIFIZIERTER FAHRZEUGKONZEPTE	104
5.1	Berechnung der Instandhaltungskosten	104
5.1.1	Entwicklung des Instandhaltungskostenmodells.....	105
5.1.2	Berechnung der Instandhaltungskosten.....	116
5.2	Berechnung der Wiederverkaufserlöse	122
5.2.1	Analyse der Wiederverkaufserlöse konventionell angetriebener Fahrzeuge.....	122
5.2.2	Berechnung der Wiederverkaufserlöse elektrifizierter Fahrzeugkonzepte.....	124

6	MARKTPOTENTIALE ELEKTRIFIZIERTER FAHRZEUGKONZEPTE	127
6.1	Berechnung des Ausgangsszenarios	127
6.1.1	Definition von Szenariofahrzeugen	127
6.1.2	Definition des Ausgangsszenarios	130
6.1.3	Berechnung des Ausgangsszenarios	134
6.2	Berechnung der Sensitivitätsszenarien	142
6.2.1	Berechnung der Sensitivitäten der technischen Randbedingungen	143
6.2.2	Berechnung der Sensitivitäten der politischen Randbedingungen	149
6.2.3	Berechnung der Sensitivitäten der ökonomischen Randbedingungen	161
6.3	Identifikation der kritischen Einflussfaktoren	174
6.4	Einordnung der Simulationsergebnisse	174
6.4.1	Einordnung des Ausgangsszenarios	175
6.4.2	Einordnung der Sensitivitätsszenarien	175
7	FAZIT UND AUSBLICK	179
7.1	Fazit	179
7.1.1	Einfluss von Ladeinfrastruktur	179
7.1.2	Kostenentwicklung von Traktionsbatterien und Elektromaschinen	180
7.1.3	Instandhaltungskosten und Wiederverkaufserlöse	181
7.1.4	Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte	182
7.2	Ausblick	186
	LITERATURVERZEICHNIS	187
	ANHANG	206
	Anhang A: Siedlungsstruktur	206
	Anhang B: Produktionskosten von Traktionsbatterien und Elektromaschinen	208
	Anhang C: Instandhaltungskosten	218
	Anhang D: Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte	220
	LEBENS LAUF	224

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Traktionsbatterien.....	3
Tabelle 1.2: Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Elektromaschinen.	6
Tabelle 1.3: Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Leistungselektronik.	8
Tabelle 2.1: Typische Batteriegrößen in heutigen Fahrzeugen.....	29
Tabelle 2.2: Vergleich unterschiedlicher Bauarten von Elektromaschinen.	42
Tabelle 3.1: Netzkontaktwahrscheinlichkeiten im ersten Ladeinfrastrukturszenario.....	55
Tabelle 3.2: Netzkontaktwahrscheinlichkeiten für Wegzweck „nach Hause“ im zweiten Ladeinfrastrukturszenario.	57
Tabelle 3.3: Netzkontaktwahrscheinlichkeiten im dritten Ladeinfrastrukturszenario.....	58
Tabelle 4.1: Fertigungsschritte der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen.	62
Tabelle 4.2: Fertigungsschritte der Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriemodulen und -packs.	63
Tabelle 4.3: Ressourcen- und Reservenverfügbarkeit sowie -reichweite von Lithium.	65
Tabelle 4.4: Struktur und Umfang des neu entwickelten Batteriekostenmodells.....	69
Tabelle 4.5: Halbzeuge und Zukaufteile eines Batteriemoduls.....	70
Tabelle 4.6: Roh-, Hilfs- und Bedarfsstoffe eines Batteriepacks.....	70
Tabelle 4.7: Fertigungskosten auf Zellebene im ersten Fertigungsszenario.	72
Tabelle 4.8: Fertigungskosten auf Modulebene im ersten und zweiten Fertigungsszenario.	73
Tabelle 4.9: Fertigungskosten auf Packebene.	74
Tabelle 4.10: Gemeinkosten auf Zell-, Modul- und Packebene.....	75
Tabelle 4.11: Exemplarische Batteriekosten (floor-costs) für ausgewählte Batteriekonfigurationen.....	76
Tabelle 4.12: Massen- und Kostenanteile von Lithium und Grafit pro kWh.....	80
Tabelle 4.13: Regressionskoeffizienten der Aktivmaterialien sowie der Leiterfolien auf die Rohstoffkosten einer Einzelzelle für eine Hochenergiekonfiguration der Traktionsbatterie.	81
Tabelle 4.14: Regressionskoeffizienten der Aktivmaterialien sowie der Leiterfolien auf die Rohstoffkosten einer Einzelzelle für eine Hochleistungskonfiguration der Traktionsbatterie.	82
Tabelle 4.15: Quantifizierung der Übertragungseffekte zwischen Hochenergie- und Hochleistungsbatterien.....	88
Tabelle 4.16: Quantifizierung der Übertragungseffekte aus verwandten Industriezweigen.....	88

Tabelle 4.17: Fertigungsschritte der Rotor- und Statorherstellung sowie der Endmontage einer permanenterregten Elektromaschine.....	90
Tabelle 4.18: Struktur und Umfang des neu entwickelten Kostenmodells für Elektromaschinen.....	92
Tabelle 4.19: Zukaufteile und Halbzeuge einer Elektromaschine.....	93
Tabelle 4.20: Fertigungskosten der Elektromaschinen in den drei Hauptprozessschritten bei einer Fertigungsmenge von 500.000 Einheiten p.a.	94
Tabelle 4.21: Gemeinkosten für die Elektromaschinenproduktion bei einer Fertigungsmenge von 500.000 Einheiten p.a.	95
Tabelle 4.22: Massenanteile von Neodym (Nd) am Permanentmagneten (PM) sowie vom Permanentmagnet an der Elektromaschine (EM).....	99
Tabelle 4.23: Vergleich bisher veröffentlichter Kosten für Elektromaschinen in Abhängigkeit der Leistung mit den Ergebnissen des neu entwickelten Kostenmodells.	102
Tabelle 5.1: Betrachtete Komponenten im Instandhaltungskostenmodell.....	106
Tabelle 5.2: Beispielkonfiguration von Traktionsbatterien im Lebensdauermodell.....	114
Tabelle 5.3: Exemplarische Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten für das Instandhaltungskostenmodell.....	117
Tabelle 5.4: Absolute und zum konventionellen Referenzfahrzeug relative Instandhaltungskosten für die exemplarische Dimensionierung der Fahrzeuge gemäß Tabelle 5.3.	118
Tabelle 5.5: Parameter der zweifachen linearen Regression in Abhängigkeit der Fahrzeuggrößenklasse.....	124
Tabelle 6.1: Definition der Szenariofahrzeuge, mittlere Fahrzeuggrößenklasse.....	128
Tabelle 6.2: Übersicht der Lernkurvenparameter im Ausgangsszenario.	131
Tabelle 6.3: Übersicht der politischen und ökonomischen Randbedingungen im Ausgangsszenario.....	133
Tabelle 6.4: Übersicht der technischen, politischen und ökonomischen Sensitivitätsszenarien.	143
Tabelle 6.5: Übersicht des Einflusses der technischen Randbedingungen auf das Marktpotential von elektrifizierten Antriebssträngen.....	149
Tabelle 6.6: Definition der staatlichen Subventionszahlungen pro Neufahrzeug in den Sensitivitätsszenarien.	159
Tabelle 6.7: Übersicht des Einflusses der politischen Randbedingungen auf das Marktpotential von elektrifizierten Antriebssträngen.....	161
Tabelle 6.8: Übersicht des Einflusses der ökonomischen Randbedingungen auf das Marktpotential von elektrifizierten Antriebssträngen.....	173

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Grafische Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Traktionsbatterien.	4
Abbildung 1.2:	Grafische Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Elektromaschinen.	7
Abbildung 1.3:	Grafische Gegenüberstellung von veröffentlichten Produktionskosten und frei verfügbaren Marktpreisen von Elektromaschinen.	7
Abbildung 1.4:	Grafische Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Leistungselektronik.	9
Abbildung 1.5:	Struktur der Arbeit.	15
Abbildung 2.1:	Antriebsstrangarchitekturen von parallelen Hybridfahrzeugen.	24
Abbildung 2.2:	Antriebsstrangarchitektur eines seriellen Hybridfahrzeugs.	25
Abbildung 2.3:	Antriebsstrangarchitekturen von leistungsverzweigten Hybridfahrzeugen.	27
Abbildung 2.4:	Antriebsstrangarchitektur eines Batteriefahrzeugs.	28
Abbildung 2.5:	Antriebsstrangarchitektur eines Brennstoffzellenfahrzeugs.	28
Abbildung 2.6:	Ragone-Plot unterschiedlicher elektrochemischer Speichersysteme.	30
Abbildung 2.7:	Schematischer Aufbau von Lithium-Ionen Bi-Zellen.	33
Abbildung 2.8:	Vergleich der vier betrachteten Kathodenmaterialien hinsichtlich Kosten, Lebensdauer, Sicherheit sowie spezifischer Energie und Leistung mit Hilfe von Eigenschaftsspinnen.	35
Abbildung 2.9:	Bauarten von Lithium-Ionen-Zellen: Zylindrische Zelle (a)), prismatische Zelle (b)) und Pouch-Zelle (c)).	37
Abbildung 2.10:	Aufbau einer Traktionsbatterie von der Zelle über das Modul bis hin zum Pack, exemplarisch am Beispiel des Nissan Leaf (oben) sowie schematisch (unten).	38
Abbildung 2.11:	Bauarten von Elektromaschinen.	40
Abbildung 2.12:	Prinzipdarstellung einer Asynchronmaschine (a)) sowie einer permanenterregten Synchronmaschine (b)).	41
Abbildung 2.13:	Funktionsweise einer Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (PEFC).	44
Abbildung 2.14:	Aufteilung der Kosten für eine Brennstoffzelle zwischen System- und Stackkomponenten bei einer Produktion von 500.000 Einheiten pro Jahr.	46
Abbildung 3.1:	Vergleich der täglichen Fahrleistungen von Fahrern unterschiedlichen Alters mit den rein elektrischen Reichweiten von Elektrofahrzeugen.	49
Abbildung 3.2:	Vergleich der täglichen Fahrleistungen von Fahrern aus unterschiedlichen Regionstypen mit den rein elektrischen Reichweiten von Elektrofahrzeugen.	50

Abbildung 3.3:	Berechnungsschema zur Ermittlung der minimalen und maximalen technischen Grenzen des Batterieladeprofiles.....	52
Abbildung 3.4:	Technische Eignung der Fahrprofile für Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit der elektrischen Reichweite für den Sonderfall einer vollständigen Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur.....	54
Abbildung 3.5:	Technische Eignung der Fahrzeuge für deutsche Fahrprofile in Abhängigkeit der elektrischen Reichweite im ersten Ladeinfrastrukturszenario („Identische Entwicklung der Regionstypen“).	56
Abbildung 3.6:	Technische Eignung der Fahrzeuge für deutsche Fahrprofile in Abhängigkeit der elektrischen Reichweite im zweiten Ladeinfrastrukturszenario („Unterschiedliche Entwicklung der Siedlungstypen“).....	57
Abbildung 3.7:	Technische Eignung der Fahrzeuge für deutsche Fahrprofile in Abhängigkeit der elektrischen Reichweite im dritten Ladeinfrastrukturszenario („Laden ausschließlich zu Hause“).	59
Abbildung 4.1:	Weltweite Verwendung von Lithium nach Produkten und Anwendungen.....	64
Abbildung 4.2:	Exemplarische Batteriekosten (floor-costs) für ausgewählte Batteriekonfigurationen auf Basis von Tabelle 4.11.	76
Abbildung 4.3:	Aufteilung der Batteriekosten im Fertigungsszenario 1 mit Gesamtkosten für die Beispielkonfiguration von 180 €/kWh, differenziert in Komponenten (a)) und in die Kostenart (b)).	77
Abbildung 4.4:	Regressionskoeffizienten des Einflusses der Komponenten eines Batteriepacks auf die Gesamtkosten der Batterie für eine exemplarische Batteriekonfiguration.....	78
Abbildung 4.5:	Regressionskoeffizienten des Einflusses der Komponenten einer Batteriezelle auf die Kosten der Einzelzelle für eine exemplarische Batteriekonfiguration.....	79
Abbildung 4.6:	Massenanteile von Aktiv- und Passivmaterialien bei Hochenergie- (HE) und Hochleistungszellen (HP).	81
Abbildung 4.7:	Funktionaler Zusammenhang zwischen der Kapazität der Einzelzelle und den Produktionskosten einer Traktionsbatterie in Abhängigkeit des Fertigungsszenarios.....	83
Abbildung 4.8:	Massenanteile von Lithium und Graphit an der Gesamtbatterie in Abhängigkeit der Kapazität einer Einzelzelle.....	84
Abbildung 4.9:	Lernkurven für zwei exemplarische Batteriekonfigurationen als Hochleistungs- sowie als Hochenergiebatterie.	85

Abbildung 4.10: Abhängigkeit der Lernrate vom Batterietyp (a)), von der Kapazität der Einzelzelle (b)), von der Anzahl der Zellen pro Modul (c)) sowie von der Anzahl der Module pro Pack (d)) für die vier betrachteten Zellchemien.....	86
Abbildung 4.11: Zusammensetzung der Produktionskosten (floor-costs) von Elektromaschinen nach Kostenarten für eine Beispielkonfiguration von 80 kW.	96
Abbildung 4.12: Abhängigkeit der Produktionskosten von Elektromaschinen von der Leistung.	96
Abbildung 4.13: Produktionskosten von Elektromaschinen in Abhängigkeit des Kupferpreises für eine Beispielkonfiguration von 80 kW.	97
Abbildung 4.14: Bestimmung des kritischen Kupferpreises für die Vorteilhaftigkeit von PSM zu FSM in Abhängigkeit der Leistung.	98
Abbildung 4.15: Veränderung der Produktionskosten einer permanenten Synchronmaschine in Abhängigkeit des Neodympreises sowie des Neodymanteils am Permanentmagneten.	100
Abbildung 4.16: Veränderung der Produktionskosten einer permanenten Synchronmaschine in Abhängigkeit des Neodympreises sowie des Magnetanteils an der Elektromaschine.	101
Abbildung 4.17: Gegenüberstellung der Gesamtkosten der vier betrachteten Elektromaschinenbauarten.	103
Abbildung 5.1: Begriffsdefinition von Instandhaltung.	105
Abbildung 5.2: Typischer Entladezyklus für einen Plug-in Hybrid.	110
Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau eines Batteriemoduls mit vier parallel verschalteten seriellen Zellsträngen zu je fünf Einzelzellen (4p5s).	111
Abbildung 5.4: Einfluss von Batteriegröße und maximal zulässiger Entladungstiefe auf die Lebensdauerkosten von BEV-Traktionsbatterien normiert auf die Basiskonfiguration (a)) sowie normiert auf den Energiegehalt der Batterie (b)).	115
Abbildung 5.5: Einfluss von Batteriegröße und maximal zulässiger Entladungstiefe auf die Lebensdauerkosten von HEV-Traktionsbatterien; normiert auf die Basiskonfiguration und die Batteriegröße.	115
Abbildung 5.6: Instandhaltungskosten der betrachteten Antriebsstrangarchitekturen im Vergleich zum konventionellen, verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug (ICV) für die drei Fahrzeuggrößenklassen.	119
Abbildung 5.7: Differenzierung der Instandhaltungskosten in Komponentengruppen für die betrachteten Fahrzeuggrößenklassen und Antriebsstrangvarianten.	120
Abbildung 5.8: Differenzierte Aufteilung der Instandhaltungskosten für das mittlere Fahrzeugsegment.	121

Abbildung 5.9: Wiederverkaufswerte der drei betrachteten Fahrzeuggrößenklassen nach vier Jahren in Abhängigkeit der jährlichen Fahrleistung; exemplarische Datenpunkte für jedes Segment.....	123
Abbildung 5.10: Vergleich der Wiederverkaufswerte (relativ zum Anschaffungspreis) von Hybridmodellen mit den konventionellen Schwestermodellen in Abhängigkeit der jährlichen Fahrleistung nach einer Haltedauer von vier Jahren.....	124
Abbildung 5.11: Berechnungsschema des Wiederverkaufswertes elektrifizierter Fahrzeugkonzepte in Abhängigkeit der Fahrleistung nach vier Jahren.....	125
Abbildung 6.1: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario.....	134
Abbildung 6.2: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten und Fahrzeuggrößenklasse im Ausgangsszenario.....	136
Abbildung 6.3: Zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen total-cost-of-ownership im Ausgangsszenario; absolut (a)) und relativ (b)) zum Ausgangsjahr 2010.....	137
Abbildung 6.4: Zeitlicher Verlauf der Kosten von Elektromaschinen (a)), Leistungselektronik und Hochvoltkomponenten (b)) und Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (c)) im Ausgangsszenario.....	139
Abbildung 6.5: Segmentierung des deutschen PKW-Flottenbestands nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario.....	140
Abbildung 6.6: Vergleich des berechneten Flottenbestands an Elektrofahrzeugen im Ausgangsszenario mit den Zielen der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) bis zum Jahr 2020 (a)) und 2030 (b)).	141
Abbildung 6.7: CO ₂ -Emissionen der deutschen Fahrzeugflotte im Ausgangsszenario differenziert in den Entstehungsort der Emissionen; absolut (a)) und relativ zum Ausgangsjahr (b)).	142
Abbildung 6.8: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in drei progressiven Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung von Traktionsbatterien.....	144
Abbildung 6.9: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in drei konservativen Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung von Traktionsbatterien.....	145
Abbildung 6.10: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a)) und im konservativsten (b)) sowie im progressivsten (c)) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung von Elektromaschinen.....	146

Abbildung 6.11: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a) und im konservativsten (b) sowie im progressivsten (c) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung von Brennstoffzellensystemen.....	148
Abbildung 6.12: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in den drei konservativen Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung von CO ₂ -Grenzwerten für Neufahrzeuge.....	150
Abbildung 6.13: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in den sechs progressiven Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung von CO ₂ -Grenzwerten für Neufahrzeuge.....	152
Abbildung 6.14: Vergleich der Kostenentwicklung aus Nutzersicht im Ausgangsszenario und im konservativsten sowie im progressivsten Sensitivitätsszenario zur Entwicklung von CO ₂ -Grenzwerten für Neufahrzeuge.....	153
Abbildung 6.15: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a) und im konservativsten (b) sowie im progressivsten (c) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung von CO ₂ -Abgaben.....	154
Abbildung 6.16: Entwicklung der Mineralölsteuer in den Sensitivitätsszenarien für Benzin (a)), Diesel (b)) und CNG (c)).....	155
Abbildung 6.17: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a) und im konservativen (b) sowie im progressivsten (c) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung der Mineralölsteuer.....	155
Abbildung 6.18: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in drei progressiven Sensitivitätsszenarien zur Einführung einer Fahrstromsteuer.....	156
Abbildung 6.19: Vergleich der Kostenentwicklung aus Nutzersicht im Ausgangsszenario und in den beiden progressivsten Sensitivitätsszenarien zur Einführung einer Fahrstromsteuer.....	157
Abbildung 6.20: Bestandsentwicklung im Ausgangsszenario (a) und im progressivsten Sensitivitätsszenario zur Einführung einer Fahrstromsteuer (b)); Vergleich des deutschen PKW-Fahrzeugbestands mit den nationalen Zielen im Jahr 2020 (c).....	158
Abbildung 6.21: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in den drei Sensitivitätsszenarien zur Zahlung von staatlichen Subventionen für Neufahrzeuge.....	159

Abbildung 6.22: Vergleich der jährlichen (a)) und der kumulierten (b)) staatlichen Ausgaben sowie der Entwicklung des Flottenbestands mit den nationalen Zielen in den drei progressiven Sensitivitätsszenarien zur Zahlung von staatlichen Subventionen für Neufahrzeuge (c)).....	160
Abbildung 6.23: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a)) und im konservativsten (b)) sowie im progressivsten (c)) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Grafitpreises.....	162
Abbildung 6.24: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a)) und im konservativsten (b)) sowie im progressivsten (c)) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Lithiumpreises.....	163
Abbildung 6.25: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im konservativsten (a)) und im progressivsten (b)) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Neodympreises; Sensitivitätsszenario gänzlich ohne Neodymeinfluss (c)).....	164
Abbildung 6.26: Kosten der Elektromaschine (a)) und total-cost-of-ownership (b)) im Ausgangsszenario sowie im konservativsten und im progressivsten Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Neodympreises.....	165
Abbildung 6.27: Entwicklung des Platinpreises pro Feinunze (a)) sowie des kumulierten Brennstoffzellenfahrzeugabsatzes in den Sensitivitätsszenarien zum Platinpreis (b)).....	166
Abbildung 6.28: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in drei konservativen Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung des Rohölpreises.....	167
Abbildung 6.29: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in drei progressiven Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung des Rohölpreises.....	168
Abbildung 6.30: Entwicklung der Kosten aus Nutzersicht im Ausgangsszenario (a)) sowie im konservativsten (b)) und im progressivsten (c)) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Rohölpreises.....	168
Abbildung 6.31: Entwicklung des Rohölpreises (a)) sowie des Flottenbestands an Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 (b)) in den Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung des Rohölpreises.....	169
Abbildung 6.32: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im konservativen (a)) sowie im progressivsten (b)) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Elektrizitätspreises; Bestandsentwicklung an Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 (c)).....	170

- Abbildung 6.33: Entwicklung des Wasserstoffpreises (a)) und der Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebssträngen im konservativsten (b)) sowie im progressivsten (c)) Sensitivitätsszenario.....171
- Abbildung 6.34: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a)) und im konservativsten (b)) sowie im progressivsten (c)) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur.....173
- Abbildung 6.35: Vergleich der berechneten Marktanteile des Ausgangsszenarios mit denen veröffentlichter Studien für hauptsächlich elektrisch angetriebene Fahrzeuge (a)) sowie für Batteriefahrzeuge (b)).....175

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating current (dt.: Wechselstrom)
ANL	Argonne National Laboratory
ASM	Asynchronmaschine
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BEV	Battery electric vehicle (dt.: Batteriefahrzeug)
BJB	Battery-junction-box (dt.: Batterieanschlusskasten)
BMS	Batteriemanagementsystem
BPM	Brushless permanent magnet machine (dt.: Bürstenlose Gleichstrommaschine)
CD	Charge-depleting (dt. rein elektrische Fahrweise)
CNG	Compressed natural gas vehicle (dt.: Erdgasfahrzeug)
CS	Charge-sustaining (dt. hybride Fahrweise)
D	Dieselfahrzeug
DC	Direct current (dt.: Gleichstrom)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOE	US Department of Energy
EM	Elektromaschine
EoL	End-of-life (dt.: Ende der Lebensdauer)
EREV	Extended-range electric vehicle (dt.: Range-extender Fahrzeug)
EV	Electric vehicle (dt.: Elektrofahrzeug)
FCV	Fuel cell electric vehicle (dt.: Brennstoffzellenfahrzeug)
FSM	Fremderregte Synchronmaschine
G	Gasoline vehicle (dt.: Benzinfahrzeug)
GM	Gleichstrommaschine
ICV	Internal combustion engine vehicle (dt.: Verbrennungsmotorfahrzeug)
IEA	International Energy Agency (dt.: Internationale Energieagentur)
ISG	Integrated starter-generator (dt.: integrierte Starter-Generator Einheit)
KBA	Kraftfahrtbundesamt
LCE	Lithium carbonate equivalent (dt.: Lithiumcarbonat-Äquivalent)
MA	Mitarbeiter
MiD	Mobilität in Deutschland
Mio.	Millionen
MwSt.	Mehrwertsteuer
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus

NEP	Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
NVH	Noise, vibration, harshness (dt.: Geräusch, Vibration, Rauheit)
PEFC	Polymer electrolyte fuel cell (dt.: Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle)
PEM	Polymer electrolyte membrane (dt.: Polymer-Elektrolyt-Membran)
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle (dt.: Plug-in Hybrid)
PM	Permanentmagnet
PSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
RCO	Relevant cost of ownership (dt.: relevante Nutzungskosten)
REO	rare-earth oxide (dt.: Selten-Erd-Oxid)
SM	Synchronmaschine
SRM	Switched reluctance machine (dt.: Geschaltete Reluktanzmaschine)
TCO	Total-cost-of-ownership (dt.: Lebenszykluskosten)
TFM	Transversalflussmaschine
Tsd.	Tausend
TTW	tank-to-wheel (dt.: vom Tank bis zum Rad)
USABC	US Advanced Battery Consortium
USGS	United States Geological Survey
VMT _n	Vehicle-miles-traveled (dt.: Jahresfahrleistung) nach n Jahren
WTT	well-to-tank (dt.: von der Quelle bis zum Tank)
WTW	well-to-wheel (dt.: von der Quelle bis zum Rad)

Verzeichnis der Einheiten

€	Euro
€ ct/km	Euro Cent pro Kilometer
€ ct/kWh	Euro Cent pro Kilowattstunde
€/Fzg.	Euro pro Fahrzeug
€/(g CO ₂ /km)	Euro pro Gramm CO ₂ pro Kilometer
€/kg	Euro pro Kilogramm
€/kg H ₂	Euro pro Kilogramm Wasserstoff
€/kW	Euro pro Kilowatt
€/kWh	Euro pro Kilowattstunde
\$	US Dollar
\$/€	US Dollar pro Euro
\$/bbl	US Dollar pro Barrel
\$/kg	US Dollar pro Kilogramm
\$/kWh	US Dollar pro Kilowattstunde
\$/oz.tr.	US Dollar pro Feinunze
a	Jahr
A	Ampere
Ah	Amperestunde
d	Tag
g	Gramm
g CO ₂ /km	Gramm CO ₂ pro Kilometer
g/kWh	Gramm pro Kilowattstunde
h	Stunde
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km/d	Kilometer pro Tag
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
MJ	Megajoule
oz.tr.	Feinunze
Stk.	Stück
V	Volt
Wh/kg	Wattstunden pro Kilogramm

Verzeichnis der Parameter

Δ	Delta
λ	Lambda
Σ	Summe
\forall	Allquantor
a	Amortisationszeitraum
b	Zellchemie-abhängiger Lebensdauerfaktor
c, m	Regressionsparameter
C_{K-TTW}	Tank-to-Wheel CO ₂ -Emissionen des Kraftstoffs
D	depreciation (dt.: Wertverlust)
D_i	Deckungsbeitrag Anbieter
DoD	Depth-of-discharge (dt.: Entladetiefe)
E	Energie
E_F	Energiebedarf der Fahrzeugvariante
F(..)	Verteilungsfunktion
k	Formparameter
K	Kosten
$K_{M\&R}$	Instandhaltungskosten
K_N	nutzungsabhängige Kosten
K_{TCO}	Total-cost-of-ownership
L	Lernrate
LFP	Lithium-Eisenphosphat
Li	Lithium
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
M_i	kumulierte Produktionsmenge des Betrachtungsjahres
max {..}	Maximum
min {..}	Minimum
MDBF	Mean-distance-between-failure (dt.: durchschnittliche Lebensdauer)
N	Anzahl Entladezyklen
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
Nd	Neodym
NeFeB	Neodym-Eisen-Bor
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt

p, p_L	Produktionsmenge
p_{ICE}	Anteil der verbrennungsmotorischen Fahrweise
p_{Nd}	Rohstoffpreis Neodym
p_t	Anteil der Tagesfahrten zum Zeitpunkt t
P	Wahrscheinlichkeit
$P_{i,j}$	Verkaufspreis Fahrzeugkomponente j im Betrachtungsjahr i
P_K	Endverbraucherpreis Kraftstoff
RV	residual value (dt.: Wiederverkaufswert)
S_{C-S}	Strafe bei Überschreitung Zielwert CO_2
S_{C-Z}	Zielwert CO_2
S_J	jährliche Kfz-Steuer
S_S	einmalige Subventionen beim Fahrzeugkauf
$SmCo$	Samarium-Kobalt
SOC	State-of-charge (dt.: Beladungszustand)
S_U	Umsatzsteuer
t	Uhrzeit
T	Lebensdauer
$V_{i,j}$	Absatz Neufahrzeuge vom Antriebsstrang j im Jahr i
VMT_x	Vehicle miles traveled (nach x -Jahren) (dt.: Fahrleistung)
$Z_{abs.}$	absolute maximale Zuwachsrate
$Z_{rel.}$	relative maximale Zuwachsrate

1 Einleitung

1.1 Motivation ---

Die deutsche Bundesregierung hat das Ziel ausgegeben, bis zum Jahr 2020 einen Bestand von einer Million Elektrofahrzeugen in der deutschen Fahrzeugflotte zu erreichen. Bis zum Jahr 2030 soll der Bestand bis auf sechs Millionen Elektrofahrzeuge ansteigen. Darüber hinaus soll der Automobilstandort Deutschland nicht nur Leitmarkt, sondern auch Leitanbieter von elektrifizierten Fahrzeugkonzepten werden [1] [2]. Vor diesem Hintergrund bieten sich für die Automobilindustrie durch die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs Möglichkeiten, aber auch große Herausforderungen.

So hat mittlerweile jeder Fahrzeughersteller elektrifizierte Fahrzeuge im Angebot. Bei den Serien- und Prototypenfahrzeugen lässt sich dabei eine Vielzahl von Konzepten, von Mildhybriden bis hin zu Brennstoffzellenfahrzeugen, aber auch von einsitzigen Stadtfahrzeugen bis hin zu familientauglichen Universalfahrzeugen, beobachten, wobei eindeutige Trends bisher nicht erkennbar sind. Hierin liegt auch die größte Herausforderung im Wandel der Automobilproduktion von konventionellen, verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen hin zu elektrifizierten Antriebssträngen begründet. Derzeit existieren große Unsicherheiten im Hinblick auf die Auslegung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte. Nicht nur unklare Nutzeranforderungen, sondern auch intransparente technische Potentiale stellen große Hürden für die gesamte Automobilindustrie dar. Stichworte wie „Reichweitenangst“ oder „Verzichtsfahrzeug“ werden in der öffentlichen Diskussion dabei oftmals angeführt.

Darüber hinaus wird in jüngster Vergangenheit deutlich, dass die in der letzten Dekade zu beobachtende euphorische Diskussion um das Thema Elektrofahrzeug einer faktenbasierten Betrachtung weicht. So führt die einsetzende öffentliche Diskussion zu der Forderung, quantitative Antworten auf die sich stellenden Herausforderungen zu geben und letztlich alltagstaugliche, den Nutzeranforderungen entsprechende Fahrzeuge zur Serienreife zu bringen.

Die vorliegende Arbeit adressiert diese aktuell existierende Unsicherheit und soll durch die ingenieurwissenschaftliche und integrierte Bewertung auf Basis der Kombination von Technologieanalyse und Nutzerverhalten Potentiale für den zukünftigen Markterfolg elektrifizierter Fahrzeugkonzepte ableiten, um industrielle und politische Entscheider mit einer fundierten Entscheidungsgrundlage auszustatten.

1.2 Stand der Forschung

1.2.1 Einfluss der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur

Das Mobilitätsverhalten der Deutschen ist in der umfassenden Primärerhebung Mobilität in Deutschland (MiD) 2002 aufgezeichnet worden. Diese Erhebung wurde im Jahr 2008 aktualisiert. In dieser Basiserhebung wurden die Angaben von 25.922 Haushalten und 60.713 Personen zu 193.290 Wegen und 34.601 Fahrzeugen erfasst [3]. Die Studie beinhaltet dabei das gesamte Mobilitätsverhalten, also auch intermodale Wegeketten. Die Umfrage stellt aufgrund ihrer Konzeption bzw. ihrer Struktur eine für Deutschland repräsentative Stichprobe dar. Im Rahmen der Studie sowie in darauf aufbauenden Auswertungen wurden bereits Datenanalysen durchgeführt, wenngleich sich keine Analyse mit dem Einfluss von Ladeinfrastruktur auf die technische Eignung von Elektrofahrzeugen für die Nutzerprofile befasst [4] – [7].

Alle Analysen legen hierbei die Studie zu Grunde, konzentrieren sich jedoch ausschließlich auf aggregierte Auswertungen hinsichtlich der Fahrtstrecken deutscher Fahrzeugnutzer und lassen den möglichen Einfluss von Nachlademöglichkeiten auf die Durchführbarkeit der Fahrten unberücksichtigt. Im Rahmen dieser Arbeit sollen diese Defizite beseitigt und so Rückschlüsse des Einflusses der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur auf die technische Auslegung und im Speziellen auf die elektrische Reichweite von elektrifizierten Fahrzeugkonzepten ermöglicht werden.

1.2.2 Kosten von Antriebsstrangkomponenten

Im Gegensatz zu den aggregierten Untersuchungen des Mobilitätsverhaltens existieren zahlreiche detaillierte Analysen der Technikpotentiale von elektrifizierten Antriebsstrangkomponenten, wobei die Modelle in der Regel Kostenanalysen auf Basis der kumulierten produzierten Einheiten gänzlich außen vor lassen und sich auf zeitliche Kostendegressionen ungeachtet der tatsächlichen Marktentwicklung bzw. -nachfrage beschränken.

1.2.2.1 Kosten von Traktionsbatterien

Erste Ergebnisse zu Kosten von Lithium-Ionen-Batterien¹ wurden bereits 2000 von Gaines et al. veröffentlicht [8]. Die hier verwendeten Modelle und Annahmen wurden darauf aufbauend von Nelson et al. weiterentwickelt und 2010 bzw. 2011 veröffentlicht [9] [10]. Das betrachtete Modell

¹ Der Begriff „Batterie“ beschränkt sich nicht ausschließlich auf Primärzellen, d. h. nicht-wiederaufladbare galvanische Elemente, sondern umfasst auch Sekundärzellen bzw. Akkumulatoren, welche die Eigenschaft der Wiederaufladbarkeit besitzen [290].

nähert sich den Batteriekosten von einer tiefgehenden chemisch-technischen Betrachtung und ist in der Lage, sowohl Energie- als auch Leistungsdichten zu berücksichtigen. Allerdings antizipiert auch dieses Modell eine theoretisch mögliche Batteriefabrik zur Massenfertigung von Traktionsbatterien im Jahr 2020 und lässt Kostendegressionseffekte unberücksichtigt [11].

Weitere wissenschaftliche Arbeiten betrachten Batteriekosten im Zusammenhang der Gesamtfahrzeugintegration, lassen allerdings auch hier den Aspekt der Lernkurven und insbesondere der Differenzierung unterschiedlicher Zellchemien unberücksichtigt [12] [13] [14] [15] (vgl. Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Traktionsbatterien.

Veröffentlichung	Produktionskosten	Batteriegröße	Bemerkung	Quelle
Gaines (2000)	706 \$/kWh	35 kWh	"Baseline" Szenario für Hochenergie-Zellen	[8]
Gaines (2000)	250 \$/kWh	35 kWh	"Optimistic" Szenario für Hochenergie-Zellen	[8]
Gaines (2000)	150 \$/kWh	35 kWh	"Goal" Szenario für Hochenergie-Zellen	[8]
Axsen (2008)	200 \$/kWh	17 kWh	100.000 Einheiten p.a. (Hochenergiebatterien)	[15]
Axsen (2008)	300 \$/kWh	6 kWh	100.000 Einheiten p. a. (Hochleistungsbatterien)	[15]
BCG (2010)	990 \$/kWh	15 kWh	NCA Batterie im Jahr 2009	[16]
BCG (2010)	360 \$/kWh	15 kWh	NCA Batterie im Jahr 2020	[16]
Bain (2010)	650 \$/kWh	18 kWh	BEV-Batterie im Jahr 2010	[17]
Roland Berger (2010)	618 \$/kWh	k. A.	Hochenergiebatterie im Jahr 2010	[18]
Roland Berger (2010)	390 \$/kWh	k. A.	Hochenergiebatterie im Jahr 2015	[18]
Roland Berger (2010)	260 \$/kWh	k. A.	Hochenergiebatterie im Jahr 2020	[18]
Santini (2010)	260 \$/kWh	10 kWh	Hochleistungsbatterie (NCA) im Jahr 2020	[10]
Santini (2010)	186 \$/kWh	33 kWh	Hochleistungsbatterie (NMC) im Jahr 2020	[10]
Nelson (2011)	386 \$/kWh	9 kWh	"Baseline" Szenario für Hochenergie-Zellen	[9]
Nelson (2011)	435 \$/kWh	9 kWh	"Double Power" Szenario für Hochenergie-Zellen	[9]
Nelson (2011)	275 \$/kWh	17 kWh	"Double Capacity" Szenario für Hochenergie-Zellen	[9]
Nelson (2011)	311 \$/kWh	17 kWh	"Double Modules" Szenario für Hochenergie-Zellen	[9]
Kruger (2011)	650 \$/kWh	k. A.	"Best cost" Szenario im Jahr 2010	[19]
Kruger (2011)	265 \$/kWh	k. A.	"Best cost" Szenario (Zielwert)	[19]

Quelle: Wie angegeben; Preise bezogen auf das jeweilige Veröffentlichungsdatum.
Umrechnungskurs 1,30 \$/€.

Darüber hinaus existieren Ergebnisse von Firmen und Unternehmensberatungen, welche allerdings im Hinblick auf die wissenschaftliche Betrachtung der Problemstellung und die damit verbundene methodische Herangehensweise keinen Einblick geben. Dennoch existiert hier eine Vielzahl von Ergebnissen, die alle einen Preis pro Energieinhalt (z. B. €/kWh) zeigen [16] [19] [20]. Auch hier bleiben jedoch Lernkurvenaspekte sowie Kostendegressionseffekte unberücksichtigt. In einigen Fällen basieren die Ergebnisse darüber hinaus auf Metaanalysen des Marktes [17] [18].

Das in [21] veröffentlichte Batteriekostenmodell beschränkt sich in der Betrachtung auf die Produktionskosten einer einzelnen Zelle. Außerdem fokussiert es sich auf die zugrunde liegenden Rohstoffkosten. Kosten für die Modul- und Packherstellung sowie Kosten der Fertigungsschritte selbst werden auf Basis von pauschalen, prozentualen Aufschlägen abgeschätzt. Inhaltlich werden für je zwei Konfigurationen von Hochenergie- und Hochleistungszellen Kosten berechnet. Hierbei werden jedoch nicht die Größe der Zelle, ihr Energiegehalt oder das geforderte Spannungs- und Energielevel des Gesamtfahrzeugs berücksichtigt.

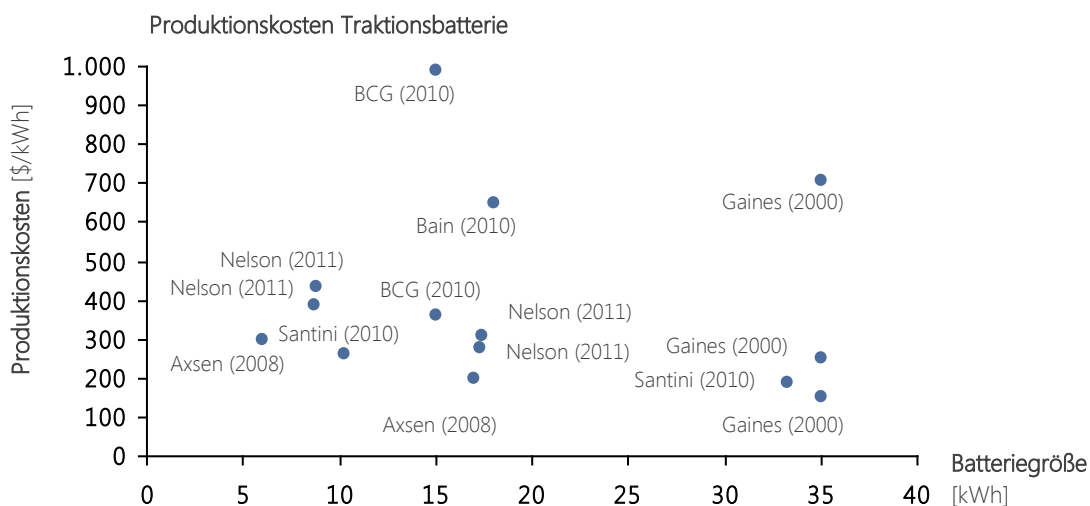


Abbildung 1.1: Grafische Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Traktionsbatterien.

Quelle: Eigene Darstellung, vgl. Tabelle 1.1; Umrechnungskurs 1,30 \$/€.

In der Höhe der berechneten Kosten lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den Veröffentlichungen identifizieren (vgl. Tabelle 1.1 sowie Abbildung 1.1). So gibt Gaines in Ihrer frühen Veröffentlichung aus dem Jahr 2000 einen theoretischen Zielwert von 150 \$/kWh für eine 35 kWh Batterie an [8]. Die Unternehmensberatung BCG gibt dagegen einen für das Jahr 2020 prognostizierten Wert für eine 15 kWh Batterie von 360 \$/kWh an [16]. Eine Abhängigkeit der veröffentlichten Batteriekosten vom jeweiligen Veröffentlichungsdatum der untersuchten Publikationen lässt sich allerdings nicht erkennen. Der Vergleich der Veröffentlichungen zeigt zudem, dass die Kosten für leistungsorientierte Batterien in der Regel höher eingeschätzt werden, als Kosten für energieorientierte Batterien. Darüber hinaus antizipieren alle Publikationen fallende Kosten im Zeitverlauf,

wenngleich, wie zuvor erläutert, die quantitative Herleitung dieser Kostendegressionen mit Hilfe von Lernkurveneffekten ausbleibt.

Alle betrachteten Veröffentlichungen zeigen, dass zwar eine Vielzahl von Meinungen zu Kosten von Traktionsbatterien existiert, jedoch keine der Veröffentlichungen die Rohstoffabhängigkeit der Kostenentwicklung sowie die Kostendegressionspotentiale in Abhängigkeit kumulierter Ausbringungsmengen berücksichtigt. Auf Basis bisheriger Veröffentlichungen wird das Themenfeld der Kostenentwicklung von Traktionsbatterien im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen und mit Hilfe eines neu zu entwickelnden Kostenmodells analysiert.

1.2.2.2 Kosten von Elektromaschinen

Die Kosten von Elektromaschinen hängen von einer Vielzahl von Parametern, wie beispielsweise der Bauart, der maximalen Leistung, des maximalen Drehmoments oder sonstiger Anforderungen hinsichtlich des Einsatzzwecks ab. Die in der Literatur gängige Kostenbetrachtung bezieht sich auf spezifische Kosten pro Leistung, wobei in der Regel die maximale Peak-Leistung als Referenzwert verwendet wird. Daher wird auch im Rahmen dieser Arbeit die Leistung der Elektromaschine als Bezugspunkt gewählt.

Die Gegenüberstellung von bisher veröffentlichten Kostenberechnungen zeigt, dass die Werte der ermittelten Produktionskosten signifikant voneinander abweichen (vgl. Tabelle 1.2). So lassen sich neben linearen Kostenangaben pro Leistung in der Form $a \cdot P_{\text{Peak}} + b$ auch logarithmische Formeln der Form $a \cdot \ln(P_{\text{Peak}}) + b$ identifizieren. In keiner der aufgeführten Veröffentlichungen werden die zugrunde liegenden Kostenmodelle näher beschrieben. Oftmals fehlt darüber hinaus eine Angabe, um welchen Maschinentyp es sich handelt.

Im Leistungsbereich von bis zu 150 kW Peak-Leistung resultieren daraus signifikante Abweichungen. Lipman [22] berechnet für eine 100 kW Elektromaschine Produktionskosten von 1.146 \$, während das US Department of Energy (DOE) [23] im Forschungsplan für Plug-in Fahrzeuge für eine Maschine gleicher Leistung Kosten von 2.500 \$ für das Jahr 2010 angibt. Zwischen diesen beiden Extremwerten lässt sich nahezu jedes Kostenlevel in bisherigen Veröffentlichungen identifizieren (vgl. Tabelle 1.2). Hierbei zeigt sich bei einer detaillierten Analyse der Veröffentlichungen weder ein Zusammenhang hinsichtlich der Produktionskosten einer bestimmten Motorbauart, noch hinsichtlich einer Korrelation mit der Rohstoffpreisentwicklung im jeweiligen Veröffentlichungsjahr. Lediglich hinsichtlich der Publikationszeiträume lässt sich ein leichter Trend zu höheren Kostenergebnissen bei späteren Veröffentlichungszeitpunkten erkennen, wobei dieser Trend allerdings nicht signifikant ist.

Tabelle 1.2: Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Elektromaschinen.

Veröffentlichung	Produktionskosten	Bemerkung	Quelle
Cuenca (1995)	8,1 \$/kW	AC Induktionsmotor	[24]
Cuenca (1995)	10,2 \$/kW	DC Motor	[24]
Cuenca (1995)	11,8 \$/kW	bürstenlose DC Maschine	[24]
Lipman (1999)	18 \$/kW	AC Induktionsmotor (Central cost case)	[25]
Delucchi (2000)	12,51 \$/kW _{peak}	bürstenlose BPM (200.000 Einheiten p.a.)	[26]
Delucchi (2001)	10,8 \$/kW _{peak}	AC Induktionsmotor (200.000 Einheiten p.a.)	[27]
Graham (2001)	190 \$ + 13,7 \$/kW	keine Unterscheidung zwischen Bauarten	[28]
Lipman (2003)	146 \$ + 10 \$/kW	Leistungsbereich 10-100 kW	[22]
Burke (2007)	127,7 \$ ln(P _{peak}) - 111,3 \$		[29]
Kromer (2007)	15 \$/kW + 200 \$		[30]
DOE (2007)	2010: 75 \$/kW; 2015: 50 \$/kW; 2020: 25 \$/kW	Kosten für kombinierte Einheit aus Motor & Controller	[23]
Emadi (2008)	<7 \$/kW		[31]
Ahn (2009)	20 \$/kW + 425 \$		[32]
EPRI (2010)	19,3 \$/kW + 255 \$		[33]
Brooker (2010)	21,7 \$/kW + 425 \$	Kosten für kombinierte Einheit aus Motor & Controller	[34]
Barnes (2011)	2010: 11,1 \$/kW; 2015: 7 \$/kW; 2020: 4,7 \$/kW	Permanentmagnet Motoren, DOE-Ziele	[35]

Quelle: Wie angegeben; Preise bezogen auf das jeweilige Veröffentlichungsdatum.

Zusätzlich zur vorangegangenen Literaturrecherche zeigt eine Marktanalyse von derzeit verfügbaren Elektromaschinen in Deutschland ein ähnliches Bild (Abbildung 1.3). Da im freien Handel keine Elektromaschinen für automobiler Anwendungen erwerbbar sind, beschränkt sich die Analyse dabei auf stationäre Motoren. Bei allen untersuchten Kostenwerten handelt es sich um Wechselstrommotoren, was einen Vergleich mit den Literaturwerten ermöglicht.

Es zeigt sich, dass alle wissenschaftlichen bzw. prognostizierten Ergebnisse bei einem Umrechnungskurs von 1,30 \$/€ unter den gefundenen Marktwerten liegen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es sich bei den Marktwerten um Verkaufspreise, also Preise inklusive Mehrwertsteuer, Marge, Händlerprovision sowie weitere Kosten handelt, wohingegen die wissenschaftlichen Veröffentlichungen reine Produktionskosten betrachten. Rechnet man zu den veröffentlichten Kostenwerten die gesetzliche Mehrwertsteuer sowie einen Kostenaufschlag von 35% für übrige Kosten hinzu [21], zeigt sich, dass die Kostenwerte im Bereich der gefundenen Marktpreise liegen und sich dem einfachen, ungewichteten Durchschnitt annähern (Abbildung 1.3).

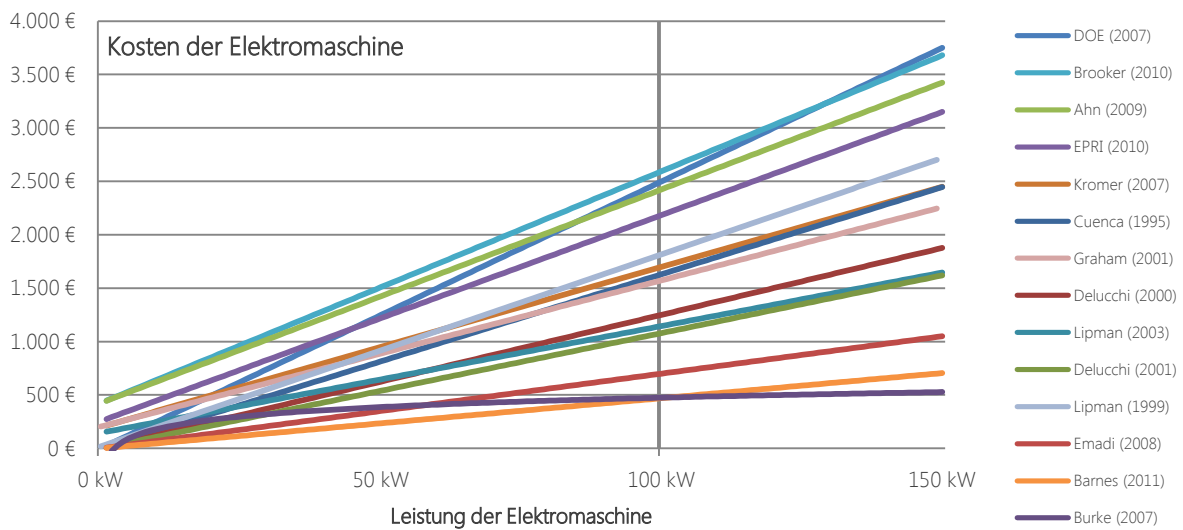


Abbildung 1.2: Grafische Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Elektromaschinen.

Quelle: Eigene Darstellung, vgl. Tabelle 1.2; Umrechnungskurs 1,30 \$/€.

Wie bereits im Fall der Kosten von Traktionsbatterien zeigt sich also auch für die Kosten von Elektromaschinen, dass zwar eine Vielzahl an publizierten Meinungen existiert, diese jedoch nicht die Ableitung von Kostendegressionseffekten sowie Rohstoffeinflüssen auf Basis unterschiedlicher Motorbauarten ermöglichen. Aus diesem Grund wird die Themenstellung im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen und mit Hilfe eines neu zu entwickelnden Kostenmodells beantwortet.

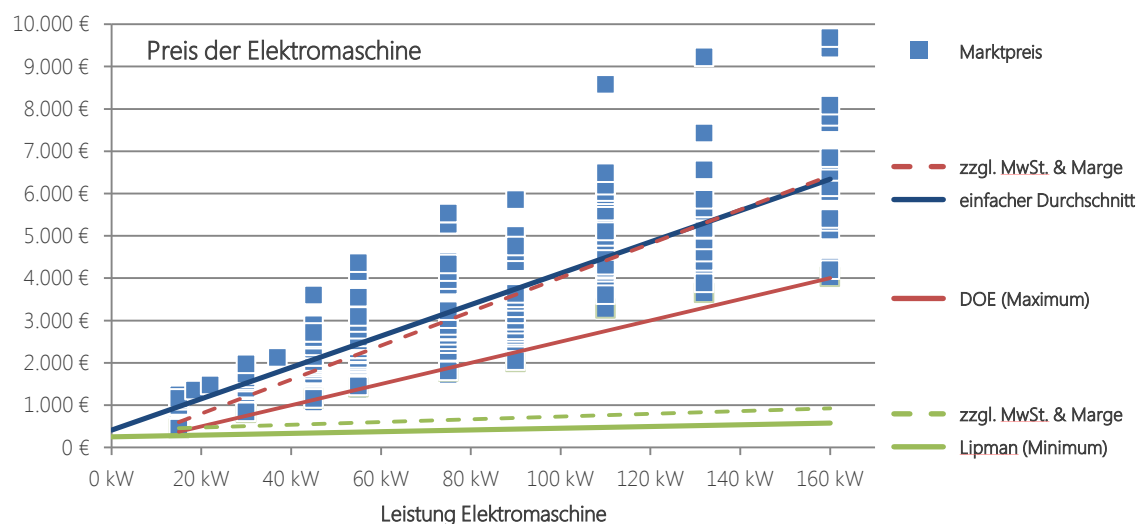


Abbildung 1.3: Grafische Gegenüberstellung von veröffentlichten Produktionskosten und frei verfügbaren Marktpreisen von Elektromaschinen.

Quelle: Eigene Darstellung, [22] [23] [36] [37] [38]; Umrechnungskurs 1,30 \$/€.

1.2.2.3 Leistungselektronik und Hochvoltkomponenten

Unter Leistungselektronik werden im Rahmen dieser Arbeit alle Komponenten zusammengefasst, die zum Ansteuern der Elektromaschine bzw. der Elektromaschinen, zum Laden der Traktionsbatterie sowie zum Bereitstellen des 12 V-Bordnetzes benötigt werden. Hierzu zählen explizit das Ladegerät, der bzw. die DC/AC-Antriebsumrichter sowie die Gleichspannungswandler zur Erhöhung bzw. Verringerung des Spannungslevels zwischen Elektromaschine und Traktionsbatterie und zwischen Traktionsbatterie und Bordnetz. Die Auslegung der Elektronik ist dabei von der Art der Elektromaschine sowie von der Leistungsanforderung abhängig. Eine detaillierte Analyse dieser Problematik ist aufgrund des beschränkten Umfangs dieser Arbeit nicht möglich. Im Hinblick auf die spätere Simulation des Neufahrzeugmarktes wird jedoch im Folgenden ein Überblick über die Kostenstruktur gegeben (vgl. Tabelle 1.3).

Tabelle 1.3: Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Leistungselektronik.

Veröffentlichung	Produktionskosten	Bemerkung	Quelle
Lipman (1999)	907 \$ + 6,11 \$/kW	Kurzfristige Produktionskosten: DC Controller @ 200.000 Einheiten p.a.	[13]
Lipman (1999)	907 \$ + 3,27 \$/kW	Kurzfristige Produktionskosten: BPM Controller @ 200.000 Einheiten p.a.	[13]
Lipman (1999)	312 \$ + 7,6 \$/kW	Langfristige Produktionskosten: DC Controller @ 200.000 Einheiten p.a.	[13]
Lipman (1999)	262 \$ + 6,94 \$/kW	Langfristige Produktionskosten: BPM Controller @ 200.000 Einheiten p.a.	[13]
Cuenca (1999)	14,6 \$/kW	DC Controller	[39]
Cuenca (1999)	18,9 \$/kW	AC Controller	[39]
Delucchi (2000)	262 \$ + 6,9 \$/kW _{peak}	DC Controller @ 200.000 Einheiten p.a. (vgl. Lipman (1999))	[26]
Delucchi (2000)	312 \$ + 7,6 \$/kW _{peak}	BPM Controller @ 200.000 Einheiten p.a. (vgl. Lipman (1999))	[26]
Graham (2001)	165 \$ + 7 \$/kW	IGBT inklusive Kühlung; für alle Arten von Motoren	[28]
Lipman (2003)	480 \$ + 2,95 \$/kW	Controller & Umrichter (10-100kW)	[22]
Emadi (2008)	< 5 \$/kW	"U.S. partnerships for a New Generation of Vehicles"	[31]
Wallentowitz (2009)	22 €/kW	Mittelwert über drei Fahrzeugklassen	[40]
Delorme (2009)	12 \$/kW	Controller (keine Spezifikation hinsichtlich der Art)	[41]
Rousseau (2009)	9 \$/kW	Controller (keine Spezifikation hinsichtlich der Art)	[42]
EPRI (2010)	225 \$ + 10 \$/kW		[33]
Barnes (2011)	2010: 7,9 \$/kW; 2015: 5; 2020: 3,3	DOE-Zielwerte	[35]

Quelle: Wie angegeben; Preise bezogen auf das jeweilige Veröffentlichungsdatum.

Wie bereits im Fall der Traktionsbatterien und Elektromaschinen, lässt sich auch für Leistungselektronik eine Vielzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen hinsichtlich der Produktionskosten

identifizieren. Hier variieren die publizierten Werte ebenfalls signifikant, wenngleich die absolute Bandbreite der Kostenwerte in geringerem Maße abweicht, als im Fall der Elektromaschinen (vgl. Abbildung 1.4). So gibt Emadi mit Zielkosten von unter 5 \$/kW die geringsten Kosten an, wohingegen Cuenca mit 18,9 \$/kW die höchsten Produktionskosten berechnet.

Bei den Analyseergebnissen der Literaturrecherche ist zu beachten, dass sich die veröffentlichten Werte auf teils sehr unterschiedliche Technologien beziehen und letztlich nur eingeschränkt miteinander vergleichbar sind. Allerdings zeigt sich auch hier, dass keine Korrelation zwischen den Rohstoffkosten zum Zeitpunkt der Veröffentlichung und den veröffentlichten Produktionskosten vorliegt. Für die spätere Simulation des Neufahrzeugmarktes reicht diese Datenbasis aus, um die Kostenentwicklung von Leistungselektronik und Hochvoltkomponenten bestimmen zu können (vgl. Kapitel 6).

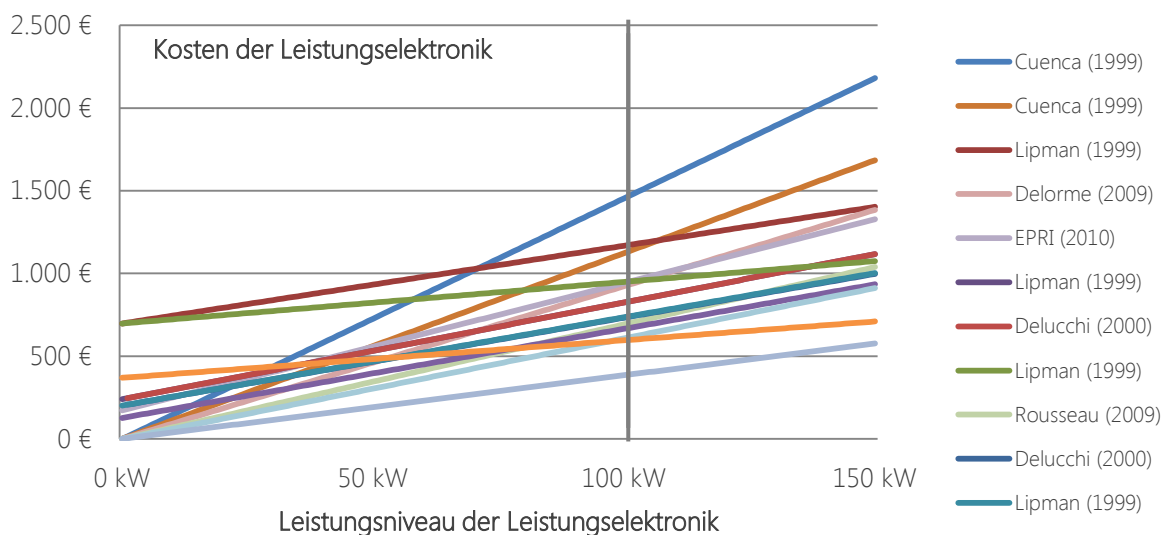


Abbildung 1.4: Grafische Gegenüberstellung veröffentlichter Produktionskosten von Leistungselektronik.

Quelle: Eigene Darstellung, vgl. Tabelle 1.3; Umrechnungskurs 1,30 \$/€.

1.2.3 Instandhaltungskosten und Wiederverkaufserlöse

Zusätzlich zu den Detailbewertungen der Antriebsstrangkomponenten sind die übergreifenden Kostenanalysen elektrifizierter Fahrzeugkonzepte zu nennen. Es existieren zahlreiche Gesamtbeurteilungen von heutigen und zukünftig zu erwartenden Kostenzusammensetzungen von Elektrofahrzeugen, wobei alle Untersuchungen die Instandhaltungskosten sowie den Wiederverkaufswert der Fahrzeuge unberücksichtigt lassen oder lediglich auf einem sehr aggregierten Level betrachten.

1.2.3.1 Instandhaltungskosten

Das Themenfeld der Instandhaltungskosten zukünftiger elektrifizierter Antriebskonzepte wurde bisher nur unzureichend betrachtet. Van Wliet erkennt in seinem Lebenszykluskostenvergleich von elektrifizierten und konventionellen Antriebssträngen zwar die Bedeutung von Instandhaltungskosten, betrachtet diese jedoch nicht im Detail:

„For a lack of experience, maintenance, repair and tires costs for series hybrids and fuel cell cars, both with central motor and wheel motors, are unclear. [...] However, our TCO comparison is quite sensitive to maintenance costs: for every MRT cost increase of 0.1 € ct/km (20 €/year), the breakeven distance of the series hybrids and fuel cell cars increases by 2,000-5,000 km/year.²“ [43]

Ebenso wie Wallentowitz in seiner Kostenanalyse der unterschiedlichen Antriebsysteme [40] lässt auch Becker Instandhaltungskosten unbetrachtet [44]. Falls Kosten für Instandhaltung in die Berechnung mit einbezogen werden, geschieht dies nur durch Abschätzungen und auf eine sehr aggregierte Art und Weise. So antizipiert Ruth, dass beispielsweise Brennstoffzellenfahrzeuge die gleichen Instandhaltungskosten wie Mildhybride aufweisen:

„Fleet FCV maintenance costs were adjusted from the fleet conventional ICE vehicle maintenance costs using the NEMS input ratios for FCV maintenance. [...] Therefore, it was assumed that the FCV would have similar repair costs to those of mild HEVs.³ [45]

Diese Annahmen beziehen weder die gänzlich unterschiedliche Antriebsstrangarchitektur von Brennstoffzellenfahrzeugen ein, noch berücksichtigen sie die unterschiedliche Kostenstruktur und Lebensdauererwartung von Brennstoffzellensystemen.

Neben diesen beiden exemplarisch genannten Veröffentlichungen existieren noch weitere Analysen, die sich mit den total-cost-of-ownership (TCO) von Elektrofahrzeugen beschäftigen, die zu erwartenden Instandhaltungskosten allerdings ebenfalls unbetrachtet lassen [39] – [45]. Aus diesem Grund soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Instandhaltungskostenmodell entwickelt werden, welches es erlaubt, die Charakteristika aller heute bekannten elektrifizierten Antriebsstrangvarianten (vgl. Kapitel 2.3) sowie die damit verbundenen Kosten- und Lebensdauerstrukturen der verwendeten Komponenten einzubeziehen.

² Dt.: „Aufgrund fehlender Erfahrungen sind die Kosten für Instandhaltung, Reparaturen und Reifen unklar. [...] Allerdings ist unser TCO-Vergleich sehr abhängig von den Instandhaltungskosten: Bei Erhöhung der Kosten für Instandhaltung, Reparaturen und Reifen um 0,1 € ct/km (20 €/Jahr) steigt die Break-even-Fahrleistung zwischen seriellen Hybriden und Brennstoffzellenfahrzeugen um 2.000 bis 5.000 km/Jahr.“

³ Dt.: „Die Instandhaltungskosten der Brennstoffzellenfahrzeuge wurden auf Basis der Instandhaltungskosten von konventionellen ICE-Instandhaltungskosten unter Berücksichtigung der NEMS-Inputverhältnisse für die Instandhaltung von Brennstoffzellenfahrzeugen angepasst. [...] Folglich wurde angenommen, dass Brennstoffzellenfahrzeuge ähnliche Instandhaltungskosten aufweisen wie Mildhybride.“

1.2.3.2 Wiederverkaufserlöse

Wiederverkaufserlöse elektrifizierter Fahrzeugkonzepte wurden bisher weltweit nur unzureichend betrachtet. Zwar existieren erste Schätzungen zur Wertentwicklung von Elektrofahrzeugen, diesen Expertenmeinungen fehlt jedoch ein erkennbarer systematischer Ansatz [45] [46] [47] [48] [49] [50]. Obwohl die Quantifizierung der Wiederverkaufserlöse von großer Bedeutung für die Automobilindustrie ist, liegen bisher keine wissenschaftlichen Analysen vor [51]. Die bisher veröffentlichten Untersuchungen der Restwertentwicklung stammen von Industrieunternehmen, wobei hier exemplarisch eine Eurotax-Studie sowie ein Autobild-Testbericht zu nennen sind. So zeigt Eurotax zwar auf, dass ohne umfangreiche mehrjährige Garantien die Gefahr besteht, *„dass die neuen alternativen Antriebstechnologien am Gebrauchtwagenmarkt nur skeptisch aufgenommen werden und sich damit sehr niedrige Restwerte ausbilden könnten“*, lässt jedoch eine Quantifizierung der wesentlichen Einflussparameter wie Fahrleistung und Antriebsart unberücksichtigt [46]. Ebenso publiziert Autobild exemplarisch für den Citroen C-Zero einen absoluten Restwert, ohne die Einflussfaktoren zu identifizieren [52]. Aufgrund der fehlenden systematischen Analyse der Restwertentwicklung wird dieses Handlungsfeld im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgegriffen.

1.2.4 Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte

Die Abbildung der Auswirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf die Marktzusammensetzung existiert in den unterschiedlichsten Szenarien. So wurden von Unternehmensberatungen, Automobilherstellern und -zulieferern, aber auch von Forschungseinrichtungen zahlreiche, in der Regel intransparente Ergebnisse veröffentlicht [53] – [54]. Hervorzuheben sind dabei drei Untersuchungen, welche die Wechselwirkung von exogenen Randbedingungen und der Marktzusammensetzung der deutschen Fahrzeugflotte analysieren.

Die ersten beiden zu nennenden Studien wurden von öffentlichen Forschungseinrichtungen durchgeführt und analysieren die zukünftige Zusammensetzung des deutschen Neufahrzeugmarktes. Es handelt sich um die öffentlich geförderten Projekte „Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen (OPTUM)“ [55] und „Marktmodell Elektromobilität (MMEM)“ [56]. Beide Modelle leiten die zukünftige Marktzusammensetzung aus der Gegenüberstellung des Marktpotentials und der Nutzerakzeptanz von Elektrofahrzeugen ab und basieren methodisch auf statistischen Analysen, wie dem Nested-Logit-Verfahren oder den Conjoint-Analysen, lassen jedoch eine Gesamtkostenbetrachtung als Entscheidungsgrundlage unberücksichtigt. Darüber hinaus liegt der Fokus nicht auf der Zusammensetzung des Fahrzeugmarktes selbst, sondern vielmehr auf dem Zusammenspiel von Fahrzeugbestand und Energiesektor im Hinblick auf die gesamten zu erwartenden CO₂-Emissionen. Detaillierte Kostenbetrachtungen der Antriebsstrangkomponenten bleiben ebenso unberücksichtigt wie eine Differenzierung der Nutzereigenschaften. So wird beispielsweise in MMEM die Kostenentwicklung von Traktionsbatterien als einziger betrachteter An-

triebsstrangkomponekte und mit einer festen zeitlichen Vorgabe antizipiert. Darüber hinaus beruht die Nutzerbasis noch auf „Schätzungen“. Allerdings werden bereits hier erste Variationen der politischen Randbedingungen ermöglicht, wenngleich sich die Sensitivitätsanalysen auf volkswirtschaftliche Aspekte konzentrieren und die Identifikation kritischer Einflussfaktoren ausbleibt. Die bisher durchgeführten Analysen beschränken sich folglich auf einzelne ausgewählte Themengebiete und Fragestellungen, wobei die getroffenen Annahmen teils auf Schätzungen beruhen.

Die dritte zu nennende Veröffentlichung ist die Entwicklung der Modells VECTOR21 in seiner ursprünglichen Form. Das „Vehicle Technologies Scenario Model VECTOR21“ ist in der Lage, die Konkurrenzsituation zwischen konventionellen Antriebssträngen und elektrifizierten Fahrzeugkonzepten auf dem deutschen PKW-Neufahrzeugmarkt abzubilden. Entwickelt und erstmalig mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2030 angewandt wurde es am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt von Mock in [21]⁴.

Obwohl das Simulationsmodell VECTOR21 in seiner ursprünglichen Form bereits in der Lage ist, Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte abzuleiten, lässt es jedoch essentielle Aspekte und Einflussfaktoren wie Instandhaltungskosten und Wiederverkaufserlöse, gegenseitige Kostenabhängigkeiten elektrifizierter Antriebsstrangkomponekten, Kapazitätsbeschränkungen der Automobilindustrie oder auch verbreitete Antriebsstrangarchitekturen wie parallele Plug-in Hybride unberücksichtigt. Ebenso werden von Mock nur zwei Sensitivitäten im Hinblick auf die Veränderung der äußeren Einflussfaktoren betrachtet, wobei hier eine systematische Variation der Randbedingungen mit dem Ziel der Identifikation von kritischen Einflussfaktoren für das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte ausbleibt.

Um die Analysetiefe des ursprünglichen Simulationsmodells zu erweitern, sollen die von Mock entwickelten Grundlagen im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen werden, wobei im Hinblick auf die Ableitung des Marktpotentials elektrifizierter Fahrzeugkonzepte die von ihm identifizierten Forschungsbedarfe teilweise umgesetzt werden. Da das Modell signifikante Einflussparameter auf die Zusammensetzung des Neufahrzeugmarktes unberücksichtigt lässt, soll das ursprüngliche Simulationsmodell im Rahmen dieser Arbeit inhaltlich und funktional erweitert werden. Mit Hilfe der systematischen Definition von Sensitivitätsszenarien soll darüber hinaus die Identifikation von kritischen Einflussfaktoren ermöglicht werden.

⁴ Die funktionale Beschreibung des Modells ist in Kapitel 2.2.1 zu finden.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Identifikation von Marktpotentialen elektrifizierter Fahrzeugkonzepte auf dem deutschen Neufahrzeugmarkt bis zum Jahr 2040 sowie die Ableitung von damit verbundenen kritischen Einflussfaktoren. Hierzu sollen auf Basis eines Ausgangsszenarios Sensitivitätsrechnungen zu technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen durchgeführt werden.

Um die Szenariorechnungen auf einer fundierten Datenbasis aufzubauen, sollen im Rahmen detaillierter Kostenbetrachtungen von Traktionsbatterien und Elektromaschinen Potentiale für eine mögliche zukünftige Kostenentwicklung abgeleitet werden. Hierbei soll neben den resultierenden Kosten auch der Einfluss kritischer Rohstoffe auf die zukünftige Kostenentwicklung untersucht werden.

Darüber hinaus soll eine Datenbasis hinsichtlich Instandhaltungskosten und Wiederverkaufswerten elektrifizierter Fahrzeugkonzepte geschaffen werden. Hierbei soll insbesondere die Ausprägung bzw. die Topologie des elektrischen Antriebsstrangs in die Analyse einbezogen werden, um so detaillierte Aussagen zur Konkurrenzsituation auf dem Neufahrzeugmarkt mit Hilfe der abschließenden Szenariorechnungen treffen zu können.

Neben diesen Kostenbetrachtungen im Sinne eines Lebenszykluskostenansatzes soll darüber hinaus der Einfluss von Ladeinfrastruktur auf die technische Eignung von elektrifizierten Fahrzeugen für deutsche Nutzer- bzw. Fahrprofile ermittelt werden. Hierbei soll neben der methodischen Analyse deutscher Fahrprofile die Auswirkung des Aufbaus von Ladeinfrastruktur auf die notwendige elektrische Reichweite von Fahrzeugen analysiert werden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Identifikation von Marktpotentialen elektrifizierter Fahrzeugkonzepte im Rahmen der Szenario- und Sensitivitätsrechnungen nicht als Prognose, sondern vielmehr als Analysewerkzeug zur Ableitung von Einflussfaktoren und Wirkzusammenhängen zu verstehen ist. Als Analyserahmen dient bei allen Untersuchungen der deutsche PKW-Markt mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2040.

Die Ergebnisse der Arbeit sind für alle Stakeholder der Automobilindustrie, also sowohl für Automobilhersteller und -zulieferer als auch für politische bzw. staatliche Einrichtungen sowie für Energieversorgungsunternehmen und Mineralölkonzerne von Interesse.

1.4 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Schritte (vgl. Abbildung 1.5). Zunächst werden nach einer Einleitung die methodischen und inhaltlichen Grundlagen gelegt. Im Anschluss daran folgen mit der Analyse des Einflusses der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur auf die technische Eignung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte, der Ermittlung von Produktionskosten und -potentialen elektrifizierter Antriebsstrangkomponenten sowie der Ableitung von Instandhaltungskosten und Wiederverkaufserlösen inhaltliche Vorarbeiten für die anschließende, übergreifende Quantifizierung der Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte. Abschließend werden im siebten und letzten Schritt die Ergebnisse interpretiert und gegenübergestellt sowie ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

In **Kapitel 2** werden die zum Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen dargestellt. Nach einer Einführung in die Methode der Technologiebewertung wird das für die abschließenden Szenariorechnungen verwendete Simulationsmodell VECTOR21 inklusive der im Rahmen dieser Arbeit implementierten Neuerungen erläutert. Darüber hinaus werden sowohl die in dieser Arbeit verwendeten elektrifizierten Antriebsstrangtopologien als auch die dazugehörigen Schlüsselkomponenten vorgestellt.

In **Kapitel 3** wird die elektrische Reichweite elektrifizierter Fahrzeugkonzepte heutigen Nutzungsprofilen mit Hilfe eines neu entwickelten Berechnungsmodells gegenübergestellt. Die Untersuchung der elektrischen Reichweite bezieht dabei im Sinne der integrierten Bewertung die Ladeinfrastruktur mit ein und leitet auf Basis des entwickelten Berechnungsmodells funktionale Abhängigkeiten zwischen der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur und der technischen Eignung deutscher Fahrprofile für Elektrofahrzeuge ab.

In **Kapitel 4** wird die Bewertung der Produktionskosten von Traktionsbatterien und Elektromaschinen durchgeführt. Im Rahmen der Analyse von Traktionsbatterien wird ein neues Berechnungsmodell für die Berechnung der Produktionskosten von Lithium-Ionen-Batterien erarbeitet, welches neben der Analyse der eigentlichen Produktionskosten auch in der Lage ist, Entwicklungspotentiale und Rohstoffabhängigkeiten aufzuzeigen. Die Bewertung von Elektromaschinen basiert analog dazu ebenfalls auf einem neu entwickelten Berechnungsmodell, wobei auch hier Rohstoffabhängigkeiten aufgezeigt werden.

In **Kapitel 5** wird die zuvor durchgeführte Analyse der Produktionskosten im Sinne einer ganzheitlichen total-cost-of-ownership-Betrachtung ergänzt. Hierzu werden neben den Instandhaltungskosten elektrifizierter Fahrzeugkonzepte auch deren Wiederverkaufswerte analysiert. Um die heutigen Wissenslücken im Hinblick auf Instandhaltungskosten und Wiederverkaufswerte zu schließen, werden zwei neue Berechnungsmodelle entwickelt, welche es ermöglichen, Aussagen zur Kostenbewertung elektrifizierter Antriebsstränge zu treffen.

Kapitel 6 dient - unter Einbeziehung der in den vorangegangenen Kapiteln erzielten Berechnungsergebnisse - der Quantifizierung von Marktpotentialen elektrifizierter Fahrzeugkonzepte. Ausgehend von der Berechnung und Interpretation eines Ausgangs- bzw. Referenzszenarios werden mit Hilfe von 80 Sensitivitätsszenarien Einflüsse von technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen auf das Marktpotential abgeleitet. Hierbei werden die Auswirkungen sowohl im Hinblick auf die Veränderung der Marktzusammensetzung als auch auf die Kostenstruktur aus Nutzersicht sowie den Zielerreichungsgrad der nationalen Bestandsziele an Elektrofahrzeugen analysiert. Übergreifend erfolgt dabei die Identifikation von kritischen Einflussfaktoren.

Im abschließenden **Kapitel 7** werden die erzielten Ergebnisse gegenübergestellt und bewertet. Darüber hinaus wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.



Abbildung 1.5: Struktur der Arbeit.

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen, welche zum Verständnis dieser Arbeit notwendig sind, dargestellt. Nach einer Einführung in die Technologiebewertung (Kapitel 2.1) werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Neuerungen am Simulationsmodell VECTOR21 methodisch beschrieben (Kapitel 2.2). Darüber hinaus erfolgt im Hinblick auf die Analyse elektrifizierter Fahrzeugkonzepte eine Betrachtung und Definition der elektrifizierten Antriebsstrangarchitekturen (Kapitel 2.3) sowie der dazugehörigen Schlüsselkomponenten Traktionsbatterie, Elektromaschine sowie Brennstoffzelle (Kapitel 2.4).

2.1 Technologiebewertung

VDI-Richtlinie 3780 „Technikbewertung - Begriffe und Grundlagen“ unterscheidet zwischen der problem- sowie der technikinduzierten Technikbewertung [57]. Die probleminduzierte Bewertung sucht dabei technische Lösungen für vorgegebene gesellschaftliche Aufgabenstellungen, wohingegen die technikinduzierte Bewertung bereits existierende Technologien bewertet. Weiterhin unterscheidet die Definition zwischen der innovativen und der reaktiven Technikbewertung. Hierbei bezieht sich die Einordnung der gewählten Methode auf den Reifegrad der zu untersuchenden Technologie. Während die innovative Bewertung zu einem frühen Zeitpunkt des Produktlebenszyklus einsetzt, startet die reaktive Bewertung zu einem späteren Zeitpunkt im Lebenszyklus, zu dem die Entwicklung bereits deutlich vorangeschritten ist. Im Sinne dieser Definition lässt sich die in dieser Arbeit angewandte Methode der technikinduzierten Bewertung zuordnen, welche sowohl innovative als auch reaktive Charakteristika aufweist.

Alle Bewertungsmethoden nutzen Kriterien, um die Technologien zu evaluieren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen Kosten und deren Entwicklung als maßgebendes Kriterium verwendet werden. Die einheitliche Nutzung von Kosten ermöglicht den direkten Vergleich und letztlich die Verwendung der Ergebnisse im Simulationsmodell VECTOR21. Trotz des betriebswirtschaftlichen Charakters von Kosten, ist zur fundierten Technologiebewertung ein Detailverständnis der technischen Möglichkeiten und Entwicklungspotentiale essentiell. Hierzu wird in Kapitel 4 nach einer einleitenden Identifikation der relevanten Antriebsstrangvarianten auf die Schlüsselkomponenten und deren technische Bewertung eingegangen.

2.2 Simulationsmodell VECTOR21

Im folgenden Kapitel wird zunächst die Funktionalität bzw. die Entscheidungslogik des für die abschließenden Szenariorechnungen verwendeten Simulationsmodells VECTOR21 dargestellt (Kapitel 2.2.1). Aufbauend hierauf werden die zur Integration der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse notwendigen Neuerungen am Modell beschrieben (Kapitel 2.2.2).

2.2.1 Ursprüngliches Modell

Der Entscheidungsalgorithmus von VECTOR21 stellt 900 Kundengruppen unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten auf Basis einer Kostenberechnung gegenüber. In seiner ursprünglichen Form wurden hierzu die Kosten fest definierten Fahrzeuge mit Hilfe eines relevant-cost-of-ownership (RCO)-Ansatzes berechnet [21]. Hierzu wurden die Anschaffungskosten der Fahrzeuge mit Kraftfahrzeugsteuern und Kraftstoff- bzw. Energiekosten für jeden Kundentyp bezogen auf die durchschnittliche Haltedauer deutscher Neufahrzeuge von vier Jahren summiert. Eine wesentliche Besonderheit des Modells stellt dabei die Möglichkeit dar, Kosten neuartiger Komponenten wie Traktionsbatterien oder Brennstoffzellen auf Basis der im Modell berechneten kumulierten Stückzahlen mit Hilfe von Lernkurven zu berechnen. Die Marktentwicklung beeinflusst somit durch die Anzahl der verkauften Fahrzeuge und den damit verbundenen stückzahlabhängigen Kosten den weiteren Verlauf der Rechnung.

Die 900 berechneten Kundengruppen werden hinsichtlich ihrer präferierten Fahrzeuggröße (klein, mittel, groß), ihrer jährlichen Fahrleistung (1.000 bis 60.000 km) sowie ihrer Zahlungsbereitschaft differenziert, wobei zwischen fünf Kundentypen auf Basis eines Marketingansatzes unterschieden wird [58]. Durch Kombination der drei Fahrzeuggrößen, der 60 Fahrleistungsklassen und der fünf Kundentypen werden so im Modell 900 Kundengruppen erzeugt.

Der Entscheidungsalgorithmus basiert auf einem Kostenansatz. Durch Vollenumeration werden für jedes zu berechnende Fahrzeug die RCO für jeden der 900 Kunden berechnet. Um umweltfreundliches Verhalten der Nutzer im Modell abbilden zu können, werden anschließend in Abhängigkeit der Zahlungsbereitschaft der Kundentypen Lösungsräume gebildet, aus denen das Fahrzeug mit den geringsten CO₂-Emissionen für den jeweiligen Kundentyp ausgewählt wird. Diese Berechnung erfolgt zeitdiskret in Jahresschritten.

Als Ergebnis des Modells liegen neben der jährlichen Verteilung der Antriebsstrangvarianten auf dem deutschen PKW-Neufahrzeugmarkt auch der damit verbundene Flottenbestand sowie die auf well-to-wheel (WTW)-Analysen beruhenden CO₂-Emissionen vor. Darüber hinaus können die Gesamtkosten der Nutzer sowie die lernkurvenbasierte Kostenentwicklung einzelner Antriebsstrangkomponenten betrachtet werden. Zur Berechnung des gesamten deutschen Fahrzeugbe-

stands sind im Szenariomodell Überlebenswahrscheinlichkeiten neu verkaufter Fahrzeuge auf Basis historischer Daten hinterlegt.

2.2.2 Neuerungen am Simulationsmodell

Da das ursprüngliche Simulationsmodell VECTOR21 (vgl. vorangegangener Abschnitt, Mock [21] sowie Abschnitt 1.2.4) die Integration der im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse nicht zulässt, wurde die alte Version des Modells hinsichtlich Instandhaltungskosten und Wiederverkaufserlösen, Rohstoffpreisabhängigkeiten, der lernkurvenabhängigen Kostendegression, Kapazitätsbeschränkungen sowie dem Antriebsstrangportfolio sowohl inhaltlich als auch funktional erweitert.

2.2.2.1 Total-cost-of-ownership

Inhaltlich wurde im Rahmen dieser Arbeit der auf der relevant-cost-of-ownership-Berechnung basierende Entscheidungsalgorithmus durch eine total-cost-of-ownership-(TCO-)Berechnung ersetzt. Der neue Algorithmus ist nun in der Lage, auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 4 sowohl Instandhaltungskosten während der Nutzungsphase als auch Wiederverkaufswerte im Anschluss an die Nutzungsphase in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. Hierzu werden für jede Kombination aus Kunde und Fahrzeugvariante die neuen Parameter berücksichtigt. Die variierende jährliche Fahrleistung der Kundengruppen fließt dabei durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Instandhaltungskosten also ebenso in die Entscheidung mit ein, wie die abweichenden Anschaffungskosten der Fahrzeuge und der damit verbundene schwankende Wiederverkaufswert (vgl. Kapitel 5). Die Parameterdefinition der Instandhaltungskosten und Wiederverkaufswerte folgt der Eingabelogik des Modells und ist für jedes Jahr und jeden Antriebsstrang in jeder Fahrzeuggröße frei definierbar. Die Werte der Parameter werden in den abschließenden Szenariorechnungen (vgl. Kapitel 6) basierend auf den in Kapitel 4 entwickelten Kostenmodellen ermittelt.

Mathematisch lassen sich die neuen Nutzungskosten K_N in Anlehnung an [21], Formel 9⁵, durch

$$K_N = E_F \cdot P_K + K_{M\&R} \quad \text{Formel 2.1}$$

mit K_N : nutzungsabhängige Kosten [€/km]
 E_F : Energiebedarf der Fahrzeugvariante [MJ/km]
 P_K : Endverbraucherpreis Kraftstoff [€/MJ]
 und $K_{M\&R}$: Instandhaltungskosten [€/km]

beschreiben.

⁵ Ursprüngliche Formel 9 aus [21]: $K_N = E_F \cdot P_K$.

Unter Berücksichtigung der Wiederverkaufserlöse lassen sich die einmaligen Fahrzeugkosten $P_{Fzg.}$ in Anlehnung an [21], Formel 8⁶, mathematisch durch

$$P_{Fzg.} = P_F - RV \quad \text{Formel 2.2}$$

mit $P_{Fzg.}$: einmalige Fahrzeugkosten [€]
 und P_F : Verkaufspreis Fahrzeugvariante [€] (vgl. [21], Formel 8)
 sowie RV : Wiederverkaufswert [€]

beschreiben.

Hieraus ergeben sich in Anlehnung an [21], Formel 13⁷ die neuen, für die Kaufentscheidung des simulierten Nutzers ausschlaggebenden Total-cost-of-ownership:

$$K_{TCO} = P_F - RV + \left((C_{K-TTW} \cdot E_F) - S_{C-Z} \right) \cdot S_{C-S} - S_S + (S_J \cdot a) + (K_N \cdot VMT \cdot a) \quad \text{Formel 2.3}$$

mit K_{TCO} : Total-cost-of-ownership [€]
 C_{K-TTW} : Tank-to-Wheel CO₂-Emissionen des Kraftstoffs [g/MJ]
 S_{C-Z} : Zielwert CO₂ [g/km]
 S_{C-S} : Strafe bei Überschreitung Zielwert CO₂ [€/(g/km)]
 S_S : einmalige Subventionen beim Fahrzeugkauf [€]
 S_J : jährliche Kfz-Steuer [€/a]
 a : zu Grunde gelegter Amortisationszeitraum [a]
 VMT : jährliche Fahrleistung [km/a]

2.2.2.2 Rohstoffpreisabhängigkeit

Neben der Integration der TCO-Berechnung in den Entscheidungsalgorithmus wurde die Berechnung der Komponentenkosten bzw. -preise um zusätzliche Rohstoffe erweitert. Bisher war es im Modell möglich, Kraftstoffpreise auf Basis einer Ölpreisabhängigkeit zu berechnen. Darüber hinaus floss der Platinpreis als ein Kostentreiber von Brennstoffzellen in die Kostenberechnung mit ein. Nach der Erweiterung des Modells ist es nun möglich, neben diesen beiden Rohstoffeinflüssen zudem die Preisentwicklung von Lithium und Grafit als Hauptbestandteile der Aktivmaterialien von Traktionsbatterien (vgl. Kapitel 4.1) sowie von Neodym als Kostentreiber von Magneten für Elektromaschinen (vgl. Kapitel 4.2) zu berücksichtigen. Die Integration der zusätzlichen Rohstoffe folgt dabei der bisherigen Entscheidungslogik gemäß [21], Formeln 5, 6 und 7. Diese Neuerung ermög-

⁶ Ursprüngliche Formel 8 aus [21]: $P_F = \sum_{j=1}^n P_{B(j)} + \sum_{k=1}^m P_{E(k)}$.

⁷ Ursprüngliche Formel 13 aus [21]: $K_{RCO} = P_F + \left((C_{K-TTW} \cdot E_F) - S_{C-Z} \right) \cdot S_{C-S} - S_S + (S_J \cdot A) + (K_N \cdot F_A \cdot A)$.

licht zusätzliche Sensitivitätsberechnungen (vgl. Kapitel 6) und erlaubt die Integration der in Kapitel 4 erzielten Ergebnisse in das Simulationsmodell.

2.2.2.3 Lernkurvenabhängige Kostendegression

Eine weitere wesentliche Neuerung des Modells besteht in der Anpassung der Berechnung von Kostendegressionen mit Hilfe von Lernkurven. Hierbei unterlag das Modell in seiner ursprünglichen Form einer Beschränkung, da zwar für jedes einzelne Fahrzeug Lernkurven berechnet werden konnten (vgl. [21], Formel 7), diese Stückzahleffekte jedoch keine Auswirkung auf andere Fahrzeuggruppen hatten. Als konkretes Beispiel seien die Kosten der Traktionsbatterie eines kleinen Batteriefahrzeugs angeführt, welche zwar mit Hilfe einer Lernkurve berechnet werden konnten, diese Kostendegression jedoch keine Auswirkung auf die Kosten der Traktionsbatterie des mittleren Fahrzeugsegments hatte. Da die in beiden Fahrzeugen verwendeten Traktionsbatterien allerdings auf die gleiche Technologie sowie identische Fertigungsprozesse zurückgreifen (vgl. Kapitel 2.4.1 sowie Kapitel 4.1) und darüber hinaus in der Praxis mit hoher Wahrscheinlichkeit sogar in der gleichen Fabrik gefertigt würden, ist die durchgeführte Modellerweiterung essentiell für die Interpretation der Auslegung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte. Hierbei wurde die Erweiterung für alle Komponenten durchgeführt, deren Kosten mit Hilfe von Lernkurven berechnet werden. Neben Traktionsbatterien zählen hierzu Brennstoffzellensysteme, Elektromaschinen sowie Leistungselektronik und Hochvoltkomponenten. In dem oben angeführten Beispiel führt die lernkurvenbedingte Kostendegression von Traktionsbatterien, welche in kleinen Batteriefahrzeugen verbaut werden, nunmehr also auch zu einer Kostendegression der in mittleren Batteriefahrzeugen verbauten Traktionsbatterien. Mathematisch kann diese Neuerung in Anlehnung an [21], Formel 7⁸, durch

$$P_{i,j} = \left(K_{i-1,j} \left(\frac{M_{i,j}}{M_{i-1,j}} \right)^{\frac{\log(L)}{2}} \right) + D_{i,j} + S_U \quad \text{Formel 2.4}$$

- mit $P_{i,j}$: Verkaufspreis Fahrzeugkomponente j im Betrachtungsjahr i [€]
 $K_{i-1,j}$: Herstellkosten Fahrzeugkomponente j im Vorjahr $i-1$ [€]
 M_i : kumulierte Produktionsmenge des Betrachtungsjahres [Stk.]
 M_{i-1} : kumulierte Produktionsmenge des Vorjahres [Stk.]
 L : Lernrate [%]
 D_i : Deckungsbeitrag Anbieter im Betrachtungsjahr [%] bzw. [€]
 S_U : Umsatzsteuer [%] bzw. [€]

beschrieben werden.

⁸ Ursprüngliche Formel 7 aus [21]: $P_{B/E(i)} = \left(K_{B/E(i-1)} \cdot \left(\frac{M_i}{M_{i-1}} \right)^{\frac{\log(r)}{2}} \right) + D_i + S_U$.

2.2.2.4 Kapazitätsbeschränkungen

Eine weitere signifikante inhaltliche Neuerung stellt die Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen der Fertigung dar. Um die Dauer der Markteinführung zukünftiger Fahrzeugkonzepte berücksichtigen zu können, besteht nun die Möglichkeit, für alle Antriebsstrangvarianten sowohl absolute als auch relative maximale jährliche Zuwachsraten zu definieren. Diese Neuerung bildet somit die Dauer des Produktionsaufbaus seitens der Fahrzeughersteller ab. Das ursprüngliche Modell sah eine solche Beschränkung nicht vor. Hierdurch wäre es innerhalb einer Szenariorechnung theoretisch möglich gewesen, dass innerhalb eines einzigen Jahres die gesamte deutsche Neufahrzeugflotte aus einem einzigen Antriebsstrang modelliert gewesen wäre.

Die neue, an eine Hysterese angelehnte Beziehung des Absatzes an Neufahrzeugen V einer Antriebsstrangart j lässt sich zwischen zwei aufeinanderfolgenden Jahren i und $i+1$ mathematisch mit Hilfe von

$$V_{i+1,j,\max} \leq \max\{V_{i,j} \cdot (1 + z_{\text{rel.}}); V_{i,j} + z_{\text{abs.}}\} \quad \text{Formel 2.5}$$

mit $V_{i,j}$: Absatz Neufahrzeuge vom Antriebsstrang j im Jahr i [Stk.]

$V_{i+1,j}$: maximal zulässiger Absatz Neufahrzeuge vom Antriebsstrang j im Folgejahr $i+1$ [Stk.]

$z_{\text{rel.}}$: relative maximale Zuwachsrate [%]

$z_{\text{abs.}}$: absolute maximale Zuwachsrate [Stk.]

beschreiben. Hierbei lassen sich im Modell sowohl eine relative Zuwachsrate $z_{\text{rel.}}$ als auch eine absolute Zuwachsrate $z_{\text{abs.}}$ definieren, wobei der maximal mögliche bzw. zulässige Neufahrzeugabsatz eines Antriebsstrangs aus dem Maximalwert der beiden Beziehungen bestimmt wird. Als Antriebsstrang wird in VECTOR21 eine Triebstrangtopologie wie beispielsweise parallele Hybride oder Batteriefahrzeuge verstanden (vgl. [21] sowie Abschnitt 1.2.4 und 2.3).

2.2.2.5 Antriebsstrangportfolio

Im Hinblick auf die Auslegung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte und im Besonderen im Hinblick auf die Wahl der Antriebsstrangarchitektur, werden die in Abschnitt 2.3 identifizierten Antriebsstrangkonfigurationen in das Modell integriert. Die Anzahl der im Modell ursprünglich zur Verfügung stehenden sieben Antriebsstrangtopologien (vgl. [21]) werden so auf zwölf erhöht. Hierdurch wird die Interpretation der Szenariorechnungen hinsichtlich des Auslegungskriteriums der Antriebsstrangarchitektur ermöglicht (vgl. Kapitel 6). So ist neben der Berechnung von Benzin-, Diesel- und Erdgasfahrzeugen sowie deren vollhybrider Fahrzeugvarianten nun auch die Berechnung von drei weiteren Parallelhybriden möglich. Hierbei werden zwei Benzin- sowie ein Diesel Plug-in Hybrid dem Modell hinzugefügt, wobei die beiden zusätzlichen Benzinhybride als P2- und als P4-Hybrid ausgelegt sind. Der zusätzliche Dieselhybrid ist als P2-Hybrid definiert (vgl. Kapitel 2.3.1).

Darüber hinaus stehen der serielle Hybrid sowie die beiden vollelektrischen Fahrzeuge BEV und FCV zur Verfügung.

Im Gegensatz zum ursprünglichen Modell (vgl. [21]) wird nicht mehr zwischen den Fahrzeuggrößenklassen hinsichtlich der Verfügbarkeit einzelner Antriebsstrangvarianten unterschieden, d. h. es werden nun beispielsweise auch große Batteriefahrzeuge in die Berechnung mit einbezogen.

2.2.2.6 Funktionale Neuerungen

Neben den inhaltlichen Neuerungen wurde das Simulationsmodell auch funktionell umstrukturiert und erweitert. So wurde zusätzlich zur Verbesserung der Nutzeroberfläche durch die Erweiterung der Analysefunktionalität um grafische Auswertungen das einfache Kopieren vollständiger Szenarien aus zuvor berechneten Szenarioläufen ermöglicht. Darüber hinaus wurde die Laufzeit signifikant verbessert, sodass in der neuen Version Szenariorechnungen mit einem Zeithorizont von 30 Jahren in weniger als einer Stunde möglich sind, wobei hier durch die Nutzung von leistungsstärkeren Servern oder der Optimierung des Berechnungsalgorithmus weiteres Verbesserungspotential besteht.

2.3 Elektrifizierte Antriebsstrangarchitekturen

Um im Rahmen dieser Arbeit detaillierte Kostenanalysen durchführen zu können und darüber hinaus Potentiale möglicher zukünftiger Entwicklungen abzuleiten, ist ein tiefgehendes Technikverständnis essentiell. Dies gilt insbesondere für die Architektur der Fahrzeugantriebsstränge. Die einsetzende Elektrifizierung des Antriebsstrangs und die damit verbundene Integration von neuen, innovativen Komponenten in das Fahrzeug resultiert in einer Vielzahl von möglichen Konfigurationen. Hierbei wird neben den konventionellen, verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen wie Benzin-, Diesel- und Gasfahrzeugen zwischen hybriden sowie vollelektrischen Fahrzeugen unterschieden.

2.3.1 Hybridfahrzeuge

Hybridfahrzeuge zeichnen sich durch die Verwendung von mindestens zwei Energiewandlern sowie mindestens zwei dazugehörigen Energiespeichern aus [40]. Als mögliche Energiewandler kommen neben konventionellen Hubkolbenverbrennungsmotoren Rotationsmotoren oder Freikolbenmotoren, aber auch Brennstoffzellensysteme und Elektromotoren jeglicher Art in Frage. Die dazugehörigen Energiespeicher gliedern sich entsprechend in Kraftstofftanks, Wasserstoffspeicher sowie Traktionsbatterien. Je nach Elektrifizierungsgrad unterscheidet man in Mikro-, Mild- und Vollhybride [40].

Mikrohybride haben den geringsten Elektrifizierungsanteil und beschränken sich auf eine Start-Stopp-Funktion des Verbrennungsmotors sowie die meist nur kurzzeitige Versorgung des 12 Volt Bordnetzes durch eine größere bzw. zusätzliche Batterie [59].

Mildhybride haben durch einen integrierten Elektromotor die Möglichkeit zur Leistungs- und Drehmomentunterstützung des Verbrennungsmotors, sind jedoch nicht in der Lage, rein elektrisch zu fahren. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur Rekuperation von Bremsenergie und zur Lastpunktanhebung des Verbrennungsmotors. Die Elektromaschine ist hierbei meist als integrierte Starter-Generator Einheit (ISG) ausgeführt und kombiniert somit Anlasser und Lichtmaschine zu einer Komponente. Im Antriebsstrang ist diese Elektromaschine entweder direkt auf der Antriebswelle integriert und dient somit gleichzeitig zur Momentenaddition des Verbrennungsmotors (vgl. Kapitel 2.3.1.1) oder sie ist durch einen Riemen mit der Antriebswelle verbunden (engl.: belt-driven) [60].

Vollhybride erweitern die Funktionalität der Mildhybride um das rein elektrische Fahren. Hierbei ist der Elektromotor im Antriebsstrang so dimensioniert, dass er zumindest für kurze Strecken bzw. bis zu einer bestimmten Maximalgeschwindigkeit das Fahrzeug ohne Unterstützung des Verbrennungsmotors antreiben kann. Besitzt ein Vollhybrid zusätzlich einen Netzanschluss, welcher ein direktes Laden der Batterie aus dem Stromnetz ermöglicht, so spricht man von einem Plug-in Hybriden (Plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) [40]. Hierbei orientiert sich die Namensgebung zusätzlich an der rein elektrischen Reichweite der Vollhybride. So spricht man von PHEV₂₀ oder PHEV₄₀ Fahrzeugen, falls sie eine rein elektrische Reichweite von 20 bzw. 40 km besitzen.⁹

Hinsichtlich der Antriebsstrangarchitektur werden Vollhybridfahrzeuge analog der Kraftübertragung auf die Räder definiert. So existieren die drei Arten der parallelen, der seriellen sowie der leistungsverzweigten Hybridfahrzeuge.

2.3.1.1 Parallele Hybridfahrzeuge

Unter parallelen Hybridfahrzeugen versteht man Fahrzeuge, welche parallel sowohl durch den Verbrennungsmotor als auch durch den Elektromotor angetrieben werden können. Hierbei ist neben dem rein verbrennungsmotorischen und dem rein elektrischen Antrieb auch eine Kombination aus beiden möglich. In der weiteren Unterteilung von parallelen Hybriden richtet sich die Definition nach der Position der Elektromaschine im Antriebsstrang. So wird zwischen Hybriden mit Momenten-, Zugkraft- und Drehzahladdition unterschieden [61]. Darüber hinaus existiert eine weitere Nomenklatur, welche die unterschiedlichen Antriebsstrangvarianten mit den Kürzeln P1 bis

⁹ Im englischen Sprachgebrauch wird eine identische Nomenklatur verwendet, wobei die rein elektrische Reichweite hier in Meilen ausgedrückt wird. Ein PHEV₂₀ bezeichnet also ein Plug-in Hybridfahrzeug mit einer rein elektrischen Reichweite von 20 Meilen [42].

P4¹⁰ belegt, sich im Wesentlichen allerdings mit den Varianten der zuvor genannten Definition deckt [59]. So entsprechen die Varianten P1 bis P3 einer Antriebsstrangarchitektur mit Momentenaddition, wobei hier noch weiter hinsichtlich der Position der Elektromaschine im Zusammenspiel mit Kupplung und Getriebe differenziert wird (vgl. Abbildung 2.1). Beispiele für bereits auf dem Markt verfügbare Fahrzeuge mit Momentenaddition sind der Audi Q5 Hybrid oder der BMW 7er ActiveHybrid [62] [63].

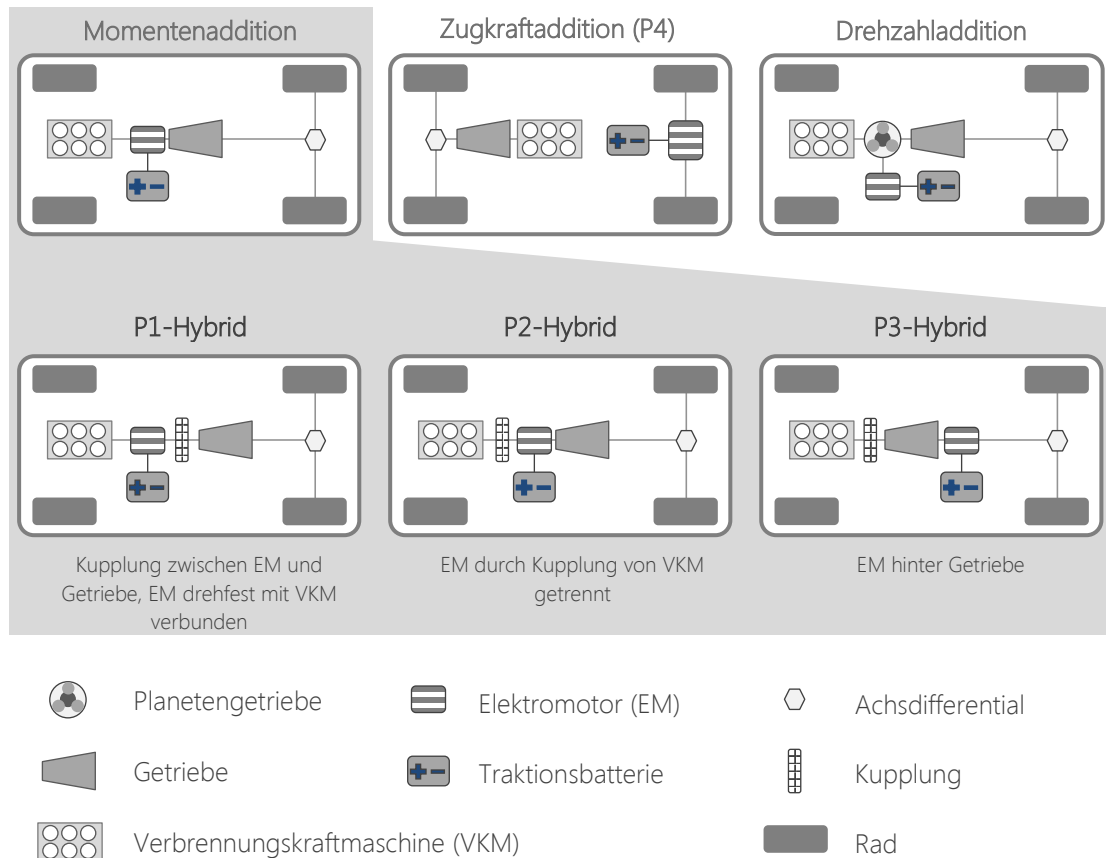


Abbildung 2.1: Antriebsstrangarchitekturen von parallelen Hybridfahrzeugen.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [61] [59].

Ein P4-Hybrid entspricht einem Parallelhybrid mit Zugkraftaddition. Hierbei sind heutige Prototypenfahrzeuge meist so aufgebaut, dass ein konventionelles, verbrennungsmotorisch betriebenes Fahrzeug mit Vorderachsantrieb um einen Elektromotor, welcher ausschließlich die Hinterachse antreibt, erweitert wird. Dieser Hybrid wird aufgrund der mechanisch nicht miteinander verbundene-

¹⁰ Die Nummerierung richtet sich nach der Position der Elektromaschine im Antriebsstrang in Relation zum Verbrennungsmotor. Beispielsweise bedeutet die Bezeichnung P2-Hybrid, dass sich die Elektromaschine an Position 2 vom Verbrennungsmotor aus gesehen, also hinter der Anfahrkupplung im Triebstrang befindet [259].

nen Achsen auch als „axle-split-Hybrid“ oder „over-the-road-Hybrid“¹¹ bezeichnet. Ein Beispiel für ein in der Entwicklung stehendes Fahrzeug dieser Art ist der Volvo V60 Plug-in Hybrid [64].

2.3.1.2 Serielle Hybridfahrzeuge

Als serielle Hybride werden Fahrzeuge bezeichnet, welche zwar einen Verbrennungsmotor an Bord haben, dieser jedoch keine mechanische Kopplung zu den Rädern hat (vgl. Abbildung 2.2). Das Fahrzeug kann folglich nur durch den Elektromotor angetrieben werden. Der Verbrennungsmotor dient in dieser Antriebsstrangkonfiguration ausschließlich zum Aufladen der Traktionsbatterie und somit der Reichweitenverlängerung. Da er nicht mehr auf dynamische Leistungsanforderungen ausgelegt sein muss, wird in der Regel ein „Downsizing-Motor“ eingesetzt, welcher in einigen wenigen verbrauchsarmen Betriebspunkten betrieben wird. Darüber hinaus kommen alternative Verbrennungskraftmaschinen wie Rotations- oder Freikolbenmotoren in Frage. Aufgrund der reichweitenverlängernden Eigenschaft des Verbrennungsmotors werden serielle Hybride auch als Range-extender-Fahrzeuge bezeichnet (extended-range electric vehicle, EREV) [61].

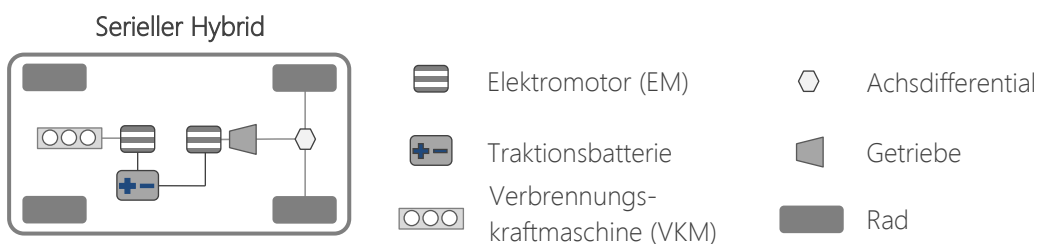


Abbildung 2.2: Antriebsstrangarchitektur eines seriellen Hybridfahrzeugs.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [61] [59].

Wesentlich bei der Auslegung des Fahrzeugs ist die Berücksichtigung von NVH (Noise, vibration, harshness)-Anforderungen auf der einen und Bauraumbeschränkungen auf der anderen Seite. Die Hauptantriebsstrangkomponenten serieller Hybride sind der Elektromotor, welcher zum Antrieb des Fahrzeugs dient, ein hiermit verbundenes Übersetzungsgetriebe und ein Achsdifferential, der Verbrennungsmotor zum Aufladen der Batterie, ein Generator zwischen Verbrennungsmotor und Batterie, welcher gleichzeitig als Starter des Verbrennungsmotors genutzt wird, die Traktionsbatterie sowie Leistungselektronik, welche die elektrischen Flüsse regelt. Darüber hinaus besitzen serielle Hybride in der Regel einen Netzanschluss, um die Batterie direkt laden zu können. Der Energiegehalt der Traktionsbatterie und somit die elektrische Reichweite serieller Hybridfahrzeuge ist aufgrund der rein elektrischen Betriebsweise der Fahrzeuge in der Regel deutlich größer als bei

¹¹ Die Bezeichnung „over-the-road“ resultiert aus der Tatsache, dass die Straße die einzige mechanische Verbindung des verbrennungsmotorischen und des elektrischen Antriebssystems darstellt.

parallelen Hybriden. Dieser höhere Energiegehalt ermöglicht die Versorgung des 12 Volt Bordnetzes aus der Traktionsbatterie. Hierzu notwendig ist allerdings ein Spannungswechsler, welcher die Verbindung zwischen dem Hochvoltsystem des Antriebsstrangs mit Spannungsniveaus von in der Regel über 150 Volt und dem Bordnetz sicherstellt [59] [61]. Ein Beispiel für ein serielles Hybridfahrzeug ist der Audi A1 e-tron, welcher als Besonderheit einen Wankelmotor zum Aufladen der Traktionsbatterie nutzt [65].

2.3.1.3 Leistungsverzweigte Hybridfahrzeuge

Leistungsverzweigte Hybridantriebe ermöglichen sowohl eine serielle als auch eine parallele Betriebsweise. Man unterscheidet drei Arten von leistungsverzweigten Hybriden: 1-mode, 2-mode sowie kombinierte Hybridantriebe (vgl. Abbildung 2.3). Alle drei Arten verfügen über (mindestens) zwei Elektromaschinen, einen Verbrennungsmotor, eine Traktionsbatterie sowie die dazugehörige Leistungselektronik. 1-mode und 2-mode Hybridfahrzeuge benötigen darüber hinaus noch ein bzw. zwei Planetengetriebe [59].

Der 1-mode Hybrid zeichnet sich durch ein zentral angeordnetes Planetengetriebe aus, welches die Verbrennungskraftmaschine mit zwei Elektromaschinen verbindet. Hierdurch wird eine Momentenaddition der Energiewandler auf den Antriebsstrang realisiert. Diese Anordnung der Komponenten resultiert in einer Vielzahl von Betriebsmodi. So besitzt der Chevrolet Volt bzw. das Schwestermodell Opel Ampera vier unterschiedliche Betriebszustände [66]¹². Zusätzlich zu den Hauptantriebsstrangkomponenten sind drei in das Planetengetriebe integrierte Kupplungen erforderlich, um die Leistungsanforderung des Fahrers im gesamten Geschwindigkeitsbereich zu erfüllen.

Die Antriebsstrangarchitektur des 2-mode Hybrids erweitert die zuvor erläuterte Konfiguration um ein zweites Planetengetriebe. Hierdurch wird neben zwei leistungsverzweigten Betriebsmodi durch die mechanische Kopplung der Verbrennungskraftmaschine über die beiden Planetengetriebe mit den Rädern auch ein rein verbrennungsmotorischer Antrieb des Fahrzeugs mit konventionellen Getriebestufen und festen Übersetzungsverhältnissen ermöglicht [61]. Aufgrund einer Vielzahl mechanischer und elektrischer Komponenten sowie sehr komplexen Betriebsstrategien stellt diese Technologie ein kompliziertes und damit teures System dar.

Beim kombinierten Hybrid ermöglicht eine mechanische Kupplung zwischen den beiden Elektromaschinen die Differenzierung in parallele und serielle Betriebsweise. Bei offener Kupplung entspricht das System dem in Abschnitt 2.3.1.2 beschriebenen seriellen Hybrid-Antriebsstrang. Der

¹² Bei den vier voneinander abgegrenzten Betriebsmodi handelt es sich um den „Elektrischen Modus 1“ (Fahren mit einer Elektromaschine), den „Elektrischen Modus 2“ (Fahren mit zwei Elektromaschinen), „Reichweitenverlängerungs Modus“ (serieller Betrieb analog eines seriellen Hybriden) sowie den „Combined Drive“ (Leistungsverzweigung auf der Ausgangsseite) [66].

Vortrieb des Fahrzeugs wird in diesem Fall nur durch den mit den Rädern verbundenen Elektromotor ermöglicht. Die zweite Elektromaschine dient dann als Generator zum Aufladen der Traktionsbatterie. Bei geschlossener Kupplung ist der Vortrieb auch rein verbrennungsmotorisch möglich. In diesem Fall entspricht die Antriebsstrangkonfiguration der eines parallelen Hybriden mit Momentenaddition. In Abhängigkeit der Betriebsstrategie und der Leistungsanforderung des Fahrers lassen sich die beiden Elektromaschinen in den Lastfluss einbinden. Der Volkswagen TwinDrive stellt ein Beispiel für ein kombiniertes Hybridfahrzeug dar [67].

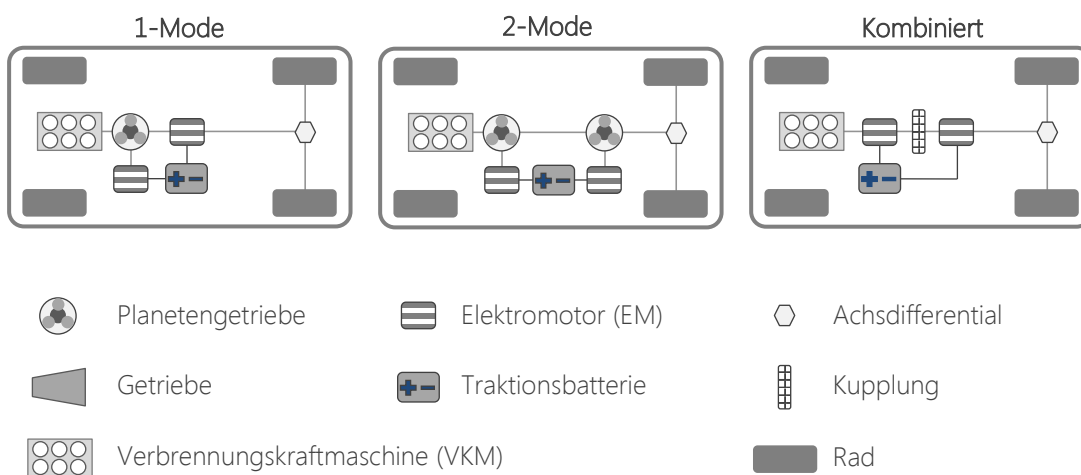


Abbildung 2.3: Antriebsstrangarchitekturen von leistungsverzweigten Hybridfahrzeugen.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [61] [59].

2.3.2 Batteriefahrzeuge

Als Batteriefahrzeuge (battery electric vehicle, BEV) werden Fahrzeuge bezeichnet, welche als einzige Energiequelle eine Traktionsbatterie nutzen und mittels eines oder mehrerer Elektromotoren angetrieben werden (vgl. Abbildung 2.4) [59]. Häufig wird im Zusammenhang mit batterieelektrischen Fahrzeugen der Begriff „Elektrofahrzeug“ verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch zwischen diesen beiden Begriffen differenziert; die Bezeichnung Elektrofahrzeug wird als Oberbegriff aller elektrifizierten Antriebsstränge verwendet und dient nicht der alleinigen Bezeichnung von Batteriefahrzeugen.

Die Traktionsbatterie von Batteriefahrzeugen ist in der Regel größer dimensioniert als bei Hybridfahrzeugen. Da sie als einzige Energiequelle dient, ist mit ihrem Energiegehalt auch gleichzeitig eine Reichweitenbeschränkung verbunden. Der Kundennutzen und damit der Markterfolg der Fahrzeuge sind eng mit der rein elektrischen Reichweite verbunden. Kapitel 3 untersucht diesen Aspekt durch die Gegenüberstellung des Mobilitätsverhaltens der Nutzer und den elektrischen Reichweiten der Fahrzeuge eingehend. Je nach Auslegung des Antriebsstrangs nutzen BEVs ein zusätzliches, festes Übersetzungsgetriebe, um die Effizienz der Elektromaschinen zu erhöhen.

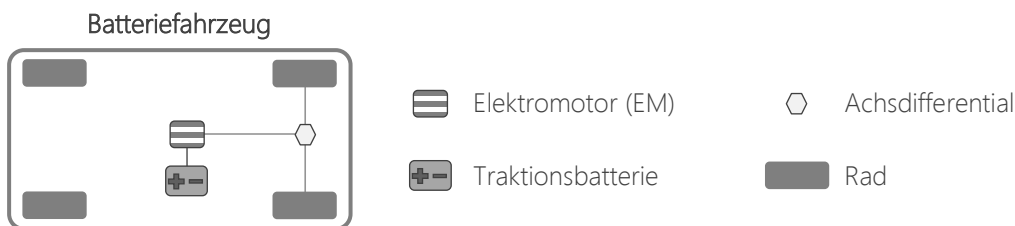


Abbildung 2.4: Antriebsstrangarchitektur eines Batteriefahrzeugs.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [61] [59].

2.3.3 Brennstoffzellenfahrzeuge

Brennstoffzellenfahrzeuge (fuel cell electric vehicle, FCV) sind zumeist als serielle Hybridfahrzeuge ausgelegt, wobei an die Stelle des Verbrennungsmotors eine Brennstoffzelle tritt. Infolge dieser Besonderheit werden sie nicht den Hybridfahrzeugen zugeordnet, sondern als eigene Antriebsstrangkategorie definiert. Da aufgrund technischer Grenzen das dynamische Leistungsverhalten der Brennstoffzelle nicht den Lastanforderungen des Fahrers folgen kann, wird zwischen Brennstoffzellensystem und Traktionselektromotor eine Hochleistungsbatterie integriert. Daher gleicht die Antriebsstrangarchitektur der eines seriellen Hybridfahrzeugs (vgl. Abbildung 2.5) [59].

Als Speicheroptionen des für den Betrieb der Brennstoffzelle benötigten Wasserstoffs kommen Flüssigwasserstoff, Kryogen-Adsorption, Metallhydridspeicher, Druckwasserstoff, Alanate, salzähnliche Metallhydride sowie Wasser in Frage (vgl. auch Abschnitt 2.4.3) [68]. Die derzeit in Vorserienfahrzeugen verwendete Speichervariante sind Druckwasserstofftanks, welche bei Druckniveaus von 350 und 700 bar betrieben werden. Bei der Auslegung des Fahrzeugs ist zu beachten, dass höhere Betriebsdrücke kleinere Packageanforderungen ermöglichen, sich der Herstellungsaufwand und damit die Kosten der Speicher jedoch signifikant erhöhen [69].

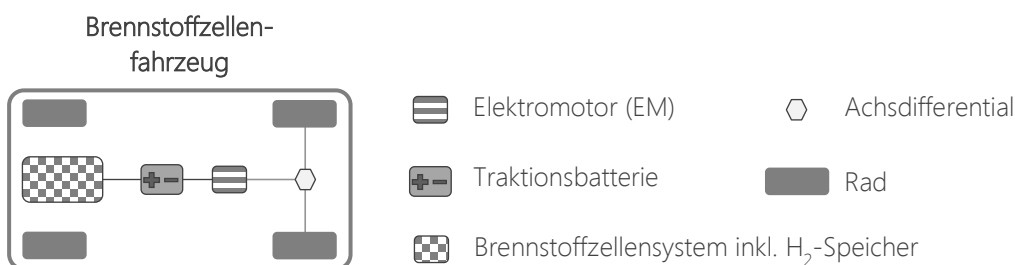


Abbildung 2.5: Antriebsstrangarchitektur eines Brennstoffzellenfahrzeugs.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [61] [59].

Da sich die Funktionsweise der Batterie darauf beschränkt, die dynamischen Anforderungen des Fahrers zu bedienen, ist ihr Energiegehalt auf wenige kWh begrenzt. Es ist vielmehr essentiell, dass

sie den Lastanforderungen gerecht werden kann und somit als Hochleistungsbatterie ausgelegt ist (vgl. Kapitel 4.1) [70].

Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Begriff „Elektrofahrzeug (EV)“ wird in Anlehnung an die Definition des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität (NPE) als Sammelbegriff für Fahrzeuge genutzt, die einen Netzanschluss besitzen. Hierzu zählen konkret Batteriefahrzeuge, Range-extender Fahrzeuge sowie Plug-in Hybride.

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die unterschiedlichen Antriebsstrangkonfigurationen beschrieben wurden, wird im Folgenden auf die Schlüsselkomponenten Traktionsbatterie, Elektromaschine und Brennstoffzelle sowie deren technische Beschreibung eingegangen.

2.4 Elektrifizierte Antriebsstrangkomponenten

2.4.1 Traktionsbatterien

Traktionsbatterien stellen die zentrale Komponente aller elektrifizierten Fahrzeugkonzepte dar. Der Funktionsweise des Elektrofahrzeugs und damit der Nutzen für den Kunden hängt maßgeblich von der Batterie ab. Die Auslegung muss sowohl im Hinblick auf den Energiegehalt und damit auf die potentielle rein elektrische Reichweite als auch auf die Leistungsanforderung erfolgen [40] [70]. Nach einer Beschreibung der unterschiedlichen Arten von Traktionsbatterien sowie deren Aufbau und Funktionsweise werden im Folgenden Produktionskosten und deren mögliche zukünftige Entwicklungen bewertet. Im Rahmen einer Nutzungsanalyse von Traktionsbatterien erfolgt darüber hinaus eine Abschätzung möglicher Abnutzungsraten und Lebenszyklen.

Derzeit werden in Serienfahrzeugen drei unterschiedliche Arten von Batterien verbaut [71]:

- Blei-Batterien,
- Nickel-Metallhydrid-Batterien sowie
- Lithium-Ionen-Batterien.

Hierbei variiert die Auslegung der Batterien hinsichtlich ihrer Größe bzw. ihres Energiegehalts deutlich je nach Art des Antriebsstrangs (vgl. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Typische Batteriegrößen in heutigen Fahrzeugen.

Fahrzeugtyp	Elektrofahrrad	Starterbatterie	Golf-Fahrzeug	Gabelstapler	Vollhybrid
Zellchemie	NiMH, Li-Ion	Blei	Blei	Blei	NiMH, Li-Ion
Batteriegröße	360 Wh	0,5 – 1 kWh	8 kWh	18 kWh	1 – 2 kWh

Quelle: Eigene Darstellung nach [71].

2.4.1.1 Beschreibung der Funktionsweise

Die Batterietypen unterscheiden sich durch ihre chemische Zusammensetzung. Allen gemein ist jedoch ihre Definition als galvanische Elemente mit einer Anode sowie einer Kathode. Diese beiden Elektroden werden durch einen Separator mechanisch getrennt, wobei durch einen Elektrolyten die elektrochemische Redoxreaktion ermöglicht wird. Der Aufbau der Batteriezelle sowie die Wahl der Zellchemie beeinflussen ihre technischen Eigenschaften wie Leistungs- und Energiedichte. Die Auslegung der Traktionsbatterie erfolgt daher immer unter Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen des Antriebsstrangs an die Batterie.

Die Zellchemien weisen aufgrund des variierenden elektrochemischen Potentials unterschiedliche Leistungs- und Energiedichten auf (vgl. Abbildung 2.6). Von den betrachteten Batterien weisen Blei-Akkumulatoren die geringsten Leistungs- und Energiedichten auf. Insbesondere im Hinblick auf die Energiedichte liegen die technisch, d. h. auf Batteriesystemebene realisierbaren Werte bei Lithium-Ionen-Batterien deutlich höher. Bei allen Batterietypen ist zu beachten, dass die Erhöhung der Energiedichte mit einer Verringerung der Leistungsdichte, und umgekehrt, verbunden ist. Insbesondere bei Lithium-Ionen-Batterien ist die Variation bzw. die Bandbreite der technisch möglichen Energie- und Leistungsdichten sehr groß. [72]

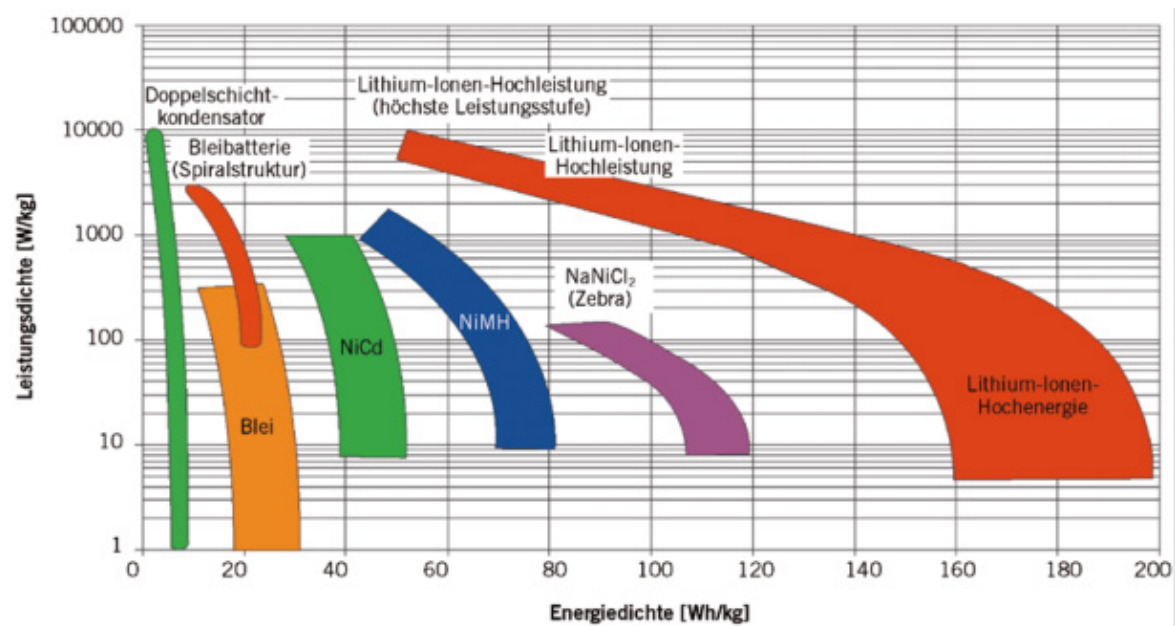


Abbildung 2.6: Ragone-Plot unterschiedlicher elektrochemischer Speichersysteme.

Bildquelle: [73].

Hinsichtlich der Verwendung in elektrifizierten Antriebssträngen haben Lithium-Ionen-Batterien aus heutiger Sicht das größte Potential. Aufgrund der hohen Produktionskosten dieses Batterietyps (vgl. Abschnitt 2.4.1.4) finden jedoch insbesondere in Fahrzeugen mit einem geringen Elektrifizie-

rungsgrad auch andere Batterietypen Verwendung. Aus diesem Grund finden derzeit, zumindest für hybridisierte Fahrzeugkonzepte, NiMH- und Bleibatterien weiterhin Verwendung [71].

Im Folgenden werden die technischen Eigenschaften der derzeit verwendeten Batterietypen erläutert.

2.4.1.2 Blei-Batterien

In konventionellen Fahrzeugen werden Blei-Batterien hauptsächlich als Starterbatterien verwendet. Ihre Hauptaufgabe besteht in der Stromversorgung des Startvorgangs des Verbrennungsmotors sowie in der Versorgung des 12 V-Bordnetzes. Die Ladung erfolgt hierbei durch die Lichtmaschine während der Fahrt. Die Einführung von Mikrohybriden macht durch die längeren Start-Stopp-Phasen sowie die Möglichkeit der Rekuperation von Bremsenergie eine Anpassung der herkömmlichen Starterbatterien notwendig. Blei-Batterien besitzen Energiedichten von 30-50 Wh/kg auf Systemebene [74]. Die Elektroden werden von zwei Bleiplatten gebildet, welche durch einen Separator getrennt sind. Als Elektrolyt dient Schwefelsäure (H_2SO_4) [72].

Aus Mangel an technischen Alternativen nutzten bis in die 1990er Jahre hinein auch batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge Blei-Batterien als Energiequelle [75]. Die Zyklenfestigkeit, welche hauptsächlich durch innere Korrosion beschränkt wird, liegt bei 300 bis 400 Vollzyklen. Aufgrund der geringen Energiedichte in Verbindung mit der technischen Beschränkung, dass Blei-Batterien keinesfalls tiefentladen werden dürfen und sich somit die tatsächlich nutzbare Energie auf unter 90% der nominalen Batteriegröße verringert, verursachen Blei-Batterien in reinen Elektrofahrzeugen ein signifikantes Zusatzgewicht. Dies führt wiederum zu einem höheren Energieverbrauch und damit zu sinkenden elektrischen Reichweiten. Dem gegenüber stehen die im Vergleich zu anderen Batterietechnologien niedrigen Anschaffungskosten von unter 100 €/kWh sowie die Hochstromfähigkeit. Die für den Startvorgang notwendigen Spitzenströme von über 100 A lassen sich aufgrund der hohen Leitfähigkeit des Bleioxids realisieren, welches die Kathode der Batterie bildet [76]. Aus diesem Grund ist auch zukünftig von einem Einsatz von Blei-Batterien in Mikrohybriden auszugehen, weshalb sie im Rahmen der abschließenden Szenariorechnungen weiterhin berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 6).

2.4.1.3 Nickel-Metallhydrid-Batterien

Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) werden heute in Vollhybridfahrzeugen, wie beispielsweise dem Toyota Prius der ersten und zweiten Generation oder den BMW 5er und 7er Active Hybrids, eingesetzt [77] [78]. Sie zählen zur Gruppe der alkalischen Batterien und zeichnen sich bei doppelter Leistungsdichte einer Blei-Batterie durch Energiedichten von 60-120 Wh/kg aus [79]. Im Gegensatz zur Vorstufe der Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd) weisen sie nur eine geringe Menge gesundheitsschädlicher Stoffe auf. Ihre Sicherheitsrisiken sind darüber hinaus im Vergleich zu

anderen Batterietypen geringer, da keine brennbaren Elektroden oder Elektrolytlösungen verwendet werden [72].

Die Elektroden bestehen aus Nickelhydroxid (Kathode) und Metallhydrid (Anode). Sie liefern pro einzelner Zelle aufgrund des relativ geringen elektrochemischen Potentials der beiden Elektroden eine Spannung von 1,2 V. Die Lebensdauer von NiMH-Batterien liegt bei einer Entladungstiefe von 70% der Nominalkapazität bei etwa 4000 Zyklen [12]. Ebenso wie Blei-Batterien dürfen NiMH-Akkumulatoren nicht tiefentladen werden. Darüber hinaus weisen sie eine hohe Temperaturempfindlichkeit auf und sind für Temperaturbereiche von unter 0°C nur eingeschränkt geeignet, was ihren Einsatz in Fahrzeugen erschwert [72].

2.4.1.4 Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Batterien weisen, wie eingangs erwähnt, die höchsten technisch möglichen Energie- und Leistungsdichten auf (vgl. Abbildung 2.6). Dies liegt in der Tatsache begründet, dass Lithium als das leichteste feste Element des Periodensystems das höchste elektrochemische Standardpotential aufweist. Da es sich somit ideal für die Anwendung in Traktionsbatterien eignet, wird von nahezu allen Experten erwartet, dass die Entwicklung der Elektromobilität über die nächsten 20 bis 30 Jahre von dieser Technologie signifikant beeinflusst wird [72].

Der Begriff Lithium-Ionen-Batterie bezieht sich nicht, wie bei den zuvor diskutierten Batterietypen, auf eine einzelne Zellchemie, sondern umfasst vielmehr eine Gruppe von Batterien. Grundsätzlich weisen jedoch alle Lithium-Ionen-Batterien den gleichen Aufbau auf [9]. Zwei Elektroden werden von einem Separator getrennt, wobei auch hier ein Elektrolyt den Ladungsaustausch ermöglicht. Der Separator besteht meist aus Polypropylen oder Polyethylen. Ihm kommt aufgrund der Brennbarkeit der Elektrodenmaterialien und des Elektrolyts eine besondere Bedeutung zu. Um einen „thermal run-away“, also das unkontrollierte Aufheizen der Batterie im Fehlerfall bis hin zum Brand oder gar einer Explosion zu verhindern, schmilzt er bei einer kritischen Temperatur und verhindert somit durch irreversibles Abschalten ein weiteres Aufheizen der Zelle [72]. Um den Ladungstransport der Lithium-Ionen zwischen den beiden Elektroden zu ermöglichen, werden als Elektrolyt meist Salze wie beispielsweise Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6) oder Lithiumtetrafluoroborat (LiBF_4) verwendet [80]. Als Anodenmaterial kommt aus Kostengründen in der Regel Graphit zum Einsatz. Denkbar sind darüber hinaus auch die Verwendung von Lithium-Metall, Lithium-Legierungen, amorphem Kohlenstoff oder Lithium-Titanat.

Das Funktionsprinzip von Lithium-Ionen-Zellen hingegen unterscheidet sich von dem von Blei- und NiMH-Batterien, da hier ausschließlich Lithium die aktive Spezies darstellt [9]. Beim Ladevorgang werden Lithium-Ionen von der positiven Elektrode zur negativen Elektrode transportiert, wo sie mit von außen zugeführten Elektronen zu Lithiumatomen reagieren und im Wirtsgitter des Graphits gespeichert bzw. eingelagert werden. Dieser Vorgang wird auch als Interkalation der Lithi-

umatome bezeichnet. Beim Entladevorgang dreht sich dieser Vorgang um, wodurch über einen externen Stromkreis ein elektrischer Fluss erzeugt wird (vgl. Abbildung 2.7).

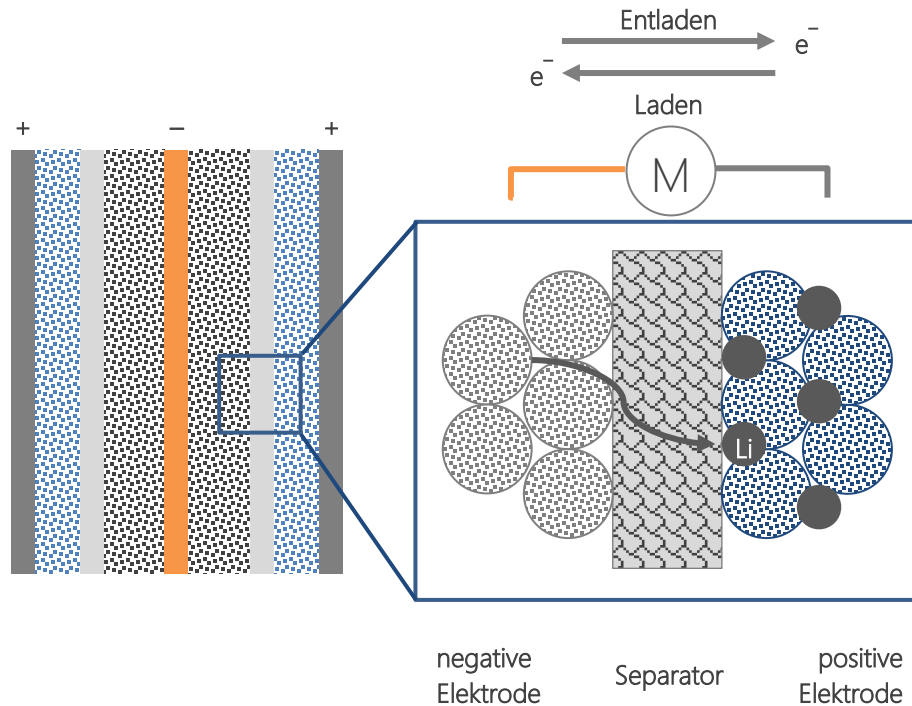


Abbildung 2.7: Schematischer Aufbau von Lithium-Ionen Bi-Zellen.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [9].

Dieses Funktionsprinzip ist bei allen Lithium-ionenbasierten Systemen gleich. Unterschiede bestehen allerdings in der Wahl der Elektrodenmaterialien sowie in deren Dicke. Soll die Batterie als Hochleistungsbatterie (high power, HP) ausgelegt werden, ist es nötig, eine geringe Kathodendicke von etwa $30 \mu\text{m}$ zu wählen, um so einen schnellen Ladungsaustausch innerhalb des Gitters zu ermöglichen. Im Gegensatz dazu ist es bei der Konfiguration einer Hochenergiezelle (high energy, HE), also einer Batterie mit einer vergleichsweise hohen Energiedichte, nötig, die Kathodendicke zu vergrößern und so eine kontinuierliche Leistungsabgabe über einen längeren Zeitraum zu ermöglichen [9].

Zellchemien

Die Namensgebung der Lithium-Ionen-Batterien bezieht sich auf das verwendete Kathodenmaterial [16]. Heute zumeist genutzte Aktivmaterialien sind

- Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt (NMC),
- Lithium-Mangan-Oxid (LMO),
- Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA) und
- Lithium-Eisenphosphat (LFP).

Neben diesen vier im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Zellchemien existiert noch eine Vielzahl weiterer Zellchemien auf Lithium-Ionen-Basis, welche in der automobilen Anwendung bisher allerdings noch keine Anwendung gefunden haben und aus diesem Grund hier nicht näher betrachtet werden. Die spezifischen Vor- und Nachteile der betrachteten Zellchemien werden im Folgenden diskutiert.

Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt (NMC)

Dieses Kathodenmaterial bezeichnet ein Stoffsystem, welches durch die chemische Formel $\text{Li}(\text{Ni}_a\text{Mn}_b\text{Co}_c)\text{O}_2$ beschrieben werden kann, wobei die Faktoren a , b und c das Mengenverhältnis von Nickel, Mangan und Kobalt definieren und es gilt: $a + b + c = 1$. Ein häufig verwendetes Verhältnis gewichtet die drei Materialien gleich, also zu jeweils einem Drittel ($a = b = c = 1/3$). In jüngster Vergangenheit sind aufgrund des hohen Kobaltpreises Bestrebungen der Batteriehersteller zu erkennen, den Anteil von Kobalt zu reduzieren. In diesem Fall spricht man von „low-cobalt-Batterien“. Aufgrund seiner ausgewogenen Eigenschaften wird NMC derzeit von vielen Fahrzeugherstellern als Kathodenmaterial sowohl für Hochenergie- als auch für Hochleistungstraktionsbatterien verwendet [16] [10].

Lithium-Mangan-Oxid (LMO)

Lithium-Mangan-Oxid besitzt die chemische Formel LiMn_2O_4 und wird aufgrund seiner Kristallstruktur auch als Manganspinell bezeichnet. Dieses Kathodenmaterial besitzt sehr ausgewogene Eigenschaften hinsichtlich der spezifischen Energie sowie der spezifischen Leistung. US-amerikanische Fahrzeughersteller, wie beispielsweise GM im Chevrolet Volt, setzen vermehrt diese Technologie ein [66]. Die im Vergleich zu anderen lithiumbasierten Aktivmaterialien geringen Kosten sowie gute Sicherheitseigenschaften stehen dabei einer geringeren Lebensdauer sowie geringeren möglichen Entladetiefen aufgrund der Instabilität der Kristallstruktur bei Spannungen unter 3,1 V gegenüber [81].

Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA)

Chemisch lässt sich dieses Kathodenmaterial durch die Formel LiNiCoAlO_2 beschreiben. Das Oxid besitzt gegenüber anderen Materialien hinsichtlich der spezifischen Energie, der spezifischen Leistung sowie der Zyklenfestigkeit bzw. der Lebensdauer Vorteile. Neben den vergleichsweise hohen Herstellungskosten ist die durch die Gefahr des „thermal run-aways“ geringere Sicherheit der Hauptnachteil von NCA-basierten Zellen [16].

Lithium-Eisenphosphat (LFP)

Lithium-Eisenphosphat besitzt aufgrund seiner guten thermischen Stabilität das beste Sicherheitsverhalten der betrachteten Kathodenmaterialien. Darüber hinaus sind die verwendeten Rohstoffe kostengünstig und nicht verknappt. Die geringe Potentiallage der Aktivmaterialien resultiert in

einer mit Manganspinellen vergleichbaren Energiedichte. Allerdings besitzt LFP eine deutlich schlechtere Hochstromfähigkeit als die übrigen Kathodenmaterialien [72]. Daher wird es in der Regel nur für rein elektrische Fahrzeuge in Form von Hochenergiebatterien und nicht für Hybridantriebe verwendet.

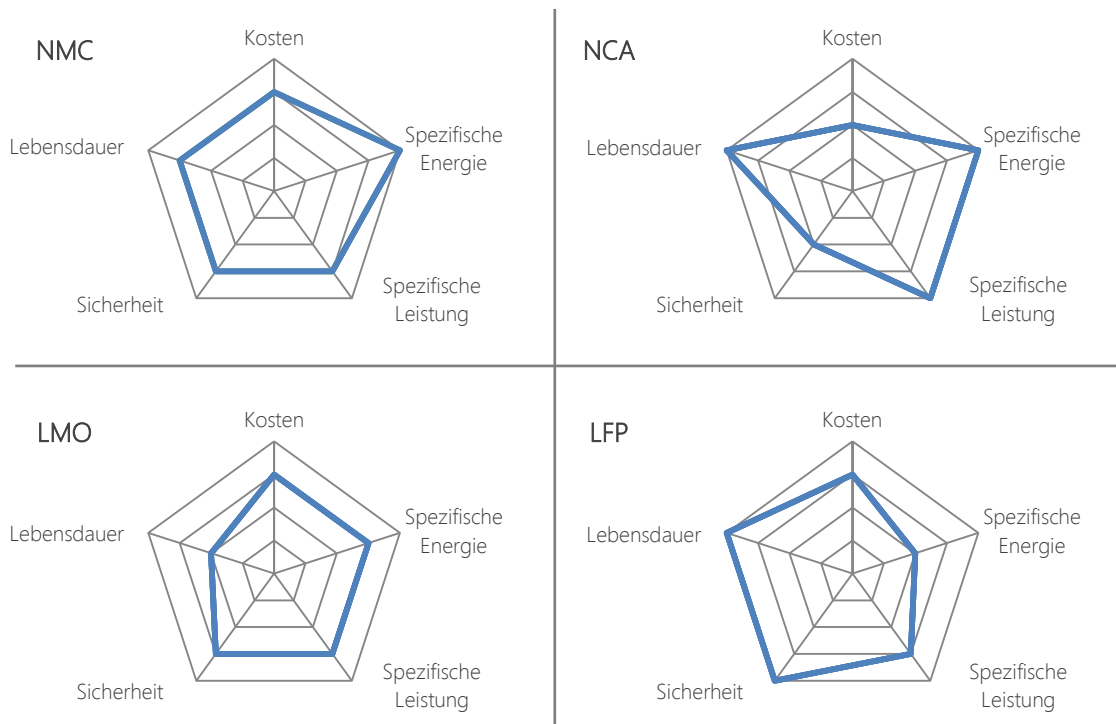


Abbildung 2.8: Vergleich der vier betrachteten Kathodenmaterialien hinsichtlich Kosten, Lebensdauer, Sicherheit sowie spezifischer Energie und Leistung mit Hilfe von Eigenschaftsspinnen¹³.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [16].

Der Gegenüberstellung der Lithium-Kathodenmaterialien hinsichtlich der Eigenschaften Sicherheit, Lebensdauer, gemessen in der Anzahl möglicher Zyklen sowie der kalendarischen Lebensdauer, spezifische Energie, spezifische Leistung und Produktionskosten zeigt, dass keines der Materialien ein anderes strikt dominiert (vgl. Abbildung 2.8). Daher ist es notwendig, die Wahl der Zellchemie vom jeweiligen Anwendungsfall und den geforderten Fahrzeugeigenschaften abhängig zu machen.

¹³ Eigenschaftsspinnen oder Radar-Charts stellen mehrere Eigenschaftsausprägungen mit Hilfe einer nominaler Skalen vergleichend gegenüber und vermitteln so einen intuitiven Eindruck der diskutierten Alternativen, wobei ein weiter außen liegender Datenpunkt eine bessere Eigenschaftsausprägung repräsentiert [296].

Anodenmaterialien

Als Anodenmaterial von Lithium-Ionen-Batterien kommen, ebenso wie für die Kathodenseite, eine Vielzahl an Materialien wie beispielsweise reines Lithium-Metall, amorpher Kohlenstoff, Graphit sowie Lithiumlegierungen, Metalloxide oder Lithium-Titanat in Frage [82]. Entscheidend für die Auswahl ist neben dem elektrochemischen Potential der Aktivmaterialien der Preis. Den besten Kompromiss stellt derzeit Graphit dar. Es besitzt nach reinem Lithium-Metall das zweitgrößte Potential gegenüber den zuvor genannten Kathodenmaterialien und eignet sich daher zur Erreichung eines hohen Spannungslevels der Einzelzelle. Reines Lithium-Metall ermöglicht theoretisch die maximale Zellspannung, besitzt allerdings aufgrund der unvollständigen Rückabscheidung pro Lade-/Entladezyklus Lebensdauer- sowie Sicherheitsnachteile. Amorpher Kohlenstoff hat im Vergleich zu Graphit bei höheren Herstellungskosten ein geringeres Potential zur Einlagerung von Lithium-Ionen und ist daher ungeeignet. Das aus Sicherheitsgründen und in seinen thermischen Eigenschaften interessante Lithium-Titanat, welches derzeit selten als Anodenmaterial verwendet wird, besitzt eine sehr hohe Potentiallage und damit ein geringeres mögliches Spannungslevel als Graphit [83]. Darüber hinaus ist es mit 17,5 \$/kg [84] deutlich teurer als Graphit mit 3 \$/kg [85] (vgl. Kapitel 4.1.2).

2.4.1.5 Identifikation der Bauarten

Aufgrund ihrer herausragenden Bedeutung für elektrifizierte Antriebsstränge wird im Folgenden eine Detailbetrachtung von Lithium-Ionen-Batterien durchgeführt. Einzelne Lithium-Ionen-Zellen für Traktionsbatterien werden in drei unterschiedlichen Arten gefertigt: Rundzellen oder zylindrische Zellen, prismatische Zellen sowie Pouch- oder Coffee-bag-Zellen (vgl. Abbildung 2.9). Zylindrische Zellen entsprechen in ihrem Aufbau handelsüblichen Batterien, wie sie aus dem Konsumgüterbereich oder der Unterhaltungselektronik bekannt sind. Prismatische Zellen weisen ebenso wie Pouch-Zellen eine rechteckige Grundfläche auf. Allerdings besitzen prismatische Zellen ebenso wie Rundzellen ein festes Gehäuse und können so äußeren mechanischen Einwirkungen besser standhalten. Dieses feste Gehäuse verursacht jedoch ein höheres Gewicht und damit eine, zumindest auf Zellebene, niedrigere Energiedichte [86].

Pouch-Zellen hingegen werden von einer Verbundfolie umschlossen und sind so nur in geringem Maße vor mechanischen Belastungen geschützt. Vorteile ergeben sich aufgrund des geringeren Gewichts der äußeren Hülle in den Leistungs- und Energiedichten dieser Zellen, weshalb sie für automobiler Anwendungen zur Zeit favorisiert werden [16]. Innerhalb der Zellen befinden sich mehrere Schichten von positiven und negativen Elektroden inklusive dazwischen liegendem Separator. Über positive und negative äußere Anschlüsse wird die Energie der Zelle abgerufen. Darüber hinaus verfügt jede Lithium-Ionen-Zelle über sogenannte Balancer, welche den elektrischen Status der einzelnen Zellen ausgleichen [9]. Lithium-Ionen-Zellen erfordern zu jedem Betriebszeitpunkt eine Überwachung und aktive Regelung der elektrischen Flüsse und Spannungen der einzelnen Zellen, um Fehlfunktionen oder gar unsichere Zustände zu vermeiden.

a) Zylindrisch



b) Prismatisch



c) Pouch



Abbildung 2.9: Bauarten von Lithium-Ionen-Zellen: Zylindrische Zelle (a)), prismatische Zelle (b)) und Pouch-Zelle (c)).

Nicht maßstäblich.

Bildquellen: [87] [88].

Für die Nutzung von Pouch-Zellen in Traktionsbatterien sind Zellkapazitäten zwischen 5 und 50 Ah pro Zelle üblich, was je nach Zellchemie Energiemengen von 0,02 bis 0,20 kWh entspricht. Für die Verwendung in Elektrofahrzeugen ist es also notwendig, mehrere Zellen zu kombinieren. Hierbei werden zunächst einige wenige Zellen zu einem Modul zusammengeschaltet. Die Anzahl der verschalteten Zellen hängt ebenso wie die Verschaltung der Zellen selbst als Reihen- oder Parallelschaltung oder einer Kombination der beiden Strategien von unterschiedlichen Faktoren, wie dem vorhandenen Bauraum, dem gewünschten Spannungslevel oder der geforderten Gesamtenergiemenge ab. Hierbei gilt, dass durch eine Reihenschaltung der Zellen innerhalb des sogenannten Moduls bzw. der Makrozelle das Spannungslevel erhöht und somit bei gleicher Leistung die Stromstärke und damit der Querschnitt der benötigten Kabel im Fahrzeug reduziert werden kann. Dies hat direkten Einfluss auf die benötigte Kupfer- bzw. Aluminiummenge in den Leiterkabeln sowie auf das mögliche Packaging der Kabelbäume. Darüber hinaus wird das obere Spannungslevel des gesamten Systems, also die maximale Anzahl von in Reihe geschalteten Zellen, von der Spannungsgrenze der Leistungselektronik limitiert.

Um die geforderte Energiemenge sowie das gewünschte Spannungsniveau des Gesamtfahrzeugs sicherzustellen, reicht ein Modul in der Regel nicht aus. Daher werden mehrere Module zu einem oder mehreren sogenannten Batteriepacks verschaltet [66] (vgl. Abbildung 2.10). Auch hier sind der vorhandene bzw. vorgesehene Bauraum sowie das Gesamtspannungslevel die entscheidenden Kriterien für die Verschaltung der einzelnen Module untereinander. Generell gilt auch hier, dass die einzelnen Module in serieller und/oder paralleler Verschaltung angeordnet werden können. Um die Energieflüsse, das Spannungslevel sowie den Ladezustand innerhalb der Batterie zu überwachen und zu regeln, wird ein Batteriemanagementsystem (BMS) benötigt, welches zusammen mit den verbauten Balancern den einwandfreien Betrieb der Batterie sicherstellt [89]. Darüber hinaus sind weitere, nur einmal im Batteriepack verbaute Komponenten wie die Battery-junction-box (BJB,

dt.: Batterieanschlusskasten), welche die äußere Schnittstelle des Batteriepacks inklusive aller erforderlichen Sicherheits- bzw. Schutzmechanismen für den Fehlerfall darstellt, sowie die elektrischen Anschlüsse notwendig.

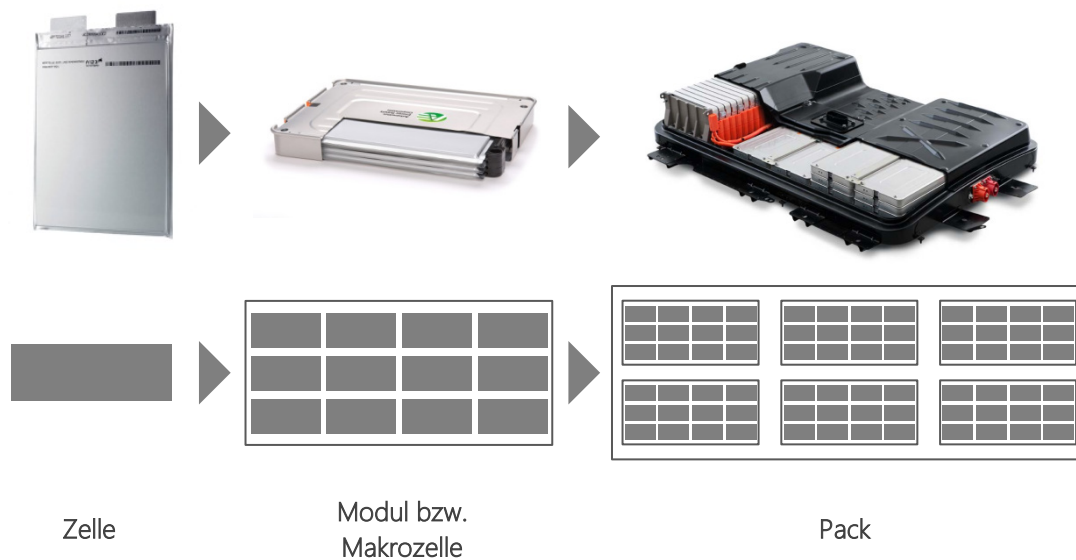


Abbildung 2.10: Aufbau einer Traktionsbatterie von der Zelle über das Modul bis hin zum Pack, exemplarisch am Beispiel des Nissan Leaf (oben) sowie schematisch (unten).

Quelle: Eigene Darstellung, [90], [91], [88].

Die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Grundlagen wie beispielsweise die Unterschiede zwischen einzelnen Zellchemien oder die Zusammensetzung eines Batteriepacks werden im Rahmen der Entwicklung des Batteriekostenmodells erneut aufgegriffen. Hierbei werden die Einflüsse dieser technischen Eigenschaften auf die Produktionskosten von Traktionsbatterien aufgezeigt. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus aufgrund ihrer zunehmenden Verbreitung in der Automobilindustrie auf Lithium-Ionen-Batterien, welche auf Pouch-Zellen basieren.

2.4.2 Elektromaschinen

Elektromaschinen stellen, ebenso wie Traktionsbatterien, einen Hauptbestandteil elektrifizierter Antriebsstränge dar (vgl. Kapitel 2.3). Sie dienen dabei sowohl zum Antrieb des Fahrzeugs als auch zur Rückgewinnung von Bremsenergie durch Rekuperation.

Die Integration der Maschinen in den Antriebsstrang kann dabei im Allgemeinen unabhängig von der Bauart bzw. Funktionsweise oder der Antriebsstrangarchitektur selbst erfolgen. So lassen sich drei unterschiedliche Konzepte unterscheiden:

- Zentralmotor,
- radnaher Motor sowie
- Radnabenmotor.

Zentralmotoren befinden sich, ähnlich wie der Verbrennungsmotor auch, an einer zentralen Stelle im Fahrzeug. Hierbei kann der Motor an das Getriebe angeflanscht sein (z. B. P2-Hybrid), sich auf der Achse befinden (z. B. P4-Hybrid) oder gänzlich an die Stelle des Verbrennungsmotors treten (z. B. BEV) [40]. Bei allen Konzepten ist in der Regel auch weiterhin ein mechanisches Achsdifferential notwendig (vgl. Abschnitt 2.3).

Radnahe Motoren sowie **Radnabenmotoren** befinden sich im Gegensatz zum Zentralmotor am bzw. im Rad. Der hierdurch erzielte Vorteil hinsichtlich des Fahrzeugpackagings ist bei diesen beiden Integrationsarten mit der Notwendigkeit der doppelten Anzahl an Elektromotoren in Relation zu setzen [40]. Radnabenmotoren besitzen darüber hinaus den Nachteil, hohe ungefederte Massen im Rad selbst zu verursachen, welche sich wiederum negativ auf die Fahrdynamik des Gesamtfahrzeugs auswirken können [59]. Bei beiden Integrationsarten wird in der Regel ein elektronisches anstelle eines mechanischen Achsdifferentials verwendet.

2.4.2.1 Beschreibung der Funktionsweise

Alle Elektromaschinen beruhen, unabhängig von ihrer Bauart, auf dem gleichen Wirkprinzip und bestehen aus einer feststehenden (Stator oder Ständer) sowie einer rotierenden Komponente (Rotor oder Läufer) [61]. Alle Motoren machen sich das Prinzip zu Nutze, welches besagt, dass auf stromdurchflossene Leiter in einem Magnetfeld eine Kraft wirkt [92]. Die elektrische Energieumwandlung in eine rotatorische Bewegung wird dabei über den Läufer dem Antriebsstrang zur Verfügung gestellt und zum Vortrieb des Fahrzeugs genutzt.

Die Kennlinie von Elektromotoren weicht grundsätzlich von der eines Verbrennungsmotors ab. So steht bei Elektromotoren das maximale Drehmoment bereits beim Anfahren des Motors zur Verfügung. Darüber hinaus lassen sich Elektromotoren für wenige Sekunden bei niedrigen Drehzahlen überlasten, was in einem bis zu vierfach erhöhten Drehmoment resultieren kann [93]. Diese Eigenschaften haben signifikante Auswirkungen auf die Dynamik des Fahrzeugs und sind daher bei der Auslegung des Antriebsstrangs stets zu berücksichtigen.

Elektromotoren haben im Vergleich zu Verbrennungskraftmaschinen einen deutlich höheren Wirkungsgrad. So liegt die Effizienz der bei heute in automobilen Anwendungen verwendeten Elektromotoren in der Regel bei über 90% [94]. Zudem besitzen Elektromaschinen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren eine deutlich höhere Leistungsdichte [59].

Ein weiterer Vorteil von Elektromotoren liegt in ihrem verschleißarmen Betrieb. Da nur wenige rotierende Teile benötigt werden, besitzen Elektromotoren einen deutlich geringeren Instandhaltungs- und Wartungsaufwand (vgl. Abschnitt 5). Während für die Herstellung eines Verbren-

nungsmotors etwa 1.400 Teile benötigt werden, liegt dieser Wert für Elektromotoren bei 100-200 Bauteilen insgesamt deutlich niedriger [95].

2.4.2.2 Identifikation der Bauarten

Elektromaschinen lassen sich in Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen unterteilen (vgl. Abbildung 2.11). Da Gleichstrommaschinen (GM) im Vergleich zu Wechselstrommaschinen geringere Wirkungsgrade besitzen und darüber hinaus schwerer sind, kommen sie trotz ihres hohen technischen Reifegrades aus heutiger Sicht für automobiler Anwendungen nicht mehr in Frage [96]. In früheren Elektrofahrzeugen wurden hingegen fast ausschließlich Gleichstrommaschinen verwendet.

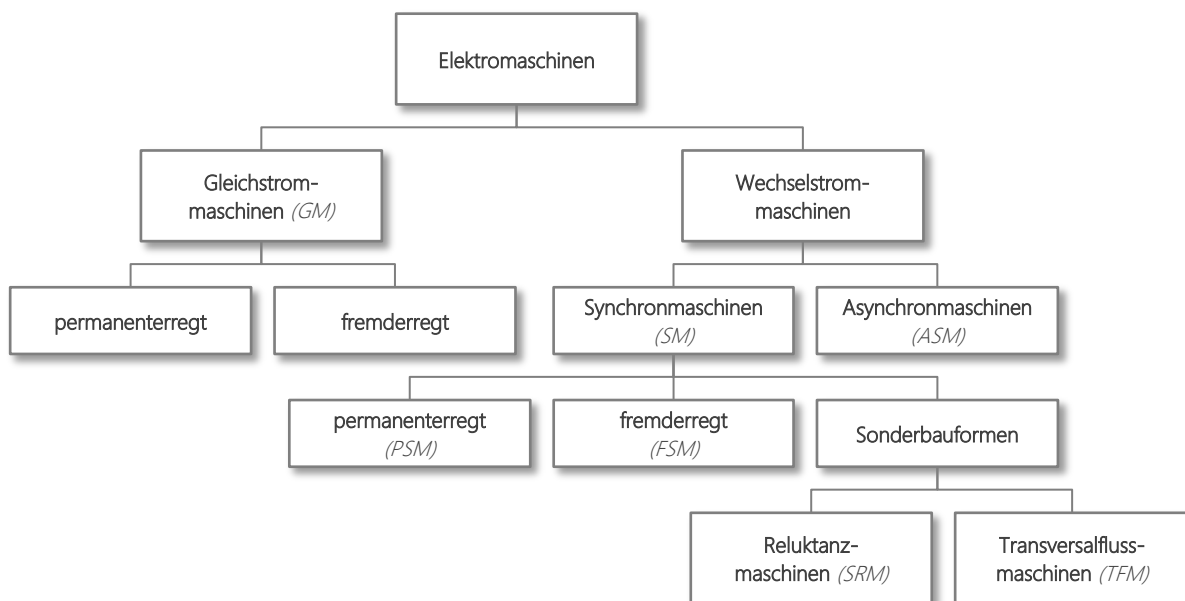


Abbildung 2.11: Bauarten von Elektromaschinen.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [61].

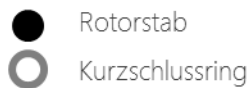
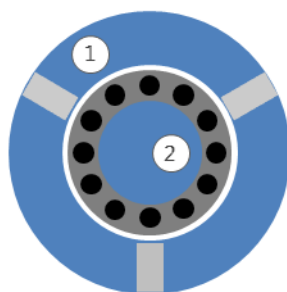
Wechselstrommaschinen lassen sich darin unterscheiden, ob die Rotation des Läufers synchron oder asynchron mit dem im Ständer erzeugten Umlauf des magnetischen Feldes erfolgt [92]. Bei beiden Maschinenarten ist der Aufbau des Ständers prinzipiell gleich und besteht aus einem Blechpaket mit Drehstromwicklung. Der Aufbau des Läufers unterscheidet sich hingegen bei Synchron- und Asynchronmaschinen.

Bei **Asynchronmaschinen** (ASM) wird in Kurzschlusswicklungen oder -ringen durch das magnetische Feld des Ständers eine Spannung induziert, wodurch ein Stromfluss in den Läuferstäben resultiert (vgl. Abbildung 2.12). Dieser Stromfluss wiederum bewirkt die Bildung eines Magnetfeldes und letztlich, in Kombination mit dem äußeren magnetischen Feld des Ständers, die rotatorische Bewegung des Läufers. Die im Stator eingezogenen Wicklungen sind dabei um 120° zueinander versetzt und werden durch einen 3-Phasen Wechselstrom des Antriebsumrichters ver-

sorgt [92]. Aufgrund des strominduzierten Magnetfeldes und des dadurch möglichen Verzichts auf Permanentmagnete, sind im Vergleich zu Synchronmaschinen höhere Drehzahlen möglich. Gleichzeitig resultiert die Bauweise allerdings in höheren Verlusten und damit in geringeren Wirkungsgraden [61].

Da das Wirkprinzip der Maschine nur funktioniert, falls ein Geschwindigkeitsunterschied zwischen der Umfangsgeschwindigkeit des Statorfeldes und des Rotors existiert, der sogenannte Schlupf, wird die Bauart dieser Maschinen als asynchron bezeichnet. Diese Bauart wird darüber hinaus auch als Induktionsmaschine bezeichnet, da das Wirkprinzip auf der elektromagnetischen Induktion beruht [92].

a) Asynchronmaschine (ASM)



b) Permanenterrregte Synchronmaschine (PSM)

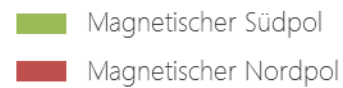
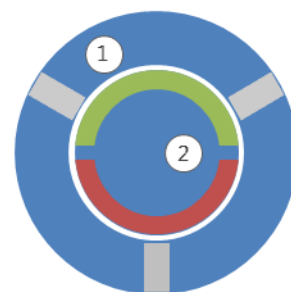


Abbildung 2.12: Prinzipdarstellung einer Asynchronmaschine (a)) sowie einer permanenterrregten Synchronmaschine (b)).

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [97] [98] [99]

Als **Synchronmaschinen** (SM) werden Elektromaschinen bezeichnet, deren Umfangsgeschwindigkeiten von Statorfeld und Rotor übereinstimmen. Hierbei entsteht das Magnetfeld des Läufers nicht durch Induktion des elektrischen Feldes des Ständers, sondern wird direkt im Rotor erzeugt, wobei sich Synchronmaschinen weiter in permanent- und fremderregte Maschinen unterteilen lassen [59].

Im Fall von **permanenterrregten Synchronmaschinen** (PSM) wird das Magnetfeld des Rotors durch einen oder mehrere Permanentmagnete erzeugt [92]. Diese technisch ausgereifte Bauart bietet bei hohen Wirkungsgraden eine hohe Leistungsdichte, hat allerdings Nachteile hinsichtlich der Produktionskosten (vgl. Abschnitt 4.2.2). Darüber hinaus lässt sich im Fehlerfall die induzierende Wirkung des Permanentmagneten nicht regeln bzw. abschalten, wodurch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen erforderlich werden [61]. Im Vergleich zu Asynchronmaschinen besitzen permanenterrregte Synchronmaschinen eine bis zu 30% geringere Gesamtmasse, was sie für den automobilen

Einsatz attraktiv macht [59]. Da die beweglichen Teile der Maschine keine Stromzuführung erfordern, wird diese Bauweise als sehr wartungsarm angesehen.

Fremderregte Synchronmaschinen (FSM) hingegen benötigen keine Magnete, sondern erzeugen das Läuferfeld durch von Gleichstrom durchflossene Wicklungen. Hierdurch entfällt die Abhängigkeit von Permanentmagneten, es wird jedoch eine dreifach höhere Kupfermenge für die Wicklungen des Elektromagneten benötigt [100]. Die größten Vorteile dieser Bauweise liegen in einem geringeren Sicherheitsrisiko im Fehlerfall sowie in der Unabhängigkeit von der Neodym- bzw. Magnetpreisentwicklung. Gleichzeitig erhöht sich bei höherer Masse und einem größeren benötigten Bauraum allerdings auch der Wartungsaufwand, da die beweglichen Teile des Rotors eine Stromzufuhr benötigen [59].

Tabelle 2.2: Vergleich unterschiedlicher Bauarten von Elektromaschinen.

	GM	PSM	FSM	ASM	SRM	TFM
Leistungsdichte	○	●	◐	◑	◑	◑
Wirkungsgrad	○	●	◐	◑	◑	◑
Maximale Drehzahl	○	◐	◐	●	●	○
Volumen	○	●	◐	◑	◑	◐
Gewicht	○	●	◐	◑	◑	◑
Kühlung	○	●	◐	◑	●	◑
Regel-/Steuerbarkeit	●	◐	◐	◑	◑	◑
Geräusch	◐	●		◐	○	
Sicherheit	◐	○	●	●	●	●
Reifegrad	●	●	○	●	◐	◐
Fertigungsaufwand	◐	○	◐	●	●	○
Kosten der Maschine	○	◐	◐	◑	●	○
Kosten des Systems	◐	◐	◐	●	◑	◐

○ *Sehr schlechte Eigenschaften* ● *Sehr gute Eigenschaften*

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [61] [59].

Neben permanent- und fremderregten Synchronmaschinen gibt es noch weitere, spezielle Bauarten, die ebenfalls eine identische Umlaufgeschwindigkeit von Ständerfeld und Läufer besitzen und daher ebenfalls den Synchronmaschinen zugeordnet werden. Hierzu zählen u. a. Reluktanz- und Transversalflussmaschinen.

Geschaltete Reluktanzmaschinen (engl. switched reluctance machine, SRM) zeichnen sich dadurch aus, dass der Rotor weder Wicklungen noch einen Kurzschlusskäfig oder Permanentmagnete besitzt, sondern vielmehr stark genutet ist und daher vom Drehfeld des Ständers mitgezogen

wird [61]. Dieser Aufbau bedingt eine aufwändigere Steuerung und Sensorik, bietet jedoch Vorteile hinsichtlich des Leistungsgewichts sowie der Produktionskosten. Der Aufbau der Maschine führt allerdings zu hohen Geräusch- und Vibrationsentwicklungen, weshalb bisher noch kein verbreiteter Einsatz als Traktionsmotor zu beobachten ist [59]. Die geschaltete Reluktanzmaschine stellt, ähnlich wie die fremderregte Synchronmaschine, im Fehlerfall kein Sicherheitsrisiko dar, da im unbestromten Zustand keine Kräfte einwirken.

Transversalflussmaschinen (TFM) besitzen eine sehr aufwändige Bauart, die eine ringförmige Wicklung des Ständers und eine damit verbundene dreidimensionale Feldführung beinhaltet. Dieser komplexe Aufbau führt zwar zu drei- bis fünffach höheren Leistungsdichten im Vergleich zu anderen Elektromaschinen, bedingt allerdings auch deutliche Mehrkosten [61]. Aufgrund des geringen Reifegrads der Technologie ist kurz- bis mittelfristig nicht mit einem automobilen Einsatz in hohen Stückzahlen zu rechnen.

Alle Motorarten lassen sich unabhängig von ihrem Funktionsprinzip als Innen- und Außenläufer herstellen [92]. Hierbei sind Außenläufer aufgrund des höheren Massenträgheitsmoments schlechter für dynamische, automobiler Anwendungen geeignet, bieten jedoch Vorteile hinsichtlich der direkten Anbindung des Rades im Fall von Radnabenmotoren.

Im Rahmen dieser Arbeit werden aufgrund ihres bereits weit verbreiteten Einsatzes in der Automobilindustrie permanenterrregte Synchronmaschinen (PSM) sowie die aufgrund zahlreicher Vorteile für den automobilen Einsatz denkbaren Bauarten der fremderregten Synchronmaschine (FSM), der Asynchronmaschine (ASM) sowie der geschalteten Reluktanzmaschine (SRM) näher betrachtet. Gleichstrommaschinen (GM) scheiden aufgrund ihrer vorhandenen Nachteile ebenso aus der näheren Betrachtung aus wie die sehr aufwendigen und noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befindlichen Transversalflussmaschinen (TFM).

Die im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten Eigenschaften der vier betrachteten Bauarten werden im Rahmen der Entwicklung des Kostenmodells von Elektromaschinen erneut aufgegriffen und zur Identifikation der Kostenauswirkungen unter Einbeziehung der technischen Unterschiede dieser Bauarten genutzt.

2.4.3 Brennstoffzellen

Brennstoffzellensysteme wandeln chemische Energie in elektrische Energie und Wärmeenergie um. Ihre lokale Emissionsfreiheit in Kombination mit einem hohen Wirkungsgrad, der in allen Leistungsbereichen in der automobilen Anwendung über dem konventioneller Diesel- und Benzinverbrennungsmotoren liegt, macht den Einsatz von Brennstoffzellen in automobilen Anwendungen attraktiv. Darüber hinaus ermöglicht die Nutzung von unter Druck stehendem Wasserstoff aufgrund des hohen Energiegehalts sowie der Möglichkeit des schnellen Nachtankens eine Reichweite bzw. eine Nutzungsmöglichkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen, wie Nutzer sie bisher aus konven-

tionellen, verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen gewohnt sind [101]. Demgegenüber stehen die heute sehr hohen Systemkosten, welche die eines Batteriefahrzeugs noch deutlich übersteigen, sowie die Notwendigkeit des Aufbaus einer Tankstelleninfrastruktur [102]. Im Folgenden wird auf den Aufbau sowie die Kosten von Brennstoffzellensystemen und deren mögliche zukünftige Entwicklung eingegangen.

2.4.3.1 Beschreibung von Aufbau und Funktionsweise

Der Aufbau eines Brennstoffzellensystems gliedert sich in die drei Hauptkomponenten des Brennstoffzellenstacks, der Systemkomponenten sowie des Wasserstofftanks. Aufgrund ihrer Schnellstartfähigkeit, ihrem im Vergleich zu anderen Brennstoffzellensystemen guten dynamischen Verhalten sowie des hohen Wirkungsgrades von bis zu 70% kommen in der automobilen Anwendung zumeist die Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC) bzw. die Polymer-Elektrolyt-Membran (Polymer Electrolyte Membrane, PEM) Brennstoffzelle zum Einsatz [103].

Der **Stack** (oder Stapel) dieses Brennstoffzellentyps ist ähnlich einer Batterie aufgebaut. Zwei Elektroden sind durch die PEM mechanisch voneinander getrennt, ermöglichen jedoch durch den Elektronenfluss über einen externen Stromkreis die Abnahme elektrischer Energie [104]. Im Gegensatz zur Batterie stellt die Brennstoffzelle jedoch kein chemisch abgeschlossenes System dar. Vielmehr werden die Energieträger, welche im Fall der PEFC Wasserstoff und Sauerstoff sind, von außen zugeführt. Als Produkt der elektrochemischen Reaktion liegt Wasser vor (vgl. Abbildung 2.13).

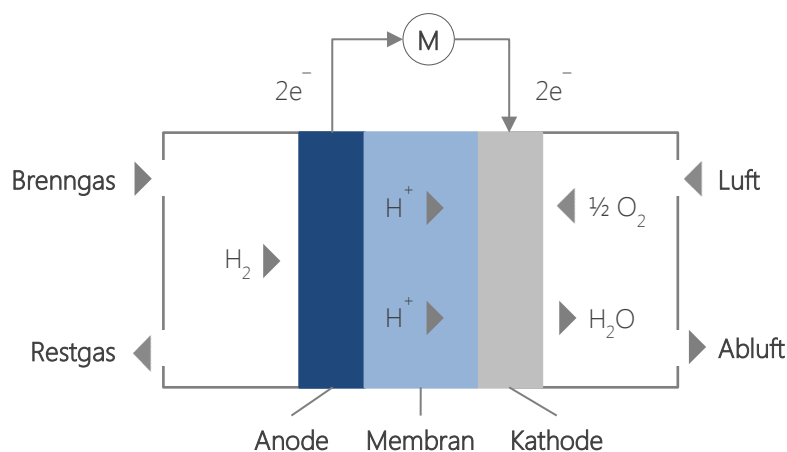


Abbildung 2.13: Funktionsweise einer Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (PEFC).

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [105] [106] [107].

An der Anode, welche die Diffusionsschicht für den Wasserstoff bildet, dissoziieren die anströmenden Wasserstoffmoleküle in Protonen und Elektronen. Die Kathode hingegen wird von Sauerstoff oder sauerstoffreichem Gas angeströmt, welches wiederum durch die aufgetragenen Katalysato-

ren ionisiert wird. Aufgrund des sich dadurch aufbauenden elektrochemischen Potentials diffundieren die Protonen durch die protonenleitende Membran (PEM) hindurch von der Anode zur Kathode. Über die anliegende elektrische Verbindung von Anode und Kathode wird durch den Elektronenfluss die elektrische Last zur Verfügung gestellt [108]. Als Katalysatormaterial wird üblicherweise Platin eingesetzt [109].

Neben dem eigentlichen Brennstoffzellenstack, in dem die elektrochemische Reaktion abläuft, werden zudem **Systemkomponenten** benötigt, welche die Befeuchtung des Stacks kontrollieren und regeln, das thermische Management überwachen, die beiden Gase Wasserstoff und Sauerstoff zur Verfügung stellen und je nach Lastanforderung dosieren, den elektrischen Fluss steuern sowie das gesamte System mittels Sensoren und Aktuatorik in seinen Systemgrenzen halten [104]. Das Packaging dieser Komponenten stellt für Automobilhersteller eine große Herausforderung dar [101]. Wie bereits im Fall der Traktionsbatterie spielen auch hier Probleme des thermischen Managements bei hohen Lastanforderungen eine große Rolle.

Die dritte Hauptkomponente eines Brennstoffzellensystems bildet der **Wasserstofftank**. Sauerstoff wird in der Regel der Luft entnommen bzw. es wird dem System direkt Luft zugeführt. Da Wasserstoff massenspezifisch zwar den 2,8-fachen Energiegehalt von Benzin aufweist, die volumetrische Energiedichte von gasförmigem Wasserstoff bei Umgebungsdruck jedoch deutlich unter der von Benzin liegt, ist zur Erreichung vergleichbarer Fahrzeugreichweiten selbst bei einem höheren Wirkungsgradniveau der Brennstoffzelle im Vergleich zum Verbrennungsmotor ein effizienter Wasserstoffspeicher erforderlich [109]. Für die automobiler Anwendung kommen unterschiedliche Systeme, wie beispielsweise Flüssigwasserstoff, Hydridspeicher in Form von salzähnlichen Hydriden oder Metallhydriden sowie Druckwasserstoff in Frage (vgl. 2.3.3) [110]. Die heute übliche Variante ist die Speicherung von Wasserstoff mittels Druckspeichern, wobei Druckniveaus von 200 bis 700 bar verwendet werden. Neben der Gefahr der Bildung von explosionsfähigen Wasserstoff-Luftgemischen ist hierbei insbesondere das hohe Druckniveau selbst nachteilig. Im Falle eines schweren Unfalls des Brennstoffzellenfahrzeugs geht von der physischen Beschädigung bzw. Zerstörung des Drucktanks eine erhebliche Gefahr, nicht nur für die Fahrzeuginsassen, aus.

2.4.3.2 Ableitung der Kosten von Brennstoffzellensystemen

Bei Brennstoffzellensystemen stellen die Elektroden mit nahezu drei Viertel der Gesamtkosten des Stacks den größten Kostentreiber dar [104]. Dies liegt hauptsächlich in der Verwendung des teuren Katalysatormaterials Platin begründet. Detaillierte Kostenmodelle zeigen, dass ähnlich wie bei den Kosten von Lithium-Ionen-Batterien die spezifische Systemauslegung einen deutlichen Einfluss auf die Kosten hat [103]. Als Bezugsgröße für die Kosten von Brennstoffzellen dient im Rahmen dieser Arbeit die Leistung.

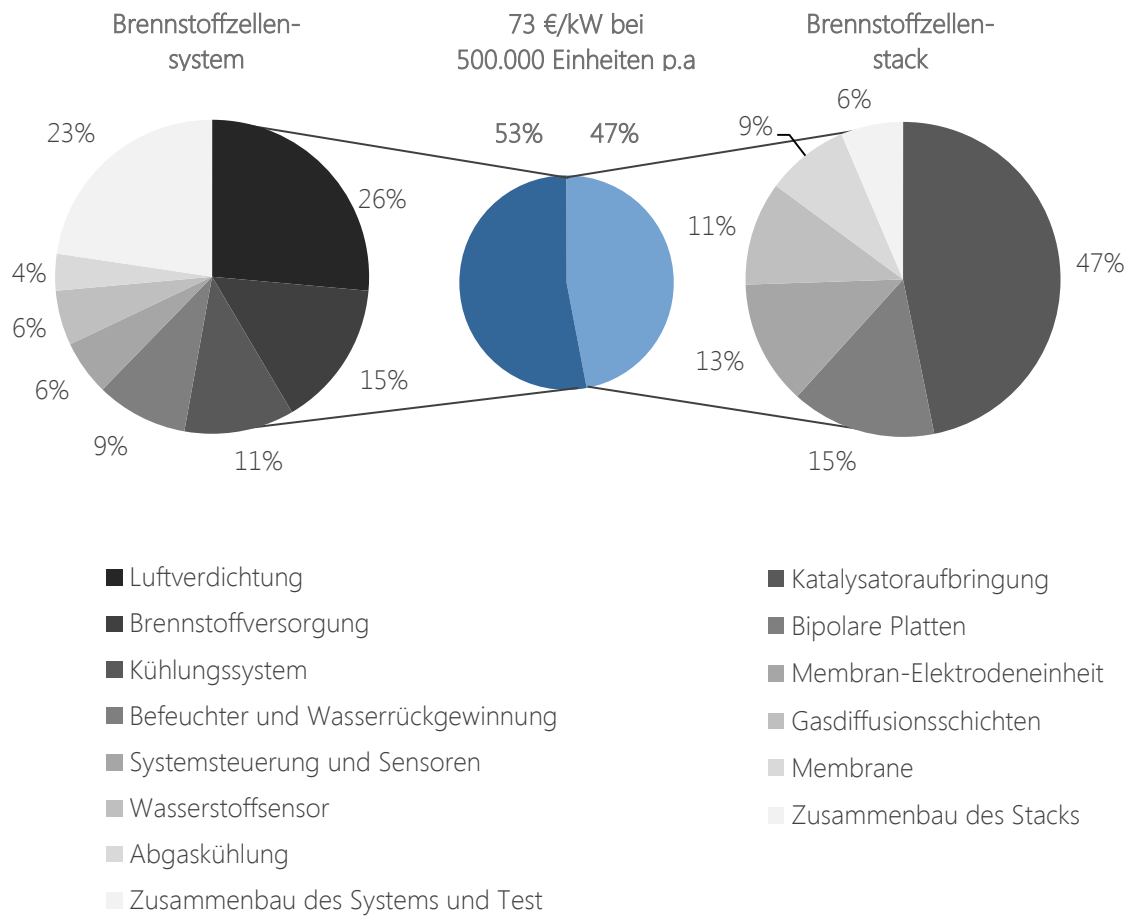


Abbildung 2.14: Aufteilung der Kosten für eine Brennstoffzelle zwischen System- und Stackkomponenten bei einer Produktion von 500.000 Einheiten pro Jahr.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [111].

Die veröffentlichten Kosten für heutige Brennstoffzellensysteme reichen bis zu 1.700 \$/kW für ein 80 kW System bei einer kumulierten Stückzahl von 40 Fahrzeugen weltweit und einer Lernrate von 79% [21]. Die Kosten des Brennstoffzellensystems ohne Wasserstofftank für ein Prototypenfahrzeug liegen mit 120.000 € bei 80 kW Dauerleistung und einem spezifischen Wert von 1.500 €/kW sogar noch höher [111]. Diese hohen Kosten liegen in der manuellen Fertigung der Prototypensysteme begründet. Bei einer Ausbringungsmenge von 200 Einheiten pro Jahr sinken die Herstellungskosten bereits auf etwa 250 €/kW für ein 80 kW System [103]. Langfristige, auf der Massenproduktion von Brennstoffzellen beruhende Kostenprognosen antizipieren deutlich niedrigere Werte. Hierbei werden Werte von 12 \$/kW bei einer Million produzierten Einheiten [112] errechnet. Das US Department of Energy sieht langfristige Zielwerte von 30 \$/kW für Brennstoffzellensysteme bei Wirkungsgraden von über 60% und Lebensdauern von 5.000 Stunden für automobiler Anwendungen vor [113]. Bei einer Massenproduktion von 500.000 Einheiten pro Jahr werden vom International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, welches in Deutschland

durch die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) vertreten wird, Herstellungskosten für Brennstoffzellensysteme von 73 \$/kW angegeben (vgl. Abbildung 2.14). Die Zielkosten der an der Arbeitsgruppe beteiligten Länder variieren hierbei deutlich. Die europäische HyWays-Studie ermittelte im Vergleich dazu minimale Produktionskosten von 41 €/kW [53], welche im Rahmen der in der EU-Coalition-Studie veröffentlichten Werte liegen. Diese errechnet Produktionskosten des Brennstoffzellensystems von 500 €/kW in 2010 und 43 €/kW in 2020 [102].

Die Kosten des Druckwasserstofftanks weisen ähnliche Bandbreiten auf. Die Bezugsgröße ist hierbei die Masse speicherbaren Wasserstoffs in kg. Die Kosten für H₂-Tanks von Prototypenfahrzeugen werden mit 10.000 € für 3,5 kg Wasserstoff bzw. 2.857 €/kg angegeben [111]. Auch hier resultieren die hohen Produktionskosten aus der Einzelanfertigung dieser Speicher. Kosten für die Massenfertigung von Druckspeichern variieren zwischen 120 €/kg [21] über 264 €/kg [53] bis hin zu 575 €/kg [114].

Diese Werte machen deutlich, dass zur Zeit eine sehr große Unsicherheit hinsichtlich der Produktionskosten und insbesondere hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung dieser Kosten besteht. Hierbei sind nicht allein Rohstoffkosten wie beispielsweise Kosten für Platin ausschlaggebend. Vielmehr ist die Entwicklung von geeigneten Produktionsprozessen und letztlich die Möglichkeit der Massenfertigung ausschlaggebend für kompetitive Kosten von Brennstoffzellensystemen.

Im Rahmen der abschließenden Szenariorechnungen werden Kosten für den Brennstoffzellenstack von 110 €/kW, für die weiteren Brennstoffzellen-Systemkomponenten von 100 €/kW sowie für den Drucktank von 575 €/kg verwendet (vgl. Kapitel 6). Diese Kosten beziehen sich dabei auf die jeweiligen Startwerte der im VECTOR21-Modell berücksichtigten Kostendegressionen.

3 Einfluss der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Grundlagen für das Verständnis der Arbeit gelegt wurden, wird im folgenden Kapitel die Wechselwirkung zwischen der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur und der Nutzbarkeit von Batteriefahrzeugen für deutsche Fahrprofile mit Hilfe eines neu entwickelten Berechnungsmodells quantifiziert.

Elektrifizierte Fahrzeugkonzepte besitzen aufgrund technischer Grenzen hinsichtlich der Energiedichte von Traktionsbatterien eine elektrische Reichweitenbeschränkung. Batterieelektrische Fahrzeuge mit der Traktionsbatterie als einziger Energiequelle werden von dieser Beschränkung am stärksten beeinflusst. Um im Rahmen der abschließenden Simulationsrechnungen den Einfluss der Verfügbarkeit von elektrischer Ladeinfrastruktur auf das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeuge abbilden zu können (vgl. Kapitel 6), ist ein methodischer Vergleich von verfügbarerer Infrastruktur und der potentiellen Eignung elektrischer Reichweiten für die Nutzer erforderlich. Hierzu werden nach einer einführenden Darstellung realer Fahrtstrecken (Kapitel 3.1) deutsche Fahrprofile mit Hilfe eines neu entwickelten Berechnungsmodells (Kapitel 3.2) Aufbauszenarien von Ladeinfrastruktur gegenübergestellt (Kapitel 3.3). Abschließend erfolgt die Interpretation der Berechnungsergebnisse (Kapitel 3.4). Den Analysen liegt dabei die deutschlandweite Primärerhebung Mobilität in Deutschland (MiD) 2008 zugrunde [3].

3.1 Vergleich realer Reichweiten

3.1.1 Quantifizierung des Einflusses der Altersstruktur

Die Gegenüberstellung der täglichen Fahrweite einzelner Nutzer und aktuell verfügbarer Elektrofahrzeuge zeigt, dass das Alter der Nutzer das Mobilitätsverhalten und damit letztlich die Eignung der Fahrzeuge als reines Elektrofahrzeug signifikant beeinflusst (vgl. Abbildung 3.1). Hierbei ist die Unterscheidung zwischen den Herstellerangaben für die maximale elektrische Reichweite der Fahrzeuge, welche nach EU-Vorgaben im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ermittelt wird, und real erzielbaren Reichweiten für das Nutzungspotential essentiell. Veröffentlichte Testwerte zeigen deutliche Abweichungen zwischen den beiden Verbrauchswerten. So betragen die Herstellerangaben der elektrischen Reichweite des Mitsubishi i-MiEV und des Smart ED 144 km

bzw. 135 km. Real gemessene Energieverbräuche zeigen jedoch signifikant abweichende Werte von 77 km bzw. 106 km für i-MiEV bzw. Smart ED [115]. Für den Nutzer und damit für die Auslegung entscheidend ist letztlich der reale Verbrauch bzw. Energiebedarf.

Der Vergleich der beiden Verbrauchswerte mit realen Fahrdaten zeigt, dass die Auslegung der Fahrzeuge die Eignung für unterschiedliche Altersklassen der Nutzer stark beeinflusst. So implizieren die NEFZ-Angaben beider Fahrzeuge eine Eignung als reines Elektrofahrzeug für über 90% der Nutzer, nahezu unabhängig vom Alter der Nutzer. Die realen Verbräuche hingegen resultieren in einem deutlich geringeren Eignungsgrad insbesondere für junge Nutzer. Für eine elektrische Reichweite von 60 km, wie sie beispielsweise von zukünftigen Range-extender Fahrzeugen erwartet wird, zeigt sich, dass diese elektrische Reichweite bereits über 90% der Tagesfahrten der 80-Jährigen abdecken kann, dieser Wert für 28-Jährige jedoch auf unter 70% fällt. Diese Beobachtung erlaubt die Schlussfolgerung, dass die Auslegung der elektrischen Reichweite der Fahrzeuge stets unter Berücksichtigung der anvisierten Nutzergruppe zu erfolgen hat. Vor diesem Hintergrund sollte die Reichweitenauslegung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte differenziert betrachtet und auf die Anforderungen der Zielgruppe abgestimmt werden.

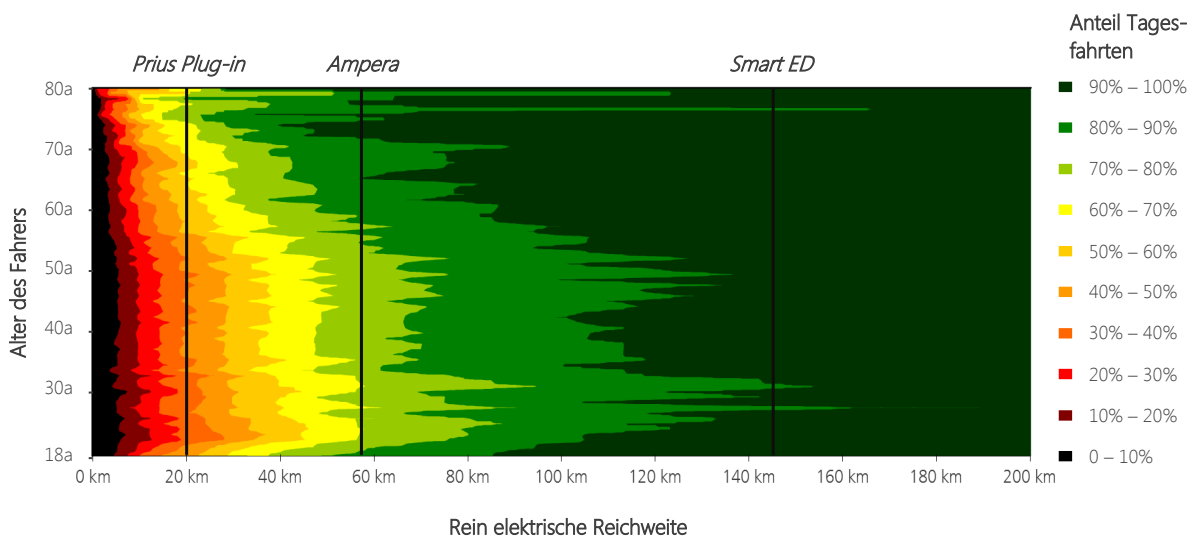


Abbildung 3.1: Vergleich der täglichen Fahrleistungen von Fahrern unterschiedlichen Alters mit den rein elektrischen Reichweiten von Elektrofahrzeugen.

Reichweitenangaben der Beispielfahrzeuge im NEFZ.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [3], Herstellerangaben: [77] [66] [116].

3.1.2 Quantifizierung des Einflusses der Siedlungsstruktur

Die Wegedatensätze aus [3] erlauben neben der Gruppierung nach dem Alter der Fahrer eine Untersuchung in Abhängigkeit des Siedlungsstrukturtyps, also des Wohnorts der Fahrer. Die Unterteilung in Kreistypen repräsentiert hierbei die nach der Einteilung des Bundesinstituts für Bau-,

Stadt- und Raumforschung (BBSR) vorgenommene Aufteilung Deutschlands in neun „differenzierte siedlungsstrukturelle Kreistypen“ [117].¹⁴ Diese Kreistypen setzen sich zusammen aus

- *Typ 1:* Kernstädte,
 - *Typ 2:* Hochverdichtete Kreise,
 - *Typ 3:* Verdichtete Kreise,
 - *Typ 4:* Ländliche Kreise,
 - *Typ 5:* Kernstädte,
 - *Typ 6:* Verdichtete Kreise,
 - *Typ 7:* Ländliche Kreise,
 - *Typ 8:* Ländliche Kreise höherer Dichte sowie
 - *Typ 9:* Ländliche Kreise geringerer Dichte.
- Agglomerationsräume

Verstädterte Räume

Ländliche Räume

Der Vergleich von realen elektrischen Reichweiten und der Zuordnung der Nutzer zu unterschiedlichen Siedlungsstrukturtypen zeigt, dass es hinsichtlich der Eignung von rein elektrischen Reichweiten für Fahrprofile aus unterschiedlichen Kreistypen nur geringe Abweichungen gibt, wobei die beiden ländlichen Gebiete hinsichtlich ihrer Tagesfahrweiten abweichen (vgl. Abbildung 3.2). Allerdings wird auch in dieser Betrachtung deutlich, dass die mit NEFZ-Verbrauchswerten verbundene Eignung und damit letztlich auch die Auslegung der Fahrzeuge deutlich von der Eignung realer Verbräuche für die Nutzerprofile abweicht.

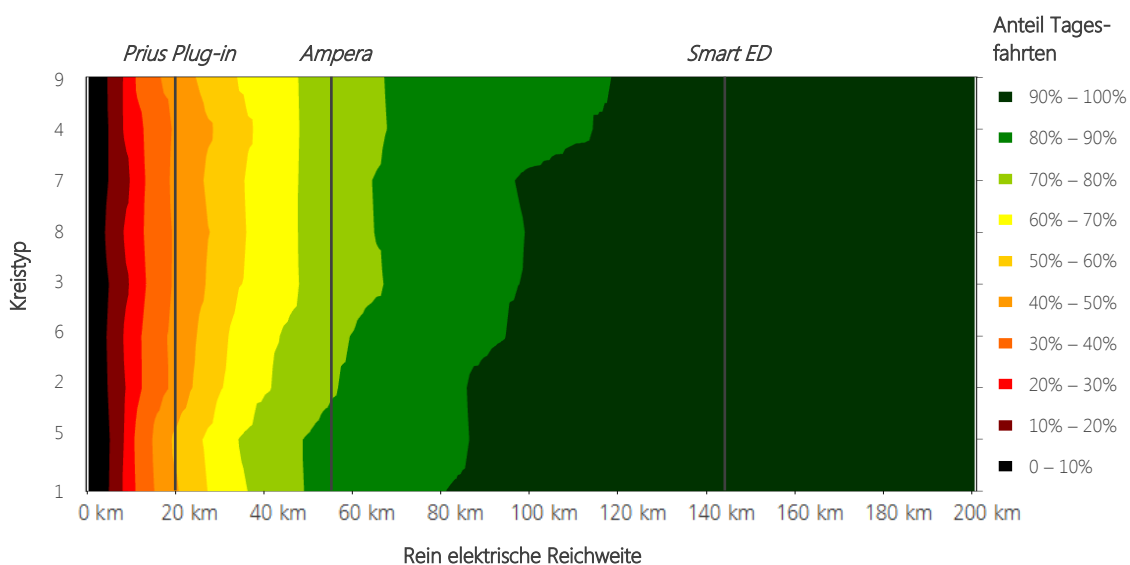


Abbildung 3.2: Vergleich der täglichen Fahrleistungen von Fahrern aus unterschiedlichen Regionstypen mit den rein elektrischen Reichweiten von Elektrofahrzeugen.

Reichweitenangaben der Beispielfahrzeuge im NEFZ.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [3], Herstellerangaben: [77] [66] [116].

¹⁴ Im Anhang befindet sich die aktuelle Aufteilung in die neun Kreistypen (vgl. Anhang A 1f.).

Hinsichtlich der Auslegung der elektrischen Reichweiten spielt also der Wohnort der Nutzer im Vergleich zur Altersstruktur eine untergeordnete Rolle, da die Differenz innerhalb der Intervalle zwischen der größten und der kleinsten Wegstrecke bei der Gruppierung nach Wohnort geringer ausfällt, als bei der Gruppierung nach Altersklasse. Hierbei lässt sich darüber hinaus schlussfolgern, dass Nutzer aus hochverdichteten Kreistypen geringere Anforderungen an die rein elektrische Reichweite der Fahrzeuge besitzen.

3.2 Entwicklung des Berechnungsmodells

Neben der Summe der Tagesfahrtstrecken beeinflusst die Verfügbarkeit geeigneter Ladeinfrastruktur die technische Eignung von Elektrofahrzeugen. Die Möglichkeit, zwischen zwei Fahrten nachzuladen, erhöht die potentielle rein elektrische Reichweite der Fahrzeuge. Im Sinne der integrierten Bewertung der Fahrzeugauslegung hat also auch die Entwicklung von Ladeinfrastruktur als systemisches Merkmal einen Einfluss auf die Eignung von elektrifizierten Fahrzeugkonzepten für unterschiedliche Fahrprofile.

Um den Einfluss von verfügbarer Ladeinfrastruktur auf das Nutzungspotential von Elektrofahrzeugen zu quantifizieren, wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, welches es ermöglicht, die verfügbare elektrische Reichweite mit Nutzungsprofilen und der Infrastrukturentwicklung zu kombinieren und somit die technische Eignung der Fahrzeugkonzepte für diese Nutzungsprofile zu bestimmen. Die technische Eignung wird dabei als die Darstellbarkeit der Tagesfahrt mit Hilfe eines Batteriefahrzeugs definiert, d. h. die Batterie des Batteriefahrzeugs muss zu jedem Zeitpunkt ausreichend geladen sein, um die Fahrstrecke zu absolvieren. Hierzu wurde aufbauend auf der Datenbasis Mobilität in Deutschland ein Algorithmus entwickelt, welcher jedes einzelne Fahrprofil der Erhebung betrachtet. Dabei wird für jedes Fahrzeug zunächst antizipiert, dass es als rein elektrisches Fahrzeug ausgelegt ist. In Abhängigkeit des hinterlegten Fahrprofils werden im Anschluss der maximal mögliche sowie der minimal zulässige Beladungszustand der Batterie in stündlicher Auflösung für den gesamten Tag errechnet (vgl. Abbildung 3.3). Hierzu werden reale Grenzen des Entladehubs von Lithium-Ionen-Batterien berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.1).

Die Verfügbarkeit eines freien Ladeplatzes und damit die Möglichkeit des Netzkontakts im Anschluss an eine Fahrt ist in dem entwickelten Modell an die Art bzw. den Zweck des zurückgelegten Weges geknüpft. Dabei werden in der Datenbasis zehn Wegzwecke unterschieden, auf die das Modell zurückgreift, wobei jedem Wegzweck eine Netzkontaktwahrscheinlichkeit zugeordnet wird [3]. Ist das Fahrzeug unterwegs, so ist die Netzkontaktwahrscheinlichkeit per Definition gleich 0. Durch die Festlegung der Wahrscheinlichkeiten für einen Netzkontakt lassen sich unterschiedliche Infrastrukturszenarien simulieren, wobei nicht nur zwischen den Wegzwecken selbst

sondern auch hinsichtlich des Standorts des Fahrzeugs im Sinne der Siedlungsstrukturtypen unterschieden werden kann (vgl. Abschnitt 3.1.2).

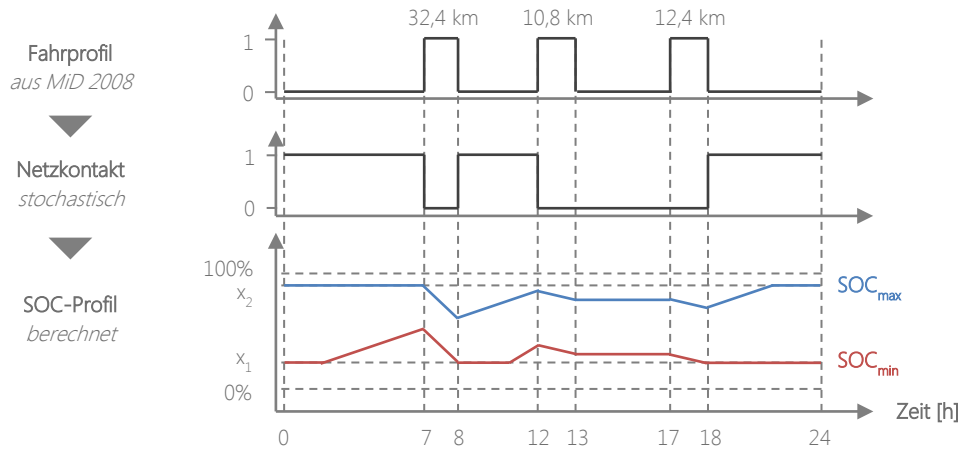


Abbildung 3.3: Berechnungsschema zur Ermittlung der minimalen und maximalen technischen Grenzen des Batteriebeladungsprofils.

Das Modell errechnet durch die Kombination von jeweiligem Fahrprofil und den dazugehörigen Netzkontaktwahrscheinlichkeiten die minimalen und maximalen Beladungszustände der Traktionsbatterie des Fahrzeugs. Der maximale Beladungszustand der Batterie (SOC_{max}) stellt dabei die technisch mögliche Grenze des oberen SOC-Levels der Batterie dar. Hierzu wird angenommen, dass die Batterie unverzüglich geladen wird, sobald das Fahrzeug an das Stromnetz angeschlossen ist. Dieser Fall stellt somit die Ladestrategie eines „unkontrollierten Ladens“ dar. Für den minimalen Beladungszustand (SOC_{min}) wird antizipiert, dass die Traktionsbatterie nach der letzten Tagesfahrt bis zu ihrer minimal zulässigen Entladungstiefe (x_1) entladen ist. Hierzu wird die ex-ante Information der Datenbasis über die Anzahl und die Gesamtfahrtstrecke der Tagesfahrten verwendet. Somit stellt auch dieser minimale Beladungszustand eine technisch mögliche Grenze dar, wobei das minimal zulässige SOC-Level auch als Sicherheitspuffer der Nutzer interpretiert werden kann. Mathematisch können die Berechnungsalgorithmen der beiden Beladungsgrenzen rekursiv durch

$$SOC_{min}(t) = SOC_{min}(t+1) + E_{Fahren}(t) - E_{Laden}(t) \geq SOC_{min, minimal} \quad \forall t \in \{0..24\} \quad \text{Formel 3.1}$$

$$\text{u. d. N.} \quad SOC_{min}(t_{\text{letzt}}) = SOC_{min, minimal}$$

$$SOC_{min}(t=0) = SOC_{min}(t=24)$$

mit SOC_{min} : untere Grenze des möglichen Beladungszustands

t: Uhrzeit in stündlicher Auflösung

t_{letzt} : Zeitpunkt der letzten Fahrt des Tages

E_{Fahren} : Verbrauchte Energie des Fahrzeugs beim Fahren

E_{Laden} : Aufgeladene Energie bei Netzkontakt

und

$$\text{SOC}_{\max}(t+1) = \text{SOC}_{\max}(t) - E_{\text{Fahren}}(t+1) + E_{\text{Laden}}(t+1) \leq \text{SOC}_{\max, \text{maximal}} \quad \forall t \in \{0..24\} \quad \text{Formel 3.2}$$

u. d. N. $\text{SOC}_{\max}(t_{\text{erst}}) = \text{SOC}_{\max, \text{maximal}}$

$$\text{SOC}_{\max}(t=0) = \text{SOC}_{\max}(t=24)$$

mit SOC_{\max} : obere Grenze des möglichen Beladungszustands

t: Uhrzeit in stündlicher Auflösung

t_{erst} : Zeitpunkt der ersten Fahrt des Tages

E_{Fahren} : Verbrauchte Energie des Fahrzeugs beim Fahren

E_{Laden} : Aufgeladene Energie bei Netzkontakt

beschrieben werden. Der Beladungszustand $\text{SOC}(t)$ gibt dabei den Wert an, der am Anfang der Stunde vorliegt, wobei die berechneten Zeitschritte eine stündliche Auflösung besitzen. Der durch das Fahren verursachte Energieverbrauch bzw. die Beladung der Batterie beziehen sich auf die Energie, welche innerhalb der jeweiligen Stunde der Batterie entnommen bzw. zugeführt wird.

Die mögliche Eignung eines Tagesfahrprofils für ein rein elektrisches Fahrzeugkonzept wird somit dadurch beeinflusst, ob das jeweilige Fahrprofil mit der gewählten Fahrzeugauslegung, also der Batteriegröße und des Energieverbrauchs, komplettiert werden kann oder nicht. Sollte die elektrische Reichweite des Fahrzeugs in Kombination mit der Möglichkeit nachzuladen nicht ausreichen, um die in der Datenbasis hinterlegte Wegstrecke zu bewältigen, wird das Fahrprofil nicht als mögliches Nutzungsprofil für ein Elektrofahrzeug interpretiert.

Im Anschluss an die individuelle Berechnung der Batterienutzungsprofile für jedes einzelne Fahrzeug lässt sich durch Auswertung aller hinterlegten Fahrprofile und deren Berechnungsergebnisse bestimmen, welcher Anteil der Fahrprofile statistisch für die Nutzung von Elektrofahrzeugen aus technischer Sicht geeignet ist. Dadurch wird eine Interpretation der technischen Eignung der Fahrzeuge in Abhängigkeit der elektrischen Reichweite und der Entwicklung von Ladeinfrastruktur ermöglicht.

3.3 Analyse des Einflusses von Ladeinfrastruktur

Auf Basis des neu entwickelten Berechnungsmodells lässt sich durch geeignete Variation der Eingangsparameter ermitteln, inwiefern Ladeinfrastruktur und elektrische Reichweite die technische Eignung der Fahrzeuge für deutsche Fahrprofile beeinflussen. Wie eingangs definiert, wird die technische Eignung dabei als die Darstellbarkeit des Fahrprofils mit einem Batteriefahrzeug verstanden (vgl. Abschnitt 3.2).

Um zunächst den oberen Grenzwert der technischen Eignung bestimmen zu können, wurde eine Wahrscheinlichkeit von 1 für das Finden eines freien Ladeplatzes nach jeder Fahrt angenommen, d. h. es wird davon ausgegangen, dass eine Ladeinfrastruktur von 100% zur Verfügung steht.

Gleichzeitig wurde die elektrische Reichweite der Fahrzeuge systematisch variiert, wodurch Aussagen hinsichtlich einer möglichen Auslegung der Fahrzeuge möglich werden. Die zur Verfügung stehende Ladeleistung stimmt dabei mit dem Leistungslevel gewöhnlicher Hausanschlüsse überein und beträgt 3,7 kW [118].

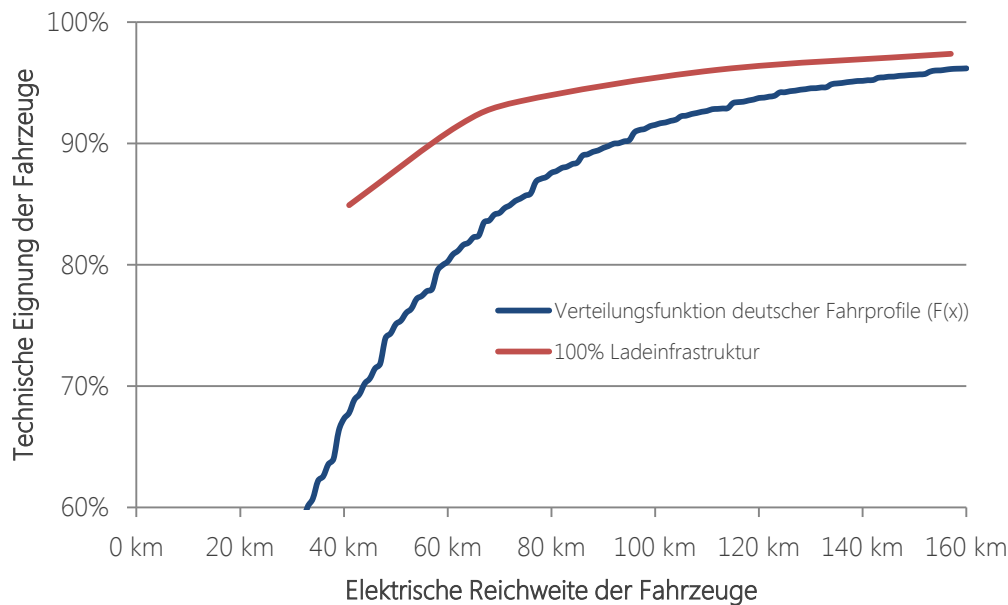


Abbildung 3.4: Technische Eignung der Fahrprofile für Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit der elektrischen Reichweite für den Sonderfall einer vollständigen Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur.

Es zeigt sich, dass die resultierende Kurve der technischen Eignung zwar über der Verteilungsfunktion der täglichen Fahrtweiten liegt, jedoch signifikant von einer 100%-igen Eignung abweicht (vgl. Abbildung 3.4). Auch für elektrische Reichweiten von über 150 km resultiert also selbst die Möglichkeit, nach jeder Fahrt nachzuladen, nicht in einer 100%-igen Eignung der Fahrprofile für Elektrofahrzeuge. Darüber hinaus wird deutlich, dass insbesondere für elektrische Reichweiten unter 100 km signifikante Abweichungen zwischen den beiden Kurven bestehen. Eine detaillierte Analyse des Einflusses von Ladeinfrastruktur auf die technische Eignung von Fahrzeugkonzepten für deutsche Nutzerprofile erscheint vor diesem Hintergrund notwendig. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, wurden drei Szenarien definiert, die jeweils unterschiedliche Ausbaustufen von Ladeinfrastruktur berücksichtigen.

3.3.1 Szenario 1: Identische Entwicklung der Ladeinfrastruktur für alle Siedlungstypen

Das Modell erlaubt die Variation der Netzkontaktwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit des Siedlungsstrukturtyps. Das erste Szenario unterstellt jedoch zunächst eine identische Entwicklung der

Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur für alle Siedlungstypen, d. h. es wird beispielsweise nicht hinsichtlich der Lademöglichkeiten in hochverdichteten Agglomerationsräumen und den Lademöglichkeiten in ländlichen Gebieten differenziert. Hierbei wurden drei Ausbaustufen der Ladeinfrastruktur definiert, die sich durch die Wahrscheinlichkeit einen freien Ladeplatz im Anschluss an eine Fahrt zu finden, unterscheiden. Zum Vergleich wurde das Extremszenario der 100%-igen Netzkontaktwahrscheinlichkeit ebenfalls berücksichtigt (vgl. Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Definierte Netzkontaktwahrscheinlichkeiten im ersten Ladeinfrastrukturszenario.

Netzkontaktwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Wegzwecks [%]	Arbeit	Ausbildung	Geschäftlich	Begleitung	Privat	Einkauf	Freizeit	Sonstige	Nach Hause	Gewichteter Durchschnitt
Ausbaustufe 1	10	10	0	10	5	5	10	0	10	9
Ausbaustufe 2	39	39	6	57	8	43	22	6	57	44
Ausbaustufe 3	60	60	10	90	10	70	30	10	90	68
Vollst. Infrastr.	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Definition Wegzwecke gemäß [3].

Die Berechnungen zeigen, dass die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur deutlichen Einfluss auf die technische Eignung von Elektrofahrzeugen hat (vgl. Abbildung 3.5). Dabei hat die Erhöhung der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur größeren Einfluss als die Erhöhung der Reichweite. Praktisch bedeutet dies, dass eine Erhöhung der elektrischen Reichweite von 70 km auf 109 km (Zuwachs von 55%) eine geringere Auswirkung auf die technische Eignung der Fahrzeug hat, als eine Erhöhung der Netzkontaktwahrscheinlichkeit von 44% auf 68% (ebenfalls Zuwachs von 55%). Darüber hinaus wird deutlich, dass eine durchschnittliche Verfügbarkeit von 68% in Ausbaustufe 3 die Verteilungsfunktion der täglichen deutschen Fahrtstrecken nahezu abbildet. Ausbaustufe 2 stellt dabei eine Implementierung von Ladeinfrastruktur dar, welche in den nächsten Jahren erreicht werden kann. Insbesondere die Möglichkeit, auf der Arbeits- bzw. Ausbildungsstelle nachladen zu können, ist heute noch nicht in diesem Maße gegeben. Ausbaustufe 3 repräsentiert eine Entwicklungsstufe, wie sie mittel- bis langfristig denkbar ist.

Die Detailbetrachtung der Netzkontaktwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit des Wegzwecks impliziert die Hypothese, dass die Möglichkeit Elektrofahrzeuge zu Hause zu laden signifikanten Einfluss auf die technische Eignung der Fahrzeuge für deutsche Fahrprofile hat. Um diese Vermutung zu bestätigen wurden zwei weitere Szenarien definiert.

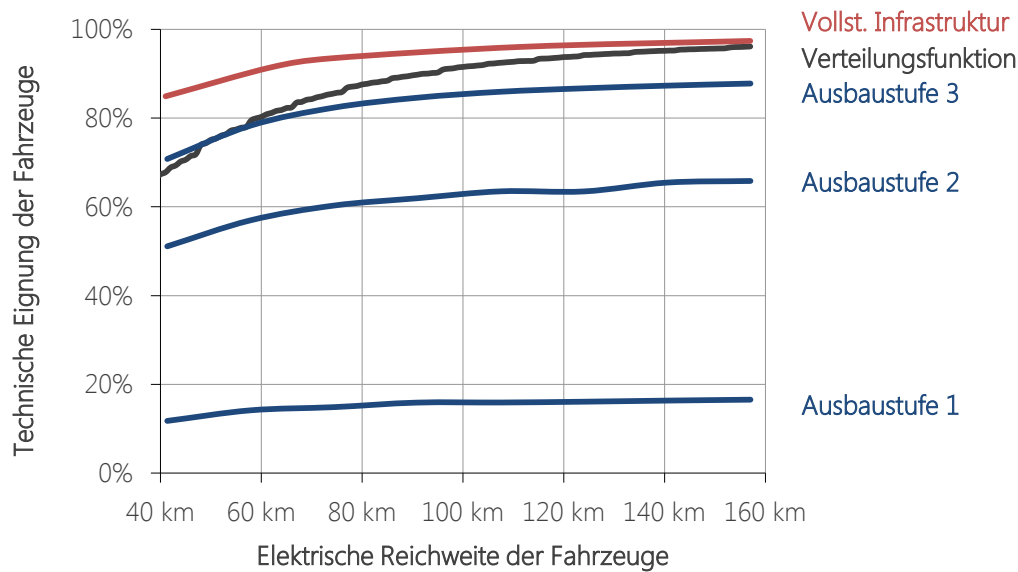


Abbildung 3.5: Technische Eignung der Fahrzeuge für deutsche Fahrprofile in Abhängigkeit der elektrischen Reichweite im ersten Ladeinfrastrukturszenario („Identische Entwicklung der Regionstypen“).

3.3.2 Szenario 2: Unterschiedliche Entwicklung der Siedlungstypen

Zunächst wird aufbauend auf dem ersten Szenario in diesem zweiten Szenario eine unterschiedliche Entwicklung der Ladeinfrastruktur in den Siedlungstypen antizipiert. Hierzu werden die Netzkontaktwahrscheinlichkeiten für das Laden zu Hause ceteris paribus in Abhängigkeit des Siedlungstyps variiert. Es wird (in Ausbaustufe 3) unterstellt, dass Fahrzeuge in ländlichen Gebieten (Typ 7) mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% anschließend an die Fahrten nach Hause auf dem gleichen Platz, z. B. in einer Garage oder direkt vor der Haustür, abgestellt werden. Für Fahrzeuge in hochverdichteten Zentren hingegen wird davon ausgegangen, dass dies nur für jedes zweite Fahrzeug, also nur in 50% der Fälle zutrifft. Die Netzkontaktwahrscheinlichkeiten der restlichen Siedlungstypen liegen zwischen diesen beiden Werten (vgl. Tabelle 3.2).

Die Analyse der Simulationsergebnisse bestätigt zum einen die Hypothese, dass das Laden zu Hause einen signifikanten Einfluss auf die technische Eignung der Elektrofahrzeuge hat (vgl. Abbildung 3.6). Dies zeigt sich am Vergleich der dritten Ausbaustufe des zweiten Szenarios mit der zweiten Ausbaustufe des ersten Szenarios. Die resultierende Eignung der Fahrzeuge liegt trotz eines vergleichbaren gewichteten Durchschnittswertes von Infrastrukturverfügbarkeit von 45% bzw. 44% im zweiten Szenario deutlich über der des ersten Szenarios. Die Verteilung der möglichen Netzkontakte nach Art der Wegzwecke und damit die Art und Weise des Ausbaus von Ladeinfrastruktur haben also einen signifikanten Einfluss auf die technische Eignung der Fahrzeuge für deutsche Mobilitätsmuster. Es ist also nicht entscheidend, ob Ladeinfrastruktur aufgebaut wird, sondern vielmehr wo dieser Aufbau stattfindet, wobei die Möglichkeit des Ladens am Wohnort

den größten Einfluss hat. Übrige Standorte von Ladestationen haben hingegen nur untergeordneten Einfluss.

Tabelle 3.2: Definition Netzkontaktwahrscheinlichkeiten für Wegzweck „nach Hause“ im zweiten Ladeinfrastrukturszenario.

Netzkontaktwahrscheinlichkeit für Wegzweck „nach Hause“ in Abhängigkeit des Siedlungsstrukturtyps [%]	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6	Typ 7	gewichteter Durchschnitt
Ausbaustufe 1	10	15	20	30	40	70	80	19
Ausbaustufe 2	33	41	46	53	60	82	89	33
Ausbaustufe 3	50	60	65	70	75	90	95	45
Vollständige Infrastruktur	100	100	100	100	100	100	100	100

Alle restlichen Netzkontaktwahrscheinlichkeiten betragen 0.

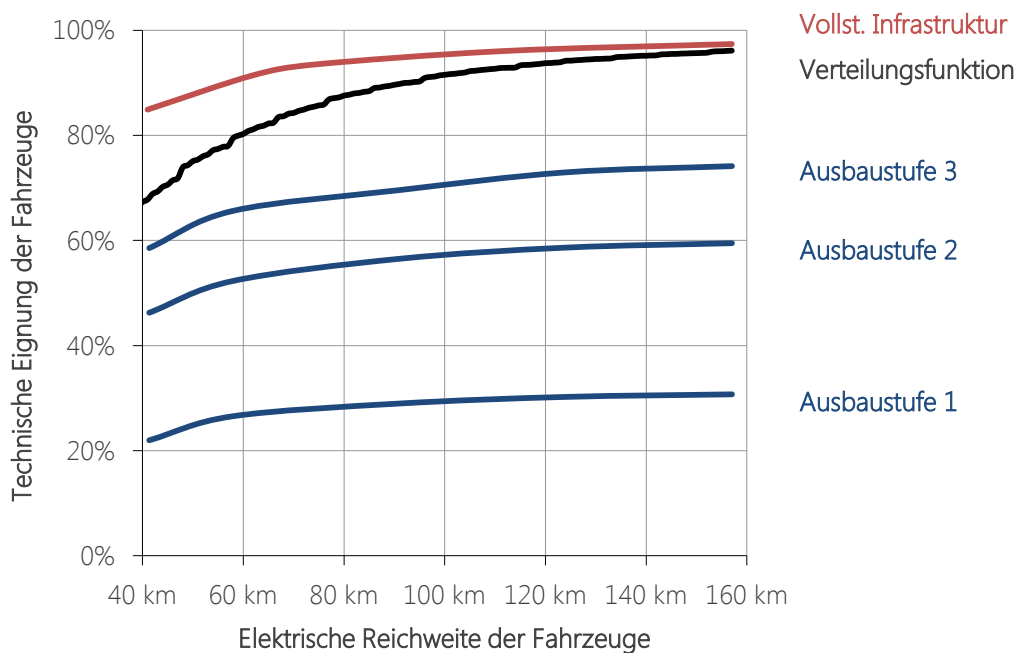


Abbildung 3.6: Technische Eignung der Fahrzeuge für deutsche Fahrprofile in Abhängigkeit der elektrischen Reichweite im zweiten Ladeinfrastrukturszenario („Unterschiedliche Entwicklung der Siedlungstypen“).

Zum anderen zeigt die Detailanalyse der Berechnungsergebnisse, dass ländliche Gebiete nicht zwangsläufig schlechter für Elektrofahrzeuge geeignet sind als Städte, sondern im Gegenteil auf-

grund der Möglichkeit einen festen Stellplatz vorzufinden, sogar eine höhere technische Eignung für Elektrofahrzeuge aufweisen. Dieses Ergebnis wird im Sinne der integrierten Bewertung durch die Beobachtung des vorangegangenen Kapitels, dass die täglichen Fahrtstrecken in Deutschland nur marginale Abweichungen in Abhängigkeit des Siedlungsstrukturtyps aufweisen, bestätigt (vgl. Abschnitt 3.1.2).

3.3.3 Szenario 3: Laden ausschließlich zu Hause

Um den Zusammenhang zwischen der technischen Eignung der Fahrzeuge und der Möglichkeit zu Hause nachzuladen zu untersuchen, wird ein drittes Szenario definiert, welches sich in drei Ausbaustufen auf die Netzkontaktwahrscheinlichkeit des Ladens zu Hause konzentriert und alle anderen Wahrscheinlichkeiten als nicht gegeben antizipiert. Dieses Szenario unterstellt also ein rationales Verhalten potentieller Käufer von Elektrofahrzeugen, das Fahrzeug nur zu beschaffen, falls auch eine Lademöglichkeit zu Hause besteht und stellt somit keinesfalls ein Extremszenario dar. Da es sich beim Wegzweck „Begleitung“ gemäß der zu Grunde liegenden Definition (vgl. Erhebung „Mobilität in Deutschland 2008“, [3]) hauptsächlich um Fahrten zu einem bestimmten Ziel und direkt wieder zurück handelt, wurde diese Netzkontaktwahrscheinlichkeit analog des Wegzwecks „nach Hause“ angepasst (vgl. Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Definition Netzkontaktwahrscheinlichkeiten im dritten Ladeinfrastrukturszenario.

Netzkontaktwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Wegzwecks [%]	Arbeit	Ausbildung	Geschäftlich	Begleitung	Privat	Einkauf	Freizeit	Sonstige	Nach Hause	gewichteter Durchschnitt
Ausbaustufe 1	0	0	0	5	0	0	0	0	5	3
Ausbaustufe 2	0	0	0	61	0	0	0	0	61	32
Ausbaustufe 3	0	0	0	100	0	0	0	0	100	53
Vollst. Infrastr.	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Definition Wegzwecke gemäß [3].

Auch die Berechnungsergebnisse dieses dritten Szenarios bestätigt die Hypothese, dass die Möglichkeit des Ladens zu Hause signifikanten Einfluss auf die technische Eignung von Elektrofahrzeugen hat (vgl. Abbildung 3.7). Die Modellergebnisse zeigen, dass eine 100%-ige Netzkontaktwahrscheinlichkeit zu Hause bereits nahezu die Verteilungsfunktion der deutschen Wegstrecken abbildet. Insbesondere für Distanzen unter 80 km und damit für nahezu 9 von 10 Fahrten bestätigt sich diese Beobachtung. Die Abweichung der Kurve von der Verteilungsfunktion sagt aus, dass nicht

alle Fahrzeuge am Stichtag zu Hause abgestellt wurden und somit auch keine Möglichkeit hatten, dort nachzuladen. Auch hier zeigt sich also, dass der Ort der Errichtung von Ladeinfrastruktur wesentlichen Einfluss auf die technische Eignung von Elektrofahrzeugen hat. Überlegungen, einen öffentlichen Ladeinfrastrukturaufbau zu forcieren können also bestenfalls eine psychische Wirkung entfalten, aus technischer Sicht ist es jedoch zumindest im Anfangsstadium der Einführung von Elektrofahrzeugen hinreichend, eine Lademöglichkeit am Wohnort zu garantieren.

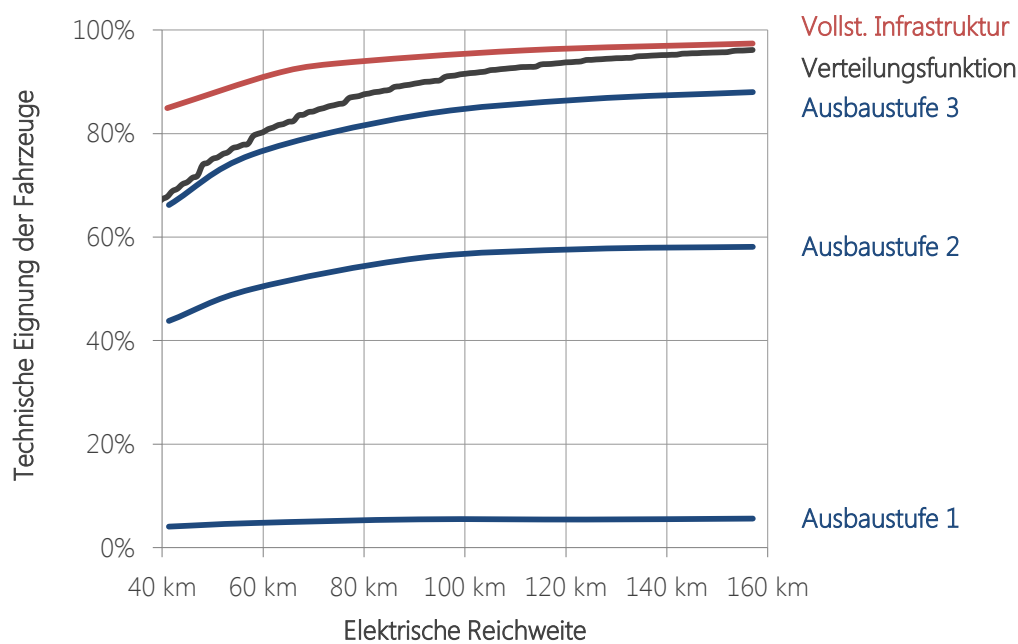


Abbildung 3.7: Technische Eignung der Fahrzeuge für deutsche Fahrprofile in Abhängigkeit der elektrischen Reichweite im dritten Ladeinfrastrukturszenario („Laden ausschließlich zu Hause“).

3.4 Interpretation der Ergebnisse

Durch die Gegenüberstellung von Nutzerverhalten und der elektrischen Reichweite im Kontext der Ladeinfrastrukturentwicklung lässt sich das in der gesellschaftlichen Diskussion häufig angeführte Problem der Reichweitenbeschränkung von Elektrofahrzeugen relativieren. Zwar liegen die im Elektrofahrzeug mitgeführte Energiemenge deutlich unter und die Betankungs- bzw. Nachladezeit deutlich über der vergleichbarer verbrennungsmotorisch betriebener Fahrzeuge, jedoch ist die technische Eignung heute bereits auf dem Markt verfügbarer Batteriefahrzeuge mit einer realen Reichweite von 100 km für über 85% der Tagesfahrprofile unter realistischen Annahmen hinsichtlich der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur gegeben. Dies zeigen beispielsweise die Berechnungsergebnisse im ersten und dritten Szenario in der dritten Ausbaustufe. Es wird deutlich, dass die Möglichkeit, zu Hause das Fahrzeug nachzuladen, signifikanten Einfluss auf die technische Eignung

der Fahrzeuge für die Nutzerprofile hat. Dies bedeutet, dass zu Beginn der Markteinführung von elektrifizierten Antriebssträngen aus technischer Sicht nicht zwangsläufig eine öffentliche Ladeinfrastruktur benötigt wird, sondern vielmehr ein Fokus auf die Möglichkeit am Wohnort zu laden gelegt werden sollte.

Darüber hinaus zeigt sich in allen berechneten Szenarien, dass die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur einen signifikant größeren Einfluss auf die technische Eignung von rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen hat als die Vergrößerung der elektrischen Reichweite der Fahrzeuge selbst. Es wird deutlich, dass reale elektrische Reichweiten über 150 km nur noch marginalen Einfluss auf die technische Eignung haben und somit nur noch begrenzten Mehrwert liefern.

Die Variation der Lademöglichkeit in Abhängigkeit des Siedlungsstrukturtyps im zweiten Szenario zeigt zudem, dass ländliche Gebiete nicht zwangsläufig schlechter für Elektrofahrzeuge geeignet sind, sondern vielmehr aufgrund der häufig gegebenen Möglichkeit, das Fahrzeug täglich an der gleichen Stelle zu parken und nachzuladen in Kombination mit den nur marginal längeren täglichen Fahrtstrecken einen Vorteil gegenüber hochverdichteten Innenstadtgebieten aufweisen.

4 Produktionskosten von Traktionsbatterien und Elektromaschinen

Im folgenden Kapitel werden die Technologien von Traktionsbatterien (Kapitel 4.1) sowie von Elektromaschinen (Kapitel 4.2) auf Basis ihrer Produktions- und Anschaffungskosten mit Hilfe von zwei neu entwickelten Berechnungsmodellen bewertet. Dieser Kostenansatz wird an ausgewählten Stellen, insbesondere im Hinblick auf neuartige Technologien, um die Betrachtung der notwendigen Ressourcen und damit verbundenen, potentiellen Kostensteigerungen erweitert.

4.1 Berechnung der Produktionskosten von Traktionsbatterien

4.1.1 Identifikation der Fertigungsprozesse

Im Folgenden werden zur Ermittlung der heutigen Produktionskosten von Lithium-Ionen-Batterien sowie deren möglicher zukünftiger Entwicklung, die notwendigen Produktionsschritte zur Zell-, Modul- und Packherstellung einführungsbetrachtend betrachtet.

4.1.1.1 Zellherstellung

Die Zellherstellung erfordert höchste Präzision und Reinheit über alle Produktionsschritte hinweg. Bereits kleinste Mengen von Verunreinigungen – insbesondere von Wasser – innerhalb der Zelle können schwerwiegende Folgen bis hin zum Batterie-Brand verursachen. Darüber hinaus ist es erforderlich, die Reproduzierbarkeit des Prozesses sicherzustellen. Aufgrund der Empfindlichkeit von Lithium-Ionen-Zellen hinsichtlich ihres Spannungsniveaus sowie der beaufschlagten Stromstärke ist es im Hinblick auf die Verschaltung von Zellen zu einem Modul essentiell, möglichst gleichartige Zellen zu verwenden [18].

Die ersten Schritte der Zellherstellung bilden das Mischen der Kathoden- und Anodenmaterialien und die Beschichtung der Kupfer- bzw. Aluminiumleiterfolien (vgl. Tabelle 4.1). Bereits hier ist die spätere Verwendung der Zelle zu berücksichtigen: Hochleistungszellen erfordern geringere Elektrodenstärken von etwa 30 μm , wohingegen Hochenergiezellen eine dickere Beschichtung von etwa 150 μm nötig machen [119]. Die geringere Elektrodenstärke von Hochleistungszellen ermöglicht einen schnelleren Ladungsaustausch und damit eine höhere Stromstärke, was bei gleichem Spannungslevel zu einer höheren Leistung führt. Eine größere Schichtdicke führt hingegen zu mehr

interkalierbaren Lithium-Ionen und damit zu einem größeren Energiegehalt. Bei der Produktion von sogenannten Bi-Zellen ist es notwendig, die Beschichtung doppelseitig aufzutragen [120]. Nach dem Trocknen und dem anschließenden Kalandern der Elektroden, welches eine einheitliche Schichtdicke sicherstellt, werden die bisher kontinuierlichen Kupfer- bzw. Aluminiumfolien auf ihre benötigte Größe zurechtgeschnitten. Kritische Prozessschritte stellen dabei das Beschichten und das Kalandern dar, da hier die Funktionsweise sowie die Lebensdauer der Zelle durch die gleichmäßige Partikelverteilung sowie identische Schichtdicken maßgeblich beeinflusst wird [19].

Tabelle 4.1: Fertigungsschritte der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen.

Kathoden-/Anodenherstellung		Zellherstellung	
1.	Mischen	6.	Wickeln / Stapeln
2.	Beschichten	7.	Kontakte schweißen
3.	Trocknen	8.	Zusammenfügen
4.	Kalandern	9.	Befüllen mit Elektrolyt
5.	Schneiden	10.	Zusätzliche Bauteile hinzufügen
		11.	Zelle schließen
		12.	Zelle laden und formieren
		13.	Zelle testen

Quelle: [18] [80] [19].

Nachdem die einzelnen Elektroden hergestellt wurden, werden diese zu einer Zelle zusammengefügt. Der erste Schritt besteht dabei im Wickeln bzw. Stapeln der Folien. Bei der Produktion von Bi-Zellen werden die Elektrodenfolien in Kombination mit der Separatorfolie so gestapelt, dass die Reihenfolge Anode, Separator, Kathode, Separator, Anode, usw. entsteht. Durch den Verzicht auf eine mechanische Trennung der einzelnen galvanischen Systeme ergeben sich so Vorteile hinsichtlich der Leistungs- und Energiedichten, wengleich der Produktionsschritt der Folienbeschichtung sich durch den beidseitigen Auftrag der Elektrodenmaterialien wie zuvor beschrieben erschwert [120].

Nachdem die elektrischen Anschlüsse angeschweißt wurden, kann die Befüllung mit dem flüssigen Elektrolyt erfolgen. Dieser Produktionsschritt ist sehr aufwendig und langsam, da eine gleichmäßige Befüllung der gesamten Zelle sichergestellt werden muss. Hieran anschließend werden die Zellen im Fall von Pouch-Zellen mit Verbundfolie umschlossen. Die nach dem erstmaligen Laden notwendige Zeit zur Formierung der Zellen beträgt etwa zwei Wochen. Abschließend erfolgt ein Test der Zellen [18].

4.1.1.2 Modulherstellung

Zur Herstellung von Modulen wird in der Regel Automatisierungstechnik in Form von Montagerobotern verwendet. Nachdem die einzelnen Zellen nochmals auf ihre einwandfreie Funktion hin überprüft wurden, werden sie gestapelt und anschließend mechanisch und elektrisch verbunden (vgl. Tabelle 4.2). Die erneute Funktionsüberprüfung soll sicherstellen, dass keine fehlerhaften Einzelzellen verbaut werden. Bevor die Schutzeinhausung, die sogenannte Coverplate, montiert wird, werden die zusätzlichen Komponenten wie Balancer, Überdruckventil und das thermische Management inklusive der benötigten Kühlflüssigkeit hinzugefügt. Abschließend wird auch das Gesamtmodul einer Funktionsüberprüfung unterzogen. Insbesondere die mechanische und elektrische Verbindung der Einzelkomponenten wird in der Regel automatisiert durchgeführt [9].

Tabelle 4.2: Fertigungsschritte der Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriemodulen und -packs.

Modulherstellung		Packherstellung	
1.	Übernahme Zellen	1.	Angleichen und Prüfen der Module
2.	Inspektion Zellen	2.	Integration in Gehäuse
3.	Stapelung der Komponenten	3.	Montage und Kontaktierung
4.	Montage Kühlmittelanschlüsse	4.	Kontaktierung Module
5.	Montage Zellüberwachung	5.	Montage Steuerungselektronik
6.	Montage elektr. Verbindungen	6.	Montage Kühlmittelanschlüsse
7.	Integration in Submodul	7.	Montage BMS
8.	Mech. Verbindung Komponenten	8.	Montage Elektromechanik
9.	Montage Coverplate	9.	Funktionstest
10.	Test der Module	10.	Endmontage Abdeckungen
		11.	Verschluss des Gehäuses

Quelle: [10] [9].

4.1.1.3 Packherstellung

Wie bereits die Modulherstellung, so besitzt auch die Herstellung der Batteriepacks einen hohen Automatisierungsgrad. Nachdem die elektrische Ladung der Module angeglichen wurde, werden sie in einem Gesamtgehäuse integriert. Hierbei erfolgt neben der mechanischen und elektrischen Verbindung die Montage der Zusatzkomponenten wie der Steuerungselektronik, der Kühlmittelverbindungen, des Batteriemanagementsystems sowie der Elektromechanik. Bevor das Batteriepack verschlossen wird und das Bauteil für die Integration in das Gesamtfahrzeug zur Verfügung steht, erfolgt ein abschließender Funktionstest (vgl. Tabelle 4.2) [10].

4.1.2 Identifikation der relevanten Rohstoffe

Insbesondere für die Herstellung der Aktivmaterialien von Lithium-Ionen-Zellen bedarf es wie zuvor erläutert einer Vielzahl an Rohstoffen. Um mögliche Kostenauswirkungen und -entwicklungen dieser Rohstoffe zu identifizieren, wird im Folgenden eine Analyse der benötigten Materialien durchgeführt. Im Anschluss an die Betrachtung der Aktivmaterialien werden die Rohstoffe der beiden Ableiterfolien Kupfer und Aluminium analysiert.

4.1.2.1 Lithium

Das Alkalimetall Lithium ist das leichteste feste Element des Periodensystems (vgl. 2.4.1.4). Es besitzt das dem Betrag nach höchste elektrochemische Standardpotential und eignet daher ideal, wie zuvor beschrieben, für die Anwendung in Traktionsbatterien. Allerdings weist es eine starke Reaktion mit Wasser auf [72]. Bei Kontakt bildet sich gasförmiger, reaktiver Wasserstoff. Aus diesem Grund ist die zuvor erwähnte Reinheit bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen essentiell.

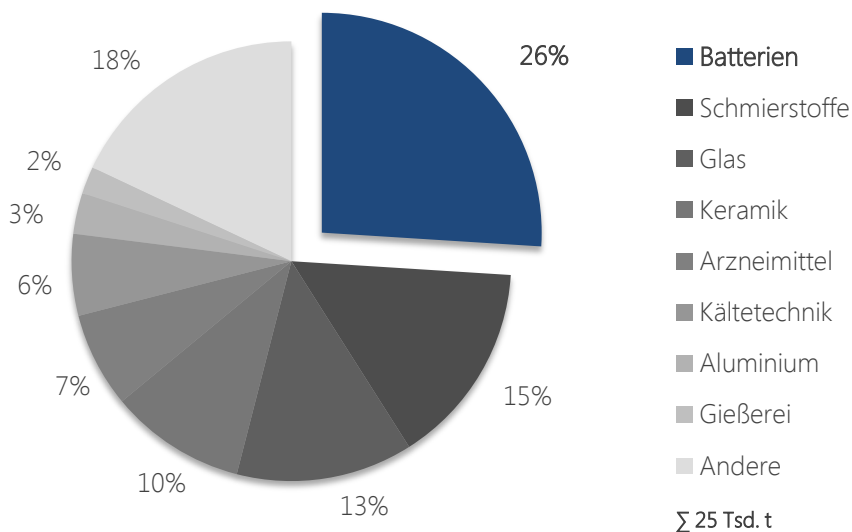


Abbildung 4.1: Weltweite Verwendung von Lithium nach Produkten und Anwendungen.

Quelle: Eigene Darstellung nach [71] und [121].
Angaben für das Jahr 2011.

Heute wird Lithium in einer Vielzahl von Produkten und Anwendungen wie beispielsweise Schmierstoffen, Glas, Keramik und Batterien benötigt, wobei die Batterieproduktion für über ein Viertel des weltweiten Lithiumverbrauchs verantwortlich ist (vgl. Abbildung 4.1). Ein gesteigerter Marktanteil von elektrifizierten Fahrzeugen und damit ein höheres Produktionsvolumen von lithiumbasierten Batterien würden zu einer weiteren Steigerung dieses Bedarfs führen.

Unter Experten besteht Einigkeit, dass auch zukünftig weltweit ausreichend Lithiumressourcen und -reserven vorhanden sind. Das United States Geological Survey (USGS) beziffert die Weltpro-

duktion von Lithium in 2010 mit 25.300 t. Demgegenüber stehen Ressourcen von 135-165 Mio. t [122] und Reserven von etwa 69 Mio. t [121] Lithiumcarbonat-Äquivalent¹⁵. Bei einer angenommenen jährlichen Produktion von 50 Mio. Elektrofahrzeugen mit Traktionsbatterien von 20 kWh und 150 g Lithium pro kWh (vgl. Abschnitt 4.1.2) entsprechen diese Vorkommen einer Reserven-Reichweite von mindestens 27 Jahren sowie einer Ressourcen-Reichweite von mindestens 142 Jahren, wobei keine Recyclingeffekte eingerechnet werden (vgl. Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3: Ressourcen- und Reservenverfügbarkeit sowie -reichweite von Lithium.

Studie	Lithium-Reserven		Lithium-Ressourcen		Quelle
	Vorkommen	Reichweite	Vorkommen	Reichweite	
Tahil 2008	21 Mio. t LCE	27 Jahre	114 Mio. t LCE	142 Jahre	[85]
USGS 2010	69 Mio. t LCE	65 Jahre	136 Mio. t LCE	170 Jahre	[123]
Evans 2008	74,5 Mio. t LCE	93 Jahre	158 Mio. t LCE	200 Jahre	[124]

LCE: Lithiumcarbonat-Äquivalent.

Quelle: Wie angegeben, [122].

Problematisch ist nicht die weltweit verfügbare Menge an Lithium, sondern vielmehr die Verteilung dieser Ressourcen. Von den vom USGS identifizierten Weltreserven von 13 Mio. t Lithium befinden sich 7,5 Mio. t in Chile sowie weitere 3,5 Mio. t in China. Zusammen besitzen diese beiden Länder also einen Anteil von 85% der weltweit verfügbaren Reserven an Lithium [121]. Aufgrund der geopolitischen Stellung dieser beiden Staaten kann es zukünftig zu einer Verknappung des Rohstoffs Lithium und damit zu einer Verteuerung des Materials kommen.

Derzeit lässt sich auf dem Weltmarkt ein Lithium-Preis von 6,6 \$/kg beobachten. Es wird erwartet, dass dieser Preis langfristig auf 9,3 \$/kg steigen wird [19]. Historisch gesehen liegt der Preis bereits heute auf einem sehr hohen Niveau, was insbesondere vor dem Hintergrund der noch nicht bzw. nur in sehr geringem Maße eingesetzten Elektrifizierung der Antriebsstränge eine große Unsicherheit der Preisentwicklung impliziert.

¹⁵ 5,32 kg Lithiumcarbonat-Äquivalent (LCE) entsprechen 1 kg Lithium.

„Ressourcen bezeichnen die tatsächlich gemessene oder auch abgeschätzte Menge eines natürlich auftretenden festen, flüssigen oder gasförmigen Materials in oder auf der Erdkruste, aus der die ökonomische Gewinnung eines Rohstoffs heute oder zukünftig möglich ist.

Als Reservenbasis wird der Teil der Ressourcen bezeichnet, der spezifische minimale physikalische und chemische Anforderungen, bezogen auf gegenwärtige Abbau- und Produktionsmethoden, erfüllt.

Reserven sind der Teil der Reservenbasis, der mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden kann.“ [123] [122]

4.1.2.2 Kobalt

Das ferromagnetische Schwermetall Kobalt ist ein häufig verwendetes Aktivmaterial der Kathode. Eingesetzt wird es in Traktionsbatterien auf NMC- und NCA-Basis. Es ist ein selten in der Erdkruste vorkommendes Element, welches stets in gebundener Form vorliegt [121]. Die weltweiten Reserven betragen 7,3 Mio. t, bei einer jährlichen Förderung von etwa 88.000 t. Dies entspricht ohne die Berücksichtigung von Recyclingeffekten einer theoretischen Reichweite von 83 Jahren. Hauptförderländer sind der Kongo mit etwa 45.000 t, gefolgt von Sambia, China, Russland, Australien und Kuba [121]. Auch hier kann also, wie bereits im Fall von Lithium, durch die Konzentration der Weltvorkommen in zumeist politisch instabilen Regionen eine Verknappung eintreten und somit zu einer deutlichen Preissteigerung führen. In der historischen Preisentwicklung von 1999 bis 2009 lässt sich ein mittlerer Preis von 35 \$/kg beobachten, wobei sich der Preis sehr volatil zeigt. Langfristige Prognosen antizipieren einen fallenden Kobaltpreis auf ein Preisniveau von 26,4 \$/kg [19].

4.1.2.3 Mangan

Mangan ist nach Eisen und Titan das dritthäufigste in der Erdkruste vorkommende Übergangsmetall und damit ein häufiges chemisches Element [123]. Bei weltweiten Reserven von etwa 630 Mio. t bilden China, Australien und Südafrika die größten Produktionsländer, wobei sich in Südafrika zwei Drittel der weltweit identifizierten Ressourcen befinden [121]. Demgegenüber steht eine weltweite, jährliche Minenproduktion von ca. 13 Mio. t und folglich eine theoretische Reichweite von 49 Jahren. In Lithium-Ionen-Traktionsbatterien wird es als Kathodenmaterial in den Zellchemien NMC und LMO verwendet.

Die historische Preisentwicklung zeigt, dass auch Mangan trotz des häufigen Vorkommens in der Erdkruste eine deutliche Preissteigerung aufweist. Im Mittel lag der Rohstoffpreis im Zeitraum von 1999 bis 2009 bei 1,02 \$/kg. Dahingegen betrug der Preis im Jahr 2011 3,68 \$/kg [125]. Prognosen antizipieren einen deutlich ansteigenden Preis von 6,30 \$/kg [19].

4.1.2.4 Nickel

Wie Mangan, zählt auch Nickel zur chemischen Gruppe der Übergangsmetalle. Bei Reserven von 76 Mio. t und Ressourcen von 130 Mio. t ist es ein selten in der Erdkruste vorkommendes Element. Nach Kanada mit einem Anteil von über 30% zählen Russland, Indonesien und die Philippinen zu den Hauptproduktionsländern. Im Jahr 2010 wurden 1,55 Mio. t Nickel produziert, was ohne die Berücksichtigung von Recycling einer Reichweite von 49 Jahren entspricht [121].

Die historische Preisentwicklung zeigt einen ansteigenden Verlauf bei großer Volatilität. Bei einem Mittelwert des Rohstoffpreises im Zeitraum von 1999 bis 2009 von 15 \$/kg liegt die Standardabweichung bei über 9 \$/kg. Bis 2015 wird von einer Fortsetzung dieses ansteigenden Trends und einem Preisniveau von etwa 19 \$/kg ausgegangen [19].

4.1.2.5 Grafit

Wie zuvor erläutert, wird derzeit in der Regel Grafit als Anodenmaterial verwendet. Dies liegt neben dem niedrigen elektrochemischen Potential und den damit erzielbaren hohen Zellspannungen an seinem im Vergleich zu anderen Anodenmaterialien niedrigen Preis sowie dem hohen Reifegrad des Herstellungsprozesses, wenngleich Grafit für die Verwendung in Traktionsbatterien sehr hohen Reinheitsanforderungen unterliegt.

Die Rohstoffreserven werden vom USGS auf 71 Mio. t beziffert. Demgegenüber steht eine jährliche Produktion von 1,1 Mio. t, was ohne Berücksichtigung von Recyclingeffekten einer theoretischen Reichweite von 65 Jahren entspricht [121].

Der Preis für Grafit mit einem Reinheitsgrad von 94 bis 97% hat sich im Zeitraum von 2009 bis 2011 von 1 \$/kg auf 3 \$/kg verdreifacht. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Reinheit des Grafits wird mittelfristig (bis zum Jahr 2020) mit einem weiteren Anstieg des Preises auf etwa 4 \$/kg gerechnet [84].

Nach den vorangegangenen Betrachtungen der wesentlichen Rohstoffe der Aktivmaterialien werden im Folgenden die beiden zu den Passivmaterialien zählenden Rohstoffe Kupfer und Aluminium näher dargestellt.

4.1.2.6 Kupfer

Als Rohstoff für die Ableiterfolie der Anodenseite der Zelle dient Kupfer. Die Dicke der Metallfolie beträgt in Abhängigkeit der elektrischen Eigenschaften der Zelle ca. 10 μm [72]. Darüber hinaus findet Kupfer unter anderem in Steckverbindungen zum elektrischen Kontaktieren der Zelle Verwendung.

Das USGS beziffert bei einer weltweiten Minenproduktion von 16,2 Mio. t weltweite Reserven von 630 Mio. t. Das größte Förderland mit 5,5 Mio. t ist Chile, gefolgt von Peru mit 1,3 Mio. t und China mit 1,2 Mio. t [121]. Die USA werden mit einer jährlichen Produktionsmenge von 1,1 Mio. t an vierter Stelle gelistet. Neben den Reserven wurden weltweit landbasierte Ressourcen von mehr als 3 Mrd. t Kupfer identifiziert, wobei von weiteren unbezifferten Tiefseevorkommen ausgegangen wird.

Der Preis von Kupfer hat sich in den vergangenen Jahren volatil entwickelt. So fiel der Preis innerhalb eines halben Jahres ausgehend von Juli 2008 von 8,9 \$/kg bis zum Dezember 2008 auf 2,8 \$/kg (-69%), um in der Folge bis zum Februar 2011 auf 10,2 \$/kg (+264%) zu steigen [126]. Für die weiteren Berechnungen wird von einem mittleren Kupferpreis von 9,0 \$/kg ausgegangen.

4.1.2.7 Aluminium

Für die Ableiterfolie der Kathodenseite lässt sich Kupfer nicht verwenden, da es stark korrodieren würde. Trotz der im Vergleich zu Kupfer um etwa ein Drittel verringerten Leitfähigkeit wird daher

als Rohstoff Aluminium verwendet, wobei eine erhöhte Foliendicke von ca. 15 μm erforderlich ist. Neben der Verwendung als Ableiterfolie wird Aluminium zudem als Bestandteil der Verbundfolie als Verpackungsmaterial von Pouch-Zellen verwendet [72].

Da Aluminium das am dritthäufigsten vorkommende Element auf der Erde und das am häufigsten vorkommende Metall darstellt, wird davon ausgegangen, dass die weltweiten Reserven von Aluminium die zukünftigen Bedarfe problemlos decken können [121]. Im Jahr 2010 betrug die weltweite Produktion 41,4 Mio. t. Die größten Produktionsländer stellen China (16,8 Mio. t), Russland (3,9 Mio. t) und Kanada (2,9 Mio. t) dar.

Ähnlich wie der Preis von Kupfer, verhält sich auch der Aluminiumpreis volatil. So fiel der Preis innerhalb eines Jahres ausgehend von 3,3 \$/kg im Juli 2008 auf 1,3 \$/kg im März 2009 (-61%), um bis April 2011 auf 2,8 \$/kg (+115%) zu steigen [127]. Die Volatilität liegt nicht in der Verknappung des Rohstoffs begründet, sondern ist auf sich ändernde Produktionskapazitäten zurückzuführen [121]. Für die folgenden Berechnungen wird von einem mittleren Aluminiumpreis von 2,5 \$/kg ausgegangen.

4.1.3 Entwicklung des Kostenmodells für Traktionsbatterien

Im Folgenden sollen die Kosten von Lithium-Ionen-Batterien und deren zeitlicher Entwicklung methodisch analysiert werden. Wie eingangs der Arbeit gezeigt, beschäftigt sich die heutige wissenschaftliche Betrachtung meist mit Teilaspekten, lässt jedoch die Gesamtbetrachtung und insbesondere die Identifikation und Quantifizierung von Lernkurven auf Basis unterschiedlicher Zellchemien unberücksichtigt (vgl. Kapitel 1.2.2).

4.1.3.1 Modellstruktur

Um eine detailliertere Berechnung der Kosten von Traktionsbatterien sowie deren zukünftiger Entwicklung in Form von Lernkurven berechnen zu können, wurde aufbauend auf dem in [21] beschriebenen Modell ein neues Batteriekostenmodell entwickelt. Die singuläre Betrachtung der Rohstoffkosten einer Einzelzelle wurde um die Bestandteile der Module sowie der Packs erweitert. Darüber hinaus erfolgt eine Berücksichtigung von Produktions- und Fertigungskosten sowie von Gemeinkosten in Abhängigkeit der jährlich produzierten Stückzahl (vgl. Tabelle 4.4). Qualitativ sind in diese Betrachtung Überlegungen zu möglichen Wissenstransfers aus anderen Industriezweigen, wie beispielsweise der Produktion von Batterien für Konsumgüter- und Elektronikproduktion oder hochautomatisierten Herstellungsprozessen wie beispielsweise der Produktion von Solarzellen eingeflossen. Die Darstellung des Berechnungsschemas sowie der Eingabe-, Ausgabe- und Berechnungsmasken des Modells befinden sich im Anhang (vgl. Anhang B 1 ff.).

Neben der funktionalen Erweiterung wurden zudem die in Kapitel 2.4.1.4 beschriebenen Zellchemien in das Modell integriert. Hierbei lässt sich neben der Wahl der Chemie auch die Auslegung als

Hochenergie- oder als Hochleistungsbatterie definieren. Gesamtfahrzeuanforderungen wie das geforderte Spannungslevel des Batteriepacks lassen sich ebenso berücksichtigen wie der geforderte Energiegehalt der Traktionsbatterie und die Kapazitäten der Einzelzellen.

Tabelle 4.4: Struktur und Umfang des neu entwickelten Batteriekostenmodells.

	Zelle	Modul	Pack
Rohstoffe (inkl. Halbleitungen und Zukaufteile)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anodenmaterial ▪ Kathodenmaterial ▪ Elektrolyt / Leitsalz ▪ Separator ▪ Casing ▪ Anschlüsse und Stromableiter 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modulgehäuse ▪ Terminal ▪ Anschlüsse ▪ Zellverbinder ▪ Sicherheitsbauteile ▪ Balancer 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gesamtgehäuse ▪ Kühlungssystem ▪ Sicherheitsbauteile ▪ Schütze ▪ Elektrische Verbindungen ▪ Batteriemanagementsystem
Produktion und Fertigung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Herstellung Elektroden ▪ Montage Batteriezelle ▪ Füllen und Verschließen ▪ Aufladung und Formierung der Batteriezelle ▪ Test der Zelle ▪ Betrachtung Fertigungsanlagen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Übernahme und Inspektion der Zellen ▪ Montage der versch. Modulkomponenten ▪ Test der Module ▪ Betrachtung Fertigungsanlagen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Angleichen der Module ▪ Integration in das Gesamtgehäuse ▪ Montage und Kontaktierung der Pack-Komponenten ▪ Betrachtung Fertigungsanlagen
Gemeinkosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Forschung und Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transport ▪ Fremdkapitalkosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marketing ▪ Gewinn ▪ Overhead

Alle Kostenbetrachtungen sind dabei so angelegt, dass sie auf Unsicherheiten mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen getestet werden können. Darüber hinaus lassen sich Kostentreiber und Rohstoffeinflüsse mit Hilfe von Regressionsanalysen identifizieren. Als Ergebnis des Modells liegen die Gesamtkosten der gewählten Batteriekonfiguration sowie eine dazugehörige Lernrate vor.

4.1.3.2 Rohstoffkosten

Neben den in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Rohstoffkosten für die Herstellung der Zelle, fallen Kosten für die zur Produktion von Modulen und Packs benötigten Materialien an. Bei diesen Kosten handelt es sich im Wesentlichen um Ausgaben für Zukaufteile. Darüber hinaus werden aber auch die elektrischen Anschlüsse sowie die Einhausungen der Baugruppen berücksichtigt.

Auf Modulebene werden als zusätzlich benötigte Komponenten die Balancer, das Überdruckventil, die Kontrolleinheit zur Überwachung des Ladezustands, die elektrischen Anschlüsse auf Basis von Kupfer, die elektrische und thermische Isolierung sowie das Modulgehäuse aus Aluminium betrachtet. Hierbei wurden neben den Kosten pro Komponente auch Skaleneffekte auf Basis der

jährlichen produzierten Einheiten bewertet (vgl. Tabelle 4.5). In Abhängigkeit der gewählten Batteriekonfiguration und damit der benötigten Anzahl an Modulen fließt diese Berechnung in die Kostenermittlung der Gesamtbatterie ein.

Tabelle 4.5: Halbzeuge und Zukaufteile eines Batteriemoduls.

	Preis	Bemerkung	Skaleneffekt ¹⁶	Quelle
Modulgehäuse Alu	2,60 \$	40€ pro Modul	90%	[10]
Isolierung	56,00 \$	40€ pro Modul	90%	[10]
Anschlüsse Kupfer	9,00 \$	1kg pro Modul	90%	[10]
Balancer	3,00 \$	50€ pro Modul	–	[10]
Überdruckventil	5,00 \$		90%	Annahme
SOC Controller	1,80 \$	pro parallelem Strang	90%	[9]
Paralleler Anschluss	0,10 \$	pro paralleler Zelle	95%	[9]

In ähnlicher Weise werden die Kosten für das Batteriepack berechnet. Bei den hier berücksichtigten zusätzlichen Komponenten handelt es sich um das System zur Klimatisierung der Batterie, Schutzbauteile, das Batteriemanagementsystem, die elektrischen Verbindungen sowie das auf Stahlbauweise basierende Gehäuse der Batterie. Auch hier werden Skaleneffekte für die einzelnen Bauteile berücksichtigt (vgl. Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6: Roh-, Hilfs- und Bedarfsstoffe eines Batteriepacks.

	Preis	Bemerkung	Skaleneffekt	Quelle
Klimasystem	168,00 \$	pro Pack	85%	[9]
Schutzbauteile	140,00 \$	pro Pack	–	[9]
Gesamtgehäuse Stahl	0,60 \$		90%	[128]
Elektr. Verbindungen	28,00 \$	pro Pack	–	Annahme
Batteriemanagementsystem	135,00 \$		85%	[89]

¹⁶ Definition Skaleneffekt: Größenkostensparnisse, Skalenerträge; Kostensparnisse, die bei gegebener Produktionsfunktion (Produktionstechnik) infolge konstanter Fixkosten auftreten, wenn die Ausbringungsmenge wächst, da bei wachsender Betriebsgröße die durchschnittlichen totalen Kosten (DTK) bis zur sog. mindestoptimalen technischen Betriebs- bzw. Unternehmensgröße (MOS) sinken (der Anteil der fixen Kosten je produzierter Einheit wird immer kleiner [295]). Der hier angegebene Wert bezieht sich auf eine Verdopplung der Ausbringungsmenge.

4.1.3.3 Fertigungskosten

Die Berechnung der Fertigungskosten erfolgt auf Basis der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Fertigungsprozesse. Um das Modell zur Ableitung von Lernraten verwenden zu können, werden drei unterschiedliche jährliche Ausbringungsmengen einer fiktiven Fabrik definiert. So wird eine

- Massenfertigung von 100.000 Batteriepacks pro Jahr (Fertigung 1), eine
- Fertigung von 10.000 Batteriepacks pro Jahr (Fertigung 2) sowie eine
- geringe Ausbringungsmenge von 1.000 Batteriepacks pro Jahr (Fertigung 3)

betrachtet. Fertigung 1 dient dabei zur Identifikation der minimal zu erreichenden Batteriekosten, basierend auf einer sehr hohen jährlichen Ausbringungsmenge in Kombination mit einer maximalen Auslastung des Maschinenparks.

Die Produktionsprozesse der drei Szenarien unterscheiden sich in der Auslastung des Maschinenparks sowie im Automatisierungsgrad. Fertigung 1 und 2 besitzen den gleichen Maschinenpark, wobei in Fertigung 1 365 Arbeitstage im 3-Schichtbetrieb und für Fertigung 2 300 Arbeitstage im 1-Schichtbetrieb definiert werden. Fertigung 3 antizipiert eine weniger automatisierte Fertigung mit einem höheren Anteil manueller Fertigungsschritte. Allen Fertigungsszenarien liegt ein Abschreibungszeitraum von 20 Jahren zugrunde. Neben den Anschaffungskosten des Maschinenparks werden die Energieverbräuche und die damit korrespondierenden Energiekosten, die Kosten für Installation, Wartung und Instandhaltung der Anlagen sowie die Personaleinsatzkosten berechnet. Um einen quantitativen Eindruck über die absolute Höhe der ermittelten Produktionskosten zu geben, wird im Folgenden eine Beispielkonfiguration einer 36 kWh Batterie mit der Zellchemie NMC, einer Zellkapazität von 34 Ah und einer Gesamtzahl von 288 Zellen in 9 Modulen mit je 32 Zellen verwendet. Diese Werte entsprechen aktuell verbauten Zellgrößen und spiegeln die Gesamtanzahl der Zellen des Opel Ampera (Modelljahr 2012) wider [129] [130].

Die für die Produktion von Einzelzellen benötigten 13 Prozessschritte lassen sich durch Zusammenlegung einzelner Prozessschritte auf 8 Fertigungsmaschinen durchführen (vgl. Tabelle 4.7). Hierfür ist ein Gesamtinvestitionsvolumen von 215 Mio. € erforderlich. Bei einer angenommenen durchschnittlichen Batteriegröße von 20 kWh (und Fertigungsszenario 1) resultieren daraus Investitionskosten von 12,43 €/kWh bzw. 0,38 € pro Einzelzelle. Die Plausibilisierung dieser berechneten Werte mit veröffentlichten Herstellerangaben zeigt, dass die getroffenen Annahmen dem Industriestandard entsprechen. Die Hersteller Sanyo [131], NEC [132], Toshiba [133] und SBLimotive [134] geben durchschnittlich einen Wert von 0,37 € pro Zelle an, wobei diese Auswertung nur Werke berücksichtigt, welche zur Produktion von Zellen dienen. Wie zuvor erwähnt, wird für das zweite Fertigungsszenario der gleiche Anlagenbestand angenommen. Aufgrund der geringeren Auslastung des Maschinenparks steigen die Investitionskosten pro Ausbringungsmenge deutlich auf 112,09 €/kWh. Für das dritte Fertigungsszenario wird auf Basis von Experteninterviews eine Gesamtinvestitionssumme von 16,5 Mio. € angenommen. Hierdurch steigen die relativen Investitionskosten auf 128,86 €/kWh [135] [136] [11].

Tabelle 4.7: Fertigungskosten auf Zellebene im ersten Fertigungsszenario.

Fertigungsschritt	Maschine	Investitions- summe [Mio. €]	Leistung [kW]	Installation, Wartung, Instandhaltung (p.a.) [Mio. €]	Quelle
1. Mischen	Eirich Mischsystem	20	0,5	1,00	[137]
2. Beschichten	Coatema Linecoater	45	220	2,25	[138]
3. Trocknen	Kroenert Floatec	13	150	0,65	[139]
4. Kalandrieren	Coatema Kalandrier	10	in 2. Inkl.	0,50	[139]
5. Schneiden	Manz Automation Schneider	20	3,5	1,00	[139]
6. Wickeln / Stapeln					
7. Schweißen	Kroenert Sonderwickler	38	15	1,90	[139]
8. Packen					
9. Befüllen					
10. Zusatzteile	Manz Automation	20	10	1,00	[139]
11. Schließen					
12. Formieren	Manz Automation	49	25 + 152 ^a	2,45	[139]
13. Testen					

Preise für das Jahr 2012.

a: Benötigte Leistung (152 kW) zum Formieren der Zellen für die exemplarische Batterie von 36 kWh.

Die Fertigungskosten auf Modulebene werden nach der gleichen Berechnungslogik ermittelt. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades der Fertigung werden hier, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, hauptsächlich Montageroboter eingesetzt. Analog zur vorangegangenen Betrachtung wird für Fertigung 1 und 2 der gleiche Anlagenbestand antizipiert, wobei für alle Maschinen aufgrund der höheren Abnutzung ein Abschreibungszeitraum von 7 Jahren antizipiert wird (vgl. Tabelle 4.8). Neben den Investitionskosten der Maschinen werden deren Wartungskosten, der Energiebedarf sowie das benötigte Personal berechnet. Hieraus ergeben sich Modulfertigungskosten von 1,40 €/kWh für Fertigung 1, 6,21 €/kWh für Fertigung 2 sowie 53,57 €/kWh für Fertigung 3.

Tabelle 4.8: Fertigungskosten auf Modulebene im ersten und zweiten Fertigungsszenario.

Fertigungsschritt	Maschine	Investitions- summe [Tsd. €]	Wartung [Tsd. €]	Leistung [kW]	Personal	Quelle
1. Übernahme Zellen	ABB 3x Industrieroboter	90	4,5	45	0	[140]
2. Inspektion Zellen	PEC 10x SBT 052050	1.000	50,0	300	2	[141]
3. Stapelung versch. Komponenten	ABB 3x Montage-Roboter	180	3,0	45	0	[140]
4. Montage Kühlmittleinlass/-auslass	ABB 3x Montage-Roboter	210	3,0	45	0	[140]
5. Montage Zellüberwachung	ABB 3x Montage-Roboter	255	3,0	45	1	[140]
6. Montage elektrische Verbindungen	ABB 3x Montage-Roboter	210	3,0	45	0	[140]
7. Integration in Submodul	ABB 3x Montage-Roboter	180	3,0	45	0	[140]
8. Mechanische Verbindung der Komponenten	ABB 3x Montage-Roboter	180	3,0	45	1	[140]
9. Montage Coverplate	ABB 3x Montage-Roboter	90	3,0	45	0	[140]
10. Test der Module	PEC 2x SBT 4050	1.000	50,0	72	1	Annahme auf Basis [141]

Preise für das Jahr 2012.

Die Fertigungskosten des Batteriepacks basieren ebenfalls auf der gleichen Bottom-up-Berechnungslogik. Auch hier werden für die Massenfertigung aufgrund des hohen Automatisierungsgrades hauptsächlich Montageroboter verwendet. Daher werden neben den Investitionskosten auch Energie- und Wartungskosten ermittelt. Die unterschiedliche Auslastung des Maschinenparks in Fertigung 1 und 2 macht es jedoch erforderlich, hinsichtlich des Energie- und Personalbedarfs zwischen den beiden Fertigungsszenarien zu differenzieren (vgl. Tabelle 4.9).

Darüber hinaus wird in der Berechnung der Fertigungskosten des Packs das notwendige Produktionsgebäude berücksichtigt, welches für Fertigung 1 und 2 mit einer Grundfläche von 10.000 m² und 1.500 \$/m² angenommen wird [10]. Für Fertigung 3 werden auf Basis eines Expertengesprächs eine Grundfläche von 300 m² und Investitionskosten von 8 Mio. € angenommen [142]. Die Produktionsfläche umfasst hierbei jeweils die gesamte Fabrikfläche bestehend aus Zell-, Modul- und Pack-Fertigung. Aus den Werten berechnen sich bei einem Abschreibungszeitraum des Ma-

schinenparks von 7 Jahren Fertigungskosten von 2,42 €/kWh für Fertigung 1, 18,35 €/kWh für Fertigung 2 sowie 59,44 €/kWh für Fertigung 3.

Tabelle 4.9: Fertigungskosten auf Packebene.

Fertigungsschritt	Maschine	Investitions- summe [Mio. €]	Wartung [Mio. €]	100.000 Packs p.a.		Quelle
				Leistung [kW]	Personal (pro Schicht)	
1. Transport Moduleinheiten	ABB 3x Industrie- roboter	180	9,0	45	0	[140]
2. Angleichen Module	PEC 3x SBT 4050	600	30,0	225	2	[143]
3. Integration im Gesamtgehäuse	ABB 3x Industrie- roboter	180	9,0	45	0	[140]
4. Montage und Kontaktierung	ABB 3x Industrie- roboter	210	10,5	45	0	[140]
5. Kontaktierung untereinander	ABB 3x Industrie- roboter	210	10,5	45	0	[140]
6. Montage Steuerungs- elektronik	ABB 3x Industrie- roboter	225	11,3	45	1	[140]
7. Montage Kühlverbindungen	ABB 3x Industrie- roboter	180	9,0	45	0	[140]
8. Montage BMS	ABB 3x Industrie- roboter	180	9,0	45	0	[140]
9. Montage Elektromechanik	ABB 3x Industrie- roboter	180	9,0	45	0	[140]
10. Elektrischer Test	PEC 3x SBT 10050	900	45,0	225	2	[144]
11. Endmontage übrige Abdeckungen	ABB 3x Industrie- roboter	150	7,5	45	0	[140]
12. Gehäuse Schließen	ABB 3x Industrie- roboter	150	7,5	45	1	[140]
13. Komponentenend- montage	ABB 3x Industrie- roboter	150	7,5	45	0	[140]
14. Produktionsgebäude	10.000 m ²	11.538	0,0			[140]

Preise für das Jahr 2012.

4.1.3.4 Gemeinkosten

Um eine vollständige Kostenbetrachtung durchführen zu können, werden in dem entwickelten Batteriekostenmodell auch Kosten betrachtet, welche sich nicht direkt den Rohstoff- oder den Fertigungskosten zurechnen lassen. So wurden Kosten für Forschung und Entwicklung, Transport und Logistik sowie Fremdkapitalkosten berücksichtigt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass alle Investitionen fremdfinanziert werden. Darüber hinaus wurde zur Ermittlung des resultierenden Batteriepreises eine Gewinnmarge der Hersteller von 5% antizipiert.

Die Kosten für Forschung und Entwicklung werden im Kostenmodell im Verhältnis zur Gesamtinvestitionssumme auf die Bereiche Zelle, Modul und Pack umgelegt. Um eine flexible Auswertung der Kostenentwicklung zu ermöglichen, sind diese Kosten ebenso wie der Fremdkapitalzinssatz frei wählbar. Für die folgenden Beispielrechnungen werden Ausgaben für Forschung und Entwicklung von 15 Mio. € sowie ein Fremdkapitalzinssatz von 6% angenommen (vgl. Tabelle 4.10).

Tabelle 4.10: Gemeinkosten auf Zell-, Modul- und Packebene.

		Variable Kosten			Einmalige Kosten		
		1.000	10.000	100.000	1.000	10.000	100.000
		<i>Einmalige Kosten in Tsd. € p.a.</i>					
		Batterie-Packs pro Jahr					
Zelle	Forschung & Entwicklung				12.900		
	Transport & Logistik "Receiving" (MA pro Schicht)			5 MA			2.000
			3 MA			1.000	
		2 MA			500		
Modul	Forschung & Entwicklung				500		
	Transport & Logistik (MA pro Schicht)			5 MA			1.000
			3 MA			600	
		2 MA			250		
Pack	Forschung & Entwicklung				1.500		
	Transport & Logistik (MA pro Schicht)			5 MA			3.000
			3 MA			750	
		2 MA			300		
	Marge				5%		
	Genehmigung Verkauf/Transport				20		
Fremdkapitalkosten				6%			

Quelle: Eigene Berechnung, [145].

4.1.4 Analyse der Batteriekosten und Kostentreiber

Aufbauend auf den vorangegangenen Analysen werden im Folgenden systematische Auswertungen mit Hilfe des neu entwickelten Batteriekostenmodells durchgeführt. Hierbei wird der Fokus auf die Aufteilung der Kosten und die damit verbundenen Kostentreiber gelegt.

Die Auswertung des Kostenmodells auf Basis ausgewählter, exemplarischer Batteriekonfigurationen zeigt, dass die floor-costs der jeweiligen Batterien nicht nur in Abhängigkeit der verwendeten Zellchemie, sondern auch in Abhängigkeit des Batterielayouts variieren (vgl. Tabelle 4.11 und Abbildung 4.2). So wird im direkten Vergleich zwischen der Batterie des Chevrolet Volt und des Mitsubishi iMiev deutlich, dass sich die Kosten (in €/kWh) trotz ähnlicher Batteriegrößen bzw. -energieinhalte unterscheiden. Die höheren errechneten Kosten des Chevrolet Volt liegen hauptsächlich in der größeren Anzahl an Zellen und der damit steigenden Anzahl an passiven Batteriekomponenten begründet. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich bei allen

hier berechneten Kosten um floor-costs, welche mit Hilfe des Fertigungsszenarios 1 ermittelt wurden, handelt. Ein Bezug zu den realen, von den Automobilherstellern aufgewendeten Kosten ist aufgrund der fehlenden Datenbasis nicht möglich.

Tabelle 4.11: Exemplarische Batteriekosten (floor-costs) für ausgewählte Batteriekonfigurationen.

Nr. in Abbildung		1	2	3	4	5	6	7
Exemplarisches Fahrzeug		Chevrolet Volt	Mitsubishi iMIEV	Nissan Leaf	VW eGolf "fiktiv"	Tesla Roadster "fiktiv"	Tesla Model S "fiktiv"	Beispiel-konfiguration
Zellkapazität	[Ah]	15	48	33	25	40	40	34
Zellen pro Modul	[Stk.]	32	22	4	12	24	24	32
...davon parallel	[Stk.]	1	1	2	3	4	6	3
Module pro Pack	[Stk.]	9	4	48	24	16	24	9
Zellen gesamt	[Stk.]	288	88	192	288	384	576	288
LMO	Kosten [€/kWh]	244	193	286	229	176	173	182
	Energie [kWh]	15,3	14,9	22,4	25,4	54,2	81,3	34,6
LFP	Kosten [€/kWh]	246	190	293	229	171	167	178
	Energie [kWh]	13,7	13,4	20,2	22,9	48,8	73,3	31,1
NMC	Kosten [€/kWh]	237	190	279	223	174	170	180
	Energie [kWh]	15,9	15,5	23,3	26,5	56,5	84,8	36,0
NCA	Kosten [€/kWh]	226	176	269	211	158	155	165
	Energie [kWh]	15,0	14,7	22,1	25,1	53,5	80,2	34,1

Quelle: [146] [147] [66] [90] [91], eigene Darstellung; Umrechnungskurs: 1,30 \$/€.

Tatsächlich in den Fahrzeugen verwendete Zellchemien sind fett dargestellt.

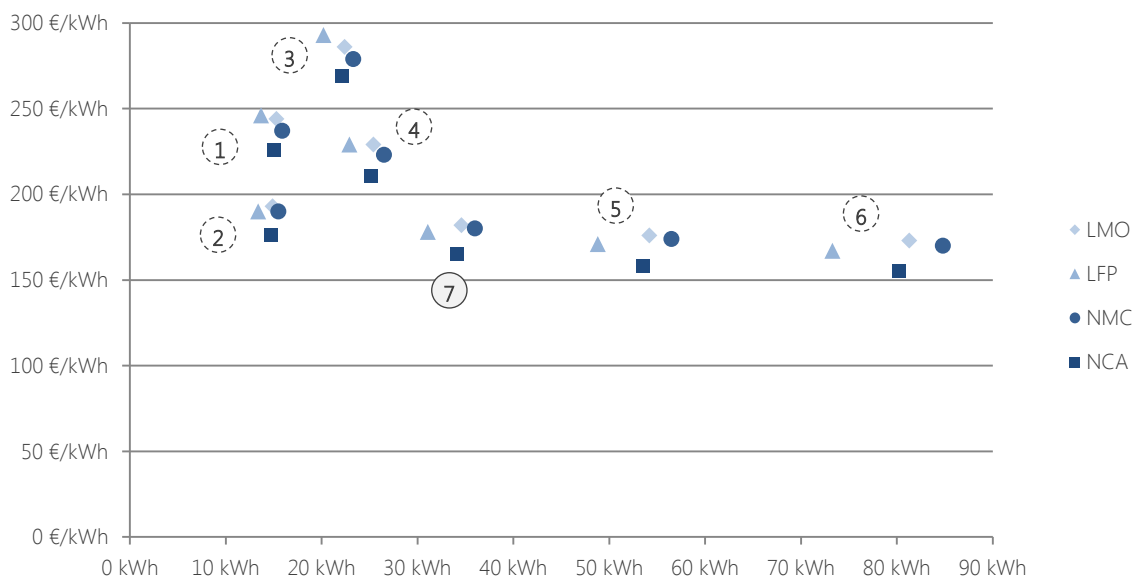


Abbildung 4.2: Exemplarische Batteriekosten (floor-costs) für ausgewählte Batteriekonfigurationen auf Basis von Tabelle 4.11.

Die fiktive Batterieauslegung¹⁷ der Batterien der beiden Tesla Fahrzeuge zeigt auf, dass die floor-costs bei Verwendung von Pouch-Zellen für solche großen Batteriepacks deutlich unter 200 €/kWh liegen können. Hierfür sind im Wesentlichen zwei Haupttreiber verantwortlich: Zum einen sinkt durch die große Energiemenge der relative Kostenanteil von nur einmal im Batteriepack verbauten Komponenten wie der Battery-junction-box (BJB), dem Batteriemanagementsystem (BMS) oder auch der elektrischen Anschlüsse (vgl. Abschnitt 2.4.1). Zum anderen ermöglichen die großen Einzelzellen eine Reduktion der weiteren, mehrfach im Batteriepack verbauten passiven Komponenten, wie den Balancern oder den elektrischen Zellanschlüssen. Für die folgenden Analysen der Kostenzusammensetzung sowie der Kostentreiber von Traktionsbatterien wurde eine Beispielkonfiguration definiert. Diese exemplarische Auslegung einer Traktionsbatterie repräsentiert in ihren Charakteristika keine (bisher) real existierende Batterie, sondern dient vielmehr der Illustration einer beispielhaften „mittleren“ Batterieauslegung.

Für diese gewählte Beispielkonfiguration lassen sich mit Hilfe des Batteriekostenmodells bei einem Umrechnungskurs von 1,30 \$/€ Gesamtbatteriekosten von 180 €/kWh für Fertigung 1 (floor-costs), 390 €/kWh für Fertigung 2 sowie 635 €/kWh für Fertigung 3 berechnen. In den drei Fertigungsszenarien verteilen sich die Kosten auf die Bereiche ähnlich, wobei der Anteil der Rohstoffkosten, getrieben von einem hohen Anteil teurer Materialien für die Zellfertigung, dominiert (vgl. Abbildung 4.3). Im Falle der Massenproduktion von 100.000 Einheiten pro Jahr nehmen die Rohstoffkosten einen Anteil von 80% ein. Die restlichen 20% verteilen sich nahezu gleichmäßig auf Produktions- und Gemeinkosten.

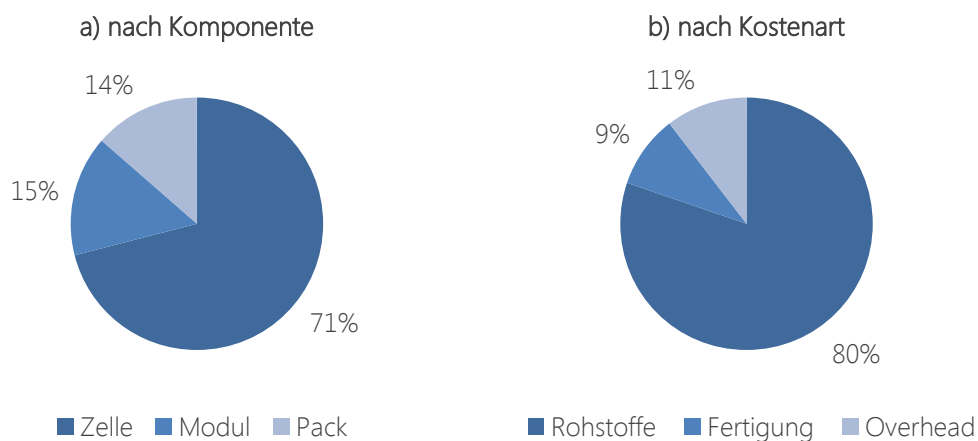


Abbildung 4.3: Aufteilung der Batteriekosten im Fertigungsszenario 1 mit Gesamtkosten für die Beispielkonfiguration von 180 €/kWh, differenziert in Komponenten (a)) und in die Kostenart (b)).

Beispielbatteriekonfiguration: NMC, Hochenergieauslegung, 32 Zellen à 34 Ah pro Modul, 9 Module pro Pack, 36 kWh.

¹⁷ Es handelt sich hierbei um fiktive Batterieauslegungen, da die beiden Tesla Fahrzeuge mit zylindrischen Zellen (und nicht mit Pouch-Zellen) in Serie produziert wurden bzw. werden [298] [299].

Der hohe Anteil der Rohstoffkosten ist auf die teuren Materialien zur Zellherstellung, wie beispielsweise Grafit, den Separator oder die Binder der Aktivmaterialien zurückzuführen. Diese Materialien haben so großen Einfluss, dass sie auch die Gesamtkosten pro kWh am deutlichsten beeinflussen. Die Analyse der Einflussfaktoren auf die Gesamtkosten mit Hilfe einer Regressionsanalyse macht deutlich, dass das gewählte Anodenmaterial Grafit den größten Kostentreiber darstellt, wobei der Einfluss mit einem Regressionskoeffizienten¹⁸ von 0,5 aufgrund der hohen Volatilität des Grafitpreises sehr deutlich ausgeprägt ist (vgl. Abbildung 4.4).

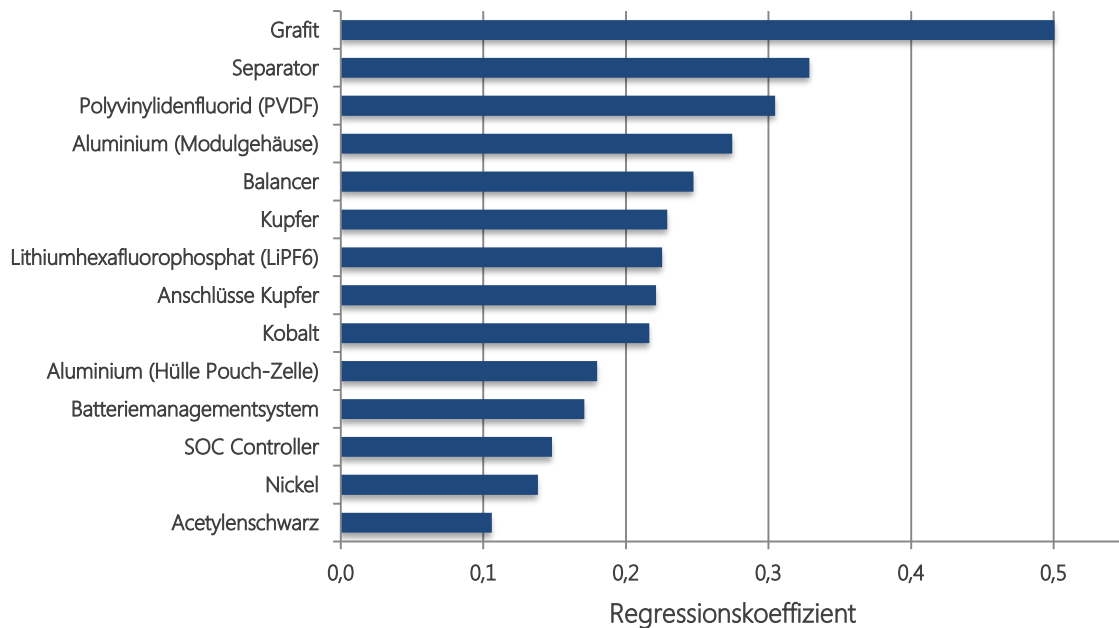


Abbildung 4.4: Regressionskoeffizienten des Einflusses der Komponenten eines Batteriepacks auf die Gesamtkosten der Batterie für eine exemplarische Batteriekonfiguration.

Beispielbatteriekonfiguration: NMC, Hochenergieauslegung, 32 Zellen à 34 Ah pro Modul, 9 Module pro Pack, 36 kWh.

¹⁸ Der Regressionskoeffizient ist ein Maß dafür, wie stark eine abhängige Variable Y – in diesem Fall die gesamten Produktionskosten der Traktionsbatterie – durch die unabhängige Variable X – in diesem Fall der Rohstoffpreis von Grafit – beeinflusst wird. Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten multivariaten Regressionsanalysen wird als Maß des Einflusses der sogenannte standardisierte Regressionskoeffizient verwendet. Dieser verfügt über einen von den ursprünglichen Maßeinheiten der beschreibenden Variablen unabhängigen Wertebereich, welcher sich auf das Intervall [-1;+1] erstreckt. Mathematisch gibt er an, um wieviel die abhängige Variable Y gemessen in Standardabweichungen von Y im Durchschnitt zu- bzw. abnimmt, wenn die beschreibende Variable X um eine Standardabweichung von X ansteigt. Durch diese Normierung wird die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Einflussparameter miteinander gewährleistet. [293] [294]

Nach Grafit stellen der Separator, das Binder-Material Polyvinylidenfluorid (Pvdf), das für das Modulgehäuse verwendete Aluminium sowie die benötigten Balancer die fünf größten Einflussfaktoren dar. Lithium hingegen hat einen so geringen Einfluss, dass es nicht unter die 15 größten Kostentreiber fällt. Tatsächlich hat der Rohstoffpreis für das verwendete Lithium einen Anteil von 0,4% an den Gesamtkosten, was einem absoluten Wert von 0,71 € entspricht.

Die reinen Rohstoffkosten der weiteren Kathodenmaterialien Kobalt, Nickel und Mangan nehmen ebenfalls nur geringen Einfluss auf die Gesamtkosten, wobei Kobalt mit einem Regressionskoeffizienten von 0,22 den größten Kosteneinfluss hat.

Die drei weiteren NMC-Kathodenmaterialien haben also singular betrachtet keinen wesentlichen Einfluss. Summiert man jedoch die Regressionskoeffizienten der drei Rohstoffe, so zeigt sich, dass sich der Einfluss der Kathodenmaterialien deutlich erhöht und mit einem Wert von 0,36 direkt hinter Grafit einordnet. Die Analyse der Einflussfaktoren zeigt also, dass selbst auf Pack-Ebene die beiden Elektrodenmaterialien die größten Treiber für die Kosten einer Traktionsbatterie darstellen.

Die detaillierte Analyse der Rohstoffkosten der Einzelzelle zeigt ein ähnliches Ergebnis (vgl. Abbildung 4.5). Grafit hat bei einem Regressionskoeffizienten von 0,62 den größten Einfluss auf die Kosten. Ebenso finden sich auch hier unter den größten Kostentreibern der Separator (Regressionskoeffizient 0,41) und der Binder (0,38). Aufgrund seines hohen Preises beeinflusst Kupfer darüber hinaus in Form der Ableiterfolie der Anode die Rohstoffkosten deutlich.

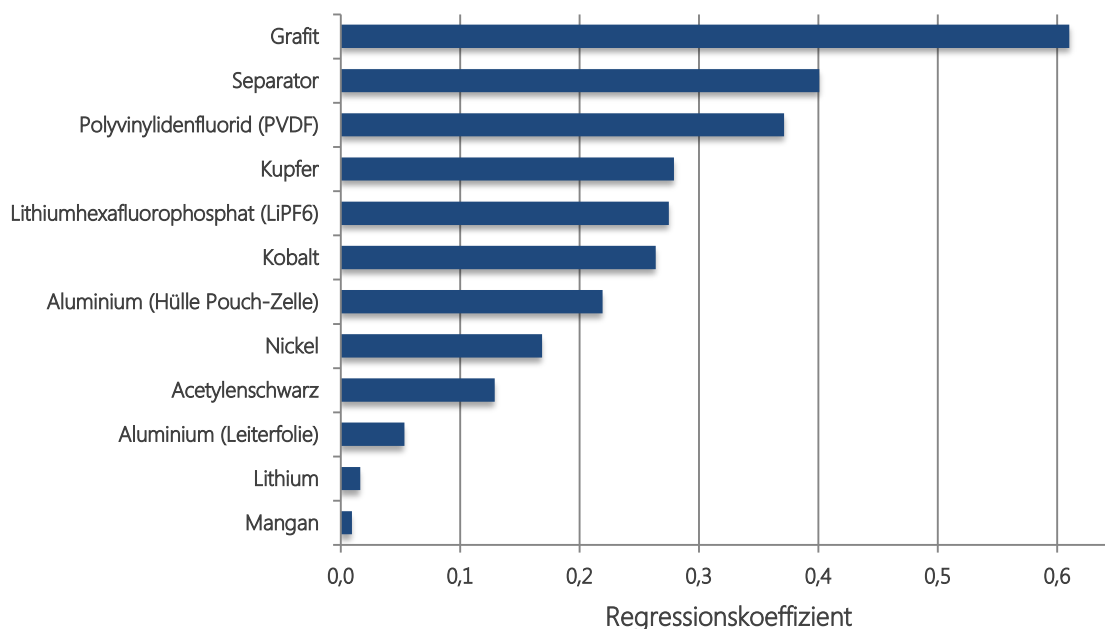


Abbildung 4.5: Regressionskoeffizienten des Einflusses der Komponenten einer Batteriezelle auf die Kosten der Einzelzelle für eine exemplarische Batteriekonfiguration.

Beispielbatteriekonfiguration: NMC, Hochenergieauslegung, 32 Zellen à 34 Ah pro Modul, 9 Module pro Pack, 36 kWh.

Auch hier zeigt sich, dass der singuläre Einfluss der Rohstoffkosten der Kathodenmaterialien gering ist, wobei Kobalt mit 0,26 den höchsten Regressionskoeffizienten aufweist. Summiert man die NMC-Kathodenmaterialien, so wird erneut deutlich, dass das Kathodenmaterial mit einem Regressionskoeffizienten von 0,46 signifikanten Einfluss auf die Rohstoffkosten der Einzelzelle hat und sich auch hier direkt hinter dem Regressionskoeffizienten von Grafit einordnet. Der Kosteneinfluss der beiden Elektrodenmaterialien ist somit auf Zellebene noch deutlicher ausgeprägt.

Ausschlaggebend für die spätere Simulation des deutschen Neufahrzeugmarktes (vgl. Kapitel 6) sind die absoluten Massen der Elektrodenmaterialien. Die Analyse der berechneten Batteriekosten hinsichtlich Lithium und Grafit zeigt, dass die Masse dieser beiden Rohstoffe je nach Zellchemie variiert. Insbesondere die Normierung der Massenanteile auf eine kWh veranschaulicht diesen Zusammenhang. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.1.2 ermittelten Rohstoffpreise wird deutlich, dass Lithium mit Ausgaben von durchschnittlich 0,57 €/kWh nicht zu den Kostentreibern einer Traktionsbatterie zählt. Grafit hingegen hat auch absolut einen deutlich größeren Einfluss, was anhand der durchschnittlichen Kosten in Höhe von 2,10 €/kWh deutlich wird (vgl. Tabelle 4.12).

Tabelle 4.12: Massen- und Kostenanteile von Lithium und Grafit pro kWh.

		Zellchemien				Durchschnitt
		NMC	NCA	LFP	LMO	
Lithium	g/kWh	142	130	91	86	112
	€/kWh	0,71	0,66	0,44	0,46	0,57
Grafit	g/kWh	852	901	888	986	907
	€/kWh	1,97	2,08	2,28	2,05	2,10

Zur Definition der Zellchemien vgl. Abschnitt 2.4.1 sowie Abbildung 2.8.

4.1.4.1 Vergleich von Hochenergie- und Hochleistungszellen

Wie die Berechnungen zeigen, beeinflusst die Auslegung der Traktionsbatterie als Hochenergie- (HE) bzw. als Hochleistungszelle (HP) den Mengenanteil von Aktivmaterialien und Passivmaterialien der Batteriezelle (vgl. Abschnitt 2.4.1.4 und Abbildung 4.6) deutlich. Als Aktivmaterialien werden dabei die beiden Elektroden bezeichnet, da sie aktiv am Ladungsaustausch beteiligt sind. Die restlichen Materialien, welche für die Zellreaktion notwendig sind, jedoch nur passiv den Ladungsaustausch ermöglichen, wie beispielsweise Elektrolyt oder Separator, werden als Passivmaterialien bezeichnet [148].

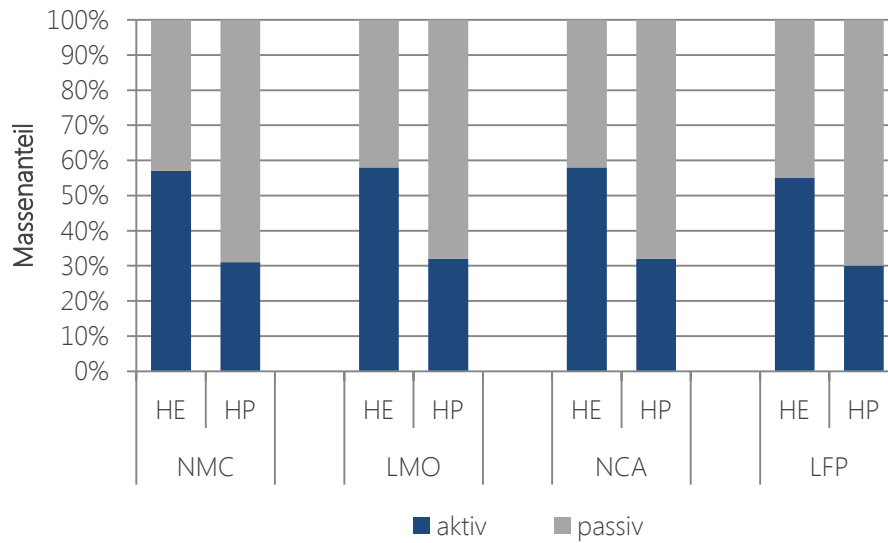


Abbildung 4.6: Massenanteile von Aktiv- und Passivmaterialien bei Hochenergie- (HE) und Hochleistungszellen (HP).

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse hinsichtlich der vier betrachteten Zellchemien NMC, NCA, LMO und LFP zeigt ceteris paribus, dass das Anodenmaterial Grafit in allen Hochenergiekonfigurationen der größte Kostentreiber ist. Im Gegensatz dazu hat Lithium auf keine der Zellchemien einen signifikanten Einfluss. Für die weiteren Aktivmaterialien ergibt sich für die singuläre Betrachtung der einzelnen Rohstoffe ein ähnliches Resultat, wobei im Fall von NMC wie zuvor erläutert Kobalt den größten Kostentreiber darstellt. Darüber hinaus beeinflusst Nickel die Rohstoffkosten der NCA-Zellchemie deutlich (vgl. Tabelle 4.13). Von den beiden Leiterfolien der Anoden- bzw. Kathodenseite weist Kupfer aufgrund seines hohen Preises den größten Regressionskoeffizienten auf. Aluminium, welches als Kathodenfolie dient, hat hingegen nahezu keinen Einfluss auf die Rohstoffkosten. Auch dieses Ergebnis bestätigt sich für alle betrachteten Zellchemien, wobei die Varianz des Ergebnisses geringer ausfällt als für die übrigen Rohstoffe.

Tabelle 4.13: Regressionskoeffizienten der Aktivmaterialien sowie der Leiterfolien auf die Rohstoffkosten einer Einzelzelle für eine Hochenergiekonfiguration der Traktionsbatterie.

<i>Hochenergie</i>		Grafit	Lithium	Nickel	Mangan	Kobalt	Eisen	Aluminium	Kupfer
Zellchemien	NMC	0,62	0,02	0,17	0,01	0,27		0,05	0,28
	LMO	0,60	0,01		0,04			0,06	0,31
	NCA	0,64	0,02	0,38		0,11		0,05	0,24
	LFP	0,65	0,01				0,03	0,06	0,30

Vergleicht man die Berechnungsergebnisse der Hochenergie- mit einer Hochleistungskonfiguration, so zeigt sich, dass der Kosteneinfluss der Aktivmaterialien für alle vier Zellchemien abnimmt (vgl. Abbildung 4.6). Im Gegensatz dazu beeinflussen die inaktiven Zellmaterialien wie beispielsweise der Separator, die beiden Leiterfolien oder das Zellgehäuse die Rohstoffkosten stärker. Hierbei stellt insbesondere die Separator- sowie die Kupferfolie einen signifikanten Kostentreiber dar. Grafit besitzt von den Aktivmaterialien auch hier den größten Kosteneinfluss, wenngleich dieser im Vergleich zur Hochenergiezelle abnimmt (vgl. Tabelle 4.14).

Tabelle 4.14: Regressionskoeffizienten der Aktivmaterialien sowie der Leiterfolien auf die Rohstoffkosten einer Einzelzelle für eine Hochleistungskonfiguration der Traktionsbatterie.

<i>Hochleistung</i>		Grafit	Lithium	Nickel	Mangan	Kobalt	Eisen		Aluminium	Kupfer
Zellchemien	NMC	0,23	0,01	0,06	0,00	0,10			0,10	0,53
	LMO	0,21	0,00		0,01				0,10	0,54
	NCA	0,28	0,01	0,16		0,05			0,10	0,51
	LFP	0,23	0,00				0,01		0,10	0,53

Lithium stellt auch in dieser Konfiguration keinen Kostentreiber dar. Insgesamt lässt sich aufgrund des schlechteren Verhältnisses von Aktiv- zu Passivmaterialien ein höheres Preisniveau für Hochleistungszellen erkennen. Dieses Ergebnis entspricht bisherigen wissenschaftlichen Ergebnissen [9] [11] [14] [8] [15] [72].

4.1.4.2 Batteriekosten in Abhängigkeit der Zellkapazität

Die Berechnungen zeigen darüber hinaus, dass neben den Kosten der Rohstoffe die Kapazität der einzelnen Zellen einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtkosten der Traktionsbatterie hat. Hierbei gilt: je größer die Kapazität der Zelle, desto geringer sind die Kosten der gesamten Batterie. Diese Relation gilt für alle betrachteten Zellchemien und Fertigungsszenarien, wobei sich die prozentuale Änderung der Kostenreduktion zwischen den drei Fertigungsszenarien nur marginal unterscheidet (vgl. Abbildung 4.7). Um den Energiegehalt der betrachteten NMC-Beispielbatteriekonfiguration von 36 kWh bei Variation der Zellkapazität konstant zu halten, wurde die Anzahl der Module bei der Auswertung des Batteriekostenmodells entsprechend angepasst, wobei die Anpassung etwaige sprungfixe Veränderungen nicht berücksichtigt.

Alle drei Fertigungsszenarien nähern sich asymptotisch einem unteren Kostenwert, wobei sich ab einer Zellkapazität von etwa 30 Ah eine deutlich abflachende Steigung beobachten lässt. Dieser Zusammenhang erklärt die Bestrebung der Automobilindustrie, die Zellkapazität zu erhöhen. Da sich jedoch nur ein geringer Kostenunterschied zwischen Zellen mit einer Kapazität von 40 und 50 Ah beobachten lässt, werden weitere Auslegungskriterien des Gesamtfahrzeugs wie Package-

anforderungen oder Kühlaufwand des Batteriepacks wichtiger. Darüber hinaus stellt die Produktion der Separatorfolien bei solchen großen Zellen aufgrund der Gefahr des Einreißen dieser Folien bei der Verarbeitung eine Größenrestriktion dar. Da die maximale Höhe der Pouch-Zelle, d. h. die Anzahl der geschichteten Anode-Separator-Kathode-Kombinationen durch thermische Restriktionen beschränkt ist, gilt, dass die Kapazität der Zellen mit ihrer Grundfläche positiv korreliert und somit eine höhere Kapazität auch gleichzeitig eine größere Zelle impliziert. Hierdurch wiederum wird der benötigte Bauraum des gesamten Batteriepacks beeinflusst und die Flexibilität des Packagings nimmt ab.

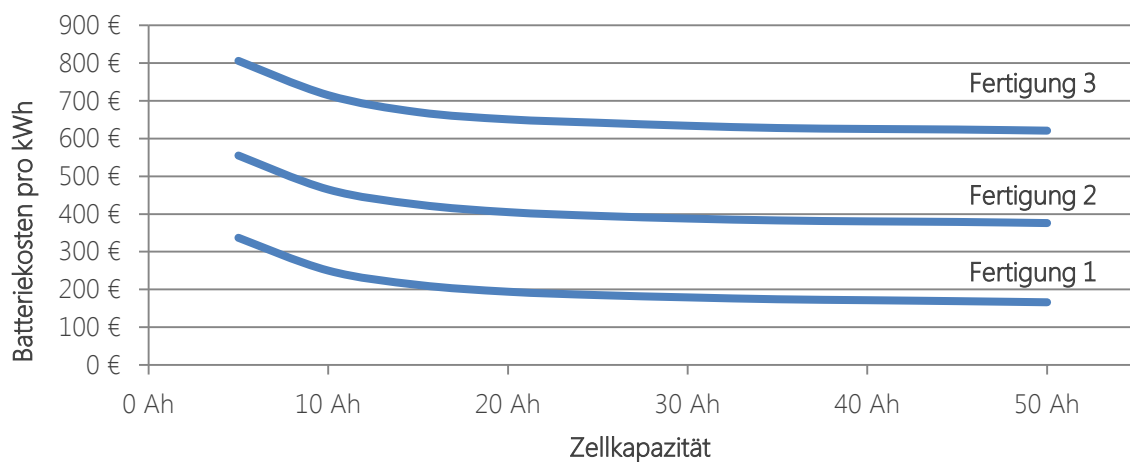


Abbildung 4.7: Funktionaler Zusammenhang zwischen der Kapazität der Einzelzelle und den Produktionskosten einer Traktionsbatterie in Abhängigkeit des Fertigungsszenarios.

Beispielbatteriekonfiguration: NMC, 36 kWh, Hochenergiekonfiguration.

Die Berechnungen zeigen, dass mit der Vergrößerung der Kapazität der Einzelzelle auch gleichzeitig der relative Anteil von Lithium und Graphit an der Gesamtbatterie steigt (vgl. Abbildung 4.8). Da bei größeren Einzelzellen für die gleiche Energiemenge weniger Verpackungsmaterial für die Zelle, ein geringere Anzahl an elektrischen Leitern und Anschlüssen sowie weniger Regelungskomponenten benötigt werden, steigt der relative Anteil der Aktivmaterialien. Hierdurch wird auch das Gesamtgewicht der Batterie beeinflusst, welches mit zunehmender Kapazität der Einzelzelle sinkt, wodurch die Energiedichte wiederum steigt.

Die Erhöhung der Kapazität der Einzelzellen hat also deutlich positive Effekte zur Folge, wenn gleich die oben angeführten Package-Restriktionen keine beliebige Erhöhung der Zellgröße ermöglichen.

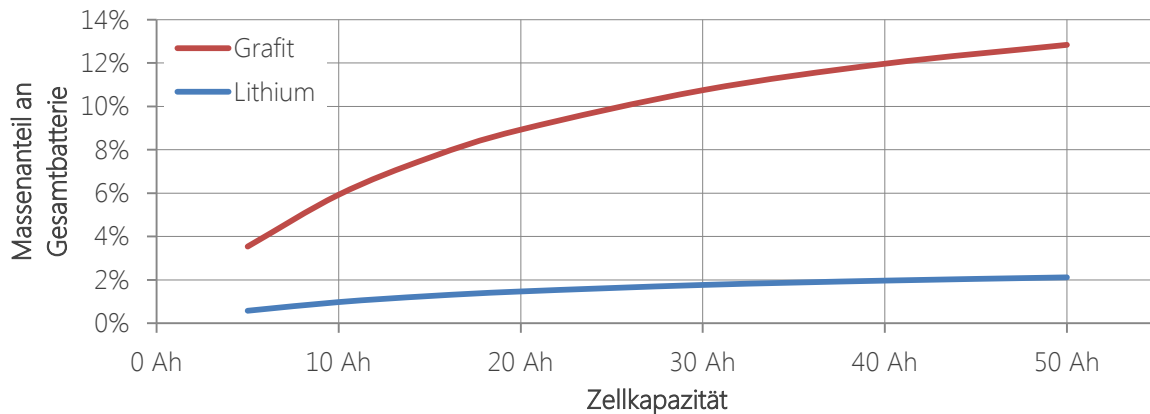


Abbildung 4.8: Massenanteile von Lithium und Graphit an der Gesamtbatterie in Abhängigkeit der Kapazität einer Einzelzelle.

Beispielbatteriekonfiguration: NMC, 32 Zellen pro Modul, 9 Module pro Pack, 36 kWh.

4.1.5 Ableitung von Lernkurven

Neben der Betrachtung der Gesamtkosten sowie der dazugehörigen Kostentreiber erlaubt das neu entwickelte Batteriekostenmodell zudem die Analyse der möglichen zukünftigen Kostenentwicklung von Traktionsbatterien auf Basis der kumulierten Stückzahlen. Hierzu werden im Modell die drei Fertigungsszenarien kombiniert, wobei sie im Hinblick auf die kumulierte Ausbringungsmenge interpretiert werden. Somit ist, wie bereits in den vorangegangenen Berechnungen, eine detaillierte Analyse auf Zell-, Modul- und Packebene möglich.

Die Kostendegression wird mit Hilfe eines Lernkurvenansatzes berechnet, welcher besagt, dass die Gesamtkosten bei jeder Verdopplung der kumulierten Ausbringungsmenge um einen festen Prozentsatz sinken [149]. Mathematisch wird dieser Zusammenhang durch

$$K_L(p) = K_0 \cdot L^{\log_2\left(\frac{p}{p_0}\right)} \quad \text{Formel 4.1}$$

mit L : Lernrate [-]

K_L : resultierende Kosten in Abhängigkeit der Lernrate [€]

K_0 : Kosten der Referenzproduktionsmenge [€]

p_0 : Referenzproduktionsmenge [Stk.]

p : Produktionsmenge, bei der die Lernrate ermittelt wird [Stk.]

beschrieben. Eine höhere Lernrate bedeutet also eine geringere Kostendegression pro kumulierter Produktionsmenge, weshalb dieser Begriff häufig zu Verwirrungen führt. Diese Form der Analyse möglicher zukünftiger Kostenentwicklungen ermöglicht es, unabhängig vom Betrachtungszeitraum die Produktionskosten neuartiger Technologien nur auf Basis der Produktionsmenge zu berechnen. Insbesondere im Hinblick auf die in Kapitel 6 durchgeführten Simulationen der zukünftigen

Fahrzeugflotte mit Hilfe des Simulationsmodells VECTOR21 ist diese Möglichkeit der Kostenberechnung vorteilhaft.

Für den Fall der Beispielbatteriekonfiguration beträgt die Lernrate 83%, d. h. die Kosten für Traktionsbatterien reduzieren sich um 17% bei Verdopplung der Ausbringungsmenge (vgl. Abbildung 4.9). Diese Rate der Kostendegression liegt im Vergleich zu früheren Ergebnissen im Bereich der bisher beobachteten Lernraten. So gibt [150] eine durchschnittliche Lernrate von 85% an. Differenziert man darüber hinaus zwischen den beiden Wirtschaftszweigen Maschinenbau mit durchschnittlichen Lernraten im Bereich von 85 bis 95% und Elektrotechnik mit Raten im Bereich von 60 bis 80% so wird deutlich, dass die Produktion von Traktionsbatterien marginal oberhalb der sonst üblichen Raten der Elektrotechnik liegt. Der hohe Anteil von Automatisierungstechnik begründet die geringfügige Verschiebung hin zu einer höheren Lernrate und damit hin zu den üblichen Raten des Maschinenbaus.

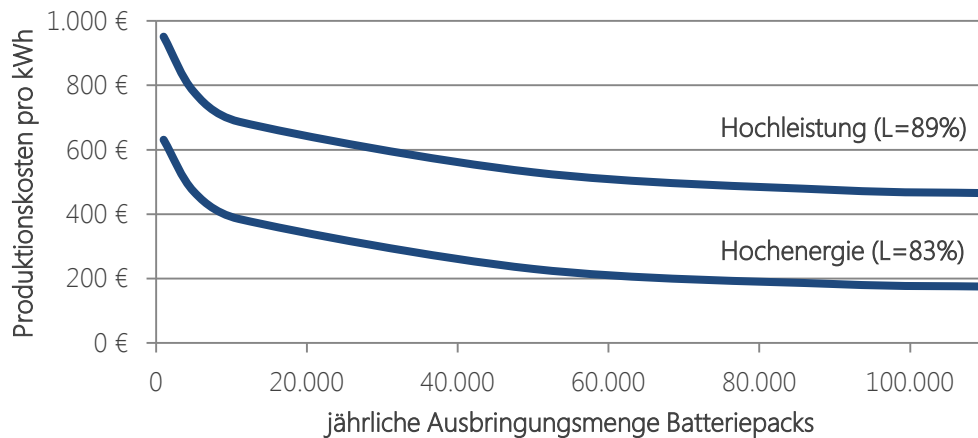


Abbildung 4.9: Lernkurven für zwei exemplarische Batteriekonfigurationen als Hochleistungs- sowie als Hochenergiebatterie.¹⁹

Variiert man ceteris paribus einen Parameter der Konfiguration der Beispielbatterie, so lassen sich auf Basis der Berechnungsergebnisse folgende Zusammenhänge identifizieren:

- Hochleistungszellen weisen höhere Lernraten auf als Hochenergiezellen.
- Je geringer die Kapazität der Einzelzelle ist, desto höher ist die Lernrate.
- Je geringer die Anzahl der Zellen pro Modul ist, desto höher ist die Lernrate.
- Je geringer die Anzahl der Module pro Pack ist, desto höher ist die Lernrate.

Diese Zusammenhänge gelten für alle vier betrachteten Zellchemien (vgl. Abbildung 4.10).

¹⁹ Hochenergiekonfiguration: NMC, 36 kWh, 34 Ah pro Zelle, 9 Module zu je 32 HE-Zellen;
Hochleistungskonfiguration: NMC, 3,5 kWh, 10 Ah pro Zelle, 6 Module zu je 16 HP-Zellen.

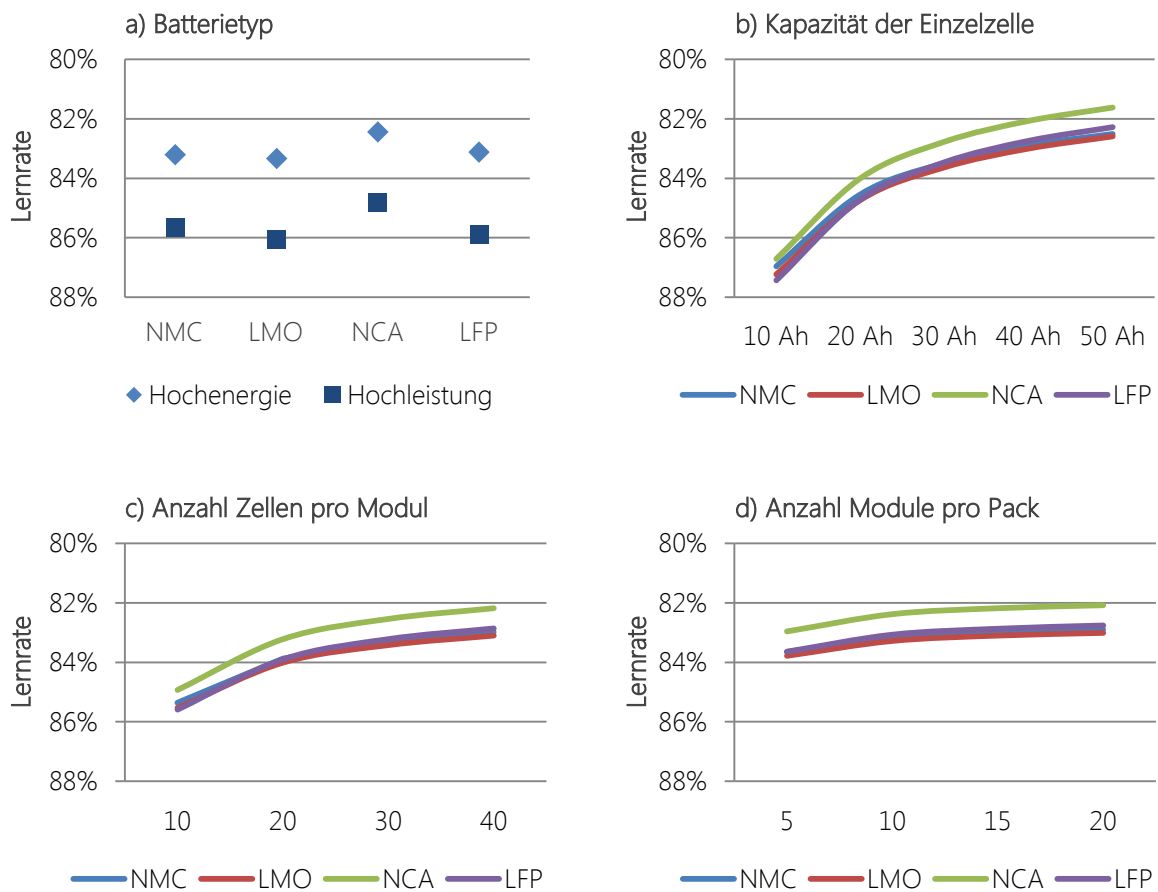


Abbildung 4.10: Abhängigkeit der Lernrate vom Batterietyp (a)), von der Kapazität der Einzelzelle (b)), von der Anzahl der Zellen pro Modul (c)) sowie von der Anzahl der Module pro Pack (d)) für die vier betrachteten Zellchemien.

Analyse auf Basis der Variation eines einzigen Parameters der Konfiguration der Beispielbatterie.

Eine Veränderung der Beispielkonfiguration auf eine für den Einsatz in Vollhybridfahrzeugen taugliche NMC-basierte Hochleistungsbatterie mit einem Energiegehalt von 3,5 kWh, einer heute üblichen Kapazität der Einzelzellen von 10 Ah sowie 6 Modulen zu je 16 Zellen zeigt, dass hierdurch neben einem deutlichen Kostenanstieg auf ein Level von 465 €/kWh bei Massenproduktion in Fertigungsszenario 1 auch gleichzeitig eine signifikante Verlangsamung der Kostendegression auf eine Lernrate von 89% verbunden ist (Abbildung 4.9). Die Evaluierung der Kosten sowie der Lernraten einer Traktionsbatterie lässt sich also nicht verallgemeinern, sondern hängt immer vom jeweiligen Anwendungsfall ab.

4.1.6 Ableitung von Übertragungseffekten

Im Hinblick auf die mögliche zukünftige Kostenentwicklung von Traktionsbatterien ist neben den Einflüssen von Skalen- und Lerneffekten auf die Produktion und damit auf die zu erwartende Kostendegression die Fragestellung von Bedeutung, inwiefern die Produktion von Traktionsbatterien durch andere Wirtschaftszweige, aber auch durch eine Professionalisierung der Industrie selbst beeinflusst werden kann. Hierzu wird im Folgenden ermittelt, welche Übertragungseffekte zwischen der Produktion von Hochleistungs- und Hochenergiezellen existieren. Darüber hinaus werden mögliche Übertragungseffekte aus verwandten Industriezweigen wie beispielsweise der Konsumgüterzellen oder der Photovoltaikindustrie bewertet. Die Analyse erfolgt hierbei quantitativ anhand der Scoring-Methode, welche es ermöglicht, mit Hilfe eines Punktbewertungssystem von -2 (stark negativer Effekt) bis $+2$ (stark positiver Effekt) subjektive Einschätzungen und qualitative Faktoren zu quantifizieren und somit vergleichbar zu machen [151]. Den Bewertungsrahmen bildet die Berechnungsmatrix des Batteriekostenmodells (vgl. Tabelle 4.15).

4.1.6.1 Übertragungseffekt zwischen Hochenergie- und Hochleistungsbatterien

Zwischen der Herstellung von Hochenergie- und Hochleistungsbatterien existieren sehr große Synergieeffekte. Hierbei weisen alle Bereiche der Herstellung sowie alle Komponenten der Traktionsbatterie, von der Zelle über das Modul bis hin zum Pack, hohe Übertragungseffekte auf. Da alle Komponenten auf die gleichen Rohstoffe und Bauteile zurückgreifen, beeinflussen sich die zukünftigen Entwicklungen der beiden Batteriekonfigurationen gegenseitig. Insbesondere die Rohstoffe der Zellproduktion weisen stark positive Übertragungseffekte auf. Bei allen betrachteten Zellchemien werden für Hochleistungs- und Hochenergiezellen die gleichen Ausgangsstoffe verwendet, wenngleich sich die Elektrodendicke und damit der Materialeinsatz unterscheiden. Ebenso bestehen Unterschiede in der Auslegung der elektrischen Anschlüsse, da diese bei Hochleistungsbatterien aufgrund der größeren elektrischen Ströme stärker dimensioniert werden müssen. Dennoch werden auch hier die gleichen Materialien und Produktionsschritte verwendet.

Die Fertigung der Module und Packs unterliegt noch stärkeren positiven Einflüssen als die Zellfertigung. Da sich Hochleistungs- und Hochenergiebatterien in ihren äußeren Abmessungen nahezu nicht unterscheiden, können zur Modul- und Packherstellung die gleichen Rohstoffe und Maschinen eingesetzt werden. Etwaige Unterschiede bestehen auch hier lediglich in der Dimensionierung der elektrischen Anschlüsse und des Kühlungssystems. Insgesamt ergibt sich mit einem Punktwert von $+1,9$ auf der Skala von -2 bis $+2$ ein stark positiver Übertragungseffekt (Tabelle 4.15). Dieser starke Zusammenhang wird in Kapitel 6 aufgegriffen und im Rahmen der Szenariorechnungen mit Hilfe des VECTOR21-Modells umgesetzt.

Tabelle 4.15: Quantifizierung der Übertragungseffekte zwischen Hochenergie- und Hochleistungsbatterien.

		Zelle	Modul	Pack	Gesamt
	<i>Gewichtung</i>	71%	15%	14%	100%
Rohstoffkosten	80%	+2	+2	+2	+2
Fertigungskosten	9%	+1	+2	+2	+1,3
Gemeinkosten	11%	+2	+2	+2	+2
Gesamtkosten	100%	+1,9	+2	+2	+1,9

Bewertet nach der Scoring-Methode mit Punktwerten von -2 bis +2; Gewichtung gemäß Abbildung 4.3.

4.1.6.2 Übertragungseffekt aus verwandten Industriezweigen

Um mögliche Kostendegressionseffekte, welche mit Übertragungseffekten aus verwandten Industriezweigen verbunden sind, zu beurteilen, werden im Folgenden potentielle Wissenstransfers identifiziert. Für die Zellherstellung kommen als verwandte Industrien exemplarisch drei Bereiche in Frage: Die Batteriefertigung von Konsumgüterzellen, die Display-Herstellung sowie die Herstellung von Photovoltaikerelementen. Batterien für Kleinallektroelektronik sind meist als zylindrische Zellen oder als Knopfzellen ausgeführt. Daher ist der Übertragungseffekt auf die Zusammensetzung von Zellen für Traktionsbatterien sowie auf die Modul- und Packherstellung als nahezu nicht vorhanden einzuschätzen. Die Produktion der Elektrodenmaterialien hingegen ähnelt ebenso wie die Beschichtung der Elektrodenfolien sehr den Produktionsprozessen für eine Traktionsbatteriezele.

Aufgrund des hohen Präzisionsgrades ist davon auszugehen, dass auch die Display-Herstellung sowie die Photovoltaikproduktion einen positiven Übertragungseffekt auf die Batterieherstellung haben werden. Neben dem geforderten Höchstmaß an Präzision benötigt die Herstellung von photovoltaischen Elementen ebenso wie die Batteriefertigung einen Reinraum sowie Prozessschritte zur Beschichtung von Wirtsmaterialien. Insgesamt ist mit einem schwach positiven Übertragungseffekt aus verwandten Industrien auf die Traktionsbatterieherstellung zu rechnen, was durch einen Punktwert von +0,7 zum Ausdruck kommt (Tabelle 4.16). Aufgrund der nur schwachen Ausprägung wird dieser Übertragungseffekt im Rahmen der Szenariorechnungen (vgl. Kapitel 6) nicht aufgegriffen.

Tabelle 4.16: Quantifizierung der Übertragungseffekte aus verwandten Industriezweigen.

		Zelle	Modul	Pack	Gesamt
	<i>Gewichtung</i>	71%	15%	14%	100%
Rohstoffkosten	80%	+1	±0	±0	+0,7
Fertigungskosten	9%	+2	+2	+2	+2,0
Gemeinkosten	11%	±0	±0	±0	±0
Gesamtkosten	100%	+1,0	+0,2	+0,2	+0,7

Bewertet nach der Scoring-Methode mit Punktwerten von -2 bis +2; Gewichtung gemäß Abbildung 4.3.

4.1.7 Einordnung der Berechnungsergebnisse

Das neu entwickelte Batteriekostenmodell ermöglicht die Berechnung und Simulation einer Vielzahl von möglichen Konfigurationen von Traktionsbatterien. In der öffentlichen und wissenschaftlichen Diskussion existieren unterschiedliche Annahmen, welches minimale Kostenniveau bei Massenproduktion erzielbar ist. Exemplarisch werden im Folgenden drei Zielpreise von Traktionsbatterien einer wissenschaftlichen Organisation, einer Unternehmensberatung sowie eines Fahrzeugherstellers mit den Ergebnissen des Berechnungsmodells verglichen. Alle im Folgenden genannten Preis- und Kostenangaben beziehen sich dabei auf das Jahr der Veröffentlichung.

Das US Advanced Battery Consortium (USABC) hat 2011 in Zusammenarbeit mit dem US Department of Energy (DoE) Kostenziele von 200 bis 300 \$/kWh veröffentlicht [152] [35]. Bei einem Umrechnungskurs von 1,30 \$/€ entsprechen diese Werte Batteriekosten von 154 bis 230 €/kWh. Das Argonne National Laboratory (ANL), welches eine Batteriefertigung im Jahr 2020 betrachtet, hat Batteriekosten für eine NMC-Konfiguration von 230 bis 280 \$/kWh bzw. 177 bis 216 €/kWh veröffentlicht [9]. Die mit dem neu entwickelten Batteriekostenmodell errechneten Kosten der Beispielbatteriekonfiguration liegen mit 180 €/kWh also im Bereich der wissenschaftlichen Kostenberechnungen.

In dem von der Unternehmensberatung Roland Berger veröffentlichten „Best cost scenario“ werden langfristig Batteriekosten von 265 \$/kWh bzw. 204 €/kWh für eine auf NMC-basierende Traktionsbatterie antizipiert [19]. Die errechneten Kosten weichen um 16% von diesem Wert ab und liegen somit im realistischen Bereich. Von Musk, dem CEO von Tesla Motors, wird antizipiert, dass die Kosten auf Zellebene in naher Zukunft unter 200 \$/kWh fallen [153]. Bei einem Umrechnungskurs von 1,30 \$/€ entspricht dieser Wert 154 €, was im plausiblen Bereich der Kosten pro Zelle liegt.

Der Fahrzeughersteller Nissan gibt für das Batteriefahrzeug Leaf eine LMO-Hochenergiebatteriekonfiguration mit einem nominalen Energiegehalt von 22,5 kWh und Produktionskosten von 375 \$/kWh bzw. 288 €/kWh an [154]. Hierbei werden insgesamt 192 Einzelzellen zu je 33,1 Ah in 48 Modulen verbaut. Die Berechnung dieser Konfiguration mit dem Batteriekostenmodell ergibt in Fertigung 1 Kosten von 286 €/kWh und bildet das veröffentlichte Ergebnis somit nahezu exakt ab (vgl. Tabelle 4.11).

Die Berechnungsergebnisse des neu entwickelten Batteriekostenmodells werden folglich als plausibel angesehen. Dennoch bestehen hinsichtlich der Eingabeparameter, insbesondere aber hinsichtlich der antizipierten Rohstoffpreise Unsicherheiten, welche eine kontinuierliche Überprüfung bei jeder Anwendung des Modells erfordern.

4.2 Berechnung der Produktionskosten von Elektromaschinen

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die Berechnung der Produktionskosten von Traktionsbatterien erfolgte, sollen im Folgenden die Produktionskosten von E-Maschinen ermittelt werden. Hierzu wird ein neues Berechnungsmodell entwickelt, welches analog der vorangegangenen Untersuchungen die Ableitung der Produktionskosten von E-Maschinen ermöglicht.

4.2.1 Identifikation der Fertigungsprozesse

Die Fertigung von Elektromaschinen lässt sich analog der generellen Bauweise (vgl. Kapitel 2.4.2) in die beiden Hauptprozesse der Rotor- sowie der Statorfertigung unterteilen. Die abschließende Endmontage stellt den letzten Produktionsschritt dar. Im Folgenden werden die einzelnen Produktionsschritte der drei Hauptprozesse am Beispiel einer permanenterrregten Synchronmaschine dargestellt.

4.2.1.1 Herstellung des Rotors

Die Herstellung des Rotors lässt sich in sechs Einzelprozesse unterteilen [145]. Den ersten Bearbeitungsschritt bildet die Erstellung des Blechpakets (vgl. Tabelle 4.17). Die gestanzten Bleche werden dabei ausgerichtet und mittels Fügeverfahren zu einer Einheit verbunden. In einem zweiten Prozessschritt wird die Rotorwelle gefertigt. Hierbei kommen vor allem formgebende Verfahren zum Einsatz, wobei der Rundlauf sowie die Oberflächenqualität der Welle gewährleistet sein muss.

Tabelle 4.17: Fertigungsschritte der Rotor- und Statorherstellung sowie der Endmontage einer permanenterrregten Elektromaschine.

Rotorherstellung		Statorherstellung		Endmontage	
1.	Erstellung Blechpaket	1.	Erstellung Blechpaket	1.	Fertigung Gehäuse
2.	Fertigung Rotorwelle	2.	Erstellung Isolierung	2.	Montage Stator
3.	Magnetisierung	3.	Erstellung Wicklungen	3.	Montage Rotor
4.	Verpressen Welle-Blechpaket	4.	Schalten	4.	Endmontage
5.	Formen und Qualitätsprüfung	5.	Formen	5.	Endprüfung
6.	Prüfen und Wuchten	6.	Prüfen	6.	Abschluss (inkl. Vorbereitung für Transport)
		7.	Qualitätsoptimierung		

Quelle: [145].

Nachdem in einem vierten Prozessschritt die Integration der Magnete auf dem Rotor erfolgt ist, werden die Welle sowie das zu Beginn hergestellte Blechpaket verpresst. Die im fünften Produkti-

onsschritt durchgeführte Qualitätsoptimierung beinhaltet neben einer geeigneten Einhausung des Rotors einen optionalen Korrosionsschutz. Abschließend wird der Rotor im letzten Produktionsschritt geprüft und gegebenenfalls gewuchtet, um eine einwandfreie Funktion zu gewährleisten.

4.2.1.2 Herstellung des Stators

Die Herstellung des Stators ist aufgrund der notwendigen Integration der Kupferwicklungen aufwändiger als die Rotorherstellung, wobei sich die Produktion in sieben Schritte unterteilen lässt [145]. Nachdem in einem ersten Schritt analog zur Herstellung des Rotors das Blechpaket erstellt wird, wird in einem zweiten Prozessschritt die notwendige elektrische Isolierung auf Basis von Isolationspapier und -folie aufgebracht (vgl. Tabelle 4.17). Den dritten Herstellungsschritt bildet die Erstellung der Wicklungen. Hierzu werden in einem vollautomatisierten Prozess zunächst die Drähte selbst gewickelt, um anschließend in das zuvor erstellte und isolierte Blechpaket eingezogen zu werden. Im vierten Schritt werden die Wicklungen durch Bündelung der Phasen und anschließende Kontaktierung miteinander verschaltet. Im Anschluss daran wird der Stator in Form gebracht und für die weitere Verwendung durch Richten der Kabel und das Bandagieren des Wickelkopfes aufbereitet. Den vorletzten sechsten Produktionsschritt bildet die elektrische Prüfung des Stators. Hierzu werden sowohl die Widerstände als auch die Isolierung geprüft. Darüber hinaus werden Stoß- und Teilentladungen durchgeführt, um die einwandfreie Funktion sicherzustellen. Den letzten Herstellungsschritt bildet analog zur Herstellung des Rotors eine Qualitätsoptimierung.

4.2.1.3 Endmontage der Elektromaschine

Den dritten Hauptprozess zur Herstellung einer Elektromaschine bildet das Zusammenführen von Rotor und Stator inklusive der abschließenden Funktionsprüfung [145]. Auf dieser letzten Fertigungsstufe lassen sich sechs Prozessschritte differenzieren (vgl. Tabelle 4.17). Nachdem im ersten Prozessschritt das Motorgehäuse mittels Grau- bzw. Aluminiumdruckguss gefertigt wurde, folgen im zweiten und dritten Schritt die Montage des Stators und des Rotors. Hierbei werden neben der erforderlichen Lagerung des Rotors auch die Hochvoltkontaktierungen des Stators angebracht sowie ein erster Funktionstest durchgeführt. Den vierten Prozessschritt bildet die Endmontage der nun vollständigen Elektromaschine. Hierzu werden alle Lage- und Temperatursensoren sowie die restlichen elektrischen Verbindungen montiert. Im Anschluss daran wird das Gehäuse der Maschine verschlossen. Den vorletzten fünften Prozessschritt stellt die Endprüfung dar. Hierbei wird neben Leistungs- und Wirkungsgradmessungen ein abschließender elektrischer Test durchgeführt. Im letzten Prozessschritt wird die fertige Elektromaschine zur Weiterverwendung bzw. zum Transport inklusive aller dafür notwendigen Lackierungen und Beschriftungen vorbereitet.

4.2.2 Entwicklung des Kostenmodells für Elektromaschinen

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die Funktionsweise der unterschiedlichen Bauarten sowie die notwendigen Fertigungsschritte einführend erläutert wurden, wird im Folgenden eine Kostenbetrachtung durchgeführt. Im Hinblick auf die spätere Simulation des Neufahrzeugmarktes (vgl. Kapitel 6) wird hierbei analog zur Kostenbetrachtung von Traktionsbatterien neben den Produktionskosten der Rohstoffeinfluss mit Hilfe eines neu entwickelten Berechnungsmodells in die Analyse einbezogen.

4.2.2.1 Modellstruktur

Das neu entwickelte Berechnungsmodell berücksichtigt neben der Herstellung der beiden Hauptkomponenten Rotor und Stator auch die Endmontage dieser beiden Komponenten. Hierbei werden analog des Batteriekostenmodells (vgl. Abschnitt 4.1.3) Rohstoffkosten, Fertigungs- und Produktionskosten sowie Gemeinkosten unterschieden. Um die Kosten der unterschiedlichen Bauarten von Elektromaschinen vergleichbar zu machen, bezieht die Modellbetrachtung die vier in Abschnitt 2.4.2.2 identifizierten Bauarten PSM, FSM, ASM sowie SRM ein. Analog der in Abschnitt 4.1.3 eingeführten Berechnungslogik wird auch zur Berechnung der Kosten von Traktions-elektromaschinen eine Matrixstruktur verwendet (vgl. Tabelle 4.18). Die Darstellung des Berechnungsschemas sowie der Eingabe-, Ausgabe- und Berechnungsmasken des Modells befinden sich im Anhang (vgl. Anhang B 13 ff.).

Tabelle 4.18: Struktur und Umfang des neu entwickelten Kostenmodells für Elektromaschinen.

	Rotor	Stator	Endmontage
Rohstoffe <i>(inkl. Halbzeuge und Zukaufteile)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Blech ▪ Magnet(e) ▪ Kupferdraht ▪ Lager ▪ Bleche ▪ Welle ▪ Anschlüsse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Blech ▪ Kupferdraht ▪ Sensoren ▪ Anschlüsse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gehäuse ▪ Kühlung ▪ Anschlüsse ▪ Lagerschilder
Produktion und Fertigung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rotor Blechpaket ▪ Rotorwelle ▪ Magnetisierung ▪ Verpressen ▪ Formen ▪ Prüfen und Wuchten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stator Blechpaket ▪ Isolierung ▪ Wickeln ▪ Schalten ▪ Formen ▪ Prüfen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Montage Stator ▪ Montage Rotor ▪ Endmontage ▪ Endprüfung und Funktionstest
Gemeinkosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transport zur Montage ▪ Forschung und Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transport zur Montage ▪ Forschung und Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transport und Logistik ▪ Vertrieb und Marketing

4.2.2.2 Rohstoffkosten

Da sich die Bauweise der vier betrachteten Elektromaschinen in einigen Punkten unterscheidet, ist es notwendig, die erforderlichen Zukaufteile ebenfalls den jeweiligen Motorbauarten zuzurechnen. Zu den benötigten Komponenten zählen neben dem Magnet bzw. den Magneten für permanent-erregte Maschinen der Kupferdraht, die Rotorwellen inklusive der Lagerung, Schleifringe bzw. -kohlen, Temperatur- und Lagesensoren sowie die Blechpakete und das Gehäuse inklusive der Kühlung [155]. Die Kosten der Komponenten sind dabei masse- oder stückzahlabhängig (vgl. Tabelle 4.19). Um den Kosteneinfluss seltener Erden auf die Produktionskosten von Elektromaschinen abbilden zu können, wurde eine separate Berechnung der Magnetkosten in das übergeordnete Berechnungsmodell integriert (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Tabelle 4.19: Zukaufteile und Halbzeuge einer Elektromaschine.

Komponente	Kosten [€/kg]	Stückkosten [€]	PSM	FSM	ASM	SRM	Quelle
Magnetkosten	128,78		ja	nein	nein	nein	Berechnung
Kupferdraht	8,65		ja	ja	ja	ja	[156]
Lager		20,00	ja	ja	ja	ja	[157]
Blechpakete	7,80		ja	ja	ja	ja	Berechnung, [158]
Welle	6,80		ja	ja	ja	ja	Berechnung
Sensoren		40,00	ja	ja	ja	ja	[159]
Scheifringe/Kohlen		10,00	nein	ja	nein	nein	[160]
Gehäuse inkl. Kühlung etc.	4,43		ja	ja	ja	ja	[161]

4.2.2.3 Fertigungskosten

Die Fertigungskosten des Stators sowie des Rotors werden analog der in Abschnitt 4.2.1 identifizierten Prozessschritte ermittelt (vgl. Tabelle 4.20). Neben den Investitionskosten der benötigten Maschinen werden deren Energieverbrauch sowie die Kosten für Instandhaltung und Wartung berücksichtigt. Letztere werden pauschal mit einem jährlichen Betrag von 5% der Investitionssumme angenommen. Stromkosten fließen mit 0,1 €/kWh in die Berechnung ein [162]. Der notwendige Personalbedarf stützt sich auf die in [145] veröffentlichten Werte, wobei auch hier zwischen direkten und indirekten Produktionsmitarbeitern, welche für Logistik und Transport sowie für qualitätssichernde Maßnahmen wie Qualitätskontrolle oder Instandhaltung und Wartung zum Einsatz kommen, unterschieden wird. Insgesamt beläuft sich der Personalbedarf für die antizipierte Serienfertigung im Dreischichtbetrieb an 365 Arbeitstagen pro Jahr auf 260 direkte sowie 52 indirekte Mitarbeiter.

Tabelle 4.20: Fertigungskosten der Elektromaschinen in den drei Hauptprozessschritten bei einer Fertigungsmenge von 500.000 Einheiten p.a.

Fertigungsschritt	Maschine	Anzahl Maschinen	Invest pro Maschine [€]	Leistung [kW]	Instandhaltung und Wartung [€/a]	Quelle	
Prozesskette Rotor	Förderband	2	20.000	1,0	2.000	Annahme	
	Blechpakete zusammensetzen	Montage-Roboter	2	60.000	15,0	6.000	[140]
	Bleche verbinden (schweißen, Nut)	Schweißgerät, Rotor-Blechpakete	5	350.000	20,0	87.500	[135]
	Montage Rotorwelle und Rotornabe	Presse	5	35.462	10,0	8.866	[163]
	Rotor wickeln	Wickelmaschine	5	183.000	11,0	45.750	[164]
	Magnete positionieren und kleben	Magnetbestückung	5	250.000	5,0	62.500	[135]
	Magnetisierung prüfen	Prüfgerät	2	60.000	1,0	6.000	[165]
	Test und Messung	Prüfgerät	2	60.000	1,0	6.000	[165]
	Auswuchten ggf. anbringen Ausgleichsgewichte	Auswucht-Maschine	5	80.000	0,8	20.000	[166]
	Erneuter Test und Messung	Prüfgerät	2	60.000	1,0	6.000	[165]
Prozesskette Stator	Förderband	2	20.000	1,0	2.000	Annahme	
	Blechpakete zusammensetzen	Montage-Roboter	2	60.000	15,0	6.000	[140]
	Bleche verbinden (schweißen, Nut)	Schweißgerät, Stator-Blechpakete	5	350.000	15,0	87.500	[135]
	Isolierpapier zuschneiden	Zuschneidemaschine Isolierpapier	2	10.000	1,0	1.000	[167]
	Isolation Nutgrund	Isoliermaschine	2	76.000	2,5	7.600	[168]
	Draht wickeln	Wickler	5	183.000	11,0	45.750	[169]
	Bereitstellen der Spulen für die Spuleneinzugsmaschine	Montage-Roboter	5	60.000	15,0	15.000	[140]
	Einbringen vorgefertigter Spulen in Stator-Blechpakete	Spuleneinziehmaschine	5	295.000	4,0	73.750	[170]
	Richten Kabel und Kontaktierung	Mitarbeiter					[145]
	Wickelkopfformen auf dem Wickelkopffendformer	Endformpresse	5	140.000	7,0	35.000	[171]
	Abisolieren der Schaltenden und Schalten der Wicklung	Drahtverbinder	5	40.000	11,7	10.000	[172]
	Bandagieren und Nachformen des Wickelkopfes	Wicklungs-Verschnür-Maschine	5	60.000	2,5	15.000	[173]
	Zwischenprüfen	Prüfgerät	5	60.000	1,0	15.000	[174]
	Vakuumprägnieren Stator	Imprägniermaschine	5	50.000	10,0	12.500	[175]
Aushärtung im Ofen	Ofen	5	50.000	20,0	12.500	[176]	
Prozesskette Endmontage	Förderband	2	20.000	1,0	2.000	Annahme	
	Montage Lager in Lagerschilde	Mitarbeiter				[145]	
	Einsetzen Rotor in Stator, montieren Lagerschilde	Montage-Roboter	2	60.000	15,0	6.000	[140]
	Integration Lage-Sensoren, Stecker, Klemmkasten	Mitarbeiter				[145]	
	Funktionstest	Prüfgerät	2	40.000	1,0	4.000	[177]
	Elektrischer Abschlusstest	Prüfgerät	2	60.000	1,0	6.000	[178]
Verpacken, Transport	Montage-Roboter	2	60.000	15,0	6.000	[140]	

4.2.2.4 Gemeinkosten

Im Gegensatz zu den Rohstoff- sowie den Fertigungskosten wird im Hinblick auf die Gemeinkosten davon ausgegangen, dass keine Unterschiede zwischen den vier betrachteten Bauarten von Elektromaschinen existieren. Neben jährlichen Ausgaben für Forschung und Entwicklung fließen Miet- sowie Fremdkapitalkosten in die Berechnung ein. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der gesamte Maschinenpark zu einem Zinssatz von 7% fremdfinanziert und über sieben Jahre konstant abgeschrieben wird. Zusätzlich zu diesen Kosten werden Kosten für Transport bzw. Logistik sowie Marketing- und Vertriebskosten berücksichtigt. Der Personalbedarf wird auf Basis von [145] mit 16 Mitarbeitern ermittelt (vgl. Tabelle 4.21).

Tabelle 4.21: Gemeinkosten für die Elektromaschinenproduktion bei einer Fertigungsmenge von 500.000 Einheiten p.a.

Kostenart	Kosten [€/a]	Quelle
Forschung und Entwicklung	5.000.000	Annahme
Transport und (Kunden-)Logistik	50.308.017	[179]
Fremdkapitalkosten	881.145	Eigene Berechnung
Fertigungsfläche und Büroräume	168.000	Eigene Berechnung
Marketing und Vertrieb	6.611.889	[180]
Personal (16 MA zu 35 €/h)	1.140.838	[145] [181]

4.2.3 Analyse der Kosten von Elektromaschinen und Kostentreiber

Im Folgenden wird das neue entwickelte Kostenmodell auf Basis der vorangegangenen Analysen angewandt. Ziel ist neben der Identifikation der Kosten von Elektromaschinen die Abbildung des Einflusses von Rohstoffkosten, wobei hier ein Fokus auf den Einfluss Seltener Erden sowie von Kupfer gelegt wird.

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse der vier betrachteten Elektromaschinen anhand einer exemplarischen Leistung von 80 kW zeigt, dass permanenterregte Synchronmaschinen die höchsten Gesamtkosten aufweisen (vgl. Abbildung 4.11). Der Kostenunterschied zu den übrigen Maschinenbauarten wird durch die hohen Ausgaben für die benötigten Magnete verursacht. Nach permanenterregten Synchronmaschinen weisen fremderregte Synchronmaschinen die zweithöchsten Gesamtkosten auf, wobei hier der Kostenunterschied hauptsächlich durch den dreifach höheren Kupferanteil im Vergleich zu Asynchronmaschinen bedingt wird (vgl. auch Abschnitt 2.4.2.2). Die niedrigsten Produktionskosten weisen Asynchronmaschinen und geschaltete Reluktanzmaschinen auf.

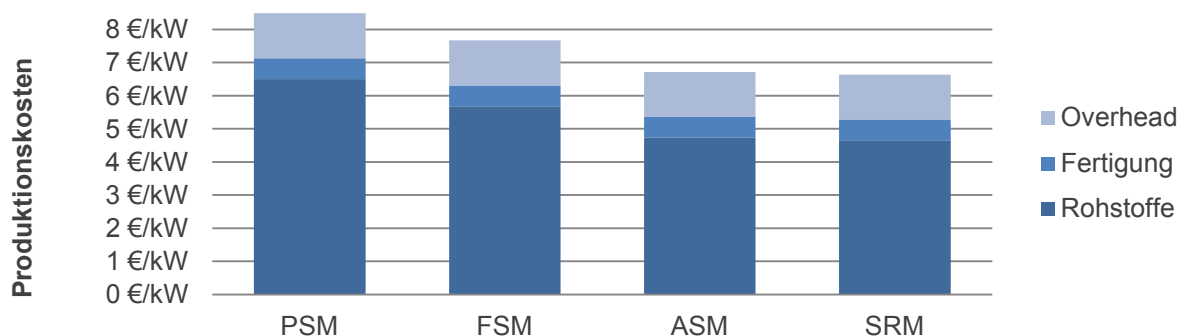


Abbildung 4.11: Zusammensetzung der Produktionskosten (floor-costs) von Elektromaschinen nach Kostenarten für eine Beispielkonfiguration von 80 kW.

Die Berechnungen zeigen, dass bei allen Maschinentypen die Kosten für Rohstoffe und Zukaufteile den größten Anteil an den Gesamtkosten besitzen. Aufgrund der hohen Kosten für die benötigten Magnete liegt dieser Anteil bei permanentenerregten Elektromaschinen mit 77% am höchsten. Aufgrund der hochautomatisierten Fertigungsprozesse bilden Fertigungskosten den geringsten Kostenanteil, wobei für alle Bauarten der Anteil unter 10% liegt.

Die Gegenüberstellung der spezifischen Produktionskosten pro kW in unterschiedlichen Leistungsklassen im relevanten Bereich bis 160 kW zeigt, dass mit zunehmender Leistung für alle Maschinentypen eine signifikante Kostenreduktion verbunden ist (vgl. Abbildung 4.12).

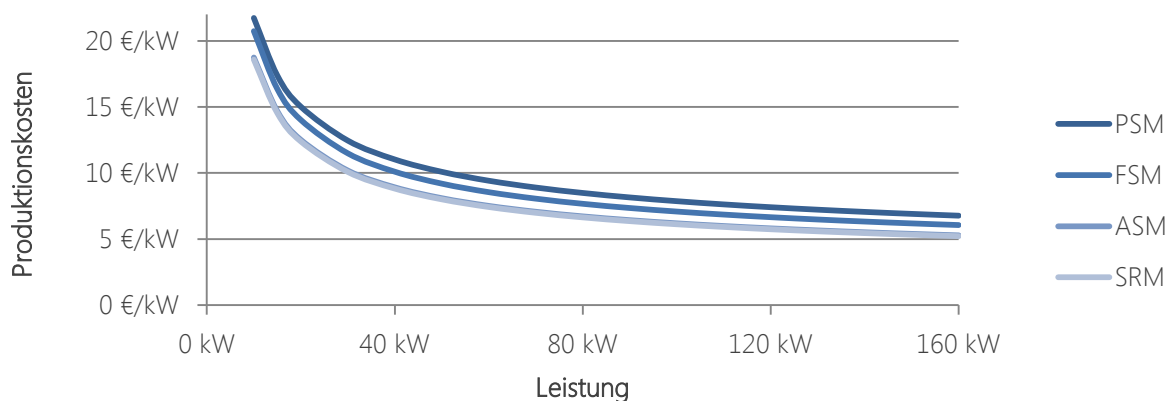


Abbildung 4.12: Abhängigkeit der Produktionskosten von Elektromaschinen von der Leistung.

Diese Kostenreduktion liegt hauptsächlich in Skaleneffekten innerhalb der Maschinen selbst begründet. Beispielsweise sind unabhängig von der Leistungsklasse für alle Maschinen die gleiche Anzahl Lager nötig, wenngleich sich die Baugröße an die jeweilige Leistung anpasst. Es zeigt sich, dass die Rangfolge der Gesamtkosten zwischen den vier betrachteten Maschinentypen im gesamten Leistungsbereich identisch ist, wobei permanenterreichte Synchronmaschinen die höchsten Kosten verzeichnen und Asynchronmaschinen und geschaltete Reluktanzmaschinen wie bereits im

Fall der Beispielkonfiguration auf einem nahezu identischen Niveau die niedrigsten Kosten verzeichnen.

4.2.3.1 Kosteneinfluss von Kupfer

Mit Hilfe des neu entwickelten Kostenmodells ist es möglich, neben den absoluten Kosten auch den Einfluss von Rohstoffpreisen auf diese Kosten zu identifizieren. Im Rahmen dieser Arbeit sollen dabei Kupfer sowie Seltene Erden betrachtet werden.

Alle vier betrachteten Maschinentypen benötigen Kupferwicklungen, um ein magnetisches Feld zu erzeugen (vgl. Abschnitt 2.4.2.1). Bei fremderregten Synchronmaschinen ist der Kupferbedarf am größten, da hier auf dem Rotor ebenfalls Wicklungen zur Erzeugung des Rotorfeldes genutzt werden. Eine Sensitivitätsanalyse der spezifischen Kosten pro kW der vier betrachteten Bauarten zeigt ceteris paribus, dass unter den getroffenen Annahmen eine fremderregte Synchronmaschine für die Leistungsklasse von 80 kW ab einem Rohstoffpreis für Kupfer von 10,34 €/kg die teuerste Alternative darstellt (vgl. Abbildung 4.13). Unterhalb dieses Schnittpunktes weisen permanenterregte Synchronmaschinen aufgrund des Magnetpreises von 129 €/kg die höchsten Produktionskosten auf. Die berechneten Kosten von Asynchronmaschinen sowie von geschalteten Reluktanzmaschinen liegen für alle betrachteten Kupferpreise unter den Produktionskosten der beiden Synchronmaschinen. Die Berechnungen zeigen zudem, dass insbesondere die Produktionskosten von fremderregten Synchronmaschinen sehr volatil auf sich verändernde Kupferpreise reagieren und mit jeder Erhöhung des Kupferpreises von 1 €/kg um 25 € ct/kW ansteigen.

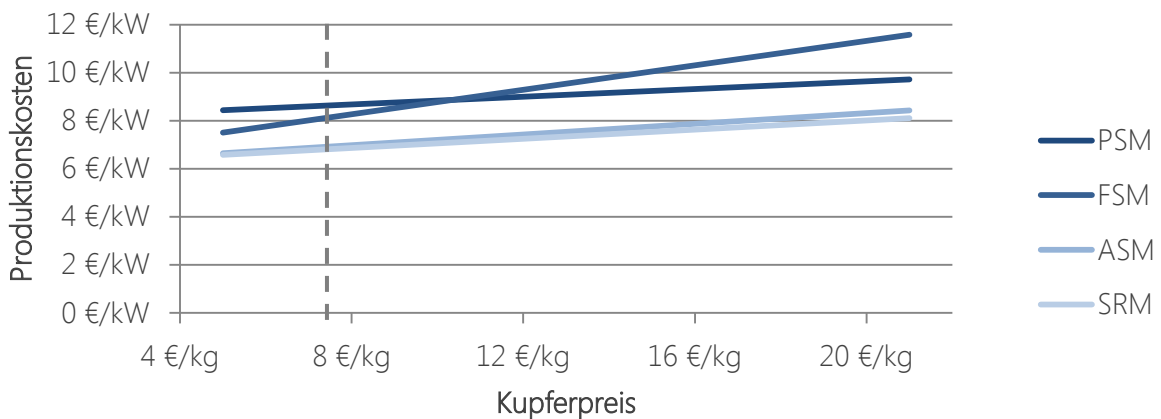


Abbildung 4.13: Produktionskosten von Elektromaschinen in Abhängigkeit des Kupferpreises für eine Beispielkonfiguration von 80 kW.

Kupferpreis im August 2011: 9,80 \$/kg, entspricht 7,5 €/kg bei einem Umrechnungskurs von 1,30 \$/€.

Die Betrachtung der Vorteilhaftigkeit von permanenterregter zu fremderregter Synchronmaschine in Abhängigkeit des Kupferpreises, also die Bestimmung des Schnittpunktes der beiden Kostenkurven, zeigt, dass mit zunehmender Leistung der Elektromaschine auch der Schnittpunkt an-

steigt (vgl. Abbildung 4.14). Das bedeutet, dass fremderregte Maschinen für hohe Leistungsklassen auch bei steigenden Kupferpreisen niedrigere Produktionskosten aufweisen als permanenterregte Maschinen. Umgekehrt bedeutet dies aber auch, dass für leistungsschwächere Maschinen selbst bei niedrigen Kupferpreisen permanenterregte gegenüber fremderregten Synchronmaschinen vorteilhaft sind.

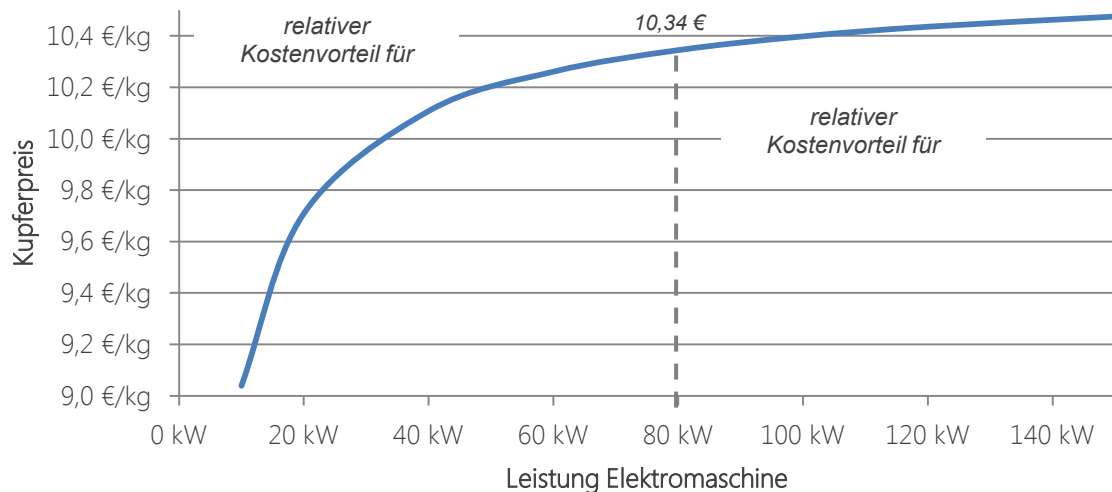


Abbildung 4.14: Bestimmung des kritischen Kupferpreises für die Vorteilhaftigkeit von PSM zu FSM in Abhängigkeit der Leistung.

4.2.3.2 Kosteneinfluss von Seltenen Erden

In heutigen Serienfahrzeugen, insbesondere in Hybridfahrzeugen, werden von nahezu allen Herstellern und in allen Fahrzeuggrößenklassen permanenterregte Synchronmaschinen verbaut [59]. Diese Bauart besitzt im Rotor, wie zuvor beschrieben, Permanentmagnete, welche heute in der Regel aufgrund der hohen Magnetstärke aus Neodym-Eisen-Bor- (NeFeB-) Magneten bestehen. NeFeB-Magnete besitzen im Vergleich zu anderen Magnettypen eine signifikant höhere Magnetstärke und eignen sich daher besonders für kompakte Bauweisen der Elektromaschinen. So beträgt ihre Magnetstärke das 2,5-fache von Samarium-Kobalt- (SmCo) Magneten und das 7 bis 12-fache von aluminium- oder eisenbasierten Magneten. Nachteile von NeFeB-Magneten sind ihre Korrosionsanfälligkeit sowie ein beschränkter Temperaturbereich [182].

Neodym zählt als Element der Gruppe der Lanthanoide zu den Metallen der Seltenen Erden. Seltene Erden sind – im Gegensatz zu ihrer Bezeichnung – in ihrem absoluten Vorkommen weltweit nicht selten zu finden, liegen allerdings häufig nur in geringen Konzentrationen in der Erdkruste vor, was die Förderung meist unwirtschaftlich macht [183]. Einer jährliche Förderung aller

Selten-Erd-Metalle von 134.000 t REO (rare-earth oxide, dt.: Selten-Erd-Oxid)²⁰ stehen dabei weltweite Reserven von 110 Millionen t REO gegenüber [121]. Hohe Konzentrationen von Neodym sind in natürlichen Vorkommen ausschließlich in chemischen Verbindungen mit anderen Lanthanoiden zu finden. Problematisch an der weltweiten Verfügbarkeit ist dabei weniger die Menge des vorhandenen Neodyms, sondern vielmehr die geo-politische Verteilung. So stammen derzeit über 95% der weltweiten Produktion aus China [184], wengleich Chinas Anteil an den weltweiten Reserven nur etwa 50% beträgt [121].

Der Preis von Neodym verzeichnet einen stetig-ansteigenden Trend, was insbesondere durch die Regulierung der Ausfuhren seitens China noch verstärkt wird und weltweit für Unsicherheit sorgt [185]. Neben der staatlich regulierten Exportquote für Seltene Erden versucht China darüber hinaus, weltweiten Preisrückgängen durch zeitweises Aussetzen der Produktion entgegenzuwirken [186].

Tabelle 4.22: Massenanteile von Neodym (Nd) am Permanentmagneten (PM) sowie vom Permanentmagnet an der Elektromaschine (EM).

Veröffentlichung	Nd ► PM	PM ► EM	Bemerkung	Quelle
Cuenca (1995)		45%		[24]
Cuenca (1999)		37%		[24]
Angerer (2009)	27-30%			[182]
Keane (2009)	31%		Referenz: 55 kW Motor, 650g Magnet, 200g Nd	[187]
Hykawy (2010)	30%			[188]
Kara (2010)	29%			[189]
Bubar (2011)	30%	1-2 kg	Referenz: Toyota Prius	[183]
Rogers (2011)	21%		Gesinterter NdFeB-Magnet	[190]

Um den Effekt der Preissteigerung von Neodym auf die Produktionskosten von Permanentmagneten und damit letztlich auf die Produktionskosten von permanenterregten Synchronmaschinen abbilden zu können, wurde das neu entwickelte Berechnungsmodell um ein Berechnungsmodul für Permanentmagneten erweitert. Das neue Berechnungsmodul bezieht sowohl den Anteil von Neodym an NeFeB-Magneten als auch den Anteil des Permanentmagneten an der Elektromaschine mit ein. Literaturdaten zum Anteil von Neodym am Magneten zeigen dabei ein eindeutiges Ergebnis (vgl. Tabelle 4.22). Das Berechnungsmodell nutzt aufgrund der Aktualität sowie der Aufbereitung der Analyse die publizierten Daten von Rogers als Referenzwert [190]. Der Anteil von

²⁰ Seltene Erden werden zumeist in Form von Oxiden gehandelt; folglich wird die Größe der Vorkommen ebenfalls in REO angegeben [297].

Neodym am Magneten sowie der Anteil des Magneten an der Elektromaschine lassen sich im Modell als Eingabeparameter frei variieren.

Die Sensitivitätsanalyse des Einflusses des Neodympreises auf die Produktionskosten zeigt, dass eine Steigerung des Rohstoffpreises signifikante Auswirkungen auf die Produktionskosten der Elektromaschine hat (vgl. Abbildung 4.15). So führt bei einem Neodymanteil am Permanentmagneten von 30% und einem Anteil des Magneten an der gesamten Elektromaschine von 40% eine Rohstoffkostensteigerung von Neodym von 50 \$/kg auf 400 \$/kg zu einer Steigerung der Produktionskosten um 224 %. Die gewählte Bandbreite des Neodympreises reflektiert dabei die hohe Volatilität dieses Rohstoffpreises in der Vergangenheit. Systematisiert man die Analyse der Sensitivität des Neodympreises und variiert gleichzeitig den Anteil von Neodym am Permanentmagneten in den identifizierten Grenzen der Literaturdaten von 21% bis 31% (und darüber hinaus), so zeigt sich, dass dieser Anteil einen signifikanten Einfluss auf die mögliche zukünftige Entwicklung der Produktionskosten von permanenterregten Elektromaschinen hat. Eine Reduktion des Neodymanteils am Magneten wirkt sich also deutlich positiv auf die resultierenden Produktionskosten der Elektromaschine aus. Dieser Effekt ist umso stärker ausgeprägt, je höher der Rohstoffpreis von Neodym ist.

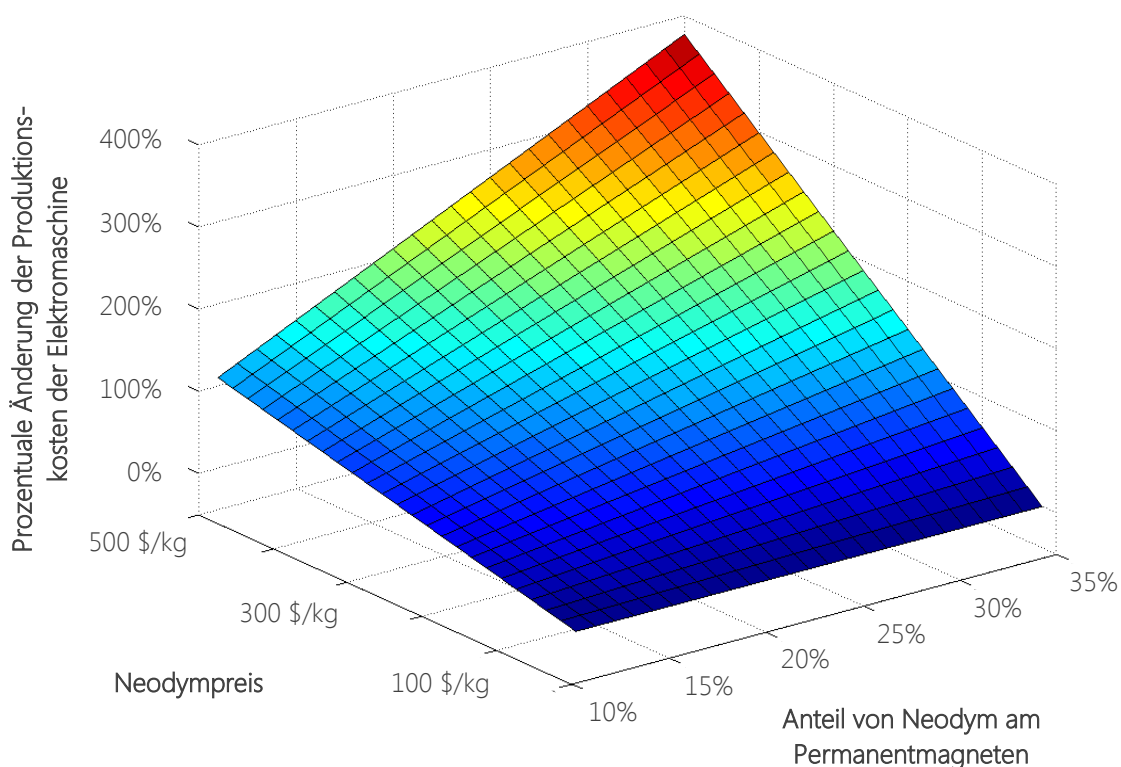


Abbildung 4.15: Veränderung der Produktionskosten einer permanenten Synchronmaschine in Abhängigkeit des Neodympreises sowie des Neodymanteils am Permanentmagneten.

Eine weitere Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des Anteils des Magneten an der Elektromaschine zeigt ein ähnliches Ergebnis (vgl. Abbildung 4.16). So führt eine Verkleinerung des Magneten zu deutlich sinkenden Produktionskosten der Elektromaschine, wobei der Effekt auch hier umso stärker ausgeprägt ist, je höher die Rohstoffkosten von Neodym sind. Eine Steigerung der Magnetstärke und die damit verbundene Möglichkeit, kleinere Magneten zu verwenden, resultiert also in signifikant sinkenden Produktionskosten der Elektromaschinen und damit in einer deutlich reduzierten Rohstoffabhängigkeit.

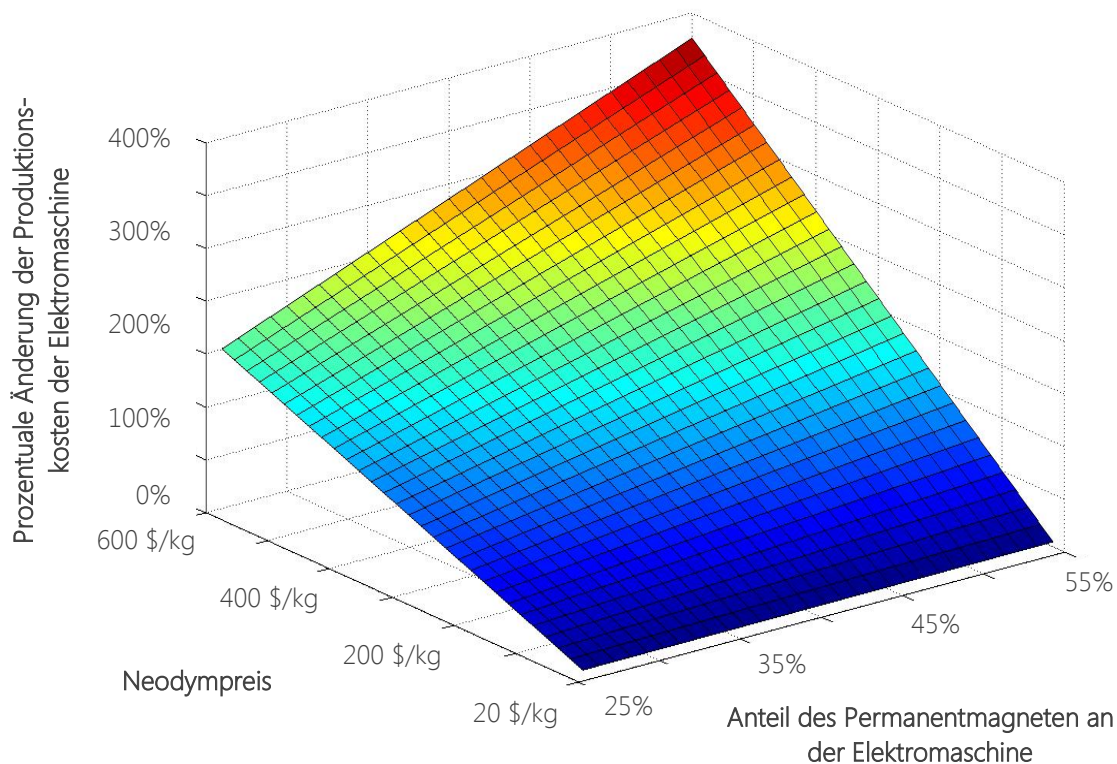


Abbildung 4.16: Veränderung der Produktionskosten einer permanenten Synchronmaschine in Abhängigkeit des Neodympreises sowie des Magnetanteils an der Elektromaschine.

Im Hinblick auf die spätere Simulation des Marktpotentials elektrifizierter Fahrzeugkonzepte ist es erforderlich, einen funktionalen Zusammenhang für die Berechnung des Anteils der Rohstoffkosten von Neodym an den gesamten Produktionskosten der Elektromaschine zu bestimmen. Hierzu wurde das Berechnungsmodell mit exemplarischen Eingangswerten des Massenanteils von Neodym am Magneten von 30% und des Anteils des Magneten an der Elektromaschine von 40% initialisiert, wobei diese beispielhaften Werte die in Tabelle 4.22 identifizierten Anteile repräsentieren. Eine lineare Regression auf Basis des Neodympreises resultiert in einer funktionalen Abhängigkeit, die sich durch

$$\Delta K_{EM} = 0,0041 \text{ kg/€} \cdot p_{Nd} - 0,0504$$

Formel 4.2

mit ΔK_{EM} : Delta Produktionskosten Elektromaschine [·] p_{Nd} : Rohstoffpreis Neodym [€/kg]

mathematisch beschreiben lässt. Im Rahmen der späteren Szenariensimulation wird dieser Zusammenhang verwendet, um die Auswirkungen eines veränderlichen Neodympreises auf die Zusammensetzung des deutschen Neufahrzeugmarktes zu bestimmen (vgl. Kapitel 6.2.3.1).

4.2.4 Einordnung der Berechnungsergebnisse

Der Vergleich der mit Hilfe des neu entwickelten Kostenmodells für Elektromaschinen berechneten Ergebnisse mit denen bisher veröffentlichter Ergebnisse zeigt, dass sich die Modellergebnisse für die gewählte Beispielkonfiguration der E-Maschinen innerhalb der Bandbreite der in Kapitel 1.2.2 analysierten Veröffentlichungen befinden.

Tabelle 4.23: Vergleich bisher veröffentlichter Kosten für Elektromaschinen in Abhängigkeit der Leistung mit den Ergebnissen des neu entwickelten Kostenmodells.

Leistung	[kW]	20	40	60	80	100	120	140	Quelle
Cuenca (1995)	[€]	162	324	486	648	810	972	1.134	[24]
Cuenca (1995)	[€]	204	408	612	816	1.020	1.224	1.428	[24]
Cuenca (1995)	[€]	326	652	979	1.305	1.631	1.957	2.283	[24]
Lipman (1999)	[€]	360	720	1.080	1.440	1.800	2.160	2.520	[25]
Delucchi (2000)	[€]	250	500	751	1.001	1.251	1.501	1.751	[26]
Delucchi (2001)	[€]	216	432	648	864	1.080	1.296	1.512	[27]
Graham (2001)	[€]	464	738	1.012	1.286	1.560	1.834	2.108	[28]
Burke (2007)	[€]	270	358	410	447	475	498	518	[29]
Lipman (2003)	[€]	346	546	746	946	1.146	1.346	1.546	[22]
Kromer (2007)	[€]	500	800	1.100	1.400	1.700	2.000	2.300	[30]
DOE (2007)	[€]	500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	[23]
Emadi (2008)	[€]	140	280	420	560	700	840	980	[31]
Ahn (2009)	[€]	825	1.225	1.625	2.025	2.425	2.825	3.225	[32]
EPRI (2010)	[€]	641	1.027	1.413	1.799	2.185	2.571	2.957	[33]
Brooker (2010)	[€]	859	1.293	1.727	2.161	2.595	3.029	3.463	[34]
Barnes (2011)	[€]	94	188	282	376	470	564	658	[35]
<i>Minimum</i>	[€]	<i>94</i>	<i>188</i>	<i>282</i>	<i>376</i>	<i>470</i>	<i>498</i>	<i>518</i>	berechnet
<i>Maximum</i>	[€]	<i>859</i>	<i>1.293</i>	<i>1.727</i>	<i>2.161</i>	<i>2.595</i>	<i>3.029</i>	<i>3.500</i>	berechnet
PSM	[€]	300	441	565	679	787	889	987	berechnet
FSM	[€]	280	404	513	614	708	798	885	berechnet
ASM	[€]	250	357	451	539	622	701	777	berechnet
SRM	[€]	248	353	445	531	612	689	763	berechnet

Sortiert nach dem Jahr der Veröffentlichung; Umrechnungskurs: 1,30 \$/€.

Anzumerken ist hierbei, dass sich die berechneten Ergebnisse mit zunehmender Leistung der E-Maschinen der unteren Grenze der Bandbreite annähern. Dies liegt hauptsächlich in der Tatsache begründet, dass das neu entwickelte Kostenmodell im Gegensatz zu den meisten bisher veröffentlichten Studien keinen linearen Zusammenhang zwischen der Leistung und den Kosten einer E-Maschine unterstellt, sondern vielmehr die Kosten auf Basis der Konfiguration der E-Maschine mit Hilfe des bottom-up-Ansatzes berechnet werden. Die Gegenüberstellung der Gesamtkosten der Elektromaschine für die vier betrachteten Bauarten verdeutlicht diesen Zusammenhang (vgl. Abbildung 4.17).

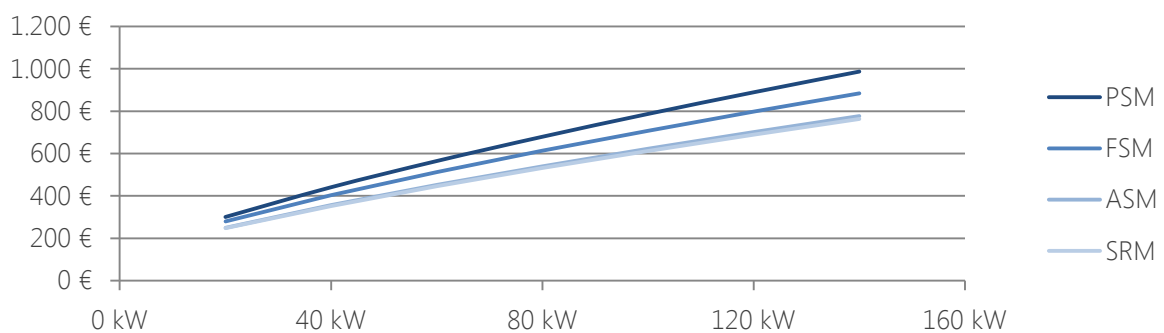


Abbildung 4.17: Gegenüberstellung der Gesamtkosten der vier betrachteten Elektromaschinenbauarten.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die in dieser Arbeit mit Hilfe des neu entwickelten Berechnungsmodells erzielten Ergebnisse mit denen bisheriger Veröffentlichungen vergleichbar sind, in ihrem Detailgrad jedoch signifikant darüber hinaus gehen.

5 Instandhaltungskosten und Wiederverkaufserlöse elektrifizierter Fahrzeugkonzepte

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Produktionskosten von Komponenten elektrifizierter Antriebsstränge betrachtet wurden, erfolgt im Folgenden eine Analyse der Instandhaltungskosten (Kapitel 5.1) sowie der Wiederverkaufserlöse (Kapitel 5.2) elektrifizierter Fahrzeugkonzepte. Hierzu wird neben einem neuen Berechnungsmodell zur Quantifizierung der Instandhaltungskosten in Abhängigkeit der Triebstrangtopologie eine neue Methodik zur Ableitung der Wiederverkaufserlöse elektrifizierter Fahrzeugkonzepte entwickelt. Hierdurch wird im Sinne der ganzheitlichen Betrachtung die integrierte Lebenszykluskostenanalyse und letztlich die Ableitung von Marktpotentialen elektrifizierter Fahrzeugkonzepte in den abschließenden Simulationsrechnungen (Kapitel 6) ermöglicht.

5.1 Berechnung der Instandhaltungskosten

Unter dem Begriff Instandhaltung werden nach der deutschen Norm DIN 31051 [191] bzw. der europäischen Norm EN 13306 [192] die Vorgänge Wartung, Inspektion, Instandsetzung sowie Verbesserung zusammengefasst (vgl. Abbildung 5.1).

Instandhaltung umfasst in diesem Sinne also alle administrativen und technischen Maßnahmen, welche zur Erhaltung bzw. Wiederherstellung einer Komponente in den funktionsfähigen Zustand dienen [59]. Konkrete Tätigkeiten umfassen hierbei die Fehleranalyse, die Vorbereitung und Durchführung der technischen Maßnahmen sowie die Funktionsüberprüfung und Rückmeldung. In der automobilen Anwendung fallen hierunter Maßnahmen wie Ölwechsel oder der Austausch von Bremssystemen.

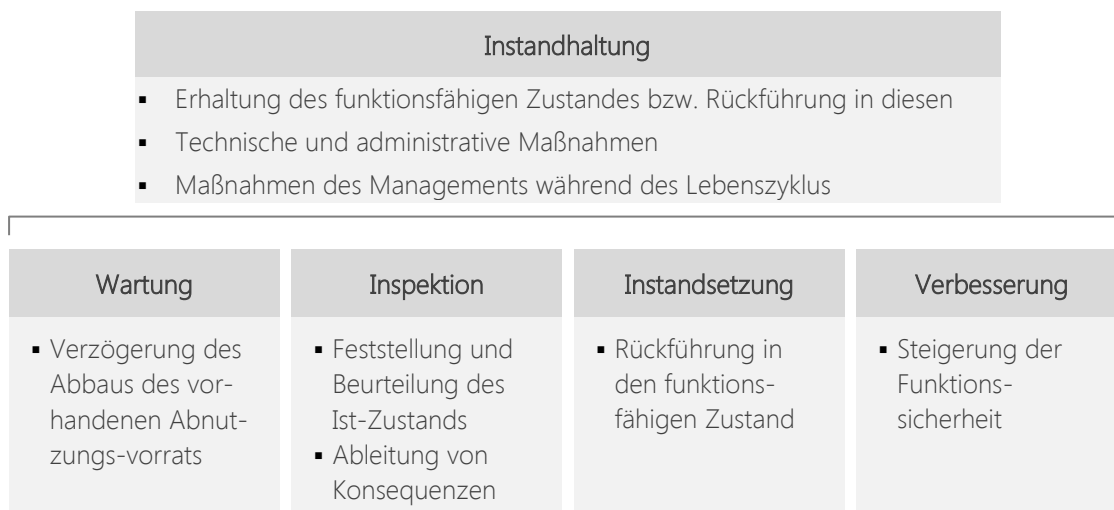


Abbildung 5.1: Begriffsdefinition von Instandhaltung.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [59] [191] [192].

5.1.1 Entwicklung des Instandhaltungskostenmodells

Das Ziel des neu entwickelten Berechnungsmodells ist die Ableitung von fahrstreckenabhängigen Instandhaltungskosten. Diese werden im Rahmen der abschließenden Szenariorechnungen genutzt, um mit Hilfe des VECTOR21-Modells Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte abzuleiten (vgl. Kapitel 6). Da bisher weder Erfahrungswerte noch Berechnungsmodelle im Hinblick auf die Instandhaltungskosten elektrifizierter Fahrzeuge existieren (vgl. Kapitel 1.2.3.1), ist die Entwicklung eines neuen Modells erforderlich.

Das neu entwickelte Instandhaltungskostenmodell bezieht hierzu basierend auf der oben erläuterten Definition von Instandhaltung alle Teilbereiche ein. Hierbei erfolgt eine zeit- sowie eine fahrleistungsabhängige Einteilung der Maßnahmen. Unter zeitabhängige Maßnahmen werden dabei Maßnahmen verstanden, welche aufgrund von Garantieforderungen oder Wartungsintervallen für den jeweiligen Fahrzeugtyp vorgeschrieben sind. Konkrete Beispiele hierfür sind der Wechsel von Öl- oder Bremsflüssigkeiten. Fahrleistungsabhängige Maßnahmen umfassen alle Tätigkeiten, welche aufgrund von Abnutzung notwendig werden. Nicht im Modell berücksichtigt werden Maßnahmen in Folge von Unfällen.

Als Ergebnis des Modells liegen Kostenkalkulationen in Form von Euro pro Kilometer Werten in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße, der Art und Architektur des Antriebsstrangs sowie der Dimensionierung der jeweiligen Antriebsstrangkomponenten vor, wobei drei Fahrzeuggrößenklassen auf Basis der Einteilung des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) unterschieden werden. Die Aggregation der gesamten Population aller vom KBA erfassten Fahrzeuge in die Größenklassen klein, mittel und groß beruht auf der von Mock [21] eingeführten Definition und stellt eine für die weiteren Analysen praktikable Partition dar.

Eine Besonderheit des Modells stellt die Einbeziehung aller in Kapitel 2.3 identifizierten Antriebsstrangarchitekturen dar. Die Dimensionierung der Antriebsstränge umfasst hierbei die verbrennungsmotorische und elektrische Leistung inklusive des Leistungsniveaus verwendeter Brennstoffzellen, die Größe der Traktionsbatterie sowie die Angabe, ob das Fahrzeug über eine Nachlademöglichkeit über das Stromnetz verfügt. Darüber hinaus sind der Anteil der rein elektrischen Fahrweise sowie der Anteil des rekuperativen Bremsens in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße sowie des Antriebsstrangs frei wählbar.

5.1.1.1 Struktur des Berechnungsmodells

Das Modell folgt einer bottom-up-Berechnungslogik und bezieht 31 unterschiedliche Komponenten konventioneller und neuartiger Antriebsstränge mit ein. Die Komponenten umfassen alle Austauschteile des Antriebsstrangs von beispielsweise Motoröl und Abgassystemen über Lichtmaschinen bis hin zu neuartigen Komponenten wie Leistungselektronik, Brennstoffzellen oder Traktionsbatterien (vgl. Tabelle 5.1).

Es wird dabei auf Basis der identifizierten Antriebsstrangarchitekturen in Kapitel 2.3 unterschieden, welche Komponenten für welchen Antriebsstrang verwendet werden. Neuartige Komponenten werden hierbei wie konventionelle Komponenten behandelt, d. h. es wird nicht hinsichtlich möglicher Zweitnutzungskonzepte von Traktionsbatterien oder Leasingkonzepte für ausgewählte Komponenten differenziert. Die Übersicht hierzu befindet sich im Anhang (vgl. Anhang C 1).

Tabelle 5.1: Betrachtete Komponenten im Instandhaltungskostenmodell.

Verbrennungsmotor	Bremssystem	Getriebe	Elektrifizierte Komponenten	Sonstige
Motoröl	Bremsflüssigkeit	Getriebe	Traktionsbatterie	Reifen
Auspuffsystem	Bremsscheibe	Getriebeöl	Brennstoffzelle	Kühlmittel
Endrohr	Bremsklotz	Kupplung	Wasserstoffdrucktank	Klimaanlage
Kraftstofffilter			Elektromaschinen	Multimedia
Luftfilter			Ladegerät	Kabinenluftfilter
Zahnriemen			Leistungselektronik	
Keilriemen				
Zylinderkopf				
Zündkerze				
Anlasser				
Lichtmaschine				
Starterbatterie				

Die Berechnungsschritte beziehen die erwartete Lebensdauer der jeweiligen Komponente und ihre Anschaffungs- bzw. Ersatzkosten ein. Die erwartete Lebensdauer wird mit Hilfe der durchschnittlich zurückgelegten Fahrtstrecke zwischen zwei durchgeführten Austauschmaßnahmen als mean-distance-between-failure (MDBF) ausgedrückt. Die für die Berechnung genutzte Ausfallrate λ lässt sich durch den reziproken Wert der MDBF bestimmen. Die Berechnungswerte berücksichtigen

dabei jeweils individuell die Fahrzeuggröße sowie die Antriebsstrangarchitektur selbst. So variiert beispielsweise die Abnutzung der Reifen und damit die erwartete durchschnittliche Lebensdauer aufgrund des unterschiedlichen Fahrzeuggewichts nicht nur zwischen kleinen, mittleren und großen Fahrzeugen, sondern auch zwischen schwereren Vollhybridfahrzeugen und leichteren konventionellen Fahrzeugen (vgl. hierzu auch Abschnitt 5.1.1.2). Darüber hinaus werden die Zeit, die zum Austausch der Komponente benötigt wird sowie die damit verbundenen Personalkosten berücksichtigt. Mathematisch lässt sich die Berechnungslogik des Instandhaltungskostenmodells durch

$$K_{M\&R, j, k} = \sum_{i=1}^{n=31} \lambda_{i, j, k} \cdot (K_{\text{Ansch.}, i, j, k} + T_{\text{Austausch}, i, j, k} \cdot K_{\text{Personal}}) \quad \forall j, k \quad \text{Formel 5.1}$$

mit $K_{M\&R}$: Instandhaltungskosten (maintenance & repair) [€/km]

λ : Ausfallrate (=MDBF⁻¹) [km⁻¹]

MDBF: mean-distance-between-failures [km]

$K_{\text{Ansch.}}$: Anschaffungskosten des Austauschteils [€]

$T_{\text{Austausch}}$: Arbeitszeit zum Austausch der Komponente [h]

K_{Personal} : Personalkosten [€/h]

n : Anzahl der betrachteten Komponenten [·]

j : Antriebsstrangarchitektur [·]

k : Fahrzeuggröße [·]

beschreiben. Neben der mittleren Zeit zwischen zwei Ausfällen bzw. dem (planmäßigen) Austausch einer Komponente sind dabei die Anschaffungskosten der Ersatzkomponente ($K_{\text{Ansch.}}$) und die Arbeitszeit ($T_{\text{Austausch}}$), die zum Austausch benötigt wird, abhängig von der Art des Antriebsstrangs sowie der Fahrzeuggröße. Für die Personalkosten (K_{Personal}) wird für alle Komponenten der durchschnittliche Kostensatz eines Facharbeiters in deutschen Werkstätten von 70 €/h verwendet [193]. Die mit Hilfe von Formel 5.1 berechneten Ergebnisse fließen auf Basis der funktionalen Erweiterung von VECTOR21 gemäß Formel 2.1 in das Simulationsmodell ein und werden folglich im Rahmen der abschließenden Szenariorechnungen (vgl. Kapitel 6) wiederverwendet.

Aufgrund dieser Berechnungslogik ist es erforderlich, für jede betrachtete Komponente die erwartete Lebensdauer sowohl in Abhängigkeit der Antriebsstrangarchitektur als auch in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße zu bestimmen.

5.1.1.2 Konventionelle Komponenten

Für konventionelle Komponenten wie Bremsscheiben, -klötze und -flüssigkeit, Reifen, Abgassysteme inklusive der Endrohre, Kupplungen, Getriebeöl, Kühlflüssigkeit, Luft-, Kabinenluft- und Treibstofffilter, Zahn- und Keilriemen, Zylinderkopfdichtungen, Zündkerzen sowie die Starterbatterie werden hinsichtlich der durchschnittlichen Lebensdauer sowie der durchschnittlichen Preise ADAC-Daten in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße verwendet [193]. Für konventionelle verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge ist es nicht erforderlich, diese Werte anzupassen. Für elektrifizierte

Fahrzeugkonzepte bedarf es im Falle der Möglichkeit, rein elektrisch zu fahren einer Anpassung der Lebensdauer dieser konventionellen Komponenten. Hierbei wird die ermittelte durchschnittliche Lebensdauer der Komponenten mit Hilfe von Formel 5.2 angepasst. Der Anteil der verbrennungsmotorischen Fahrweise ist dabei ein Eingabeparameter des Modells. Im Fall des Bremssystems wird der Anteil der ICE-Fahrweise durch den Anteil des rekuperativen Bremsens im Vergleich zum mechanischen Bremsen ersetzt. Dieser Anteil stellt ebenfalls einen Eingabeparameter in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße sowie der Antriebsstrangkonfiguration dar. Die in Abhängigkeit des rein elektrischen Fahranteils angepasste mittlere Lebensdauer von Komponenten elektrifizierter Antriebsstränge lässt sich mit Hilfe von

$$MDBF_{ij,k}^* = MDBF_{ICV,ij,k} \cdot \frac{1}{\rho_{ICE,j,k}} \quad \text{Formel 5.2}$$

mit $MDBF_{ij,k}^*$: angepasste mean-distance-between-failures [km]

$MDBF_{ICV,ij,k}$: mean-distance-between-failures des ICV
(verbrennungsmotorisches Fahrzeug) [km]

i: Komponente [·]

j: Antriebsstrangarchitektur [·]

k: Fahrzeuggröße [·]

ρ_{ICE} : Anteil verbrennungsmotorische Fahrweise [·]

bestimmen.

Neben den oben aufgeführten Komponenten existieren noch weitere konventionelle Komponenten, welche eine gesonderte Lebensdauer- und Kostenbetrachtung erforderlich machen. Hierzu zählen zum einen Motoröl und Bremsflüssigkeit, welche nicht in Abhängigkeit der Laufleistung bzw. der Abnutzung, sondern auf Basis von vorgeschriebenen Zeitintervallen gewechselt werden. Zum anderen zählen hierzu Reifen, welche eine Abnutzung in Abhängigkeit der Fahrzeugmasse und -leistung erfahren. Für Motoröl und Bremsflüssigkeit werden im Fall von konventionellen Fahrzeugen ebenfalls ADAC-Daten verwendet [193]. Für Hybridfahrzeuge basieren die angenommenen Werte auf den Handbüchern bereits erhältlicher Fahrzeuge wie dem Toyota Prius oder dem Chevrolet Volt. Die Lebensdauererwartung von Reifen wird in Abhängigkeit der Fahrzeugmasse und -leistung mit Hilfe von Formel 5.3 errechnet, wobei die Koeffizienten durch eine Regressionsanalyse der durchschnittlichen Reifenlebensdauer ermittelt wurden [193].

$$MDBF_{\text{Reifen},j,k} = 60.812 \text{ km} - 0,618 \text{ kg}^{-1} \cdot m_{jk} - 143,2 \text{ kW}^{-1} \cdot P_{jk} \quad \text{Formel 5.3}$$

mit $MDBF_{\text{Reifen},i,j,k}$: mean-distance-between-failure der Reifen [km]

j: Antriebsstrangarchitektur [·]

k: Fahrzeuggröße [·]

m: Fahrzeugmasse [kg]

P: Fahrzeugleistung [kW]

5.1.1.3 Brennstoffzellensysteme

Für Brennstoffzellensysteme wird davon ausgegangen, dass ihre Lebensdauer die eines Fahrzeugs übersteigt. Bisher veröffentlichte Studien bestätigen diese Annahme. So gibt das US Energieministerium (DOE) [194] eine zeitliche Betriebsdauer von mehr als 7.300 Stunden an. Streckenbasierte Analysen errechnen Lebensdauern von 200.000 km [194] bzw. 247.000 km [102] für die Brennstoffzelle selbst und 483.000 km [26] für den Druckwasserstofftank. Für die weiteren Berechnungen werden Lebensdauern bzw. MDBFs für das Brennstoffzellensystem von 400.000 km sowie des Druckwasserstofftanks von 483.000 km angenommen.

5.1.1.4 Traktionsbatterien

Die fehlende empirische Datenbasis zu Lebensdauererwartungen von Traktionsbatterien macht es notwendig, eigene Berechnungen durchzuführen. Hierzu wurde ein neues Berechnungsmodell implementiert. Ziel dieses Modells ist die Berechnung der Lebensdauer von Traktionsbatterien in Form eines fahrtstreckenabhängigen Kostenwertes. Hierbei wird die Konfiguration der Batterie, also die Auslegung für einen spezifischen Triebstrang in die Berechnung einbezogen. Die so ermittelten Euro pro km Werte dienen letztlich als Input für das übergeordnete Instandhaltungskostenmodell.

Lebensdauer einzelner Zellen

Auf Testständen durchgeführte Tests mit Lithium-Ionen-Batteriezellen zeigen, dass die Lebensdauer der Zellen von der Art der Nutzung und insbesondere von der Entladetiefe sowie der Entladeschwindigkeit abhängt [195] [196] [80] [34]. Hierbei lässt sich eine funktionale Abhängigkeit der Zyklenfestigkeit einzelner Batteriezellen identifizieren, welche sich durch

$$N = a \cdot \text{DoD}^b \quad \text{Formel 5.4}$$

mit N : Anzahl der Entladezyklen [·]

DoD : Depth-of-discharge (Entladetiefe [·])

a, b : Zellchemie-abhängiger Lebensdauerparameter [·]

beschreiben lässt [197] [198]. Die Bauform der Zelle ist dabei irrelevant. Die Faktoren a und b stellen Parameter dar, welche von der jeweiligen betrachteten Batterie abhängen. Auf Basis dieses funktionalen Zusammenhangs wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, welches die Lebensdauererwartung der Traktionsbatterie in Abhängigkeit des Antriebsstrangs sowie der Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten ermöglicht. Hierbei werden Werte der Parameter von $a=1.331$ und $b=-1,8248$ genutzt [199]. Eingabeparameter des Berechnungsmodells sind die Art des Antriebsstrangs und dessen elektrischer Energieverbrauch, die Kapazität der Einzelzelle, das Spannungslevel sowie der Energiegehalt inklusive der real nutzbaren Be- bzw. Entladungsgrenzen des gesamten Batteriesystems und die Anzahl der Module inklusive der Anzahl seriell geschalteter

Einzelzellen innerhalb des Moduls. Darüber hinaus sind funktionale Angaben wie die Anzahl der Simulationsläufe und die geforderte Sicherheitswahrscheinlichkeit der Berechnung notwendig.

Einfluss der Entladestrategie

Durch die in Formel 5.4 definierte Abhängigkeit wird deutlich, dass die Fahrzeugauslegung über den zulässigen Entladebereich signifikanten Einfluss auf die zu erwartende Lebensdauer der Traktionsbatterie hat. Hierbei besteht zwischen vollelektrischen und hybriden Fahrzeugen ein deutlicher Unterschied. Batterieelektrische Fahrzeuge benötigen zur Erzielung großer Reichweiten einen möglichst großen zulässigen Entladebereich, wobei ein Entlade-/Ladezyklus nur einmal durchlaufen wird. In diesem Fall spricht man von einem sogenannten charge-depleting (CD)-Betriebsmodus [15]. Hybridfahrzeuge hingegen weisen kleinere, sogenannte Mikrozyklen auf, welche jedoch deutlich häufiger durchlaufen werden. Im Falle von Plug-in Hybriden wird vor diesem sogenannten charge-sustaining (CS)-Betriebsmodus einmal der CD-Modus durchlaufen (vgl. Abbildung 5.2). Hierbei alterniert der Beladungszustand der Batterie (state-of-charge, SOC) zwischen festgelegten Minimal- und Maximalwerten. Der Anteil der CD- bzw. CS-Betriebsmodi sowie die Entladetiefe der Batteriefahrzeuge wird auf Basis realer Fahrleistungsdaten der Primärerhebung Mobilität in Deutschland 2008 [3].

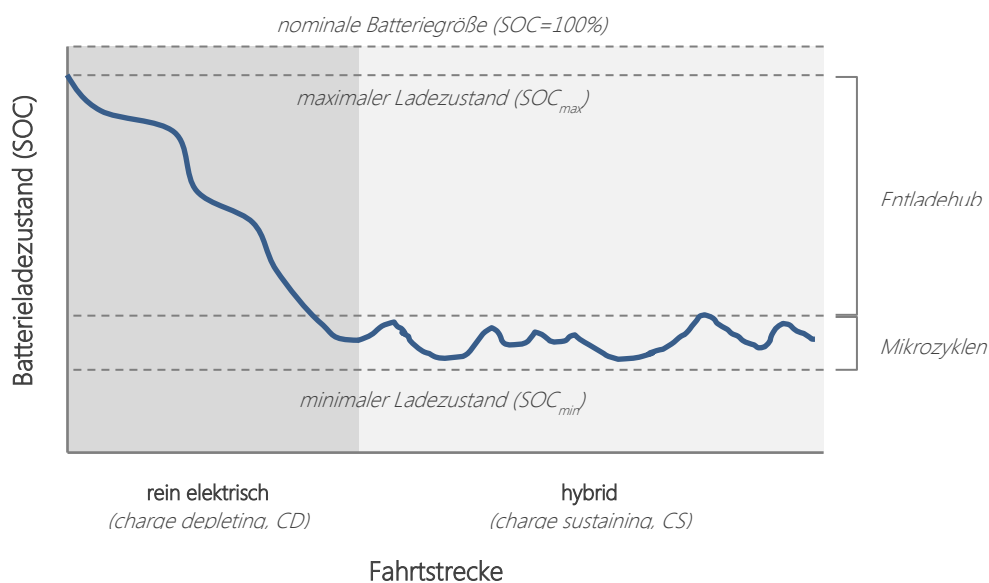


Abbildung 5.2: Typischer Entladezyklus für einen Plug-in Hybrid.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [15].

Entscheidend für die Lebensdauererwartung der gesamten Traktionsbatterie ist die Verschaltung der einzelnen Zellen innerhalb der Module sowie die Verschaltung der Module zum Batteriepack [136] [200] [201]. Für das entwickelte Berechnungsmodell wird angenommen, dass einzelne Zellen aufgrund der Heterogenität möglicher Ersatzzellen sowie der festen mechanischen

Verbindung innerhalb der Module nicht ausgetauscht werden können [136]. Das marginal unterschiedliche Spannungslevel der neuen Zellen im Vergleich zu den bereits im Modul verbauten Zellen verhindert aufgrund des derzeit nicht lösbaren Problems des elektrischen Managements von ungleichen Zellen den einfachen Austausch der Zellen. Darüber hinaus sind die Zellen der seriellen Stränge in der Regel fest miteinander verschweißt, was den einfachen Austausch ebenfalls erschwert bzw. verhindert. Es wird weiter angenommen, dass der Austausch von Modulen hingegen problemlos möglich ist. Die zu Grunde gelegte Batterietopologie beinhaltet darüber hinaus keine Querverbindungen zwischen einzelnen Zellen serieller Stränge.

Darüber hinaus ist beim Ausfall einer Zelle nicht zwangsläufig das gesamte Modul betroffen. Falls innerhalb des Moduls Stränge von seriell verschalteten Zellen selbst parallel verschaltet sind, ist es lediglich erforderlich, den seriellen Strang, welcher die defekte Zelle enthält, abzuschalten (vgl. Abbildung 5.3). Hierdurch sinkt zwar die Kapazität des Moduls und damit der Energiegehalt der gesamten Traktionsbatterie, das Spannungslevel des Moduls bleibt jedoch aufgrund der Parallelschaltung der übrigen seriellen Zellstränge konstant und das Modul somit funktionsfähig [136]. Fällt allerdings in allen seriellen Zellsträngen mindestens eine Zelle aus, so ist das Modul nicht mehr einsatzfähig und muss ersetzt werden. Folglich ist die Anordnung der Zellen im Modul ausschlaggebend dafür, wann das gesamte Modul nicht mehr funktionsfähig ist und ersetzt werden muss. Auf diesem funktionellen Zusammenhang basiert das neu entwickelte Berechnungsmodell, welches im Folgenden mathematisch beschrieben wird.

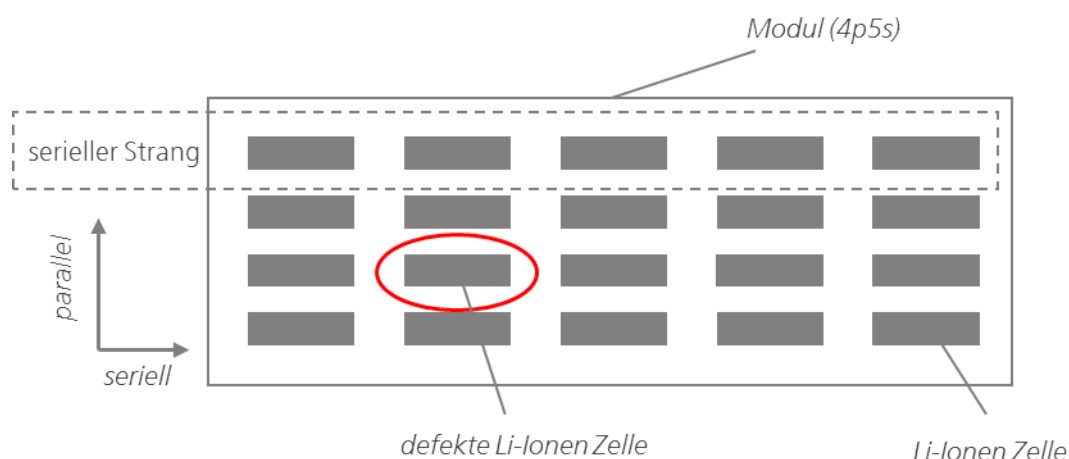


Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau eines Batteriemoduls mit vier parallel verschalteten seriellen Zellsträngen zu je fünf Einzelzellen (4p5s).

Lebensdauer bei paralleler Verschaltung

Um die Lebensdauererwartung eines Moduls mit einer Parallelschaltung von seriellen Zellsträngen zu berechnen, wird zunächst die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall einer Zelle mit Hilfe des in Formel 5.4 definierten Zusammenhangs der Lebensdauer einer Zelle und der Entladetiefe ermit-

telt. Dazu wird mittels einer Monte-Carlo-Simulation die zu erwartende Verteilung der Lebensdauer der Zellen auf Basis der realen deutschen Fahrleistungsdaten errechnet, wie sie in [3] erfasst wurden. Die so simulierte diskrete Verteilung wird durch die für Lebensdauerberechnungen übliche Weibull-Verteilung in eine stetige Funktion transferiert [202].²¹ Die Verteilungsfunktion der Weibull-Verteilung lässt sich hierbei durch

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad \text{Formel 5.5}$$

mit $F(x)$: Verteilungsfunktion [·]

λ : Skalierungsparameter [·]

k : Formparameter [·]

und $x \geq 0$

mathematisch beschreiben [202]. Die Verteilungsfunktion $F(x)$ kann inhaltlich also als Lebensdauer einer einzelnen Zelle interpretiert werden und gibt somit die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der Zelle nach x km an. Die Wahrscheinlichkeit für die Funktionsfähigkeit einer Zelle nach x km lässt sich somit durch die Gegenwahrscheinlichkeit ausdrücken und beträgt $(1-F(x))$. Auf Basis von Bol [203] kann die Lebensdauer T_s des Reihensystems einzelner Zellen folglich zu

$$P(T_s \leq x_s) = P(\min\{T_i \leq x_s\}) \quad \text{Formel 5.6 [203]}$$

$$= 1 - \prod_i P(T_i > x_s)$$

$$= 1 - \prod_i (1 - F_i(x_s)) \quad \text{mit } F_i(x_s) = F(x_s) \quad \forall i$$

$$= 1 - (1 - F(x_s))^n = 1 - \left(e^{-\left(\frac{x_s}{\lambda}\right)^k}\right)^n$$

$$\Leftrightarrow x_s = \lambda \cdot \sqrt[k]{-\ln(\sqrt[n]{1-P})} \quad \text{Formel 5.7}$$

mit P : Wahrscheinlichkeit für Ausfall [·]

T_s : Lebensdauer des Reihensystems [km]

T_i : Lebensdauer einer einzelnen Zelle des Reihensystems [km]

n : Anzahl der seriell verschalteten Einzelzellen (Index i) [·]

λ, k : Parameter der Weibull-Verteilung

x_s : Ausfallstrecke des Reihensystems [km]

umgeformt werden. Wie zuvor erläutert, ist für die Lebensdauer des seriellen Strangs die minimale Ausfallzeit T_i von einer der seriell verschalteten Zellen entscheidend. Durch diese Umformung und

²¹ Die Annäherung der diskreten Berechnungsergebnisse durch die stetige Weibull-Dichtefunktion erfolgt mit Hilfe der Simulationssoftware @Risk.

unter Berücksichtigung von Formel 5.5 kann die Lebensdauer des Reihensystems in Abhängigkeit der in der Simulation ermittelten Parameter λ und k der Weibull-Verteilung errechnet werden (Formel 5.7). Für alle Berechnungen wird die statistische Unabhängigkeit der Ereignisse unterstellt.

Lebensdauer bei serieller Verschaltung

Werden nun diese Reihensysteme einzelner Zellen innerhalb des Moduls parallel verschaltet, ist für die Berechnung der Lebensdauer T_p des gesamten Moduls entscheidend, nach welcher Fahrleistung in jedem der seriellen Zellstränge mindestens eine Zelle ausgefallen ist. Auf Basis von Bol [203] und mit Hilfe von Formel 5.6 lässt sich dieser Zusammenhang in der Wahrscheinlichkeitstheorie zu

$$\begin{aligned}
 P(T_p \leq x_p) &= P(\max\{T_j \leq x_p\}) && \text{Formel 5.8 [203]} \\
 &= \prod_j P(T_j \leq x_p) \\
 &= \prod_j F_j(x_p) \text{ mit } F_j(x_p) = F(x_p) \quad \forall j \\
 &= [F_j(x_p)]^m = \left(1 - \left(e^{-\left(\frac{x_p}{\lambda}\right)^k}\right)^n\right)^m && \text{(Formel 5.6)}
 \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow x_p = \lambda \cdot \sqrt[k]{-\ln\left(\sqrt[n]{1 - \sqrt[m]{P}}\right)} \quad \text{Formel 5.9}$$

mit P : Wahrscheinlichkeit für Ausfall [·]

T_p : Lebensdauer des Parallelsystems [km]

T_j : Lebensdauer eines Reihensystems [km]

n : Anzahl der seriell verschalteten Einzelzellen (Index i) [·]

m : Anzahl der parallel verschalteten Reihensysteme (Index j) [·]

λ, k : Parameter der Weibull-Verteilung

x_p : Ausfallstrecke des Parallelsystems [km]

umformen. x_p stellt somit den relevanten Parameter für die erwartete Lebensdauer der Traktionsbatterie in Abhängigkeit des Antriebsstrangs sowie der Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten dar. Entscheidend ist für die Lebensdauer des Moduls die maximale Lebensdauer des letzten noch funktionsfähigen seriellen Zellstrangs. Wie zuvor, wird auch hier für alle Berechnungen die statistische Unabhängigkeit der Ereignisse unterstellt.

Lebensdauer des Batteriepacks

Die Batteriegröße des Antriebsstrangs beeinflusst dabei in Kombination mit dem Energieverbrauch des Fahrzeugs in Abhängigkeit der realen Fahrleistungen die Entladetiefe der Batterie und damit die Anzahl der möglichen Zyklen. Darüber hinaus ist das geforderte Spannungslevel der Batterie in

Kombination mit der Kapazität der Einzelzellen und damit der Gesamtanzahl der Module ausschlaggebend für die Bestimmung der in Serie geschalteten Zellen pro Modul.

Die Auswertung der Berechnungsergebnisse des Lebensdauermodells in Kombination mit exemplarischen Kosten für Traktionsbatterien (vgl. Kapitel 0) liefert Aussagen über relative Kosten pro km elektrischer Reichweite. Hierbei lassen sich Sensitivitäten hinsichtlich des elektrischen Verbrauchs des Fahrzeugs, der Batteriegröße sowie des Einflusses der zulässigen Entladungstiefe bestimmen, wobei, wie eingangs erwähnt, zwischen batterieelektrischen und hybriden Fahrzeugen unterschieden werden kann.

Tabelle 5.2: Beispielkonfiguration von Traktionsbatterien im Lebensdauermodell.

	Verbrauch elektrisch (Fahrzeug) kWh/100 km	Zelle			Modul	
		Spannung	Kapazität	Kosten	Zellen	davon seriell
		V	Ah	€/kWh	Stück	Stück
BEV	15	3,7	10	200	32	4
Vollhybrid	17	3,7	10	300	16	4

	Pack				
	Module	parallel	Größe	Nutzbarer Entladehub	
	Stück	Stück	kWh	CD	CS
BEV	14	1	20	80%	–
Vollhybrid	5	2	5	60%	6%

Variiert man für eine exemplarische batterieelektrische Fahrzeugauslegung (vgl. Tabelle 5.2) sowohl die maximal zulässige Entladungstiefe als auch die Batteriegröße selbst, so lässt sich ein negativer Einfluss der maximal zulässigen Entladungstiefe auf die Kosten pro km identifizieren (Abbildung 5.4a)). Dies bedeutet, dass mit einem größeren zulässigen Entladehub auch höhere Kosten verbunden sind. Dieser Einfluss ist umso geringer, je größer die Batterie ist. Die ansteigenden Kosten pro km der größeren Batterien lassen sich hierbei fast ausschließlich aus den Mehrkosten für die größere Batterie selbst und nicht durch den negativen Einfluss der tieferen zulässigen Entladung begründen. Deutlich wird dieser Zusammenhang bei Normierung der Berechnungsergebnisse auf 1 kWh (Abbildung 5.4b)). Da es sich um ein heuristisches Berechnungsmodell handelt, welches die diskreten Berechnungsergebnisse der Batterienutzung in Abhängigkeit der Fahrtstrecken von Nutzern in Deutschland in die stetige Weibull-Verteilung überführt, weisen die Berechnungsergebnisse marginale Schwankungen auf. Technisch liegt der nahezu fehlende Einfluss der zulässigen Entladetiefe darin begründet, dass die zur Auswertung verwendeten realen deutschen Fahrprofile ab elektrischen Reichweiten der Fahrzeuge von etwa 100 km nur sehr selten bis an die maximal zulässige Entladegrenze entladen werden müssen, d. h., dass die Mehrheit der ausgewerteten Fahrprofile nicht die ganze zur Verfügung stehende Energiemenge benötigen und somit die Entladetiefe deutlich unter der maximal zulässigen Grenze bleibt (vgl. Kapitel 3.1).

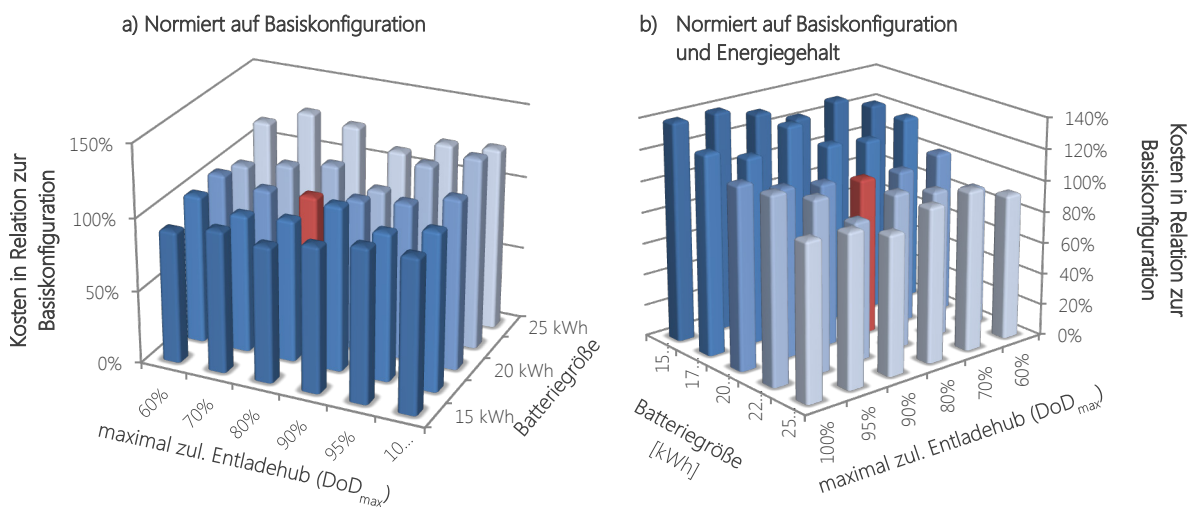


Abbildung 5.4: Einfluss von Batteriegröße und maximal zulässiger Entladungstiefe auf die Lebensdauerkosten von BEV-Traktionsbatterien normiert auf die Basiskonfiguration (a) sowie normiert auf den Energiegehalt der Batterie (b)).

Referenzwert: $DoD_{max}=80\%$, 20 kWh; jeweils normiert auf 100% und in rot dargestellt.

Traktionsbatterien von Hybridfahrzeugen weisen einen ähnlichen Zusammenhang auf, wenngleich dieser durch andere technische Randbedingungen begründet wird. So ist bei Normierung der Kosten pro km auf 1 kWh nahezu kein Zusammenhang zwischen maximal möglicher Entladungstiefe und Kosten zu erkennen (vgl. Abbildung 5.5). Vielmehr hat in diesem Fall die Größe der Batterie an sich einen signifikanten Einfluss auf die Kosten. Dies liegt darin begründet, dass Hybridfahrzeuge den CD-Modus der Batterieentladung, d. h. die vollelektrische Fahrweise pro Fahrt nur einmal durchlaufen (vgl. Abbildung 5.2) und anschließend in Mikrozyklen um den unteren SOC-Wert betrieben werden. Da diese Mikrozyklen allerdings aufgrund der geringen SOC-Schwankungen nur marginalen Einfluss auf die Lebensdauer der Batterie nehmen (Formel 5.4), steigt die Relevanz der Kosten der gesamten Batterie in Abhängigkeit der Batteriegröße.

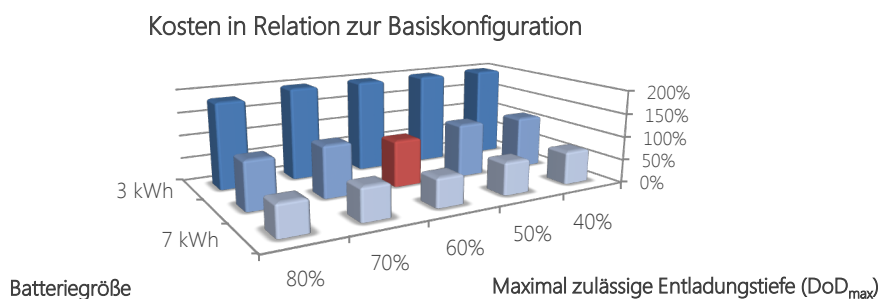


Abbildung 5.5: Einfluss von Batteriegröße und maximal zulässiger Entladungstiefe auf die Lebensdauerkosten von HEV-Traktionsbatterien; normiert auf die Basiskonfiguration und die Batteriegröße.

Referenzwert: $DoD_{max}=60\%$, 5 kWh, normiert auf 100% und in rot dargestellt.

5.1.2 Berechnung der Instandhaltungskosten

Die bisher erzielten Analyseergebnisse hinsichtlich der Antriebsstrangkomponenten fließen im Folgenden als konkrete Werte in das Instandhaltungskostenmodell ein. Hierzu werden für alle drei betrachteten Größenklassen zunächst Antriebsstrangarchitekturen definiert, wobei im Modell die Analyse aller in Kapitel 2.3 definierten Antriebsstrangvarianten möglich ist. In Abhängigkeit der Größenklasse wird in einem zweiten Schritt die Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten vorgenommen (vgl. Tabelle 5.3).

5.1.2.1 Fahrzeugdimensionierung

Diese Dimensionierung variiert dabei in Abhängigkeit der Fahrzeuggrößenklassen gemäß der Einteilung des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) sowie der Antriebsstrangarchitektur selbst. Neben einem konventionellen Fahrzeug (internal combustion engine vehicle (ICV), keine Unterscheidung zwischen Kraftstoffarten, Fahrzeugleistung gemäß durchschnittlichen Werten der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge im Jahr 2010 [204]) werden drei Arten von parallelen Hybriden, ein serieller Hybrid, ein Batteriefahrzeug sowie ein Brennstoffzellenfahrzeug unterschieden. Die drei parallelen Hybridfahrzeuge differenzieren sich in einen Vollhybrid, welcher als P2-Hybrid ausgelegt ist (HEV), einen Plug-in Hybrid, welcher ebenfalls als P2-Hybrid ausgelegt ist, allerdings zusätzlich über ein Ladegerät und eine insgesamt größere Dimensionierung der elektrischen Komponenten verfügt, die es ihm ermöglicht, eine rein elektrische Reichweite von 20 km zu erzielen (PHEV₂₀), sowie einen Plug-in Hybrid, welcher als P4-Hybrid ausgelegt ist und über eine elektrische Reichweite von 40 km verfügt (PHEV₄₀).

Die Dimensionierung der einzelnen Antriebsstrangkomponenten richtet sich nach dem Elektrifizierungsgrad der Fahrzeuge. So verfügen die drei rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugkonzepte EREV, BEV und FCV über die gleiche elektrische Leistung. Die parallelen Hybride hingegen besitzen eine Abstufung der Leistung der Elektromaschinen, wobei der P4-Hybrid aufgrund seiner Zentralmotorarchitektur über die größte elektrische Leistung verfügt.

Die Batteriegrößen der Fahrzeuge folgen der gleichen Auslegungslogik, wobei auch hier der Elektrifizierungsgrad der Fahrzeuge das ausschlaggebende Kriterium ist. So besitzen BEVs die größten Batterien, wohingegen HEVs aufgrund des fehlenden Netzanschlusses nur über sehr geringe Batteriegrößen verfügen. Die PHEV₄₀-Hybride besitzen gemäß ihrer Nomenklatur (vgl. Kapitel 2.3.1.1) den doppelten Energiegehalt der PHEV₂₀-Hybride. Brennstoffzellenfahrzeuge verfügen zur Befriedigung der dynamischen Lastanforderungen des Fahrers Traktionsbatterien geringer Größe, welche als Puffer im Antriebsstrang fungieren. Ebenso wie die Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten variiert auch der Anteil der rein elektrischen Fahrweise sowie der Anteil der zurückgewonnenen Bremsenergie in Abhängigkeit des Hybridisierungsgrades der Fahrzeuge.

Tabelle 5.3: Exemplarische Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten für das Instandhaltungskostenmodell.

Antriebsstrangarchitektur			ICV	HEV	PHEV ₂₀	PHEV ₄₀	EREV	BEV	FCV
				P2	P2	P4	seriell		
Verbrennungsmotor	kW	Klein	60	60	60	60	45	–	–
		Mittel	90	90	90	90	70	–	–
		Groß	120	120	120	120	100	–	–
Batteriegröße	kWh	Klein	–	1	4	8	9	15	1
		Mittel	–	2	5	10	12	25	2
		Groß	–	3	7	14	18	33	3
Elektromotor	kW	Klein	–	15	20	30	45	45	45
		Mittel	–	20	25	40	70	70	70
		Groß	–	25	30	50	100	100	100
Generator	kW	Klein	–	–	–	–	20	–	–
		Mittel	–	–	–	–	35	–	–
		Groß	–	–	–	–	50	–	–
Anteil ICE-Fahrweise	%		–	85	70	50	20	–	–
Anteil Rekuperation	%		–	20	25	30	40	50	20
H ₂ -Speicher	kg	Klein	–	–	–	–	–	–	2
		Mittel	–	–	–	–	–	–	3
		Groß	–	–	–	–	–	–	4
Brennstoffzellen-System	kW	Klein	–	–	–	–	–	–	45
		Mittel	–	–	–	–	–	–	70
		Groß	–	–	–	–	–	–	100

Quellen: Eigene Darstellung auf Basis von [205] [206] [207].

5.1.2.2 Berechnungsergebnisse

Auf Basis der exemplarischen Dimensionierung der Fahrzeuge werden im Folgenden mit Hilfe des neu entwickelten Berechnungsmodells die unterschiedlichen Antriebsstrangtopologien miteinander verglichen sowie Kostentreiber identifiziert.

Die Gegenüberstellung der Summe der Instandhaltungskosten zeigt, dass die Antriebsstränge deutliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Instandhaltungskosten aufweisen, wobei eine Elektrifizierung des Antriebsstrangs für alle Fahrzeuggrößenklassen im Vergleich zum konventionellen, verbrennungsmotorisch betriebenen Referenzfahrzeug (der jeweiligen Fahrzeuggrößenklasse) in sinkenden Instandhaltungskosten resultiert (vgl. Tabelle 5.4). Die Berechnungsergebnisse für das

kleine Fahrzeugsegment zeigen dabei insbesondere für hohe Elektrifizierungsgrade das größte Reduktionspotential, wobei das batterieelektrische Fahrzeug 30% niedrigere Kosten als das vergleichbare verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeug aufweist. Ebenfalls deutliche Kostenreduktionen lassen sich im Falle des seriellen Hybridfahrzeugs (-29%) und des Brennstoffzellenfahrzeugs (-23%) beobachten. Für das mittlere und große Fahrzeugsegment stellt das serielle Hybridfahrzeug den Antriebsstrang mit minimalen Instandhaltungskosten dar (-27% im mittleren bzw. -23% im großen Fahrzeugsegment).

Tabelle 5.4: Absolute und zum konventionellen Referenzfahrzeug relative Instandhaltungskosten für die exemplarische Dimensionierung der Fahrzeuge gemäß Tabelle 5.3.

	HEV		PHEV ₂₀		PHEV ₄₀		EREV		BEV		FCV	
	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.
	[€ ct/km]	[%]	[€ ct/km]	[%]	[€ ct/km]	[%]	[€ ct/km]	[%]	[€ ct/km]	[%]	[€ ct/km]	[%]
Klein	6,03	-5,2	5,98	-6,0	5,92	-6,9	4,51	-29,1	4,44	-30,2	4,88	-23,3
Mittel	6,80	-6,0	6,76	-6,5	6,73	-6,9	5,31	-26,5	5,87	-18,8	6,37	-11,9
Groß	8,60	-4,3	8,58	-4,6	8,17	-9,1	7,00	-22,2	7,82	-13,0	8,71	-3,1

Relative Werte stellen Abweichung zum konventionellen Referenzfahrzeug (der jeweiligen Fahrzeuggrößenklasse) dar.

Der Zusammenhang von sinkenden Instandhaltungskosten von Hybridfahrzeugen bei steigendem Elektrifizierungsgrad der Fahrzeuge bestätigt sich für alle Größenklassen (vgl. Abbildung 5.6). Die drei parallelen Hybridfahrzeuge zeigen dabei trotz der unterschiedlichen Dimensionierung der elektrifizierten Komponenten nur marginale Abweichungen. Die Instandhaltungskosten der seriellen Hybridfahrzeuge liegen für alle Fahrzeugklassen deutlich unter denen der Parallelhybride.

Neben den unterschiedlichen Instandhaltungskosten im Vergleich der Triebstränge untereinander zeigen die Berechnungsergebnisse zudem, dass auch die prozentualen Unterschiede zum Referenzfahrzeug innerhalb einzelner Antriebsstrangtopologien variieren. Der größte Unterschied zeigt sich hierbei zwischen den kleinen und den großen Brennstoffzellenfahrzeugen. Diese unterschiedlichen Gradienten lassen sich durch die unterschiedliche Fahrzeugdimensionierung erklären. So wird das Größenverhältnis des Wasserstoffspeichers zwischen dem kleinen und dem großen Fahrzeug durch das Verhältnis 1:3 beschrieben, während beispielsweise die Dimensionierung der Traktionsbatterie für das kleine und das große Batteriefahrzeug durch das Verhältnis 15:33 und folglich durch einen geringeren prozentualen Aufschlag vom kleinen zum großen Fahrzeug beschrieben wird. Wie die Detailanalyse der Kostentreiber der Instandhaltungskosten zeigt, sind insbesondere für diese beiden Fahrzeuge die beiden Energiespeicher (Wasserstofftank bzw. Traktionsbatterie) für die Höhe der Instandhaltungskosten verantwortlich (vgl. hierzu auch die folgende Detailanalyse sowie Abbildung 5.8). In der Konsequenz fällt somit auch die Höhe der Instandhaltungskosten relativ zueinander unterschiedlich aus.

Inhaltlich lassen sich die unterschiedlichen Verhältnisse zwischen den Triebstrangtopologien durch die zu Grunde liegende Technologie erklären. So bezieht sich die Angabe der Größe der Traktionsbatterie auf den absolut im Fahrzeug verbauten Energiegehalt, ohne das tatsächlich nutzbare SOC-Fenster bzw. den zulässigen Entladehub der Batterie (vgl. Abschnitt 5.1.1.4 sowie Abbildung 5.2) zu nennen, wohingegen der angegebene Energiegehalt des Wasserstofftanks auch tatsächlich nutzbar ist.

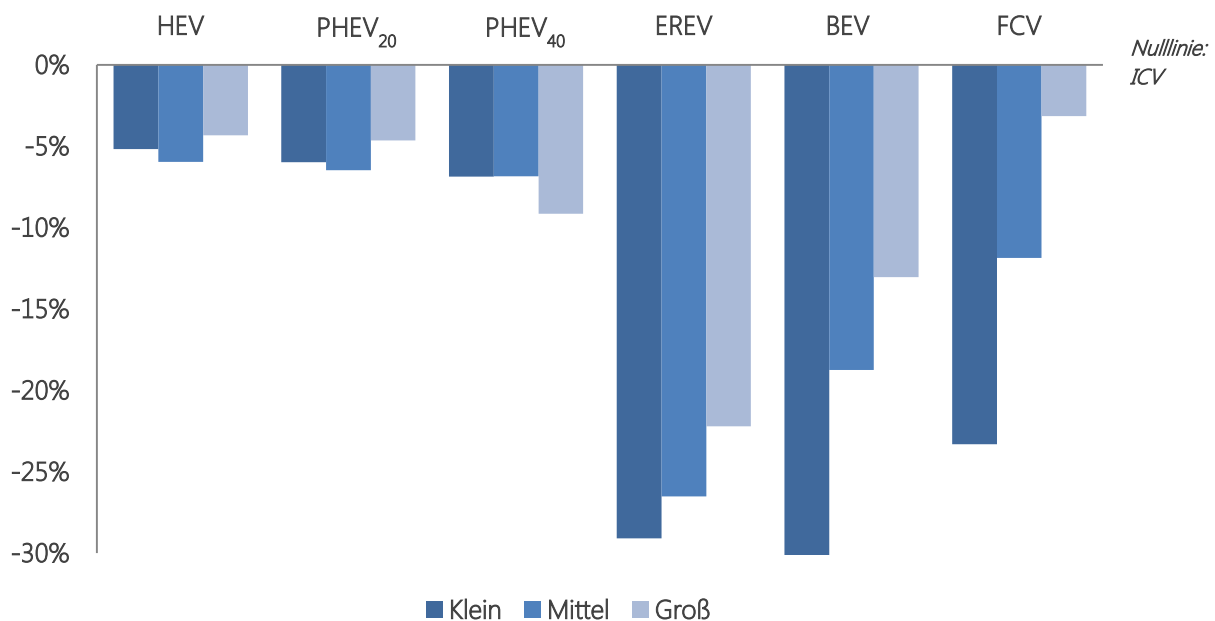


Abbildung 5.6: Instandhaltungskosten der betrachteten Antriebsstrangarchitekturen im Vergleich zum konventionellen, verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug (ICV) für die drei Fahrzeuggrößenklassen. Nulllinie: Konventionelles Fahrzeug (ICV) in der jeweiligen Fahrzeuggrößenklasse.

Die Aggregation der 31 unterschiedlichen im Modell berücksichtigten Komponenten zu den Hauptgruppen Verbrennungsmotor, Bremssystem, Getriebe, elektrifizierte Komponenten und sonstige Komponenten Komponentengruppen zeigt, dass sich für alle parallelen Hybridfahrzeuge die Summe der Kosten wie zuvor erläutert zwar nur marginal unterscheidet, die Zusammensetzung der Kosten jedoch deutlich abweicht (vgl. Abbildung 5.7). Hierbei wird die Kostenreduktion durch den zunehmenden Anteil rein elektrischer Fahrweise und damit einer selteneren Nutzung des Verbrennungsmotors von der stärkeren Beanspruchung der elektrifizierten Komponenten ausgeglichen und bleibt somit in Summe nahezu konstant. Ein ähnlicher Effekt lässt sich hinsichtlich der Berechnungsergebnisse der seriellen Hybridfahrzeuge beobachten. Hier überwiegt jedoch die Reduktion der Instandhaltungskosten des Verbrennungsmotors aufgrund des signifikant erhöhten Anteils rein elektrischer Fahrweise die Mehrausgaben für elektrifizierte Antriebsstrangkomponenten. Bei allen allein durch einen Elektromotor angetriebenen Fahrzeugen (EREV, BEV und FCV) sinken die Ausgaben für die Instandhaltung der Getriebekomponenten deutlich. Trotz unter-

schiedlicher Anteile von rekuperativem Bremsen weichen innerhalb der Fahrzeuggrößenklassen in allen Antriebsstrangvarianten die Kosten für die Instandhaltung des Bremssystems nur geringfügig voneinander ab.

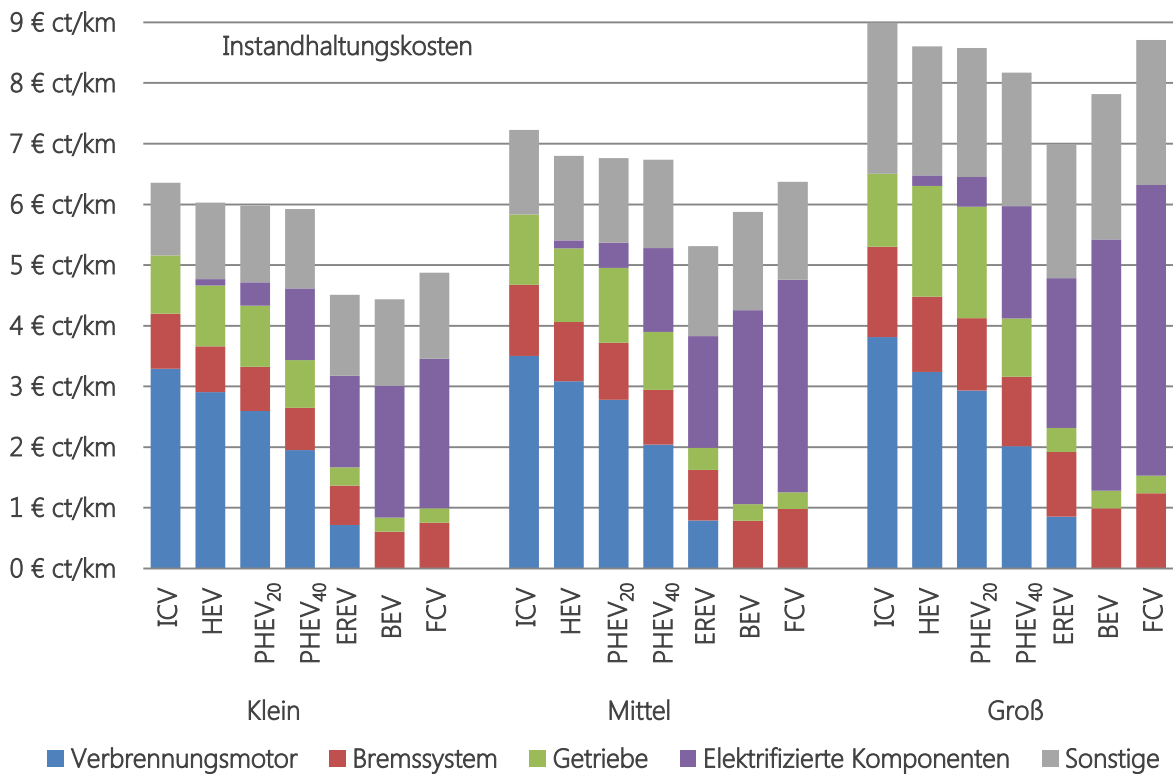


Abbildung 5.7: Differenzierung der Instandhaltungskosten in Komponentengruppen für die betrachteten Fahrzeuggrößenklassen und Antriebsstrangvarianten.

Eine weitere Differenzierung der fünf Komponentengruppen in die 31 der Berechnung zugrunde liegenden Komponenten ermöglicht die Identifikation von Kostentreibern für jeden Antriebsstrang. Das Beispiel des mittleren Fahrzeugsegments zeigt stellvertretend für die beiden anderen Fahrzeuggrößenklassen, dass sich für das konventionelle Fahrzeug nicht ein einziger, dominanter Kostentreiber identifizieren lässt (vgl. Abbildung 5.8). Vielmehr haben nach den fünf größten Kostenanteilen Abgasanlage, Brems- und Getriebesystem sowie dem Reifen- und Ölwechsel eine Vielzahl kleiner Kostenanteile einen Einfluss auf die Gesamtsumme der Instandhaltungskosten.

Die detaillierte Betrachtung der Instandhaltungskosten der parallelen Hybridfahrzeuge bestätigt die Beobachtung, dass die Kostenreduktion der verbrennungsmotorischen Komponenten durch die Mehrkosten der elektrifizierten Komponenten ausgeglichen wird. Insbesondere im Fall des P4-Hybriden hat die Traktionsbatterie signifikanten Einfluss auf die Gesamtkosten. Die durch verbrennungsmotorische Komponenten verursachten Instandhaltungskosten des seriellen Hybridfahrzeugs sinken auf unter ein Viertel der Kosten des Referenzfahrzeugs und die elektrifizierten Komponenten stellen den größten Kostentreiber dar. Für das Batterie- und das Brennstoffzellenfahrzeug lassen sich, wie eingangs bereits erwähnt, eindeutige Kostentreiber identifizieren. Die In-

standhaltungskosten der Batterie repräsentieren 40% der Gesamtkosten des BEV. Im Fall des FCV verursacht das Brennstoffzellensystem inklusive des Druckwasserstoffspeichers über ein Drittel der Kosten.

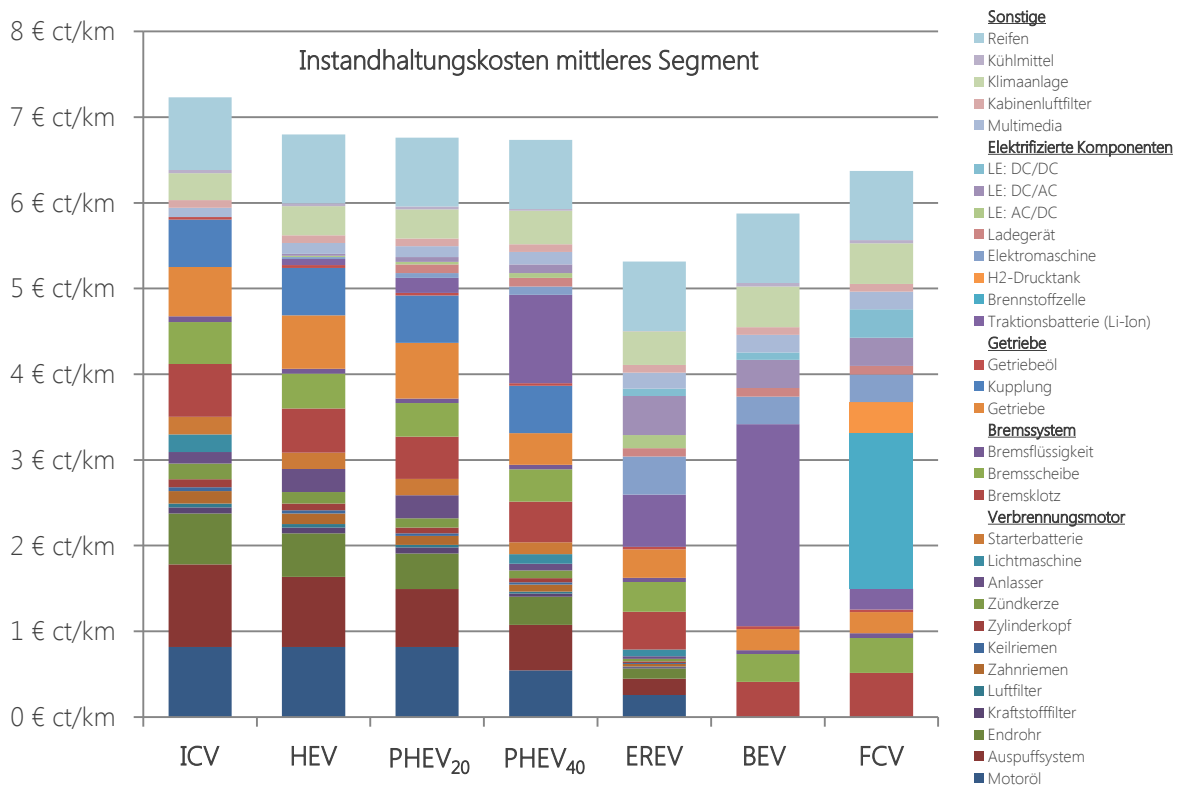


Abbildung 5.8: Differenzierte Aufteilung der Instandhaltungskosten für das mittlere Fahrzeugsegment.²²

Die Kosten für die Instandhaltung der Elektromaschinen stellen aufgrund des geringen Wartungsaufwands bzw. der langen erwarteten Lebensdauer der Komponenten für keines der elektrifizierten Antriebssysteme einen Kostentreiber dar. Zwar steigen die Kosten in Folge der größeren Dimensionierung mit zunehmendem Elektrifizierungsgrad, der Anteil bleibt jedoch selbst im Fall des seriellen Hybriden, welcher neben der eigentlichen Traktionselektromaschine eine zusätzliche, kleinere Elektromaschine zwischen Verbrennungsmotor und Traktionsbatterie besitzt, bei 8%.

Die Berechnung der Instandhaltungskosten hat gezeigt, dass elektrifizierte Fahrzeugkonzepte geringere Instandhaltungskosten im Vergleich zu konventionellen, verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen aufweisen. Insbesondere hohe Elektrifizierungsgrade der Fahrzeuge resultieren in signifikant niedrigeren Instandhaltungskosten. Im Sinne der integrierten Bewertung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte zeigt sich, dass diese neuen Ergebnisse im Hinblick auf die TCO-Bewertung der Fahrzeuge einen wesentlichen Einfluss besitzen und somit nicht unberücksichtigt bleiben dürfen.

²² Die Instandhaltungskosten der anderen beiden Segmente befinden sich im Anhang (vgl. Anhang C 2 f.).

5.2 Berechnung der Wiederverkaufserlöse

Im Sinne einer ganzheitlichen Lebenszykluskostenbetrachtung und darauf aufbauenden Simulationen des Neufahrzeugmarktes (vgl. Kapitel 6) ist die Berücksichtigung von Wiederverkaufswerten der Fahrzeuge notwendig [208] [209] [210]. Der von Mock in [21] identifizierte Forschungsbedarf schließt diese Erweiterung des vorhandenen Modells mit ein. Ausschlaggebend ist hierfür bei allen Analysen der Wiederverkaufswert neu erworbener Fahrzeuge nach der durchschnittlichen Halte-dauer für Neufahrzeuge in Deutschland von vier Jahren [21].

5.2.1 Analyse der Wiederverkaufserlöse konventionell angetriebener Fahrzeuge

Für verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge existiert in Deutschland eine umfassende Datenbank, die sogenannte Schwacke-Liste, welche Gebrauchtwagenpreise von über 30.000 Fahrzeugen enthält [211]. Die Fahrzeugdaten sind in der bereits für die Analyse der Instandhaltungskosten (vgl. Abschnitt 5) verwendeten ADAC-Autokosten-Datenbank integriert.

Die Analyse der drei meistverkauften Fahrzeuge je Fahrzeuggrößenklasse in 2010 zeigt, dass ein funktionaler Zusammenhang zwischen der jährlichen Laufleistung der Fahrzeuge und dem Wertverlust nach vier Jahren existiert. Dieser Zusammenhang zeigt nach der statistischen Auswertung einen linearen Zusammenhang und lässt sich mathematisch mit Hilfe einer linearen Regression durch

$$RV_{j,k} = P - D_{j,k} \text{ mit } D_{j,k} = m_j \cdot VMT_k + c_j \rightarrow RV_{j,k} = P - (m_j \cdot VMT_k + c_j) \quad \text{Formel 5.10}$$

mit D: Wertverlust (depreciation) [€]

RV: Wiederverkaufswert (residual value) [€]

P: Anschaffungskosten des Fahrzeugs (price) [€]

VMT: Jahresfahrleistung (vehicle miles traveled) [km]

m: 1. Regressionsparameter [€/km]

c: 2. Regressionsparameter 2 [€]

j: Fahrzeuggrößensegment

k: Kundengruppe

beschreiben. Hierbei resultieren für die drei Fahrzeuggrößenklassen unterschiedliche Variablenwerte. Der Vergleich der drei Regressionsgeraden macht deutlich, dass Fahrzeuge des kleinen Segments bei hohen jährlichen Fahrleistungen stärker an Wert verlieren als mittlere und große Fahrzeuge, wobei mittlere Fahrzeuge über nahezu den gesamten Fahrleistungsbereich den höchsten Wiederverkaufswert aufweisen. Die Gegenüberstellung der Regressionsgeraden, welche aus der Auswertung der zehn meistverkauften Fahrzeuge eines Fahrzeuggrößensegments resultiert, mit Beispielen realer Wiederverkaufswerte, illustriert die linearen Zusammenhänge von Wiederver-

kaufwert und jährlicher Fahrleistung, wie sie in der Datenbank zugrunde liegen (vgl. Abbildung 5.9).

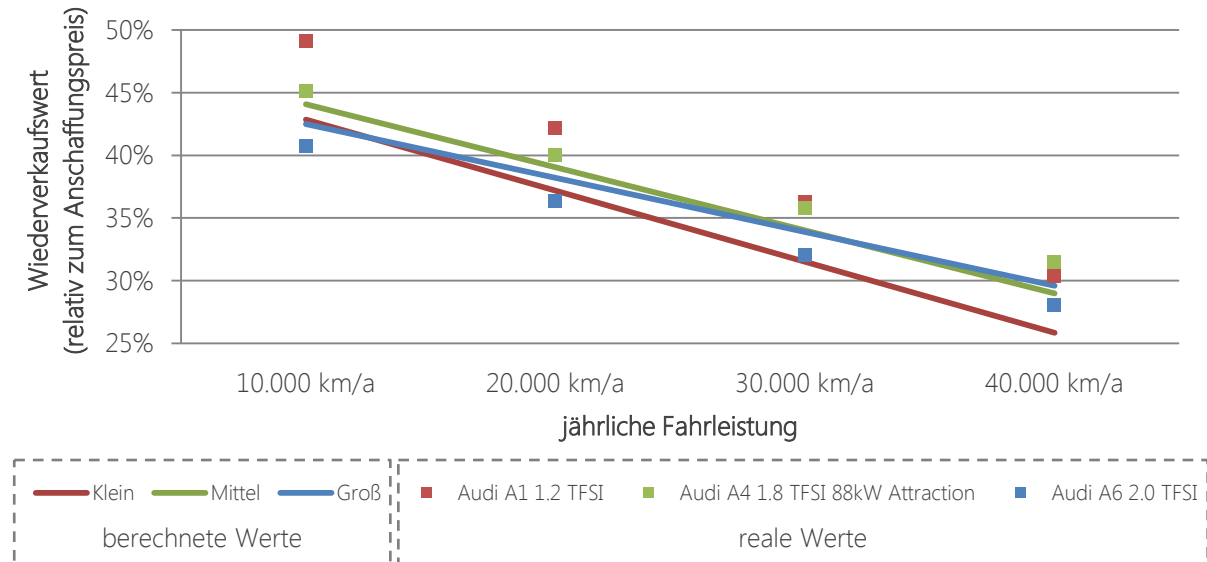


Abbildung 5.9: Wiederverkaufswerte der drei betrachteten Fahrzeuggrößenklassen nach vier Jahren in Abhängigkeit der jährlichen Fahrleistung; exemplarische Datenpunkte für jedes Segment.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [193].

Um den prozentualen Wertverlust der Fahrzeuge nicht nur durch den funktionalen Zusammenhang zur jährlichen Fahrleistung, sondern auch in Abhängigkeit der Anschaffungskosten abbilden zu können, wurde eine zweite statistische Auswertung der Datenbasis durchgeführt. Hierbei zeigt sich, dass die individuellen Anschaffungskosten der Fahrzeuge ebenfalls einen starken linearen Zusammenhang zum Restwert nach vier Jahren aufweisen. Für die beiden Faktoren der linearen Gleichung lässt sich diese Abhängigkeit mit Hilfe von Formel 5.10 auf Basis der zweiten linearen Regression durch

$$RV_{j,k} = P - [(P \cdot m_{1,j} + c_{1,j}) \cdot VMT_k + P \cdot m_{2,j} + c_{2,j}] \quad \text{Formel 5.11}$$

mit RV: Wiederverkaufswert (residual value) [€]

VMT: Jahresfahrleistung (vehicle miles traveled) [km]

P: Anschaffungskosten des Fahrzeugs (price) [€]

$c_{1,2}$, $m_{1,2}$: Parameter der zweifachen linearen Regression:

c_{1j} : [€/km]

c_{2j} : [€]

m_{1j} : [km^{-1}]

m_{2j} : [·]

j: Fahrzeuggrößensegment

k: Kundengruppe

ausdrücken. Die Gegenüberstellung der Wiederverkaufswerte in Abhängigkeit der jährlichen Fahrleistung und des Neufahrzeugpreises zeigt den gleichzeitigen Einfluss der beiden Variablen. Im Hinblick auf die Simulation des zukünftigen Neufahrzeugmarktes lässt sich somit ein Wiederverkaufswert sowohl in Abhängigkeit des Fahrzeugpreises als auch in Abhängigkeit der spezifischen Kundengruppe und ihrer jährlichen Fahrleistung errechnen. Auch hierbei resultieren für die drei Fahrzeuggrößenklassen unterschiedliche Parameter der zweifachen linearen Regression, wobei jedoch für alle drei Segmente sehr robuste Werte mit Standardabweichungen unter 1% berechnet werden (vgl. Tabelle 5.5). Die weiteren Betrachtungen basieren auf Formel 5.11.

Tabelle 5.5: Parameter der zweifachen linearen Regression in Abhängigkeit der Fahrzeuggrößenklasse.

	m_1 [km ⁻¹]	c_1 [€/km]	m_2 [·]	c_2 [€]	Standard- abweichung
Klein	7,94E-06	-2,94E-02	2,11E-01	3,92E+03	0,9%
Mittel	2,66E-06	5,26E-02	4,76E-01	7,17E+02	1,0%
Groß	5,67E-06	-5,39E-02	3,47E-01	7,25E+03	0,6%

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [193] und Formel 5.11.

5.2.2 Berechnung der Wiederverkaufserlöse elektrifizierter Fahrzeugkonzepte

Bisher gibt es „noch keine verlässlichen Prognosen, die den Restwert von Elektrofahrzeugen beziffern“ [51]. Die empirische Datenbasis der Wiederverkaufswerte elektrifizierter Antriebsstränge beschränkt sich auf die wenigen bisher auf dem deutschen Fahrzeugmarkt erhältlichen Modelle.

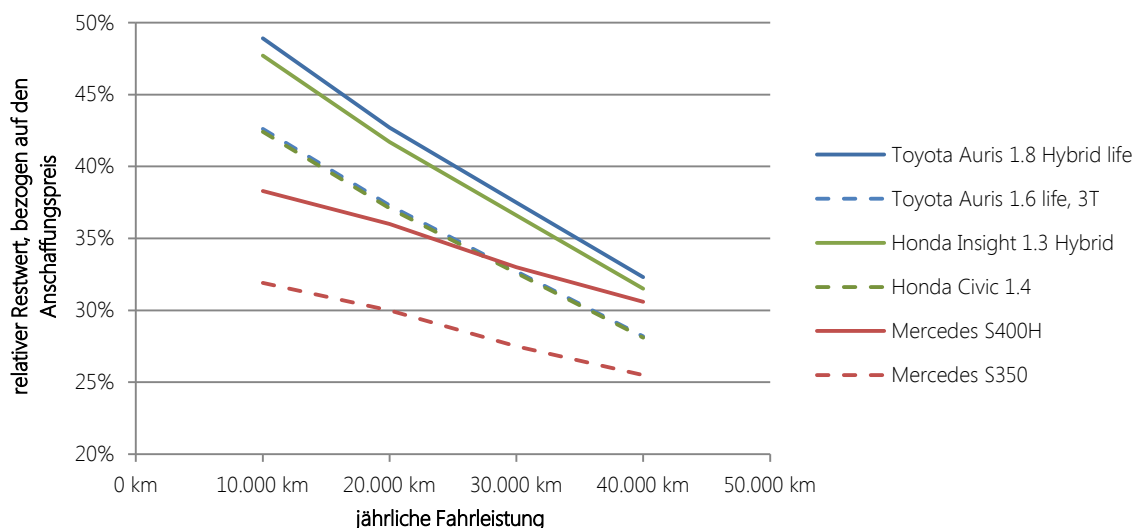


Abbildung 5.10: Vergleich der Wiederverkaufswerte (relativ zum Anschaffungspreis) von Hybridmodellen mit den konventionellen Schwestermodellen in Abhängigkeit der jährlichen Fahrleistung nach einer Haltedauer von vier Jahren.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [193].

5.2.2.1 Hybridfahrzeuge

Die Gegenüberstellung der auf die Anschaffungskosten bezogenen relativen Wiederverkaufswerte der verfügbaren Hybridmodelle zeigt, dass die Wiederverkaufswerte der Hybridfahrzeuge nach einer Haltedauer von vier Jahren einen konstanten Aufschlag im Vergleich zu ihren rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Schwestermodellen aufweisen (vgl. Abbildung 5.10). Dieser konstante prozentuale Aufschlag ist dabei unabhängig von der jährlichen Fahrleistung und beträgt je nach Fahrzeugmodell 10 bis 20%. Eine Fortschreibung der linearen Verläufe zeigt darüber hinaus, dass die ermittelten Lebensdauern bzw. die Fahrleistungen, bei welchen der Wiederverkaufswert 0% beträgt, bei ICVs und deren hybriden Schwestermodellen übereinstimmen.

Um die Wiederverkaufswerte elektrifizierter Fahrzeugkonzepte bestimmen zu können, wird auch hier zunächst wie bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen ein linearer Zusammenhang zwischen Wertverlust und jährlicher Fahrleistung antizipiert. Hierbei wird die maximale Lebensdauer (end-of-life, EoL) in Übereinstimmung mit den Analyseergebnissen für Hybridfahrzeuge und ICVs als identisch angesehen. Grafisch lässt sich dieser Zusammenhang durch eine identische Nullstelle bei gleichzeitig größerem Ordinatenabschnitt der Hybridfahrzeuge beschreiben (vgl. Abbildung 5.11). Im Sinne des vorangegangenen Vergleichs der Wiederverkaufswerte von hybriden und konventionellen Fahrzeugen entspricht der prozentuale Aufschlag x dem Delta der beiden Wiederverkaufswerten und liegt zwischen 10 und 20% (vgl. Abbildung 5.10).

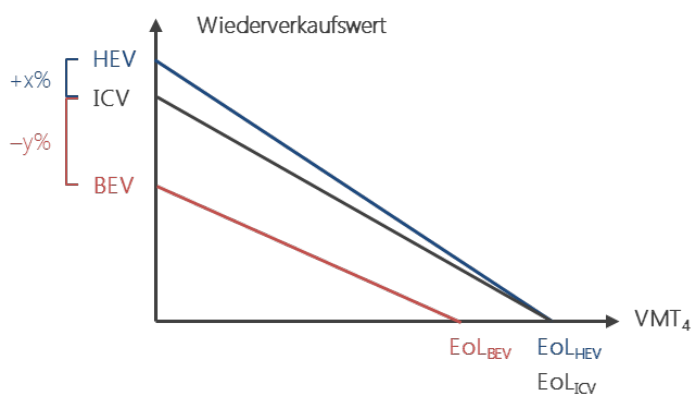


Abbildung 5.11: Berechnungsschema des Wiederverkaufswertes elektrifizierter Fahrzeugkonzepte in Abhängigkeit der Fahrleistung nach vier Jahren.

VMT_n : Vehicle-miles-traveled (dt.: Jahresfahrleistung) nach n Jahren.

Talaei geht davon aus, dass sich der prozentuale Aufschlag der hybriden Antriebsstränge in Zukunft noch weiter verstärken wird [46]. Ebenso prognostiziert Stegmaier, dass Hybridmodelle in 2014 zu den Gebrauchtwagen zählen werden, welche die geringsten Wertverluste aufweisen [47]. Im Gegensatz dazu werden von Gordon-Bloomfield beim Vergleich des relativen Wiederverkaufswertes von einem Honda Acura (ICV) und einem Toyota Prius (Hybrid) identische Wertentwicklungen festgestellt [48]. Da hier das Hybridmodell jedoch mit einem einzelnen Fahrzeug eines konkurrierenden Herstellers verglichen wird, ist von einer Verzerrung der Analyseergebnisse auszugehen.

5.2.2.2 Vollelektrische Fahrzeugkonzepte

Wiederverkaufswerte für Batteriefahrzeuge werden nach einer ähnlichen Berechnungslogik bestimmt. Aufgrund der gänzlich fehlenden Datenbasis wird hierzu eine maximale Lebensdauer der Fahrzeuge auf Basis der Lebensdaueranalyse von Traktionsbatterien errechnet (vgl. Abschnitt 5.1.1). Im Gegensatz zur Restwertentwicklung von Hybridfahrzeugen prognostizieren Studien jedoch geringere Restwerte von Batteriefahrzeugen im Vergleich zu ICVs von 28% [46]. Ein noch deutlicher Wertverlust wird für den Citroen C-Zero antizipiert. Hier beträgt der errechnete Wiederverkaufswert des 35.165 € teuren Fahrzeugs nach einer Haltedauer von vier Jahren und einer jährlichen Fahrleistung von 10.000 km nur noch 11.956 € oder 34% des Anschaffungspreises [52]. Innerhalb des kleinen Fahrzeugsegments liegt dieser Wert 44% unter dem Wiederverkaufswert vergleichbarer verbrennungsmotorisch betriebener Fahrzeuge. Mit einem Wertverlust von 90% des Anschaffungspreises nach einer Haltedauer von fünf Jahren nennt [49] den höchsten Prozentsatz. Als Hauptgrund für die signifikant niedrigeren Wiederverkaufswerte werden von allen Veröffentlichungen die ungewisse Lebensdauer der Traktionsbatterie und das damit verbundene hohe Restwertrisiko genannt. Darüber hinaus führt die Weiterentwicklung vorhandener Batterietechnologien zu steigenden elektrischen Reichweiten in Neufahrzeugen und somit letztlich zu einer Wertminderung älterer Fahrzeuge.

Im Gegensatz dazu antizipieren andere Quellen Wiederverkaufswerte von BEVs auf nahezu gleichem Niveau wie von verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen. So wird beispielsweise für den Nissan Leaf nach einer Haltedauer von drei Jahren und einer jährlichen Fahrleistung von 10.000 Meilen (16.093 km) ein Wiederverkaufswert von 40% prognostiziert, welcher im Rahmen der für das mittlere Fahrzeugsegment analysierten Wertverlustdaten für ICVs liegt [50].

Brennstoffzellenfahrzeuge werden aufgrund der langen Lebensdauer (vgl. Abschnitt 5.1.1) der Systeme analog zu verbrennungsmotorischen Fahrzeugen bewertet, d. h. ihr prozentualer Wertverlust sowie dessen Abhängigkeit von der jährlicher Fahrleistung und den Anschaffungskosten wird mit Hilfe von Formel 5.11 berechnet. Da bisher auf dem deutschen Markt kein einziges Brennstoffzellenfahrzeug frei zu erwerben ist und erste Serienfahrzeuge erst in den kommenden Jahren in den Markt eingeführt werden, liegen auch im Falle der FCVs keine empirischen Datenpunkte zur Auswertung vor. Ob und in welchem Umfang FCVs nach ihrer Markteinführung schneller an Wert verlieren werden, ist bisher auch in wissenschaftlichen Betrachtungen nicht geklärt worden [45].

Abschließend lässt sich festhalten, dass durch die vorangegangene Technologiebewertung eine umfassende Grundlage für die folgende Identifizierung des Marktpotentials elektrifizierter Fahrzeugkonzepte gelegt wurde. Es zeigte sich, dass im Sinne der integrierten Bewertung von elektrifizierten Fahrzeugkonzepten Instandhaltungs- und Abnutzungskosten wesentliche Einflussgrößen sind. Die insbesondere bei höheren Elektrifizierungsgraden deutlich abweichenden Kosten konnten mit den neu entwickelten Berechnungsmodellen erstmals quantifiziert werden.

6 Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte

Aufbauend auf den vorangegangenen Analysen elektrifizierter Antriebsstränge wird im Folgenden das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte quantifiziert. Die bisher mit Hilfe der neu entwickelten Berechnungsmodelle erzielten Ergebnisse stellen dabei eine wesentliche Grundlage der Simulationen dar. Im Rahmen der Berechnungen wird das überarbeitete Simulationsmodell VECTOR21 (vgl. Kapitel 2.2) in Form von Szenarioanalysen eingesetzt, wobei alle bisher erarbeiteten Ergebnisse genutzt und in das Modell integriert werden.

Auf Basis eines Ausgangsszenarios (Kapitel 6.1), welches im Sinne eines Business-as-usual-Szenarios die Fortschreibung heutiger Trends berücksichtigt, werden 80 Sensitivitätsszenarien der technischen, politischen und ökonomischen Einflussfaktoren berechnet (Kapitel 6.2). Aus den Simulationsergebnissen werden im Anschluss kritische Einflussfaktoren auf das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeuge abgeleitet (Kapitel 6.3). Abschließend erfolgt die Einordnung der Berechnungsergebnisse in den Kontext bisher veröffentlichter Studien (Kapitel 6.4).

6.1 Berechnung des Ausgangsszenarios

Zunächst wird ein Ausgangsszenario definiert, welches im Sinne der Trendfortschreibung heutiger Entwicklungen ein Business-as-usual-Szenario darstellt. Dieses Referenzszenario dient als Ausgangsbasis für die anschließende Berechnung der Sensitivitäten der unterschiedlichen Einflussparameter. Nach der Dimensionierung der betrachteten Fahrzeuge sowie deren Antriebssträngen werden im Anschluss die externen politischen, ökonomischen und technischen Randbedingungen definiert.

6.1.1 Definition von Szenariofahrzeugen

Um ein differenziertes Bild der möglichen zukünftigen Entwicklung des deutschen Neufahrzeugmarktes aufzeigen zu können, wurden, wie eingangs erläutert, die in Kapitel 2.3 identifizierten Antriebsstrangarchitekturen in das Modell integriert. Insgesamt werden so im aktuellen Modell in jeder Fahrzeuggrößenklasse zwölf Antriebsstrangvarianten berechnet, wobei Mild- und Mikrohyb-

ride zusätzlich zu diesen zwölf Varianten als Derivate der verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeuge in die Berechnung einfließen.

Tabelle 6.1: Definition der Szenariofahrzeuge, mittlere Fahrzeuggrößenklasse.²³

Mittleres Fahrzeugsegment	Hubraum	Anteil CS	Kfz-Steuer	Instandhaltungskosten	Wiederverkauf		E-Maschine 1	E-Maschine 2	Traktionsbatterie	H ₂ -Tank	Verbrauch CS	Verbrauch CD	Verbrauch Gesamt	Emission TTW
	Liter		€/a	€ ct/km	Faktor a	Faktor b	kW	kW	kWh	kg	MJ/km			g/km
G	1,7		161	7,23	-6,17E-06	0,4758							2,6	184
G _{HEV}	1,7	93%	98	6,80	-6,29E-06	0,5471	20		2		2,2	0,4	2,1	153
D	1,9		227	7,23	-6,17E-06	0,4758							1,9	142
D _{HEV}	1,9	93%	196	6,80	-6,29E-06	0,5471	20		2		1,6	0,4	1,7	126
CNG	1,7		94	7,23	-6,17E-06	0,4758							2,6	150
CNG _{HEV}	1,7	93%	49	6,80	-6,29E-06	0,5471	20		2		2,3	0,4	2,1	127
G-PHEV ₂₀	1,7	80%	87	6,76	-6,29E-06	0,5471	25		5		2,4	0,4	2,0	147
G-PHEV ₄₀	1,7	63%	33	6,73	-6,29E-06	0,5471	40		8		2,3	0,4	1,6	116
D-PHEV ₂₀	1,9	80%	183	6,76	-6,29E-06	0,5471	25		5		1,7	0,4	1,4	108
EREV	1,2	35%	24	5,31	-6,29E-06	0,5471	70	35	12		1,6	0,5	0,8	64
BEV			0	5,87	-5,87E-06	0,4044	70		25				0,5	0
FCV			0	6,37	-6,17E-06	0,4758	70		2	3			1,1	0

Fahrzeuge: G: Benzin, D: Diesel, CNG: Erdgas, HEV, Vollhybrid, PHEV: Plug-in Hybrid. EREV: range-extender, BEV: Batterie, FCV: Brennstoffzelle.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [204] [212] [207] [213] [214].

Die Dimensionierung der konventionellen Antriebsstränge erfolgt mit Hilfe der in Kapitel 3 durchgeführten Untersuchungen und folglich auf Basis der Zulassungszahlen des Kraftfahrtbundesamtes. Hinsichtlich der Fahrzeugpreise und der Kraftstoffverbräuche wurde dabei eine hubraum- und geschwindigkeitsbasierte Anpassung zwischen Diesel-, Benzin- und Erdgasfahrzeugen durchgeführt, um pro Fahrzeugsegment repräsentative und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten (vgl. Tabelle 6.1).

Für alle parallelen Hybridfahrzeuge wurde die gleiche verbrennungsmotorische Leistung wie für konventionelle Fahrzeuge antizipiert. Die Dimensionierung der Traktionsbatterie erfolgt ausgehend von der rein elektrischen Reichweite im NEFZ. Plug-in Hybride sind auf 20 bzw. 40 km rein elektrisches Fahren (im NEFZ) ausgelegt, wobei für alle Fahrzeuggrößenklassen aus Gründen der Ver-

²³ Die Fahrzeugdefinition des kleinen und des großen Fahrzeugsegments befinden sich im Anhang (vgl. Anhang D 1 f.).

gleichbarkeit identische elektrische Reichweiten angenommen wurden. Die beiden PHEV₂₀ sind als P2-Hybride definiert, während der PHEV₄₀ als P4-Hybrid ausgelegt ist. Entsprechend der rein elektrischen Reichweiten erfolgte die Dimensionierung der Elektrotraktionsmotoren. Fahrzeuge mit höherem CD Fahranteil besitzen größere Elektromotoren, die sie in die Lage versetzen, auch höhere rein elektrische Geschwindigkeiten zu erzielen. Die Verbrauchswerte im CD-Modus der Fahrzeuge stammen aus da Costa [215]. Die Anteile der rein elektrischen Fahrweise wurden dabei auf Basis der mit den Batteriegrößen erzielbaren elektrischen Reichweiten und den Ergebnissen der Analyse der Fahrstrecken ermittelt (vgl. Kapitel 3.1). Die Hubraumgrößen entsprechen denen der KBA-Zulassungszahlen [193] [204].

Die Auslegung der rein elektrisch angetriebenen Fahrzeuge EREV, BEV und FCV folgt der Logik, dass durch die Elektromotoren identische Fahrleistungen im Vergleich zu verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen erzielbar sind. Dementsprechend wurden alle drei Antriebsstrangvarianten innerhalb der drei Fahrzeuggrößenklassen mit gleichen Elektromotoren dimensioniert, wobei das serielle Hybridfahrzeug zusätzlich einen Generator zum Aufladen der Traktionsbatterie besitzt (vgl. Kapitel 2.3.1.2). Die absoluten Werte der Gesamtfahrzeuggesteuerung entsprechen denen der KBA-Zulassungstatistik [193] [204].

Die Berechnung der jährlichen Kraftfahrzeugsteuern wird im Gegensatz zum ursprünglichen VECTOR21-Modell nicht mehr auf Basis historischer Daten durchgeführt, sondern folgt im Sinne eines business-as-usual-Szenarios der aktuellen Gesetzgebung. Diese besagt, dass für alle Fahrzeuge eine CO₂-basierte Besteuerung anfällt, wobei sich die Höhe der Abgabe nach der Differenz des CO₂-Ausstoßes zum Grenzwert von 120 g CO₂/km richtet und mit 2 €/g CO₂/km angesetzt wird. Zusätzlich hinzu kommen für Benzinfahrzeuge 2 € je angefangene 100 ccm Hubraum und für Dieselfahrzeuge 9,5 € je angefangene 100 ccm Hubraum [216].

Erdgas- und Hybridfahrzeuge sind von dieser Regelung nicht befreit, sondern werden wie konventionelle Fahrzeuge besteuert. Lediglich Fahrzeuge, „die ausschließlich von Elektromotoren angetrieben werden“ [217] sind innerhalb der ersten zehn Jahre gänzlich von der Steuer befreit. Im Anschluss an diesen Zeitraum werden sie wie Nutzfahrzeuge nach Gewicht, allerdings zum halben Steuersatz besteuert. Da der Berechnungsalgorithmus die ersten vier Jahre des Fahrzeuglebenszyklus betrachtet, werden die Fahrzeuge über die gesamte Zeit als steuerfrei angesehen.

Die Werte der Instandhaltungskosten wurden mit Hilfe des in Kapitel 5 entwickelten Berechnungsmodells ermittelt. Hierbei wurde die aktuelle Auslegung der Fahrzeuge bzw. die Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten mit berücksichtigt.

Ebenso basieren die Parameter zur Berechnung des Wiederverkaufswertes der Fahrzeuge auf Berechnungsergebnissen, die mit Hilfe des neu entwickelten Kostenmodells ermittelt wurden (vgl. Kapitel 5.2). Hierbei wird analog der Logik des Berechnungsmodells der Wiederverkaufswert für jedes Fahrzeug in jeder Fahrzeuggrößenklasse und für jede der 900 Kundengruppen in VECTOR21 individuell auf Basis der jährlichen Fahrleistung mit Hilfe von Formel 5.11 berechnet. Hierzu wurde

die ermittelte Formel 5.11 in eine lineare Gleichung der Form $a \cdot x + b$ umgeformt. In diesem Zusammenhang wird gemäß den Ergebnissen aus Kapitel 5.2 für Hybridfahrzeuge ein Aufschlag von 15% und für Batteriefahrzeuge ein Abschlag von 10% antizipiert. Die ermittelten Restwerte werden dabei mit einem Fremdkapitalzinssatz von 6% diskontiert. Da die Entscheidung der Nutzer und letztlich der Kauf des Fahrzeugs zu einem anderen Zeitpunkt stattfindet, als der Geldfluss des Wiederverkaufswertes, ist diese Kapitalwertberechnung erforderlich.

6.1.2 Definition des Ausgangsszenarios

Die Definition der externen Randbedingungen umfasst technische, politische und ökonomische Parameter. Alle Faktoren sind mit einer Unsicherheit behaftet und werden daher im Folgenden näher erläutert.

6.1.2.1 Technische Randbedingungen

Zu den technischen Randbedingungen zählt insbesondere die technische und kostenbezogene Entwicklung der Hauptantriebsstrangkomponenten, wie sie in Kapitel 4 analysiert und beschrieben wurde. Hierzu zählen die Traktionsbatterie, Brennstoffzellensysteme, Elektromaschinen sowie Leistungselektronik und Hochvoltssysteme.

In der Szenarioberechnung mit VECTOR21 ist es möglich, die Parameter der zugrunde liegenden Lernkurven näher zu definieren. Diese Spezifizierung schließt neben der Lernrate selbst den aktuellen Stand der Industrie in Form der bisher weltweit produzierten Stückzahl sowie den Startkosten ein. Darüber hinaus werden die minimal möglichen, sogenannten „floor-costs“ angegeben. Als Besonderheit des Berechnungsmodells ist es möglich, neben den eigentlichen Produktionskosten auch einen stückzahlabhängigen Herstelleraufschlag zu definieren. Dieser Aufschlag kann im Falle einer Produkteinführung sowohl negativ als auch positiv sein. Als Zielwert dieses Aufschlags wird der ursprüngliche Wert von 35% übernommen [21]. Insgesamt werden im aktuellen Modell die Kosten von acht Subkomponenten der elektrifizierten Triebstrangkomponenten mit Hilfe von Lernkurven ermittelt (vgl. Tabelle 6.2).

Die ermittelten Werte der jeweiligen Lernkurvenparameter stammen im Fall der Traktionsbatterie, der Elektromotoren sowie der Leistungselektronik und Hochvoltkomponenten aus den in Kapitel 1 und 4 erläuterten Kostenmodellen und Literaturrecherchen. Aufgrund der umfassenden Datenbasis wurden die Parameter der Brennstoffzelle aus [21] übernommen und hinsichtlich der floor-costs um neue Erkenntnisse der Literaturrecherche in Kapitel 2.4.3 ergänzt.

Tabelle 6.2: Übersicht der Lernkurvenparameter im Ausgangsszenario.

Übersicht Lernkurvenparameter		Lernrate	Startwert			Endwert			Quelle
			Produktionskosten bzw. -masse	Aufschlag	produzierte Einheiten	floor-costs bzw. -masse	Aufschlag	produzierte Einheiten	
Lithium-Ionen-Batterie	€/kWh	88%	700	35%	3,00E+05	170	35%	3,00E+08	Kapitel 2.4.1.4
Elektromaschine ohne Neodym	€/kW	93%	37,2	0%	1,40E+06	6,51	35%	1,40E+09	Kapitel 4.2.2
Neodymanteil	kg	93%	0,03	35%	1,40E+06	0,006	35%	1,40E+09	Kapitel 4.2.2
Leistungselektronik & Hochvoltkomponenten	€/kW	93%	40	35%	1,40E+06	5	35%	1,40E+09	Kapitel 1.2.2.3
Brennstoffzellen-Stack	€/kW	85%	110	-95%	2,10E+05	19	35%	2,10E+08	Kapitel 2.4.3.2
Platinanteil	kg	85%	0,00273	-95%	2,10E+05	0,00033	35%	2,10E+08	[21]
Brennstoffzellen-Systemkomponenten	€/kW	85%	100	-95%	2,10E+05	45	35%	2,10E+08	Kapitel 2.4.3.2
H ₂ -Drucktank	€/kg	85%	575	-95%	9,00E+03	120	35%	9,00E+06	Kapitel 2.4.3.2

Neben der Implementierung von Lernkurven für neuartige Antriebskomponenten besteht in VECTOR21 die Möglichkeit, auch eine Verbesserung der konventionellen Fahrzeugarten zu berücksichtigen. Diese Verbesserungen umfassen Einzelmaßnahmen wie Reibungsminderung, Verringerung des Luftwiderstands oder die Massereduktion des Fahrzeugs und werden zu sogenannten Spritsparoptionen bzw. Add-ons zusammengefasst. Die Parametrisierung wurde im Wesentlichen aus [21] übernommen und um Erweiterungen für die neu eingeführten Antriebsstrangvarianten ergänzt. Die vollständige Übersicht befindet sich im Anhang (vgl. Anhang D 3).

6.1.2.2 Politische Randbedingungen

Zu den politischen Randbedingungen, die in VECTOR21 Berücksichtigung finden, zählen sowohl Mehrkosten der Nutzer in Form von Steuern als auch monetäre Anreizmaßnahmen. Zum Bereich der Steuergesetzgebung gehören neben der konventionellen Mehrwertsteuer die Mineralölsteuer sowie eine potentielle Fahrstromsteuer. Diese Abgabe stellt eine mögliche Sonderbesteuerung von Elektrizität dar, welche zum Vortrieb des Fahrzeugs verwendet wird und bildet somit das Pendant zur Mineralölsteuer. Im Rahmen der Szenariorechnungen wurde aufgrund der großen Unsicherheit keine potentiell mögliche Besteuerung von Wasserstoff berücksichtigt. Die Mehrwertsteuer wird im Ausgangsszenario bei den aktuell erhobenen 19% über den Betrachtungszeitraum konstant gehalten. Für die drei konventionellen Kraftstoffe Benzin, Diesel und CNG wird die Mineralölsteuer ebenfalls auf dem heutigen Stand belassen. Da keine Gesetzgebungspläne hinsichtlich der Einführung einer Fahrstromsteuer existieren, wird im Ausgangsszenario keine solche Abgabe erhoben.

Darüber hinaus wird die EU-weite Gesetzgebung hinsichtlich der Strafzahlung bei neu verkauften Fahrzeugen für jedes g CO₂/km oberhalb eines bestimmten Grenzwertes berücksichtigt. Diese zusätzliche Strafe wird im Jahr 2015 erstmalig eingeführt und beginnt mit einer gestaffelten Abgabe, welche den Verkauf von elektrifizierten Antriebssträngen durch Mehrfachanrechnung der lokalen Emissionsfreiheit begünstigt. Die Höhe des Grenzwertes auf EU-Ebene beträgt im Jahr 2015 130 g CO₂/km gemessen im NEFZ und wird in Abhängigkeit der Fahrzeugmasse für jedes individuelle Fahrzeugmodell angepasst [218]. In der Vergangenheit lag die durchschnittliche Masse der in Deutschland zugelassenen Neufahrzeuge 8% über dem europäischen Mittel [21]. Dieser Wert wird zur Anpassung des Grenzwertes im Modell verwendet. Die Höhe der Abgabe ist pro Fahrzeug mit 95 € pro g CO₂/km angesetzt, wobei dieser Wert im Ausgangsszenario über die Zeit konstant gehalten wird. Der zulässige Grenzwert hingegen wird entsprechend der angekündigten Gesetzgebung bis zum Jahr 2020 auf 95 g CO₂/km schrittweise reduziert. Langfristig wird von einer Verschärfung der Gesetzgebung auf 80 g CO₂/km bis zum Jahr 2040 ausgegangen. Dieser Wert deckt sich mit Expertenmeinungen und stellt vor dem Hintergrund der aktuellen Gesetzgebung eine geeignete langfristige Fortschreibung dar [218] [219] [220] [221]. An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich der Grenzwert lediglich auf die Emissionen der Fahrzeuge selbst, also die TTW-Emissionen, bezieht und folglich die Vorketten der Kraftstoff- bzw. Energiebereitstellung gänzlich außer Acht lässt. Die Höhe der Strafe wird analog der Gesetzgebung mit 95 €/(g CO₂/km) definiert, wobei die Berechnungslogik des Modells im Falle der Überschreitung vorsieht, den Betrag an den Kunden weiterzugeben [218] [21].

Neben den erhobenen Steuern und CO₂-Strafen besteht im Modell auch die Möglichkeit, fördernde monetäre Maßnahmen in Form von Subventionen für Neufahrzeuge zu berücksichtigen. Da die Bundesregierung bislang eine ablehnende Haltung gegenüber solchen Maßnahmen zeigt, wird im Ausgangsszenario davon ausgegangen, dass keine Subventionen gezahlt werden [1].

6.1.2.3 Ökonomische Randbedingungen

Die ökonomischen Randbedingungen lassen sich in zwei Bereiche unterteilen. Zum einen bilden Kraftstoffkosten und -verfügbarkeit einen wesentlichen Bestandteil der Szenarioparameter. Zum anderen werden die ökonomischen Randbedingungen durch die Entwicklung der Rohstoffkosten ausgedrückt.

Die Kosten für konventionelle Kraftstoffe werden mit Hilfe einer linearen Regression auf Basis historischer Daten ermittelt und aus [21] übernommen. Hierbei wird zusätzlich berücksichtigt, dass Erdgas als Kraftstoff bis zum Jahr 2018 einer Steuerentlastung von 80% unterliegt. In 2018 wird der Steuersatz gemäß aktueller Gesetzgebung auf 100% des Satzes vergleichbarer Kraftstoffe angehoben [222] (vgl. Tabelle 6.3).

Die Gestehungskosten von Elektrizität bis zum Preis, den der Kunde zahlt, werden aus [223] ermittelt. Für Hybridfahrzeuge mit Netzanschluss wird eine Kombination der beiden Kostenarten auf

Basis der in Abschnitt 6.1.1 erläuterten Fahrzeugdefinition und den damit verbundenen Anteilen rein elektrischer Fahrweise ermittelt und im Szenariomodell hinterlegt. Der Preis für Wasserstoff entspricht den berechneten Preisen der EU-Coalition-Studie [102].

Tabelle 6.3: Übersicht der politischen und ökonomischen Randbedingungen im Ausgangsszenario.

		2010	2020	2030	2040	Quelle
CO ₂ -Grenzwert	g CO ₂ /km	130	95	85	80	<i>ab 2015</i>
Höhe der CO ₂ -Abgabe	€/(g CO ₂ /km)	95				[218] [219]
Ölpreis	\$/bbl	80	118	132	148	[224] (current policies)
Platinpreis	\$/oz.tr.	1011				[225] [226]
Neodympreis	\$/kg	70	210	280	350	[227] [100]
Grafitpreis	\$/kg	3,00	4,00	4,50	5,00	[84]
Lithiumpreis	\$/kg	6,61	8,00	9,30	10,00	[19]
Elektrizitätspreis	€ ct/kWh	21,7	21,2	20,2	19,3	[223]
H ₂ -Preis	€/kg	16,6	6,6	5,0	4,6	[102]
CO ₂ -Intensität Strom (WTT)	g CO ₂ /kWh	540	510	21	21	[21] [223]
CO ₂ -Intensität H ₂ (WTT)	g CO ₂ /kWh	360	360	90	30	[102]
Fahrstromsteuer	€ ct/kWh	keine				[1]
Mineralölsteuer CNG	%	20%	ab 2018: 100%			[222]
Verfügbarkeit Ladestationen	%	40%	55%	63%	70%	Kapitel 3
Verfügbarkeit H ₂ -Tankstellen	%	10%	30%	50%	70%	Kapitel 3
Subventionen	€/Fzg.	keine				[1]
Mehrwertsteuer	%	19%				

Umrechnungskurs 1,30 \$/€.

Quelle: Wie angegeben, eigene Fortschreibung.

Die Verfügbarkeit der beiden flüssigen Kraftstoffe Benzin und Diesel wird aufgrund der hinreichenden Tankstellenabdeckung mit 100% antizipiert. Erdgas als Kraftstoff hingegen wird aufgrund der bisher nur 900 [228] deutschlandweit verfügbaren Tankstellen erst schrittweise bis zum Jahr 2020 auf 100% erhöht. Der gleichen Logik folgt die Verfügbarkeit von Wasserstofftankstellen, wobei hier der Prozentsatz von 10% im Jahr 2010 schrittweise auf 70% im Jahr 2040 erhöht wird. Die Verfügbarkeit von Ladestationen orientiert sich am ersten Ladeinfrastrukturszenario (vgl. Kapitel 3.3.1) und wird schrittweise von einem Startwert von 40% auf ebenfalls 70% in 2040 erhöht.

Die Berücksichtigung von Rohstoffkosten wurde wie in Kapitel 2.2.2 erläutert um weitere Rohstoffarten erweitert. Neben Öl und Platin sind nun auch Lithium, Grafit und Neodym im Modell hinterlegt. Der Ölpreis entspricht dem „current policies scenario“ der Internationalen Energieagentur (IEA) und steigt zunächst auf 118 \$/bbl im Jahr 2020 und langfristig auf 140 \$/bbl bis zum Jahr 2035 [224]. Der Platinpreis wird nach [21] konstant gehalten. Die Preise für Lithium, Grafit und Neodym richten sich nach den in Kapitel 4 identifizierten Rohstoffpreisen und -prognosen.

6.1.3 Berechnung des Ausgangsszenarios

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten Szenariofahrzeuge sowie die Eingangsparameter definiert wurden, wird im Folgenden das Ausgangsszenario berechnet und interpretiert. Im Anschluss daran erfolgt auf Basis dieses Referenzszenarios die Analyse der Sensitivitäten. Das Ausgangsszenario ist dabei im Sinne der Fortschreibung heutiger Trends und Gesetzgebungen als mögliche zukünftige Marktentwicklung zu betrachten und keinesfalls als Prognose zu verstehen. Als Zeithorizont dient das Jahr 2040.

6.1.3.1 Neufahrzeugmarkt

Die berechneten Ergebnisse zeigen, dass die klassische Aufteilung des deutschen Marktes in hauptsächlich Benzin- und Dieselfahrzeuge einem Portfolio aus Antriebssträngen weicht, wobei kein dominanter Antriebsstrang erkennbar ist (vgl. Abbildung 6.1).

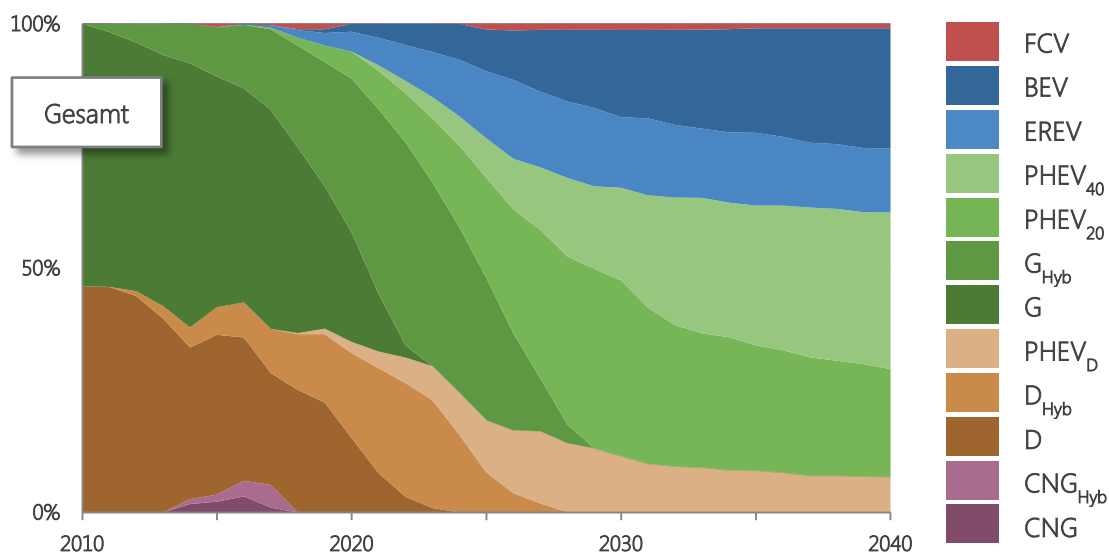


Abbildung 6.1: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario.

In den Modellrechnungen werden Benzin- und Dieselfahrzeuge zunächst sukzessive durch die jeweiligen Vollhybridvarianten ersetzt. Diese werden im Anschluss daran durch die Hybridvarianten mit Netzanschluss ersetzt. Ab dem Jahr 2024 sind keine konventionellen, nicht-hybridisierten Antriebsstränge auf dem Neufahrzeugmarkt mehr vorhanden. Bereits im Jahr 2029 werden – abgesehen von Brennstoffzellenfahrzeugen – keine Fahrzeuge ohne Netzanschluss mehr verkauft. Die Marktanteile von Benzin- und Diesel-basierten Fahrzeugen bleiben dabei zunächst konstant, wobei die Werte des Ausgangsjahres den realen KBA-Zulassungsdaten entsprechen. Mit einsetzender Marktdurchdringung vollelektrischer Fahrzeuge sinkt der Dieselmarktanteil ab. Dies liegt an der Konkurrenz der Antriebssysteme hinsichtlich Kunden mit hohen Fahrleistungen, da sowohl

Dieselfahrzeuge als auch vollelektrische Fahrzeuge höhere Anschaffungskosten als Benzinfahrzeuge aufweisen und daher erst für hohe jährliche Fahrleistungen vorteilhafte total-cost-of-ownership bieten. Der Anteil der Benzin-basierten Fahrzeuge bleibt hingegen über den gesamten Betrachtungszeitraum nahezu konstant. So sinkt bis zum Jahr 2040 der Marktanteil von Dieselfahrzeugen auf 7%, wohingegen der Marktanteil von Benzinfahrzeugen (PHEV₂₀ und PHEV₄₀) sowohl im Jahr 2010 als auch im Jahr 2040 54% beträgt [204]. Zählt man zu diesen beiden Parallelhybriden den seriellen Hybrid hinzu, steigt der Marktanteil bis zum Jahr 2040 sogar auf 67%. Insgesamt besitzen Fahrzeuge, welche einen Verbrennungsmotor an Bord haben, im Jahr 2040 einen Marktanteil am deutschen PKW-Neufahrzeugmarkt von 75%.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass CNG-Fahrzeuge durch die Einführung der CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge in Kombination mit dem steigenden Ölpreis zunächst einen Nischenmarkt für sich behaupten können. Das Auslaufen der Mineralölsteuerbefreiung im Jahr 2018 von derzeit 20% auf zukünftig 100%, wie es aktuellen Gesetzesvorgaben entspricht, lässt die Fahrzeuge jedoch abrupt aus dem Markt verschwinden.

In der Modellrechnung nehmen vollelektrische Antriebsstränge bis zum Jahr 2020 lediglich einen Nischenmarkt ein und können keine signifikanten Marktanteile erzielen. Bis zum Jahr 2040 können die drei ausschließlich elektrisch angetriebenen Fahrzeuge BEV, FCV und EREV jedoch einen Marktanteil von 39% einnehmen. Der langfristige Markterfolg der beiden batterieelektrischen Fahrzeuge BEV und EREV ist dabei im Wesentlichen auf die einsetzenden Kostendegressionseffekte der Traktionsbatterien zurückzuführen. Diese Kostenreduktion wird durch die zunehmende Marktdurchdringung von Hybridfahrzeugen mit kleinen Batteriegrößen, allerdings in hohen Stückzahlen, ermöglicht. Parallel-hybride Fahrzeuge dienen also als Wegbereiter für vollelektrische Fahrzeuge. Der geringe Marktanteil von Brennstoffzellenfahrzeugen ist darauf zurückzuführen, dass den hohen Kosten der Brennstoffzellensysteme ein solcher Wegbereiter fehlt. Zwar resultieren der sinkende Wasserstoffpreis und die durch die übrigen elektrifizierten Antriebsstränge verursachten Kostendegressionen im Bereich der Traktionsbatterie, der Elektromaschinen sowie der Leistungselektronik und den Hochvoltkomponenten in sinkenden Kosten des elektrischen Antriebsstrangs, diese Effekte sind jedoch im Vergleich zu den restlichen Antriebsarten zu schwach um Brennstoffzellenfahrzeuge wettbewerbsfähig werden und mehr als nur einen Nischenmarkt besetzen zu lassen. Eine genaue Analyse der Daten zeigt, dass die Käufer von Brennstoffzellenfahrzeugen Kunden mit hohen Zahlungsbereitschaften und gleichzeitig hohen jährlichen Fahrleistungen sind, die es ermöglichen, die hohen Anschaffungskosten während der Haltedauer von vier Jahren zu amortisieren.

Der Vergleich der drei Fahrzeuggrößenklassen zeigt, dass die Entwicklung der drei Fahrzeugsegmente ähnlich berechnet wird, bei genauerer Analyse jedoch deutliche Abweichungen sichtbar werden (vgl. Abbildung 6.2). Die Ähnlichkeit der Marktentwicklung drückt sich durch die zuvor erläuterten Entwicklungen des Gesamtfahrzeugmarktes aus. In jedem der Fahrzeugsegmente

bleibt der Marktanteil von Benzin- und Dieselfahrzeugen zunächst nahezu konstant, um mittel- bis langfristig durch ein Antriebsstrangportfolio abgelöst zu werden. Die Zusammensetzung dieses Portfolios variiert jedoch insbesondere langfristig deutlich zwischen den drei Größenklassen. So wird im großen Fahrzeugsegment, wie bereits im Jahr 2010, auch im Jahr 2040 ein höherer Anteil an Diesel-Plug-in Hybriden berechnet. Der Anteil reiner Batteriefahrzeuge ist hingegen deutlich geringer als im kleinen Fahrzeugsegment. Die Veränderung des Marktes im Zeitverlauf ist darüber hinaus unterschiedlich. So werden im Modell im kleinen Fahrzeugsegment zeitlich früher Batteriefahrzeuge nachgefragt, wohingegen die Marktdurchdringung dieser Fahrzeuge im großen Fahrzeugsegment deutlich langsamer zu beobachten ist.

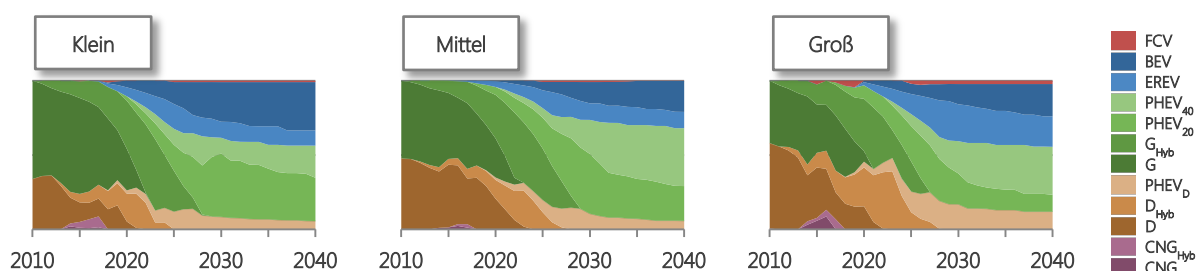


Abbildung 6.2: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten und Fahrzeuggrößenklasse im Ausgangsszenario.

Hinsichtlich der Zusammensetzung der Hybridfahrzeuganteile lässt sich feststellen, dass im großen Fahrzeugsegment die beiden Hybride mit großen Traktionsbatterien (PHEV₄₀ und EREV) einen signifikant höheren Marktanteil erzielen als im kleinen Fahrzeugsegment, in welchem insbesondere die beiden Hybridvarianten mit kleineren Batterien (PHEV₂₀ und PHEV_D) bevorzugt werden. Diese berechnete Marktentwicklung liegt in der höheren Fahrleistungsverteilung des großen Fahrzeugsegments und der damit verbundenen schnelleren Amortisation der hohen Anschaffungskosten teurer Traktionsbatterien begründet. Im Hinblick auf die Fahrzeugauslegung lässt sich daraus schließen, dass das große Fahrzeugsegment sich besser für die Einführung von Hybridfahrzeugen mit hoher rein elektrischer Reichweite eignet.

Ein ähnlicher Effekt lässt sich hinsichtlich der Marktentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen beobachten. Zwar werden für FCVs in keinem der drei Fahrzeugsegmente signifikante Marktanteile berechnet, das Segment mit dem größten Brennstoffzellenanteil stellt jedoch das große Segment dar. Auch hier wird in den Modellrechnungen aufgrund der hohen jährlichen Fahrleistungen ein größerer Anteil teurer Brennstoffzellenfahrzeuge nachgefragt, da sich die Investitionskosten schneller amortisieren. Im kleinen Fahrzeugsegment stellt darüber hinaus die geringere Zahlungsbereitschaft der Nutzer einen erschwerenden Faktor für die Marktdurchdringung von Brennstoffzellenfahrzeugen dar.

In allen Analysen liegt die Entwicklung des mittleren Fahrzeugsegments zwischen der Entwicklung des kleinen und des großen Fahrzeugsegments und damit letztlich sehr nah an der Entwicklung

des gesamten Fahrzeugmarktes. Für die Auslegung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte bedeutet die unterschiedliche Marktentwicklung der drei Fahrzeuggrößenklassen, dass bei der Wahl der Antriebsstrangarchitektur stets die Fahrzeuggröße und die Kundenzielgruppe Berücksichtigung finden muss.

6.1.3.2 Total-cost-of-ownership

Die Kostenbetrachtung in VECTOR21 wurde von einer relevant-cost-of-ownership-Betrachtung zu einer total-cost-of-ownership-Berechnung geändert (vgl. Kapitel 2.2.2.1). Die Berücksichtigung von Wiederverkaufswerten und den während der Nutzungsphase anfallenden Instandhaltungskosten erlaubt die detaillierte Analyse der Kostenstruktur aus Kundensicht.

Hierfür wird in die Bereiche der fixen und variablen Kosten unterschieden. Zu den fixen Kosten zählen die Ausgaben für Anschaffung (inkl. etwaiger Steuern und Abgaben) sowie die Erlöse beim Wiederverkauf des Fahrzeugs. Variable Kosten beziehen alle anderen Kosten ein, die während der Nutzungsphase anfallen. Hierzu zählen Energiekosten, jährliche Steuerabgaben und Instandhaltungskosten.

Die Analyse der durchschnittlichen Ausgaben deutscher Fahrzeugnutzer zeigt, dass die Kosten für die Nutzung und den Besitz des Fahrzeugs in der Simulationsrechnung im gesamten Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2040 über dem Ausgangswert des Jahres 2010 liegen (vgl. Abbildung 6.3). Die Kosten aus Kundensicht für individuelle Mobilität steigen also im Betrachtungszeitraum an.

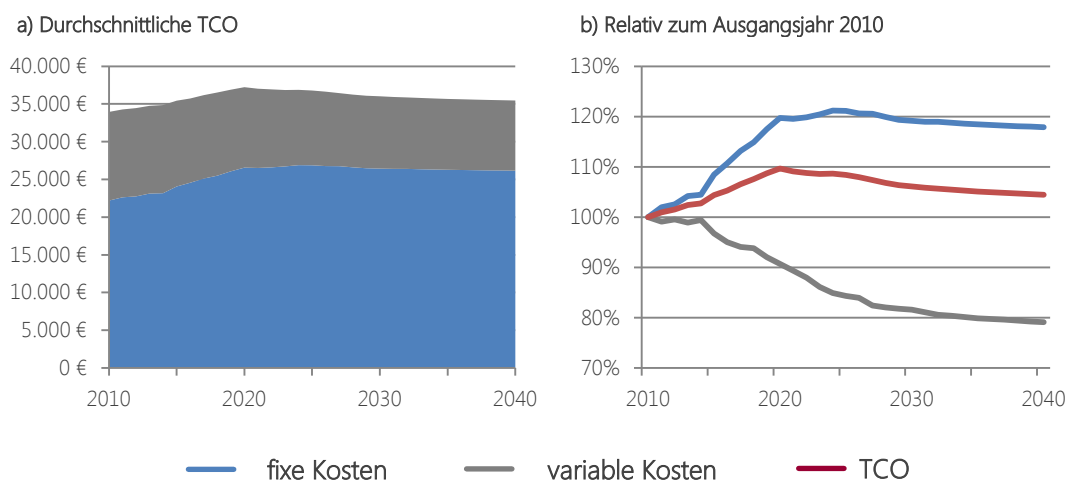


Abbildung 6.3: Zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen total-cost-of-ownership im Ausgangsszenario; absolut (a)) und relativ (b)) zum Ausgangsjahr 2010.

Insgesamt kommt es in diesem berechneten Ausgangsszenario zu einer Verschiebung des Verhältnisses von fixen zu variablen Kosten. So steigt der Anteil der fixen Kosten von 65% der Ge-

samtausgaben in 2010 auf 74% im Jahr 2040. Dies liegt im Wesentlichen in den aufgrund der teureren Antriebsstrangkomponenten höheren Anschaffungskosten für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte und den gleichzeitig sinkenden Energieverbräuchen der Fahrzeuge.

Hierbei lassen sich zwei gegensätzliche Effekte beobachten. Zum einen werden bis zum Jahr 2024 um über 21% steigende fixe Kosten der Fahrzeuge berechnet, wobei sich insbesondere ab dem Jahr 2015 ein signifikant ansteigender Verlauf beobachten lässt. Dies liegt hauptsächlich in der Einführung der CO₂-Strafsteuer für Neufahrzeuge begründet. Da zu diesem Zeitpunkt jedoch elektrifizierte Fahrzeugkonzepte aufgrund der hohen Produktionskosten der neuartigen Antriebsstrangkomponenten noch zu teuer sind, ist es notwendig, zusätzliche verbrauchsreduzierende und gleichzeitig teure Maßnahmen in den konventionellen Fahrzeugantrieben zu integrieren. Langfristig sinken in der Modellrechnung die durchschnittlichen fixen Kosten aufgrund der ausgeprägten Kostendegressionseffekte neuartiger Komponenten wieder, liegen jedoch auch im Jahr 2040 noch 18% über dem Ausgangswert des Jahres 2010.

Zum anderen sinken die variablen Kosten im Betrachtungszeitraum signifikant um 21% bis zum Jahr 2040. Diese berechnete Kostendegression wird durch die stärkere Marktdurchdringung elektrifizierter Antriebskonzepte begründet. Auf der einen Seite sinken dadurch die durchschnittlichen Energiekosten. Auf der anderen Seite werden hierdurch geringere Ausgaben für Instandhaltung nötig (vgl. Kapitel 5). In der Modellrechnung überwiegen dabei die geringeren Energieverbräuche der Fahrzeuge die steigenden Kosten der Kraftstoffe bedingt durch den steigenden Ölpreis. Auch im Fall der variablen Kosten ist die Einführung der CO₂-Strafsteuer deutlich im Kostenverlauf zu erkennen. Die Einführung im Jahr 2015 lässt die Kosten von einem bis dahin nahezu konstanten Verlauf aufgrund der effizienzverbessernden Maßnahmen sowie der Elektrifizierung der Antriebsstränge deutlich sinken.

6.1.3.3 Kosten elektrifizierter Antriebsstrangkomponenten

Die berechneten Produktionskosten für Elektromaschinen sinken sehr rasch von ihrem Ausgangswert ab (vgl. Abbildung 6.4). Diese schnelle Kostendegression wird dadurch ermöglicht, dass alle elektrifizierten Antriebsstränge einen Elektromotor besitzen. Somit werden durch die bis zum Jahr 2020 hohe Marktdurchdringung hybridisierter Antriebskonzepte hohe Stückzahlen erzielt und folglich die Produktionskosten durch die im Modell hinterlegten Lernkurveneffekte gesenkt. Langfristig nähert sich die berechnete Kostenkurve einem asymptotischen Verlauf an, da die lernkurvenbedingte Kostendegression nahezu vollständig von den steigenden Rohstoffkosten für Neodym egalisiert wird. Ein ähnlicher Kostenverlauf zeigt sich für Leistungselektronik und Hochvoltkomponenten, wenngleich hier auch langfristig noch Kostendegressionen berechnet werden.

Die simulierte Kostendegression von Traktionsbatterien verläuft noch schneller als im Fall von Elektromaschinen und Leistungselektronik. Durch die geringere Lernrate von 88% im Vergleich zu 93% kann der Ausgangswert von 750 €/kWh trotz der anfänglich geringen produzierten Stückzah-

len bis zum Jahr 2020 signifikant gesenkt werden. Dennoch ist festzustellen, dass auch im Jahr 2020 die berechneten Kosten mit 346 €/kWh noch deutlich über den floor-costs von unter 200 €/kWh liegen. Dieser Wert kann erst im langfristigen Verlauf erreicht werden. Im Wesentlichen wird diese langfristige Kostendegression durch die höhere Marktdurchdringung von Fahrzeugen mit größeren Batterien beeinflusst. Hierdurch können in der Modellrechnung die Produktionskosten von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien bis zum Jahr 2040 auf unter 180 €/kWh sinken.

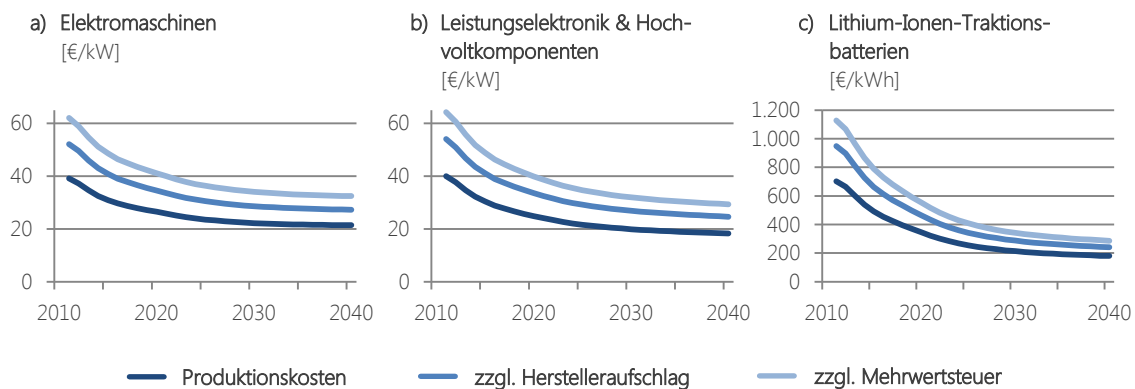


Abbildung 6.4: Zeitlicher Verlauf der Kosten von Elektromaschinen (a)), Leistungselektronik und Hochvoltkomponenten (b)) und Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (c)) im Ausgangsszenario.

6.1.3.4 Gesamter Bestand an Fahrzeugen

Die vorangegangenen Betrachtungen bezogen sich alle auf die Entwicklung des deutschen Neufahrzeugmarktes. Im Folgenden wird die Entwicklung des gesamten deutschen Fahrzeugbestands untersucht.

Aus den Berechnungsergebnissen hinsichtlich des gesamten Fahrzeugbestands wird deutlich, dass die Umschichtung der Anteile der unterschiedlichen Antriebsstränge aufgrund der hohen maximalen Überlebenswahrscheinlichkeiten von bis zu 19 Jahren sehr viel langsamer verläuft als auf dem Neufahrzeugmarkt (vgl. Abbildung 6.5). Bemerkenswert ist dabei, dass auch im Jahr 2040 noch konventionelle Benzin- und Dieselfahrzeuge im Flottenbestand existieren. Der Anteil von Benzinbasierten Fahrzeugen (inkl. EREV) steigt dabei auf 71% an, wohingegen der Dieselanteil auf unter 10% fällt.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass im Jahr 2040 noch in 81% aller Fahrzeuge der deutschen Fahrzeugflotte ein Verbrennungsmotor im Antriebsstrang integriert ist. Die beiden rein elektrischen Fahrzeuge BEV und FCEV erreichen somit einen Anteil von 19%, wobei Brennstoffzellenfahrzeuge mit 411.000 Einheiten bzw. knapp einem Prozent der Gesamtflotte einen Nischenmarkt darstellen.

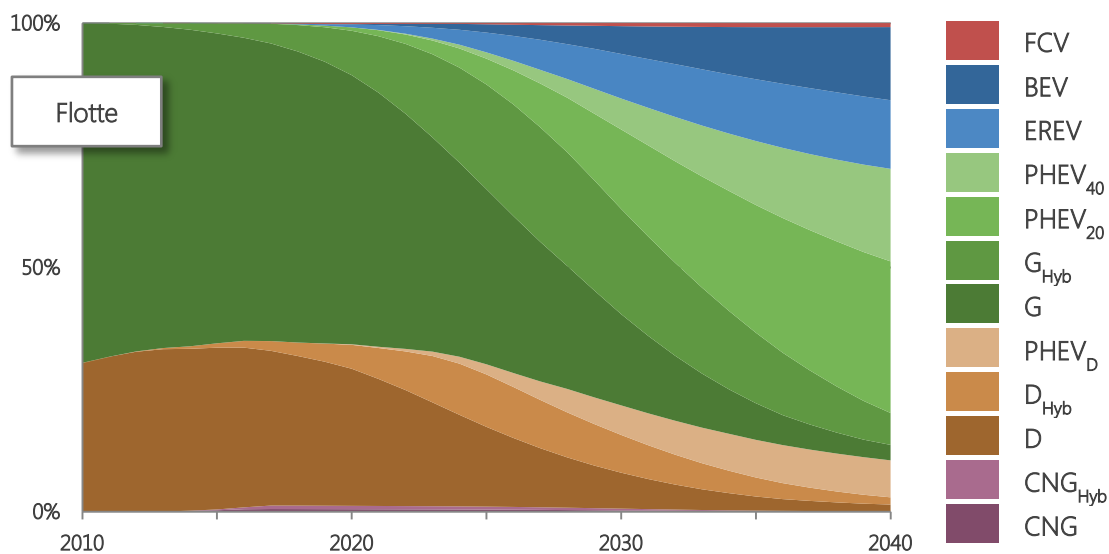


Abbildung 6.5: Segmentierung des deutschen PKW-Flottenbestands nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario.

Der Vergleich des berechneten Flottenbestands mit den Zielen der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) zeigt, dass das Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 im Ausgangsszenario nahezu erreicht und darüber hinaus das Ziel von sechs Millionen Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 sogar deutlich übertroffen werden kann (vgl. Abbildung 6.6). Als Elektrofahrzeuge werden in diesem Zusammenhang Fahrzeuge angesehen, die eine Netzanbindung besitzen (vgl. Kapitel 2.3). Hierzu zählt der Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität (NEP) der Bundesregierung konkret Batteriefahrzeuge, Range-extender Fahrzeuge sowie Plug-in Hybride. Brennstoffzellenfahrzeuge werden dabei ebenso wie Vollhybride explizit ausgeschlossen [1]. Zu beachten ist bei den absoluten Zielen des Elektrofahrzeugbestands, dass dabei auch Nutzfahrzeuge hinzugezählt werden. Für PKW ergibt sich somit ein niedrigerer Wert von 950.000 Fahrzeugen für das Jahr 2020 [2].

Die Analyse der Zusammensetzung des Bestands an Elektrofahrzeugen zeigt, dass die Ziele der NPE von den berechneten Simulationsergebnissen abweichen. Die 950.000 Fahrzeuge sollen nach den Zielen des Arbeitskreises durch 500.000 Plug-in Hybride und 450.000 Batteriefahrzeuge erreicht werden. Die im Modell berechneten Ergebnisse zeigen jedoch mit knapp 80.000 BEVs einen deutlich geringeren Anteil rein elektrischer Fahrzeuge. Dies liegt im Wesentlichen in den bis zum Jahr 2020 noch hohen Produktionskosten der Traktionsbatterien begründet.

Der zeitliche Verlauf des Flottenbestands an Elektrofahrzeugen verläuft im Modell langsamer als die Ziele der NPE es vorsehen. Trotz dieses Unterschieds wird das Ziel von sechs Millionen Fahrzeugen im Jahr 2030 deutlich übertroffen. Dies liegt vor allem in der hohen Marktdurchdringung von Plug-in Hybriden begründet und lässt das langfristige Ziel der NPE konservativ erscheinen.

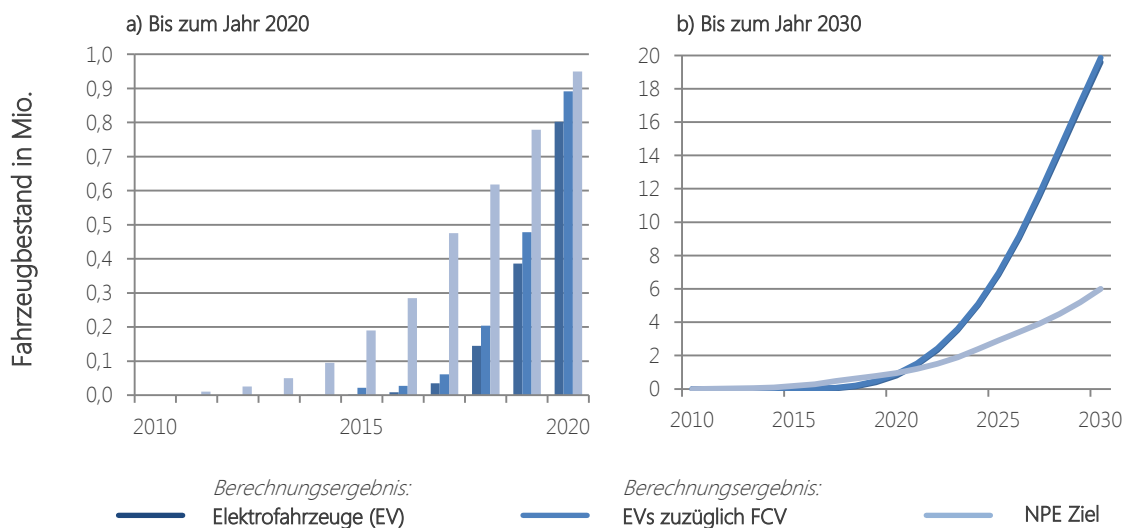


Abbildung 6.6: Vergleich des berechneten Flottenbestands an Elektrofahrzeugen im Ausgangsszenario mit den Zielen der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) bis zum Jahr 2020 (a) und 2030 (b).

Quelle NPE: [2].

Elektrofahrzeug: BEV, EREV und BEV (vgl. Definition NPE [2]).

6.1.3.5 CO₂-Emissionen

Die Analyse der CO₂-Emissionen im Ausgangsszenario zeigt, dass sich die durch die deutsche Fahrzeugflotte verursachten Gesamtemissionen um über 76% bis zum Jahr 2040 im Vergleich zum Ausgangsjahr 2010 reduzieren lassen (vgl. Abbildung 6.7). Diese berechnete Reduktion schließt sowohl lokale Emissionen der Fahrzeuge selbst (tank-to-wheel, TTW) als auch in den Vorketten der Kraftstoffe bzw. Energieträger verursachte Emissionen (well-to-tank, WTT) mit ein. Die signifikante Reduktion auf unter ein Viertel des Ausgangswertes wird im Wesentlichen durch den höheren Wirkungsgrad elektrifizierter Antriebsstränge verursacht. Letztlich trägt allerdings auch die Effizienzsteigerung konventioneller Triebstränge insbesondere im kurz- bis mittelfristigen Zeitraum maßgeblich zur Senkung der Emissionen bei.

Bedingt durch die im Ausgangsszenario hinterlegte Annahme, dass zur Traktion verwendeter Strom zunächst dem deutschen Strom-Mix entnommen und erst ab dem Jahr 2020 schrittweise auf rein erneuerbare Energiequellen umgestellt wird, bleibt das Verhältnis von WTT- und TTW-Emissionen über den gesamten Zeitverlauf nahezu konstant. Zu beobachten ist dabei, dass die berechneten CO₂-Emissionen unabhängig von ihrem Verursachungsort im gesamten Betrachtungszeitraum unter dem Ausgangswert im Jahr 2010 liegen. Mit einer stärkeren Marktdurchdringung von Fahrzeugen mit Netzanschluss und der gleichzeitig erst einsetzenden Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen steigen die WTT-Emissionen in der Simulationsrechnung im Zeitraum von 2020 bis 2025 wieder an, um anschließend weiter stetig zu fallen.

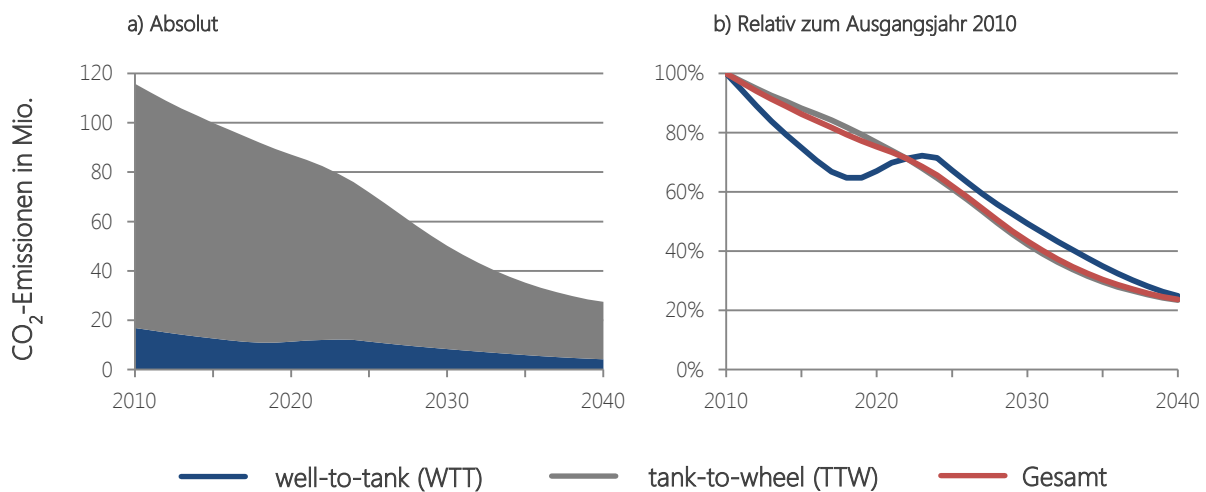


Abbildung 6.7: CO₂-Emissionen der deutschen Fahrzeugflotte im Ausgangsszenario differenziert in den Entstehungsort der Emissionen; absolut (a) und relativ zum Ausgangsjahr (b)).

Die Berechnungsergebnisse des Ausgangsszenarios haben gezeigt, dass sich die klassische Aufteilung des deutschen Neufahrzeugmarktes in Diesel- und Benzinfahrzeuge durch die einsetzende und im Zeitverlauf zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs in ein Portfolio aus Fahrzeugkonzepten wandelt, wobei auch im Jahr 2040 aufgrund der langen Verweildauer der Fahrzeuge in der Gesamtflotte noch konventionelle, nicht elektrifizierte Fahrzeugantriebe zu finden sein werden. Die nationalen Bestandsziele erscheinen im Kontext dieses Szenarios realistisch und erreichbar.

6.2 Berechnung der Sensitivitätsszenarien

Im Folgenden werden ausgehend von dem zuvor berechneten Ausgangsszenario Sensitivitäten einzelner Einflussparameter simuliert. Um explizit den Einfluss eines Parameters identifizieren zu können, wird ausschließlich dieser eine Parameter variiert, während die restlichen konstant gehalten werden (*ceteris paribus*). In Kombination mit einer sowohl progressiven als auch konservativen Variation der Parameter werden so Schlussfolgerungen auf das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte ermöglicht.²⁴ Die Variation der Parameter erfolgt dabei entlang der technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen (vgl. Tabelle 6.4).

²⁴ Die Bezeichnung „progressiv“ bezieht sich in den Sensitivitätsszenarien auf eine im Vergleich zum Ausgangsszenario (und im Hinblick auf den variierten Parameter) beschleunigte bzw. optimistische Entwicklung, wohingegen sich die Bezeichnung „konservativ“ auf eine verlangsamte bzw. pessimistische Entwicklung bezieht.

Tabelle 6.4: Übersicht der technischen, politischen und ökonomischen Sensitivitätsszenarien.

Sensitivität				Variation "konservativ"	Ausgangs- szenario	Variation "progressiv"	# Szenarien	
Technisch	Traktions- batterie	Startwert	[€/kWh]	800	700	650	6	
		Endwert	[€/kWh]	250	170	120		
		Lernrate	[%]	94	88	75		
	E-Maschinen	Startwert	[€/kW]	37,2	37,2	25	6	
		Endwert	[€/kW]	15	6,5	2		
		Lernrate	[%]	97	93	80		
	Brennstoffzelle	System	Startwert	[€/kW]	100	100	80	6
			Endwert	[€/kW]	60	45	30	
			Lernrate	[%]	90	85	74	
		Stack	Startwert	[€/kW]	110	110	90	
			Endwert	[€/kW]	40	19	10	
			Lernrate	[%]	90	85	74	
		H ₂ - Druck- tank	Startwert	[€/kg]	575	575	400	
			Endwert	[€/kg]	150	120	80	
			Lernrate	[%]	90	85	74	
		Platin- Anteil	Startwert	[g/kW]	2,73	2,73	2,73	
			Endwert	[g/kW]	0,33	0,33	0,33	
			Lernrate	[%]	90	85	74	
Politisch	CO ₂ -Grenzwerte	2015		Entfall	130	130	9	
		2020	[g CO ₂ /km]	Entfall	95	95		
		2030		Entfall	85	55		
		2040		Entfall	80	20		
	CO ₂ -Abgabe	2015		95	95	95	4	
		2020	[€/g CO ₂ /km]	85	95	130		
		2030		70	95	200		
		2040		50	95	300		
	Mineralöl- steuer	2015		95	100	105	3	
		2020	[%]	93	100	110		
		2030		87	100	117		
		2040		80	100	125		
	Fahrstrom- steuer	2010		-	0	10	3	
		2020	[€ ct./kWh]	-	0	20		
		2030		-	0	30		
		2040		-	0	40		
	Subventionen	PHEV, EREV	[€/Fzg]	-	0	5.000	3	
		BEV, FCV		-	0	10.000		
Ökonomisch								
Ökonomisch	Grafitpreis	2010		3,00	3,00	3,00	5	
		2020	[\$/kg]	2,00	4,00	40,00		
		2030		1,50	4,50	70,00		
		2040		1,00	5,00	100,00		
	Lithium- preis	2010		6,61	6,61	6,61	5	
		2020	[\$/kg]	4,00	8,00	40,00		
		2030		3,00	9,30	70,00		
		2040		2,00	10,00	100,00		
	Neodym- preis	2010		70	70	70	7	
		2020	[\$/kg]	65	210	500		
		2030		60	280	800		
		2040		50	350	1.000		
Platinpreis	2010		1.011	1.011	1.011	4		
	2020	[\$/oz.tr.]	850	1.011	1.400			
	2030		700	1.011	1.700			
	2040		600	1.011	2.200			
Ölpreis	2010		80	80	80	6		
	2020	[\$/bbl.]	80	118	150			
	2030		80	132	240			
	2040		80	148	400			
Elektrizitäts- preis (exkl. MWSt.)	2010		21,7	21,7	21,7	3		
	2020	[€ ct./kWh]	16,0	21,2	25,0			
	2030		14,0	20,2	30,0			
	2040		12,0	19,3	35,0			
Wasserstoff- preis	2010		16,6	16,6	3,5	6		
	2020	[€/kg H ₂]	14,0	6,6	6,6			
	2040		12,0	4,6	1,0			
Infrastruktur	2010		20	40	40	4		
	2020	[%]	25	55	60			
	2030		28	63	70			
	2040		30	70	80			

6.2.1 Berechnung der Sensitivitäten der technischen Randbedingungen

Wie die Berechnung aller Sensitivitäten, soll auch die Variation der technischen Randbedingungen dazu dienen, Unsicherheiten abzuschätzen und stabile Entwicklungspfade zu identifizieren. Die Besonderheit der technischen Randbedingungen liegt darin begründet, dass sie maßgeblich die zukünftige Marktentwicklung und damit das Marktpotential elektrifizierter Antriebskonzepte beeinflussen. Ihre zeitliche Entwicklung birgt nicht nur Potential, sondern impliziert gleichzeitig auch ein großes Risiko, da bei heutigen Fehleinschätzungen hinsichtlich der Entwicklung einzelner Kompo-

zenten signifikante Konsequenzen für die Marktdurchdringung elektrifizierter Antriebe drohen. In der Realität korreliert die technische Entwicklung deutlich mit politischen Randbedingungen, wie beispielsweise den staatlichen Ausgaben für Forschung und Entwicklung. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die folgenden Sensitivätsberechnungen die Kostenentwicklung der Technologien maßgeblich ist und hierdurch keine Aussage über etwaige Technologiesprünge oder den Wechsel zu anderen Bauarten bzw. Systemen getroffen werden kann.

6.2.1.1 Traktionsbatterien

Es wurden sechs Sensitivitätsszenarien definiert, welche sowohl eine sehr positive als auch eine konservative Batterieentwicklung antizipieren. Hierbei wurden ausgehend von den Referenzwerten der Batterieentwicklung von heutigen Produktionskosten von 700 €/kWh, einer Lernrate von 88% und floor-costs von 170 €/kWh (vgl. Kapitel 2.4.1.4 und 6.1.2.1)) drei progressive sowie drei konservative Technologieentwicklungen unterstellt. Die berechnete Entwicklung des Neufahrzeugmarktes in den drei progressiven Szenarien zeigt große Veränderungen gegenüber dem (in Abbildung 6.1 dargestellten) Ausgangsszenario. Insbesondere im langfristigen Verlauf zeigen sich signifikanten Unterschiede (vgl. Abbildung 6.8).

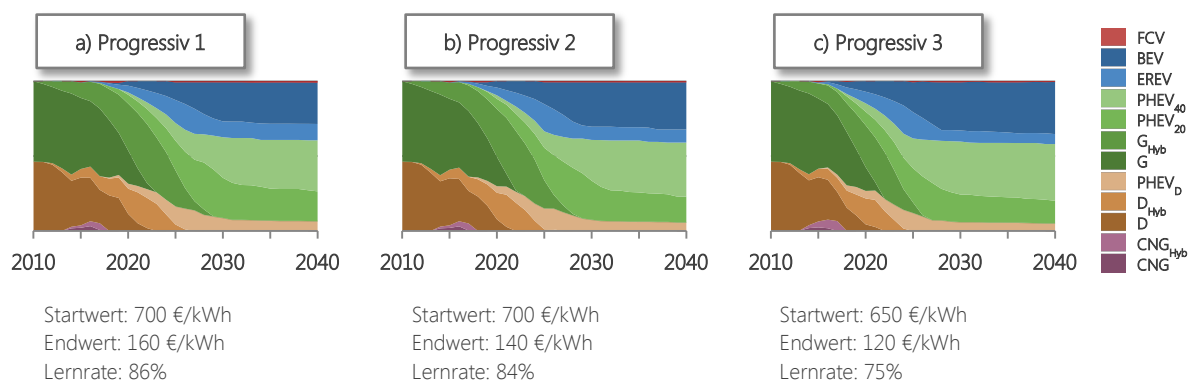


Abbildung 6.8: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in drei progressiven Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung von Traktionsbatterien.

Die Annahme einer deutlich positiven Batterieentwicklung im Batterie-Szenario „Progressiv 3“ mit Lernkurvenparametern von 650 €/kWh Startkosten, 120 €/kWh floor-costs sowie einer Lernrate von 75% führt dazu, dass die Umschichtung des Marktes in der Sensitivätsrechnung schneller verläuft und das in der langfristigen Entwicklung Antriebsstränge mit großen Batterien bevorzugt werden. So sind aufgrund der sehr niedrigen Lernrate von 75% bereits im Jahr 2025 keine Fahrzeuge ohne Netzanschluss auf dem Neufahrzeugmarkt vertreten. Brennstoffzellenfahrzeuge werden in diesem Sensitivitätsszenario nahezu vollständig aus dem Markt verdrängt.

Die detaillierte Analyse der berechneten Batteriekosten zeigt, dass in diesem progressivsten Szenario die floor-costs der Produktionskosten von 120 €/kWh bereits im Jahr 2021 erreicht werden.

Aufgrund der in den Modellberechnungen antizipierten beschränkten elektrischen Reichweite der Batteriefahrzeuge tritt langfristig eine Sättigung ein und der Marktanteil stagniert.

Konservativere Annahmen hinsichtlich der Technologieentwicklung zeigen, dass Traktionsbatterien auch hier einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung des Neufahrzeugmarktes haben können. Eine Veränderung der Lernkurvenparameter auf einen Startwert von 800 €/kWh, einen Endwert von 250 €/kWh und eine Lernrate von 94% und damit auf deutlich schlechtere Werte als im Ausgangsszenario, resultiert in einer gänzlich unterschiedlichen Berechnung der Zusammensetzung des Neufahrzeugmarktes (vgl. Abbildung 6.9). Hierbei variiert sowohl die Geschwindigkeit der Veränderung als auch das langfristige Antriebsstrangportfolio signifikant. So werden auch im Jahr 2030 noch konventionelle Dieselfahrzeuge neu zugelassen. Dieselhybride ohne Netzanschluss können sich darüber hinaus über den gesamten Betrachtungszeitraum im Markt behaupten, wobei sich der Anteil Diesel-basierter Fahrzeuge insgesamt deutlich erhöht.

Die schlechte Entwicklung der Batterietechnologie führt in der Simulationsrechnung darüber hinaus dazu, dass Batteriefahrzeuge ebenso wie Range-extender Fahrzeuge lediglich Nischenmärkte besetzen können, wohingegen Brennstoffzellenfahrzeuge signifikante Marktanteile gewinnen können und somit selbst den Nischenmarkt verlassen. Der berechnete Anteil der Plug-in Hybride mit geringeren elektrischen Reichweiten wächst deutlich an.

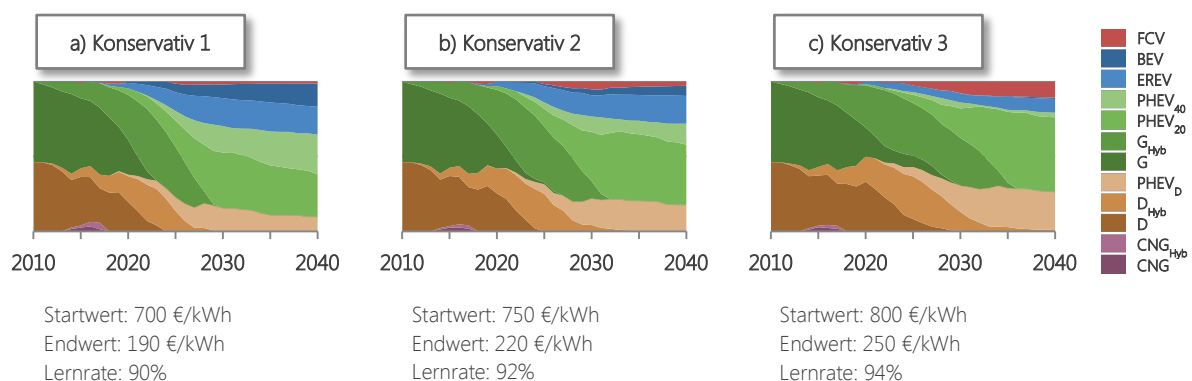


Abbildung 6.9: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in drei konservativen Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung von Traktionsbatterien.

Bemerkenswert an den konservativen Batterieszenarien ist, dass bereits weniger restriktive Annahmen als dies im dritten Szenario der Fall ist, zu ähnlichen Tendenzen und Marktveränderungen führen. So können in den Simulationen bereits bei einer Lernrate von 92% und floor-costs von 220 €/kWh im zweiten Szenario, Batteriefahrzeuge erst langfristig signifikante Marktanteile gewinnen, wohingegen auch hier Brennstoffzellenfahrzeuge den Status des Nischenmarktes verlassen.

Die Sensitivitätsberechnungen hinsichtlich der Entwicklungen von Traktionsbatterien zeigen, dass die rasche Kostendegression von Batterien essentiell für die Elektrifizierung des deutschen Neufahrzeugmarktes ist. Zwar kann eine positive Technologieentwicklung nur leichte Veränderungen

gegenüber dem Ausgangsszenario hervorrufen, eine konservative Entwicklung kann allerdings zu signifikant niedrigeren Marktanteilen elektrifizierter Fahrzeugkonzepte führen.

6.2.1.2 Elektromaschinen

Neben Traktionsbatterien benötigt jeder elektrifizierte Antriebsstrang mindestens eine Elektromaschine. Daher ist die technologische Entwicklung dieser Baugruppe für die Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen ebenso interessant. Wie bereits zuvor werden zur Abschätzung von Unsicherheiten Sensitivitätsszenarien definiert, welche sowohl eine progressive als auch eine konservative technische Entwicklung von Elektromaschinen beinhalten. Hierbei wird nur die Entwicklung der Maschinen selbst, nicht jedoch die Kostenentwicklung von Neodym berücksichtigt. Diese Analyse wird separat in Abschnitt 6.1.2.3 durchgeführt.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden vier konservative sowie zwei progressive Szenarien berechnet. Da die technische Entwicklung von Elektromaschinen im Allgemeinen deutlich weiter vorangeschritten ist als die Entwicklung von Traktionsbatterien, repräsentiert die Bandbreite der definierten Szenarien eine geringere Variation als im Fall der Traktionsbatterien (vgl. auch Kapitel 4.2). Der Vergleich des konservativsten sowie des progressivsten Sensitivitätsszenarios mit dem Ausgangsszenario zeigt, dass die extrem positive bzw. negative Entwicklung von Elektromaschinen dennoch deutlich unterschiedliche berechnete Marktanteile zur Folge hat (vgl. Abbildung 6.10).

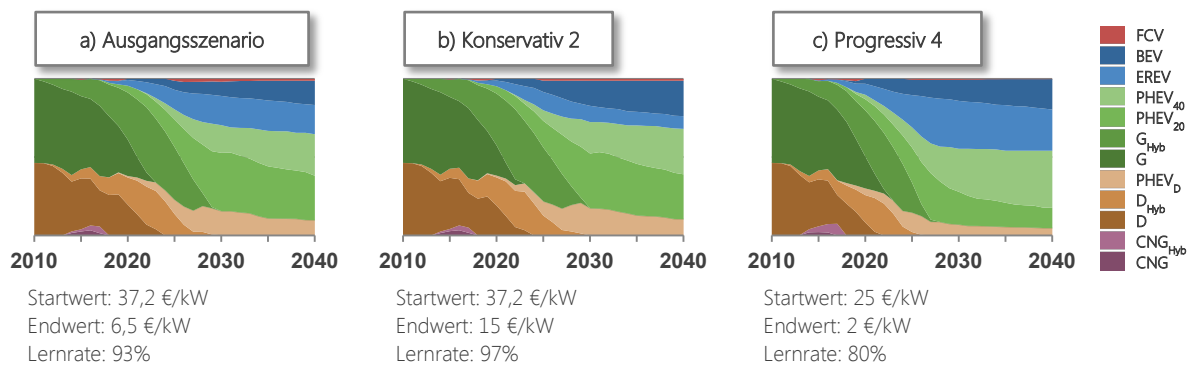


Abbildung 6.10: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a)) und im konservativsten (b)) sowie im progressivsten (c)) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung von Elektromaschinen.

Die konservative Entwicklung von Elektromaschinen bedingt in der Simulationsrechnung eine langsamere Umschichtung des Marktes, in der langfristigen Berechnung bis zum Jahr 2040 behaupten allerdings insbesondere die parallelen Hybrid-Antriebsstränge nahezu identische Marktanteile wie im Ausgangsszenario. Bemerkenswert an dieser Sensitivitätsrechnung ist, dass Batteriefahrzeuge (BEV) gegenüber seriellen Hybridfahrzeugen (EREV) Marktanteile gewinnen können, was in dem zusätzlich verbauten Generator des EREV und damit in höheren Kosten begründet liegt.

Die Simulationsrechnung des progressivsten Szenarios führt zu einer stärkeren Durchdringung von Antriebssträngen mit einem höheren Hybridisierungsgrad und damit leistungsstärkeren Elektromaschinen. Die extremen Annahmen eines Startwerts von 25 €/kW sowie eines Endwerts von 2 €/kW bei einer Lernrate von 80% können inhaltlich als Technologiesprung interpretiert werden und liegen aus heutiger Sicht deutlich über realistischen Annahmen.

Bemerkenswert ist hinsichtlich dieser berechneten Marktentwicklung, dass Brennstoffzellenfahrzeuge von dem positiven Trend der elektrifizierten Antriebsstränge nicht profitieren können und langfristig sogar aus dem Markt verdrängt werden. Dies liegt an der Tatsache, dass die übrigen elektrifizierten Antriebsstränge durch die stark sinkenden Kosten für Elektromotoren in der Simulation rasch günstiger werden und somit Brennstoffzellenfahrzeuge im relativen Vergleich in der Entscheidung der Kunden als zu teuer angesehen werden. Auch hier gilt also, wie bereits im Fall der Traktionsbatterien, für diese Antriebsvariante, dass sich eine konservative technologische Entwicklung positiv auf den Marktanteil auswirkt.

6.2.1.3 Brennstoffzellensysteme

Die beiden vorangegangenen Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass die berechnete Entwicklung des Marktanteils von Brennstoffzellenfahrzeugen signifikant von der technologischen Entwicklung der elektrifizierten Antriebsstrangkomponenten beeinflusst wird. Um die Auswirkung einer alternativen Entwicklung des Brennstoffzellensystems selbst ermitteln zu können, wurden hinsichtlich der Entwicklung dieser Baugruppe vier progressive sowie zwei konservative Sensitivitätsszenarien definiert und berechnet.

Die Simulationen zeigen, dass selbst sehr positive Annahmen hinsichtlich der Entwicklung der Brennstoffzellenkosten nicht zu einer signifikanten Durchdringung von Brennstoffzellenfahrzeugen im deutschen Neufahrzeugmarkt führen, d. h., dass auch im positivsten Sensitivitätsszenario Brennstoffzellenfahrzeuge die Rolle des Nischenmarktes nicht verlassen können (vgl. Abbildung 6.11).

Die getroffenen Annahmen sind dabei aus heutiger Sicht außerhalb des realistischen Bereichs (vgl. auch Kapitel 2.4.3). Der Verlauf der simulierten Marktentwicklung liegt darin begründet, dass der geringe Anteil an verkauften Brennstoffzellenfahrzeugen auch bis zum Jahr 2040 nicht dazu führt, dass die Produktionskosten des Brennstoffzellensystems auf ein wettbewerbsfähiges Niveau sinken. Hierbei werden Rohstoffkosteneffekte, wie bereits im Fall der Elektromaschinen, nur im Rahmen der im Ausgangsszenario getroffenen Annahmen berücksichtigt. Eine explizite Analyse der Rohstoffkosteneinflüsse erfolgt in Abschnitt 6.2.3.

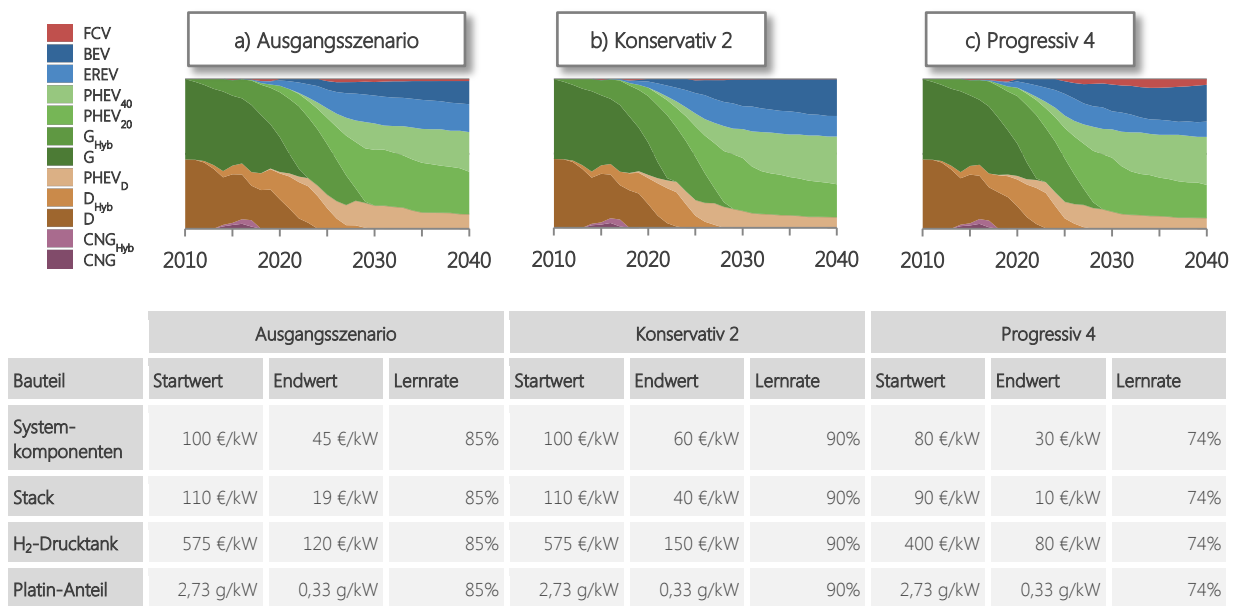


Abbildung 6.11: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a) und im konservativsten (b) sowie im progressivsten (c) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung von Brennstoffzellensystemen.

Bemerkenswert an der berechneten Marktentwicklung des konservativsten Sensitivitätsszenarios ist, dass auch die deutlich verlangsamte Entwicklung der Kostendegression von Brennstoffzellensystemen nicht dazu führt, dass Brennstoffzellenfahrzeuge vollständig aus dem Markt verdrängt werden. Zwar sinkt der Marktanteil im Jahr 2040 auf ein nahezu nicht mehr wahrnehmbares Niveau, ein Nischenmarkt für hohe jährliche Fahrleistungen und innovative Käufergruppen ist jedoch in allen drei Größensegmenten vorhanden.

6.2.1.4 Gegenüberstellung

Die Analyse der technischen Sensitivitäten hat gezeigt, dass die technische Entwicklung von Traktionsbatterien und Elektromaschinen einen signifikanten Einfluss auf die berechnete Zusammensetzung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes haben kann. Insbesondere die Entwicklung von Traktionsbatterien ist hierbei hervorzuheben (vgl. Tabelle 6.5). Eine Verlangsamung der Kostendegression im Vergleich zum Ausgangsszenario hat im konservativsten Sensitivitätsszenario deutlich gemacht, dass ein zukünftiger Markterfolg von Fahrzeugen mit einem hohen Elektrifizierungsgrad signifikant von der Entwicklung der Energiespeicher abhängt und im Fall von Batteriefahrzeugen sogar gänzlich unterbunden werden kann.

Elektromaschinen haben in den Simulationsrechnungen einen ähnlichen Effekt auf die Zusammensetzung des Marktes, wenngleich die mit der technischen Entwicklung verbundene Unsicherheit aufgrund des niedrigeren Kostenniveaus geringer ausfällt.

Tabelle 6.5: Übersicht des Einflusses der technischen Randbedingungen auf das Marktpotential von elektrifizierten Antriebssträngen.

	Einfluss auf Marktpotential von EVs			Bemerkung
	Gesamt	Kurzfristig	Langfristig	
Traktionsbatterien	●	◐	●	Kritischer Einflussfaktor; kann elektr. Fahrzeugkonzepte begünstigen, aber auch aus Markt verdrängen
Elektromaschinen	◐	◐	◐	Kritischer Einfluss, allerdings aufgrund des geringeren Kostenlevels geringerer Einfluss als Traktionsbatterien
Brennstoffzellen	○	○	○	Progressive Entwicklung kann für FCV zu höheren Marktanteilen führen

○ *Kein Einfluss* ● *Sehr großer Einfluss*

Abschließend lässt sich festhalten, dass die technische Entwicklung der Antriebsstrangkomponenten und damit letztlich die Kostendegression dieser Baugruppen entscheidenden Einfluss auf das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte hat. Im Hinblick auf die Auslegung der Fahrzeugkonzepte lässt sich schlussfolgern, dass Plug-in Hybride unter allen betrachteten Sensitivitäten die stabilsten Entwicklungspfade verzeichnen, wobei in der Regel Parallel-Hybride auf Benzinbasis die größten Marktanteile besitzen. Dieselfahrzeuge können sich langfristig nur in konservativen Batterieszenarien am Markt behaupten. Darüber hinaus ist zu beobachten, dass die Marktentwicklung von BEVs und FCVs in besonderem Maße von der Entwicklung der Traktionsbatterien bzw. der Brennstoffzellensysteme verbunden und folglich mit großen Unsicherheiten behaftet ist, wobei Brennstoffzellenfahrzeuge auch bei deutlich fallenden Kosten der Brennstoffzellensysteme die Rolle des Nischenmarktes nicht verlassen können.

Aufgrund der deutlich variierenden Marktzusammensetzungen lassen sich zum Teil stark abweichende Kosten- und CO₂-Auswirkungen beobachten. So lässt sich am Beispiel der Traktionsbatterien im progressivsten Szenario eine Reduktion der gesamten CO₂-Emissionen (well-to-wheel, WTW) bis zum Jahr 2040 von 27,45 Mio. t CO₂/a im Ausgangsszenario auf 24,70 Mio. t CO₂/a beobachten, wohingegen das konservativste Sensitivitätsszenario aufgrund des geringeren Elektrifizierungsgrades der Fahrzeugflotte mit höheren Emissionen von 36,45 Mio. t CO₂/a verbunden ist.

6.2.2 Berechnung der Sensitivitäten der politischen Randbedingungen

Im Folgenden werden zu CO₂-Grenzwerten und -Abgaben, zu Fahrstrom- und Mineralölsteuer sowie zu Subventionen für Neufahrzeuge Sensitivitätsszenarien definiert und analog des vorangegangenen Abschnitts mit Hilfe des VECTOR21-Modells berechnet.

6.2.2.1 CO₂-Grenzwerte und -Abgabenzahlungen

Die EU-weite Regulierung des CO₂-Ausstoßes von Neufahrzeugen entspricht im Ausgangsszenario der aktuellen, bis zum Jahr 2020 bekannten Gesetzgebung von 95 g CO₂/km und wird im Anschluss daran bis zum Jahr 2040 auf 80 g CO₂/km gesenkt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Hierbei wird die Abgabenzahlung pro Gramm Differenz ebenfalls gemäß der aktuellen Gesetzgebung bei 95 € konstant gehalten. Wie zuvor erläutert, wird die EU-weite Vorgabe auf Basis historischer Flottendaten auf die deutsche Fahrzeugflotte auf Basis der durchschnittlichen Masse der Fahrzeuge angepasst [21].

CO₂-Grenzwerte

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt werden auch hinsichtlich der CO₂-Grenzwerte sowohl konservative als auch progressive Alternativszenarien definiert. Die berechneten Sensitivitätsszenarien zeigen, dass die Regulierung der CO₂-Emissionen einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung des deutschen Neufahrzeugmarktes hat (vgl. Abbildung 6.12).

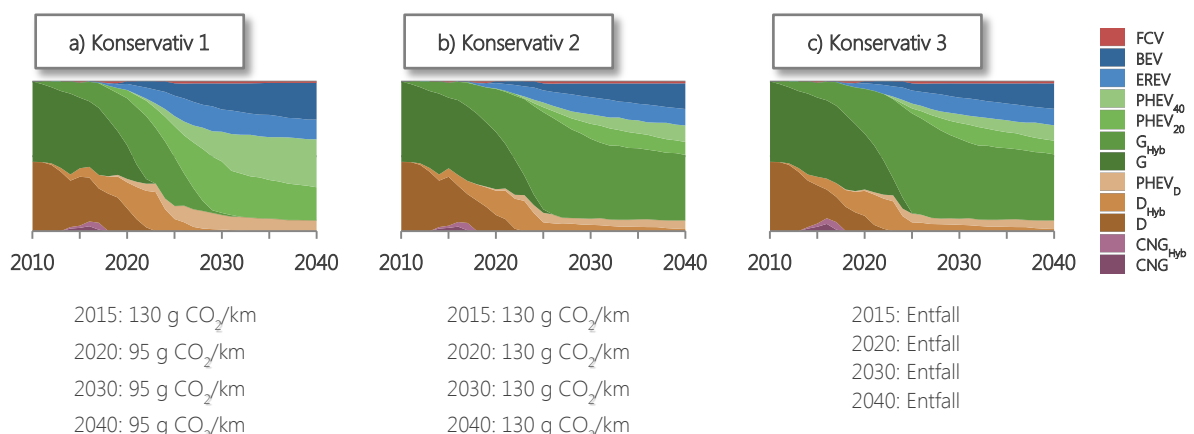


Abbildung 6.12: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in den drei konservativen Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung von CO₂-Grenzwerten für Neufahrzeuge.

Der konstante Verlauf des Grenzwertes ab dem Jahr 2020 beim Wert von 95 g CO₂/km im ersten konservativen Szenario zeigt dabei nur marginale Auswirkungen auf die berechnete Zusammensetzung des Neufahrzeugmarktes. Dahingegen resultiert in der zweiten konservativen Sensitivitätsrechnung ein Wert von 130 g CO₂/km im Zeitraum von 2015 bis 2040 darin, dass hybride Fahrzeugantriebe ohne Netzanschluss sich bis einschließlich des Jahres 2040 mit einem signifikanten Marktanteil im Markt behaupten können. Diese abweichende Marktentwicklung führt dazu, dass im Jahr 2020 eine signifikant geringere Anzahl an Elektrofahrzeugen in der Fahrzeugflotte existiert. Das Ziel der NPE von einer Million Fahrzeugen wird in der Berechnung mit nur 446.000 Elektrofahrzeugen deutlich unterschritten. Aufgrund der in der Sensitivitätsrechnung mittelfristig einsetzenden Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen mit Netzanschluss kann das Ziel der NPE im Jahr 2030 mit 7,9 Millionen Fahrzeugen dennoch erreicht und sogar übertroffen

werden. Bis zum Jahr 2040 steigt der berechnete Anteil der Elektrofahrzeuge an der Gesamtflotte auf 47%, d. h. über die Hälfte der deutschen Fahrzeuge hat auch im Jahr 2040 keinen Netzananschluss.

Überlässt man den Markt im dritten konservativen Sensitivitätsszenario sich selbst und antizipiert keine Regulierung hinsichtlich des zulässigen CO₂-Ausstoßes, werden nahezu identische Ergebnisse zum zweiten konservativen Szenario berechnet, wobei das Ziel der NPE in 2020 mit nur 430.000 Elektrofahrzeugen noch deutlicher verfehlt wird. Die nahezu identische Marktentwicklung lässt die Schlussfolgerung zu, dass übrige Randbedingungen wie beispielsweise der steigende Ölpreis und die sinkenden Technologiekosten in Kombination mit der im Modell antizipierten höheren Zahlungsbereitschaft umweltbewusster Kunden dazu führen, dass elektrifizierte Fahrzeugkonzepte auch ohne zusätzliche Strafsteuern für den Nutzer aus Kostensicht vorteilhaft sind.

Die Berechnungsergebnisse der progressiven Sensitivitätsszenarien bestätigen die Schlussfolgerung, dass CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung des zukünftigen Neufahrzeugmarktes haben (vgl. Abbildung 6.13). Für alle sechs berechneten Szenarien wurde die geltende Gesetzgebung von 95 g CO₂/km im Jahr 2020 konstant gehalten. Für den Zeitraum von 2020 bis 2040 wurden jedoch systematische Veränderungen des Grenzwertes vorgenommen und der Zielwert im progressivsten Szenario bis zum Jahr 2040 bis auf 20 g CO₂/km abgesenkt. Vor dem Hintergrund aktueller politischer Diskussionen, erscheint dieses Ziel keinesfalls unrealistisch, sondern liegt vielmehr am unteren Rand des zukünftig Denkbaren. So wird der ehemalige Bundesumweltminister Röttgen mit einem möglichen Grenzwert im Jahr 2040 von 10 bis 35 g CO₂/km zitiert [219]. Die Unternehmensberatung McKinsey geht darüber hinaus in einem Extremszenario von Emissionszielen von unter 10 g CO₂/km aus [221].

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bereits kleine Veränderungen an den CO₂-Grenzwerten zumindest langfristig Veränderungen in der Zusammensetzung des Neufahrzeugmarktes hervorrufen. Sind im Fall der Reduzierung des Zielwertes auf 70 g CO₂/km im Jahr 2040 noch moderate Veränderungen zu beobachten, so erhöht sich der Anteil der PHEV₄₀ ab 60 g CO₂/km deutlich. Ein Grenzwert von 50 g CO₂/km im Jahr 2040 führt bereits dazu, dass keine benzinbasierten PHEV₂₀ mehr im Markt vertreten sind.

Hinsichtlich der vollelektrischen Fahrzeuge ist festzustellen, dass die Verschärfung der CO₂-Gesetzgebung in den Simulationen zunächst keine signifikanten Auswirkungen auf die berechneten Marktanteile hat. Bei zunehmender Verschärfung der CO₂-Gesetzgebung setzen die simulierten Kostendegressionen der elektrifizierten Komponenten jedoch früher ein und bedingen letztlich im langfristigen Verlauf einen deutlich höheren Marktanteil von vollelektrischen Fahrzeugen. Von den Kostensenkungen können Batteriefahrzeuge im langfristigen Ausblick am deutlichsten profitieren.

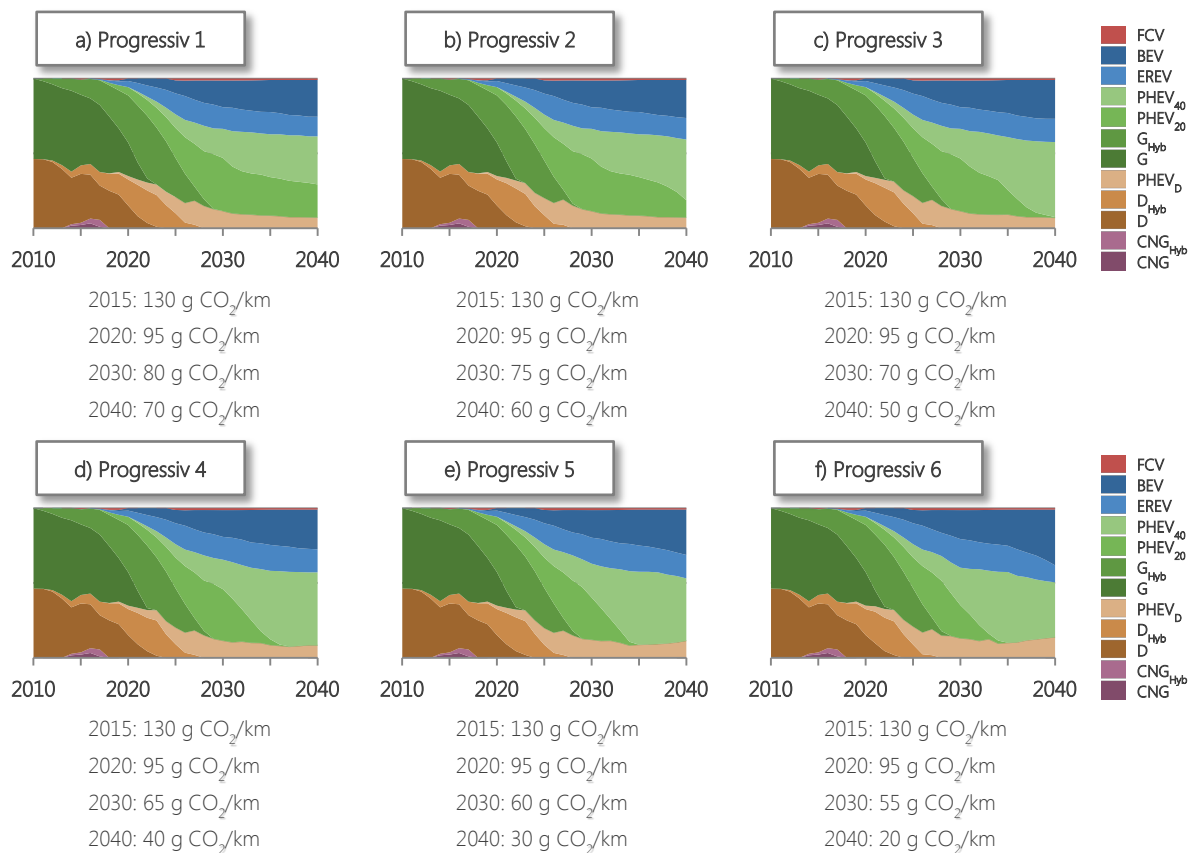


Abbildung 6.13: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in den sechs progressiven Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung von CO₂-Grenzwerten für Neufahrzeuge.

Die berechnete Kostenentwicklung aus Nutzersicht zeigt, dass die gesamten TCO im konservativsten Szenario im Vergleich zum Ausgangsszenario marginal sinken (vgl. Abbildung 6.14). Während sie im Ausgangsszenario bis zum Jahr 2040 um 4,5% steigen, verläuft dieser Anstieg im „Konservativ 3“-Szenario moderater und beträgt 2,8%. Die Tatsache, dass überhaupt ein Anstieg vorliegt, ist mit steigenden Energiekosten und insbesondere mit dem steigenden Rohölpreis zu erklären. Wie die Simulationsergebnisse hinsichtlich der Segmentierung des Marktes zeigen, kommt es auch in diesem Szenario trotz des Verzichts auf eine Regulierung des CO₂-Ausstoßes aufgrund des Kostenvorteils zu einem Eintritt von elektrifizierten Antriebssträngen in den Fahrzeugmarkt, worin die Verschiebung des Anteils von fixen zu variablen Kosten begründet liegt.

Bemerkenswert an den Ergebnissen des progressivsten Sensitivitätsszenarios ist, dass trotz der signifikanten Verschärfung der CO₂-Gesetzgebung und der damit verbundenen Umschichtung der Marktzusammensetzung, die Kosten aus Nutzersicht nur moderat um 9,4% steigen. Im Vergleich zum Ausgangsszenario wird also eine Kostensteigerung aus Nutzersicht von 6,4% berechnet. Hierbei egalisieren sich die gegenläufigen Effekte von deutlich steigenden fixen Kosten und gleichzeitig signifikant abnehmenden variablen Kosten. So sinken die variablen Kosten auf unter 74% ihres Ausgangswertes.

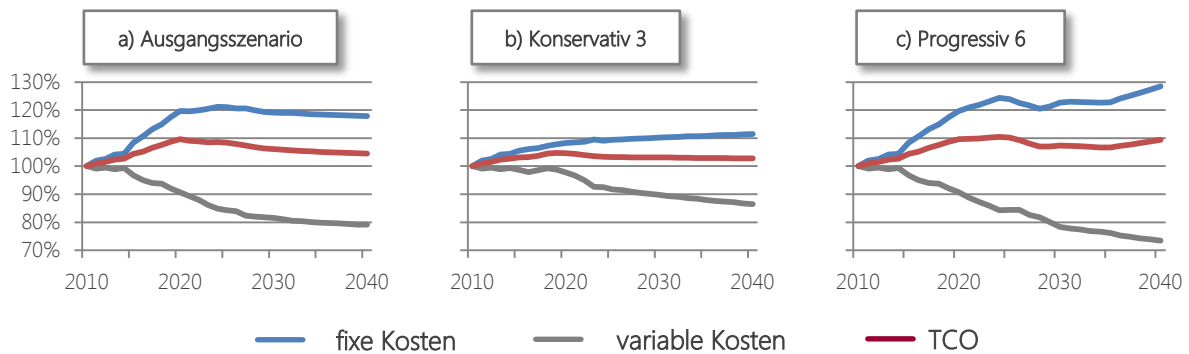


Abbildung 6.14: Vergleich der Kostenentwicklung aus Nutzersicht im Ausgangsszenario und im konservativsten sowie im progressivsten Sensitivitätsszenario zur Entwicklung von CO₂-Grenzwerten für Neufahrzeuge.

Die Simulation der Marktentwicklung unter variierenden CO₂-Zielwerten zeigt also, dass die Regulierung dieses Grenzwertes zwar einen signifikanten Einfluss auf den Grad der Elektrifizierung des deutschen Neufahrzeugmarktes hat, die berechneten Kosten aus Nutzersicht durch eine Verschärfung der Gesetzgebung allerdings im Zeitverlauf auch steigen. Diese Beobachtung erlaubt die Schlussfolgerung, dass die Festlegung zukünftiger Grenzwerte für Neufahrzeuge komplexe Auswirkungen hat und folglich die Handlungsoptionen detailliert zu bewerten sind. In diesem Zusammenhang sollte darüber hinaus geprüft werden, ob die Festlegung der CO₂-Grenzwerte auch weiterhin auf Basis der vom Fahrzeug selbst verursachten Emissionen erfolgen sollte, oder ob nicht vielmehr die Einbeziehung der Vorketten der Kraftstoffe bzw. Energieträger zielführend ist.

CO₂-Abgabenzahlungen

Unter dem Begriff der CO₂-Abgabenzahlungen werden jene Pönale zusammengefasst, welche pro Gramm Differenz des Ausstoßes eines Neufahrzeugs und des zulässigen Grenzwertes erhoben werden. Das Ausgangsszenario antizipiert dabei einen konstanten Wert von 95 € pro Gramm im Zeitraum von 2015 bis 2040.

Die Berechnung der Sensitivitätsszenarien zeigt, dass weder eine Erhöhung noch eine Verringerung dieser Abgaben signifikanten Einfluss auf die Zusammensetzung des Marktes haben (vgl. Abbildung 6.15). Eine Senkung der Abgabe auf 50 € pro g CO₂/km führt dabei ebenso wenig zu signifikanten Veränderungen wie eine Erhöhung der Pönale auf 300 € bis zum Jahr 2040. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte zwar von der Einführung einer Abgabenzahlung positiv beeinflusst wird, sich jedoch nahezu invariant gegenüber der absoluten Höhe dieser Zahlung verhält. Diese Erkenntnis bedeutet, dass es aus einer TCO-Sicht, die dem Modell als Entscheidungsgrundlage dient, vorteilhafter ist, Abgabenzahlungen ungleich welcher Höhe in jedem Fall zu vermeiden und stattdessen die vorgeschriebenen CO₂-Grenzwerte einzuhalten.

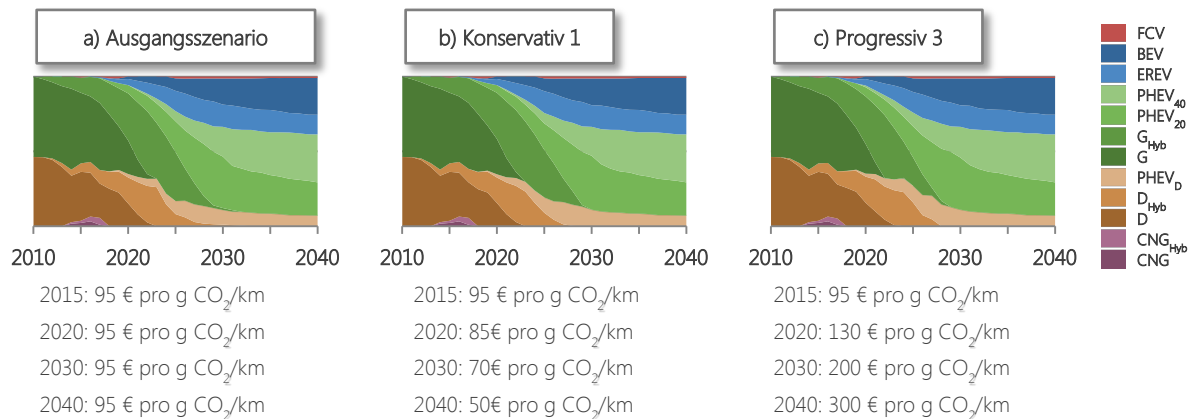


Abbildung 6.15: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a) und im konservativsten (b) sowie im progressivsten (c) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung von CO₂-Abgaben.

6.2.2.2 Energiesteuern

Zu den Energiesteuern, welche im Rahmen der Sensitivitätsrechnungen bewertet werden sollen, zählen sowohl steuerliche Abgaben für konventionelle Kraftstoffe, die sogenannte Mineralölsteuer, sowie die zukünftig möglicherweise erhobene Abgaben für Elektrizität, welche zur Traktion im Straßenverkehr verwendet wird, die sogenannte Fahrstromsteuer. Da beide Steuersätze auf die variablen Kosten elektrifizierter Fahrzeugkonzepte Einfluss haben, ist eine Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung der damit verbundenen Unsicherheiten essentiell.

Mineralölsteuer

Die Berechnung der Zusammensetzung des deutschen Neufahrzeugmarktes zeigt, dass weder eine Erhöhung der steuerlichen Abgaben für Diesel und Benzin um 50% bis zum Jahr 2040, noch eine Reduktion um 20% signifikante Auswirkungen hat. Die Variation des CNG-Steuersatzes unterscheidet sich in den Sensitivitätsszenarien dahingehend, dass die Erhöhung in zwei Schritten vollzogen wird (vgl. Abbildung 6.16). So wird zunächst in Übereinstimmung mit der aktuellen Gesetzgebung der ermäßigte Steuersatz für gasförmige Kraftstoffe auf den vollen Steuersatz in 2018 angehoben. Anschließend wird auch hier die steuerliche Abgabe um 50% im Vergleich zum Referenzwert des Ausgangsszenarios im Jahr 2040 angehoben. Im konservativen Sensitivitätsszenario wird der Steuersatz hingegen nicht sprunghaft im Jahr 2018 angehoben. Die Anpassung erfolgt vielmehr stetig über den Zeitraum von 2018 bis 2040.

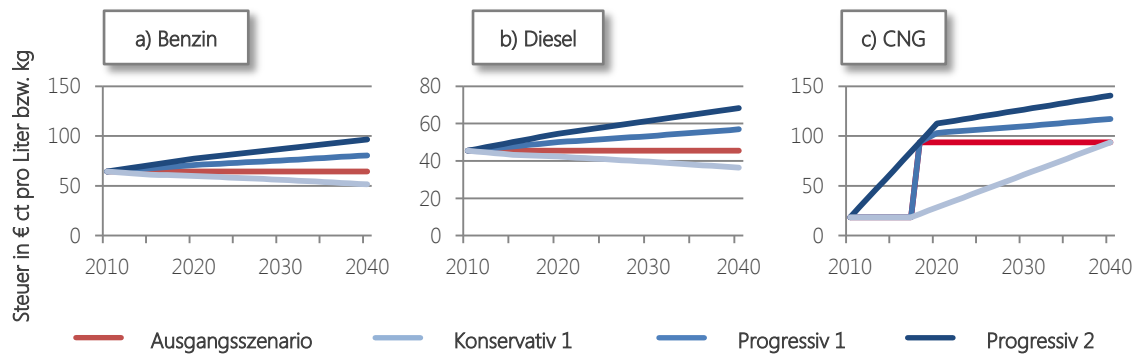


Abbildung 6.16: Entwicklung der Mineralölsteuer in den Sensitivitätsszenarien für Benzin (a)), Diesel (b)) und CNG (c)).

Die größte Auswirkung aufgrund der Variation des Mineralölsteuersatzes lässt sich hinsichtlich Batteriefahrzeugen beobachten (vgl. Abbildung 6.17). Da sie zusammen mit Brennstoffzellenfahrzeugen die einzigen Fahrzeugkonzepte darstellen, die von einer Änderung der Mineralölsteuer nicht betroffen sind, können sie in der Simulationsrechnung von einer Erhöhung des Steuersatzes am deutlichsten profitieren bzw. verlieren durch die Verringerung die größten Marktanteile, wobei Brennstoffzellenfahrzeuge auch durch die Variation der Mineralölsteuer ihren Nischenmarkt nicht verlassen können. So wird für Batteriefahrzeuge im Jahr 2040 ausgehend von 24,6% Marktanteil im Ausgangsszenario ein auf 21,7% abgesenkter Marktanteil im konservativen Szenario berechnet. Die Steigerung der Mineralölsteuer in der progressivsten Szenariorechnung führt hingegen zu einer Erhöhung des Marktanteils batterieelektrischer Fahrzeuge im Jahr 2040 auf 30,0%.

Im Hinblick auf die Ziele der NPE lassen sich in der berechneten Zusammensetzung der gesamten deutschen Fahrzeugflotte und insbesondere in der Anzahl der Elektrofahrzeuge in den Jahren 2020 und 2030 keine signifikanten Unterschiede beobachten. Die Invarianz der Marktsegmentierung gegenüber der Veränderung der Mineralölsteuer liegt darin begründet, dass das relative Kostenverhältnis konventioneller und hybridisierter Antriebsstränge in den Berechnungen nahezu unberührt bleibt und lediglich absolut höher bzw. niedriger ausfällt.

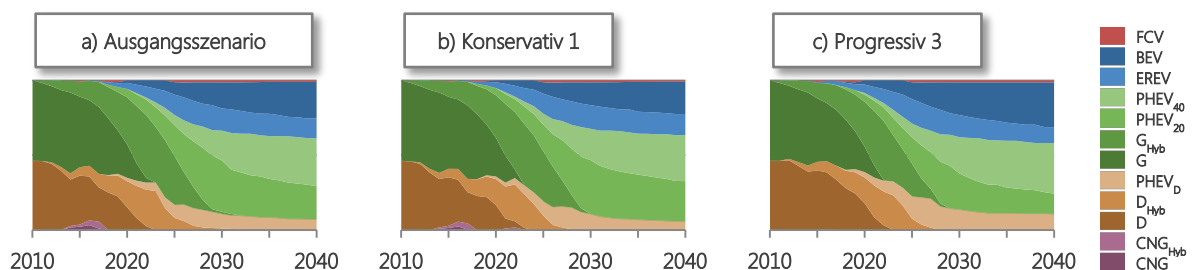


Abbildung 6.17: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a)) und im konservativen (b)) sowie im progressivsten (c)) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung der Mineralölsteuer.

Letztlich zeigt sich, dass eine Veränderung der Mineralölsteuer in den Sensitivitätsberechnungen zwar zu einer Veränderung der Gesamtkosten aus Nutzersicht und damit verbunden auch zu einer Veränderung der staatlichen Steuereinnahmen führt, die Marktzusammensetzung jedoch nahezu invariant auf eine Anpassung des Steuersatzes reagiert. Die Möglichkeit der gezielten Beeinflussung des Marktpotentials elektrifizierter Fahrzeugkonzepte durch die Variation des Mineralölsteuersatzes scheidet somit folglich aus.

Fahrstromsteuer

Analog zur Betrachtung der Mineralölsteuer stellt sich die Frage, inwiefern die Einführung einer Fahrstromsteuer das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte abschwächt. In der aktuellen politischen Diskussion wird die Einführung einer solchen steuerlichen Abgabe als mögliches Mittel angesehen, potentiell geringere Steuereinnahmen aus der Mineralölsteuer aufgrund des höheren Anteils elektrisch angetriebener Fahrzeuge zu kompensieren und gleichzeitig die Nutzung von erneuerbaren Energiequellen zu forcieren [229].

Da derzeit keine Fahrstromsteuer erhoben wird, betrachten die Sensitivitätsszenarien den Fall der Einführung einer solchen Abgabe. Hierzu werden drei Szenarien definiert, wobei das erste Szenario eine über den gesamten Betrachtungszeitraum konstante Abgabe von 5 € ct/kWh antizipiert. Im zweiten und dritten Sensitivitätsszenario wird ein Steuersatz von 10 € ct/kWh ebenfalls im Basisjahr eingeführt, anschließend jedoch bis zum Jahr 2040 auf 20 bzw. 40 € ct/kWh angehoben. An dieser Stelle ist zu betonen, dass sich die eingeführte Fahrstromsteuer im Sinne der ceteris-paribus-Betrachtung ausschließlich auf die elektrische Energie bezieht und zur Traktion genutzten Wasserstoff nicht berücksichtigt.

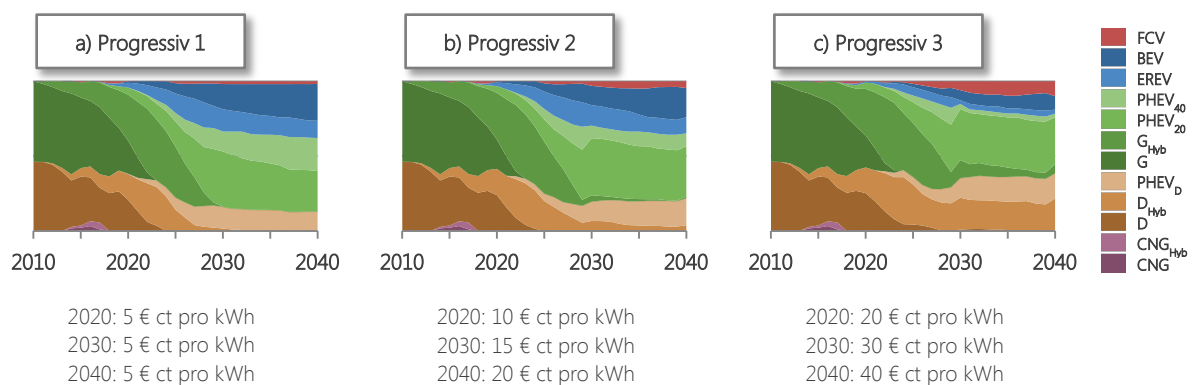


Abbildung 6.18: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in drei progressiven Sensitivitätsszenarien zur Einführung einer Fahrstromsteuer.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Erhebung einer Fahrstromsteuer signifikanten Einfluss auf die Zusammensetzung des deutschen Neufahrzeugmarktes hat (vgl. Abbildung 6.18). Hierbei resultiert die Einführung der 5-Cent-Steuer in einem deutlich größeren Marktanteil von Plug-in Hybriden mit einer rein elektrischen Reichweite von 20 km, also den PHEV₂₀ sowie den PHEV_D.

Diese Berechnungsergebnisse liegen darin begründet, dass aufgrund der Absenkung der CO₂-Grenzwerte auf 80 g CO₂/km bis zum Jahr 2040 zwar nur noch Fahrzeuge mit Netzanschluss im Markt zu finden sind, der geringere Hybridisierungsgrad der PHEV₂₀ und PHEV_D allerdings bereits ausreicht, um diesen Grenzwert zu unterschreiten.

Die Erhöhung der Fahrstromsteuer auf bis zu 40 € ct/kWh im Jahr 2040 führt zu mehreren signifikanten Veränderungen der Marktzusammensetzung. Zum einen verstetigt sich der Anteil von Dieselfahrzeugen und liegt im Jahr 2040 bei einem Prozentsatz von 39% im Vergleich zu 7% im Ausgangsszenario im Jahr 2040 bzw. 46% im Jahr 2010. Zum anderen können sich in diesem Sensitivitätsszenario auch bis zum Jahr 2040 noch Antriebsstränge im Markt behaupten, die keinen Netzanschluss besitzen. Dies gilt sowohl für Diesel- als auch für Benzinfahrzeuge. Konventionelle Triebstränge ohne jeglichen Elektrifizierungsgrad werden allerdings auch in dieser Simulationsrechnung aus dem Markt verdrängt. Darüber hinaus sinkt der Anteil vollelektrischer Fahrzeugkonzepte deutlich, wobei Brennstoffzellenfahrzeuge deutlich höhere Marktanteile gewinnen können. Range-extender Fahrzeuge sowie PHEV₄₀ können hingegen lediglich Nischenmärkte einnehmen.

Die Einführung der Fahrstromsteuer hat darüber hinaus deutliche Kostensteigerungen für die Nutzer zur Folge (vgl. Abbildung 6.19). Zwar wird in der Modellrechnung aufgrund der weiterhin bestehenden CO₂-Gesetzgebung der Kauf von elektrifizierten Fahrzeugkonzepten bewirkt, die hiermit verbundenen Kostenvorteile in der Nutzung der Fahrzeuge durch geringere Energiekosten werden jedoch durch die Steuer relativiert. Dieser Effekt führt letztlich zu signifikant steigenden TCO aus Nutzersicht. So werden die TCO bis zum Jahr 2040 um 12,8% höher als im Vergleich zum Basisjahr bzw. um 7,9% höher als im Vergleich zum Ausgangsszenario berechnet.

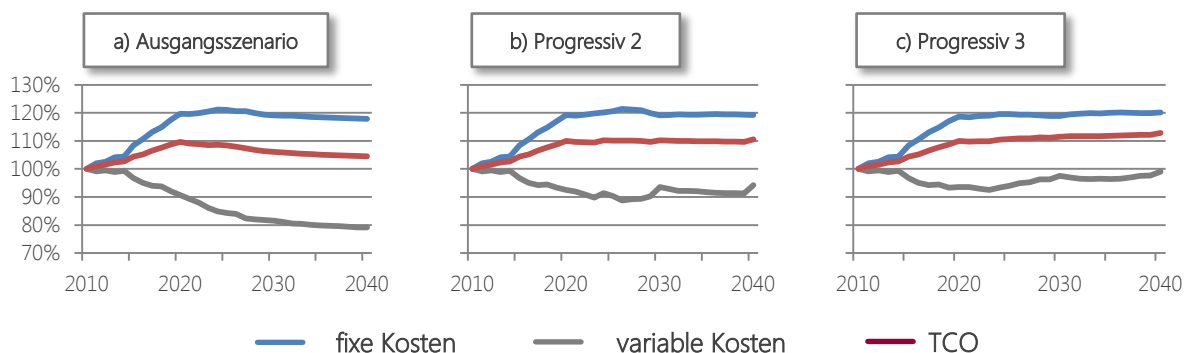


Abbildung 6.19: Vergleich der Kostenentwicklung aus Nutzersicht im Ausgangsszenario und in den beiden progressivsten Sensitivitätsszenarien zur Einführung einer Fahrstromsteuer.

Darüber hinaus zeigt sich, dass das Ziel der NPE, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge in der deutschen Fahrzeugflotte zu erreichen, durch die Einführung der Fahrstromsteuer in den Simulationen deutlich erschwert wird (vgl. Abbildung 6.20). So werden bereits bei Einführung der 5-Cent-Steuer lediglich 520.000 Elektrofahrzeuge in der Fahrzeugflotte berechnet. Im Fall des progressivsten Szenarios sinkt diese Zahl sogar noch deutlicher auf 332.000 Fahrzeuge.

Die Berechnungsergebnisse der Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Einführung einer Fahrstromsteuer zeigen, dass dieses politische Mittel einen signifikanten Einfluss auf die zukünftige Entwicklung und das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte hat. Darüber hinaus wird die Erreichung der nationalen Bestandsziele im Jahr 2020 deutlich erschwert. Folglich sind die Einführung und die damit verbundenen Konsequenzen detailliert zu bewerten und vor dem Hintergrund einer Kosten-Nutzen- bzw. Einnahmen-Ausgaben-Analyse zu beurteilen.

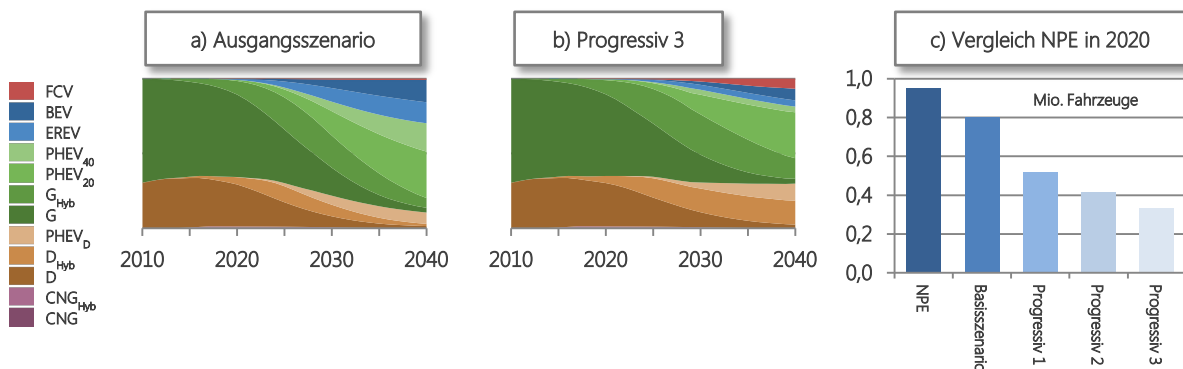


Abbildung 6.20: Bestandsentwicklung im Ausgangsszenario (a)) und im progressivsten Sensitivitätsszenario zur Einführung einer Fahrstromsteuer (b)); Vergleich des deutschen PKW-Fahrzeugbestands mit den nationalen Zielen im Jahr 2020 (c).

Quelle NPE: [2].

6.2.2.3 Subventionen

Einen weiteren politischen Parameter, welcher im Rahmen der Modellrechnungen berücksichtigt wird, stellen staatliche Subventionen in Form von Einmalzahlungen beim Neufahrzeugkauf dar. Obwohl die Bundesregierung diese monetären Anreize bisher ablehnt [1], werden im Folgenden mögliche Auswirkungen mit Hilfe von Sensitivitätsszenarien beurteilt.

Um zwischen unterschiedlichen Ausprägungen der Einmalzahlungen differenzieren zu können, wurden drei Sensitivitätsszenarien definiert (vgl. Tabelle 6.6). In den Szenarien werden im Sinne der NPE-Definition Elektrofahrzeuge mit Netzanschluss berücksichtigt. Um die Auswirkung von Subventionszahlungen auf Brennstoffzellenfahrzeuge ebenfalls bestimmen zu können, werden diese Fahrzeuge darüber hinaus in die Berechnung einbezogen. Für alle Antriebsstränge und in allen Sensitivitätsszenarien wird davon ausgegangen, dass die Subventionen für Neufahrzeuge in den ersten fünf Jahren nach Markteinführung gezahlt werden und danach erlöschen.

Tabelle 6.6: Definition der staatlichen Subventionszahlungen pro Neufahrzeug in den Sensitivitätsszenarien.

<i>pro Fahrzeug</i>	HEV	PHEV ₂₀	PHEV ₄₀	PHEV _D	EREV	BEV	FCV
Ausgangsszenario	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Progressiv 1	0 €	2.500 €	2.500 €	2.500 €	2.500 €	2.500 €	2.500 €
Progressiv 2	0 €	3.000 €	3.000 €	3.000 €	3.000 €	5.000 €	5.000 €
Progressiv 3	0 €	5.000 €	5.000 €	5.000 €	5.000 €	10.000 €	10.000 €

Einmalige Zahlungen in den ersten fünf Jahren nach Markteinführung pro Fahrzeug.

Die Berechnungsergebnisse der drei Sensitivitätsszenarien zeigen, dass die Zahlung von Subventionen in allen drei Simulationen zwar kurzfristige Veränderungen im Fahrzeugmarkt hervorruft, die langfristige Entwicklung jedoch nahezu unbeeinflusst verläuft (vgl. Abbildung 6.21). So führen die Einmalzahlungen zwar zu einem signifikant höheren Anteil an Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020, der langfristige Marktanteil elektrifizierter Fahrzeugkonzepte bleibt hingegen nahezu unverändert. Vor diesem Hintergrund können Subventionen als kurzfristige Maßnahmen interpretiert werden, die keine nachhaltige Wirkung auf den Markt und dessen Entwicklung haben.

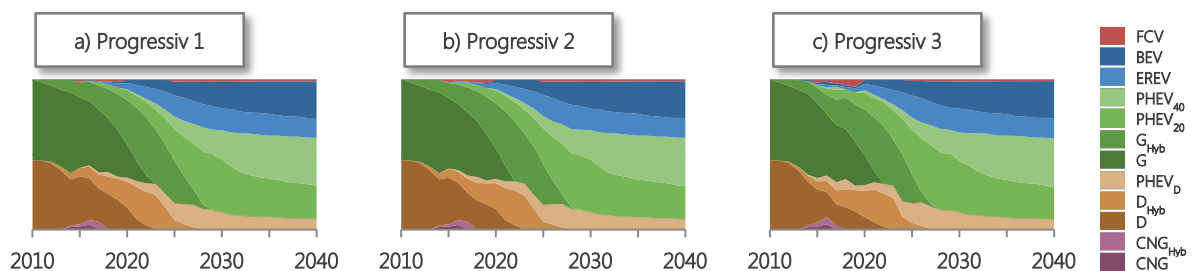


Abbildung 6.21: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in den drei Sensitivitätsszenarien zur Zahlung von staatlichen Subventionen für Neufahrzeuge.

Der Vergleich des Flottenbestands an Elektrofahrzeugen in den drei Sensitivitätsszenarien mit den Bestandszielen der NPE zeigt, dass diese Ziele durch die Subventionszahlungen bereits im ersten Sensitivitätsszenario übertroffen werden können (vgl. Abbildung 6.22). Durch die konstante Zahlung von 2.500 € für neu verkaufte Elektrofahrzeuge wird im Jahr 2020 bereits ein Flottenbestand in Höhe von 1,2 Millionen Elektrofahrzeugen errechnet. Die gesamten staatlichen Ausgaben summieren sich in diesem ersten Sensitivitätsszenario auf 1,1 Milliarden Euro. Diese Summe entspricht der im Rahmen des Konjunkturpakets II im Jahr 2009 gezahlten Umweltprämie für Altfahrzeuge [230].

Die Zahlung von 5.000 € für vollelektrische Fahrzeuge (BEV und FCV) sowie 3.000 € für Plug-in Hybride resultiert in einem berechneten Flottenbestand von 1,5 Millionen Elektrofahrzeugen im Jahr 2020. Die gesamten staatlichen Ausgaben belaufen sich hierbei auf 2,4 Milliarden Euro. Obwohl sich die Ausgaben also mehr als verdoppeln, kann nur eine Erhöhung des Flottenbestands an

Elektrofahrzeugen von 400.000 Fahrzeugen erzielt werden. Diese Beobachtung erlaubt die Schlussfolgerung, dass die Beeinflussung des Flottenbestands im Jahr 2020 und damit die mögliche Einflussnahme auf das Erreichen der nationalen Bestandsziele nicht linear mit der absoluten Höhe der Subventionszahlungen verbunden sind. Die Erhöhung der Subventionszahlungen auf 10.000 € pro vollelektrischem Fahrzeug und 5.000 € für Hybridfahrzeuge mit Netzanschluss bestätigt diese Beobachtung. Zwar steigt der berechnete Bestand an Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 auf 2,7 Millionen Fahrzeuge, die staatlichen Ausgaben erhöhen sich allerdings gleichzeitig auf 11,9 Milliarden Euro. Subventionszahlungen in dieser Höhe sind also im Sinne der Erreichung der NPE-Ziele als zu hoch einzustufen und führen letztlich zu signifikant steigenden staatlichen Ausgaben.

Abschließend lässt sich festhalten, dass staatliche Einmalzahlungen für Elektrofahrzeuge kurzfristig zu Veränderungen am Markt führen und dazu beitragen können, die nationalen Bestandsziele zu erreichen, diese Einflussnahme auf den Markt allerdings nahezu keine Auswirkungen auf die langfristige Marktentwicklung hat.

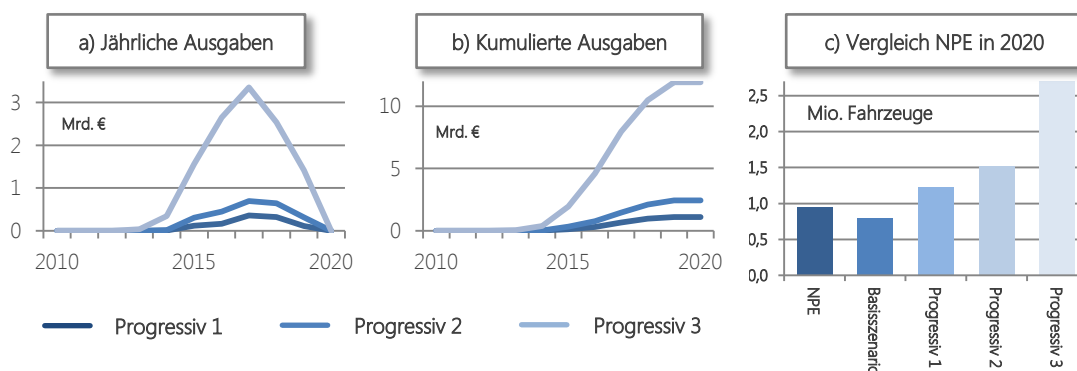


Abbildung 6.22: Vergleich der jährlichen (a)) und der kumulierten (b)) staatlichen Ausgaben sowie der Entwicklung des Flottenbestands mit den nationalen Zielen in den drei progressiven Sensitivitätsszenarien zur Zahlung von staatlichen Subventionen für Neufahrzeuge (c)).

Quelle NPE: [2].

6.2.2.4 Gegenüberstellung

Die Gegenüberstellung der politischen Stellhebel und deren Einfluss auf die Marktentwicklung zeigt, dass die Parameter unterschiedlich stark auf die Marktentwicklung einwirken (vgl. Tabelle 6.7).

So haben in den Modellrechnungen die regulierenden Maßnahmen der CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge und die potentielle Einführung einer Fahrstromsteuer signifikante Auswirkung insbesondere auf die langfristige Marktentwicklung. Konträr dazu haben die absolute Höhe der CO₂-Strafzahlungen sowie die Veränderung der Mineralölsteuer nahezu keinen Einfluss auf die Marktentwicklung. In diesem Zusammenhang nehmen Subventionen für Neufahrzeuge zwar kurzfristig im Zeithorizont bis zum Jahr 2020 einen signifikanten Einfluss auf die Marktentwicklung,

haben jedoch langfristig nahezu keine Auswirkung. Aus politischer Sicht lässt sich schlussfolgern, dass vor dem Hintergrund der beabsichtigten Ziele aus einem Portfolio von Maßnahmen ausgewählt werden kann, wenngleich die Maßnahmen unterschiedliche zeitliche Wirkungen entfalten.

Tabelle 6.7: Übersicht des Einflusses der politischen Randbedingungen auf das Marktpotential von elektrifizierten Antriebssträngen.

	Einfluss auf Marktpotential von EVs			Bemerkung
	Gesamt	Kurzfristig	Langfristig	
CO ₂ -Grenzwert				Kritischer Einflussfaktor, insbesondere langfristig Allerdings sind TCO stark korreliert
Höhe der CO ₂ -Abgabe				Die <u>Höhe</u> der Abgabe hat nahezu keinen Einfluss
Mineralölsteuer				Kaum Einfluss, da bis auf BEV & FCV alle Antriebe betroffen; i.S.v. Elektromobilität kaum Steuermöglichkeit
Fahrstromsteuer				Signifikanter negativer Einfluss, insbesondere für EVs Einsatz des Mittels ist sorgfältig zu prüfen
Subventionen				Lediglich im kurzfristigen Zeithorizont Auswirkungen Zur Erreichung der Flottenbestandsziele geeignet

Kein Einfluss

Sehr großer Einfluss

6.2.3 Berechnung der Sensitivitäten der ökonomischen Randbedingungen

Neben technischen und politischen Randbedingungen haben ökonomische Randbedingungen einen Einfluss auf das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte. Hierzu zählen sowohl die Entwicklung von Rohstoffkosten als auch die Kosten sowie die Verfügbarkeit von Energieträgern. Analog zur vorangegangenen Analyse werden im Folgenden auch hinsichtlich der ökonomischen Randbedingungen Sensitivitätsszenarien berechnet.

6.2.3.1 Rohstoffkosten

Im Rahmen der folgenden Sensitivitätsanalyse sollen vier Rohmaterialien, welche zur Herstellung elektrifizierter Antriebsstrangkomponenten benötigt werden, untersucht werden. Die Analyse stützt sich dabei im Wesentlichen auf die Ergebnisse der Technikbewertung in Kapitel 4.

Grafitpreis

Da der Preis von Grafit in der Vergangenheit starken Preisschwankungen unterlag, werden neben zwei konservativen Szenarien drei progressive Szenarien definiert. Hierbei antizipiert das konservativste Szenario einen von 3 \$/kg im Jahr 2010 auf 1 \$/kg in 2040 fallenden Grafitpreis. Dahingegen wird in einem Extremszenario ermittelt, welche Auswirkung eine Preissteigerung auf 100 \$/kg bis zum Jahr 2040 auf den deutschen Neufahrzeugmarkt hat (Progressiv 3).

Die Berechnungsergebnisse des konservativsten Szenarios zeigen, trotz des um zwei Drittel fallenden Grafitpreises, nahezu keine Auswirkungen auf die Entwicklung des deutschen Neufahrzeugmarktes (vgl. Abbildung 6.23). Die Simulation des Extremszenarios, welche aus heutiger Sicht einen außerhalb des Denkbaren liegenden Grafitpreis von 100 \$/kg im Jahr 2040 antizipiert, resultiert hingegen in einer Veränderung der langfristigen Marktentwicklung. Insbesondere Batteriefahrzeuge, aber auch PHEV₄₀ verlieren in dieser Szenariorechnung zu Gunsten von seriellen Hybriden sowie PHEV₂₀ und PHEV_D Marktanteile. Brennstoffzellenfahrzeuge können nur marginal von den teureren Produktionskosten von Traktionsbatterien profitieren.

Die Analyse dieses progressivsten Szenarios zeigt, dass selbst eine extreme und aus heutiger Sicht unrealistische Entwicklung des Grafitpreises keine signifikanten Marktveränderungen zur Folge hat. Diese Beobachtung erlaubt die Schlussfolgerung, dass das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte nur marginal von steigenden Grafitpreisen vermindert wird und folglich hinsichtlich dieses ökonomischen Parameters nur eine geringe Unsicherheit besteht.

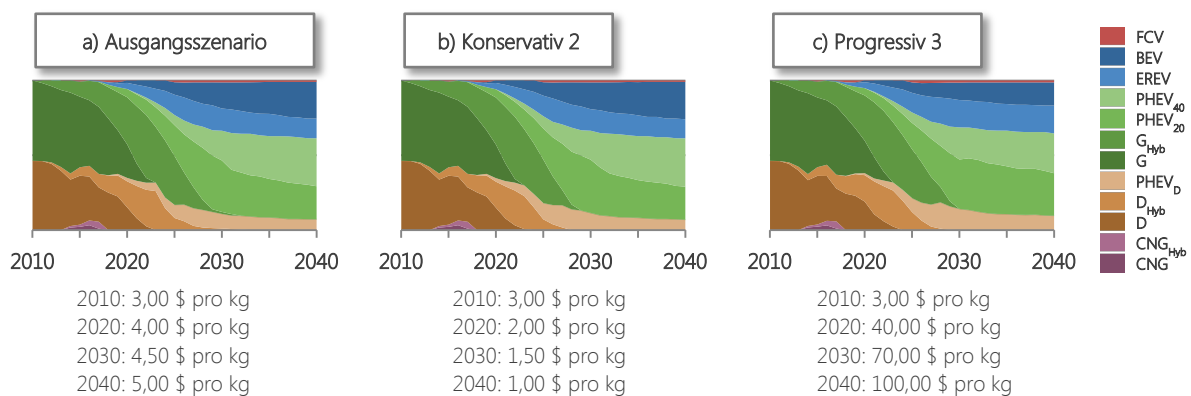


Abbildung 6.23: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a) und im konservativsten (b) sowie im progressivsten (c) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Grafitpreises.

Umrechnungskurs: 1,30 \$/€.

Lithiumpreis

Im Hinblick auf den Einfluss des Lithiumpreises auf das Marktpotential von Elektrofahrzeugen wurden fünf Sensitivitätsszenarien definiert. Die Simulationsrechnungen zeigen, dass weder die Verringerung des Preises von 6,61 \$/kg im Ausgangsjahr auf 2 \$/kg im Jahr 2040, noch die Erhöhung auf einen extremen und aus heutiger Sicht unrealistischen Wert von 100 \$/kg im Jahr 2040 signifikante Auswirkungen auf die Segmentierung des deutschen Neufahrzeugmarktes hat (vgl. Abbildung 6.24).

Dieses Ergebnis bestätigt die Beobachtung aus Kapitel 4, dass von der Verfügbarkeit von Lithium aufgrund der Verteilung der weltweiten Vorkommen in politisch instabilen Regionen und Ländern ein größeres Risiko ausgeht, als von der eigentlichen Höhe des Preises des Materials selbst. Vor dem Hintergrund des Extremszenarios lässt sich darüber hinaus schlussfolgern, dass selbst eine

deutliche Verknappung des Rohstoffs und ein damit verbundener extremer Preisanstieg zu einer kaum messbaren Veränderung des Marktpotentials elektrifizierter Fahrzeugkonzepte führt, wenn- gleich die Kosten von Traktionsbatterien und damit letztlich auch die Kosten elektrifizierter Fahr- zeuge steigen.

Die trotz der deutlichen Variation des Lithiumpreises geringe Veränderung der berechneten Marktzusammensetzung liegt zum einen darin begründet, dass, wie anhand des neu entwickelten Berechnungsmodells in Kapitel 4.1 gezeigt werden konnte, der Lithium-Kostenanteil an der Trakti- onsbatterie gering ist und somit eine Preissteigerung des Rohstoffs nur zu einer geringeren Ände- rung der Kosten der Traktionsbatterie führt (vgl. auch Tabelle 4.12). Zum anderen lässt sich die geringe Veränderung der Marktzusammensetzung durch die Tatsache erklären, dass alle elektrifi- zierten Fahrzeugkonzepte eine Traktionsbatterie nutzen. Je nach verbauter Batteriegröße steigen somit die Kosten für alle elektrifizierten Fahrzeuge, wodurch sich letztlich die Konkurrenzsituation auf dem Neufahrzeugmarkt nur bedingt ändert bzw. verschiebt.

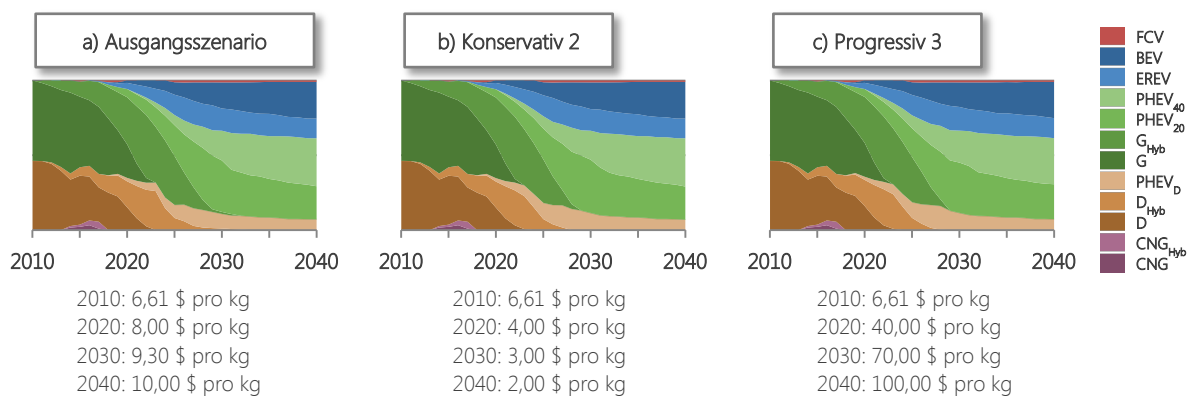


Abbildung 6.24: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a) und im konservativsten (b) sowie im progressivsten (c) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Lithiumpreises.

Umrechnungskurs: 1,30 \$/€.

Neodympreis

Wie in Kapitel 4 gezeigt, kann eine Preissteigerung des für die Herstellung von Permanentmagne- ten benötigten Selten-Erd-Metalls Neodym zu signifikanten Preissteigerungen von permanenter- regten Elektromaschinen führen. Um die Auswirkung eines volatilen Neodympreises auf die Zu- sammensetzung des Neufahrzeugmarktes zu untersuchen, wurden ausgehend vom Ausgangssze- nario sowohl drei konservative als auch drei progressive Sensitivitätsszenarien bestimmt. Darüber hinaus wurde ein Alternativszenario definiert, welches gänzlich ohne den Einfluss von Neodym berechnet wurde und somit anstelle permanenterregter Synchronmaschinen eine andere, magnet- freie Bauweise der Elektromaschinen betrachtet.

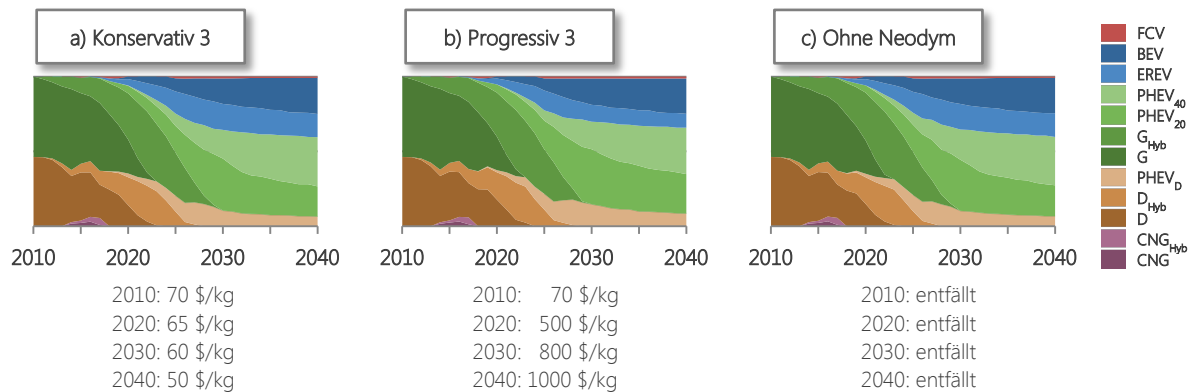


Abbildung 6.25: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im konservativsten (a)) und im progressivsten (b)) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Neodympreises; Sensitivitätsszenario gänzlich ohne Neodymeinfluss (c)).

Umrechnungskurs: 1,30 \$/€.

Die Auswertung der berechneten Zusammensetzung des Neufahrzeugmarktes zeigt, dass weder die konservativen Annahmen, noch der Wechsel zu einer anderen Motorbauart signifikante Veränderungen in der Marktzusammensetzung zur Folge haben (vgl. Abbildung 6.25). Darüber hinaus ist lediglich im progressivsten Szenario ein marginaler Rückgang des Marktanteils von Batteriefahrzeugen zu beobachten. Die Tatsache, dass der variierende Neodympreis nahezu keine Auswirkungen auf die simulierte Entwicklung der deutschen Neufahrzeugflotte hat, liegt darin begründet, dass sich die Kostensteigerung bzw. -reduktion auf alle elektrifizierten Antriebsstrangkonfigurationen auswirkt und somit das relative Kostenverhältnis der Fahrzeuge nahezu konstant bleibt.

Der Neodympreis hat jedoch Auswirkungen auf die berechneten Kosten von Elektromaschinen und damit letztlich auch auf die Anschaffungskosten der Fahrzeuge. So fallen die Produktionskosten der Elektromaschinen im konservativsten Szenario auf 17,4 €/kW im Jahr 2040, wohingegen die Kosten im progressivsten Szenario nach einer anfänglichen Kostendegression langfristig wieder auf 30,1 €/kW ansteigen (vgl. Abbildung 6.26). Dieser im Vergleich zu den in Kapitel 4.2 ermittelten Analyseergebnissen nur moderate Anstieg wird durch die Annahme sinkender Neodymanteile im Permanentmagneten begründet. Die Kostensteigerung der Produktionskosten wirkt sich durch steigende Fahrzeugpreise auch auf die Gesamtkosten aus Nutzersicht aus. Hier beträgt die Differenz des durchschnittlichen Neufahrzeugpreises im Jahr 2040 zwischen dem progressivsten und dem konservativsten Szenario 1.308 €.

Die Analysen lassen schlussfolgern, dass ein volatiler Neodympreis zwar signifikante Auswirkungen auf die Kostenstruktur von permanenterregten Elektromaschinen hat, sich diese Änderungen jedoch nur in geringem Maße auf die Zusammensetzung des Neufahrzeugmarktes auswirken. Allerdings werden in letzter Konsequenz die Gesamtkosten aus Nutzersicht beeinflusst, wenngleich die Auswirkungen auch hier nur moderat ausfallen.

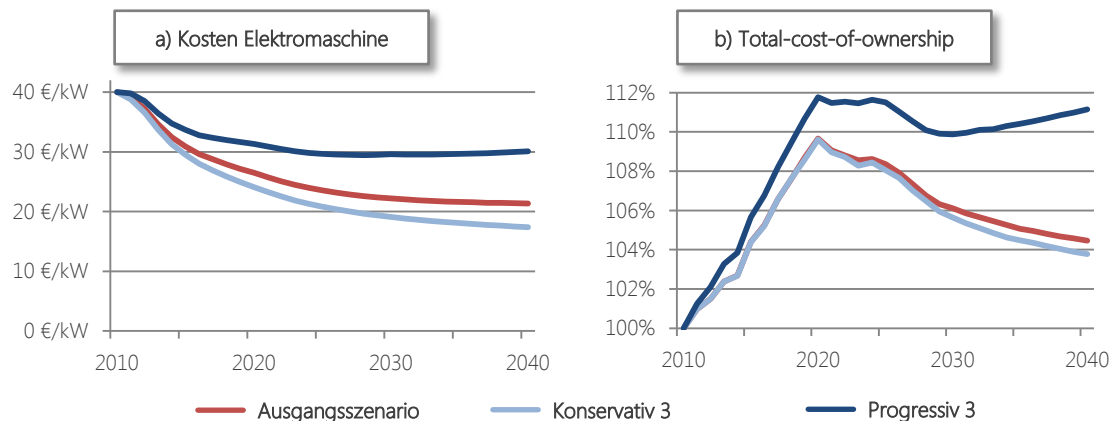


Abbildung 6.26: Kosten der Elektromaschine (a) und total-cost-of-ownership (b) im Ausgangsszenario sowie im konservativsten und im progressivsten Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Neodympreises.

Platinpreis

Die Volatilität des Platinpreises ist lediglich für das Marktpotential von Brennstoffzellenfahrzeugen von Bedeutung, hier jedoch in signifikantem Maße. Die Variation des Preises ausgehend vom Ausgangsszenario in einem konservativen sowie drei progressiven Szenarien zeigt, dass die kumulierte Anzahl neu verkaufter Brennstoffzellenfahrzeuge signifikant von der Entwicklung des Platinpreises beeinflusst wird (vgl. Abbildung 6.27). Hierbei können Brennstoffzellenfahrzeuge in den Simulationsrechnungen allerdings auch im konservativen Szenario selbst bei einem fallenden Platinpreis die Rolle des Nischenmarktes nicht verlassen. So wird bis zum Jahr 2040 lediglich ein Absatzpotential von 671.000 Brennstoffzellenfahrzeugen im deutschen Markt berechnet.

Dennoch lässt sich aus der Analyse der progressiven Sensitivitätsszenarien schlussfolgern, dass das Marktpotential von Brennstoffzellenfahrzeugen durch einen Preisanstieg von Platin deutlich abgeschwächt wird. Während im Ausgangsszenario bis zum Jahr 2040 611.000 Fahrzeuge in Deutschland zugelassen werden, sinkt diese Anzahl im progressivsten Szenario bei einem von 1.011 \$/oz.tr. im Ausgangsjahr auf 2.200 \$/oz.tr. steigenden Platinpreis auf lediglich 297.000 Fahrzeuge.

Der im Vergleich zu den weiteren betrachteten Rohstoffen Grafit, Lithium und Neodym hohe Einfluss des Rohstoffpreises von Platin lässt sich zum einen dadurch erklären, dass Platin ein deutlich höheres absolutes Preisniveau besitzt und letztlich einen höheren Anteil an den Kosten des Brennstoffzellenstacks verursacht, als dies beispielsweise ausgehend von Lithium für Traktionsbatterien der Fall ist. So werden durch die Katalysator-Aufbringung 47% der Kosten des Brennstoffzellenstacks verursacht (vgl. Abbildung 2.14), während sich im Fall der beispielhaften Batteriekonfiguration des Batteriekostenmodells die Kosten für Lithium auf 71 € Cent pro kWh bei Gesamtbatteriekosten von 180 €/kWh belaufen (vgl. Tabelle 4.12).

Zum anderen hat die Variation des Platinpreises nur auf die Kosten von Brennstoffzellenfahrzeugen Einfluss und lässt die Kosten der weiteren elektrifizierten Fahrzeuge unberührt. Hierdurch wird die Konkurrenzsituation auf dem Neufahrzeugmarkt maßgeblich beeinflusst, was letztlich zu einer deutlicheren Variation des Marktpotentials von Brennstoffzellenfahrzeugen führt.

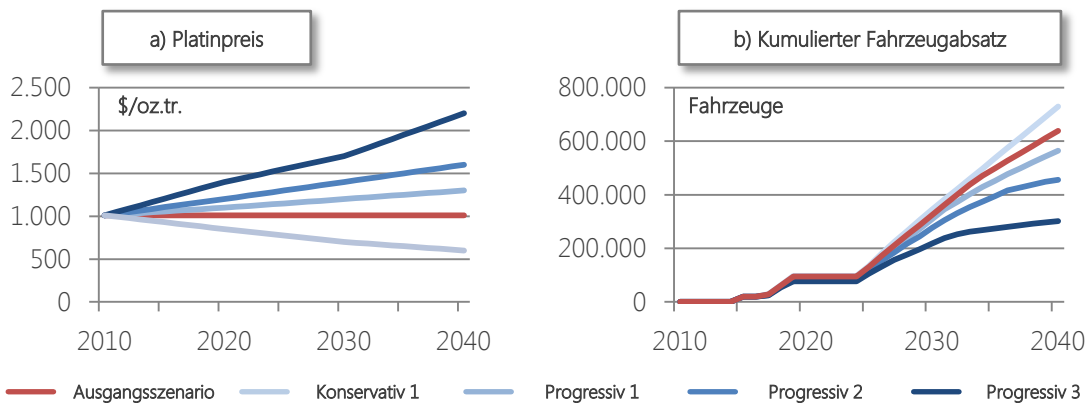


Abbildung 6.27: Entwicklung des Platinpreises pro Feinunze (a) sowie des kumulierten Brennstoffzellenfahrzeugabsatzes in den Sensitivitätsszenarien zum Platinpreis (b).

6.2.3.2 Energiekosten

Neben den Kosten für Rohmaterialien, welche zur Herstellung der elektrifizierten Triebstrangkomponenten benötigt werden, bilden Kosten für Energieträger sowie die Infrastrukturverfügbarkeit einen wesentlichen Einflussparameter für das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte.

Ölpreis

Die Entwicklung des Ölpreises hat aufgrund der hiermit verbundenen Beeinflussung der Kosten für flüssige und gasförmige Kraftstoffe Auswirkung auf die Nutzungskosten aller konventionellen und hybriden Antriebsstränge. Lediglich die Energiekosten der beiden vollelektrischen Triebstränge der Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge bleiben von einer Veränderung des Ölpreises unberührt.

Um auch die mit der Entwicklung des Ölpreises verbundene Unsicherheit für das Marktpotential von Elektrofahrzeugen bewerten zu können, wurden analog zum bisherigen Vorgehen drei progressive sowie drei konservative Ölpreisszenarien definiert. Hierbei reicht die Bandbreite der antizipierten Ölpreisentwicklungen von einem konstanten Verlauf auf dem Niveau des Ausgangsjahrs von 80 \$/bbl bis hin zu einem signifikanten Anstieg bis zum Jahr 2040 auf 400 \$/bbl. Da alle verfügbaren Quellen aufgrund der Verknappung von Rohöl zukünftig von einem ansteigenden Preis ausgehen, wird in keinem Szenario ein fallender Ölpreis antizipiert (vgl. z. B. [231] [232] [224]).

Die Berechnungsergebnisse der drei konservativen Szenarien zeigen, dass das Marktpotential von Batteriefahrzeugen, aber auch von PHEV₄₀ durch einen moderaten Anstieg bzw. konstanten Verlauf des Ölpreises deutlich reduziert wird (vgl. Abbildung 6.28). Die beiden weiteren konservativen Szenarien spiegeln dabei die Ölpreisentwicklung wider, wie sie von der Internationalen Energieagentur in den Szenarien „new policies“ und „450 scenario“ angegeben wird. Der Hauptgrund für den Verlust von Marktanteilen von Fahrzeugen mit hohem Elektrifizierungsgrad liegt in den deutlich sinkenden Betriebskosten der Fahrzeuge mit höherem verbrennungsmotorischen Fahranteil begründet.

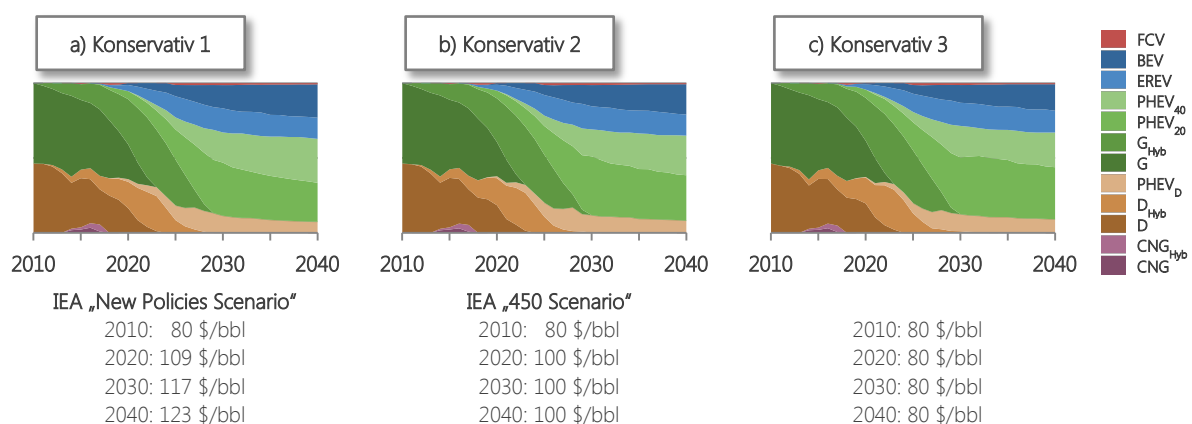


Abbildung 6.28: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in drei konservativen Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung des Rohölpreises.

Quelle: Eigene Darstellung, [224]; Umrechnungskurs: 1,30 \$/€.

Die Simulationen der drei progressiven Ölpreisszenarien bestätigen die Beobachtung, dass der Ölpreis die zukünftige Zusammensetzung des Neufahrzeugmarktes signifikant beeinflusst (vgl. Abbildung 6.29). So wird langfristig bereits bei einem Anstieg von 148 \$/bbl im Jahr im Ausgangsszenario auf 200 \$/bbl im ersten Progressiv-Szenario ein deutlich steigender Marktanteil von Fahrzeugen mit hohem Elektrifizierungsgrad berechnet. Eine Verschärfung des Ölpreisanstiegs auf 400 \$/bbl im Jahr 2040 in der Simulation des dritten Progressiv-Szenarios führt dazu, dass der Marktanteil von Fahrzeugen mit geringer elektrischer Reichweite (PHEV₂₀ und PHEV_D) von 29% im Ausgangsszenario auf 10% fällt. Von diesem deutlich steigenden Ölpreis können insbesondere die beiden vollelektrischen Triebstränge (BEV und FCV) profitieren. So steigt der Marktanteil der beiden Fahrzeugkonzepte von 25% im Ausgangsszenario auf 40%, wobei Brennstoffzellenfahrzeuge ihren Marktanteil sogar verdoppeln können.

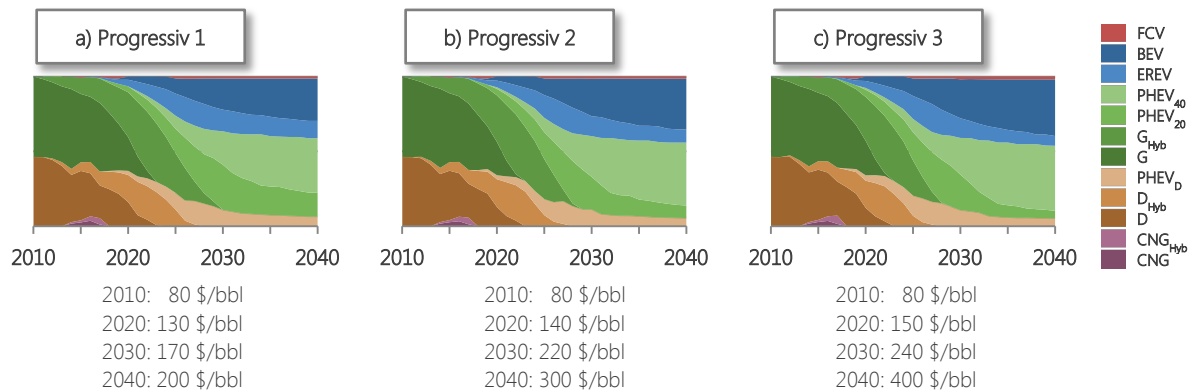


Abbildung 6.29: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten in drei progressiven Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung des Rohölpreises.

Umrechnungskurs 1,30 \$/€.

Für den Nutzer bedeuten die unterschiedlichen Rohölpreise signifikant abweichende Kostenstrukturen. Während im Ausgangsszenario die gesamten Kosten bis zum Jahr 2040 um 4,5% im Vergleich zum Ausgangsjahr steigen, fällt diese Preissteigerung im konservativsten Ölpreisszenario geringer aus und beträgt lediglich 2,1% (vgl. Abbildung 6.30). Der Hauptgrund für die trotz eines konstanten Ölpreises steigenden Gesamtkosten ist die Einführung der CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge und die damit verbundene Notwendigkeit, elektrifizierte Antriebsstränge einzusetzen. Dieser Wandel bedingt aufgrund der Effizienzsteigerung zwar sinkende Betriebs- bzw. Kraftstoffkosten, allerdings sind hiermit auch höhere Ausgaben für die Anschaffung der Fahrzeuge verbunden.

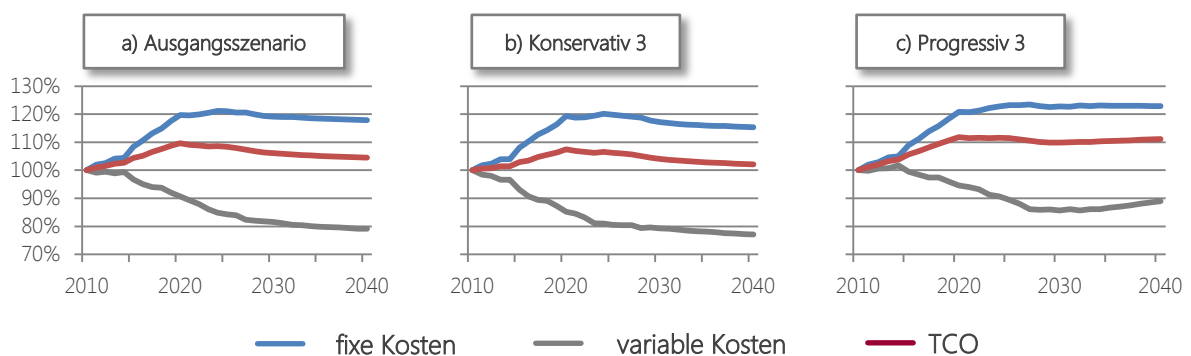


Abbildung 6.30: Entwicklung der Kosten aus Nutzersicht im Ausgangsszenario (a) sowie im konservativsten (b) und im progressivsten (c) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Rohölpreises.

Im Simulationsergebnis des progressivsten Szenarios sind diese beiden gegensätzlichen Effekte ebenfalls zu beobachten, die Effizienzsteigerung der Fahrzeuge reicht jedoch nicht aus, um die steigenden Kraftstoffkosten zu kompensieren. Insgesamt führt der steigende Ölpreis zu einer

signifikanten Steigerung der berechneten TCO um 11,1% im Vergleich zum Basisjahr bzw. zu einer um 6,3% größeren Kostensteigerung gegenüber dem Ausgangsszenario im Jahr 2040.

Vergleicht man die Entwicklung des gesamten Fahrzeugbestands in den sechs Sensitivitätsszenarien mit den Bestandszielen der NPE, so fällt auf, dass von der Ölpreisentwicklung eine hohe Unsicherheit hinsichtlich der Erreichung dieser Ziele ausgeht (vgl. Abbildung 6.31). Während in den Simulationen durch den Anstieg des Ölpreises die Ziele im Jahr 2020 erreicht bzw. sogar übertroffen werden können, führt ein moderater Anstieg bzw. ein konstanter Verlauf der Ölpreisentwicklung zu einer deutlichen Unterschreitung der Ziele. So liegt der Bestand an Elektrofahrzeugen bei einem konstanten Ölpreis von 80 \$/bbl bei lediglich 588.000 Fahrzeugen im Jahr 2020. Hieraus lässt sich ableiten, dass bei allen zur Verfügung stehenden politischen Instrumenten zur Beeinflussung der Erreichung der NPE Ziele, stets auch die Entwicklung des Ölpreises und die damit verbundene Unsicherheit in die Entscheidungsfindung einbezogen werden müssen.

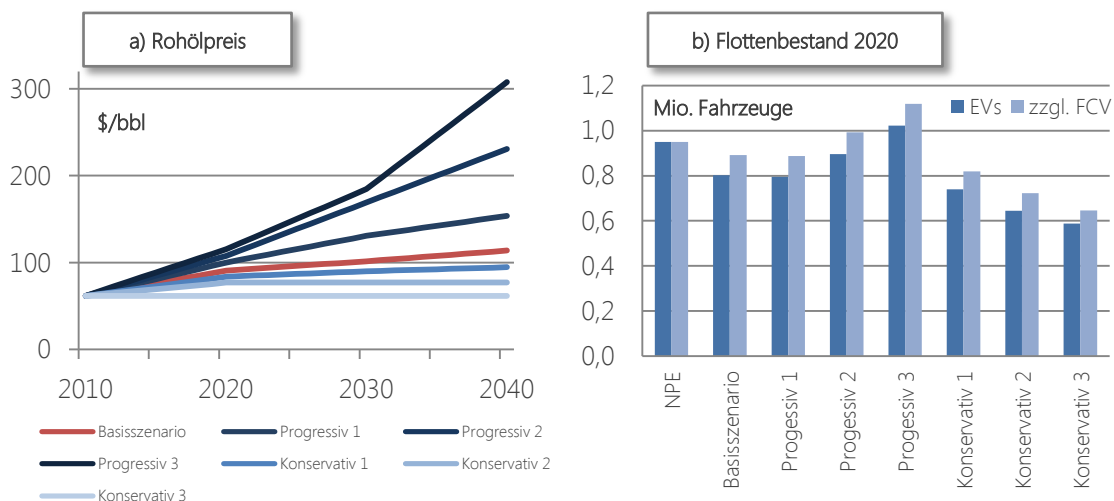


Abbildung 6.31: Entwicklung des Rohölpreises (a) sowie des Flottenbestands an Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 (b) in den Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung des Rohölpreises.

Quelle NPE: [2].

Elektrizitätspreis

Die zukünftige Entwicklung des Elektrizitätspreises hat, mit Ausnahme von Brennstoffzellenfahrzeugen, Auswirkungen auf die Nutzungskosten aller im Ausgangsszenario im langfristigen Verlauf im Markt vertretenen Fahrzeugkonzepte. Wie bereits im Fall der Einführung einer Fahrstromsteuer (vgl. Kapitel 6.1.2.2), welche im weiteren Sinne als eine Erhöhung des Elektrizitätspreises interpretiert werden kann, zeigt sich auch in den Sensitivitätsszenarien zur Entwicklung des Strompreises, dass dieser ökonomische Parameter signifikanten Einfluss auf das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte hat.

Die stetige Verringerung des Elektrizitätspreises über den gesamten Betrachtungszeitraum von 21,7 € ct/kWh auf 12 € ct/kWh zeigt in der Simulation insbesondere langfristig einen steigenden

Marktanteil von Fahrzeugen mit höherem Elektrifizierungsgrad (vgl. Abbildung 6.32). Allerdings führen auch diese, aus heutiger Sicht unrealistisch niedrigen Stromkosten, nicht zu einem signifikant abweichenden Marktverlauf mit einer langfristigen Dominanz von rein elektrischen Fahrzeugkonzepten.

Eine deutliche Steigerung des Strompreises auf 35 € ct/kWh führt im Gegensatz dazu zu einem signifikant steigenden Marktanteil der Fahrzeuge mit geringerer elektrischer Reichweite (PHEV₂₀ und PHEV_D). Durch den höheren berechneten Marktanteil dieser Fahrzeuge steigt gleichzeitig der Anteil von Dieselfahrzeugen. Der Marktanteil von reinen Batteriefahrzeugen reagiert hingegen nahezu invariant auf die deutliche Preissteigerung. Der Hauptgrund hierfür liegt in der hohen Effizienz dieses Antriebsstrangs. Hierdurch verschiebt sich das Verhältnis von variablen und fixen Kosten signifikant hin zu einem höheren Fixkostenanteil, was wiederum den Einfluss des steigenden Elektrizitätspreises auf die gesamten Kosten aus Nutzersicht abschwächt. Am deutlichsten profitieren Brennstoffzellenfahrzeuge von einer Steigerung des Elektrizitätspreises, wobei anzumerken ist, dass in den Simulationsrechnungen ein zum Ausgangsszenario unveränderter und folglich von der Strompreiserhöhung unbeeinflusster Wasserstoffpreis angenommen wurde.

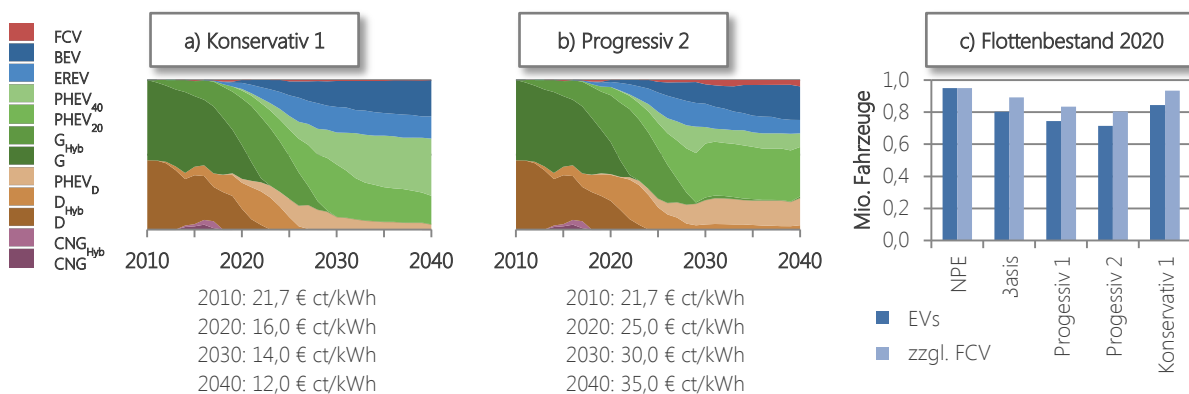


Abbildung 6.32: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im konservativen (a) sowie im progressivsten (b) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung des Elektrizitätspreises; Bestandsentwicklung an Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 (c).

Quelle NPE: [2].

Vor dem Hintergrund der von der Bundesregierung beschlossenen Energiewende und der damit verbundenen Unsicherheit hinsichtlich möglicher zukünftiger Steigerungen des Elektrizitätspreises lässt sich schlussfolgern, dass zumindest langfristig deutliche Marktveränderungen durch variierende Stromkosten hervorgerufen werden können. Kurzfristig und insbesondere im Hinblick auf die Erreichung der nationalen Bestandsziele im Jahr 2020 geht vom Einfluss des Elektrizitätspreises aufgrund der trägen Preisveränderungen nur eine geringe Unsicherheit aus.

Wasserstoffpreis

Die Entwicklung des Wasserstoffpreises hat ausschließlich auf das Marktpotential von Brennstoffzellenfahrzeugen direkten Einfluss. Dennoch ist vor dem Hintergrund aktueller politischer Diskussionen hinsichtlich des Aufbaus von Wasserstoffinfrastruktur sowie der potentiellen Nutzung von Wasserstoff als Langzeitenergiespeicher erneuerbarer Energien eine Sensitivitätsanalyse notwendig. Ausgehend von der Entwicklung des Wasserstoffpreises im Ausgangsszenario analog der prognostizierten Werte in der EU-Coalition-Studie [102], werden daher auch hier drei konservative sowie drei progressive Szenarien berechnet. Dabei wird aufgrund des noch geringen Reifegrads der Versorgungsinfrastruktur in keinem Szenario davon ausgegangen, dass der Wasserstoffpreis von seinem Wert im Ausgangsjahr von 16,6 €/kg H₂ steigen wird. In diesem Sinne antizipieren also auch die drei konservativen Szenarien einen fallenden Wasserstoffpreis.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Entwicklung des Wasserstoffpreises signifikante Auswirkungen auf das Marktpotential von Brennstoffzellenfahrzeugen hat (vgl. Abbildung 6.33). Während ein lediglich auf 12 €/kg H₂ fallender Preis im Jahr 2040 im konservativsten Szenario dazu führt, dass Brennstoffzellenfahrzeuge aus dem deutschen Neufahrzeugmarkt verdrängt werden, resultiert ein auf 1 €/kg H₂ fallender Preis im progressivsten Szenario in einem langfristig deutlich steigenden Marktanteil von Brennstoffzellenfahrzeugen. So können die Fahrzeuge in diesem Szenario den Nischenmarkt verlassen und einen Marktanteil von 4% der Neufahrzeuge einnehmen. In Summe führt diese Entwicklung zu 1,8 Millionen verkauften Fahrzeugen in Deutschland im Jahr 2040.

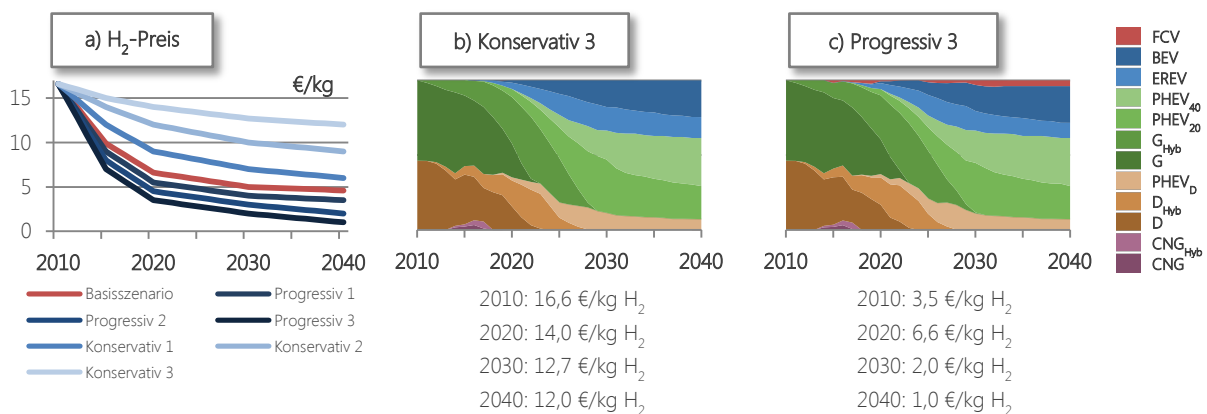


Abbildung 6.33: Entwicklung des Wasserstoffpreises (a)) und der Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebssträngen im konservativsten (b)) sowie im progressivsten (c)) Sensitivitätsszenario.

Die starke Abhängigkeit der Marktentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen vom Wasserstoffpreis zeigt, dass insbesondere im langfristigen Ausblick der effiziente und kostengünstige Aufbau von Versorgungsinfrastruktur essentiell für den Markterfolg ist. Hierzu zählen neben der professio-

nalisierten Bereitstellung von Wasserstoff selbst auch die kostengünstige Einbindung der Versorgung in das bestehende Infrastruktursystem.

Verfügbarkeit von Infrastruktur

Eine weitere ökonomische Randbedingung stellt die Verfügbarkeit bzw. der Aufbau von Lade- und Wasserstoffinfrastruktur dar. Die Analyseergebnisse aus Kapitel 3 haben gezeigt, dass die Infrastrukturentwicklung signifikanten Einfluss auf die technische Eignung von deutschen Fahrprofilen für Elektrofahrzeuge hat. Inwiefern unterschiedliche Entwicklungsstufen des Infrastrukturaufbaus sich fördernd oder restriktiv auf das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte auswirken, wird analog zur bisherigen Vorgehensweise mittels Sensitivitätsanalysen bewertet. Da der Nischenmarkt von Brennstoffzellenfahrzeugen nicht durch eine mangelnde Infrastruktur begründet wird, konzentriert sich die Analyse hierbei auf die Variation des Aufbaus von Ladeinfrastruktur.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass ein schnellerer Aufbau von Ladeinfrastruktur keine Veränderung der Entwicklung des Neufahrzeugmarktes hervorruft und diese identisch zum Ergebnis des Ausgangsszenarios verläuft (vgl. Abbildung 6.34). Hieraus lässt sich ableiten, dass sich die im Ausgangsszenario definierte Infrastrukturentwicklung nicht restriktiv auf das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte auswirkt. Die antizipierte Infrastrukturentwicklung orientiert sich dabei, wie zuvor erwähnt, an der dritten Ausbaustufe des ersten Infrastrukturszenarios aus Kapitel 3.3.

Die Ergebnisse der konservativen Sensitivitätsszenarien zeigen hingegen, dass ein verlangsamer Aufbau von Ladeinfrastruktur signifikante Veränderungen der gesamten Marktzusammensetzung hervorruft. Von der Verringerung der Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten wird nicht nur das Marktpotential von Batteriefahrzeugen negativ beeinflusst. Die zu einem späteren Zeitpunkt und langsamer verlaufende Kostendegression insbesondere von Traktionsbatterien bewirkt zudem eine Verschiebung der Marktentwicklung hin zu Antriebssträngen mit geringerem Elektrifizierungsgrad. Brennstoffzellenfahrzeuge profitieren von dieser Entwicklung am deutlichsten. Im Vergleich mit den Bestandszielen der NPE zeigt sich, dass der verlangsamte Infrastrukturaufbau im konservativsten Szenario zu einer Verringerung des Bestands an Elektrofahrzeugen führt und um 82.000 Fahrzeuge auf 720.000 im Jahr 2020 sinkt.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Entwicklung von Ladeinfrastruktur essentiell für den Markterfolg vollelektrischer Antriebsstränge ist. Hierbei kann ein im Vergleich zum Ausgangsszenario beschleunigter Aufbau von Ladeinfrastruktur zwar keine schnellere Marktdurchdringung hervorrufen, ein verlangsamer Aufbau von Infrastruktur wirkt sich jedoch stark restriktiv auf den gesamten Markt aus. Da der ökonomische Parameter der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur in diesem Sinne auch als politischer Stellhebel interpretiert werden kann, muss diese restriktive Wirkung auf das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte stets mitberücksichtigt werden. Insbesondere im Hinblick auf den Zielerreichungsgrad der nationalen Bestandsziele erhält der Einflussparameter somit eine hohe Bedeutung.

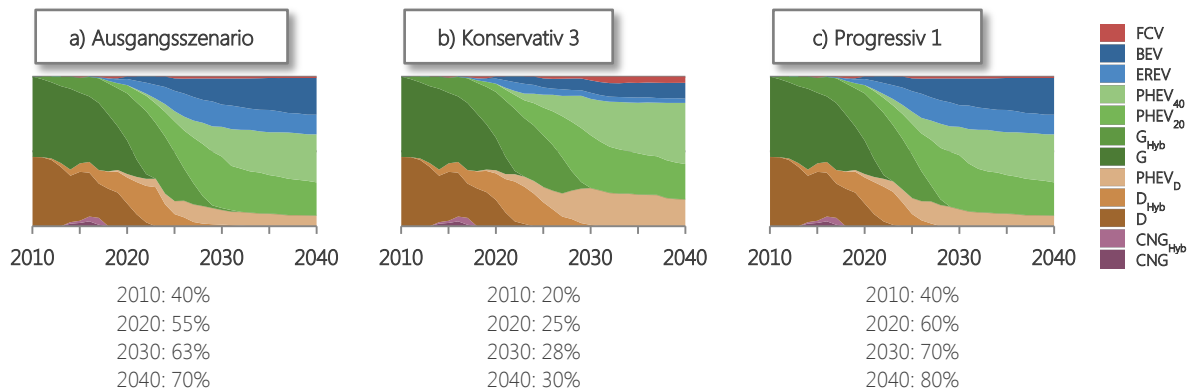


Abbildung 6.34: Segmentierung des deutschen PKW-Neufahrzeugmarktes nach Antriebsstrangarten im Ausgangsszenario (a)) und im konservativsten (b)) sowie im progressivsten (c)) Sensitivitätsszenario zur Entwicklung der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur.

6.2.3.3 Gegenüberstellung

Die übergreifende Gegenüberstellung der ökonomischen Einflussfaktoren macht deutlich, dass der Einfluss der Preisentwicklung der vier betrachteten Komponentenrohstoffe in den Simulationen eine untergeordnete Rolle spielt (vgl. Tabelle 6.8). Während Lithium und Platin nahezu keine Auswirkung auf die gesamte Marktzusammensetzung haben, zeigen Grafit und Neodym lediglich langfristig Einflüsse. Größere Unsicherheiten für elektrifizierte Antriebsstränge gehen hingegen von Energiekosten und der Infrastrukturverfügbarkeit aus. Insbesondere die Entwicklung des Ölpreises ist dabei als kritischer Einflussfaktor zu verstehen.

Tabelle 6.8: Übersicht des Einflusses der ökonomischen Randbedingungen auf das Marktpotential von elektrifizierten Antriebssträngen.

		Einfluss auf Marktpotential von EVs			Bemerkung
		Gesamt	Kurzfristig	Langfristig	
Rohstoffkosten	Grafit	◐	○	◐	Nur langfristig geringer Einfluss erkennbar
	Lithium	○	○	○	Nahezu kein Einfluss
	Neodym	◐	○	◐	Trotz deutlicher Kostensteigerungen kaum Einfluss auf Marktpotentiale erkennbar
	Platin	○	○	○	Ausschließlich für FCV relevant, hier aber deutlich
Energiekosten	Ölpreis	●	●	●	Kritischer Einflussfaktor; sowohl kurz- als auch langfristig signifikante Auswirkungen
	Elektrizitätspreis	◐	◐	◐	Signifikanter Einfluss; insbes. langfristig sind alle Antriebsstränge betroffen (Kostensteigerung)
	Wasserstoffpreis	○	○	◐	Ausschließlich für FCV relevant
	Infrastruktur	◐	○	◐	Elektrizität: Verlangsamung kann restriktiv wirken Wasserstoff: Keine restriktive Wirkung

○ Kein Einfluss ● Sehr großer Einfluss

6.3 Identifikation der kritischen Einflussfaktoren

Aus der Sensitivitätsanalyse der technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen lässt sich ableiten, dass eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeugkonzepte und damit letztlich auf die Auslegung der Antriebsstrangarchitektur einwirkt. Hierbei wird deutlich, dass der Grad des Einflusses signifikant von Parameter zu Parameter variiert. Als kritische Einflussfaktoren lassen sich dabei die Parameter

- Kostenentwicklung von Traktionsbatterien,
- Kostenentwicklung von Elektromaschinen,
- CO₂-Grenzwert für Neufahrzeuge,
- Einführung einer Fahrstromsteuer sowie
- *für den Zeithorizont bis zum Jahr 2020* Neufahrzeugsubventionen und
- Ölpreisentwicklung

identifizieren.

Die drei erstgenannten sowie die Ölpreisentwicklung können dabei die Entwicklung von Elektromobilität sowohl fördern als auch nahezu verhindern. Darüber hinaus weisen sie insbesondere in der langfristigen Entwicklung signifikanten Einfluss auf und sind daher als kritische Einflussfaktoren anzusehen.

Die Einführung einer Fahrstromsteuer hat sowohl kurz- als auch langfristige Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Neufahrzeugmarktes. Aufgrund ihres signifikant hemmenden Charakters zählt sie ebenfalls zu den kritischen Einflussfaktoren.

Neufahrzeugsubventionen sind aufgrund ihres fördernden Charakters in der Lage, den Zielerreichungsgrad der nationalen Bestandsziele von Elektrofahrzeugen insbesondere im kurzfristigen Zeithorizont bis zum Jahr 2020 signifikant zu beeinflussen. Daher ist auch dieser Parameter den kritischen Einflussfaktoren zuzuordnen.

6.4 Einordnung der Simulationsergebnisse

Um eine Einordnung der in dieser Arbeit erzielten Simulationsergebnisse in den Kontext vorangegangener Forschungsarbeiten zu ermöglichen, wird im Folgenden ein Vergleich mit bereits existierenden Studien gezogen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass alle betrachteten Studien äußerst heterogen sowohl hinsichtlich ihrer Methodik als auch hinsichtlich ihrer Ergebnisse sind und daher ein quantitativer Vergleich nur an einigen ausgewählten Beispielen erfolgen kann.

6.4.1 Einordnung des Ausgangsszenarios

Die Gegenüberstellung von veröffentlichten Studienergebnisse von Unternehmensberatungen, Forschungseinrichtungen, Nichtregierungsorganisationen (NGOs) und Industrieunternehmen zeigt, dass selbst bei der Einschränkung der Ergebnisse auf Veröffentlichungen mit einem Veröffentlichungsdatum nach dem Jahr 2010 eine sehr große Bandbreite publizierter Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte existiert (vgl. Abbildung 6.35).

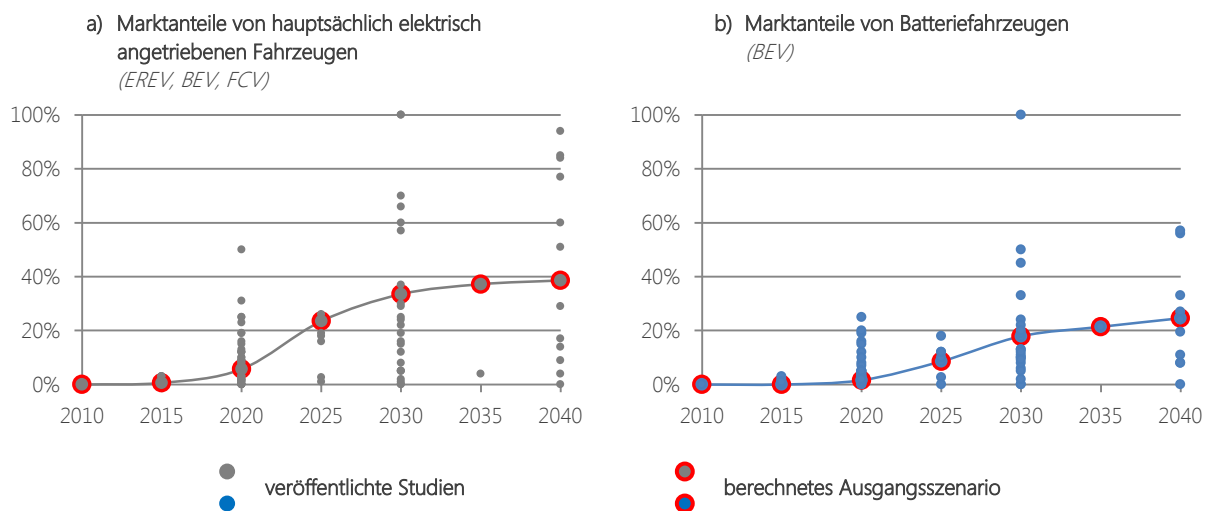


Abbildung 6.35: Vergleich der berechneten Marktanteile des Ausgangsszenarios mit denen veröffentlichter Studien für hauptsächlich elektrisch angetriebene Fahrzeuge (a) sowie für Batteriefahrzeuge (b)).

Quelle: Eigene Darstellung, [18] [233] [55] [234] [235] [145] [236] [237] [238] [139] [239] [224] [240] [2] [220] [96] [241] [221] [242] [243] [244] [245] [246].

Die Einordnung der im Ausgangsszenario berechneten Marktanteile von rein-elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (EREV, BEV und FCV) macht deutlich, dass sich die Modellergebnisse innerhalb der Bandbreite der analysierten Studienergebnisse befinden, wobei sich die im Ausgangsszenario berechneten Ergebnisse im zeitlichen Verlauf nicht in Richtung eines positiven bzw. negativen Extremums bewegen. Die Detailanalyse von Batteriefahrzeugen bestätigt diesen Vergleich, wobei auch hier die berechneten Ergebnisse im zeitlichen Verlauf innerhalb der teils sehr deutlichen positiven bzw. negativen Ausschläge liegen. Die vollständige Übersicht der analysierten Studien befindet sich im Anhang (vgl. Anhang D 5).

6.4.2 Einordnung der Sensitivitätsszenarien

Wie im Stand der Forschung aufgezeigt, existieren mit „OPTUM“ [55] und „MMEM“ [56] zwei Studien, welche Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte hinsichtlich einiger ausgewählter Sensitivitätsbetrachtungen aufzeigen. Trotz der gänzlich unterschiedlichen Berechnungsmethodik

der beiden Studien lassen sich die ermittelten Sensitivitäten mit denen in dieser Arbeit erzielten Ergebnissen vergleichen.

6.4.2.1 Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen (OPTUM)

In der OPTUM-Studie resultieren die Simulationen des Fahrzeugbestands mit 500.000 Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 in einer deutlichen Verfehlung des Bestandsziels der Bundesregierung. Im Jahr 2030 wird mit 5,9 Millionen Elektrofahrzeugen das Bestandsziel jedoch nahezu erreicht. Hierbei wird betont, dass der *„größte Anteil der elektrischen Neuzulassungen [...] Plug-In-Hybrid-Pkw mit 87%“* sind [55]. Im Kontext dieser Arbeit stimmen die Ergebnisse darin überein, dass sich das Verhältnis von Hybridfahrzeugen und Batteriefahrzeugen nicht ausgeglichen entwickeln wird, sondern vielmehr Hybridfahrzeuge den überwiegenden Anteil an elektrifizierten Fahrzeugen darstellen werden. Obwohl hierbei anzumerken ist, dass die Anzahl der berechneten Elektrofahrzeuge in OPTUM unter der Anzahl der in dieser Arbeit ermittelten EVs liegt, so wird jedoch gleichzeitig deutlich, dass die beiden für die Jahre 2020 und 2030 ausgegebenen Bestandsziele der Bundesregierung nicht zueinander passen: Eine Verfehlung der Ziele im ersten Stützjahr führt zur Erreichung im zweiten Stützjahr und umgekehrt.

Die Berechnung von Sensitivitäten führt auch in OPTUM zu dem Ergebnis, dass die Steigerung des Anschaffungspreises infolge höherer Batteriekosten eine *„wichtige Einflussgröße“* ist. Die Ergebnisse sind in ihrem Umfang der Marktveränderung mit denen dieser Arbeit vergleichbar. So führt die Erhöhung der Kosten von Traktionsbatterien im Jahr 2020 von 280 €/kWh im Ausgangsszenario auf 500 €/kWh zu einem reduzierten Marktanteil von Batteriefahrzeugen von ca. 14% auf 7%. Die Reduktion der Batteriekosten auf 200 €/kWh führt im gleichen Zeitraum hingegen zu einer Erhöhung des Marktanteils von Batteriefahrzeugen von 2%. Die langfristigen Auswirkungen dieser Variationen werden in der Studie nicht diskutiert. Ein rein quantitativer Vergleich zu den in dieser Arbeit berechneten Marktanteilen ist nicht möglich, da zum einen eine andere Ausgangsbasis gewählt wurde, zum anderen der Entscheidungsalgorithmus ein gänzlich anderer ist. So führt der auf Akzeptanzpotentialen und Diffusionsraten basierende Ansatz dazu, dass die Effekte des veränderten Anschaffungspreises auf die Marktanteile durch *„einen Stamm von Elektroauto-Fans als auch [von] einem Stamm von Elektroauto-Ablehner“* [55] abgeschwächt werden.

Eine weitere Übereinstimmung der Ergebnisse lässt sich hinsichtlich der Auswirkungen der Variation der Elektrizitätskosten. Beide Modelle gehen dabei von der gleichen Ausgangsbasis, nämlich von einem Strompreis von 21,7 € ct/kWh aus. Die Erhöhung des Strompreises im Jahr 2020 auf 30 € ct/kWh führt in OPTUM zu einer Reduzierung des PHEV-Anteils um 3%. Die Erhöhung des Strompreises im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Modellrechnungen auf 25 € ct/kWh führt zu einer Reduktion des Marktanteils im gleichen Zeitraum um 2% und liegt somit einem vergleichbaren Bereich. Auch hier werden im Rahmen der OPTUM-Studie die langfristigen Auswirkungen der Variation nicht diskutiert.

6.4.2.2 Marktmodell Elektromobilität (MMEM)

Die Studie „Marktmodell Elektromobilität“ errechnet im Referenzszenario einen Bestand von Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 von 462.000 und liegt damit ebenfalls, wie die OPTUM-Studie, unter den Bestandszielen der Bundesregierung. Darüber hinaus wird auch hier für das Jahr 2030 ein Bestand von 6 Millionen Elektrofahrzeugen ausgewiesen, was den gleichen Rückschluss wie zuvor zulässt und ebenfalls mit den Ergebnissen dieser Arbeit übereinstimmt: Die avisierten Bestandsziele für die Jahre 2020 und 2030 passen nicht zusammen.

Darüber hinaus lassen sich zwischen MMEM und den Modellrechnungen dieser Arbeit weitere Übereinstimmungen identifizieren. So können Brennstoffzellenfahrzeuge im betrachteten Zeithorizont in keinem Szenario signifikante Marktanteile erzielen. Darüber hinaus dienen hybride Antriebsstränge ebenfalls als Übergangstechnologie hin zu Fahrzeugkonzepten mit höheren Elektrifizierungsgraden, wobei HEVs sukzessive durch PHEVs ersetzt werden. Hierbei wird explizit darauf hingewiesen, dass auch ohne zusätzliche Fördermaßnahmen *„die Elektrifizierung des Antriebsstrangs attraktiv [wird]. Ein selbsttragender Markt für Vollhybride (PHEV) und dann Range Extender entsteht rasch.“* [56]

Ein Unterschied besteht in den Simulationsergebnissen hinsichtlich des Marktpotentials von Batteriefahrzeugen. Im Gegensatz zu den Modellergebnissen des in dieser Arbeit berechneten Ausgangsszenarios werden in MMEM langfristig lediglich geringe Marktanteile für Batteriefahrzeuge, näherungsweise auf dem doppelten Niveau von Brennstoffzellenfahrzeugen und damit in der Einordnung eines Nischenmarktes ausgewiesen. Als Hauptgrund hierfür wird angeführt, dass *„reine BEV im Vergleich zu den Alternativen RE [range-extender, hier: EREV] und Hybridfahrzeugen aufgrund des Verhältnisses von Reichweite und Kosten nur für bestimmte Nutzer attraktiv sind und eher im City-Bereich eingesetzt werden.“* [56]

Die Einführung einer staatlichen Subvention ist in der MMEM-Studie bei einer Zahlung von 2.000 €/Fzg. (unabhängig von der Art des Antriebsstrangs) auf insgesamt 200.000 Fahrzeuge begrenzt und führt bei kumulierten staatlichen Ausgaben von 400 Millionen Euro zu einer Bestandserhöhung im Jahr 2020 von 180.000 Fahrzeugen. In der in dieser Arbeit errechneten Sensitivität resultierte eine Zahlung von 2.500 €/Fzg. (ebenfalls unabhängig von der Art des Antriebsstrangs) ohne Limitierung der Anzahl subventionierter Fahrzeuge bei kumulierten staatlichen Ausgaben von 1,1 Milliarden Euro in einer Erhöhung des Bestands im Jahr 2020 um 420.000 Fahrzeuge. Aufgrund der Begrenzung der Subvention in der berechneten MMEM-Sensitivität lassen sich letztlich keine quantitativen Rückschlüsse ableiten, wenngleich die Höhe bzw. das Ausmaß der Beeinflussung des Marktpotentials in beiden Fällen der gleichen Logik folgt.

Der Vergleich des langfristigen Einflusses der Variation der CO₂-Gesetzgebung ist ebenfalls nicht möglich. Zwar werden in der MMEM-Studie drei Sensitivitätsszenarien hinsichtlich veränderter CO₂-Grenzwerte errechnet, die Ausweisung des Effektes auf die Fahrzeugflotte und insbesondere die Analyse der Veränderung der Anzahl elektrifizierter Fahrzeuge bleibt jedoch aus.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die in dieser Arbeit berechneten Marktpotentiale sowie die mit der Variation der technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen verbundenen Sensitivitäten mit denen bisheriger Forschungsarbeiten vergleichbar sind, jedoch in ihrem Umfang, wie beispielsweise der Heterogenität der Sensitivitätsszenarien oder dem berechneten Zeithorizont, sowie in ihrer Detaillierung, wie beispielsweise der Granularität der Sensitivitätsberechnungen oder den simulierten Fahrzeugkonzepten, deutlich über die bisherigen Ergebnisse hinausgehen.

7 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit liefert eine Quantifizierung zukünftiger Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte auf dem deutschen PKW-Neufahrzeugmarkt bis zum Jahr 2040.

Hierbei werden mit Hilfe der durchgeführten Szenariorechnungen Sensitivitäten im Hinblick auf technische, politische und ökonomische Randbedingungen bestimmt, aus denen sechs kritische Einflussfaktoren abgeleitet werden:

1. Kostenentwicklung von Traktionsbatterien
2. Kostenentwicklung von Elektromaschinen
3. CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge
4. Einführung einer Fahrstromsteuer
5. Neufahrzeugsубventionen (*im kurzfristigen Zeithorizont*)
6. Ölpreisentwicklung

Die für die Szenariorechnungen notwendige Schaffung einer fundierten Datenbasis im Rahmen von Vorarbeiten liefert darüber hinaus neue Erkenntnisse hinsichtlich

- des Einflusses von Ladeinfrastruktur,
- der Kostenentwicklung von Traktionsbatterien und Elektromaschinen sowie
- den Instandhaltungskosten und Wiederverkaufserlösen,

auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

7.1 Fazit

7.1.1 Einfluss von Ladeinfrastruktur

Mit Hilfe eines neu entwickelten Simulationsmodells konnte gezeigt werden, welchen Einfluss die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur auf die technische Eignung von Elektrofahrzeugen für deutsche Nutzungs- bzw. Fahrprofile hat. Die technische Eignung wurde hierbei als die Darstellbarkeit der Tagesfahrt mit Hilfe eines Batteriefahrzeugs definiert.

Die Berechnungen machten deutlich, dass eine reale, also nicht im NEFZ ermittelte elektrische Reichweite von 100 km unter der Annahme der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur von 68% bereits für über 85% der deutschen Tagesfahrprofile ausreichend ist. Bei realen Reichweiten von

über 150 km hat eine weitere Steigerung der Reichweite nur noch marginalen Einfluss auf die technische Eignung und liefert aus technischer Sicht nur noch begrenzten Mehrwert.

Der Vergleich unterschiedlicher Infrastrukturszenarien hat gezeigt, dass der Möglichkeit des „Ladens zu Hause“ eine entscheidende Bedeutung zukommt. Unter der Annahme, dass deutsche Fahrzeugnutzer lediglich zu Hause nachladen können, wurde bereits mit einer resultierenden durchschnittlichen Ladeinfrastrukturverfügbarkeit von 53% bei einer elektrischen Reichweite von 80 km eine technische Eignung von über 80% erzielt.

Die Simulationsrechnungen machten darüber hinaus deutlich, dass ländliche Gebiete nicht zwangsläufig schlechter für Elektrofahrzeuge geeignet sind, sondern vielmehr aufgrund der häufig gegebenen Möglichkeit, das Fahrzeug täglich an der gleichen Stelle zu parken und nachzuladen in Kombination mit den nur marginal längeren täglichen Fahrtstrecken einen Vorteil gegenüber hochverdichteten Innenstadtgebieten aufweisen.

7.1.2 Kostenentwicklung von Traktionsbatterien und Elektromaschinen

7.1.2.1 Traktionsbatterien

Das neu entwickelte Berechnungsmodell hat gezeigt, dass die erreichbaren floor-costs, also die minimal möglichen Kosten unter der Annahme eines Massenfertigungsszenarios, nicht nur von der Zellchemie, sondern in wesentlichem Maße auch von der Batteriekonfiguration abhängig sind. Für die Beispielkonfiguration einer Hochenergiebatterie auf NMC-Basis mit einem Energieinhalt von 36 kWh hat die Berechnung ergeben, dass bei floor-costs von 180 €/kWh 71% der Kosten durch die Zellen selbst und nur 15% bzw. 14% durch Modul- bzw. Packkomponenten verursacht werden. Noch deutlicher unterscheidet sich die Kostenherkunft hinsichtlich der Verteilung auf Rohstoffe, Fertigung und Overhead: Hier werden 80% der Kosten durch Rohstoffe verursacht, wohingegen lediglich 9% der Fertigung und 11% dem Overhead zuzuordnen sind.

Mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation konnte gezeigt werden, dass Graphit unter den Aktivmaterialien sowie der Separator, das Gehäuse und die elektrischen Anschlüsse unter den Passivmaterialien die wesentlichen Kostentreiber darstellen, wobei sich der Anteil von Aktiv- zu Passivmaterialien bei Hochleistungszellen deutlich hin zu den Passivmaterialien verschiebt.

Eine weitere wesentliche Erkenntnis stellt der abgeleitete Zusammenhang zwischen Zellkapazität und Batteriekosten dar. So wurde deutlich, dass die Kosten der gesamten Batterie mit zunehmender Zellkapazität asymptotisch abnehmen, wobei ab einer Zellkapazität von ca. 35 Ah nur noch marginale Kostendegressionen feststellbar sind.

Die Analyse der Lernkurvenentwicklung hat gezeigt, dass Hochenergiezellen in der Beispielkonfiguration mit einer Lernrate von 83% eine höhere Kostendegression aufweisen als Hochleistungszellen mit einer Rate von 89%. Darüber hinaus wurde deutlich, dass die Kapazität der Einzelzelle,

die Anzahl der Zellen pro Modul sowie die Anzahl der Module einen reziproken Zusammenhang zur Lernrate aufweisen.

Mit Hilfe der Scoring-Methode konnte übergreifend gezeigt werden, dass zwischen Hochleistungs- und Hochenergiebatterien signifikante Übertragungseffekte hinsichtlich der zu erwartenden Kostendegressionen bestehen.

7.1.2.2 Elektromaschinen

Das ebenfalls neu entwickelte Berechnungsmodell zur Ermittlung der Produktionskosten von Elektromaschinen hat gezeigt, dass für die gewählte Beispielauslegung einer permanenterregten Synchronmaschine mit einer Leistung von 80 kW floor-costs von 8 €/kW erreichbar sind. Hierbei wurde deutlich, dass die erreichbaren minimalen Kosten signifikant vom Leistungsniveau der E-Maschine abhängen. So sind bei Halbierung der Leistung auf 40 kW floor-costs von 11 €/kW erreichbar, wohingegen die Verdopplung der Leistung auf 160 kW zu floor-costs von 7 €/kW führt. In diesem Zusammenhang wurde deutlich, dass permanenterregte Synchronmaschinen gefolgt von fremderregten Synchronmaschinen im Vergleich der vier betrachteten Maschinenarten (PSM, FSM, ASM sowie SRM) die höchsten Kosten aufweisen, wobei sich dieses Verhältnis für die exemplarische Konfiguration der E-Maschinen in der Leistungsklasse von 80 kW ab einem Kupferpreis von ca. 10,3 €/kg umkehrt. Mit steigender Leistung der E-Maschinen steigt dieser Schnittpunkt ebenfalls an. Asynchronmaschinen weisen in der gewählten Konfiguration auf einem nahezu identischen Niveau zu Reluktanzmaschinen in allen Leistungsbereichen die niedrigsten Kosten auf.

Die Analyse des Kosteneinflusses des Selten-Erd-Metalls Neodym hat aufgezeigt, dass die Kosten der gesamten E-Maschine deutlich von dem in der Vergangenheit sehr volatilen Neodympreis beeinflusst werden. So führt eine Preissteigerung von Neodym von 50 \$/kg auf 400 \$/kg zu um über 224% steigenden Kosten der gesamten E-Maschine.

7.1.3 Instandhaltungskosten und Wiederverkaufserlöse

7.1.3.1 Instandhaltungskosten

Mit Hilfe des neu entwickelten Berechnungsmodells konnte erstmals gezeigt werden, welchen Einfluss die Triebstrangtopologie und damit verbunden der Elektrifizierungsgrad der Fahrzeuge auf die Instandhaltungskosten hat. So wurde deutlich, dass zum einen – mit Ausnahme von Brennstoffzellenfahrzeugen – mit steigendem Elektrifizierungsgrad die Instandhaltungskosten sinken. Eine wesentliche neue Erkenntnis resultierte dabei aus dem Vergleich mit konventionell angetriebenen Fahrzeugen: Bei allen betrachteten elektrifizierten Fahrzeugkonzepten lagen die Instandhaltungskosten unter denen der vergleichbaren, rein-verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge. Die niedrigsten Kosten weisen dabei EREVs und BEVs mit bis zu ca. 30% reduzierten In-

standhaltungskosten auf. Zum anderen wurde deutlich, dass die drei betrachteten parallelen Hybride (HEV, PHEV₂₀ sowie PHEV₄₀) trotz unterschiedlicher elektrischer Reichweiten und Leistungen nahezu identische Instandhaltungskosten aufweisen.

Für die hybriden Antriebsstränge (PHEV und EREV) ließen sich im Gegensatz zu BEVs und FCV keine eindeutigen Kostentreiber identifizieren. Im Gegensatz hierzu wurde für BEVs und FCVs deutlich, dass die Instandhaltungskosten hauptsächlich durch die Traktionsbatterie bzw. das Brennstoffzellensystem getrieben werden.

7.1.3.2 Wiederverkaufserlöse

In Anlehnung an die Restwertentwicklung konventionell angetriebener Fahrzeuge konnte auf Basis einer neu entwickelten Berechnungsmethode gezeigt werden, welche Wiederverkaufswerte sich für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte unter Einbeziehung von Anschaffungskosten und Lebensdauererwartungen ableiten lassen.

Darüber hinaus wurde deutlich, dass aktuelle Restwertprognosen für Hybridfahrzeuge höhere Restwerte antizipieren als für die konventionell angetriebenen Schwestermodelle, wenngleich hierfür aufgrund der geringen bisher verkauften Stückzahlen nur eine geringe Datenbasis vorliegt.

7.1.4 Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte

In der abschließenden Simulation des deutschen Neufahrzeugmarktes wurden mit Hilfe des im Rahmen dieser Arbeit überarbeiteten Simulationsmodells VECTOR21 alle vorangegangenen Ergebnisse integriert und so sowohl die Quantifizierung von Marktpotentialen elektrifizierter Fahrzeuge im Hinblick auf technische, politische und ökonomische Randbedingungen als auch die Ableitung von sechs kritischen Einflussfaktoren ermöglicht.

7.1.4.1 Ausgangsszenario

Auf Basis eines Ausgangsszenarios, welches im Sinne eines Business-as-usual-Szenarios heutige Entwicklungen und Trends fortschreibt, wurde deutlich, dass die klassische Zweiteilung des deutschen Neufahrzeugmarktes in Benzin- und Dieselfahrzeuge von einem Portfolio unterschiedlicher Antriebsstränge abgelöst werden kann. So führte die schrittweise Substitution reinverbrennungsmotorisch angetriebener Fahrzeuge durch HEVs und PHEVs sowie im späteren Verlauf durch EREVs und BEVs dazu, dass bis zum Jahr 2040 ein Marktanteil an rein-elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (EREV, BEV und FCV) von 39% erzielt wird, wobei Brennstoffzellenfahrzeuge lediglich einen Nischenmarkt einnehmen können. Dennoch wurde in diesem Ausgangsszenario für Fahrzeuge, welche einen Verbrennungsmotor an Bord haben (ICV, HEV, PHEV und EREV), ein Marktanteil von 75% im Jahr 2040 berechnet.

Im Rahmen der Modellrechnung wurde deutlich, dass sich das Verhältnis von fixen zu variablen Lebenszykluskosten aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeuge hin zu den fixen Kosten verschiebt, wobei das Kostenniveau aus Nutzersicht bis zum Jahr 2040 um 4,8% ansteigt. Gleichzeitig konnte in diesem Ausgangsszenario gezeigt werden, dass sich die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2040 aufgrund der Umschichtung des Neufahrzeugmarktes um über 75% im Vergleich zum Ausgangsjahr reduzieren lassen.

In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen der Modellrechnung ebenfalls deutlich, dass das von der Bundesregierung ausgegebene Ziel von 950.000 elektrifizierten PKWs bis zum Jahr 2020 [1] mit ca. 891.00 Fahrzeugen (inkl. FCV) nahezu erreicht werden kann. Der mittelfristige Ausblick bis zum Jahr 2030 zeigte auf, dass das avisierte Ziel von 6 Millionen Fahrzeugen sogar deutlich übertroffen werden kann.

7.1.4.2 Kritische Einflussfaktoren

Die auf Basis des Ausgangsszenarios durchgeführten Sensitivitätsrechnungen hinsichtlich der technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen haben es ermöglicht, sechs kritische Einflussfaktoren abzuleiten.

Neben der Identifikation der kritischen Einflussfaktoren konnte mit Hilfe der Sensitivitätsrechnungen auch der Grad der Beeinflussung des Marktpotentials elektrifizierter Fahrzeugkonzepte abgeleitet werden. Hierbei zeigten die Simulationen, dass die ersten drei kritischen Faktoren (die Kostenentwicklung von Traktionsbatterien, die Kostenentwicklung von Elektromaschinen sowie die Höhe der CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge) und die Ölpreisentwicklung das Marktpotential sowohl positiv als auch negativ beeinflussen können, wobei festzustellen war, dass die Kosten aus Nutzersicht teilweise signifikant erhöht wurden.

Kritische technische Einflussfaktoren

Am deutlichsten beeinflusst die **Kostenentwicklung von Traktionsbatterien** das Marktpotential, wobei sich sowohl die Geschwindigkeit der Kostenreduktion (Lernrate) als auch die erzielbaren floor-costs positiv auf das Marktpotential auswirken. Hierbei kann eine negative Entwicklung zu einer signifikant verlangsamten Marktumschichtung hin zu elektrifizierten Fahrzeugen führen. So zeigte die konservative Annahme von minimalen Produktionskosten in Höhe von 250 €/kWh im Vergleich zu 170 €/kWh im Ausgangsszenario, dass das Marktpotential von BEVs auch langfristig unter 1% liegt. Eine niedrigere bzw. optimistischere Kostenannahme führte hingegen zu signifikant schnelleren Marktumschichtungen von bis zu 10 Jahren im Vergleich zur konservativsten Sensitivitätsrechnung.

Ähnliche Zusammenhänge ließen sich hinsichtlich der Auswirkungen der **Kostenentwicklung von E-Maschinen** beobachten. Die Auswirkung bzw. die Beeinflussung des berechneten Marktpotentials fällt jedoch aufgrund des insgesamt geringeren Kostenanteils der E-Maschinen am Gesamt-

fahrzeug geringer aus. Am deutlichsten von der Variation der E-Maschinen-Kosten betroffen ist aufgrund der zwei verbauten E-Maschinen (Antriebs-E-Maschine und Generator) der simulierte Marktanteil serieller Hybride. So variiert der Anteil an neu verkauften Fahrzeugen im Jahr 2040 ausgehend von 13% im Ausgangsszenario von 8% im konservativsten Szenario bis hin zu über 26% im progressivsten Szenario.

Kritische politische Einflussfaktoren

Die Variation der Höhe der CO₂-Grenzwerte für Neufahrzeuge in den Sensitivitätsrechnungen machte deutlich, dass durch eine schärfere Gesetzgebung das Marktpotential signifikant beeinflusst werden kann. Gleichzeitig wurde aber ebenfalls deutlich, dass die Verschärfung des CO₂-Grenzwertes mit einer Erhöhung der Kosten aus Nutzersicht verbunden ist. So führt die Senkung des Grenzwerts auf 20 g CO₂/km im Jahr 2040 zu einer Erhöhung der TCO aus Nutzersicht von über 10%.

Noch deutlicher fällt die berechnete Erhöhung der Kosten aus Nutzersicht im Fall der Einführung einer Fahrstromsteuer aus. Hier führte die schrittweise Einführung einer Fahrstromsteuer (20 € ct/kWh im Jahr 2020 bis hin zu 40 € ct/kWh im Jahr 2040) in den Sensitivitätsrechnungen zu einer Erhöhung der Nutzerkosten von 12,8% im Jahr 2040 im Vergleich zum Ausgangsjahr. Zudem wurde deutlich, dass das Bestandsziel der Bundesregierung von 950.000 elektrifizierten Fahrzeugen im Jahr 2020 mit 332.000 Fahrzeugen in diesem Szenario deutlich unterschritten wird.

Neben den CO₂-Grenzwerten und der Einführung einer Fahrstromsteuer ließen sich mit Hilfe der Sensitivitätsrechnungen staatliche Subventionszahlungen als dritter kritischer, politischer Einflussfaktor identifizieren. Hierbei wurde zum einen deutlich, dass von diesem politischen Steuerungsinstrument lediglich eine kurzfristige Wirkung auf das Marktpotential ausgeht. Zum anderen wurde deutlich, dass zwischen der Höhe der Subventionszahlungen und der Beeinflussung des Marktpotentials kein linearer Zusammenhang besteht. So führten in den Szenariorechnungen kumulierte staatliche Ausgaben von 2,4 Milliarden € zu einem Bestand an elektrifizierten Fahrzeugen von 1,5 Millionen im Jahr 2020, wohingegen Ausgaben von 11,9 Milliarden € im gleichen Zeitraum „lediglich“ zu einem Bestand von 2,7 Millionen Fahrzeugen führten.

Kritischer ökonomischer Einflussfaktor

Die Analyse des Ölpreiseinflusses zeigte, dass der Anstieg des Ölpreises eine beschleunigende und erhöhende Wirkung auf das Marktpotential elektrifizierter Fahrzeuge hat. Darüber hinaus wurde in den Simulationen deutlich, dass selbst bei der Annahme eines konstanten Ölpreises von 80 \$/bbl über den gesamten Simulationszeitraum eine schrittweise, wenngleich verlangsamte Elektrifizierung der deutschen Neufahrzeugflotte zu beobachten ist. Hauptsächlich für diesen Wirkzusammenhang verantwortlich sind die von einigen wenigen Nutzern präferierten elektrifizierten Fahrzeuge, welche dennoch eine (verlangsamte) Kostenreduktion der elektrifizierten TriebstrangkompONENTEN mittels Lernkurven induzieren.

Bei einem antizipierten Anstieg des Ölpreises auf 400 \$/bbl im Jahr 2040 wurde ein Marktpotential rein-elektrisch angetriebener Fahrzeuge (BEV, EREV und FCV) von nahezu 50% berechnet, wohingegen das konservative Szenario mit einem Ölpreis von 80 \$/bbl zu einem Marktanteil dieser Fahrzeuge im Jahr 2040 von unter einem Drittel führte.

7.1.4.3 Schlussbemerkung

Die integrierte Bewertung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte mit Hilfe von Marktsimulationen hat gezeigt, dass parallele Plug-in Hybride in allen Szenarien die stabilste Entwicklung aufweisen. Hierbei sind in einem großen Teil der Szenarien lediglich marginale Veränderungen hinsichtlich des aggregierten Marktanteils von PHEV₂₀ und PHEV₄₀ zu beobachten. Fahrzeuge mit höheren Elektrifizierungsgraden hingegen reagieren zum Teil sehr volatil auf sich verändernde Einflussfaktoren, wobei Brennstoffzellenfahrzeuge auch bei deutlich positiven Annahmen ihren Nischenmarkt in keinem Szenario verlassen und ihren Marktanteil nie auf über 10% steigern können. Die Marktentwicklung von Batteriefahrzeugen zeigt in allen Sensitivitätsszenarien große Unsicherheiten und reicht von einem Marktanteil von unter 1% bei einer verlangsamten Kostendegression von Traktionsbatterien bis hin zu 38% im progressivsten Ölpreisszenario mit einem Ölpreis von 400 \$/bbl im Jahr 2040. Im langfristigen Ausblick verlieren Dieselfahrzeuge in allen Szenarien aufgrund der Substitution durch elektrifizierte, allerdings auf Benzinfahrzeugen basierenden Fahrzeugkonzepten, an Marktanteil.

7.2 Ausblick

Im Hinblick auf mögliche zukünftige Forschungsaktivitäten lassen sich auf Basis der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse Anknüpfungspunkte identifizieren, die im Folgenden stichpunktartig beschrieben werden:

- Optimierende Kostenbetrachtung des gesamten Antriebsstrangs, welche die Einzelkosten im Hinblick auf das Zusammenspiel der Komponenten integriert bewertet (Packaging versus Kapazität der Einzelzellen, Spannungslevel versus Stromstärke und Leitungsdurchmesser, Anzahl der Leistungselektroniken etc.)
- Abbildung des Einflusses weiterer Rohstoffe auf alle Antriebsstrangkomponenten und Ableitung der damit verbundenen Unsicherheiten sowie Rückkopplungen aus Nachfrage und Angebot (Kupfer, Dysprosium, Kobalt etc.)
- Erweiterung des Batteriekostenmodells um weitere Technologien (zusätzliche Lithium-Ionen-Kathoden- und Anodenmaterialien, andere Bauformen (prismatische Zellen versus Pouch-Zellen), Lithium-Luft, Lithium-Schwefel etc.)
- Integration von zukünftigen, empirischen Erkenntnissen aus Flottenversuchen (Reisen, Analysezeitraum größer als ein Tag, Instandhaltungskosten, Wiederverkaufswerte etc.)
- Bewertung des Einflusses von Fahrzyklen (Stadt versus Autobahn, Sommer versus Winter etc.)
- Integration neuer Ladekonzepte für Elektrofahrzeuge (Schnellladung, induktives Laden etc.)
- Ausdehnung der Betrachtungsgrenzen (geografisch, zeitlich, Fahrzeuggrößenklassen, Anzahl Antriebsstrangarchitekturen, Nutzfahrzeuge etc.)
- Identifikation des gleichzeitigen Einflusses zweier oder mehrerer Parameter auf das Marktpotential (Elektrizitäts- und Wasserstoffpreis, CO₂-Gesetzgebung und Energiekosten etc.)
- Implementierung eines Optimierungsansatzes zur dynamischen Auslegung von Fahrzeugkonzepten sowie zur Möglichkeit des Backcastings
- Berücksichtigung weiterer Einflüsse auf die Marktzusammensetzung (H₂ und CNG als Langzeitenergiespeicher, Beschäftigungseffekte, Einfluss von Forschungs- und Entwicklungsförderung, Umstellung auf neue Fahrzyklen, Einbeziehung von CO₂-Vorketten in Grenzwerte etc.)

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesregierung, „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität,“ Berlin, August 2009.
- [2] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), „Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität,“ Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), Berlin, Mai 2011.
- [3] infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Verkehrsforschung, „Mobilität in Deutschland (MiD) 2008,“ Bonn / Berlin, 2010.
- [4] D. Biere, D. Dallinger und M. Wietschel, „Ökonomische Analyse der Erstinutzer von Elektrofahrzeugen,“ Zeitschrift für Energiewirtschaft (ZfE), Nr. 02, pp. 173-181, 2009.
- [5] R. Follmer, „Trends im Verkehrsmarkt; Detailergebnisse der Studie Mobilität in Deutschland,“ in 4. VDV-Marketing-Kongress, Erfurt, 15. April 2010.
- [6] R. Follmer, „Potenziale für eine ökologischere Mobilität - Verhalten und Ansprüche der wichtigsten Zielgruppen,“ in dena-Jahreskongress, Berlin, 23. Juni 2009.
- [7] R. Follmer, „Mobil bleiben, Klima schonen?,“ in BAGSO Fachtagung „Nach uns die Sintflut?“, Bonn, 27. Oktober 2010.
- [8] L. Gaines und R. Cuenca, „Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, Illinois, USA, 2000.
- [9] P. Nelson, K. Gallagher, I. Bloom and D. Dees, "Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles," Forschungsbericht, veröffentlicht vom Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, Illinois, USA, 2011.
- [10] D. Santini, K. Gallager and P. Nelson, "Modeling of Manufacturing Costs of Lithium-Ion Batteries for HEVs, PHEVs, and EVs," in The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS25), Shenzhen, China, 2010.
- [11] P. Nelson, K. Gallagher and D. Santini, Persönliche Kommunikation, Vergleich der Batteriekostenmodelle, Argonne, Illinois, USA, 12. September 2011.
- [12] T. Markel and A. Simpson, "Plug-In Hybrid Electric Vehicle Energy Storage System Design," in Advanced Automotive Battery Conference, Baltimore, Maryland, USA, 2006.
- [13] T. Lipman, "The Cost of Manufacturing Electric Vehicle Batteries," Forschungsbericht, veröffentlicht von der University of California - Davis, Davis, Kalifornien, USA, 1999.
- [14] A. Pesaran, T. Markel, H. Tataria and D. Howell, "Battery Requirements for Plug-In Hybrid Electric Vehicles - Analysis and Rationale," in 23rd International Electric Vehicle Symposium (EVS23), Anaheim, Kalifornien, USA, 2009.
- [15] J. Axsen, A. Burke and K. Kurani, "Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008," Forschungsbericht, veröffentlicht von der University of California - Davis, Davis, Kalifornien, USA, 2008.

- [16] The Boston Consulting Group (BCG), "Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020," München, 2010.
- [17] Bain & Company, "Li-Ion Battery Market for Automotive Applications," Bain & Company, Inc., München, 2010.
- [18] Roland Berger Strategy Consultants, "Li-Ion batteries - the next bubble ahead?," Roland Berger Strategy Consultants, München/Shanghai/Detroit, 2010.
- [19] F. Kruger, „Powerchain 2020 - Li-Ion Battery Value Chain Analysis,“ in 3rd Technical Conference "Advanced Battery Power", Aachen, 2011.
- [20] B. Bohr, „Automobilhersteller in herausfordernden Zeiten,“ Stuttgarter Symposium, Stuttgart, 24. März 2009.
- [21] P. Mock, Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21), Stuttgart, 2010.
- [22] T. E. Lipman und M. A. Delucchi, „Hybrid-Electric Vehicle Design Retail and Lifecycle Cost Analysis,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Institute of Transportation Studies, University of California - Davis, Davis, Kalifornien, USA, April 2003.
- [23] United States Department of Energy, „Plug-In Hybrid Electric Vehicle R&D Plan - FreedomCAR and Vehicle Technologies Program,“ United States Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington, D.C., USA, 2007.
- [24] R. M. Cuenca, „Simple Cost Model for EV Traction Motors,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, Illinois, USA, Februar 1995.
- [25] T. E. Lipman, „Zero-Emission Vehicle Scenario Cost Analysis Using a Fuzzy Set-Based Framework,“ Forschungsbericht, veröffentlicht von der University of California - Davis, Davis, Kalifornien, USA, Dezember 1999.
- [26] M. Delucchi, A. Burke, T. Lipman und M. Miller, „Electric and Gasoline Vehicle Lifecycle Cost and Energy-Use Model,“ Forschungsbericht, veröffentlicht von der University of California - Davis, Davis, Kalifornien, USA, 2000.
- [27] M. Delucchi and T. Lipman, "An analysis of the retail and lifecycle cost of battery-powered vehicles," Transportation Research Part D, vol. 6, 2001.
- [28] R. Graham, „Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Electric Power Research Institute (EPRI), Concord, Kalifornien, USA, Juli 2001.
- [29] A. Burke, B. Jungers, C. Yang und J. Ogden, „Battery Electric Vehicles: An Assessment of the Technology and Factors Influencing Market Readiness,“ Forschungsbericht, veröffentlicht von der University of California - Davis, Davis, Kalifornien, USA, Juni 2007.
- [30] M. A. Kromer und J. B. Heywood, „Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, USA, Mai 2007.
- [31] A. Emadi, Y. J. Lee und K. Rajashekhara, „Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles,“ IEEE Transactions on Industrial Electronics, Bd. 55, Nr. 6, pp. 2237-2245, Juni 2008.

- [32] K. Ahn und P. Y. Papalambros, „Design Optimization of Motor/Generator Full-load Characteristics in Two-mode Hybrid Vehicles,“ SAE International, Referenz 2009-01-1317, Ann Arbor, Michigan, USA, 2009.
- [33] C. Childers und L. Mirisola, „Plug-in Fuel Cell Vehicle Technology and Value Analysis; Phase 1: Preliminary Findings and Plan for Detailed Study,“ Forschungsbericht, veröffentlicht am Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, Kalifornien, USA, Juli 2010.
- [34] A. Brooker, M. Thornton und J. Rugh, „Technology Improvement Pathways to Cost-Effective Vehicle Electrification,“ in SAE 2010 World Congress, Detroit, Michigan, USA, 13. April 2010.
- [35] J. Barnes, DOE Hybrid and Electric Systems Overview, Tubitak, Türkei: Hybrid and Electric Systems Program, US Department of Energy, 24. Mai 2011.
- [36] elektromotoren.com, „Online Shop für Elektromotoren,“ [Online]. [Zugriff am 17. August 2011, http://www.elektromotoren.com/jsp/epctrl.jsp?pri=topdrive&mod=topdrive000008&pB_Pin=PinWebshop&pB_Event=InitSearch&groupId=6&activeLink=menuEntry_WSMotor&newSearch=true].
- [37] ATG:Motor, „Energiesparmotoren - Programm,“ [Online]. [Zugriff am 8. August 2011, <http://www.atg-motor.de/produkte/energiesparmotoren/>].
- [38] JS Technik GmbH, „Elektromotoren - Wechselstrommotoren,“ [Online]. [Zugriff am 12. August 2011, <http://www.js-technik.de/wechselstrommotoren.html>].
- [39] R. M. Cuenca, L. L. Gaines und A. D. Vyas, „Evaluation of Electric Vehicle Production and Operating Cost,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, Illinois, USA, November 1999.
- [40] H. Wallentowitz, A. Fealdenhoven und I. Olschewski, Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [41] A. Delorme, S. Pagerit, P. Sharer und A. Rousseau, „Cost Benefit Analysis of Advanced Powertrains from 2010 to 2045,“ in EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stavanger, Norwegen, 13. Mai 2009.
- [42] A. Rousseau, P. Sharer, S. Pagerit und S. Das, „Trade-off between Fuel Economy and Cost for Advanced Vehicle Configurations,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, Illinois, USA, 2007.
- [43] O. P. R. van Wliet, T. Kruithof, W. Turkenburg und A. P. C. Faaij, „Techno-economic comparison of series hybrid, plug-in hybrid, fuel cell and regular cars,“ Journal of Power Sources, Bd. 195, pp. 6570-6585, 2010.
- [44] T. A. Becker, I. Sidhu und B. tenderich, „Electric Vehicles in the United States - A New Model with Forecasts to 2030,“ Forschungsbericht, veröffentlicht von der University of California - Berkeley, Berkeley, Kalifornien, USA, 2009.
- [45] M. Ruth, T. A. Timbario, T. J. Timbario und M. Laffen, „Methodology for Calculating Cost per Mile for Current and Future Vehicle Powertrain Technologies, with Projections to 2024,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, USA, 2011.
- [46] M. Talaei, „Pressemeldung: Eurotax-Studie zur Zukunft des Autos in Berlin vorgestellt: So werden Elektro- und alternative Antriebe Deutschland verändern,“ EurotaxSchwacke GmbH, Maintal, 21. Juli 2010.

- [47] G. Stegmaier und B. Santer, „FOCUS online - Gebrauchtwagenpreise der Zukunft - die Restwertriesen 2014,“ 10. Januar 2011. [Online]. [Zugriff am 13. Januar 2011, http://www.focus.de/auto/ratgeber/kosten/tid-20070/gebrauchtwagenpreise-der-zukunft-die-restwertriesen-2014-die-neuwagen-mit-dem-geringsten-wertverlust_aid_559341.html].
- [48] N. Gordon-Bloomfield, „What Will The True Residual Value of a Used EV Be? Toyota May Provide the Answer,“ 15. Juni 2010. [Online]. [Zugriff am 11. Januar 2011, http://www.allcarselectric.com/blog/1046171_what-will-the-true-residual-value-of-evs-be].
- [49] J. Batchelor, „EVs lose two thirds?,“ 11. April 2011. [Online]. [Zugriff am 13. April 2011, <http://www.cardealermagazine.co.uk/publish/8k-bill-for-replacing-ev-batteries>].
- [50] comparecontracthire.com, „CAP gives Nissan Leaf Electric Vehicle a 40% residual value forecast,“ 6. Oktober 2010. [Online]. [Zugriff am 7. Dezember 2011, <http://www.comparecontracthire.com/blog/index.php/2010/10>].
- [51] A. Brillen, „Leasing unter Strom - Die Elektromobilität könnte den Finanzierern neue Energie liefern,“ *Automobilwoche*, p. 10, 27. Juni 2011.
- [52] M. Puthz, „Batterie oder Benzin - Womit fährt man besser?,“ *Autobild*, Bd. 14, pp. 55-59, 8. April 2011.
- [53] Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, „HyWays - Hydrogen Energy in Europe,“ Ottobrunn, 2008.
- [54] G. A. Teichmann, J. Trützscher, C. Hahn, P. K. Schäfe, A. Hermann und K. Höhne, „Elektromobilität – Normen bringen die Zukunft in Fahrt,“ DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, 2012.
- [55] W. Zimmer, M. Buchert, S. Dittrich, F. Hacker, R. Harthan, H. Hermann, W. Jenseit, P. Kasten, C. Loreck, K. Götz, G. Sunderer, B. Birzle-Harder und J. Deffner, „Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft (OPTUM),“ Öko-Institut e.V., Freiburg, 2012.
- [56] European School of Management and Technology (ESMT), „Marktmodell Elektromobilität (MMEM),“ Berlin, September 2011.
- [57] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie: VDI 3780 Technikbewertung - Begriffe und Grundlagen, Beuth Verlag, 2000.
- [58] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations*, New York, New York, USA: The Free Press, 1995.
- [59] H.-H. Braess und U. Seiffert, *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 5. Hrsg., Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2007.
- [60] I.-A. Viorel, L. Szabó, L. Löwenstein und C. Stet, „Integrated Starter-Generators for Automotive Applications,“ *Acta Electrotehnica*, Bd. 45, Nr. 3, pp. 255-260, 2004.
- [61] P. Hofmann, *Hybridfahrzeuge: Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*, Wien: Springer-Verlag, 2010.
- [62] Audi AG, „Audi Q5 hybrid,“ [Online]. [Zugriff am 5. Februar 2012, <http://www.audiusa.com/models/audi-q5-hybrid>].
- [63] BMW AG, „Der BMW Active Hybrid 7,“ [Online]. [Zugriff am 5. Februar 2012, <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/7er/activehybrid-7/2012/start.html>].

- [64] Volvo Cars, „V60 Plug-in Hybrid,“ [Online]. [Zugriff am 5. Februar 2012, <http://www.volvocars.com/intl/campaigns/hybrid/pages/v60-plugin-hybrid.aspx>].
- [65] Audi AG, „Audi - Erlebniswelt - Designstudien,“ [Online]. [Zugriff am 5. Februar 2012, http://www.audi.de/content/de/brand/de/erlebniswelt/design___technologie/design-studien/audi_a1_e-tron.html].
- [66] U. Grebe und L. Nitz, „Voltec: Das Antriebssystem für Chevrolet Volt und Opel Ampera,“ *MTZ*, Bd. 5, Nr. 72, pp. 342-351, 2011.
- [67] Volkswagen AG, „Innovation - Research Vehicles - TwinDrive,“ [Online]. [Zugriff am 5. Februar 2012, http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/en/innovation/research_vehicles/twinDRIVE.html].
- [68] R. v. Helmholt und U. Eberle, „Fuel cell vehicles: Status 2007,“ *Journal of Power Sources*, pp. 833-843, Volume 165, Issue 2, 20. März 2007.
- [69] McKinsey & Company, *The Role of Battery Electric Vehicles, Plug-In Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles*, New York, New York, USA: McKinsey & Company, 2010.
- [70] A. Lamm, „Elektrische Antriebe bei Daimler mit Fokus auf Hochvolt-Lithium-Ionen-Batterien,“ in *Kraftwerk Batterie 2012*, Münster, 7. März 2012.
- [71] I. Buchmann, *Batteries in a Portable World*, Richmond, Canada: Cadex Electronics Inc., 2011.
- [72] A. Jossen und W. Weydanz, *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*, Leipzig und München, 2006.
- [73] K. Möller, „Doppelschichtkondensatoren und ihre Anwendung als Energiespeicher in Hybridfahrzeugen,“ *Aktuelle Wochenschau* (online), 30 Juni 2010.
- [74] G. Babel, *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik*, Bd. 2. Auflage, Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag, 2009.
- [75] *Berliner Zeitung*, „Großversuch mit Elektroautos beendet,“ [Online]. [Zugriff am 29. März 2011, <http://www.berliner-zeitung.de/archiv/volkswagen-bringt-seine-fahrzeuge-zurueck---opel-setzt-tests-fort-grossversuch-mit-elektroautos-beendet,10810590,9145930.html>].
- [76] B. Otterbach, „Geheimnis der Hochstromfähigkeit gelüftet,“ *Automobil-Industrie Marktnachrichten* [online], 10 Januar 2012.
- [77] Toyota, „Prius: The hybrid that startet it all,“ [Online]. [Zugriff am 29. März 2011, <http://www.toyota.com/prius/#!/Welcome>].
- [78] BMW AG, „All BMW Active Hybrid Models,“ [Online]. [Zugriff am 29. März 2011, http://www.bmw.com/com/en/active_hybrid/overview.html].
- [79] D.-U. Sauer, „Speichertechnologien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge,“ in *Internationaler ETG Kongress*, 2007.
- [80] E. R. Bareschee, „Batterieproduktion in Europa: Wahnwitz oder Alleinstellungsmerkmal?,“ in *VDMA Konferenz*, Frankfurt, 30. Mai 2011.
- [81] J. W. Fergus, „Recent developments in cathode materials for lithium ion batteries,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 195, pp. 929-954, 2010.
- [82] A. Thielmann, R. Isenmann und M. Wietschel, „Technologie Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030,“ *Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)*, Karlsruhe, Juni 2010.

- [83] B. Scrosati und J. Garche, „Lithium batteries: Status, prospects and future,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 195, pp. 2419-2430, 2010.
- [84] cars21.com, „Battery update - market developments, current trends,“ [Online]. [Zugriff am 21. Juni 2011, <http://www.cars21.com>].
- [85] W. Tahil, „The Trouble with Lithium 2 - Under the Microscope,“ Meridian International Research, Martainville, Frankreich, 2008.
- [86] B. Cooke, „A More Detailed Look at a Prismatic Li-ion Cell and Pack Manufacturing Process,“ *Green Car Congress*, 23. Februar 2010.
- [87] A123 Systems, „Produkt-Homepage,“ [Online]. [Zugriff am 13. September 2011; <http://www.a123systems.com/products-overview.htm>].
- [88] Johnson Controls, „Batteries Produkthighlights,“ [Online]. [Zugriff am 13. September 2011; http://www.johnsoncontrols.de/publish/de/de/products/automotive_experience/iaa2011/product-preview/products-batteries.html].
- [89] Valence, „XP-U BMS: Battery Management System,“ [Online]. [Zugriff am 24. November 2011, <http://www.valence.com>].
- [90] Hybrid-Autos.info, „Lithium Ionen Batterie des Nissan Leaf,“ [Online]. [Zugriff am 11. März 2012; http://www.hybrid-autos.info/images/stories/News/Pressemeldungen/Nissan/Lithium_Ionen_Batterie_Nissan_gross.jpg].
- [91] The Detroit Bureau, „Nissan Leaf Battery Pack,“ [Online]. [Zugriff am 11. März 2012, <http://www.thedetroitbureau.com/wp-content/uploads/2010/10/Nissan-Leaf-battery-pack.jpg>].
- [92] A. Farschtschi, *Elektromaschinen in Theorie und Praxis: Aufbau, Wirkungen, Anwendungen, Auswahl- und Auslegungskriterien*, Braunschweig: VDE-Verlag, 2001.
- [93] R. Schmid, „Produktion von Elektromotoren für Elektrofahrzeuge bei Continental,“ *VDMA Infotag: Elektromobilität und die Montage- und Handhabungstechnik*, Frankfurt am Main, 30. Mai 2011.
- [94] B. C. Mecrow und A. G. Jack, „Efficiency trends in electric machines and drives,“ *Energy Policy*, Bd. 36, pp. 4336 - 4341, 2008.
- [95] J. Franke, „Neue Antriebe, neue Montageprozesse, neue Mobilitätskonzepte - Elektromobilität braucht querdenkende Anlagenbauer,“ *VDMA Infotag: Elektromobilität und die Montage- und Handhabungstechnik*, Frankfurt am Main, 30. Mai 2011.
- [96] Roland Berger Strategy Consultants, „Powertrain 2020 - The Future Drives Electric,“ München, 2009.
- [97] A. Binder, *Elektrische Maschinen und Antriebe*, Darmstadt: Springer, 2012.
- [98] O. Haala, „Maschinentypen,“ [Online]. [Zugriff am 23. Januar 2012: <http://www.th-nuernberg.de/institutionen/fakultaeten/elektrotechnik-feinwerktechnik-informationstechnik/forschungsaktivitaeten/projekte/oliver-haala/antriebsregelung/maschinentypen/permanenterregte-synchronmaschine/page.html>].
- [99] K. Fuest und P. Döring, *Elektrische Maschinen und Antriebe*, Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2007.

- [100] D. Schüler, M. Buchert, R. Liu, S. Dittrich und C. Merz, „Study on Rare Earths and Their Recycling,“ Öko-Institut e.V., Freiburg, Januar 2011.
- [101] H.-C. Fickel, D. Gleyzes, R. Harrison und J. Gebert, „Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug für emissionsfreie Mobilität,“ *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, pp. 308-313, Ausgabe Nr.: 2011-04.
- [102] McKinsey & Company, "A portfolio of powertrains for Europe: a fact-based analysis," McKinsey & Company, 2011.
- [103] J. Werhahn, *Kosten von Brennstoffzellensystemen auf Massenbasis in Abhängigkeit von der Absatzmenge*, Jülich / Aachen: Forschungszentrum Jülich, 2009.
- [104] E. J. Carlson, P. Kopf, J. Sinha, S. Sriramulu und Y. Yang, „Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for Transportation,“ Forschungsbericht, veröffentlicht von TIAX LLC und National renewable Energy Laboratory (NREL), Cambridge, Massachusetts, USA / Golden, Colorado, USA, 2005.
- [105] H. Eichseder und M. Klell, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2010.
- [106] B. Eide, *Regelung und Optimierung eines Brennstoffzellensystems für die Hausenergieversorgung*, Kassel: kassel university press, 2008.
- [107] P. Kurzweil, *Brennstoffzellentechnik*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2003.
- [108] J. Wehrhahn, „Kosten von Brennstoffzellensystemen auf Massenbasis in Abhängigkeit von der Absatzmenge,“ Forschungszentrum Jülich, Jülich, 2009.
- [109] D. Wheeler und G. Sverdrup, „2007 Status of Manufacturing: Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, USA, 2007.
- [110] R. von Helmolt und U. Eberle, „Fuel cell vehicles: Status 2007,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 165, Nr. 2, p. 833–843, 2007.
- [111] M. Wietschel, U. Bünger und W. Weindorf, „Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger,“ Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2010.
- [112] P. Mock und S. Schmid, „Fuel cells for automotive powertrains - a techno-economic assessment,“ *Journal of Power Sources*, Nr. 190, p. 133, 2009.
- [113] S. Satyapal, „DOE Fuel Cell R&D Progress,“ US Department of Energy, Shanghai, China, 2010.
- [114] CONCAWE, European Council for Automotive R&D (EUCAR), European Commission Directorate General, Joint Research Center (JRC), „Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context; Well-to-Wheels Report,“ 2007.
- [115] C. Bangemann, „Neue Stromlinie,“ *Auto, Motor und Sport*, pp. 58-64, Juni 2010.
- [116] smart, „Der smart fortwo electric drive,“ [Online]. [Zugriff am 29. März 2011, <http://www.smart.de/de/de/index/smart-fortwo-electric-drive.html>].

- [117] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), „Laufende Raumbbeobachtung - Raumabgrenzungen: Siedlungsstrukturelle Regionstypen,“ 2009. [Online]. [Zugriff am 23. Juni 2010, http://www.bbsr.bund.de/cln_016/nn_103086/BBSR/DE/Raumbbeobachtung/Werkzeuge/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/Regionstypen/regionstypen.html].
- [118] C. Rehtanz und J. Rolink, „Rahmenbedingungen zum Lastmanagement von Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen,“ in Internationaler ETG-Kongress 2009 - Fachtagung, Düsseldorf, 2009.
- [119] I. Gauß, „Diffusion von Produktinnovationen im Lithium-Ionen Batterie Markt,“ Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Münster/Stuttgart, November 2007.
- [120] Harro Höfliger Verpackungsmaschinen GmbH, Manufacture of lithium-ion polymer batteries, Almersbach im Tal, 2011.
- [121] United States Geological Survey (USGS), "Mineral Commodity Summaries 2011," Reston, Virginia, USA, 2011.
- [122] Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), „Lithium - begehrter Rohstoff der Zukunft. Eine Verfügbarkeitsanalyse,“ Ulm, 2010.
- [123] United States Geological Survey (USGS), „2008 Minerals Yearbook,“ Reston, Virginia, USA, 2008.
- [124] K. Evans, „An Abundance of Lithium,“ Forschungsbericht, veröffentlicht an der North Carolina State University (NCSU), Raleigh, North Carolina, USA, 2008.
- [125] Mineralprices.com, „Minor Metals,“ [Online]. [Zugriff am 9. Mai 2011, <http://mineralprices.com>].
- [126] finanzen.net, „Rohstoffe - Kupferpreis,“ [Online]. [Zugriff am 14. März 2012, <http://www.finanzen.net/rohstoffe/kupferpreis>].
- [127] finanzen.net, „Rohstoffe - Aluminiumpreis,“ [Online]. [Zugriff am 14. März 2012, <http://www.finanzen.net/rohstoffe/aluminiumpreis>].
- [128] London Metal Exchange, „LME Steel Billet,“ [Online]. [Zugriff am 17. Juli 2011, <http://www.lme.com/steel/index.asp>].
- [129] Automotive Energy Supply Cooperation, [Online]. [Zugriff am 26. Juli 2011, <http://www.eco-aesc-lb.com/en/>].
- [130] General Motors, „Chevrolet Volt's revolutionary Voltec drive system delivers efficiency with performance,“ Pressebericht, 2010.
- [131] M. Pfliegerl, „Sanyo: Massenproduktion von Lithium-Ionen-Batterien startet 2009,“ 2. Juni 2008. [Online]. [Zugriff am 16. Januar 2012, <http://www.wattgehtab.com/batterie/sanyo-massenproduktion-von-lithium-ionen-batterien-startet-2009-2040>].
- [132] S. Abuelsamid, „Nissan-NEC JV to invest for 200,000 Li-ion batteries annually by 2011,“ 2008. [Online]. [Zugriff am 29. Dezember 2011, <http://green.autoblog.com/2008/12/29/nissan-nec-jv-to-invest-for-200-000-li-ion-batteries-annually-by>].
- [133] M. Pfliegerl, „Toshiba steigt in die Massenproduktion von Li-Ion-Batterien für E-Fahrzeuge ein,“ 26. Oktober 2008. [Online]. [Zugriff am 16. Januar 2012, <http://www.wattgehtab.com/batterie/toshiba-steigt-in-die-massenproduktion-von-li-ion-batterien-fur-e-fahrzeuge-ein-2214>].

- [134] SBLimotive, „SB LiMotive startet Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen,“ Presseinformation, 2010.
- [135] J. Klingbeil, „Persönliche Kommunikation, Laserschweißen von Statoren,“ Vertriebsleiter Europa Aumann GmbH, 26. Januar 2012.
- [136] A. Brinner, „Persönliche Kommunikation,“ 19. Januar 2011.
- [137] Hohsen Inc., „Mixing Machine,“ [Online]. [Zugriff am 21. Juli 2011, <http://www.hohsen.co.jp/en/products/detail.php?id=8>].
- [138] Coatema, „Datenblatt Basecoater 200 (BC 34),“ Coatema, 2011.
- [139] T. Schlick, G. Hertel, B. Hagemann, E. Maier und M. Kramer, „Zukunftsfeld Elektromobilität - Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau,“ Roland Berger Strategy Consultants, Frankfurt, Mai 2011.
- [140] C. Busch, „Roboter basierende Serienproduktion von Lithium-Ionen Fahrzeugbatterien,“ 30. März 2011.
- [141] F. Hanne, „Leichtbaukonzepte mit CFK im Automobilbau: Untersuchung der Herstellkosten am Beispiel Spant und Wabentank,“ Universität Stuttgart, Stuttgart, Februar 2008.
- [142] K.-U. Vayhinger, "Firma Manz, E-Mail Kommunikation: Produktionsschritte und -kosten," 7. Juli 2011.
- [143] PEC N. V., „Datenblatt SBT4050 Battery Life Test System,“ Leuven, Belgien, 2011.
- [144] PEC N. V., „Datenblatt SBT10050 Battery Life Test System,“ Leuven, Belgien, 2011.
- [145] D. Spath, W. Bauer, S. Voigt, D. Borrmann, F. Herrmann, M. Brand, P. Rally, F. Rothfuss, C. Sachs, B. Frieske, B. Propfe, M. Redelbach, S. Schmid und J. Dispan, „Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung (ELAB),“ Daimler AG, Hans-Böckler-Stiftung, IG Metall Baden-Württemberg, Stuttgart, 2012.
- [146] Battery University, „Electric Vehicle,“ [Online]. [Zugriff am 30. Dezember 2011, http://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle].
- [147] Zeit Online, „Kultiviert fahren im Elektro-Golf,“ [Online]. [Zugriff am 30. Dezember 2011, <http://www.zeit.de/auto/2010-09/elektroauto-volkswagen-golf/komplettansicht>].
- [148] M. Winter, „"Inactive" Materials in Lithium Ion Batteries,“ in Kraftwerk Batterie, Aachen, 2011.
- [149] G. F. Nemet, „Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics,“ Energy Policy 34, pp. 3218-3232, 2006.
- [150] P. Ghemawat, "Building strategy on the experience curve," Harvard Business Review, 1985.
- [151] N. Liepold, „Scoring Modell: Vorstellung der Scoring Methode als Entscheidungshilfe bei der Lieferantenauswahl für Verkehrsdienstleistungen,“ GRIN Verlag, Norderstedt, 2011.
- [152] D. L. Anderson und D. Patiño-Echeverri, „An Evaluation of Current and Future Costs for Lithium-Ion Batteries for Use in Electrified Vehicle Powertrains,“ Nicholas School of the Environment of Duke University, 2009.
- [153] autobloggreen, „Battery cost dropping below \$200 per kWh soon, says Tesla's Elon Musk,“ [Online]. [Zugriff am 14. März 2012, <http://green.autoblog.com/2012/02/21/battery-cost-dropping-below-200-per-kwh-soon-says-teslas-elon/>].
- [154] J. Arlidge, „The Leaf out of the Green Book,“ The Sunday Times, 4. April 2010.

- [155] P. F. Brosch, *Moderne Stromrichterantriebe*, Würzburg: Vogel Fachbuch Kamprath-Reihe, 2008.
- [156] Karl Ruggaber GmbH & Co. KG, „Kupferdraht,“ [Online]. [Zugriff am 31. Januar 2012, <http://www.ruggaber.de/kupfer/index.htm>].
- [157] SKF Gruppe, [Online]. [Zugriff am 31. Januar 2012, <http://www.skf.com/portal/skf/home/industries?contentId=885366>].
- [158] Jiangyin Chuangjia Electrical Appliance Co., Ltd., [Online]. [Zugriff am 31. Januar 2012, http://www.alibaba.com/product-gs/531756730/Motor_Stator_Core.html].
- [159] MACCON GmbH, „Maccon Sensoren,“ [Online]. [Zugriff am 31. Januar 2012, <http://www.maccon.de/de/sensoren/magnetische-encoder/resolver.html>].
- [160] Elosal KG, „Einkaufen - Kohlebürsten,“ [Online]. [Zugriff am 31. Januar 2012, <http://www.elosal.de/waren/kohlebuersten/motorkohlekab/501158955b1068c01.php>].
- [161] Ningbo Sanlian Die-Casting Factory, [Online]. [Zugriff am 31. Januar 2012, http://www.alibaba.com/product-gs/340580216/Aluminum_motor_housing_for_MEC_electric.html].
- [162] statista, „Industriestrompreise in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2013 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde),“ [Online]. [Zugriff am 20. Dezember 2011, <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/155964/umfrage/entwicklung-der-industriestrompreise-in-deutschland-seit-1995/>].
- [163] Hengstbeck & Eich GmbH & Co., „Hydraulische Pressen,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://www.h-e-maschinenbau.de/maschinen/hydraulische-pressen/hydraulische-multifunktionspressen.html>].
- [164] GMW, „Products - Stator In-Slot Winding Machine,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://www.gmw.com.tw/stator-in-slot-winding-machine.html>].
- [165] M-Pulse GmbH & Co. KG, „Magnetisiergeräte von M-Pulse,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://www.m-pulse.biz/deutsch/produkte/magnetisiergeraete1.html>].
- [166] Shanghai Jianping Dynamic Balancing Machine Manufacturing Co., Ltd. , „Balancing Machine for Electric Armature (PHQ-50),“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, http://www.alibaba.com/product-gs/395365448/Balancing_Machine_for_Electric_Armature_PHQ.html].
- [167] Alibaba.com, „Machine for Slot Insulation,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://www.alibaba.com/showroom/machine-for-slot-insulation.html>].
- [168] GMW, „Products, Slot Cell Insertion Machine,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://www.gmw.com.tw/cs-11c-stator-slot-cell-inserter.html>].
- [169] Statomat GmbH, „Wickeln,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://elmotec-stomat.eu/index.php/de/produkte/2011-08-09-12-59-25/wickeln-einzelmaschinen>].
- [170] Longkou Zhongji Electrical Machinery Co., Ltd., „Coil Inserting Machine, KX4L-1625,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://electricalmachine.net/kx4.html>].
- [171] Statomat GmbH, „Produkte - Formen,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://elmotec-stomat.eu/index.php/de/produkte/2011-08-09-12-59-25/formen>].

- [172] AWM Weidner, „Tube Fusing Machine GF351000,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, http://www.awm-weidner.de/k_crimpen_sonst/gf351000.pdf].
- [173] Longkou Zhongji Electrical Machinery Co., Ltd., „Banding Machine Series BZ6t-4525,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://electricalmachine.net/bz6t.html>].
- [174] SPS electronic, „Stator-Testsystem 6.000V,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://www.directindustry.de/prod/sps-electronic/stator-testsysteme-14560-57034.html>].
- [175] BARTEC Dispensing Technology GmbH, „Standard Impregnation Machines,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://www.bartec-dt.com/impregnation-machines-standard-machines.php>].
- [176] New Borel SA, „Borel-Oefen & Wärmeschränke - Standardprodukte - Industrietrockenöfen,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://www.borel-ofen.com/ofen/index.html>].
- [177] Ningbo Nide Mechanical Equipment Co., Ltd. , „Motor Performance Testing Station,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://motor-machines.en.hisupplier.com/product-486232-motor-performance-testing-station.html>].
- [178] SPS electronic, „Motorenprüfsystem MEA,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://www.spselectronic.com/produkte/automation/artikel/motorenpruefsystem-mea.html>].
- [179] PSAFL Cargo Brokers GmbH, „Lkw-Fracht: Tarif-Übersicht,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, <http://www.cargo-brokers.com/services/lkw-fracht/tarif-uebersicht/>].
- [180] C. Mallok, „Deutsche Elektroindustrie gibt 1,7% ihres Umsatzes für Marketing aus,“ [Online]. [Zugriff am 26. Januar 2012, http://www.elektronikpraxis.vogel.de/marketing_vertrieb/articles/286940/].
- [181] Bundesverband der Deutschen Industrie e.V., Arbeitskosten im internationalen Vergleich 2011, Köln: IW Köln, 2011.
- [182] G. Angerer, F. Marscheider-Weidemann, A. Lüllmann, L. Erdmann, M. Scharp, V. Handke und M. Marwede, „Rohstoffe für Zukunftstechnologien - Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage,“ Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, 15. Mai 2009.
- [183] D. Bubar, Unternehmenspräsentation der Avalon Rare Metals Inc., 4. Mai 2011.
- [184] Roland Berger Strategy Consultants, „The Rare Earth challenge: How companies react and what they expect for the future,“ Stuttgart, September 2011.
- [185] P.-K. Tse, „China's Rare Earths Industry,“ US Department of the Interior, US Geological Survey, Reston, Virginia, USA, 2011.
- [186] ntv.de, „Kampf um Seltene Erden: China stoppt Förderung,“ [Online]. [Zugriff am 14. Januar 2011, <http://www.n-tv.de/wirtschaft/China-stoppt-Foerderung-article4559911.html>].
- [187] E. Keane, „Neodymium Magnets Provide Key to Understanding Rare Earth Trends,“ [Online]. [Zugriff am 27. Juli 2011, <http://seekingalpha.com/instablog/345817-eamon-keane/9675-neodymium-magnets-provide-key-to-understanding-rare-earth-trends>].
- [188] J. Hykawy, A. Thomas und G. Casasnovas, „The Rare Earths - Pick Your Spots, Carefully,“ Byron Capital Markets, Toronto, Kanada, 25. März 2010.

- [189] H. Kara, A. Chapman, T. Crichton, P. Willis und N. Morley, „Lanthanide Resources and Alternatives,“ Oakdene Hollins Research & Consulting, Aylesbury, Großbritannien, Mai 2010.
- [190] S. Rogers, R. R. Fessler und M. Olszewski, „Final Report on Assessment of Motor Technologies for Traction Drives of Hybrid and Electric Vehicles,“ United States Department of Energy, FreedomCAR and Vehicle Technologies, Washington, D.C., USA, Mai 2011.
- [191] „DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung,“ Juni 2003.
- [192] „DIN EN 13306: Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung,“ Oktober 2008.
- [193] ADAC e. V., „Autokosten 2010, 4. Ausgabe,“ ADAC e. V., München, 2010.
- [194] United States Department of Energy (DOE), "Fuel Cell Buses - Report to Congress," United States Department of Energy (DOE), 2009.
- [195] J. Vetter, P. Novak, M. R. Wagner, C. Veit, K. C. Möller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler und A. Hammouche, „Ageing mechanisms in lithium-ion batteries,“ Journal of Power Sources, Bd. 147, p. 269–281, 2005.
- [196] D. P. Abraham, J. L. Knuth, D. W. Dees, I. Bloom und J. P. Christophersen, „Performance degradation of high-power lithium-ion cells - Electrochemistry of harvested electrodes,“ Journal of Power Sources, Bd. 170, p. 465–475, 2007.
- [197] S. B. Peterson, J. Apt und J. F. Whitacre, „Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization,“ Journal of Power Sources, Bd. 195, p. 2385–2392, 2010.
- [198] M. Broussely, P. Biensan, F. Bonhomme und P. Blanchard, „Main aging mechanisms in Li ion batteries,“ Journal of Power Sources, Bd. 146, p. 90–96, 2005.
- [199] J. Link, M. Büttner, D. Dallinger und J. Richter, „Optimisation Algorithms for the Charge Dispatch of Plug-in Vehicles based on Variable Tariffs,“ Working Papers "Sustainability and Innovation" S3/2010, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI), Karlsruhe, 2010.
- [200] C. Rosenkranz, Mobile Speicher elektrischer Antriebsenergie – Lebensdauer und Belastung von Batterien, 6.11.2009: Dritte Niedersächsische Energietage „Energie und Mobilität“, 2009.
- [201] P. Kleine-Möllhoff, H. Benad, F. Beilard, M. Esmail und M. Knöll, Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft: Herausforderungen – Potenziale – Ausblick, Reutlingen: Hochschule Reutlingen, 2012.
- [202] Verband der deutschen Automobilindustrie (VDA), Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten - Verfahren und Beispiele, 2. und 3. Auflage, 2000.
- [203] G. Bol, Wahrscheinlichkeitstheorie, München: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH, 2007.
- [204] Kraftfahrtbundesamt (KBA), „Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Herstellern und Handelsnamen - Jahr 2010 - FZ 4,“ Kraftfahrtbundesamt (KBA), Flensburg, 2010.
- [205] A. Rousseau, „Impact of Real World Drive Cycles on PHEV Fuel Efficiency and Cost for Different Powertrain and Battery Characteristics,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, Illinois, USA, Juni 2009.

- [206] A. Neudorfer, A. Binder und N. Wicker, „Analyse von unterschiedlichen Fahrzyklen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen,“ *Elektrotechnik & Informationstechnik*, pp. 352-360, Heft 7/8 2006.
- [207] A. DaCosta, Persönliche Kommunikation, 30. Dezember 2011.
- [208] S. Schweiger, *Lebenszykluskosten optimieren: Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern*, Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- [209] A. A. Rasch, *Erfolgspotential Instandhaltung: theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements*, Duisburg / Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., 2000.
- [210] T. Wenzel, *Lebenszykluskosten und die Beurteilung der Preiswürdigkeit neuer Gebrauchsgüter durch Konsumenten*, Osnabrück, 2006.
- [211] EurotaxSchwacke GmbH, „Schwacke Liste,“ [Online]. [Zugriff am 23. November 2011, <http://www.schwacke.de>].
- [212] Kraftfahrtbundesamt (KBA), „Neuzulassungen von Personenkraftwagen - Jahr 1998,“ Kraftfahrtbundesamt (KBA), Flensburg, 1999.
- [213] D. Santini, Y. Zhou und A. Vyas, „An Analysis of Car and SUV Daytime Parking for Potential Opportunity Charging of Plug-in Electric Powertrains,“ in *EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Los Angeles, Kalifornien, USA, 6. Mai 2012.
- [214] Daimler AG, „B-Klasse F-CELL erreicht siebtes Land der Weltumrundung: Über 5.000 Kilometer durch Australien – F-CELL World Drive startet dritten Streckenabschnitt,“ [Online]. [Zugriff am 26. April 2011, <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-1357913-49-1379590-1-0-0-0-0-17405-854934-0-1-0-0-0-0-0.html>].
- [215] A. da Costa, „Fuel consumption potential of different plug-in hybrid vehicle architectures in the European and American contexts,“ in *EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Los Angeles, Kalifornien, USA, 7. Mai 2012.
- [216] Kraftfahrzeugsteuergesetz, §9: Steuersatz.
- [217] Bundesministerium der Finanzen, *Übersicht zur Kraftfahrzeugsteuer für Personenkraftwagen*, Berlin, 2009.
- [218] Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, 23. April 2009.
- [219] N. Röttgen, Rede auf dem auto motor und sport-Kongress, Stuttgart: Bundesumweltminister Norbert Röttgen, 2010.
- [220] M. Devineni, A. Dinger, M. Gerrits, T. Mezger, X. Mosquet, M. Russo, G. Sticher und H. Zablit, „Powering Autos to 2020: The Era of the Electric Car?,“ The Boston Consulting Group, Chicago, Illinois, USA, Juli 2011.
- [221] McKinsey & Company, „Boost! Transforming the powertrain value chain - a portfolio challenge,“ McKinsey & Company, 2011.
- [222] Energiesteuergesetz, §2: Steuertarif, 15. Juli 2006.

- [223] J. Nitsch, T. Pregger, Y. Scholz, T. Naegler, M. Sterner, N. Gerhardt, A. von Oehsen, C. Pape, Y.-M. Saint-Drenan und B. Wenzel, „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - Leitstudie 2010,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Ingenieurbüro für neue Energien, Stuttgart, Kassel, Teltow, Dezember 2010.
- [224] International Energy Agency, World Energy Outlook 2011, Paris, Frankreich, 2011.
- [225] C. G. Whitfield, „An Exploration of Automotive Platinum Demand and its Impacts on the Platinum Market,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, USA, Mai 2009.
- [226] finanzen.net, „Rohstoffe - Platinpreis,“ [Online]. [Zugriff am 14. März 2012, <http://www.finanzen.net/rohstoffe/platinpreis>].
- [227] Metal-Prices, „Metalprices - Neodymium,“ [Online]. [Zugriff am 14. März 2012, <http://www.metal-prices.com/metalprices/neodymium/>].
- [228] gas-tankstellen.de, „LPG & CNG Tankstellenverzeichnis,“ [Online]. [Zugriff am 14. März 2012, <http://www.gas-tankstellen.de/>].
- [229] Deutscher Bundestag, „Antrag der Abgeordneten Winfried Hermann, Hans-Josef Fell, Dr. Anton Hofreiter, Peter Hettlich, Bettina Herlitzius, Cornelia Behm, Bärbel Höhn, Ulrike Höfken, Sylvia Kotting-Uhl, Undine Kurth (Quedlinburg), Nicole Maisch,“ Umfassende Förderstrategie für grüne Elektromobilität entwickeln, Berlin, 17. Dezember 2008.
- [230] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, „Richtlinie zur Förderung des Absatzes von Personenkraftwagen,“ Bundesministerium der Justiz, Bundesanzeiger, amtlicher Teil, S. 2264-2265, Berlin, 2009.
- [231] P. Sankey, D. T. Clark und S. Micheloto, „The End of the Oil Age - 2011 and beyond: a reality check,“ Deutsche Bank, New York, New York, USA, 22. December 2010.
- [232] D. Lindenberger, M. Bartels, A. Seeliger, R. Wissen, P. Hofer und M. Schlesinger, „Auswirkungen höherer Ölpreise auf Energieangebot und -nachfrage - Ölpreisvariante der Energiewirtschaftlichen Referenzprognose 2030,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin, August 2006.
- [233] Oliver Wyman Consulting GmbH, „E-Mobility 2025 – The New Power Play to Win (or Lose),“ Oliver Wyman Consulting GmbH, München, Juli 2009.
- [234] J. Linssen, A. Schulz, S. Mischinger, H. Maas, C. Günther, O. Weinmann, E. Abbasi, S. Bickert, M. Danzer, W. Hennings, E. Lindwedel, S. Marker, V. Schindler, A. Schmidt, P. Schmitz, B. Schott, K. Strunz und P. Waldowski, „Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen (NETELAN),“ Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment; Band / Volume 150, 2012.
- [235] Greenpeace International, energy [r]evolution: a sustainable world energy outlook, 2012.
- [236] P. Lebutsch und M. Weeda, Study on roll-out of Fuel Cell Electric Vehicles and Hydrogen Refueling Infrastructure for the Netherlands (THRIVE), Petten, NL, 2011.

- [237] T. Pregger, D. L. d. Tena, M. O'Sullivan, N. Roloff, S. Schmid, B. Propfe, D. Hülsebusch, B. Wille-Hausmann, S. Schwunk, C. Wittwer, T. Pollok, S. Krahl und A. Moormann, Perspektiven von Elektro-/Hybridfahrzeugen in einem Versorgungssystem mit hohem Anteil dezentraler und erneuerbarer Energiequellen, Stuttgart/Aachen/Freiburg, 2012.
- [238] A.T.Kearney, Powertrain 2025, Stuttgart: A.T.Kearney, 2012.
- [239] McKinsey & Company, The fast lane to the adoption of electric cars, Detroit, Michigan, USA: McKinsey Quarterly, 2011.
- [240] Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Strukturstudie BWe mobil 2011, Stuttgart: e-mobil BW GmbH, 2011.
- [241] McKinsey & Company, Der Trend zu energieeffizienten Pkw, Berlin: McKinsey & Company, 2010.
- [242] J.D. Power and Associates, „Drive Green 2020: More Hope than Reality?“, Westlake Village, Kalifornien, USA, November 2010.
- [243] Industrie- und Handelskammer (IHK), Otto-, Diesel- oder Elektromotor - wer macht das Rennen?, Stuttgart: Industrie- und Handelskammer (IHK), Region Stuttgart, 2010.
- [244] International Energy Agency (IEA), „Technology Roadmap - Electric and plug-in hybrid electric vehicles“, Paris, Frankreich, 2010.
- [245] Center Automotive Research (CAR), Die Bedeutung der Elektromobilität für den Standort Deutschland und Defizite in der Förderung, Duisburg, 2010.
- [246] Bain & Company, „Der Markt für Elektroautos ist da – schon heute“, Bain & Company, Inc., München, 2010.
- [247] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, „Laufende Raumbbeobachtung - Raumabgrenzungen, Siedlungsstrukturelle Gebietstypen,“ [Online]. [Zugriff am 18. März 2012, http://www.bbsr.bund.de/cIn_032/nn_1067638/BBSR/DE/Raumbbeobachtung/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/gebietstypen__node.html?__nnn=true].
- [248] T. Heckenberger, „Kühlung von Li-Ionen Batterien: Mehr als nur eine weitere Kühlungsaufgabe“, Behr: Technischer Pressetag 2009, Stuttgart, 2009.
- [249] H. W. Alt, Lineare Funktionalanalysis, 5. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 2006.
- [250] Deutsches Institut für Wirtschaft, „Gutachten: Aktualisierung und Weiterentwicklung der Berechnungsmodelle für die Fahrleistungen von Kraftfahrzeugen für das Aufkommen und die Verkehrsleistung im Personenverkehr (MIV),“ Berlin, 2005.
- [251] J. Marques de Sá, Pattern Recognition - Concepts, Methods and Applications, Berlin: Springer Verlag, 2001.
- [252] H. Pruscha, Statistisches Methodenbuch - Verfahren, Fallstudien, Programmcodes, Berlin: Springer Verlag, 2005.
- [253] A. Rencher, Methods of Multivariate Analysis, New York, New York, USA: Jon Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [254] S. Viehmann, „Das Risiko Akku-Lebensdauer,“ Zeit, 20. Januar 2012.
- [255] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), „Bevölkerungsraumordnungsprognose,“ Berlin, 2011.

- [256] J. Bähr, „Einführung in die Urbanisierung,“ [Online]. [Zugriff am 23. Januar 2012, <http://www.berlin-institut.org/online-handbuchdemografie/bevoelkerungsdynamik/auswirkungen/urbanisierung.html>].
- [257] S. Stula und K. Linz, „Demografischer Wandel in Europa - Überblickspapier zur Europäischen Union,“ Beobachtungsstelle für gesellschaftspolitische Entwicklungen in Europa, Frankfurt, 2010.
- [258] W. Rudschies, „Im rechten Winkel in die Parklücke - Interview mit Rolf Najork (Schaeffler),“ Das elektrische Fahrtenbuch, 8. Februar 2012.
- [259] T. F. Fesefeldt, „Ganzheitliche Betrachtung zur Auswahl der Starteinrichtung des Verbrennungsmotors eines Parallel-Hybrids mit Trennkupplung,“ Darmstadt, Januar 2010.
- [260] M. Tamor und C. Gearheart, „An Analytic Method for Estimation of Electric Vehicle Range Requirements, Electrification Potential and Prospective Market Size,“ Ford Motor Company, Chicago, Illinois, USA, 2011.
- [261] K. Backhaus, B. Erichson und R. W. Wulff Plinke, Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung, 12. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 2008.
- [262] S. Eaves und J. Eaves, „A cost comparison of fuel-cell and battery electric vehicles - Short Communication,“ Journal of Power Sources, Bd. 130, pp. 208-212, 2004.
- [263] A. Simpson, „Cost-Benefit Analysis of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Technology,“ in 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS-22), Yokohama, Japan, 23. Oktober 2006.
- [264] J. van Mierlo, G. Maggetto und P. Lataire, „Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles,“ Energy Conversion and Management, Bd. 47, p. 2748-2760, 2006.
- [265] D. Santini und A. Vyas, „How to Use Life Cycle Analysis Comparisons of PHEVs to Competing Powertrains,“ in The 8th International Advanced Automotive Battery and Ultracapacitor Conference, Tampa, Florida, USA, 12. Mai 2008.
- [266] R. Hensley, S. Knupfer und D. Pinner, „Electrifying cars: How three industries will evolve,“ McKinsey Quarterly Nummer 3, McKinsey & Company, Detroit, Michigan, USA, 2009.
- [267] C.-S. N. Shiao, N. Kaushal, C. T. Hendrickson, S. B. Peterson, J. F. Whitacre und J. J. Michalek, „Electric, Optimal Plug-In Hybrid Vehicle Design and Allocation for Minimum Life Cycle Cost, Petroleum Consumption, and Greenhouse Gas Emissions,“ Journal of Mechanical Design, Bd. 132, pp. 091013-1 - 091013-11, 2010.
- [268] C. Thiel, A. Perujo und A. Mercier, „Cost and CO₂ aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios,“ Energy Policy, Bd. 38, p. 7142-7151, 2010.
- [269] The Boston Consulting Group (BCG), „The Comeback of the Electric Car? How Real, How Soon, and What Must Happen Next,“ Madrid / Düsseldorf, 2008.
- [270] K. Bodek und J. Heywood, „Europe's Evolving Passenger Vehicle Fleet: Fuel Use and GHG Emissions Scenarios through 2035,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Laboratory for Energy and Environment, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, USA, März 2008.

- [271] R. Lache, P. Nolan, D. Galves, G. Toulemonde, J. Gehrke, K. Sanger, V. Ha und S. Rao, „Electric Cars: Plugged In - Batteries must be included,“ Deutsche Bank, Frankfurt am Main, 9. Juni 2008.
- [272] A. Bandivadekar, K. Bodek, L. Cheah, C. Evans, T. Groode, J. Heywood, E. Kasseris, M. Kromer und M. Weiss, „On the Road in 2035: Reducing Transportation’s Petroleum Consumption and GHG Emissions,“ Laboratory for Energy and the Environment, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, USA, Juli 2008.
- [273] G. Klink, S. Krubasik und T. Rings, „Sparsam, sauber, elektrisch? Das Rennen um den Antrieb der Zukunft,“ A. T. Kearney GmbH, Düsseldorf, 2009.
- [274] Frost & Sullivan, „360 Degree Analysis of the Global Electric Vehicles Market,“ Frost & Sullivan, London, Großbritannien, März 2009.
- [275] S. Joest, M. Fichtner, M. Wietschel, U. Bünger, C. Stiller, P. Schmidt und F. Merten, „Studie zur Frage „Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?“ (GermanHy),“ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, August 2009.
- [276] Shell Deutschland Oil GmbH, „Shell PKW-Szenarien bis 2030,“ Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg, 2009.
- [277] G. Matthies, K. Stricker und J. Traenckner, „Zum E-Auto gibt es keine Alternativ,“ Bain & Company, Inc., München, 2010.
- [278] S. Feinberg, „Plug-in electric vehicles may make up 22% of US auto sales by 2030,“ Bloomberg New Energy Finance, New York, New York, USA, 1. November 2010.
- [279] D. Spath, W. Bauer, F. Rothfuss, S. Voigt und K. Rath, „Strukturstudie BWe mobil - Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität,“ Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart, 2010.
- [280] M. Nijboer, „The Contribution of Natural Gas Vehicles to Sustainable Transport,“ International Energy Agency (IEA), Paris, Frankreich, 2010.
- [281] Institut für Mobilitätsforschung (IFMO), „Zukunft der Mobilität – Szenarien für das Jahr 2030,“ München, 2010.
- [282] C. Malorny, J. Kluge, J. Wüllenweber und N. Müller, „Der Trend zu energieeffizienten PKW - Implikationen für die deutsche Automobilindustrie,“ McKinsey & Company, Berlin, 2009.
- [283] A. Kirchner und F. C. Matthes, „Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken,“ WWF Deutschland, Berlin, 15. Oktober 2009.
- [284] E. Rosenberg, A. Fidje, K. A. Espegren, C. Stiller, A. M. Svensson und S. Møller-Holst, „Market penetration analysis of hydrogen vehicles in Norwegian passenger transport towards 2050,“ International Journal of Hydrogen Energy, Bd. 35, pp. 7267-7279, 2010.
- [285] The Royal Academy of Engineering, „Electric Vehicles: charged with potential,“ London, Großbritannien, Mai 2010.
- [286] E. Heymann, O. Koppel und T. Puls, „Elektromobilität - Sinkende Kosten sind conditio sine qua non,“ Deutsche Bank, Frankfurt, 12. September 2011.
- [287] Deloitte & Touche GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, „A new era. Accelerating toward 2020 – An automotive industry transformed,“ Düsseldorf/München, 2011.

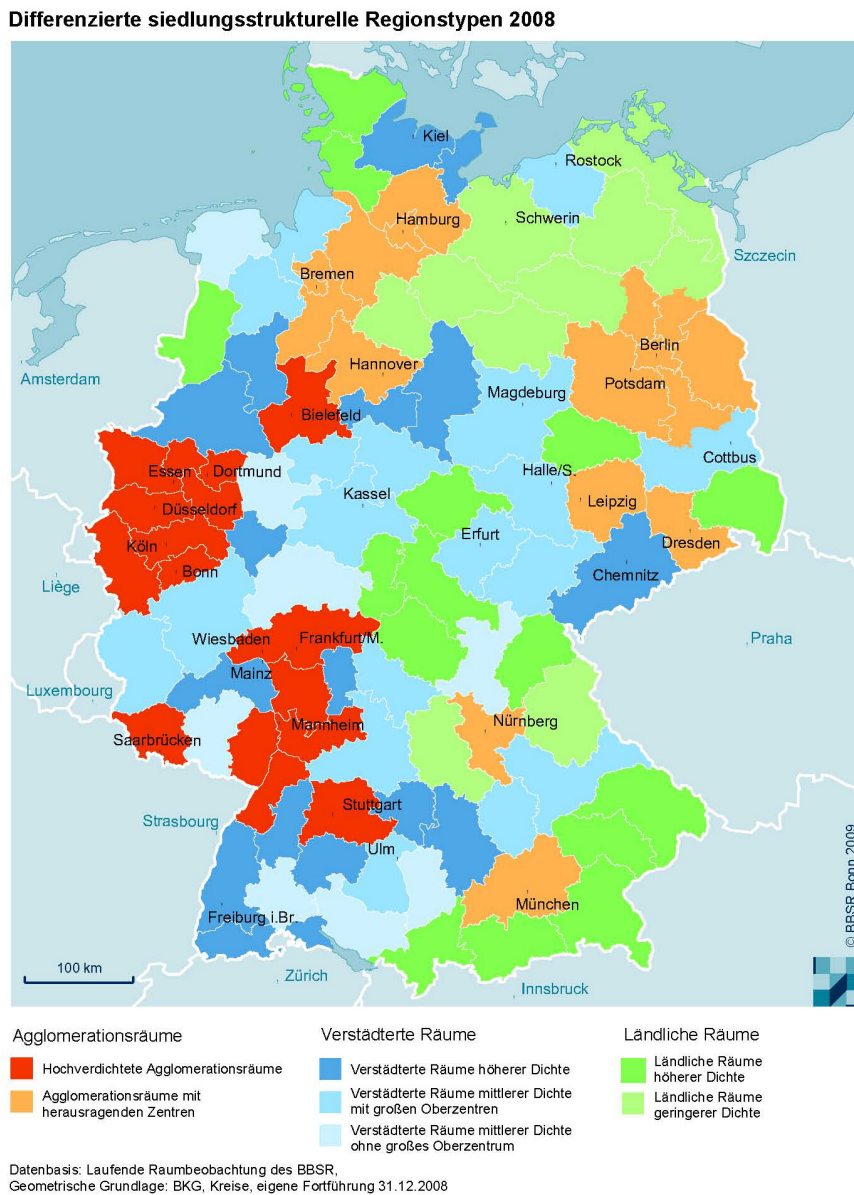
- [288] W. Schade, A. Peters, C. Doll, S. Klug, J. Köhler und M. Krail, „Vision für nachhaltigen Verkehr in Deutschland (VIVER),“ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, 2011.
- [289] Roland Berger Strategy Consultants, „Automotive landscape 2025: Opportunities and challenges ahead,“ 2011.
- [290] „DIN 40729: Akkumulatoren; Galvanische Sekundärelemente; Grundbegriffe,“ Ausgabedatum: Mai 1985.
- [291] F. Brotz, T. Isermeyer, C. Pfender und T. Heckenberger, „Kühlung von Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge,“ Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Bd. 109, Nr. 12/2007, pp. 1156-1162, 2007.
- [292] S. Jahn, „Clusteranalyse,“ Technische Universität Dresden, Dresden, 2007.
- [293] W. Langer, „Regressions- und Pfadanalyse,“ Institut für Soziologie, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, 2002.
- [294] R. Schnell, P. B. Hill und E. Esser, Methoden der empirischen Sozialforschung, München: Oldenbourg Verlag, 2008.
- [295] Gabler Wirtschaftslexikon, „Economies of Scale,“ 14. November 2011, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/economies-of-scale.html?referenceKeywordName=Skaleneffekt>.
- [296] J. Castonguay, Benchmarking Carrots and Sticks: Developing a Model for the Evaluation of Work-Based Employment Programs, Amsterdam, Niederlande: Amsterdam University Press, 2009.
- [297] Polinares, „Fact Sheet: Rare Earth Oxides (REO),“ POLINARES working paper n.37, März 2012.
- [298] Tesla Motors, Inc., „Tesla Model S,“ [Online]. [Zugriff am 12. März 2012, <http://www.teslamotors.com/models>].
- [299] Tesla Motors, Inc., „Tesla Roadster,“ [Online]. [Zugriff am 12. März 2012, <http://www.teslamotors.com/roadster>].
- [300] F. Murtagh, Correspondence Analysis and Data Coding with Java and R, Boca Raton, Florida, USA: Chapman & Hall/CRC, 2005.
- [301] H. Lee und G. Lovellette, „Will Electric Cars Transform The U.S. Vehicle Market? An Analysis of The Key Determinants,“ Forschungsbericht, veröffentlicht an der Harvard Kennedy School, Belfer Center for Science and International Affairs, Cambridge, Massachusetts, USA, Juli 2011.
- [302] S. Plotkin, A. V. D. Santini, J. Anderson, M. Wang, J. He und D. Bharathan, „Hybrid Electric Vehicle Technology Assessment: Methodology, Analytical Issues, and Interim Results,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, Illinois, USA, 2001.
- [303] J. Ogden und L. Anderson, „Sustainable Transportation Energy Pathways - A Research Summary for Decision Makers,“ Forschungsbericht, veröffentlicht vom Institute of Transportation Studies, University of California - Davis, Davis, Kalifornien, USA, 2011.
- [304] S. Albers, D. Klapper, U. Konradt, A. Walter und W. Joachim, Methodik der empirischen Forschung, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2009.

- [305] K. E. Train, Discrete Choice Methods with Simulation, New York, New York, USA: Cambridge University Press, 2009.
- [306] T. Hillig, Verfahrensvarianten der Conjoint-Analyse zur Prognose von Kaufentscheidungen, Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH, 2006.
- [307] A. Gustafsson, A. Herrmann and F. Huber, Conjoint Measurement: Methods and Applications, Berlin: Springer Science & Business Media, 2007.

Anhang

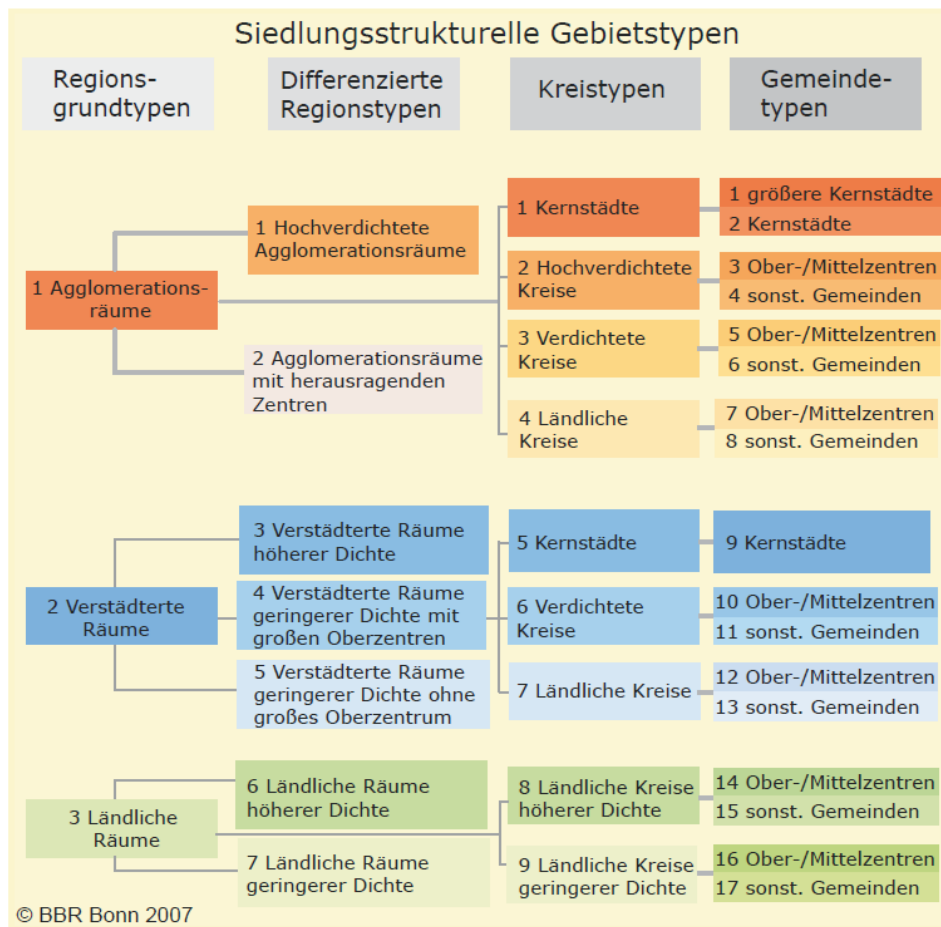
Anhang A: Siedlungsstruktur

Anhang A 1: Differenzierte siedlungsstrukturelle Regionstypen 2008.



Bildquelle: [247].

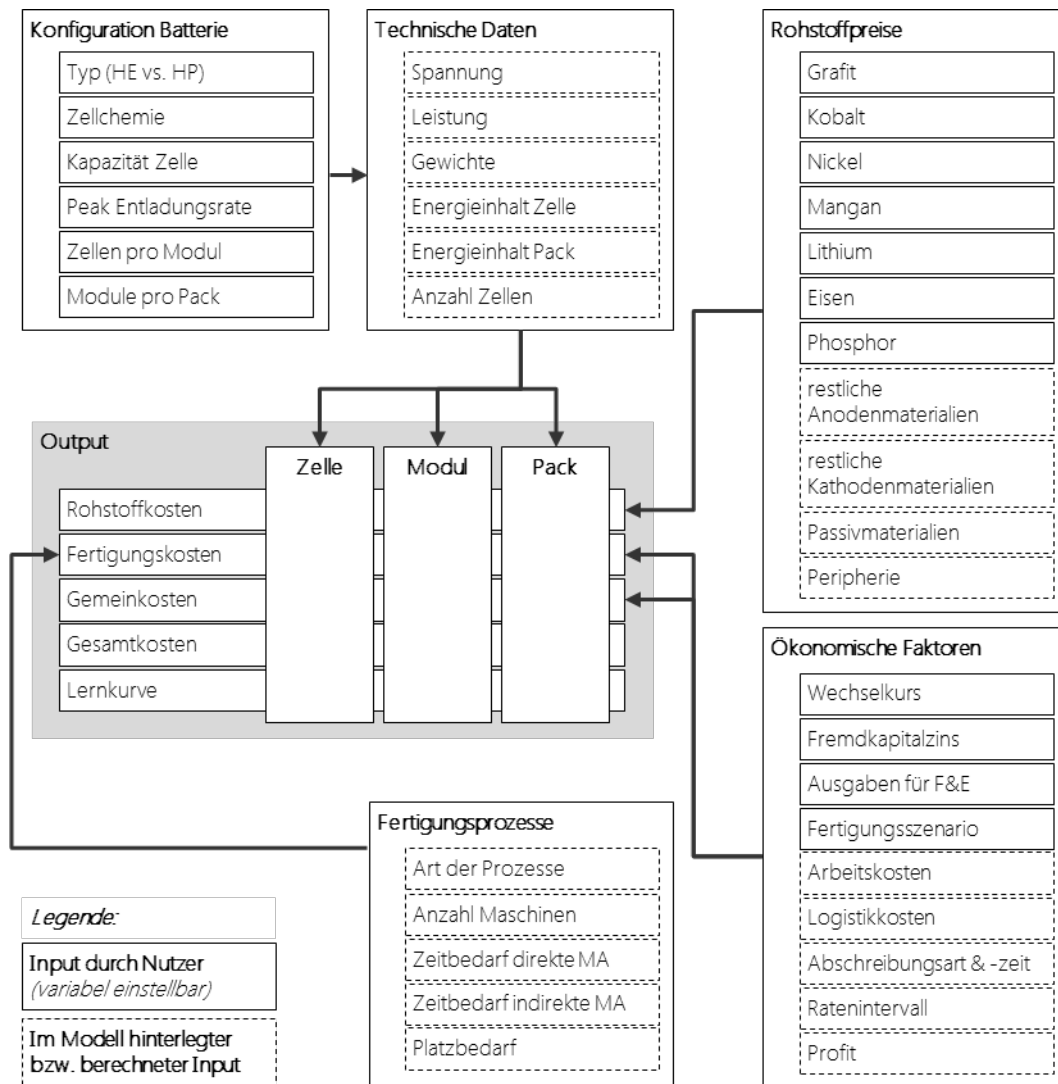
Anhang A 2: Differenzierung der siedlungsstrukturellen Gebietstypen.



Bildquelle: [247].

Anhang B: Produktionskosten von Traktionsbatterien und Elektromaschinen

Anhang B 1: Berechnungsschema des Batteriekostenmodells.



Anhang B 2: Eingabemaske des Batteriekostenmodells.

Eingabebox			Eingabe Wechselkurs		Produktion Fertigung 1	
Zelle	Einheit	Wert	Euro in Dollar	0,77	100.000 Packs pro Jahr	
Zelltyp	Name	NMC	Dollar in Euro	1,3	Produktion Fertigung 2	
Konfiguration	High Energy/Power	High Energy	1000 Packs pro Jahr			
Kapazität	Ah	34	Fremdkapitalzins			
Spannung	V	3,68	6,00%			
Peak Entladungsrate	C	1	Ausgaben für F+E			
Leistung	kW	0,13	15.000.000,00 €			
Energiemenge	kWh	0,1251	Eingabe Rohstoffpreise			
Zellen pro Modul	Anzahl	32	Graphit geringe Reinheit)	\$3,00		
...davon Parallel geschaltet	Anzahl	3	Cobalt	\$35,00		
Module pro Pack	Anzahl	9	Nickel	\$26,00		
Zellen Gesamt	Anzahl	288	Mangan	\$3,68		
Gesamt	kWh	36,03	Lithium	\$6,61		
			Eisen	\$2,17		
			Phosphor	\$0,12		

Grüne Zellen sind Input-Zellen und können geändert werden
 Zellen mit roter Schrift berechnen sich automatisch

Anhang B 3: Ausgabemaske des Batteriekostenmodells.

	Zelle		Modul		Pack		Gesamtkosten	
	Fertigung 1	Fertigung 2	Fertigung 1	Fertigung 2	Fertigung 1	Fertigung 2	Fertigung 1	Fertigung 2
Rohstoffkosten	102,56	115,55	28,82	31,46	11,84	13,12	143,22	160,14
Fertigungskosten	12,50	130,69	1,40	53,57	2,48	59,62	16,37	243,88
Overheadkosten	7,79	130,89	1,04	35,03	9,63	65,37	18,46	231,30
Gesamtkosten	122,85	377,14	31,26	120,06	23,95	138,11	178,06	635,31

Anhang B 4: Berechnungsmaske des Batteriekostenmodells: Rohstoffkosten Modul.

Edukt	Roh-, Hilfs- und Bedarfsstoffe				Modulkosten					
	Preis		Ec. of Scale p.a.		Bedarf		Kosten/Modul \$			
	\$ pro Kg bzw Stück	Bemerkung	Szenario I	Szenario II	Komponente	Gewicht (kg)	Stückzahl	Fertigung 1	Fertigung 2	Fertigung 2b
Modulgehäuse Alu	2,60	40€ pro modul	0,90	0,95	Modulgehäuse	4,20	5,04	\$14,1523	\$14,9386	\$15,7248
Isolierung	56,00	40€ pro Modul	0,90	0,95	Isolierung	0,30	1	\$50,4000	\$53,2000	\$56,0000
Anschlüsse Kupfer	9,00	1kg pro modul	0,90	0,90	Anschlüsse	0,25	1	\$6,2308	\$6,2308	\$6,9231
Balancer	3,00	pro modul 50€	1,00	1,00	Überdruckventil		1	\$4,5000	\$5,0000	\$5,0000
Überdruckventil	5,00	Annahme	0,90	1,00	Balancer		32	\$25,0000	\$25,0000	\$25,0000
SOC Controller	1,80	pro parallel cell	0,90	1,00	SOC Controller		32	\$46,9800	\$52,2000	\$52,2000
Parallel Connection	0,10	pro parallel cell	0,95	1,00	Parallel Connection		32	\$2,7550	\$2,9000	\$2,9000
Total						32,0 Zellen	4,0 kWh	150,02	159,47	163,75
						106,7 Volt	€/kWh	28,82	30,64	31,46
						4,8 kg	€/kW	37,47	39,83	40,90

Anhang B 5: Berechnungsmaske des Batteriekostenmodells: Rohstoffkosten Pack.

Edukt	Roh-, Hilfs- und Bedarfsstoffe				Packkosten					
	Preis		Ec. of Scale p.a.		Bedarf		Kosten/Pack \$			
	\$/kg bzw \$/p	Bemerkung	Szenario I	Szenario II	Komponente	Gewicht (kg)	Stückzahl	Fertigung 1	Fertigung 2	Fertigung 2b
Klimasystem	156,00	pro pack	0,85	0,90	Klimasystem	2,50	1	132,6000 €	140,4000 €	156,0000 €
Schutzbauteile	130,00	pro Pack	1,00	1,00	Schutzbauteile	1,00	1	130,0000 €	130,0000 €	130,0000 €
Gesamtgehäuse Stahl	0,60		0,90	0,90	Gesamtgehäuse Stahl	43,20		23,3280 €	23,3280 €	25,9200 €
Elektr. Verbindungen	26,00	pro Pack	1,00	1,00	Elektr. Verbindungen	1,00	1	26,0000 €	26,0000 €	26,0000 €
BMS	135,00	Valence	0,85	0,90	BMS	0,55	1	114,7500 €	121,5000 €	135,0000 €
Total						288,0 Zellen	36,0 kWh	426,68	441,23	472,92
						960,5 Volt	€/kWh	11,84	12,24	13,12
						48,3 kg	€/kW	11,84	12,24	13,12

Anhang B 6 : Berechnungsmaske des Batteriekostenmodells: Rohstoffkosten Zelle.

Edukt	Roh-, Hilfs- und Bedarfsstoffe		Ec. of Scale p.a.		Ec. of Scale p.a. Szenario II
	Preis \$/kg	\$/l	Szenario I	Szenario II	
Graphit (tische Reinheit)	12,00		0,95	0,95	1,00
Li ₂ Ti ₂ O ₇ (nano)	17,50		0,85	0,85	0,85
Kupfer	9,00		0,90	0,90	0,90
Polyvinyliden-Fluorid	60,00		0,70	0,70	0,70
Acetylen-schwarz	30,00		0,70	0,70	0,70
Aluminium	2,50		0,85	0,85	0,90
LiNi _{0,8} Co _{0,15} Al _{0,05} O ₂	21,25		0,95	0,95	1,00
LiMn ₂ O ₄	20,00		0,95	0,95	1,00
LiNi _{0,5} Co _{0,3} Mn _{0,2} O ₂	23,00		0,95	0,95	1,00
LiFePO ₄ (nano)	17,00		0,95	0,95	1,00
LiBF ₄	60,00		0,90	0,90	0,95
LiAsF ₆	60,00		0,90	0,90	0,95
LiPF ₆	120,00		0,85	0,85	0,90
Ethylencarbonat	16,00		0,90	0,90	0,90
Diethylcarbonat	17,9	17,9	0,90	0,90	0,90
Dimethoxyethan	29,00		0,90	0,90	0,90
Separator	120,00	53,1	0,90	0,90	0,95
Polyethylen	80,30		1,00	1,00	1,00
Polypropylen	1,50		1,00	1,00	1,00
Hülle (Alu) Folie (Pouch)	20,00		0,85	0,85	0,90
Reinheits-Faktor für Elektrolyt			4	4	4
Cobalt	35,00				
Nickel	26,00				
Mangan	3,68				
Lithium	6,61				
Eisen	2,17				
Phosphor	0,12				

Anode		Kathode		Separator		Elektrolyt	
Konten-träger	Kapazität	Kapazität	Dichte	Porosität (%)	U _n -Dichte	U _n -Dichte	Molmenge
Graphit	334,8	120	2,4	40	0,907	11,76	0,20
Li ₂ Ti ₂ O ₇ (nano)	150	160	2,5	40	0,94	5,6244	0,09
PVDF (Anode)	-	140	2,3	40	-	18,228	0,15
Kupfer	-	160	2,00	40	0,37	-	-
Konten-träger		Kapazität		U _n -Dichte		Dichte	
LiMn ₂ O ₄	120	160	2,4	40	0,907	11,76	0,20
LiNi _{0,8} Co _{0,15} Al _{0,05} O ₂	160	160	2,5	40	0,94	5,6244	0,09
LiNi _{0,5} Co _{0,3} Mn _{0,2} O ₂	140	140	2,3	40	-	18,228	0,15
LiFePO ₄ (nano)	160	160	2,00	40	0,37	-	-
PVDF (Kathode)	-	160	1,78	-	-	-	-
Acetylen-schwarz	-	-	2,05	-	-	-	-
Aluminium	-	-	2,7	-	-	-	-
Konten-träger		Porosität (%)		U _n -Dichte		Gesamt-dichte	
LiAsF ₆	11,76	40	0,907	40	0,36	11,76	0,20
LiBF ₄	5,6244	40	0,94	40	0,38	5,6244	0,09
LiPF ₆	18,228	40	0,94	40	0,37	18,228	0,15
Konten-träger		Leitfähigkeit 20°C		Dielektrizität		Dichte	
Ethylencarbonat	6,9	6,9	89,6	6,9	89,6	1,41	1,41
Diethylcarbonat	2,9	2,9	2,82	2,9	2,82	0,97	0,97
Dimethylcarbonat	6,5	6,5	3,12	6,5	3,12	1,07	1,07
Dimethoxyethan	-	-	7,2	-	7,2	0,87	0,87

Bedarf	Zellkosten		Technik		Kosten/Zelle \$	
Komponente	Gewicht (kg)	Volumen (l)	Fläche (dm ²)	Spannung (V)	Fertigung 1	Fertigung 2
LiNi _{0,35} Co _{0,33} Mn _{0,33} O ₂	0,243	0,106	6,9413	3,9	6,9413	6,8856
Graphit	0,107	0,071	77,139	-0,22	1,2156	1,2796
Separator	0,009	0,005	169,707		0,9974	1,0528
PVDF (Kathode)	0,012	0,005			0,100	0,1000
Acetylen-schwarz	0,005	0,003			0,2339	0,3199
LiPF ₆	0,013	0,005			0,2550	0,3643
Diethylcarbonat	0,084	0,086			5,3360	6,2777
Aluminium	0,016	0,016			0,0000	0,0000
Kupfer	0,034	0,004			0,0332	0,0391
Hülle	0,053		Kathodendicke		1,0912	1,2837
positiver Anschluss	0,01		150 µm		0,1000	0,1000
negativer Anschluss	0,03				0,1000	0,1000
Total	0,628 kg	0,225 l	0,1251 kWh		3,68 V	18,80
					€/kWh	102,56
					€/kW	108,53
						115,55
Aktivmaterialien:	0,349				7,7569	8,1652
Prozentsatz	56%				46%	43%
Passivmaterialien:	0,279				8,9248	9,49
Prozentsatz	44%				54%	57%

Anhang B 7: Berechnungsmaske des Batteriekostenmodells: Fertigungskosten Zelle.

Zellkosten													
Bedarf			Investitionssumme				p.a.		p.a.		Kosten/Zelle €		
Fertigungsschritt	Hersteller	Gerät	Investitionssumme	Quelle	Energieverb.	Install./Wart./Instand.	Personalkosten	Fertigung 1	Fertigung 2	Fertigung 2b			
1. Mischen	Eirich	Mischsystem	20 Mio €	Eirich HP RB	0,5		1						
2. Beschichten	Coatema	Linecoater	45 Mio €	coatema HP RB	220		2,25						
3. Trocknen	Kroenert	Floatec	13 Mio €	Kroenert HP RB	150		0,65						
4. Kalandrieren	Coatema	Kalander	10 Mio €	coatema HP RB	in 2. enthalten		0,5						
5. Schneiden	Manz	Automation	20 Mio €	Manz HP RB	3,5		1						
6. Wickeln													
7. Schweißen	Kroenert	Sonderwickler		Kroenert HP RB			3.002.928 €						
8. Packen			38 Mio €		15		1,9						
9. Befüllen	Manz	Automation	20 Mio €	Manz HP RB	10		1						
10. Zusatzbauteile													
11. Schliessen	Manz	Automation		Manz HP RB									
12. Laden & Formieren													
13. Testen			49 Mio €		25 + 152		2,45						
Gesamt			215 Mio €		399		10,75				16.500.000 €		
Kosten pro kWh I			5,37 €		0,26		5,37		1,56				
Kosten pro kWh II			53,75 €		0,52		53,70		4,11				
Total			Abschreibung über 20 Jahre	0,628 Kg	0,1251 kWh					1,56	14,02	16,35	
					€/kWh					12,50	112,09	130,69	

Anhang B 8: Berechnungsmaske des Batteriekostenmodells: Fertigungskosten Modul.

Modulkosten											
Bedarf			Investitionssumme /Quelle				Szenario 1 + 2		Kosten/Zelle €		
Fertigungsschritt	Gerät	Investitionssumme /Quelle	Wartung	Energie	Personal	-Kosten	Szenario I	Szenario II	Szenario III		
1. Übernahme Zellen	ABB 3x Industrieroboter	90.000,00 € ABB	4.500,00 €	45	0	0					
2. Inspektion Zellen	PEC 10x SBT 052050	1.000.000,00 € PEC	50.000,00 €	300	2	0					
3. Stapelung versch. Komponenten	ABB 3x Montage-Roboter	180.000,00 € ABB	3.000,00 €	45	0	0					
4. Montage Kühlmittelleinlass/-Auslass	ABB 3x Montage-Roboter	210.000,00 € ABB	3.000,00 €	45	0	0					
5. Montage Zelloberwachung	ABB 3x Montage-Roboter	255.000,00 € ABB	3.000,00 €	45	1	0					
6. Montage elektr. Verbindungen	ABB 3x Montage-Roboter	210.000,00 € ABB	3.000,00 €	45	0	0					
7. Integration in Submodul	ABB 3x Montage-Roboter	180.000,00 € ABB	3.000,00 €	45	0	0					
8. Mechanische Verbindung der Komponenten	ABB 3x Montage-Roboter	180.000,00 € ABB	3.000,00 €	45	1	0					
9. Montage Coverplate	ABB 3x Montage-Roboter	90.000,00 € ABB	3.000,00 €	45	0	0					
10. Test der Module	PEC 2x SBT 4050	1.000.000,00 € Annahme	50.000,00 €	72	1	0					
Gesamt		3.395.000,00 €	1.188.250,00 €	732	5	0				7500000	
Szenario I €/kWh		0,24	0,08	0,32	0,75	2,06	1,40				
Szenario II €/kWh		2,43	0,85	0,88				6,21			
Szenario III €/kWh										53,57	
Total		Abschreibung über 7 Jahre	32,00 Zellen				4,0038 kWh	5,60	24,86	214,49	
							€/kWh	1,40	6,21	53,57	
							€/kW	1,40	6,21	53,57	

Anhang B 9: Berechnungsmaske des Batteriekostenmodells: Fertigungskosten Pack.

Packkosten											
Bedarf			Szenario 1				Szenario 2		Kosten/Zelle €		
Fertigungsschritt	Hersteller	Gerät	Investition	Wartung	Energie	Personal	Energie	Personal	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Transport Moduleinheiten	ABB 3x Industrieroboter		180.000,00 €	9.000,00 €	45	0	0	0			
Angleichen und Prüfen der Module	PEC 3x SBT 4050		600.000,00 €	30.000,00 €	225	2	75	2			
Integration im Gesamtgehäuse	ABB 3x Industrieroboter		180.000,00 €	9.000,00 €	45	0	0	0			
Montage und Kontaktierung	ABB 3x Industrieroboter		210.000,00 €	10.500,00 €	45	0	45	0			
Kontaktierung untereinander	ABB 3x Industrieroboter		210.000,00 €	10.500,00 €	45	0	45	1			
Montage Steuerungselektronik	ABB 3x Industrieroboter		225.000,00 €	11.250,00 €	45	1	45	1			
Mont. Kühlungsverbindungen	ABB 3x Industrieroboter		180.000,00 €	9.000,00 €	45	0	45	0			
Montage BMS	ABB 3x Industrieroboter		180.000,00 €	9.000,00 €	45	0	45	0			
Montage Elektromechanik	ABB 3x Industrieroboter		180.000,00 €	9.000,00 €	45	0	45	0			
Electrical Test	PEC 3x SBT 10050		900.000,00 €	45.000,00 €	225	2	75	4			
Endmontage restlicher Abdeckungen	ABB 3x Industrieroboter		150.000,00 €	7.500,00 €	45	0	0	2			
Gehäuse Schliessen	ABB 3x Industrieroboter		150.000,00 €	7.500,00 €	45	1	45	2			
Komponentenendmontage	ABB 3x Industrieroboter		150.000,00 €	7.500,00 €	45	0	0	2			
Produktionsgebäude	~m ² 10000		11.538.461,54 €								346.153,85
Gesamt			15.033.461,54 €	174750	945	6 Personen	465	18			8.346.153,85
Szenario 1 €/kWh			1,07	0,09	0,41	0,90			89,22		
Szenario 2 €/kWh			10,27	0,71	1,13	2,47	0,56	7,40		682,42	
Szenario 3 €/kWh											59,62
Total			Abschreibung über 7 Jahre	288,0 Zellen			36,0 kWh	89,22	682,42	2.148,21	
							€/kWh	2,48	18,94	59,62	
							€/kW	2,48	18,94	59,62	

Anhang B 10: Berechnungsmaske des Batteriekostenmodells: Overheadkosten Zelle.

Bedarf		Zellkosten					
Overheadkosten-Komponenten	Produktion	variable Kosten	einmalige Kosten	fixe Kosten	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Research+Development			12.900.000 €				
Transport/Logistik "Receiving"	100000	5 MA/Schicht	2.000.000 €				
	10000	3 MA/Schicht	1.000.000 €				
	1000	2 MA/Schicht	500.000 €				
Fremdkapitalkosten				13.331.543 €			
Szenario 1 €/kWh		0,75	0,37	6,67	7,79		
Szenario 2 €/kWh		1,23	3,48	66,66		71,37	
Szenario 3 €/kWh		8,23	33,50	89,17			130,89
Total	20 Jahre		1,0 Zellen	0,1 kWh	0,97	8,93	131,02
				€/kWh	7,79	71,37	130,89

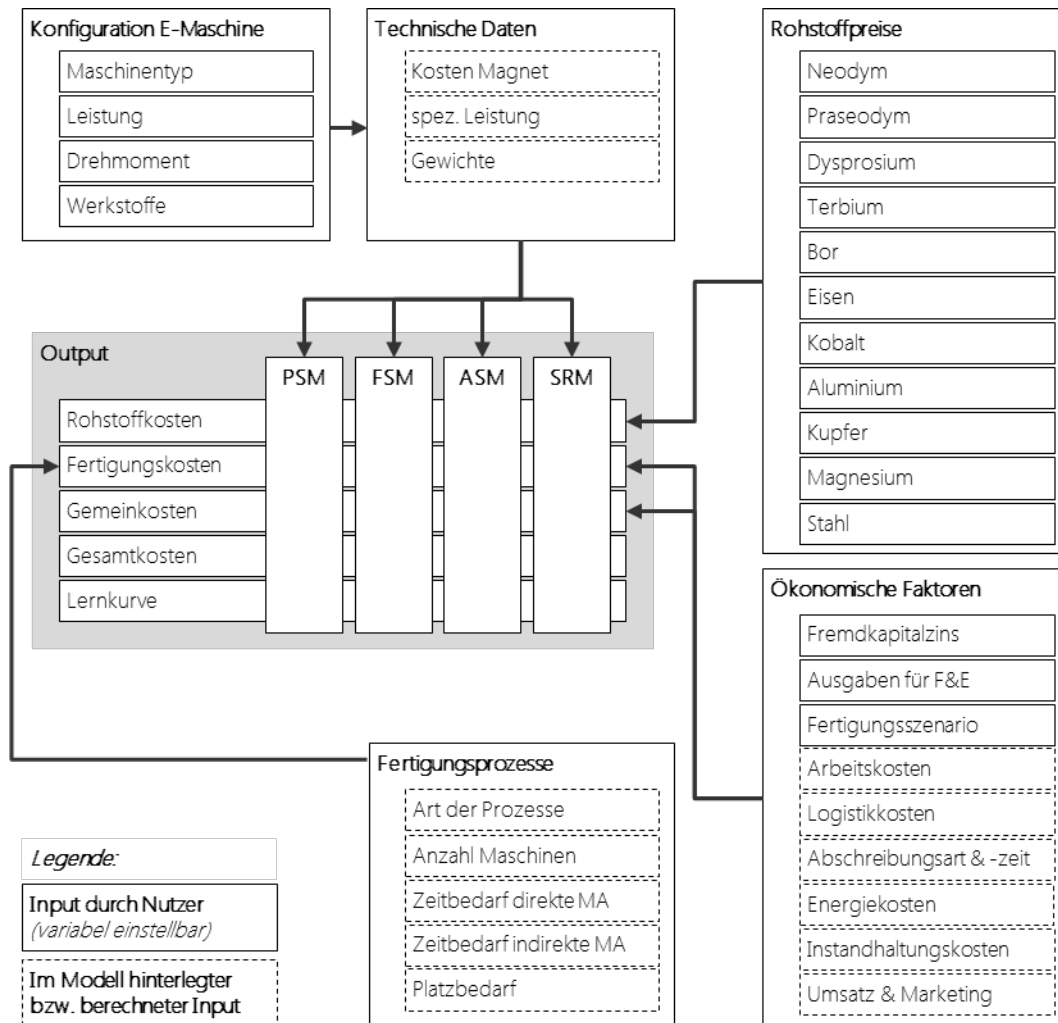
Anhang B 11: Berechnungsmaske des Batteriekostenmodells: Overheadkosten Modul.

Bedarf		Modulkosten				
Overheadkosten-Komponenten	variable Kosten	einmalige Kosten	fixe Kosten	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Research+Development		499.500 €				
Transport/Logistik	5 MA/Schicht	1.000.000 €				
	3 MA/Schicht	500.000 €				
	2 MA/Schicht	250.000 €				
Fremdkapitalkosten			508.348 €			
Szenario 1 €/kWh	0,75	0,04	0,25	1,04		
Szenario 2 €/kWh	1,23	0,25	2,54		4,03	
Szenario 3 €/kWh	8,23	1,87	24,93			35,03
Total	20 Jahre	32,0 Zellen	4,0 kWh	4,17	16,12	140,26
			€/kWh	1,04	4,03	35,03

Anhang B 12: Berechnungsmaske des Batteriekostenmodells: Overheadkosten Pack.

Bedarf		Packkosten				
Overheadkosten-Komponenten	variable Kosten	einmalige Kosten	fixe Kosten	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Research+Development		1.399.500				
Transport/Logistik	5 MA/Schicht	3.000.000				
	3 MA/Schicht	750.000				
	2 MA/Schicht	300.000				
Profit	5%			8,06 €	20,65 €	22,35 €
Genehmigung Verkauf/Transport		20.000				
Fremdkapitalkosten			1.424.291 €			
Szenario 1 €/kWh	0,75	0,11	0,71	1,57		
Szenario 2 €/kWh	1,23	0,54	7,12		8,90	
Szenario 3 €/kWh	8,23	4,29	30,50			43,02
Total	20 Jahre	288 Zellen	36,03 kWh	347,07	1.064,54	2.355,59
			€/kWh	9,63	29,54	65,37
			€/kW	9,63	29,54	65,37

Anhang B 13: Berechnungsschema des Elektromaschinenkostenmodells.



Anhang B 14: Eingabemaske des Elektromaschinenkostenmodells.

Input	Einheit	Wert	Anteil Werkstoffe an Gesamtmasse des Motors [%]		PSM		FSM		ASM		SRM		
			Input	Referenz	Input	Referenz	Input	Referenz	Input	Referenz	Input	Referenz	
Leistung	[kW]	80											
Auswahl Fertigungsgröße	1,2;3	500.000											
Fremdkapitalzins	%	7%											
Ausgaben R & D Motor [€]	€ p.a.	5.000.000 €											
Ausgaben R & D LE [€]	€ p.a.	20.000.000 €											
Abschreibung Maschinen	[Jahre]	7											
Produktion Fertigung 1	Stückzahl	5.000											
Produktion Fertigung 2	Stückzahl	50.000											
Produktion Fertigung 3	Stückzahl	500.000											
Rohstoffkosten			PSM		FSM		ASM		SRM				
Rohstoffkosten	Einheit	Wert	Input	Referenz	Input	Referenz	Input	Referenz	Input	Referenz	Input	Referenz	
Neodymium	€/kg	115,38	62,5	62,5	77	77	70	100	70	100	70	100	
Praseodymium	€/kg	134,62	100	100	70	70	70	100	70	100	70	100	
Dysprosium	€/kg	1153,85	200	200	226	226	220	220	220	220	220	220	
Terbium	€/kg	2615,38											
Bor	€/kg	833,00											
Eisen	€/kg	1,50											
Kobalt	€/kg	23,08											
Aluminium	€/kg	1,43											
Kupfer	€/kg	5,00											
Magnesium	€/kg	3,00											
Stahl	€/kg	0,80											
			Bezugspunkte für Wachstumsgesetz, Spezifische Leistung		PSM		FSM		ASM		SRM		
			Input	Referenz	Input	Referenz	Input	Referenz	Input	Referenz	Input	Referenz	
			Gewicht [kg]	62,5	62,5	77	77	70	100	70	100	70	100
			Leistung [kW]	100	100	70	70	70	100	70	100	70	100
			Drehmoment [Nm]	200	200	226	226	220	220	220	220	220	220
			Blindstrombedarf					10%					30%
			Resultierendes a: P(m)=a*m^(4/3)	0,403		0,214		0,243				0,243	
			Resultierendes Drehmoment [Nm]	160		258		251				251	
			Resultierende Spezifische Leistung (kW/kg)	1,5		0,9		1,0				1,0	
			Resultierende Gewichte		PSM		FSM		ASM		SRM		
					Input		Input		Input		Input		
					52,87		85,11		77,37		77,37		
					9,50		9,50		10,10		11,30		

Anhang B 15: Ausgabemaske des Elektromaschinenkostenmodells.

Magnetkosten (PSM)	[kg]	[€]	Kosten für gesamte E-Maschine		PSM	FSM	ASM	SRM
Neodymium	0,75	86,09	Rohstoffkosten	6,45 €/kW	5,52 €/kW	4,66 €/kW	4,60 €/kW	
Praseodymium	0,00	0,33	Fertigungskosten	0,63 €/kW	0,63 €/kW	0,63 €/kW	0,62 €/kW	
Dysprosium	0,11	129,13	Gemeinkosten	1,36 €/kW	1,36 €/kW	1,36 €/kW	1,36 €/kW	
Terbium	0,00	13,01	Gesamtkosten	8,44 €/kW	7,50 €/kW	6,64 €/kW	6,58 €/kW	
Bor	0,04	31,07						
Eisen	1,53	2,29	Stückpreis	674,82 €	600,17 €	531,47 €	526,12 €	
Kobalt	0,05	1,15	Umsatz	404.891.611 €	360.104.378 €	318.880.416 €	315.672.857 €	
Gewicht Magnet [kg]	2,49							
Rohstoffkosten gesamt [€]		263,08						
Endpreis [€]		317,79						

Anhang B 16: Berechnungsmaske des Elektromaschinenkostenmodells: Rohstoffkosten.

Zugekaufte Komponenten	Preis [€/kg]	Stückpreis [€]	PSM [€]	FSM [€]	ASM [€]	SR [€]	Economies of Scale		
							Fertigung 1	Fertigung 2	Fertigung 3
Magnetkosten	128		318					0,9	0,8
Lackisolierter Kupferdraht	8		61	200	86	73	1	0,9	0,8
A und B-Lager		20	43	43	43	43	1	0,7	0,5
Blechkpakete	8		262	353	435	432	1	0,7	0,5
Welle	7		33	53	31	44	1	0,7	0,5
Sensoren		40	40	40	40	40	1	0,9	0,8
Schleifringe, Kohlen		10		10			1	0,7	0,5
Gehäuse, Lagerschilde, Kühlung, Klemmkasten	4		25	40	36	36	1	0,7	0,5
Rohstoff-/Komponentenkosten PSM [€]							781,23	630,52	516,11
Rohstoff-/Komponentenkosten FSM [€]							739,11	565,41	441,61
Rohstoff-/Komponentenkosten ASM [€]							670,48	494,44	372,90
Rohstoff-/Komponentenkosten SM [€]							668,19	490,29	367,93
Rohstoff-/Komponentenkosten PSM [€/kW]							9,77	7,88	6,45
Rohstoff-/Komponentenkosten FSM [€/kW]							9,24	7,07	5,52
Rohstoff-/Komponentenkosten ASM [€/kW]							8,38	6,18	4,66
Rohstoff-/Komponentenkosten SM [€/kW]							8,35	6,13	4,60

Anhang B 17: Berechnungsmaske des Elektromaschinenkostenmodells: Magnetkosten.

Rohstoff	Input	Referenz	Res. Gewichte [kg]	Res. Kosten [€]		Input	Referenz
Neodymium	30,0%	30%	0,75	86,09	Gesamtkosten (ohne Rohstoffe) per Kilo [€]	22	22
Praseodymium	0,1%	<1%	0,00	0,33			
Dysprosium	4,5%	3%	0,11	129,13	Ergebnisse		
Terbium	0,2%	<1%	0,00	13,01	Magnetpreis [€/kg]	127,78	
Bor	1,5%	1-2%	0,04	31,07	Gewicht Magnet [kg]	2,49	
Eisen	61,5%	61,5%	1,53	2,29	Rohstoffpreis [€]	263,08	
Kobalt	2,0%	0-15%	0,05	1,15	Endpreis [€]	317,79	
Summe	100%						

Anhang B 18: Berechnungsmaske des Elektromaschinenkostenmodells: Fertigungskosten für Fertigungsszenario 1.

Fertigung Elektromotor	PSM	FSM	ASM	SRM	Gerät	Fertigung 1				
						Maschinenanzahl	Investitionssumme	Energieverbrauch [kW]	Energiekosten [€]	Instandhaltung/Wartung
Prozesskette Stator										
					Förderband	1	20.000 €	1	240 €	1.000 €
Blechkette zusammensetzen	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	1	60.000 €	15	3.600 €	3.000 €
Bleche verbinden (schweißen, Nut)	x	x	x	x	Schweißgerät, Stator-Blechkette	1	350.000 €	15	3.600 €	17.500 €
Isolierpapier zuschneiden	x	x	x	x	Zuschneidemaschine Isolierpapier	1	10.000 €	1	240 €	500 €
Isolation Nutgrund	x	x	x	x	Isoliermaschine	1	76.000 €	2,5	600 €	3.800 €
Draht wickeln	x	x	x	x	Wickler	1	183.000 €	11	2.640 €	9.150 €
Bereitstellen der Spulen für die Spuleneinzugsmaschine	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	1	60.000 €	15	3.600 €	3.000 €
Einbringen der vorgefertigten Spulen in die Blechkette des Stators mittels der Spuleneinziehmachine (verteilte Wicklung)	x	x	x	x	Spuleneinziehmachine	1	73.000 €	4	960 €	3.650 €
Richten Kabel und Kontaktierung	x	x	x	x	MA					
Wickelpuffformen auf dem Wickelpuffformer	x	x	x	x	Endformpresse	1	140.000 €	7	1.680 €	7.000 €
Absolieren der Schaltenden und Schalten der Wicklung	x	x	x	x	Drahtverbinder	1	40.000 €	12 €	2.800 €	2.000 €
Bandagieren und Nachformen des Wickelpuffes	x	x	x	x	Wicklungs-Verschleiß-Maschine	1	60.000 €	2,5	600 €	3.000 €
Zwischenprüfen	x	x	x	x	Prüfgerät	1	60.000 €	1	240 €	3.000 €
Vakuum-Imprägnieren des Stators	x	x	x	x	Imprägnier Maschine	1	50.000 €	10	2.400 €	2.500 €
Aushärtung im Ofen	x	x	x	x	Ofen	1	50.000 €	20	4.800 €	2.500 €
Prozesskette Rotor										
	x	x	x	x	Förderband	1	20.000 €	1	240 €	1.000 €
Blechkette zusammensetzen	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	1	60.000 €	15 €	3.600 €	3.000 €
Bleche verbinden (schweißen, Nut)	x	x	x	x	Schweißgerät, Rotor-Blechkette	1	350.000 €	20	4.800 €	17.500 €
Montage Rotorwelle und Rotornabe	x	x	x	x	Presse	1	35.462 €	10	2.400 €	1.773 €
Rotor wickeln (Konzentrierte Wicklung)		x	x		Wickelmaschine	1	183.000 €	11	2.640 €	9.150 €
Magnete positionieren und kleben	x				Magnetbestückung	1	250.000 €	5	1.200 €	12.500 €
Magnetsierung prüfen	x				Prüfgerät	1	60.000 €	1	240 €	3.000 €
Test und Messung	x	x	x	x	Prüfgerät	1	60.000 €	1	240 €	3.000 €
Auswuchten ggf. anbringen Ausgleichsgewichte	x	x	x	x	Auswucht Maschine	1	80.000 €	0,75	180 €	4.000 €
Eneuter Test und Messung	x	x	x	x	Prüfgerät	1	60.000 €	1	240 €	3.000 €
Endmontage										
					Förderband	1	20.000 €	1	240 €	1.000 €
Montage Lager in Lagerschilde	x	x	x	x	MA					
Einsetzen Rotor in Stator, montieren Lagerschilde	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	1	60.000 €	15	3.600 €	3.000 €
Integration Lage-Sensoren, Stecker, Sonstiges, montieren Klemmkasten	x	x	x	x	MA					
Funktionstest	x	x	x	x	Prüfgerät	1	40.000 €	1	240 €	2.000 €
Elektr. Abschlusstest (Widerstandsprüfung, Isolation, HV, Kurzschluss)	x	x	x	x	Prüfgerät	1	60.000 €	1	240 €	3.000 €
Verpacken, Transport	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	1	60.000 €	15	3.600 €	3.000 €

Anhang B 19: Berechnungsmaske des Elektromaschinenkostenmodells: Fertigungskosten für Fertigungsszenario 2.

Fertigung Elektromotor	PSM	FSM	ASM	SRM	Gerät	Fertigung 2				
						Maschinenanzahl	Investitionssumme [€]	Energieverbrauch [kW]	Energiekosten [€]	Instandhaltung/Wartung
Prozesskette Stator										
					Förderband	1	20.000 €	1	240 €	1.000 €
Blechkette zusammensetzen	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	1	60.000 €	15	3.600 €	3.000 €
Bleche verbinden (schweißen, Nut)	x	x	x	x	Schweißgerät, Stator-Blechkette	2	350.000 €	15	7.200 €	35.000 €
Isolierpapier zuschneiden	x	x	x	x	Zuschneidemaschine Isolierpapier	1	10.000 €	1	240 €	500 €
Isolation Nutgrund	x	x	x	x	Isoliermaschine	1	76.000 €	2,5	600 €	3.800 €
Draht wickeln	x	x	x	x	Wickler	2	183.000 €	11	5.280 €	18.300 €
Bereitstellen der Spulen für die Spuleneinzugsmaschine	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	2	60.000 €	15	7.200 €	6.000 €
Einbringen der vorgefertigten Spulen in die Blechkette des Stators mittels der Spuleneinzugsmaschine (verteilte Wicklung)	x	x	x	x	Spuleneinzugsmaschine	2	73.000 €	4	1.920 €	7.300 €
Richten Kabel und Kontaktierung	x	x	x	x	MA	2				
Wickelformen auf dem Wickelkopfendformer	x	x	x	x	Endformpresse	2	140.000 €	7	3.360 €	14.000 €
Absolieren der Schälenden und Schalten der Wicklung	x	x	x	x	Drahtverbinder	2	40.000 €	12 €	5.600 €	4.000 €
Bandagieren und Nachformen des Wickelkopfes	x	x	x	x	Wicklungs-Verschür-Maschine	2	60.000 €	2,5	1.200 €	6.000 €
Zwischenprüfen	x	x	x	x	Prüfgerät	2	60.000 €	1	480 €	6.000 €
Vakuum-Imprägnieren des Stators	x	x	x	x	Imprägnier Maschine	2	50.000 €	10	4.800 €	5.000 €
Aushärtung im Ofen	x	x	x	x	Ofen	2	50.000 €	20	9.600 €	5.000 €
Prozesskette Rotor										
	x	x	x	x	Förderband	1	20.000 €	1	240 €	1.000 €
Blechkette zusammensetzen	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	1	60.000 €	15 €	3.600 €	3.000 €
Bleche verbinden (schweißen, Nut)	x	x	x	x	Schweißgerät, Stator-Blechkette	2	350.000 €	20	9.600 €	35.000 €
Montage Rotorwelle und Rotornabe	x	x	x	x	Presse	2	35.462 €	10	4.800 €	3.546 €
Rotor wickeln (Konzentrierte Wicklung)	x	x	x	x	Wickelmaschine	2	183.000 €	11	5.280 €	18.300 €
Magnete positionieren und kleben	x				Magnetbestückung	2	250.000 €	5	2.400 €	25.000 €
Magnetsierung prüfen	x				Prüfgerät	1	60.000 €	1	240 €	3.000 €
Test und Messung	x	x	x	x	Prüfgerät	1	60.000 €	1	240 €	3.000 €
Auswuchten ggf. anbringen Ausgleichsgewichte	x	x	x	x	Auswucht Maschine	2	80.000 €	0,75	360 €	8.000 €
Eneuter Test und Messung	x	x	x	x	Prüfgerät	1	60.000 €	1	240 €	3.000 €
Endmontage										
					Förderband	1	20.000 €	1	240 €	1.000 €
Montage Lager in Lagerschilde	x	x	x	x	MA	1				
Einsetzen Rotor in Stator, montieren Lagerschilde	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	1	60.000 €	15	3.600 €	3.000 €
Integration Lage-Sensoren, Stecker, Sonstiges, montieren Klemmkasten	x	x	x	x	MA	1				
Funktionsstest	x	x	x	x	Prüfgerät	1	40.000 €	1	240 €	2.000 €
Elektr. Abschlusstest (Widerstandsprüfung, Isolation, HV, Kurzschluss)	x	x	x	x	Prüfgerät	1	60.000 €	1	240 €	3.000 €
Verpacken, Transport	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	1	60.000 €	15	3.600 €	3.000 €

Anhang B 20: Berechnungsmaske des Elektromaschinenkostenmodells: Fertigungskosten für Fertigungsszenario 3.

Fertigung Elektromotor	PSM	FSM	ASM	SRM	Gerät	Fertigung 3				
						Maschinenanzahl	Investitionssumme [€]	Energieverbrauch [kW]	Energiekosten [€]	Instandhaltung/Wartung
Prozesskette Stator										
					Förderband	2	20.000 €	1	1.752 €	2.000 €
Blechkette zusammensetzen	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	2	60.000 €	15	26.280 €	6.000 €
Bleche verbinden (schweißen, Nut)	x	x	x	x	Schweißgerät, Rotor-Blechkette	5	350.000 €	15	65.700 €	87.500 €
Isolierpapier zuschneiden	x	x	x	x	Zuschneidemaschine Isolierpapier	2	10.000 €	1	1.752 €	1.000 €
Isolation Nutgrund	x	x	x	x	Isoliermaschine	2	76.000 €	2,5	4.380 €	7.600 €
Draht wickeln	x	x	x	x	Wickler	5	183.000 €	11	48.180 €	45.750 €
Bereitstellen der Spulen für die Spuleneinzugsmaschine	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	5	60.000 €	15	65.700 €	15.000 €
Einbringen der vorgefertigten Spulen in die Blechkette des Stators mittels der Spuleneinzugsmaschine (verteilte Wicklung)	x	x	x	x	Spuleneinzugsmaschine	5	295.000 €	4	17.520 €	73.750 €
Richten Kabel und Kontaktierung	x	x	x	x	MA	3				
Wickelformen auf dem Wickelkopfendformer	x	x	x	x	Endformpresse	5	140.000 €	7	30.660 €	35.000 €
Absolieren der Schälenden und Schalten der Wicklung	x	x	x	x	Drahtverbinder	5	40.000 €	12 €	51.100 €	10.000 €
Bandagieren und Nachformen des Wickelkopfes	x	x	x	x	Wicklungs-Verschür-Maschine	5	60.000 €	2,5	10.950 €	15.000 €
Zwischenprüfen	x	x	x	x	Prüfgerät	5	60.000 €	1	4.380 €	15.000 €
Vakuum-Imprägnieren des Stators	x	x	x	x	Imprägnier Maschine	5	50.000 €	10	43.800 €	12.500 €
Aushärtung im Ofen	x	x	x	x	Ofen	5	50.000 €	20	87.600 €	12.500 €
Prozesskette Rotor										
	x	x	x	x	Förderband	2	20.000 €	1	1.752 €	2.000 €
Blechkette zusammensetzen	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	2	60.000 €	15	26.280 €	6.000 €
Bleche verbinden (schweißen, Nut)	x	x	x	x	Schweißgerät, Rotor-Blechkette	5	350.000 €	20	87.600 €	87.500 €
Montage Rotorwelle und Rotornabe	x	x	x	x	Presse	5	35.462 €	10	43.800 €	8.866 €
Rotor wickeln (Konzentrierte Wicklung)	x	x	x	x	Wickelmaschine	5	183.000 €	11	13.200 €	45.750 €
Magnete positionieren und kleben	x				Magnetbestückung	5	250.000 €	5	21.900 €	62.500 €
Magnetsierung prüfen	x				Prüfgerät	2	60.000 €	1	1.752 €	6.000 €
Test und Messung	x	x	x	x	Prüfgerät	2	60.000 €	1	1.752 €	6.000 €
Auswuchten ggf. anbringen Ausgleichsgewichte	x	x	x	x	Auswucht Maschine	5	80.000 €	0,75	3.285 €	20.000 €
Eneuter Test und Messung	x	x	x	x	Prüfgerät	2	60.000 €	1	1.752 €	6.000 €
Endmontage										
					Förderband	2	20.000 €	1	1.752 €	2.000 €
Montage Lager in Lagerschilde	x	x	x	x	MA	1				
Einsetzen Rotor in Stator, montieren Lagerschilde	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	2	60.000 €	15	26.280 €	6.000 €
Integration Lage-Sensoren, Stecker, Sonstiges, montieren Klemmkasten	x	x	x	x	MA	1				
Funktionsstest	x	x	x	x	Prüfgerät	2	40.000 €	1	1.752 €	4.000 €
Elektr. Abschlusstest (Widerstandsprüfung, Isolation, HV, Kurzschluss)	x	x	x	x	Prüfgerät	2	60.000 €	1	1.752 €	6.000 €
Verpacken, Transport	x	x	x	x	Montage-Roboter, 3-Achsen	2	60.000 €	15	26.280 €	6.000 €

Anhang B 21: Berechnungsmaske des Elektromaschinenkostenmodells: Gemeinkosten und Gesamtkosten.

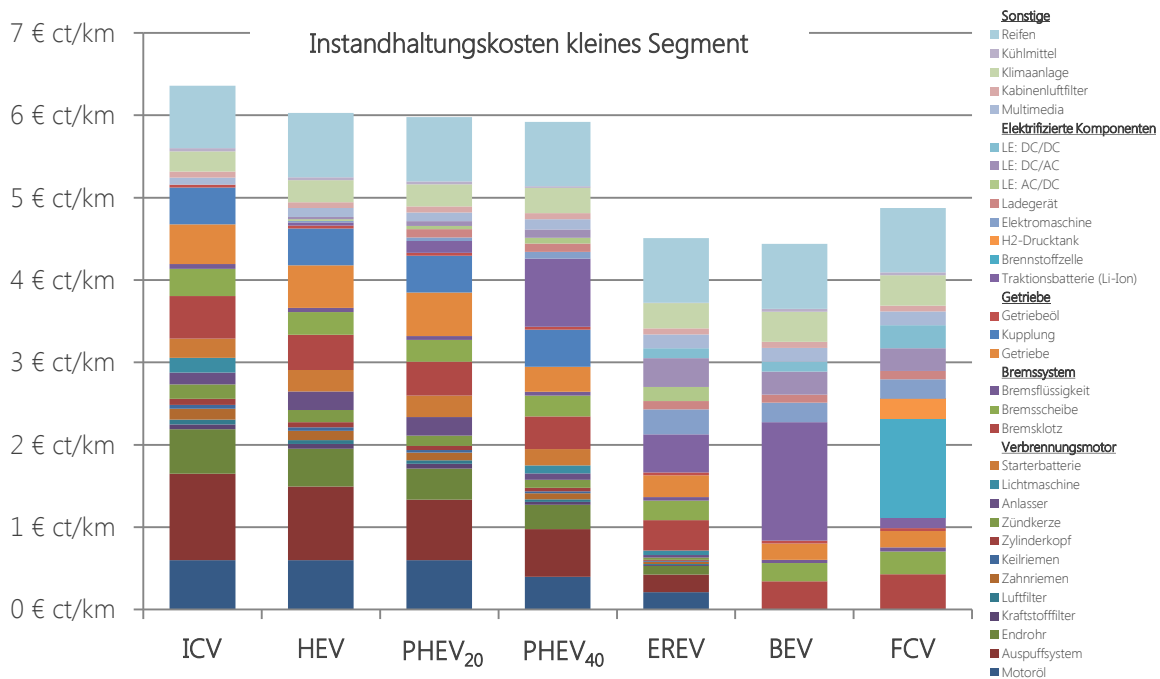
Gemeinkosten Motoren	fixe Kosten	Fertigung 1	Fertigung 2	Fertigung 3	Gesamtkosten Motor	Fertigung 1	Fertigung 2	Fertigung 3
Forschung und Entwicklung [€]		5.000.000 €	5.000.000 €	5.000.000 €	PSM			
Transport/Logistik [€]		425.554 €	4.255.540 €	42.555.401 €	Rostoffkosten [€/kW]	9,77	7,88	6,45
Fremdkapitalkosten		166.632 €	286.645 €	771.002 €	Fertigungskosten [€/kW]	2,91	1,15	0,63
Werksgelände/Fertigungsfläche	30.000 €	12.600 €	21.000 €	168.000 €	Gemeinkosten [€/kW]	14,94	2,73	1,36
Marketing/Werbung		270.999 €	1.095.481 €	5.319.689 €	Gesamtkosten [€/kW]	27,62	11,76	8,44
Personal					FSM			
Indirekte Mitarbeiter		1	3	16	Rostoffkosten [€/kW]	9,24	7,07	5,52
Kosten Mitarbeiter		71.302 €	213.907 €	1.140.838 €	Fertigungskosten [€/kW]	2,88	1,15	0,63
Kosten Gesamt:		5.977.088 €	10.902.573 €	54.213.929 €	Gemeinkosten [€/kW]	14,94	2,73	1,36
Kosten €/kW		14,94	2,73	1,36	Gesamtkosten [€/kW]	27,06	10,94	7,50
					ASM			
					Rostoffkosten [€/kW]	8,38	6,18	4,66
					Fertigungskosten [€/kW]	2,88	1,15	0,63
					Gemeinkosten [€/kW]	14,94	2,73	1,36
					Gesamtkosten [€/kW]	26,20	10,05	6,64
					SRM			
					Rostoffkosten [€/kW]	8,35	6,13	4,60
					Fertigungskosten [€/kW]	2,78	1,13	0,62
					Gemeinkosten [€/kW]	14,94	2,73	1,36
					Gesamtkosten [€/kW]	26,08	9,98	6,58

Anhang C: Instandhaltungskosten

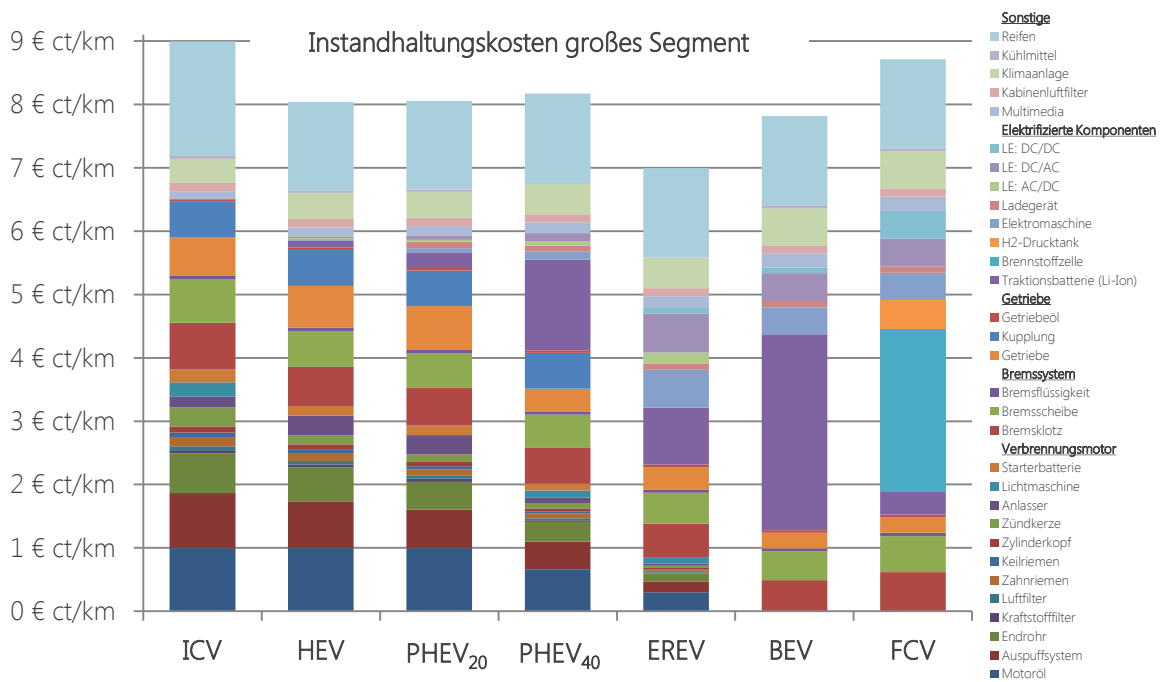
Anhang C 1: Zuordnung der 31 betrachteten Komponenten zu den jeweiligen Triebstrangvarianten.

Relevanz für Antriebsstrang		ICV	HEV	PHEV ₂₀	PHEV ₄₀	EREV	BEV	FCV
Verbrennungsmotor	Motoröl	ja	ja	ja	ja	ja		
	Auspuffsystem	ja	ja	ja	ja	ja		
	Endrohr	ja	ja	ja	ja	ja		
	Kraftstofffilter	ja	ja	ja	ja	ja		
	Luftfilter	ja	ja	ja	ja	ja		
	Zahnriemen	ja	ja	ja	ja	ja		
	Keilriemen	ja	ja	ja	ja	ja		
	Zylinderkopf	ja	ja	ja	ja	ja		
	Zündkerze	ja	ja	ja	ja	ja		
	Anlasser	ja	ja	ja	ja	ja		
	Lichtmaschine	ja	ja	ja	ja	ja		
	Starterbatterie	ja	ja	ja	ja			
Brems- system	Bremsscheibe	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Bremsflüssigkeit	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Bremsklotz	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Getriebe	Getriebe	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Getriebeöl	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Kupplung	ja	ja	ja	ja			
Elektrifizierte Komponenten	Traktionsbatterie		ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Brennstoffzelle							ja
	Wasserstoffdrucktank							ja
	Elektromaschine		ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Ladegerät			ja	ja	ja	ja	
	LE: AC/DC		ja	ja	ja	ja		
	LE: DC/AC		ja	ja	ja	ja	ja	ja
LE: DC/DC					ja	ja	ja	
Sonstige	Reifen	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Kühlmittel	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Klimaanlage	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Multimedia	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Kabinenluftfilter	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja

Anhang C 2: Instandhaltungskosten des kleinen Fahrzeugsegments.



Anhang C 3: Instandhaltungskosten des großen Fahrzeugsegments.



Anhang D: Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte

Anhang D 1: Fahrzeugdefinition kleines Fahrzeugsegment.

Kleines Fahrzeug-segment	Hubraum	Anteil CS	Kfz-Steuer	Instandhaltungs-kosten	Wieder-verkauf		E-Maschine 1	E-Maschine 2	Traktions-batterie	H ₂ -Tank	Verbrauch CS	Verbrauch CD	Verbrauch Gesamt	Emission TTW
	Liter		€/a	€ ct/km	Faktor a	Faktor b	kW	kW	kWh	kg	MJ/km			g/km
G	1,3	100	80	6,36	-5,01E-06	0,3970	-	-	-	-			2,1	148
G _{HEV}	1,3	93	36	6,03	-5,11E-06	0,4566	15	-	1	-	1,8	0,4	1,7	125
D	1,4	100	137	6,36	-5,01E-06	0,3970	-	-	-	-			1,5	111
D _{HEV}	1,4	93	137	6,03	-5,11E-06	0,4566	15	-	1	-	1,4	0,4	1,4	100
CNG	1,3	100	27	6,36	-5,01E-06	0,3970	-	-	-	-			2,1	120
CNG _{HEV}	1,3	93	27	6,03	-5,11E-06	0,4566	15	-	1	-	1,8	0,4	1,7	102
G-PHEV ₂₀	1,3	80	25	5,98	-5,11E-06	0,4566	20	-	4	-	1,9	0,4	1,6	118
G-PHEV ₄₀	1,3	63	25	5,92	-5,11E-06	0,4566	30	-	6	-	1,8	0,4	1,3	93
D-PHEV ₂₀	1,4	80	137	5,98	-5,11E-06	0,4566	20	-	4	-	1,4	0,4	1,2	84
EREV	1,0	35	20	4,51	-5,11E-06	0,4566	45	20	10	-	1,2	0,5	0,7	52
BEV	-	-	0	4,44	-4,76E-06	0,3375	45	-	14	-			0,3	-
FCV	-	-	0	4,88	-5,01E-06	0,3970	45	-	1	2			0,9	-

Quelle: Eigene Darstellung, [204] [212] [207] [213] [214].

Anhang D 2: Fahrzeugdefinition großes Fahrzeugsegment.

Großes Fahrzeug-segment	Hubraum	Anteil CS	Kfz-Steuer	Instandhaltungs-kosten	Wieder-verkauf		E-Maschine 1	E-Maschine 2	Traktions-batterie	H ₂ -Tank	Verbrauch CS	Verbrauch CD	Verbrauch Gesamt	Emission TTW
	Liter		€/a	€ ct/km	Faktor a	Faktor b	kW	kW	kWh	kg	MJ/km			g/km
G	2,2	100%	292	8,99	-3,88E-06	0,4114	-	-	-	-			3,4	244
G _{HEV}	2,2	93%	195	8,60	-3,98E-06	0,4731	25	-	3	-	2,9		2,7	195
D	2,6	100%	380	8,99	-3,88E-06	0,4114	-	-	-	-			2,6	188
D _{HEV}	2,6	93%	320	8,60	-3,98E-06	0,4731	25	-	3	-	2,3		2,2	158
CNG	2,3	100%	203	8,99	-3,88E-06	0,4114	-	-	-	-			3,4	199
CNG _{HEV}	2,3	93%	124	8,60	-3,98E-06	0,4731	25	-	3	-	2,9		2,7	159
G-PHEV ₂₀	2,2	80%	195	8,58	-3,98E-06	0,4731	30	-	7	-	3,2		2,7	195
G-PHEV ₄₀	2,2	63%	112	8,17	-3,98E-06	0,4731	50	-	12	-	3,1		2,1	154
D-PHEV ₂₀	2,6	80%	290	8,58	-3,98E-06	0,4731	30	-	7	-	2,3		2,0	143
EREV	1,4	35%	28	7,00	-3,98E-06	0,4731	100	50	18	-	2,3		1,2	85
BEV	-	-	0	7,82	-3,62E-06	0,3497	100	-	33	-			0,9	-
FCV	-	-	0	8,71	-3,88E-06	0,4114	100	-	3	4			1,4	-

Quelle: Eigene Darstellung, [204] [212] [207] [213] [214].

Anhang D 3: Übersicht der Spritsparoptionen.

Übersicht Add-ons		Markteinführung [Jahr]					Verbrauchsreduktion [%]					Produktionskosten [€]				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Kleines Fahrzeugsegment	G	2010	2011	2013	2015	2017	-7%	-16%	-26%	-35%	-42%	389	1.086	1.939	3.587	4.672
	G _{HEV}	2010	2011	2013	2015	2017	-3%	-9%	-16%	-23%	-28%	127	674	1.527	2.613	3.699
	D	2010	2011	2014	2016	2019	-3%	-7%	-14%	-22%	-26%	389	749	1.610	2.538	3.175
	D _{HEV}	2011	2012	2014	2017	–	-2%	-5%	-9%	-14%	–	327	837	1.565	2.201	–
	CNG	2011	2012	2013	2015	–	-7%	-15%	-27%	-36%	–	509	1.692	3.032	3.968	–
	CNG _{HEV}	2013	2014	2015	2016	–	-3%	-11%	-15%	-23%	–	262	1.131	1.685	2.995	–
	G-PHEV ₂₀	2013	2014	2016	–	–	-5%	-12%	-17%	–	–	262	1.378	2.651	–	–
	G-PHEV ₄₀	2013	2014	2016	–	–	-5%	-12%	-17%	–	–	262	1.378	2.651	–	–
	D-PHEV ₂₀	2015	2016	2018	–	–	-7%	-16%	-28%	–	–	329	1.303	2.119	–	–
	EREV	2013	2014	2016	–	–	-3%	-8%	-20%	–	–	172	764	2.037	–	–
	BEV	2014	2016	–	–	–	-5%	-12%	–	–	–	509	958	–	–	–
	FCV	2014	2016	–	–	–	-5%	-12%	–	–	–	509	958	–	–	–
Mittleres Fahrzeugsegment	G	2010	2011	2013	2016	2017	-8%	-17%	-23%	-35%	-42%	515	1.494	2.559	4.543	6.209
	G _{HEV}	2010	2011	2013	2015	2017	-7%	-12%	-18%	-24%	-28%	172	979	2.044	3.340	5.006
	D	2010	2011	2014	2016	2019	-9%	-13%	-19%	-25%	-30%	515	1.065	2.095	3.212	4.148
	D _{HEV}	2011	2012	2014	2017	–	-5%	-8%	-14%	-19%	–	172	721	2.009	2.945	–
	CNG	2011	2012	2013	2015	–	-11%	-24%	-30%	-37%	–	687	2.267	3.899	5.178	–
	CNG _{HEV}	2013	2014	2015	2016	–	-4%	-13%	-17%	-25%	–	378	1.494	2.267	3.976	–
	G-PHEV ₂₀	2013	2014	2016	–	–	-3%	-13%	-17%	–	–	378	1.752	3.632	–	–
	G-PHEV ₄₀	2013	2014	2016	–	–	-3%	-13%	-17%	–	–	378	1.752	3.632	–	–
	D-PHEV ₂₀	2015	2016	2018	–	–	-6%	-12%	-17%	–	–	378	1.494	2.430	–	–
	EREV	2013	2014	2016	–	–	-4%	-14%	-21%	–	–	258	1.030	2.911	–	–
	BEV	2014	2016	–	–	–	7%	18%	–	–	–	696	1.417	–	–	–
	FCV	2014	2016	–	–	–	7%	18%	–	–	–	696	1.417	–	–	–
Großes Fahrzeugsegment	G	2010	2011	2013	2016	2017	-7%	-14%	-23%	32%	-39%	478	1.384	2.315	3.847	5.308
	G _{HEV}	2010	2011	2013	2015	2017	-4%	-11%	-17%	-23%	-28%	155	931	1.862	2.877	4.338
	D	2010	2011	2014	2016	2019	13%	16%	-20%	-27%	-34%	478	996	1.771	2.715	3.498
	D _{HEV}	2011	2012	2014	2017	–	-6%	-12%	-18%	-22%	–	155	672	1.746	2.528	–
	CNG	2011	2012	2013	2015	–	-14%	-24%	-30%	-37%	–	672	2.095	3.362	4.403	–
	CNG _{HEV}	2013	2014	2015	2016	–	-4%	-13%	-17%	-25%	–	349	1.384	2.069	3.433	–
	G-PHEV ₂₀	2013	2014	2016	–	–	-5%	-12%	-18%	–	–	349	1.552	3.174	–	–
	G-PHEV ₄₀	2013	2014	2016	–	–	-5%	-12%	-18%	–	–	349	1.552	3.174	–	–
	D-PHEV ₂₀	2015	2016	2018	–	–	-10%	-21%	-28%	–	–	349	1.293	2.075	–	–
	EREV	2013	2014	2016	–	–	-3%	-8%	-13%	–	–	246	931	2.554	–	–
	BEV	2016	2018	–	–	–	-5%	-12%	–	–	–	614	1.235	–	–	–
	FCV	2016	2018	–	–	–	-5%	-12%	–	–	–	614	1.235	–	–	–

Quelle: Eigene Darstellung, [21].

Anhang D 4: Ergänzung: Politische und ökonomische Randbedingungen im Ausgangsszenario (Tabelle 7.3).

		2010	2020	2030	2040
Beimischung Bio-Ethanol zu Benzin	%	5	10	15	20
CO ₂ -Intensität Benzin (WTT)	g CO ₂ /kWh	35	22	10	0
Beimischung Bio-Diesel 1. Generation zu Diesel	%	10	13	15	20
Davon Beimischung Bio-Diesel 2. Generation zu Diesel 1. Gen.	%	1	50	100	100
CO ₂ -Intensität Diesel (WTT)	g CO ₂ /kWh	29	20	10	0
Beimischung Bio-Gas zu CNG	%	0	8	15	20
CO ₂ -Intensität CNG (WTT)	g CO ₂ /kWh	29	12	-5	-17

Quelle: Eigene Darstellung, [21].

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Bernd Propfe
Geburtsdatum / -ort 2. August 1983 / Boppard

Berufserfahrung

- seit 06/2015 Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (Weissach)
Baureihe BEV
- Koordination und Steuerung der Gesamtfahrzeug-Projektziele
 - Projektleitung für Sonderprojekte innerhalb der Baureihe
- 07/2012 – 05/2015 Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG (Stuttgart)
Produktstrategie Alternative Mobilität
- Steuerung von Elektromobilitätsprojekten in der frühen Phase
 - Erstellen und Führen der Porsche Elektromobilitätsroadmap
- 08/2009 – 06/2012 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (Stuttgart)
Institut für Fahrzeugkonzepte
- Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Forschungsfeldes „Fahrzeugsysteme und Technologiebewertung“
 - Forschungsschwerpunkte: Elektromobilität, Marktszenarien, Kostenbewertung, alternative Antriebsstränge, Traktionsbatterien

Studium

- 10/2003 – 04/2009 Wirtschaftsingenieurwesen
Universität Karlsruhe
- Mit Auszeichnung; Note: 1,2
 - Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit Oliver Wyman Consulting GmbH
Thema: „Dienstleistungsgeschäftsmodelle im Schienenfahrzeugbereich“
 - Vordiplom 10/2005; Note: 2,0
- 10/2006 – 03/2007 Wissenschaftliche Hilfskraft
Universität Karlsruhe: Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research

Praktika

- 10/2007 – 01/2008 Oliver Wyman Consulting GmbH (München)
Strategieberatung
- 04/2006 – 08/2006 Festo Corporation (Hauppauge, New York, USA)
Marketingabteilung
- 04/2003 – 07/2003 Schottel GmbH & Co. KG (Spay)
Grundpraktikum Metallverarbeitung
- 04/2002 – 05/2002 Schnorpfeil GmbH & Co. KG (Treis-Karden)
Hoch- und Tiefbau

Schule

- 08/1993 – 03/2002 Eichendorff-Gymnasium (Koblenz)
Allgemeine Hochschulreife; Note: 1,4
- 08/1989 – 07/1993 Grundschule (Waldesch)