



Methoden der Produktentwicklung
und Mechatronik



Methodische Entwicklung und Bewertung von Elektrifizierungskonzepten für innerstädtische Nutzfahrzeuge

Dissertation

Sven Gräbener

Methodische Entwicklung und Bewertung von Elektrifizierungskonzepten für innerstädtische Nutzfahrzeuge

**Vorstellung eines innovativen Entwicklungsansatzes
am Beispiel des Entsorgungsverkehrs**

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Sven Gräbener, M.Sc. MBA
geb. in Engelskirchen

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –**

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 12. Juni 2017

Berlin 2017

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich den zahlreichen Personen danken, ohne die das Anfertigen der vorliegenden Dissertation nicht möglich gewesen wäre.

Mein besonderer Dank für die intensive Betreuung und Möglichkeit für dieses Dissertationsvorhaben gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich, Leiter des Fachgebiets für Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik der Technischen Universität Berlin, an dem ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig war. Unzählige wertvolle Diskussionen, Ihre motivierte Offenheit gegenüber dem Thema und die kreative, fördernde Arbeitsumgebung haben enorm zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor, Leiter des Instituts für Konstruktionstechnik an der Technischen Universität Braunschweig, danke ich für die Zweitbetreuung, den intensiven wissenschaftlichen Diskurs und verschiedene Hilfestellungen zur Vertiefung der produktentwicklungsmethodischen Forschungsarbeit. Des Weiteren bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Auch möchte ich mich bei meinen Kollegen am Fachgebiet und unserer Sekretariatsleiterin Frau Barbara Schmunkamp für die Unterstützung bedanken. Hervorzuheben ist der fachliche Austausch und Zusammenarbeit in unseren Forschungsprojekten mit den Kollegen des ETS (Electric Transport Solutions) Teams, Franziska Kaiser, Tu-Anh Ly, Dominic Jefferies, Alexander Kunith und Enrico Lauth. Meinen studentischen Mitarbeitern Pavel Boev, Konstantin Brüske, David Jesch und Adrian Liepelt möchte ich ebenfalls für die vielfältige Unterstützung meiner Forschungsarbeiten danken.

Außerdem danke ich allen von mir betreuten Studenten, die mit Ihren Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten einen sehr wertvollen Beitrag zum Ergebnis dieser Arbeit geleistet haben. Stellvertretend herausheben möchte ich Constantin Conrad, Julia Harder, Sebastian Meinzolt, Yasin Nissen, Michael Tarnowski, Marcel Wimmelbücker und Jakob Wohlers, die mich durch wertvolle wissenschaftliche Diskussionen, Ihre Kreativität und Ihren Einsatz in besonderem Maße unterstützt haben.

Herzlich danken möchte ich auch dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Ermöglichung der Forschungsarbeiten im Forschungscampus Mobility2Grid und den Berliner Stadtreinigungsbetrieben, insbesondere den Herren Michael Tost und Christian Heyken, für die intensive Zusammenarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen.

Ebenfalls sehr gerne bedanke ich mich bei Maria Luise Diehl für das ausführliche Lektorat.

Mein größter Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für das Verständnis, die Geduld und die Motivation zum erfolgreichen Abschluss meiner Dissertation. Insbesondere danke ich meinen Eltern und meiner Freundin für die Ermöglichung und unermüdliche Unterstützung meines akademischen Werdegangs.

Berlin, Juni 2017

Sven Gräbener

Kurzfassung

Der Einsatz elektrischer und hybridisierter Antriebe ermöglicht die Energieeffizienz von Fahrzeugen zu steigern und gleichzeitig lokale Emissionen zu senken. Insbesondere innerstädtisch tragen schwere Nutzfahrzeuge durch hohe Kraftstoffverbräuche und starke Geräuschentwicklung auf anspruchsvollen Einsatzprofilen besonders zu auftretenden Emissionen bei. Bei Pkw und Linienbussen existieren bereits serienreife Fahrzeuge sowie verschiedene Ansätze für die Entwicklung und Bewertung alternativer Antriebe. Vorrangig durch energieintensive Arbeitsaggregate sowie erhöhte Komplexität, haben elektrifizierte Nutzfahrzeuge einen deutlich niedrigeren Technologiereifegrad und bestehende Methoden für den Produktentstehungsprozess sind ohne signifikante Änderungen nicht anwendbar.

In dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz zur Konzeptentwicklung elektrifizierter Nutzfahrzeuge vorgestellt. Basierend auf etablierten Vorgehensmodellen und Methoden in der Produktentstehung sowie den technischen Rahmenbedingungen der Elektro- und Hybridfahrzeuge wird eine strukturierte Methodik zur anwendungsorientierten Entwicklung von Fahrzeugsystemarchitekturen erarbeitet.

Zunächst wird eine umfangreiche fahrzeugspezifische Anforderungsanalyse in enger Abstimmung mit den Flottenbetreibern durchgeführt, um die Entwicklungsziele sowie Anforderungen an die Fahrzeuge durch Technologie, Flottenbetreiber und Fahrzeug-einsatzbeschreibung konkret zu identifizieren. Unterstützt wird die Auswertung durch Untersuchungen realer Fahrprofile und Energiebedarfssimulationen. Anschließend wird ein allgemeingültiger Lösungsraum für elektrifizierte Nutzfahrzeugsystemarchitekturen definiert und Fahrzeugkonzepte systematisch für einen spezifischen Fahrzeugtypen anhand der Anforderungsprofile entwickelt. Die ausgearbeiteten Konzepte werden in einem dritten Schritt einer mehrdimensionalen Bewertung unter Einbeziehung von Wirtschaftlichkeit, Umwelteinflüssen, technologischen Potentialen, betrieblichen Faktoren sowie der Bedeutung für das Unternehmens-Image unterzogen. Dabei werden sowohl Einzelkomponenten der Fahrzeuge als auch Antriebssystemstrukturen analysiert.

Die entwickelte Methodik wird in der vorliegenden Arbeit zunächst generisch beschrieben und auf deren wissenschaftlichen Neuheitsgrad eingegangen. Anschließend wird die Methode auf ein Papierkorbsammelfahrzeug und eine Großkehrmaschine für den innerstädtischen Betrieb angewendet sowie unterscheidende Charakteristika herausgestellt.

Besonders bei der Anwendung in interdisziplinären Teams erwies sich der vorgestellte Ansatz als effektives Hilfsmittel zur Identifikation geeigneter und umsetzbarer Konzepte für die Elektrifizierung von Nutzfahrzeugfuhrparks. Mit den Ergebnissen können die Erarbeitung einer unternehmensinternen Einführungsstrategie bei Flottenbetreibern gefördert und die Entwicklung anwendungsorientierter Fahrzeuggesamtsysteme bei Fahrzeugherstellern unterstützt werden.

Abstract

Electric and hybrid drivetrains are a proven path towards higher energy efficiency and lower emissions for road vehicles. In the urban environment in particular, commercial vehicles significantly contribute to these emissions due to their high fuel consumption and noise generation. Consequently, there are production-ready electric and hybrid vehicles as well as applicable development and evaluation methodologies for passenger cars and public buses today. However, alternative commercial vehicles exhibit a much lower technology readiness level due to their energy-intensive auxiliaries, complex drivetrains as well as the absence of applicable product development processes for the specific vehicles.

Therefore, this dissertation introduces a new approach to the concept development of electric and hybrid commercial vehicles. Refining established product development models, a structured methodology for the application-oriented development of vehicle system architectures based on the technical framework of electrified vehicles is presented.

Firstly, an extensive analysis of vehicle-specific requirements is carried out in close collaboration with fleet operators, so as to define development objectives as well as requirements for utilized technology, fleet management and vehicle operation. The analysis is supported by the interpretation of real drive cycles and the results of energy consumption simulations. Secondly, a universal solution space for electric and hybrid commercial vehicle system architectures is defined. In that regard, vehicle concepts are systematically developed conforming to specific vehicle applications. Thirdly, the established concepts are evaluated in a multi-dimensional approach, including factors such as economic feasibility, environmental impact, technological benefits, operational effects and relevance to a company's reputation. The assessment incorporates individual vehicle components as well as drivetrain system structures.

In this scientific thesis, the presented methodology is introduced universally, whilst its characteristics are described in-depth. The approach is then demonstrated on urban commercial vehicles for waste basket collection and street sweeping.

The methodology proved to be an effective tool to identify applicable and feasible concepts for electromobility in commercial vehicle fleets, especially when working in interdisciplinary teams. The results can support fleet operators formulating in-house implementation strategies and OEMs developing application-oriented electric and hybrid vehicle systems.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Kurzfassung.....	V
Abstract	VI
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungen	XVI
Formelzeichen und Indizes	XVII
Zitierweise	XVIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Vorgehen.....	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Elektromobilität bei Nutzfahrzeugen	5
2.1.1 Charakteristik der Anwendung im Wirtschaftsverkehr.....	5
2.1.2 Elektrifizierte Antriebsstrangtopologien	7
2.1.2.1 Batteriebetriebene und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge.....	7
2.1.2.2 Fahrzeuge mit Hybridantrieben	11
2.1.3 Spezifische Komponenten und Eigenschaften	15
2.1.3.1 Energiewandler	15
2.1.3.2 Energiespeicher	19
2.1.3.3 Ladetechnologie.....	24
2.1.4 Nutzen der Elektrifizierung	26
2.1.4.1 Wirkungsgrade von Vergleichsantrieben	26
2.1.4.2 Treibhausgase und Luftschadstoffe durch Nutzfahrzeuge.....	27
2.1.4.3 Geräuschemissionen elektrifizierter Fahrzeuge.....	28
2.1.5 Anwendungsbeispiele	30

2.2	Grundlagen der Produktentwicklung	34
2.2.1	Allgemeingültige Vorgehensmodelle	35
2.2.2	Anforderungsanalyse	41
2.2.2.1	Produktanforderungslisten.....	42
2.2.2.2	Methoden zur Anforderungsbestimmung.....	44
2.2.3	Konzeptentwicklung	48
2.2.3.1	Methoden zur Lösungsfindung	51
2.2.3.2	Morphologische Analyse	52
2.2.3.3	Reduktion der Lösungsalternativen	53
2.2.4	Entscheidungsfindung	54
2.2.4.1	Nutzwert-Analyse	55
2.2.4.2	Total-Cost-of-Ownership-Analyse.....	56
2.2.4.3	Lebenszyklusanalyse	58
3	Problemstellung und Forschungsansatz	61
3.1	Herleitung der Forschungsfragen.....	61
3.1.1	Entwicklungsmethode zur Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen.....	61
3.1.2	Relevante Aspekte für nutzergerechte Elektrifizierungskonzepte	61
3.1.3	Strukturierter Auswahl- und Entscheidungsprozess.....	62
3.2	Lösungsansatz zur Beantwortung der Forschungsfragen	62
3.2.1	Anforderungsanalyse	64
3.2.2	Konzeptentwicklung	65
3.2.3	Konzeptbewertung	68
4	Anforderungsprofile für die Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen	71
4.1	Anforderungsanalyse	71
4.1.1	Ziele der Konzeptentwicklung.....	72
4.1.2	Anforderungen elektrifizierter Fahrzeuge.....	73
4.1.3	Anforderungen der Flottenbetreiber im Entsorgungsverkehr	75
4.1.4	Anforderungen der Fahrzeugtypen und der Einsatzbeschreibung	76
4.2	Fahrprofilfassung.....	79
4.3	Energiebedarfssimulation	82

4.3.1	Simulationsmethoden für Fahrzeugantriebe	83
4.3.2	Energiebedarf des Fahrtriebs	84
4.3.3	Energiebedarf des Arbeitsaggregats	86
4.4	Auswertung der Daten	86
4.4.1	Datenanalyse Fahrprofile	86
4.4.2	Ergebnisse der Energiebedarfssimulation	89
4.4.3	Anforderungsprofile für die Anwendungsbeispiele	95
5	Entwicklung von Elektrifizierungskonzepten für Nutzfahrzeuge	98
5.1	Morphologischer Kasten e-Nutzfahrzeuge	99
5.2	Systematische Eingrenzung des Lösungsraums	101
5.2.1	Schritt 1 – Quantitative Ausschlusskriterien	102
5.2.2	Schritt 2 – Qualitative Ausschlusskriterien	105
5.3	Generierung von Konzepten	107
5.4	Vorselektion der Topologien zur Bewertung	110
6	Bewertung der Konzepte	114
6.1	Dimensionen der Bewertung und Bewertungskriterien	115
6.2	Mehrstufiger Gewichtungsprozess und Ermittlung der Gewichtungsfaktoren	116
6.3	Bewertung der Konzepte	120
6.3.1	Technologie	121
6.3.2	Betrieb	132
6.3.3	Wirtschaftlichkeit	141
6.3.4	Umwelteinflüsse	152
6.3.5	Unternehmens-Image	162
6.4	Bewertungsergebnisse	165
7	Fazit	168
7.1	Zusammenfassung	168
7.2	Ausblick	170
8	Literatur	172
A	Anhang	192

Studentische Arbeiten	192
Veröffentlichungen	193
Datenaufbereitung für Fahrprofile.....	194
Energiebedarfe der Fahrzeugtypen mit maximaler Zuladung	198
Simulationsergebnisse Papierkorbsammelfahrzeug	198
Simulationsergebnisse Großkehrmaschine	200
Nutzwerte der Elektrifizierungskonzepte.....	202

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Anteil der Nutzfahrzeuge an den CO ₂ -Emissionen in Deutschland	2
Abb. 1-2:	Treiber für alternative Antriebe bei Nutzfahrzeugen	3
Abb. 1-3:	Struktur der Arbeit im Flussdiagramm.....	4
Abb. 2-1:	NO _x - und Partikelemissionen des Wirtschaftsverkehrs	6
Abb. 2-2:	Wirkungsgrade batterie-elektrisches und Wasserstoff-BZ-Fahrzeug.....	9
Abb. 2-3:	Hybrid-Antriebsarchitekturen für Fahrzeuge	12
Abb. 2-4:	Parallel-Hybrid Antriebsarchitekturen.....	13
Abb. 2-5:	Serielle, kombinierte und leistungsverzweigte Hybridarchitekturen	14
Abb. 2-6:	Einordnung elektrifizierter Antriebsstrangarchitekturen	15
Abb. 2-7:	Schematisches Motorkennfeld eines Hubkolbenmotors	16
Abb. 2-8:	Wirkungsgradkennfeld einer elektrischen Maschine in der Fahrzeuganwendung	18
Abb. 2-9:	Energiedichten ausgewählter Energiespeicher im Vergleich.....	20
Abb. 2-10:	Spezifische Leistungs- und Energiedichte von Speichertechnologien	21
Abb. 2-11:	Energiespeicher für Nutzfahrzeuge im Vergleich	23
Abb. 2-12:	Papierkorbsammelfahrzeug der Berliner Stadtreinigung	31
Abb. 2-13:	Großkehrmaschine der Berliner Stadtreinigung	33
Abb. 2-14:	Arbeitsschritte nach VDI-Richtlinie 2221	36
Abb. 2-15:	Braunschweiger Konstruktionsmethodik-Modell.....	37
Abb. 2-16:	Münchener Vorgehensmodell	39
Abb. 2-17:	V-Modell als Makrozyklus in der VDI 2206.....	39
Abb. 2-18:	Hauptarbeitsschritte zum Erstellen der Anforderungsliste	43
Abb. 2-19:	Einstufung konstruktionsmethodischer Hilfsmittel in der Anforderungsanalyse	47
Abb. 2-20:	Arbeitsschritte beim Konzipieren.....	48
Abb. 2-21:	Darstellung der Produktarchitektur in der METUS-Raute	50
Abb. 2-22:	Gesamtlösungskombinationen im morphologischen Kasten	52
Abb. 2-23:	Schematisches Zielsystem mit Gewichtungsfaktoren.....	56
Abb. 2-24:	TCO-Kostenstruktur für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte.....	58
Abb. 2-25:	Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und 14044.....	59
Abb. 2-26:	Schematisches Modell einer Umwelteinflussanalyse für Fahrzeuge	60
Abb. 3-1:	Fahrzeugkonzept-Entwicklungsprozess in der Übersicht	63
Abb. 3-2:	Prozess zum Aufbau von Anforderungsprofilen	64
Abb. 3-3:	Lösungsansatz für die Entwicklung von Elektrifizierungskonzepten	66
Abb. 3-4:	Bewertungsprozess mit mehrstufiger morphologischer Nutzwertanalyse	69
Abb. 4-1:	Entwicklung der Anforderungsprofile als Prozessschaubild	71
Abb. 4-2:	u-blox EVK-M8N Evaluation Kit	80
Abb. 4-3:	Beispiel für ein Fahrprofil der Großkehrmaschine	82
Abb. 4-4:	Struktur einer Vorwärtssimulation	83
Abb. 4-5:	Struktur einer Rückwärtssimulation.....	84
Abb. 4-6:	Ø-Gesamtenergiebedarf der Großkehrmaschine pro Schicht	90

Abb. 4-7:	Ø-Gesamtenergiebedarf des Papierkorbsammelfahrzeugs pro Schicht	91
Abb. 4-8:	Ø-Energiebedarfsanteil der Betriebssegmente der Großkehrmaschine	92
Abb. 4-9:	Ø-Energiebedarfsanteil der Betriebssegmente des Papierkorbsammelfahrzeugs	92
Abb. 4-10:	Ø-Energiebedarf im Werkbetrieb der Großkehrmaschine nach Antriebsaggregat	93
Abb. 4-11:	Ø-Energiebedarf im Werkbetrieb des Papierkorbsammlers nach Antriebsaggregat	93
Abb. 4-12:	Ø-Fahrtriebenergiebedarf der Großkehrmaschine nach Betriebssegment.....	94
Abb. 4-13:	Ø-Fahrtriebenergiebedarf des Papierkorbsammlers nach Betriebssegment.....	94
Abb. 4-14:	Theoretisches Rekuperationspotential der Fahrzeugtypen	95
Abb. 5-1:	Entwicklungsprozess der Elektrifizierungskonzepte in der Übersicht	98
Abb. 5-2:	Morphologischer Lösungsraum für elektrifizierte Nutzfahrzeuge	99
Abb. 5-3:	Erster Reduktionsschritt für das Papierkorbsammelfahrzeug	103
Abb. 5-4:	Erster Reduktionsschritt für die Großkehrmaschine	104
Abb. 5-5:	Zweiter Reduktionsschritt für das Papierkorbsammelfahrzeug	106
Abb. 5-6:	Zweiter Reduktionsschritt für die Großkehrmaschine	107
Abb. 5-7:	Beispiel für ein Elektrofahrzeugkonzept beim Papierkorbsammelfahrzeug ...	108
Abb. 5-8:	Nomenklatur für die Konzeptdarstellung in Blockdiagrammen	109
Abb. 5-9:	Entwickelte Fahrzeugsystemarchitekturen der Anwendungsbeispiele.....	110
Abb. 5-10:	Elektrifizierungskonzepte für das Papierkorbsammelfahrzeug	112
Abb. 5-11:	Elektrifizierungskonzepte für die Großkehrmaschine	113
Abb. 6-1:	Bewertungsprozess mit mehrstufiger morphologischer Nutzwertanalyse	114
Abb. 6-2:	Dreistufige Gewichtungshierarchie des morphologischen Kastens	117
Abb. 6-3:	Gewichtungsergebnisse der Anwendungsbeispiele auf Ebene I	117
Abb. 6-4:	Gesamtstruktur der Gewichtungshierarchie an einem Beispiel	119
Abb. 6-5:	Schematische Prozessdarstellung zur Entscheidungsfindung.....	120
Abb. 6-6:	Technik-Bewertung Legende für Elektrofahrzeuge	124
Abb. 6-7:	Technik-Bewertung eines Elektrofahrzeugkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug	124
Abb. 6-8:	Technik-Bewertungs-Legende für Hybridfahrzeuge	125
Abb. 6-9:	Technik-Bewertung eines Parallel-Hybridfahrzeugkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug	126
Abb. 6-10:	Technik-Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug	127
Abb. 6-11:	Technik-Bewertung eines Parallel-Hybridkonzepts mit Aufbaumotor für die Großkehrmaschine.....	128
Abb. 6-12:	Technik-Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts mit Aufbaumotor für die Großkehrmaschine	129
Abb. 6-13:	Technik-Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts mit elektrischem Arbeitsaggregat für die Großkehrmaschine.....	130

Abb. 6-14:	Betriebliche Bewertungs-Legende für Elektrofahrzeuge	133
Abb. 6-15:	Betriebliche Bewertung eines Elektrofahrzeugkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug	134
Abb. 6-16:	Betriebliche Bewertungs-Legende für Hybridfahrzeuge	135
Abb. 6-17:	Betriebliche Bewertung eines Parallel-Hybridfahrzeugkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug	135
Abb. 6-18:	Betriebliche Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug	136
Abb. 6-19:	Betriebliche Bewertung eines Parallel-Hybridkonzepts mit Aufbaumotor für die Großkehrmaschine	137
Abb. 6-20:	Betriebliche Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts mit Aufbaumotor für die Großkehrmaschine	138
Abb. 6-21:	Betriebliche Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts mit elektrischem Arbeitsaggregat für die Großkehrmaschine	139
Abb. 6-22:	Struktur des verwendeten TCO-Ansatzes	141
Abb. 6-23:	Batteriesystempreisentwicklung des TCO-Modells	143
Abb. 6-24:	Prognose der Dieselpreisentwicklung	145
Abb. 6-25:	Prognose der Strompreisentwicklung	145
Abb. 6-26:	TCO-Werte für ausgewählte Parallel-Hybridkonzepte des Papierkorbsammelfahrzeugs	147
Abb. 6-27:	TCO-Werte für ausgewählte Seriell-Hybridkonzepte des Papierkorbsammelfahrzeugs	147
Abb. 6-28:	Vergleich der TCO-Werte für ausgewählte Hybrid- und Elektrofahrzeugkonzepte des Papierkorbsammelfahrzeugs.....	148
Abb. 6-29:	TCO-Werte für ausgewählte Parallel-Hybridkonzepte der Großkehrmaschine	149
Abb. 6-30:	TCO-Werte für ausgewählte Seriell-Hybridkonzepte der Großkehrmaschine	150
Abb. 6-31:	Vergleich der TCO-Werte für ausgewählte Hybrid-Konzepte der Großkehrmaschine	150
Abb. 6-32:	Struktur des verwendeten Umwelteinflussanalyse-Modells.....	153
Abb. 6-33:	CO ₂ -Emissionsfaktoren verschiedener Kraftwerkstypen im Vergleich.....	154
Abb. 6-34:	Antriebssystemspezifische Emissionen der Papierkorbsammelfahrzeug- Konzepte	156
Abb. 6-35:	Antriebssystemspezifische Emissionen der Großkehrmaschinen- Konzepte	157
Abb. 6-36:	Quellenspezifische Lärmreduktions-Maßnahmen für Papierkorbsammelfahrzeuge	160
Abb. 6-37:	Quellenspezifische Lärmreduktions-Maßnahmen für Großkehrmaschinen ...	160
Abb. 6-38:	Zielsystem zur Bewertung der Lärmemissionen.....	161
Abb. 6-39:	Bewertungsergebnisse für das Papierkorbsammelfahrzeug im Radar- Diagramm.....	165
Abb. 6-40:	Bewertungsergebnisse für die Großkehrmaschine im Radar-Diagramm.....	166

Abb. A-1:	Zweistufiger Drift-Filter.....	195
Abb. A-2:	Inkonstante Zeitdifferenz der Messpunkte.....	196
Abb. A-3:	Typischer Indikationsfehler	197
Abb. A-4:	Maximaler Gesamtenergiebedarf des Papierkorbsammelfahrzeugs pro Schicht.....	198
Abb. A-5:	Maximaler Energiebedarfsanteil der Betriebssegmente des Papierkorbsammlers	198
Abb. A-6:	Maximaler Energiebedarf im Werkbetrieb des Papierkorbsammlers	199
Abb. A-7:	Maximaler Fahrantriebsenergiebedarf des Papierkorbsammlers	199
Abb. A-8:	Maximaler Gesamtenergiebedarf der Großkehrmaschine pro Schicht	200
Abb. A-9:	Maximaler Energiebedarfsanteil der Betriebssegmente der Großkehrmaschine	200
Abb. A-10:	Maximaler Energiebedarf im Werkbetrieb der Großkehrmaschine	201
Abb. A-11:	Maximaler Fahrantriebsenergiebedarf der Großkehrmaschine	201
Abb. A-12:	Gesamtergebnis der Nutzwertanalyse für das Papierkorbsammelfahrzeug ..	202
Abb. A-13:	Gesamtergebnis der Nutzwertanalyse für die Großkehrmaschine	203

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Vergleich von BEV und FCEV im Nutzfahrzeugbereich	11
Tab. 2-2:	Eigenschaften von Nutzfahrzeug-Zellchemien im qualitativen Vergleich	22
Tab. 2-3:	Ladestrategien für elektrifizierte Nutzfahrzeuge	25
Tab. 2-4:	Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz bei Nutzfahrzeugen [%]	26
Tab. 2-5:	Immissionsrichtwerte außerhalb von Gebäuden in dB(A)	29
Tab. 2-6:	Technische Daten des Papierkorbsammelfahrzeugs	31
Tab. 2-7:	Ausgewählte Elektro- und Hybridkonzepte in der Transporter-Klasse	32
Tab. 2-8:	Technische Daten Großkehrmaschine	33
Tab. 2-9:	Ausgewählte Elektro- und Hybridkonzepte für Kehrmaschinen	34
Tab. 2-10:	Auflistung aktueller TCO-Modelle für elektrifizierte Fahrzeuge	57
Tab. 2-11:	Relevante Publikationen als Grundlage der Umwelteinflussanalyse	59
Tab. 4-1:	Technology Readiness Level Definition	76
Tab. 4-2:	Fahrzeugspezifische Anforderungen des Papierkorbsammelfahrzeug	77
Tab. 4-3:	Fahrzeugspezifische Anforderungen der Großkehrmaschine	77
Tab. 4-4:	Datenauswertung Großkehrmaschine	88
Tab. 4-5:	Datenauswertung Papierkorbsammelfahrzeug	89
Tab. 4-6:	Anforderungsprofil Großkehrmaschine	96
Tab. 4-7:	Anforderungsprofil Papierkorbsammelfahrzeug	97
Tab. 5-1:	Qualitative Anforderungen an die Fahrzeugtypen	105
Tab. 6-1:	Kriterien der fünf Bewertungsdimensionen	116
Tab. 6-2:	Exemplarische Gewichtungsergebnisse der Ebene II für Technologie	118
Tab. 6-3:	Exemplarische Gewichtungsergebnisse der Ebene II für Betrieb	119
Tab. 6-4:	Nutzwerte der technischen Bewertung für das Papierkorbsammelfahrzeug	131
Tab. 6-5:	Nutzwerte der technischen Bewertung für die Großkehrmaschine	131
Tab. 6-6:	Nutzwerte der betrieblichen Bewertung für das Papierkorbsammelfahrzeug	140
Tab. 6-7:	Nutzwerte der betrieblichen Bewertung für die Großkehrmaschine	140
Tab. 6-8:	Szenarien-Definition für die Kostenentwicklung relevanter Parameter	143
Tab. 6-9:	Fahrzeugkonzept-Batteriekapazitäten entsprechend den Anforderungsprofilen	144
Tab. 6-10:	Nutzwerte der Wirtschaftlichkeitsbewertung für das Papierkorbsammelfahrzeug	151
Tab. 6-11:	Nutzwerte der Wirtschaftlichkeitsbewertung für die Großkehrmaschine	152
Tab. 6-12:	Emissionsgrenzwerte für die betrachteten Nutzfahrzeuge [mg/kWh]	155
Tab. 6-13:	Nutzwerte der Emissionsanalyse für das Papierkorbsammelfahrzeug	158
Tab. 6-14:	Nutzwerte der Emissionsanalyse für die Großkehrmaschine	159
Tab. 6-15:	Nutzwerte der Lärmemissionsreduktion elektrifizierter Fahrzeugkonzepte	161
Tab. 6-16:	Image-Relevanz unterschiedlicher Papierkorbsammelfahrzeug-Konzepte	164
Tab. 6-17:	Image-Relevanz unterschiedlicher Großkehrmaschine-Konzepte	164

Abkürzungen

ASM	Asynchronmaschine
AUX	Auxiliary; Arbeitsaggregat
BEV	Battery Electric Vehicle
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVi	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BSR	Berliner Stadtreinigung
BV	Bewertungsverantwortlicher
BZ	Brennstoffzelle
CAN	Controller Area Network
CO	Kohlenmonoxid
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FKT	Funktion
GNSS	Global Navigation Satellite System
IT	Informationstechnik
LCA	Life Cycle Assessment; Lebenszyklusanalyse
LFP	Lithium-Eisenphosphat
LTO	Lithium-Titanat
MGMT	Management
MHLA	Mechanisch-hydraulisch leistungsverzweigter Antriebsstrang
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NMC	Nickel-Mangan-Kobaltoxid
NO _x	Stickstoffoxide
OEM	Original Equipment Manufacturer; Fahrzeughersteller
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
POI	Point of interest
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
REEV	Range-Extended Electric Vehicle
TA	Technische Anleitung
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgase
TRL	Technology Readiness Level; Technologiereifegrad
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VV	Verwaltungsvorschrift
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

Formelzeichen und Indizes

α	[°]	Steigungswinkel des Fahrzeugs
η	[]	Wirkungsgrad
ρ_L	[kg/m ³]	Spezifische Dichte der Luft
A	[m/s ²]	Fahrzeugbeschleunigung
A	[m ²]	Querschnittsfläche des Fahrzeugs
c_W	[]	Luftwiderstandsbeiwert
E_{Aux}	[J]	Arbeitsaggregat-Energiebedarf
E_{Fahr}	[J]	Fahrertrieb-Energiebedarf
f_R	[]	Rollwiderstandsbeiwert
F_a	[N]	Beschleunigungswiderstand
F_L	[N]	Luftwiderstand
F_R	[N]	Rollwiderstand
F_{St}	[N]	Steigungswiderstand
g	[m/s ²]	Gravitationskonstante
P_{Aux}	[W]	Leistung des Arbeitsaggregats
N	[]	Nutzwert / Gesamtbewertung in der Nutzwertanalyse
t	[s]	Fahrzeit
v	[m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{ij}	[]	Bewertung in der Nutzwertanalyse
w_i	[]	Gewichtungsfaktor in der Nutzwertanalyse
Z_x	[]	Teilziel / Ziel der Nutzwertanalyse

Zitierweise

Bedeutung	Beschreibung	Beispiel
Wörtliches Zitat	Schreibweise mit Anführungszeichen	„Standardwerk im Studium und in der Praxis“ ¹
Fußnote für ein wörtliches Zitat	Kurzschreibweise ohne Vgl.:	Feldhusen/Grote 2013, S. V
Fußnote für ein indirektes Zitat	Kurzschreibweise mit Vgl.:	Vgl.: Feldhusen/Grote 2013, S. V
Abkürzung bei mehr als drei Autoren	Abkürzung nach dem ersten Autor durch et al.	Hofmann et al. 2007

¹ Feldhusen/Grote 2013, S. V

1 Einleitung

Verknappung der Erdölreserven, globaler Klimawandel, alarmierende Luftschadstoffwerte in Metropolregionen und hohe Unsicherheiten in der Kraftstoffpreisentwicklung sind nur einige Schlagworte, die das konventionelle verbrennungsmotorisch-betriebene Kraftfahrzeug zunehmend in Frage stellen. Vor diesem Hintergrund sind durch die Gesetzgeber in der Vergangenheit sukzessive Emissionsgrenzwerte für Personenkraftwagen und leichte² sowie schwere Nutzfahrzeuge³ eingeführt worden. Zusätzlich wurde in der sogenannten Clean Vehicle Directive⁴ beschlossen, dass Flottenbetreiber während der Beschaffung neuer Fahrzeuge die Treibhausgas- und Schadstoffemissionen im Beschaffungsprozess monetär berücksichtigen müssen. Trotz der im Vergleich geringen Zulassungszahlen tragen insbesondere kommerzielle Nutzfahrzeuge durch hohe Kraftstoffverbräuche und Fahrleistungen wesentlich zu den verursachten Gesamtemissionen des Verkehrs bei.⁵ Die Fahrzeuge weisen immer höhere Kraftstoffkosten während des Betriebs auf, was die Forderungen der Flottenbetreiber nach energieeffizienteren Fahrzeugen weiter bekräftigt. Die Potentiale zur Verringerung des Energiebedarfs rein verbrennungsmotorisch betriebener Fahrzeuge sind jedoch begrenzt.⁶ Die Elektrifizierung und Hybridisierung von Antrieben mit gleichzeitiger Elektrifizierung der Neben- und Arbeitsaggregate ist ein weltweit anerkannter Schlüssel dieser Herausforderung zu begegnen, insbesondere wenn dadurch verstärkt erneuerbare Energien im Verkehr genutzt werden können.

1.1 Motivation

Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sind regional, national und international ein relevantes Thema, welches mit verschiedenen regulatorischen Instrumenten begleitet wird um eine langfristige Reduktion des Ausstoßes zu erreichen. Neben den zuvor erwähnten Direktiven der Europäischen Union wurden beispielsweise in Deutschland Ziele zur stärkeren Nutzung erneuerbarer Energien und alternativer Antriebssysteme definiert, die im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie⁷ mit spezifischen Handlungsempfehlungen konkretisiert wurden und im Elektromobilitätsgesetz⁸ eine gesetzliche Grundlage bekommen haben. Auf lokaler Ebene werden ebenfalls Maßnahmen definiert. Beispielsweise nach dem Berliner Energiewendegesetz soll die Gesamtsumme der Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2020 um mindestens 40 %, bis zum Jahr 2030 um mindestens 60 % und bis zum Jahr 2050 um mindestens 85 % im Vergleich zu der Gesamtsumme der Kohlendioxidemissionen des Jahres 1990 verringert und zusätzlich alle sonstigen Treibhausgasemissionen erheblich reduziert werden.⁹ Das Zusammenführen von Energiewende und Reduktion der

² Vgl.: Europäisches Parlament 2009a; Europäische Kommission 2013; Europäisches Parlament 2014

³ Vgl.: Europäisches Parlament 2009b; Europäische Kommission 2011; Europäische Kommission 2014;

⁴ Vgl.: European Parliament and Council 2009

⁵ Vgl.: Löwenberg et al. 2011, S. 7

⁶ Vgl.: Law/Jackson/Chan 2011; Hill et al. 2011

⁷ Vgl.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) 2012

⁸ Vgl.: Bundesregierung 2015

⁹ Vgl.: Land Berlin 2016, Abschnitt 2 § 3 (1)

Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors soll im Rahmen dieser Arbeit in der Anwendung auf kommunale Nutzfahrzeugflotten näher betrachtet werden.

Der Verkehrs- und Transportsektor ist für rund 19 % der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich. Wie in Abb. 1-1 dargestellt, entstehen davon ca. ein Viertel der Emissionen durch den Betrieb von Nutzfahrzeugen mit steigender Tendenz.¹⁰ Der Entsorgungs- und Reinigungsverkehr stellt von den relevanten Fahrzeugtypen nur einen Teil der Fahrzeuge, die jedoch auf Fahrgestellen aus Bau-, Fern- und Lieferverkehr basieren. Zusätzlich werden die Spezialfahrzeuge unmittelbar in Wohngebieten und im Innenstadtbereich betrieben, sodass Schadstoffemissionen eine besonders hohe Wirkung haben.

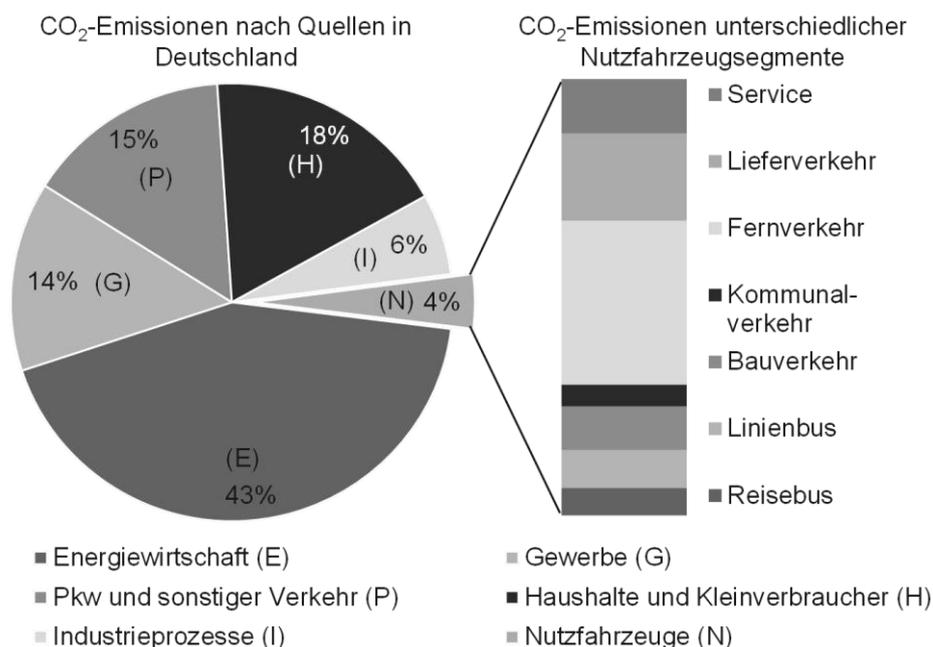


Abb. 1-1: Anteil der Nutzfahrzeuge an den CO₂-Emissionen in Deutschland¹¹

Die Effekte von Elektro- und Hybridantrieben werden besonders im Pkw-Segment kontrovers diskutiert und je nach Nutzungsprofil der Fahrzeuge sehr unterschiedlich bewertet. Technologisch sind die Fahrzeuge inzwischen Stand der Technik¹² mit kontinuierlich steigender Marktdurchdringung.¹³ Im Vergleich mit Pkw haben Nutzfahrzeuge deutlich höhere Kraftstoffverbräuche mit höherer Laufleistung, wodurch generell eine bessere Ausgangssituation zum Einsatz von Elektrofahrzeugen gesehen wird.¹⁴

¹⁰ Vgl.: Europäische Kommission 2016, S. 9

¹¹ Vgl.: Hammer 2014, S. 9; Hohenberger/Mühlenhoff 2014, S. 14; Umweltbundesamt 2016a

¹² Vgl.: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) 2014; Kampker/Vallée/Schnettler 2013; Reif 2012

¹³ Vgl.: Randall 2016; PRNewswire 2016

¹⁴ Vgl.: Hacker/von Waldenfels/Mottschall 2015; Aichinger 2014; Grausam/Parzinger/Müller 2015; Helms et al. 2016, S. 87; Gordon/Burdelski/Cannon 2003, S. 53

Treiber für die fortschreitende Elektrifizierung der Antriebsstränge im Nutzfahrzeugbereich werden als Überblick in Abb. 1-2 dargestellt. Dabei werden speziell bei den technologischen, marktwirtschaftlichen und sozio-ökonomischen Faktoren noch deutliche Verbesserungspotentiale gesehen. Demgegenüber stehen u.a. hohe Anschaffungskosten, geringe Reichweiten, Infrastrukturverfügbarkeit, beschränktes Angebot, Flexibilitätseinschränkungen und Unsicherheiten beim Restwert der Fahrzeuge.¹⁵ Bedingt durch geringe Stückzahlen und hohe Kosten für hybrid- und elektrofahrzeugspezifische Komponenten sowie die kostenintensive Entwicklung und niedrige Entwicklungsbudgets im Vergleich mit der Pkw-Industrie ist der Technologiereifegrad elektrifizierter Nutzfahrzeuge relativ gering. Teilweise wurden dennoch von großen Herstellern und Zulieferern Fahrzeugprototypen und Vorserienfahrzeuge entwickelt.¹⁶ Nach Experteninterviews genügen die Fahrzeuge häufig jedoch noch nicht den Anforderungen der Flottenbetreiber. Zusätzlich besteht durch die Vielzahl verfügbarer Technologieoptionen und –kombinationen eine hohe Unsicherheit, ein typisches Phänomen bei radikalen Innovationen wie der Elektrifizierung von Fahrzeugflotten.¹⁷ Dementsprechend muss diese bei Produktentwicklungsprozessen und Wirtschaftlichkeitsanalysen berücksichtigt und aktiv adressiert werden.

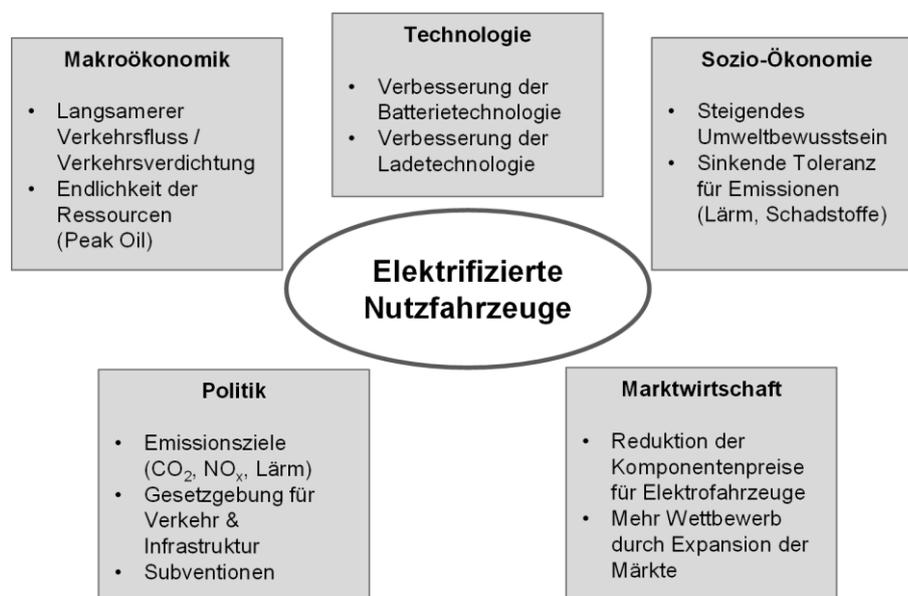


Abb. 1-2: Treiber für alternative Antriebe bei Nutzfahrzeugen¹⁸

1.2 Vorgehen

An diesem Punkt setzt das Vorgehen dieser Dissertation durch die Einbeziehung der Flottenbetreiber in eine nutzerorientierte Fahrzeugkonzeptentwicklung für alternative

¹⁵ Vgl.: Kampker/Vallée/Schnettler 2013, S.15-23; Bille et al. 2011; Ponn/Lindemann 2011

¹⁶ Vgl.: Hammer/Biermann 2010; Zhang 2016; Haag/Ade 2015; Fischer 2016; FAUN Umwelttechnik GmbH & Co.KG 2015

¹⁷ Vgl.: Proff et al. 2014, S. 12; Gorbea Díaz 2011, S. 67

¹⁸ Eigene Darstellung nach Bille et al. 2011, S. 5; Reif 2012, S.2; Wallentowitz/Freialdenhoven 2011, S. 3; Biermann 2014, S. 5-10

Antriebe an. Dementsprechend wird ein ganzheitlicher Ansatz für die Konzeptentwicklung elektrifizierter Nutzfahrzeuge mit energieintensiven Arbeitsaggregaten entwickelt und anhand der Anwendungsbeispiele Papierkorbsammelfahrzeug und Großkehrmaschine aus dem Kommunalverkehr veranschaulicht. Dazu wird als Grundlage in Kapitel 2 der Stand der Technik beschrieben. Zunächst wird im Detail auf die Elektromobilität bei Nutzfahrzeugen hinsichtlich Nutzen der Elektrifizierung, elektrifizierter Antriebsstrangtopologien sowie spezifische Komponenten von Elektro- und Hybridfahrzeugen eingegangen. Anschließend werden die Anwendungsbeispiele vorgestellt und deren Eigenschaften erläutert. Des Weiteren werden relevante Grundlagen der Produktentwicklung vorgestellt. Dazu werden zuerst unterschiedliche Ansätze von Produktentwicklungsprozessen differenziert und im Anschluss detailliert auf Anforderungsanalyse, Konzeptentwicklung und Entscheidungsfindung eingegangen. Basierend auf diesen Grundlagen werden in Kapitel 3 die Forschungsfragen hergeleitet sowie der Lösungsansatz in einer Übersicht dargestellt. In den folgenden Kapiteln 4–6 werden die zentralen Bausteine dieser Arbeit zunächst allgemeingültig beschrieben und anschließend anhand der Anwendungsbeispiele eingesetzt. Die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Dissertation werden in Kapitel 7 abschließend zusammengefasst. Abb. 1-3 zeigt die Struktur der Arbeit übersichtlich in einem Flussdiagramm.

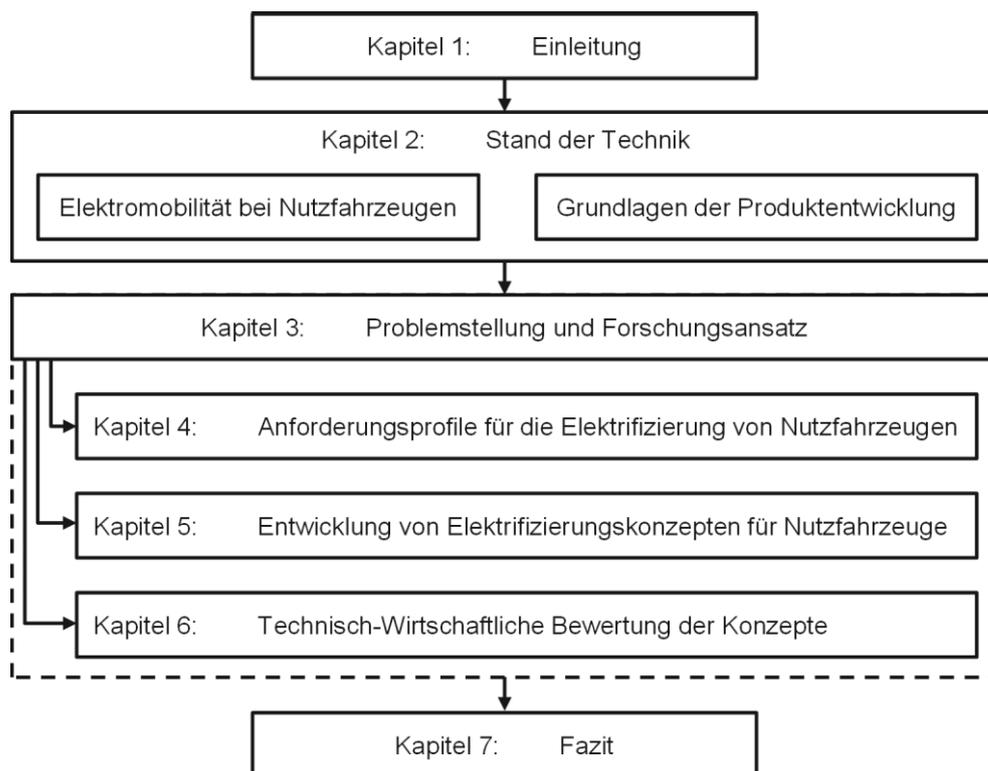


Abb. 1-3: Struktur der Arbeit im Flussdiagramm

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die benötigten Grundlagen und Rahmenbedingungen für das spezifische Vorgehen dieser Dissertation behandelt. Dazu wird zunächst auf Elektromobilität bei Nutzfahrzeugen eingegangen und im Anschluss relevante Ansätze in der Produktentwicklung beschrieben. Der Detailgrad orientiert sich dabei an der benötigten Informationstiefe, um die Problemstellung und den Forschungsansatz in dieser Arbeit herzuleiten.

2.1 Elektromobilität bei Nutzfahrzeugen

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, können elektrifizierte Nutzfahrzeuge einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehr leisten und zusätzlich die Vermeidung spezifischer Luftschadstoff- und Lärmemissionen unterstützen. Im folgenden Kapitel wird auf die Relevanz des Wirtschaftsverkehrs eingegangen sowie Elektro- und Hybridfahrzeuge konzeptionell vorgestellt. Verwendete Komponenten in den Fahrzeugen und deren Eigenschaften sowie der konkrete Nutzen elektrifizierter Fahrzeuge werden im Anschluss erläutert. Abschließend werden die Anwendungsbeispiele für diese Arbeit beschrieben.

2.1.1 Charakteristik der Anwendung im Wirtschaftsverkehr

Bei Nutzfahrzeugen ist das Angebot elektrifizierter Fahrzeuge noch sehr eingeschränkt,¹⁹ obwohl durch ständig steigende Effizienzziele, strenger werdende Emissionsgrenzen sowie die Etablierung von Umwelt- und Zero-Emissions-Zonen auch in diesem Verkehrssektor eine Elektrifizierung grundsätzlich sinnvoll ist. Neben dem hohen Anteil der Nutzfahrzeuge am gesamten Treibhausgasausstoß des deutschen Fahrzeugbestandes, der grundsätzlich direkt mit dem Kraftstoffverbrauch korrespondiert, ist das Fahrtenaufkommen eine wichtige Kenngröße zur Abschätzung der Relevanz für den Straßenverkehr. Der gesamte Wirtschaftsverkehr macht dabei rund ein Drittel aller Kfz-Fahrten in Deutschland aus und kann bis zu 40% des innerstädtischen Fahrtenaufkommens an Werktagen betragen.²⁰ Somit tragen Nutzfahrzeuge und gewerblich genutzte Pkw besonders stark zu lokalen Schadstoff- und Lärmemissionen bei.²¹ Den Nutzfahrzeugen weist beispielsweise das Luftschadstoff-Emissionskataster Baden-Württemberg rund 49 % der Stickstoffoxid-Emissionen und 32 % der Feinstaub-Abgasemissionen des gesamten Fahrzeugbestandes zu.²² Eine Studie des Umweltbundesamtes rechnet deutschlandweit mit einer Verdoppelung der Partikelemissionen und einer deutlichen zusätzlichen Erhöhung der gesamten Stickoxidemissionen durch mobile Arbeitsmaschinen, zu denen auch kommunale Reinigungsfahrzeuge gehören, wie Abb. 2-1 verdeutlicht. Grund für die hohen Emissionen ist die wesentlich spätere Einführung einer regulierenden EU-Richtlinie in 1997, große Bestände Fahrzeuge älterer

¹⁹ Vgl.: Vogel 2016, S. 10-11

²⁰ Vgl.: Wermuth et al. 2012, S. 11

²¹ Vgl.: Aichinger 2014, S. 9-11

²² Vgl.: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 2015, S. 30

Baujahre und weniger ausgereifte Maßnahmen zur Emissionsreduktion, durch die Produktion von Spezialfahrzeugen in Kleinserien.²³

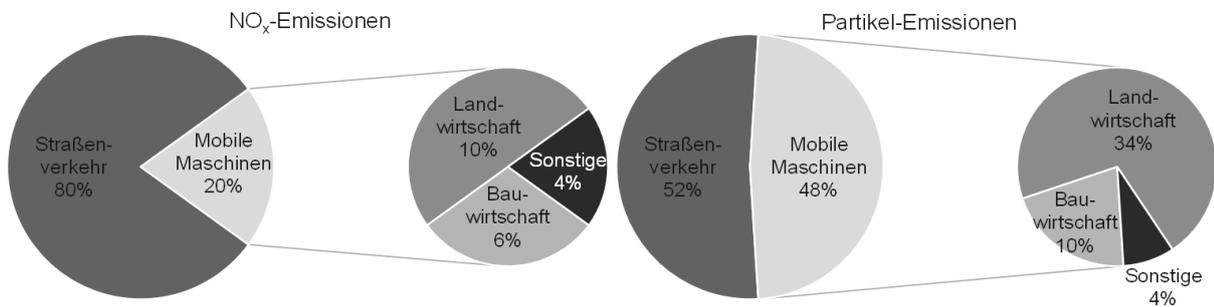


Abb. 2-1: NO_x- und Partikelemissionen des Wirtschaftsverkehrs²⁴

Insgesamt ist der Bestand kommunaler Nutzfahrzeuge im Vergleich mit anderen Fahrzeugklassen eher gering. Im Januar 2015 waren in Deutschland 15 961 sogenannte Straßenkehrer und Kanalreiniger bzw. 12 391 Abfallsammelfahrzeuge zugelassen. Zusammen entspricht dies einem Anteil von etwa 0,05 % aller Kraftfahrzeuge.²⁵ Dennoch haben wenige elektrifizierte Nutzfahrzeuge eine große Wirkung durch hohe Laufleistungen und damit hohe Kraftstoffverbräuche von Einzelfahrzeugen, sowie besonders relevante Schadstoff- und Lärmemissionen in Ballungsräumen.²⁶

Elektrifizierte Fahrzeugantriebe werden grundsätzlich als möglicher Ansatz gesehen die Gesamteffizienz von Fahrzeugen zu steigern und negative Emissionen zu reduzieren.²⁷ Diese Potentiale sollen in den folgenden Kapiteln im Detail betrachtet werden. Da der Energiebedarf der Arbeitsaggregate den Fahrtrieb sogar übersteigen kann, muss der Antriebsstrang differenziert analysiert werden.²⁸ Zusätzlich werden trotz des hohen Energiebedarfs hohe tägliche Laufleistungen mit geringen Geschwindigkeiten im starken Stop&Go-Betrieb absolviert.²⁹ Eine hohe Fahrleistung der Fahrzeuge im regelmäßigen Einsatz mit guter Kenntnis des Nutzungsprofils wird dabei allgemein als hilfreich für ein frühes Erreichen der Wirtschaftlichkeitsschwelle elektrifizierter Fahrzeuge gesehen.³⁰

Durch den Betrieb elektrifizierter Nutzfahrzeuge in Metropolregionen kann zusätzlich eine besonders hohe Sichtbarkeit gewährleistet und die Anwendbarkeit im professionellen Mehrschichtbetrieb demonstriert werden, sodass die Technologieunsicherheit auch anderer

²³ Vgl.: Haag/Ade 2015, S. 5-7

²⁴ Helms/Heidt 2014, S. 15

²⁵ Vgl.: Kraftfahrt-Bundesamt 2015

²⁶ Vgl.: van der Giessen 2015

²⁷ Vgl.: Lajunen 2011, S. 3; Emadi et al. 2005, S. 5-10; Biermann 2014, S. 5-10; Grausam/Parzinger/Müller 2015

²⁸ Vgl.: Biermann 2014, S. 13;

²⁹ Vgl.: Gräbener/Göhlich 2015, S. 429

³⁰ Vgl.: Plötz et al. 2014b, S. 107-117; Hacker/von Waldenfels/Mottschall 2015, S. 2-3

Flottenbetreiber positiv beeinflusst werden kann. In der Stadtlogistik können beispielsweise kleine Nutzfahrzeuge der Transporter-Klasse trotz erheblich höheren Fahrzeugpreisen bereits kostenneutral betrieben werden.³¹ Weiterhin kann auf aktuelle Entwicklungen in der Elektrifizierung von Stadtbussen oder im Pkw-Bereich aufgebaut werden um Komponenten und Entwicklungskosten weiter zu reduzieren.³²

Zunächst werden in den folgenden Kapiteln die Grundlagen der Antriebe von Elektro- und Hybridfahrzeugen erläutert und anschließend auf deren spezifische Komponenten und Eigenschaften eingegangen.

2.1.2 Elektrifizierte Antriebsstrangtopologien

Im Pkw-Segment werden verschiedene Topologien für alternative Antriebskonzepte unterschieden,³³ die für Nutzfahrzeuge ebenfalls zugrunde gelegt werden können. Grundsätzlich werden dabei Hybrid- und Elektrofahrzeuge unterschieden. Nach Definition des Europäischen Parlaments ist ein „Hybridkraftfahrzeug ein Fahrzeug mit mindestens zwei verschiedenen Energiewandlern und zwei verschiedenen Energiespeichersystemen (im Fahrzeug) zum Zwecke des Fahrzeugantriebs“.³⁴ Im Gegensatz dazu nutzt ein Elektrofahrzeug ausschließlich Elektromotoren als Energiewandler zum Fahrzeugantrieb, wobei die Energiequelle unterschiedlich gestaltet sein kann.³⁵

Die Antriebskonzepte für kommunale Nutzfahrzeuge müssen jeweils um die Arbeitsaggregate und deren Verbindung zum Fahrtrieb erweitert werden. Durch spezifische Ladeinfrastrukturen, hohe Nutzlasten und energieintensive Arbeitsaggregate unterscheiden sich die Rahmenbedingungen innerstädtischer Nutzfahrzeuge teilweise deutlich von Pkws. Konventionelle Antriebsstränge für Nutzfahrzeuge sind wegen hoher benötigter Leistungen der Arbeitsaggregate bereits komplex und können durch die Elektrifizierung in der Komplexität weiter steigen.³⁶ Dennoch sind die Antriebsarchitekturen für den Fahrzeugvortrieb vergleichbar und werden dementsprechend in dieser Arbeit zunächst allgemein beschrieben. Im folgenden Kapitel wird darauf aufbauend auf spezifische Komponenten der Nutzfahrzeuge eingegangen.

2.1.2.1 Batteriebetriebene und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge

Klassifiziert werden Elektrofahrzeuge durch ihre Energiebereitstellung in batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV³⁷) und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV³⁸). Vereinfacht besteht der Antrieb eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs aus einer oder mehreren Elektromaschinen und einem Batteriespeicher. Damit lassen sich die nachfolgend

³¹ Vgl.: Raiber 2016, S. 5

³² Vgl.: Spangenberg/Göhlich 2012

³³ Vgl.: Hofmann et al. 2007

³⁴ Europäische Union 2007

³⁵ Vgl.: Wallentowitz/Freialdenhoven 2011, S. 71; Eckstein 2010, S. 37-57

³⁶ Vgl.: Kautzmann 2013, S. 31-34

³⁷ Battery Electric Vehicle

³⁸ Fuel Cell Electric Vehicle

aufgelisteten BEV-spezifischen Funktionen zur Erhöhung des Systemwirkungsgrads umsetzen:³⁹

- Rekuperation⁴⁰ von kinetischer Energie
- Regeneration⁴¹
- Verschleißarmes Bremsen durch generatorischen Betrieb der elektrischen Maschine
- Entkopplung der Nebenaggregate vom Fahrtrieb
- Bedarfsgerechter Betrieb von Arbeits- und Nebenaggregaten
- Emissionsfreier Betrieb
- Segeln⁴²

Durch stetigen Fortschritt in der Batterietechnologie wird das BEV als wichtige Zukunftstechnologie der urbanen Mobilität gesehen. Eine bestehende Herausforderung sind dennoch begrenzte Speicherkapazitäten und damit Reichweiten der Fahrzeuge sowie Kosten des Energiespeichers, die insbesondere in kommerziellen Nutzfahrzeugen eine intensive Prüfung von Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit nötig machen.⁴³ Durch gute Planbarkeit des kommerziellen Fahrzeugbetriebs können Energiespeicher und Lademöglichkeiten aber sehr gut dimensioniert werden und bedürfen keiner hohen Sicherheitsfaktoren.

Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge verfügen nicht automatisch zusätzlich über einen bidirektionalen Energiespeicher⁴⁴ und können dementsprechend keine Bremsenergie zurückgewinnen oder speichern. Sie werden aus diesem Grund meist zusätzlich mit einer Batterie als Zwischenspeicher ausgestattet.⁴⁵ Insgesamt bieten Brennstoffzellen aus heutiger Sicht noch keinen vergleichbaren Technologiereifegrad mit batterie-elektrischen Fahrzeugen. Die technologischen Herausforderungen für alle Elektrofahrzeuge werden wie folgt zusammengefasst und im Anschluss kurz erläutert:⁴⁶

- Kosten
- Wirkungsgrad
- Lebensdauer
- Unterstützung der Energieversorgungsnetze
- Nutzung erneuerbarer Energien
- Rohstoffe
- Reichweite der Fahrzeuge

³⁹ Vgl.: Thiebes 2012, S. 48; Hammer 2014, S. 12

⁴⁰ Rückgewinnung und Speicherung der kinetischen und potentiellen Energie eines Fahrzeugs

⁴¹ Rückgewinnung und direkte Nutzung der kinetischen und potentiellen Energie eines Fahrzeugs

⁴² Ein besonderer Fahrzustand, bei dem das Fahrzeug komplett entkoppelt von den Antriebsaggregaten unverzögert rollt.

⁴³ Vgl.: Eckstein 2010, S. 38; Löwenberg et al. 2011; Thielmann et al. 2012; Wallentowitz/Freialdenhoven 2011, S. 71-75

⁴⁴ Deshalb bietet sich die Hybridisierung des FCEV durch eine zusätzliche Pufferbatterie an.

⁴⁵ Vgl.: Wallentowitz/Freialdenhoven 2011, S. 76

⁴⁶ Vgl.: Sauer et al. 2015, S. 26-30

Insgesamt ergeben sich durch die Nutzung von Brennstoffzellen aktuell sehr hohe Kosten für die Fahrzeuge, die zu installierende Infrastruktur und den Wasserstoff während des Betriebs. Fahrzeuge, beispielsweise für den Stadtbuss-Einsatz, übersteigen die Kosten für Batteriebusse aktuell um mehr als das Doppelte. Auch in Zukunft werden trotz Skaleneffekten deutlich höhere Kosten für die Fahrzeuge erwartet.⁴⁷ Bei den rein energiebezogenen Betriebskosten liegen die Brennstoffzellenbusse mit 0,50-0,90 €/km ebenfalls über den Kosten von Batteriebusen von ca. 0,27 €/km.⁴⁸ Die Kosten für die Wasserstoff-Infrastruktur übersteigen die Kosten einer Ladeinfrastruktur zusätzlich deutlich, wobei die Prognose für H₂-Tankstellen in der Größenordnung eines Betriebshofs für Nutzfahrzeuge schwer abzuschätzen ist.⁴⁹

Der Gesamtwirkungsgrad von Wasserstoff-Brennstoffzellensystemen ist im Vergleich mit batterie-elektrischen Fahrzeugen relativ gering. Die Wirkungsgradketten sind in Abb. 2-2 schematisch dargestellt. Brennstoffzellenfahrzeuge erreichen einen Systemwirkungsgrad von 55 - 60 %. Bei der Nutzung von erneuerbaren Energien ergibt sich ein Well-to-Wheel-Wirkungsgrad von ca. 33 %.⁵⁰ Insgesamt benötigt ein Brennstoffzellenfahrzeug damit mehr als das 2,4-fache der elektrischen Energie eines BEV, wenn der Wasserstoff ausschließlich durch Elektrolyse hergestellt wird.

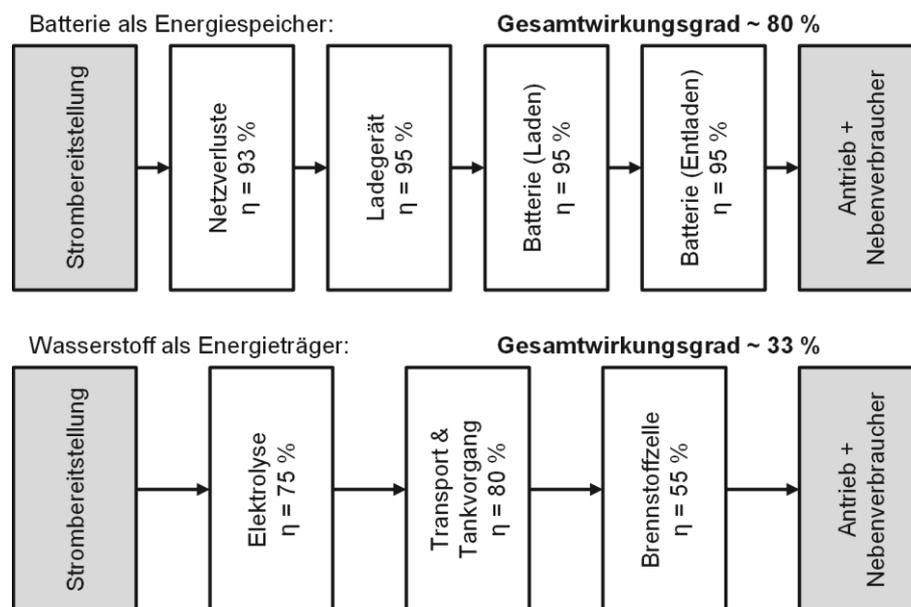


Abb. 2-2: Wirkungsgrade batterie-elektrisches und Wasserstoff-BZ-Fahrzeug⁵¹

In der Literatur wird aktuell von einer Lebensdauer von 12 000 h qualitativ hochwertiger Brennstoffzellen ausgegangen. Als langfristiges Ziel wird 25 000 h angegeben.⁵² Bei einer

⁴⁷ Vgl.: Sauer et al. 2015, S. 26

⁴⁸ Vgl.: Hua et al. 2014; Annahmen: BEV 1,5 kWh/km, 0,18 €/kWh; BZ 0,1 kg H₂/km, 5-9 €/kg

⁴⁹ Vgl.: Melaina/Penev 2013, S. 5

⁵⁰ Vgl.: Thielmann et al. 2012, S. 7

⁵¹ Vgl.: Sauer et al. 2015, S. 27

⁵² Vgl.: Hua et al. 2014, S. 991

täglichen Nutzung der Fahrzeuge im 2-Schicht Betrieb entspricht das langfristige Ziel einer Nutzungsdauer von 4,3 Jahren. Batterie-Lebensdauern werden entsprechend der Fahrzeuglebensdauern ausgelegt, sodass entweder ein Batteriewechsel nach einer bestimmten Laufzeit z.B. fünf Jahren vorgesehen oder die volle Lebensdauer berücksichtigt werden kann.

Eine unmittelbare Integration in das elektrische Versorgungsnetz ist mit Brennstoffzellenfahrzeugen nicht möglich. Batterieelektrische Fahrzeuge können dagegen mit Hilfe einer intelligenten Steuerung direkt vom Netzbetreiber angesteuert werden.

Damit der Betrieb von Wasserstofffahrzeugen aus Umweltgesichtspunkten sinnvoll ist, wird der Energieträger Wasserstoff aus Überschüssen erneuerbarer Energien hergestellt. Selbst in prognostizierten Ausbauszenarien für 2050 mit einem Anteil von 45 – 95 % Photovoltaik und Windenergie liegen die Überschusskapazitäten bei unter 5 000 h pro Jahr.⁵³ Zusätzlich muss durch den niedrigen Gesamtwirkungsgrad beinahe das Dreifache an neuen EE-Kapazitäten aufgebaut werden.⁵⁴ In den restlichen Stunden würde die Energie über fossile Energieträger bereitgestellt. Zusätzlich können Wasserstoff-Überschüsse aus industrieller Produktion genutzt werden, welche jedoch in Zukunft nur unter hoher Unsicherheit abzuschätzen sind.

Für die Produktion von Batterien wird technologiebedingt eine große Menge Lithium benötigt. Die weltweit verfügbaren Ressourcen reichen für die vollständige Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge aus, sind jedoch teilweise lokal konzentriert.⁵⁵ Die Katalysatoren in Brennstoffzellen benötigen hingegen Platin. 90 % der Reserven liegen in Russland und Südafrika, sodass Engpässe bei der Versorgung für den Rohstoff deutlich wahrscheinlicher sind.⁵⁶

Positiv bei Brennstoffzellenfahrzeugen wird die hohe Reichweite gesehen. Durch relativ kurze Tankvorgänge und eine hohe Energiedichte können autark wesentlich höhere Reichweiten und Betriebszeiten realisiert werden. Bei batterie-betriebenen Fahrzeugen kann die Reichweite mit Hilfe von Schnellladeinfrastruktur erweitert werden, jedoch werden dafür hohe Anschlussleistungen benötigt und eine entsprechende Ladeinfrastruktur ist kostenintensiv. Die folgende Tabelle fasst den aktuellen Entwicklungsstand der Brennstoffzellen im Vergleich mit batterie-elektrischen Fahrzeugen zusammen.

⁵³ Vgl.: Sauer et al. 2015, S. 28

⁵⁴ Vgl.: Lienkamp 2016, S. 7

⁵⁵ Vgl.: Grosjean et al. 2012

⁵⁶ Vgl.: Sauer et al. 2015

Tab. 2-1: Vergleich von BEV und FCEV im Nutzfahrzeugbereich

	BEV	FCEV
Kosten	+	-
Wirkungsgrad	+	-
Lebensdauer	-	-
Netzunterstützung	+	-
Nutzung EE	+	-
Rohstoffe	+	-
Reichweite	-	+

2.1.2.2 Fahrzeuge mit Hybridantrieben

Eine Besonderheit von Hybridfahrzeugen liegt in der Integration von zwei Energiespeichern und den dazugehörigen Energiewandlern im Antriebsstrang, welche wahlweise gemeinsam oder jeweils getrennt für den Fahrzeugvortrieb genutzt werden können.⁵⁷ Dabei ist ein Energiespeicher durch eine geringe Speichergröße meistens nur als Energiepuffer vorgesehen.⁵⁸ Eine Erweiterung des Hybridfahrzeugs, das sogenannte Plug-In Hybridfahrzeug, bietet die Möglichkeiten das Fahrzeug aus dem elektrischen Versorgungsnetz und ebenfalls über Kraftstoff mit Energie zu versorgen.⁵⁹ Dementsprechend werden größere elektrische Energiespeicher verbaut und höhere elektrische Reichweiten umgesetzt. Auf die Antriebsstrangarchitekturen hat dies jedoch keinen Einfluss.

Neben den Elektrofahrzeug-spezifischen Funktionen (siehe Kapitel 2.1.2.1) werden von Hybridantrieben zusätzlich die nachfolgend aufgelisteten Funktionen zur Effizienzsteigerung des Gesamtfahrzeugs realisiert:⁶⁰

- Start/Stop-Funktionalität der Verbrennungskraftmaschine (VKM)
- Fremdstart des Verbrennungsmotors und dadurch Entfall des konventionellen Anlassers
- Betriebspunktverschiebung⁶¹
- Phlegmatisierung⁶²
- Downsizing / Rightsizing⁶³
- Boosten⁶⁴
- Generatorbetrieb zur mobilen Stromversorgung
- Entfall von Gangstufen durch Drehmomentunterstützung

⁵⁷ Vgl.: Reif 2012, S. 7

⁵⁸ Vgl.: Stan 2012, S. 276

⁵⁹ Vgl.: Pistoia 2010, S. 406

⁶⁰ Vgl.: Reif 2012, S. 15; Hofmann 2014, S. 25

⁶¹ Lastanhebung, -absenkung der VKM

⁶² Lastpunktverschiebung in Drehzahl und Drehmoment der VKM

⁶³ Der Verbrennungsmotor kann in einem Hybridkonzept besser angepasst ausgelegt werden, da die elektrische Maschine zusätzlich zum Antrieb beiträgt.

⁶⁴ Beim sogenannten „Boosten“ wird ein zusätzliches Moment durch die elektrische Maschine bereitgestellt und damit die Leistungsfähigkeit kurzfristig erhöht.

Bei den Hybridantrieben werden generell serielle, parallele und gemischt-hybride Antriebsgrundstrukturen mit den Unterkategorien kombinierter und leistungsverzweigter Hybrid wie in Abb. 2-3 dargestellt unterschieden.⁶⁵

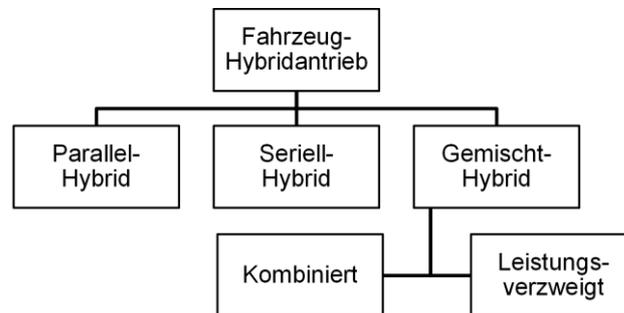


Abb. 2-3: Hybrid-Antriebsarchitekturen für Fahrzeuge⁶⁶

Parallel-Hybridantriebe zeichnen sich dadurch aus, dass ein direkter, mechanischer Durchtrieb vom Verbrennungsmotor bis zum Rad möglich ist. Der elektrische Antrieb kann parallel zu- und abgeschaltet werden. Häufig ist der Verbrennungsmotor mit Hilfe einer Kupplung vom Antrieb abtrennbar, sodass auch rein elektrisch gefahren werden kann.⁶⁷ Die elektrische Maschine kann an verschiedenen Stellen im Antriebsstrang positioniert werden, wodurch vier Varianten des Parallel-Hybridantriebs unterschieden werden:

- Momentenaddition als Einwellenlösung
- Momentenaddition als Zweiwellenlösung
- Zugkraftaddition
- Drehzahladdition

Abb. 2-4 zeigt die grundsätzlich unterschiedlichen Parallel-Hybridarchitekturen in der Übersicht. Bei Hybridantrieben mit Momentenaddition sind beide Energiewandler entweder auf einer Welle direkt miteinander verbunden oder über ein Getriebe gekoppelt. Eine weitere Parallel-Hybridvariante mit separaten Antrieben von Vorder- und Hinterachse addiert die Zugkraft beider Antriebe. Eine vierte Variante verbindet die Energiewandler über ein Planetengetriebe. Dabei ist das Momentenverhältnis der Antriebssysteme durch das Übersetzungsverhältnis vorgegeben und die Drehzahlen können frei gewählt werden.⁶⁸

⁶⁵ Vgl.: Hofmann 2014, S. 24; Göhring 1997, S. 6-21; Emadi et al. 2005

⁶⁶ Eigene Darstellung, angelehnt an Gorbea Díaz 2011, S. 103

⁶⁷ Vgl.: Hofmann 2014, S. 28

⁶⁸ Vgl.: Hofmann 2014, S. 30

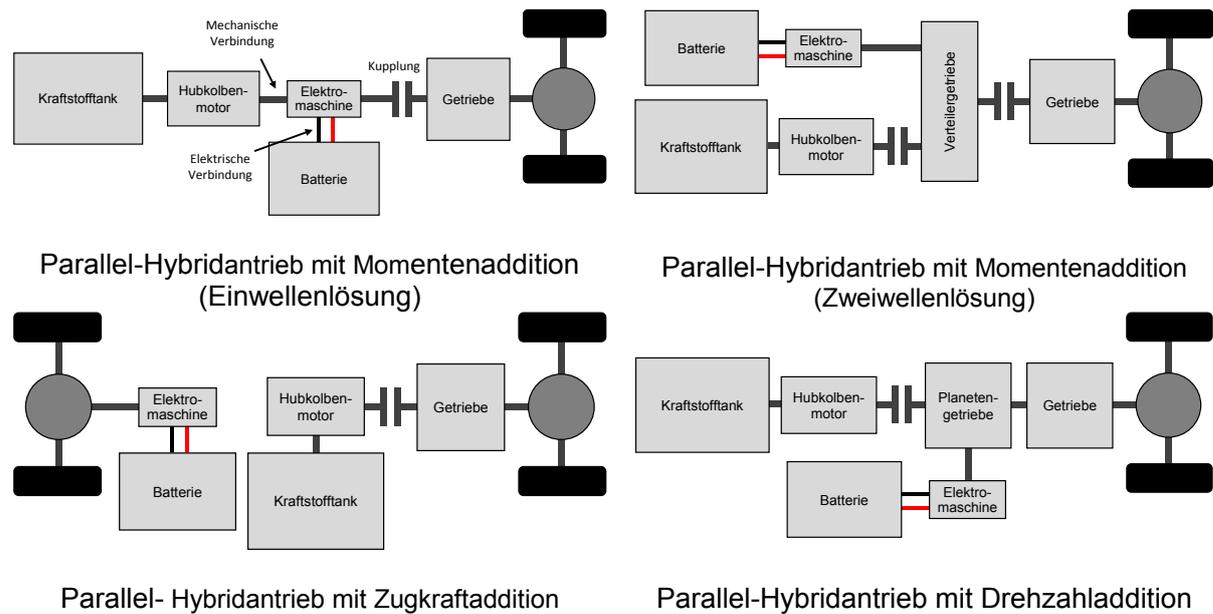


Abb. 2-4: Parallel-Hybrid Antriebsarchitekturen

Durch die mechanische Verbindung der Energiewandler können bei parallelen Konfigurationen höhere Verluste während des regenerativen Bremsens auftreten. Zusätzlich lassen sich die Lastpunkte nicht vollkommen frei verschieben, sodass optimale Betriebspunkte der Energiewandler nicht immer angefahren werden können.⁶⁹

Der Seriell-Hybridantrieb erzeugt den Vortrieb ausschließlich über eine elektrische Maschine. Die elektrische Energie wird über eine weitere elektrische Maschine als Generator erzeugt, der von einem weiteren Energiewandler angetrieben wird. Eine direkte mechanische Kopplung ist nicht vorgesehen, sodass die Energie entweder zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt oder durch einen Speicher aufgenommen wird.⁷⁰ Die Seriell-Hybride unterscheiden nach der Auslegung des Antriebs den klassischen Seriell-Hybriden und den Reichweiten-Verlängerer (REEV⁷¹). Der klassische Seriell-Hybridantrieb sieht einen konstanten Betrieb der Energiewandler zur Energiebereitstellung vor. Der Energiespeicher im elektrischen Antriebsstrang dient als Pufferspeicher und für kurze elektrische Fahrstrecken. Im Gegensatz dazu ist das REEV ein Elektrofahrzeug mit relativ hoher elektrischer Reichweite. Der zweite Energiewandler wird als Reichweiten-Verlängerer bei entladener Batterie genutzt. Dieser ist dementsprechend nicht für den Dauerbetrieb bestimmt und kann häufig nicht die maximal benötigten Leistungen abdecken, sodass Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit nach überschreiten der elektrischen Reichweite zu erwarten sind.⁷²

Der Vorteil der Seriell-Hybride liegt in der unabhängigen Regelung des zweiten Energiewandlers vom Radantrieb. Damit kann die Energiebereitstellung im optimalen

⁶⁹ Vgl.: Wallentowitz/Freialdenhoven 2011, S. 67

⁷⁰ Vgl.: Reif 2012, S. 28

⁷¹ Range Extended Electric Vehicle

⁷² Vgl.: Reif 2012, S. 30; Hofmann 2014, S. 23-27; Wallentowitz/Freialdenhoven 2011, S. 69

Betriebspunkt auch bei sehr dynamischem Nutzungsprofil erfolgen, anwendungsorientierte Betriebsstrategien ermöglicht und Komponenten relativ frei positioniert werden. Negativ kann sich die mehrfache Energiewandlung auswirken, sodass die Vorteile der optimalen Regelung leicht kompensiert werden.⁷³

Ein kombinierter Hybridantrieb integriert eine mechanische Verbindung mit einer Kupplung zwischen dem zweiten Energiewandler und dem Radantrieb eines Seriell-Hybridantriebs. Durch Schließen der Kupplung entsteht ein Parallelhybrid mit Momentenaddition und deutlich reduzierten Wandlungsverlusten. Nachteile dieser Architektur liegen in der erhöhten Komplexität mit höheren Kosten und Bauaufwand sowie geringerer Flexibilität in der Komponentenanzahl.⁷⁴

Im leistungsverzweigten Hybridantrieb wird die Leistung eines Energiewandlers mit Hilfe eines Planetengetriebes in einen mechanischen und einen elektrischen Pfad zum Radantrieb aufgeteilt. Die elektrische Energie wird zwischengespeichert oder direkt im Radantrieb genutzt. Damit bietet diese Antriebsarchitektur mehr Freiheitsgrade um Drehzahl und Drehmoment des Energiewandlers zu variieren und damit effizientere Betriebspunkte als beim kombinierten Hybridantrieb anzufahren. Insgesamt entstehen durch das Planetengetriebe, zwei elektrische Maschinen und einen zusätzlichen Energiewandler die höchste System- und Steuerungskomplexität sowie hohe Entwicklungs- und Komponentenkosten.⁷⁵ Abb. 2-5 zeigt schematisch die Seriell-Hybriden, kombinierten und leistungsverzweigten Hybrid-Antriebsstrangarchitekturen.

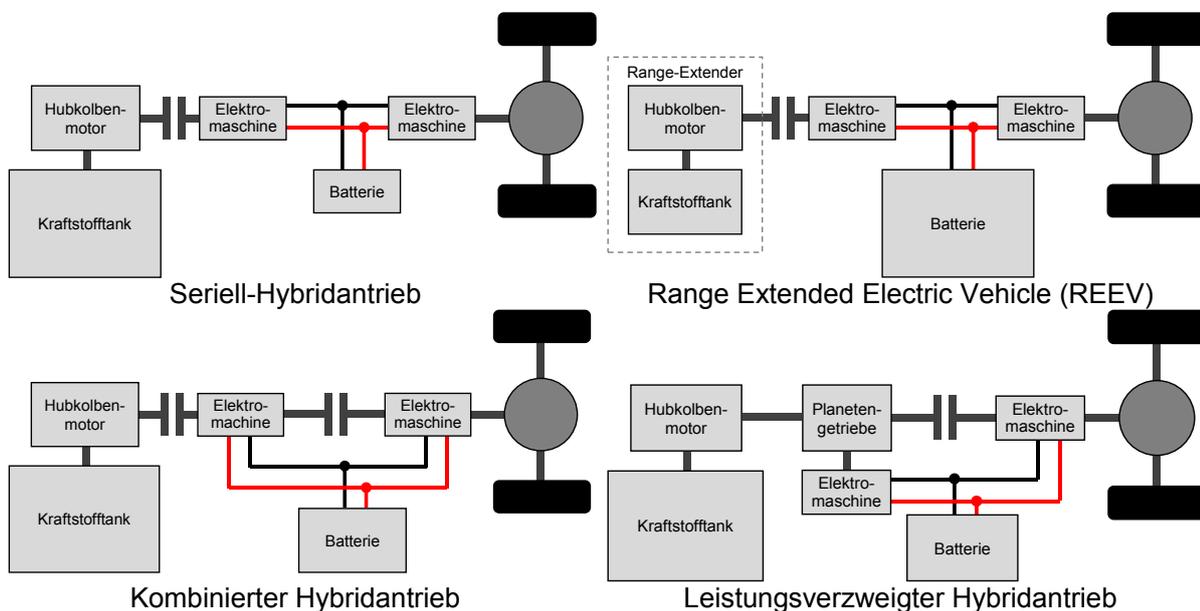


Abb. 2-5: Serielle, kombinierte und leistungsverzweigte Hybridarchitekturen

⁷³ Vgl.: Hofmann 2014, S. 27-28; Reif 2012, S. 29

⁷⁴ Vgl.: Hofmann 2014, S. 29-30; Reif 2012, S. 36-39

⁷⁵ Vgl.: Hofmann 2014, S. 31-34; Reif 2012, S. 39-44

Die unterschiedlichen Elektro- und Hybridfahrzeug-Architekturen können entsprechend Abb. 2-6 nach elektrischer Reichweite und Grad der Elektrifizierung eingeordnet werden. Deutlich erkennbar sind die verschiedenen Bandbreiten und Schwerpunkte der Konzepte, aufgetragen auf den Achsen.

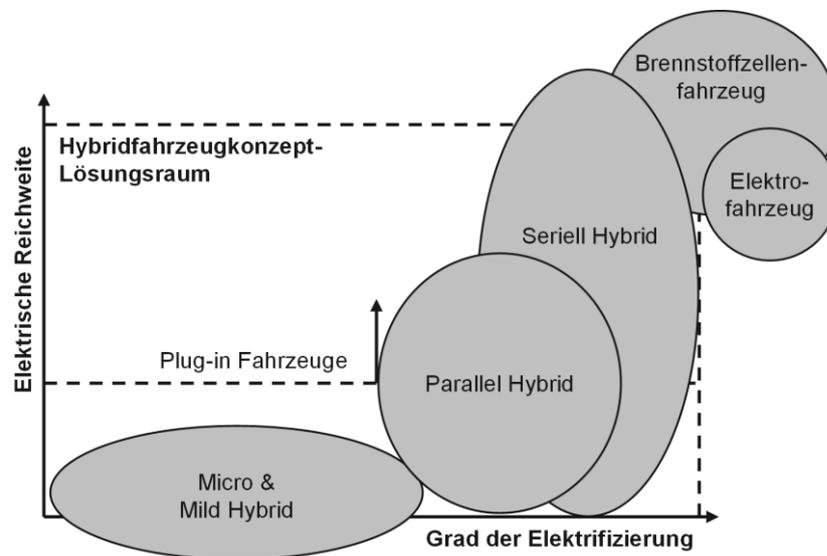


Abb. 2-6: Einordnung elektrifizierter Antriebsstrangarchitekturen⁷⁶

2.1.3 Spezifische Komponenten und Eigenschaften

In diesem Kapitel wird nun nach der allgemeinen Beschreibung der Antriebsarchitekturen auf die spezifischen Komponenten und Eigenschaften alternativer Antriebe eingegangen. Dazu werden verschiedene Energiewandler, Energiespeicher und Ladetechnologien beschrieben und miteinander verglichen. Ein besonderer Fokus wird auf in relevanten und vergleichbaren Fahrzeuggruppen aktuell eingesetzte Technologien gelegt sowie spezifische Technologien für den Einsatz in kommunalen Nutzfahrzeugen beschrieben.

2.1.3.1 Energiewandler

In elektrifizierten Nutzfahrzeugen kommen verschiedene Energiewandler zur Anwendung, um den Fahrtrieb und Arbeitsaggregate mit Energie und Leistung zu versorgen. Bei der Kombination mehrerer Energiewandler können positive Wechselwirkungen entstehen, die in der Elektromobilität gezielt genutzt werden. Die Auswahl geeigneter Komponenten wird von der benötigten Leistung sowie von Drehmoment und Drehzahlverlauf, Wirtschaftlichkeit und Umweltbeeinflussung bestimmt.⁷⁷ Im Folgenden werden Funktionen und Eigenschaften von Verbrennungskraft- und elektrischen Maschinen, Brennstoffzellen und Hydraulikmaschinen mit Bezug zum Einsatz in elektrifizierten Nutzfahrzeugantriebssträngen beschrieben.

⁷⁶ Eigene Darstellung, abgeleitet aus Gorbea Díaz 2011, S. 109

⁷⁷ Vgl.: Wallentowitz 2007, S. 99

Diesel-Hubkolbenmotor: Bei Nutzfahrzeugen wird aktuell fast ausschließlich der Dieselmotor als Antriebsaggregat eingesetzt. Dieser gehört zu den Verbrennungskraftmaschinen (VKM), genauer zu den Hubkolbenmotoren und zeichnet sich durch eine innere zyklische Verbrennung aus.⁷⁸ Aktueller Stand der Technik sind Dieselmotoren mit Direkteinspritzung, Turboaufladung und komplexer Abgasnachbehandlung. Im Vergleich mit anderen Verbrennungskraftmaschinen hat der moderne Dieselmotor einen günstigen Kraftstoffverbrauch und niedrige Schadstoffemissionen, ist jedoch relativ kosten-intensiv und schwer. Im optimalen Betriebspunkt erreichen Dieselmotoren einen Wirkungsgrad von 35 - 45 % und weisen auch im Teillast-Bereich gegenüber anderen VKM hohe Wirkungsgrade auf.⁷⁹ Abb. 2-7 zeigt schematisch ein Motorkennfeld mit dem eingezeichnetem Punkt und der Linie des geringsten Verbrauchs. Dieser Aspekt ist insbesondere für den typischen Stop&Go-Betrieb kommunaler Nutzfahrzeuge relevant, wo nur geringe Wirkungsgrade erreicht werden können.

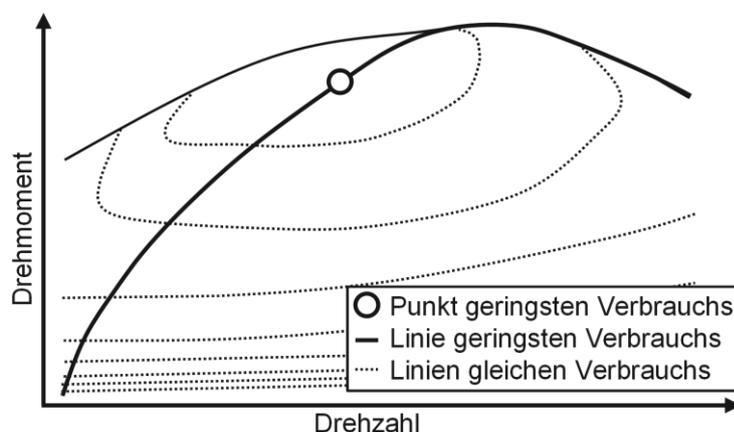


Abb. 2-7: Schematisches Motorkennfeld eines Hubkolbenmotors

Gas-Hubkolbenmotor: Der Gas-Hubkolbenmotor ist ebenfalls ein Antriebsaggregat, das insbesondere von kommunalen Flottenbetreibern eingesetzt wird. Obwohl dieser Hubkolbenmotor nach dem Ottomotor-Prinzip funktioniert und darum einen geringeren Wirkungsgrad⁸⁰ im Vergleich mit Dieselantrieben aufweist, besteht bei diesem Motor der besondere Vorteil, dass vom Entsorgungsunternehmen selbst erzeugtes Biogas, chemisch identisch mit Erdgas, zum Betrieb des Fahrzeugs genutzt werden kann. Somit kann ein nahezu CO₂-emissionsfreier Betrieb der Fahrzeuge umgesetzt werden.⁸¹ Nachteile der Technologie sind relativ hohe Kosten durch die zusätzliche Infrastruktur beim Flottenbetreiber, weniger Nutzlast durch schwere zusätzliche Komponenten und ein erhöhter Wartungsaufwand.

⁷⁸ Vgl.: Robert Bosch GmbH 2014, S. 398-401

⁷⁹ Vgl.: Eckstein 2010, S. 159; Reif 2012; S. 82; Hofmann 2014, S. 145-148

⁸⁰ Vgl.: Eckstein 2010, S. 157-161

⁸¹ Vgl.: Berliner Stadtreinigungsbetriebe 2016a

Gasturbine: Die Gasturbine zählt ebenfalls zu den Verbrennungskraftmaschinen und arbeitet nach dem Prinzip der inneren kontinuierlichen Verbrennung. Der Energiewandler erzeugt dabei überwiegend kinetische Energie mit Hilfe von Strömungseffekten des heißen Abgases.⁸² Dabei weisen Gasturbinen durch kontinuierliche Verbrennung und hohe Drehzahlen gute Emissionswerte, Vielstofffähigkeit, geringe Vibrationen, lange Wartungsintervalle und ein geringes Gewicht auf. Dem stehen im Vergleich mit Hubkolbenmotoren hohe Anschaffungskosten, erhöhter Kraftstoffverbrauch und Bauraumbedarf gegenüber. Aufgrund der notwendigen Strömungsenergie haben Gasturbinen im Teillastbetrieb einen deutlich schlechteren Wirkungsgrad verglichen mit Hubkolbenmotoren.⁸³

Zusammenfassend eignen sich Gasturbinen besonders für den kontinuierlichen Betrieb im optimalen Betriebspunkt, beispielsweise als Energieerzeuger in seriellen Hybridantriebsarchitekturen mit hohen Energiebedarfen.⁸⁴ Hubkolbenmotoren sind für serielle und parallele Hybridarchitekturen geeignet und werden dort bereits eingesetzt. Auf die spezifischen Emissionen der Kraftstoffe im Vergleich wird in Kapitel 2.1.3.2 eingegangen.

Elektrische Maschinen: Eine elementare Komponente bei der Elektrifizierung von Antriebssträngen sind elektrische Maschinen, da elektrische in mechanische Energie bidirektional gewandelt werden kann. Der motorische und generatorische Betrieb der Energiewandler ist häufig Grundvoraussetzung zur Umsetzung einiger Funktionen wie beispielsweise regeneratives Bremsen bei Elektrifizierungskonzepten. Aufgrund ihrer Leistungsentfaltung sind elektrische Maschinen sehr gut für den Antrieb von Fahrzeugen geeignet.⁸⁵ Abb. 2-8 zeigt exemplarisch das Wirkungsgradkennfeld einer elektrischen Maschine für den Einsatz in Elektrofahrzeugen. Deutlich erkennbar steht bereits im Stillstand das maximale Drehmoment zur Verfügung und bleibt bis zum Erreichen der Nennleistung konstant. Ab dieser Drehzahl bleibt die Leistung der Maschine im sogenannten Feldschwächebereich annähernd konstant.

Der allgemeine Aufbau einer elektrischen Maschine gliedert sich in eine feststehende, dem Stator, und eine rotierende Komponente, dem Rotor. Dabei wird im Stator die elektrische Energie und im Rotor die mechanische Energie zu- bzw. abgeführt. Bei elektrischen Maschinen werden in der Literatur viele unterschiedliche Bauformen unterschieden.⁸⁶ Davon relevant für die Elektrifizierung von Fahrzeugantrieben sind die jeweils mit dreiphasigem Wechselstrom betriebene permanenterregte Synchronmaschine (PSM), die den höchsten Wirkungsgrad besitzt, und die Asynchronmaschine (ASM), die als kostengünstige Alternative ebenfalls gute Wirkungsgrade hat.⁸⁷ Die höchsten Wirkungsgrade werden bei hohen

⁸² Vgl.: van Basshuysen/Schäfer 2015, S. 1166; Dellenback 2002, S. 443

⁸³ Vgl.: Hofmann 2014, S. 157; Reif 2012, S. 92; Eckstein 2010, S. 163

⁸⁴ Vgl.: Eckstein 2010, S. 163

⁸⁵ Vgl.: Hofmann 2014, S. 167-172; Reif 2012, S. 93

⁸⁶ Vgl.: Hofmann 2014, S. 167

⁸⁷ Vgl.: Reif 2012, S. 93; Eckstein 2010, S. 194

Leistungen im Feldschwächebereich erreicht und fallen typischerweise bei Teillast deutlich ab.⁸⁸

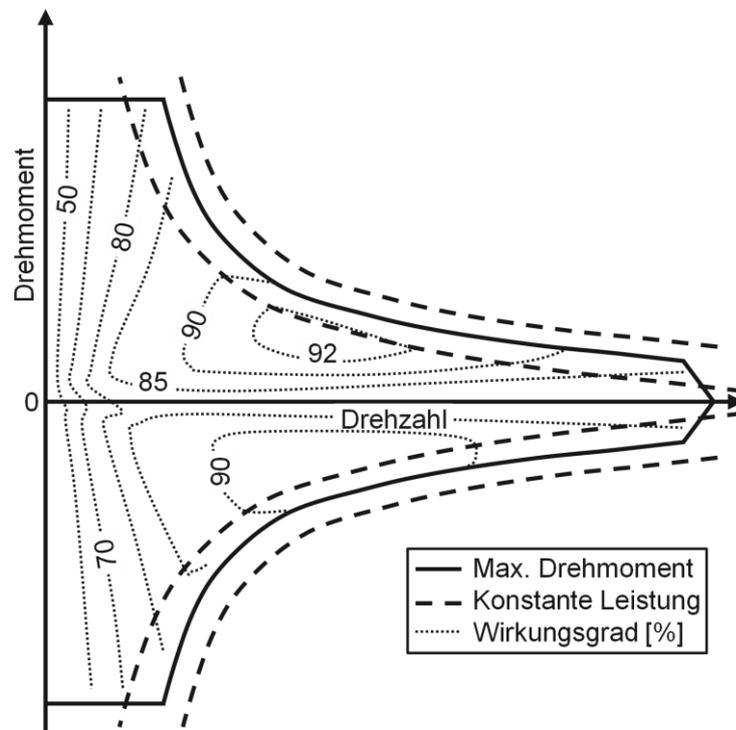


Abb. 2-8: Wirkungsgradkennfeld einer elektrischen Maschine in der Fahrzeuganwendung

Brennstoffzelle: Die Brennstoffzelle ist das wesentliche Element zur Umwandlung von Wasserstoff, Methanol oder Erdgas in elektrische Energie. Das Wirkungsprinzip entspricht einer galvanischen Zelle, der die Reaktanten kontinuierlich zugeführt werden und somit kontinuierliche, quasi zeitlich-unbeschränkte Betriebszeiten ermöglichen. Dabei kommt die Brennstoffzelle ohne bewegliche Bauteile aus. Schadstoff- oder Lärm-Emissionen, bei Wasserstoff als Reduktionsmittel ebenfalls CO₂-Emissionen, treten nicht auf. Ein weiterer wesentlicher Vorteil des Energiewandlers ist die direkte Umwandlung stoffgebundener chemischer Energie in elektrische Energie ohne zusätzliche Umwandlungsprozesse wie beispielsweise beim Verbrennungsmotor. Dementsprechend werden deutlich höhere Fahrzeugantriebsstrang-Wirkungsgrade von aktuell bis zu 60 % erreicht.⁸⁹

Demgegenüber stehen hohe Herstellungskosten der Komponenten und potentielle Engpässe benötigter Materialien bei hohem Produktionsvolumen. Außerdem weisen die Komponenten aktuell noch kein zufriedenstellendes Langzeitverhalten und eine ausreichende Lebensdauer auf. Ebenfalls liegt der Technologiereifegrad noch nicht auf vergleichbarem Niveau mit batterieelektrischen Antrieben.⁹⁰ Die Brennstoffzellentechnik wird bei Pkw bereits in ersten

⁸⁸ Vgl.: Eckstein 2010, S. 172

⁸⁹ Vgl.: Eichlseder/Klell 2012, S. 219-221; Babel 2014, S. 26-30, Wallentowitz/Freialdenhoven 2011, S. 75-83

⁹⁰ Vgl.: Lienkamp 2016, S. 6-7; Eichlseder/Klell 2012, S. 219; Babel 2014, S. 29

Serien-Fahrzeugen eingesetzt und im Omnibus-Bereich existieren ebenfalls vereinzelt Vorserienmodelle im Testbetrieb. In dieser Arbeit wird die Brennstoffzelle kombiniert mit einem Wasserstofftank als Energiespeicher definiert, da eine weitere Energiewandlung notwendig wird, um ein Fahrzeug anzutreiben.⁹¹

Hydraulikmaschinen: Im Bereich der kommunalen Nutzfahrzeuge werden Arbeitsaggregate aktuell fast ausschließlich hydraulisch betätigt, da die Technologie hohe Leistungsdichten und schnelle Reaktionszeiten auf geringem Bauraum ermöglicht.⁹² Als Hydraulikmaschinen werden in dieser Arbeit hydraulische Pumpen, Motoren und Zylinder bezeichnet. Hydraulikpumpen wandeln dabei eine Rotation in hydraulischen Druck um, während Hydraulikmotoren diesen Prozess umkehren. Die Drehzahl der Komponenten ist jeweils proportional mit dem Förderstrom der hydraulischen Flüssigkeit, sodass beispielsweise ein stufenlos übersetzter, hydrostatischer Fahrzeugantrieb umgesetzt werden kann.⁹³ Die Komponenten erzielen im optimalen Betriebspunkt einen Wirkungsgrad von maximal 89 %, liegen aber bei bestimmten Bauarten deutlich darunter und sind stark Betriebspunktabhängig.⁹⁴ Für translatorische Bewegungen werden Hydraulikzylinder verwendet. Hydraulische Arbeitszylinder erreichen einen Gesamtwirkungsgrad von 84-96 % und als Teleskopzylinder 74-86 %. Die Verluste sind von Qualität und Verschleiß der Komponenten abhängig und entstehen jeweils durch Reibungs- und Dichtungsverluste der Hydraulikflüssigkeit.⁹⁵

2.1.3.2 Energiespeicher

Grundsätzlich unterscheiden sich Energiespeicher in konventionelle chemische Energiespeicher, bei denen innerhalb kurzer Zeit viel Energie in ein Fahrzeug getankt werden kann sowie während des Betriebs wieder aufladbare Speicher, die zusätzliche Funktionen im Fahrzeugantrieb ermöglichen und auf eine kürzere Energiespeicherung ausgelegt sind.⁹⁶ In dieser Arbeit werden im Folgenden für den Nutzfahrzeug-Bereich relevante Technologien und Energieträger vorgestellt und verglichen. Fahrzeuge werden aktuell fast ausschließlich mit Diesel oder Biogas betrieben. Zukünftig kann zusätzlich Wasserstoff im Nutzfahrzeugbereich eine zunehmende Bedeutung erlangen.⁹⁷ Elektro-chemische Energiespeicher mit bereits hoher Relevanz sind Lithium-Ionen Batterien sowie Doppelschichtkondensatoren. Zusätzlich werden pneumatische Kompressionsspeicher und elektro-mechanische Schwungräder bereits in Fahrzeugen eingesetzt.⁹⁸ In Abb. 2-9 wird deutlich, dass die Kraftstoffe signifikant höhere Energiedichten bereitstellen und bidirektionale, alternative Technologien deswegen hinsichtlich ihrer Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit im Detail analysiert werden müssen. Nachfolgend werden die

⁹¹ Vgl.: Kapitel 2.1.3.2

⁹² Vgl.: Findeisen/Helduser 2015; Reif 2012, S. 246-247

⁹³ Vgl.: Hofmann 2014, S. 259-260; Murrenhoff/Eckstein 2011, S. 75-121

⁹⁴ Vgl.: Findeisen/Helduser 2015, S. 143-147, 265-268; Helduser 2013, S. 143-165

⁹⁵ Vgl.: Findeisen/Helduser 2015, S. 383

⁹⁶ Vgl.: Hofmann 2014, S. 209-210; Reif 2012, S. 9

⁹⁷ Vgl.: Verband der Automobilindustrie e.V. 2012, S. 14,27

⁹⁸ Vgl.: Thiebes 2012, S. 26-30; Hammer 2014

unterschiedlichen Technologien mit Relevanz in der Nutzfahrzeuganwendung zunächst qualitativ beschrieben und im Anschluss anhand ihrer konkreten Kennwerte verglichen.

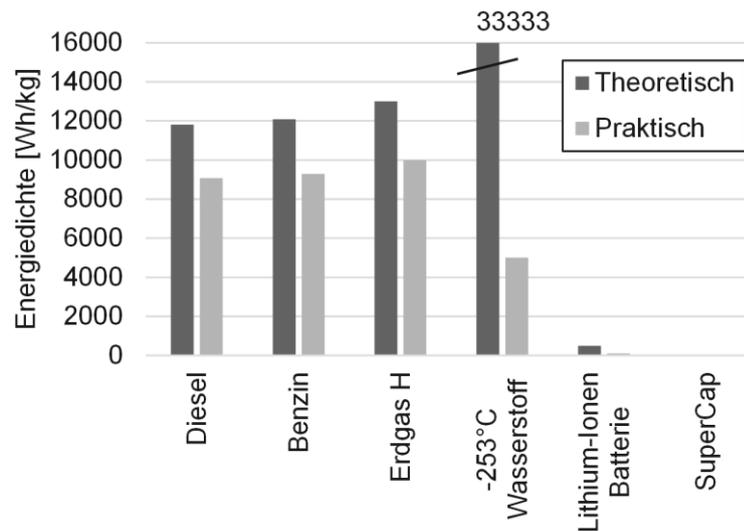


Abb. 2-9: Energiedichten ausgewählter Energiespeicher im Vergleich⁹⁹

Kraftstoffe: Diesel, Biogas und Wasserstoff Während Diesel-Kraftstoff in einfachen Kraftstofftanks gespeichert werden kann, wird Biogas bei Nutzfahrzeugen in Drucktanks mitgeführt, die im Vergleich mehr Bauraum benötigen. Biogas entspricht in seiner chemischen Zusammensetzung dem Erdgas mit dem wesentlichen Vorteil, dass die CO₂-Bilanz des Kraftstoffs klimaneutral ist. Im Vergleich mit Diesel werden von den Fahrzeugen insgesamt bis zu 90 % weniger NO_x-Emissionen sowie vernachlässigbare Mengen Partikelemissionen ausgestoßen. Ein weiterer Vorteil sind die deutlich reduzierten Lärmemissionen der Fahrzeuge im Betrieb. Ein Nachteil der Technologie sind mögliche Reichweiteinschränkungen durch hohes Gewicht oder Bauraumbedarf der Drucktanks.¹⁰⁰

Wasserstoff zur Verwendung in der Brennstoffzelle wird ebenfalls in Hochdrucktanks oder verflüssigt bei sehr niedrigen Temperaturen im Fahrzeug gespeichert. Die Speicherung des hoch flüchtigen Elements Wasserstoff ist dabei jedoch wesentlich teurer und energieaufwändiger als bei konventionellen Kraftstoffen. So werden für die Verdichtung auf 700 bar bereits etwa 15 % und für die Verflüssigung etwa 20-30 % des Heizwertes von Wasserstoff aufgewendet. Zusätzlich existiert aktuell keine flächendeckende Versorgungsinfrastruktur.¹⁰¹

Batteriespeicher: Batteriesysteme zählen zu den elektro-chemischen Energiespeichern und kommen in Elektro- und Hybridfahrzeugen zur Anwendung. Die Energie- und Leistungsdichte der Speichertechnologien sind relevante technische Kenngrößen für die Auslegung von Elektro- und Hybridfahrzeugen. Abb. 2-10 zeigt verschiedene Batterien im Vergleich und

⁹⁹ Erweiterte Darstellung nach Hofmann 2014, S. 211

¹⁰⁰ Vgl.: Semin 2008; Umweltbundesamt 2016b; Berliner Stadtreinigungsbetriebe 2016b

¹⁰¹ Vgl.: Eichlseder/Klell 2012, S. 123-124; Lienkamp 2016, S. 6-7; Wallentowitz/Freialdenhoven 2011, S. 76

verdeutlicht die vielversprechenden Eigenschaften der Lithium-Ionen-Technologie (Li-Ion). Infolgedessen werden Lithium-Ionen-Batterien das größte Zukunftspotential für Mobilitätsanwendungen zugesprochen¹⁰² und werden in dieser Arbeit als bevorzugte Batterietechnologie näher betrachtet.

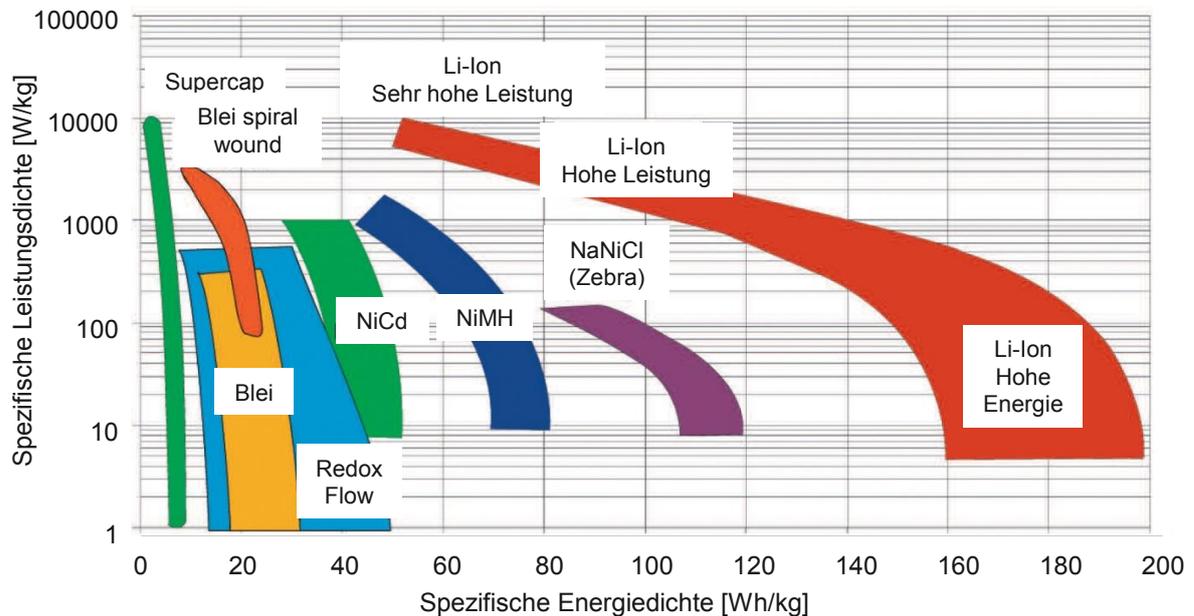


Abb. 2-10: Spezifische Leistungs- und Energiedichte von Speichertechnologien¹⁰³

Die genannten Kenngrößen Energie- und Leistungsdichte stehen häufig in Konflikt mit weiteren relevanten Energiespeicher-Eigenschaften wie Sicherheit, Lebensdauer und Systemkosten. Außerdem sind die Zusammenhänge der Eigenschaften komplex und nach Zellchemie unterschiedlich. So wird beispielsweise zur Erhöhung der Lebensdauer häufig nur 80 % der Batteriekapazität genutzt.¹⁰⁴ Bei einer Vielzahl verfügbarer Zellchemien können in Nutzfahrzeugen nach aktuellem Stand der Technik Lithium-Eisenphosphat (LFP), Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) und Lithium-Titanat (LTO) Batterien eingesetzt werden. Tab. 2-2 zeigt ihre Charakteristika im Vergleich.

Die Leistungsfähigkeit der Zellen für den Nutzfahrzeubbereich ist zum heutigen Zeitpunkt noch deutlich geringer als in der Pkw-Anwendung. Im Vergleich sind beispielsweise die Energiedichten niedriger und die Preise deutlich höher. Für Lithium-Ionen Batterien in Fahrzeugantrieben wird in den kommenden Jahren in vielen Quellen eine stark positive Entwicklung in allen relevanten Bereichen prognostiziert.¹⁰⁵ Dabei werden bei Nutzfahrzeuganwendungen wegen geringeren Stückzahlen deutlich langsamere Verbesserungen

¹⁰² Vgl.: Reif 2012, S. 224; Babel 2014, S. 35; Lienkamp 2016, S. 7

¹⁰³ Vgl.: Kampker/Vallée/Schnettler 2013, S. 301; Wiedergegeben mit Erlaubnis des Springer-Verlags

¹⁰⁴ Vgl.: Sauer et al. 2016, S. 12-13

¹⁰⁵ Vgl.: Randall 2016; Thielmann et al. 2012, S. 5; Hackmann/Hermann/Robert 2015, S. 2; Sauer et al. 2016, S. 6-13; Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) 2016, S. 16; Schlott 2016

erwartet. Aufgrund von höheren Technologiereifegraden im Pkw-Segment und möglichen Skaleneffekten könnten ebenfalls deutlich schnellere Entwicklungen realisiert werden und sich beispielsweise Batteriekosten schneller annähern.¹⁰⁶ Beide Prognoseszenarien sind dennoch mit großer Unsicherheit behaftet.

Tab. 2-2: Eigenschaften von Nutzfahrzeug-Zellchemien im qualitativen Vergleich¹⁰⁷

	LFP	LTO	NMC
Lade- und Entladeleistung	-	+	0
Energiedichte	0	-	+
Lebensdauer	-	+	0
Kosten	+	-	0
Sicherheit	0	+	-

Kondensatoren: Im Gegensatz zu Batterien speichern Kondensatoren die Energie elektro-statisch und zeichnen sich durch eine hohe Leistungsdichte bei relativ geringem Energieinhalt aus. Als Speicher in Hybridantrieben kommen aktuell ausschließlich Doppelschichtkondensatoren zum Einsatz, da diese im Vergleich mit anderen Bauarten deutlich höhere Energiekapazitäten umsetzen.¹⁰⁸ Zusätzlich besitzen Kondensatoren eine hohe Lebensdauer und große Betriebstemperaturbereiche von bis zu 70°C. Wie in Abb. 2-10 gezeigt wird, sind Kondensatoren als kurzzeitige Leistungsspeicher sehr geeignet, durch die niedrige Energiedichte bei hohen Kosten und Gewicht jedoch als alleinstehender Energiespeicher für Elektrofahrzeuge mit nennenswerter Reichweite nicht einsetzbar.¹⁰⁹

Schwungradspeicher: Das Schwungrad speichert kinetische Energie mit Hilfe einer rotierenden Masse und kann prinzipiell unmittelbar in den mechanischen Antrieb oder über eine elektrische Maschine in den elektrischen Antrieb integriert werden. Da hohe Drehzahlen zum Speichern von Energie nötig werden, ist der nutzbare Energieinhalt der Schwungräder meist eher gering. Leistungsdichte und Wirkungsgrad der Systeme ist heutzutage vergleichbar mit Kondensatoren, sodass Schwungräder als Leistungsspeicher zum Regenerieren bei Bremsvorgängen eingesetzt werden. Die Kosten für das eingesetzte System sind relativ stark von Leistungsfähigkeit und Leichtbau abhängig, sodass ähnliche Kosten wie bei Kondensatoren erreicht werden.¹¹⁰ Bei Nutzfahrzeugen ist aktuell kein Anwendungsfall bekannt, jedoch wird das System erfolgreich im Rennsport eingesetzt.

Hydropneumatische Speicher: Ein weiteres etabliertes System zur Speicherung von Energie insbesondere bei Nutzfahrzeugen sind hydropneumatische Speicher. Die Energiespeicherung wird dabei durch die Kompression eines Gases mit Hilfe eines

¹⁰⁶ Vgl.: Hacker/von Waldenfels/Mottschall 2015, S. 18-20

¹⁰⁷ Vgl.: Anderman 2014, S. 9; Korthauer 2013, S. 25; Pihlatie 2015, S. 9; Thielmann/Sauer/Wietschel 2015, S. 44-46

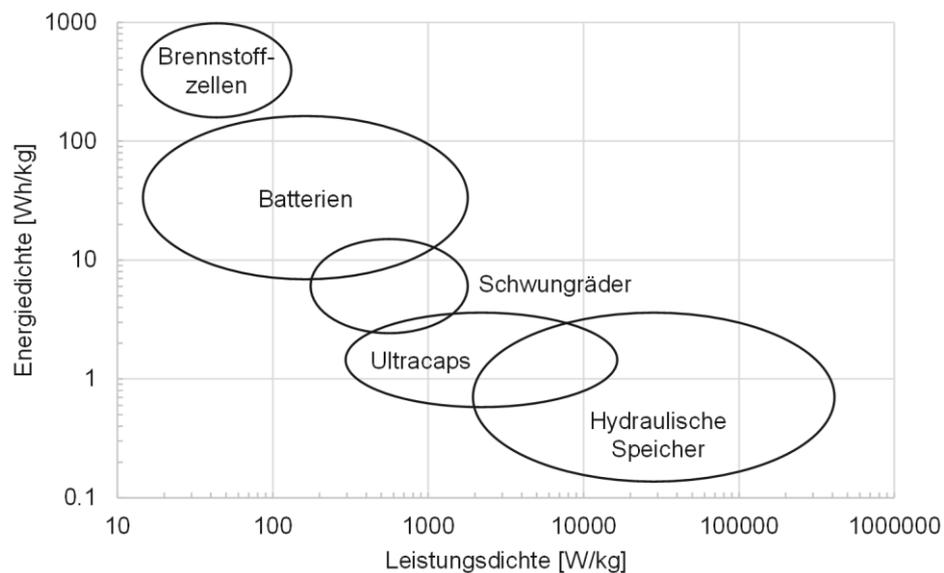
¹⁰⁸ Vgl.: Reif 2012, S. 207-212; Babel 2014, S. 30-33

¹⁰⁹ Vgl.: Thiebes 2012, S. 30; Hofmann 2014, S. 242-246

¹¹⁰ Vgl.: Hofmann 2014, S. 246-253; Reif 2012, S. 249-253; Thiebes 2012, S. 27

hydraulischen Aktuators umgesetzt. Dabei werden ebenfalls sehr hohe Leistungsdichten mit begrenzten Energieinhalten realisiert.¹¹¹ Beispielsweise kann die auftretende Bremsenergie von großen Nutzfahrzeugen beinahe vollständig gespeichert, jedoch durch den geringen Energieinhalt kontinuierliche Hybrid-Funktionen¹¹² wie Lastpunktanhebungen nicht umgesetzt werden. Bei entsprechender, hydraulik-typischer Wartung müssen die Systeme in einem Fahrzeugleben nicht getauscht werden und der erreichbare Wirkungsgrad des Leistungsspeichers ist mit ca. 90 % relativ hoch.¹¹³

Zusammenfassend aus den vorhergehenden Abschnitten werden die verschiedenen Energiespeicher in Abb. 2-11 verglichen.



	Diesel	Erdgas (CNG)	Wasserstoff-Brennstoffzelle	Lithium-Ionen Batterie	Kondensator	Elektromechanisches Schwungrad	Hydropneumatischer Speicher
Wirkungsgrad [%]	-	-	~ 50	65 - 95	80 - 90	~ 90	~ 90
Lebensdauer [Zyklen]	-	-	< 25 000 h	1 000 – 20 000	~ 500 000	~ 1 Mio.	> 10 000 h
Kosten [€/kWh]	~ 0,12	~ 0,49	~ 0,15 (nur H ₂)	400 - 1 200	> 10 000	10 000 – 25 000	-

Abb. 2-11: Energiespeicher für Nutzfahrzeuge im Vergleich¹¹⁴

¹¹¹ Vgl.: Backé 1993, S. 194; Reif 2012, S. 245-249; Hofmann 2014, S. 253-267; Helduser 2013, S. 303-310

¹¹² Vgl.: Kapitel 2.1.2.2

¹¹³ Vgl.: US EPA/OAR/Office of Transportation & Air Quality 2004, S. 5; Thiebes 2012, S. 27-28; Mi/Masrur/Gao 2014, S. 163-168

¹¹⁴ Eigene Darstellung und aggregierte Daten aus den angegebenen Quellen in Kapitel 2.1.3.2

Im logarithmischen Ragone-Diagramm werden die Technologien in ihrer Leistungs- und Energiedichte gegenübergestellt. Zusätzlich werden die relevanten Kenngrößen Wirkungsgrad, Lebensdauer und Kosten in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet. Teilweise ist ein unmittelbarer Vergleich der Kennwerte vereinfacht jedoch nicht möglich, da diese sehr stark vom Betrieb der Aggregate abhängen. Dementsprechend müssen Fahrzeugnutzung und Anforderungen an den Antrieb deutlich konkreter spezifiziert werden, um einen geeigneten Energiespeicher auswählen zu können.

2.1.3.3 Ladetechnologie

Ein weiterer relevanter Aspekt der Elektromobilität bei Nutzfahrzeugen stellt die Energiebereitstellung dar. Im Gegensatz zu Kraftstoffen werden elektrische Energiespeicher mit Hilfe von Ladegeräten im Rahmen ihrer technischen Eigenschaften¹¹⁵ aufgeladen. Während elektrifizierte Pkw meist mit einem Ladegerät fahrzeugseitig ausgestattet sind und an einer haushaltsüblichen Steckdose über mehrere Stunden aufgeladen werden, benötigen energieintensive Nutzfahrzeuge deutlich höhere Leistungen, um die Energiespeicher von Elektro- und Plug-in Hybrid-Fahrzeugen in betriebsbedingten Standzeiten aufzuladen.

Aktuell werden drei unterschiedliche Ladestrategien umgesetzt, die im Folgenden im Detail beschrieben werden:¹¹⁶

- Übernacht-Laden
- Schnell-Laden
- Batteriewechsel

Übernacht-Laden: Das Übernacht-Laden oder auch langsames Laden beschreibt einen Ladevorgang der Batterie über mehrere Stunden mit niedrigen Leistungen auflädt. Die benötigte Leistung des Ladegeräts und der Netzanschluss sind dabei abhängig von der Größe des Energiespeichers, der benötigten Energie für den Betrieb und der verfügbaren Standzeit der Fahrzeuge. Die Fahrzeuge werden zum Ende einer Schicht auf dem Betriebshof mit den Ladegeräten verbunden und bis zum Beginn der nächsten Schicht geladen. Entsprechend der Dimensionierung von Energiespeicher und Antriebskonzept sind die Fahrzeuge flexibel einsetzbar. Durch niedrige Leistungen können die Speicher lebensdauer-optimiert geladen werden, obwohl je Ladevorgang relativ tief entladen wird.

Schnell-Laden: Das schnelle Aufladen der Energiespeicher verkürzt durch höhere Ladeleistungen die benötigte Ladezeit. Die benötigte Ladeinfrastruktur für diese Strategie ist deutlich kosten-intensiver und durch höhere Wärmeentwicklung während des Ladevorgangs wird der Energiespeicher stärker belastet.¹¹⁷ Beim sogenannten „Opportunity-Charging“ für Elektrobusse, einer extremen Auslegung der Strategie, werden die Energiespeicher sehr häufig auf der vorgegebenen Strecke aufgeladen und resultieren so in relativ geringen Energiespeicherkapazitäten. Die Reichweite der rein-elektrischen Fahrzeuge ist theoretisch

¹¹⁵ Vgl.: Kapitel 2.1.3.2

¹¹⁶ Vgl.: Wallentowitz/Freialdenhoven 2011, S. 115-119; Reif 2012, S. 69-72; Kley 2011, S. 7-14

¹¹⁷ Vgl.: Sauer et al. 2016, S. 16

unbegrenzt, jedoch ist der Nachteil der Strategie eine deutlich eingeschränkte Flexibilität im Fahrzeugeinsatz.¹¹⁸

Batteriewechsel: Eine weitere Strategie ist das Auswechseln des gesamten Energiespeichers eines Nutzfahrzeugs während den Standzeiten. Positive Aspekte dieses Vorgehens sind kurze Wechselzeiten einer gesamten Batterie, niedrige Batteriebelastungen durch langsames Laden in den Wechselstationen und eine permanente Verfügbarkeit von Batteriekapazitäten zur Integration in Smart Grids. Demgegenüber stehen sehr hohe Investitionen für Batteriewechselstationen und zusätzliche Batterien, eventuell benötigte komplexe Automatisierungstechnik, eine benötigte Standardisierung von Batteriepaketen und potentiell zusätzliche Fahrten zur Wechselstation. Während diese Technologie beispielsweise bei elektrischen Gabelstaplern seit Jahren eingesetzt wird und bei Stadtbussen in China erfolgreich getestet wurde, ist ein großes Pkw-Vorhaben mit Wechselbatterietechnologie in Israel katastrophal gescheitert.¹¹⁹

Eine Übersicht der unterschiedlichen Ladestrategien für Nutzfahrzeuge im Vergleich zeigt Tab. 2-3. Zusammenfassend sollte der Einsatz unterschiedlicher Ladestrategien für die spezifische Anwendung intensiv und möglichst umfassend geprüft werden. Insbesondere betriebliche Rahmenbedingungen haben einen signifikanten Einfluss auf einen wirtschaftlichen Einsatz.

Tab. 2-3: Ladestrategien für elektrifizierte Nutzfahrzeuge¹²⁰

	Übernacht-Laden	Schnellladen	Batteriewechsel
Reichweite	Begrenzt -	Durch Wiederaufladen nach Standzeit unbegrenzt o	Durch Wechsel unbegrenzt +
Benötigte Batteriekapazität	Groß -	Gering für verbundene Teilstrecken o	Gering, aber mehrere redundante Batterien o
Flächenverbrauch für Infrastruktur	Je Fahrzeug eine Ladestation o	Ladestationen an strategisch günstigen Positionen +	Wechselstation benötigt große Fläche -
Kosten der Infrastruktur	Ladestationen im Betriebshof +	Wenige, kosten-intensive Ladestationen o	Wechselstation sehr kostenintensiv -
Kosten des Energiespeichers	Hoch, relativ günstige Einzelbatterien +	Mittlere, relativ teure Einzelbatterien +	Mehrere redundante Batterien -
Flexibilität im Streckenmanagement	Abhängig von der Reichweite +	Reichweite der Ladestationen -	Reichweite der Wechselbatterien o
Lebensdauer	Tiefe Entladung o	Starke Belastung des Energiespeichers -	Tiefe Entladung o

¹¹⁸ Vgl.: Göhlich/Kunith/Gräbener 2013, S. 75

¹¹⁹ Vgl.: dpa Deutsche Presse-Agentur GmbH 2016

¹²⁰ Auf Nutzfahrzeuge angepasste Darstellung ähnlich Göhlich/Kunith/Gräbener 2013

2.1.4 Nutzen der Elektrifizierung

Zunächst werden in diesem Kapitel spezifische Effizienzsteigerungspotentiale elektrifizierter Antriebe in der speziellen Anwendung des Nutzfahrzeugsbereichs vorgestellt. Exemplarisch wird auf Entwicklungen bei Entsorgungsfahrzeugen und Linienbussen als vergleichbarer Anwendungsbereich mit höherem Technologiereifegrad eingegangen um vorhandene Elektrifizierungspotentiale weiter zu spezifizieren. Im Anschluss wird auf die Umweltwirkung von Nutzfahrzeugen eingegangen und die Eignung der Elektromobilität zu deren Verbesserung beschrieben. Konkret werden dabei zunächst Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen untersucht. Abschließend werden Geräuschemissionen urbaner Nutzfahrzeuge beschrieben um auch in diesem Bereich die Möglichkeiten zur Verbesserung abzuschätzen.

2.1.4.1 Wirkungsgrade von Vergleichsantrieben

Potentiale zur Verbesserung des Antriebswirkungsgrads von Nutzfahrzeugen unter Beibehaltung hoher Sicherheits- und Komfortstandards sind nach aktuellen Erkenntnissen begrenzt und können entsprechend Tab. 2-4 auf verschiedene Bereiche des Fahrzeugs aufgeteilt werden. Neben den relevanten Komponenten Motor, Getriebe und übergreifendem Energie- und Betriebsmanagement, spielen Fahrzeugkomponenten zur Reduktion von Luft-, Roll- und Beschleunigungswiderständen eine Rolle. Als weiterer, wesentlicher Baustein effizienterer Fahrzeuge werden die Hybridisierung des Antriebsstrangs sowie die Elektrifizierung von Arbeitsantrieben und Nebenaggregaten gesehen.

Tab. 2-4: Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz bei Nutzfahrzeugen [%]¹²¹

	Motor	Getriebe	Leichtbau	Aerodynamik	Räder / Reifen	Hybrid-Funktion.	Betriebs-Mgmt.
Städtischer Lieferverkehr	0 - 3	0 - 3	1,5 - 3	1,5 - 7	2,5 - 5	15 - 25	0 - 0,2
Regionaler Lieferverkehr	1 - 5	0,5 - 5	1,5	7,5 - 11	8 - 9	7 - 9	1 - 4
Güter-Fernverkehr	1 - 6	0,5 - 6	1,5 - 2	8,5 - 12,5	8 - 11	6 - 7	2,5 - 4,5
Kommunalfahrzeuge	2,5 - 3,5	2,5 - 3	0,5 - 2,5	0 - 0,2	2 - 3	18 - 30	0 - 0,2
Radlader	5 - 10	0 - 5	0 - 0,2	0 - 0,2	9 - 10	22 - 27	0 - 0,2
Linienbus	2,5 - 3,5	2,5 - 3	3,5 - 5	0 - 0,2	0,5 - 5	25 - 30	0 - 0,2
Reisebus	0,5 - 5	0,5 - 5	0,5 - 1,5	5,5 - 7	1 - 8	6 - 10	1 - 4

Deutlich erkennbar sind hohe Potentiale bei der Verbesserung aerodynamischer Eigenschaften von Fahrzeugen mit hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten. Zusätzlich

¹²¹ Vgl.: Hammer 2014; Law/Jackson/Chan 2011; Hill et al. 2011; Committee to Assess Fuel Economy Technologies for Medium- and Heavy-Duty Vehicles/National Research Council/Transportation Research Board 2010; Lenz et al. 2010; Sonntag et al. 2011; Urban/Halm 2010; Verband der Automobilindustrie e.V. 2012; Jähne 2013; Bach et al. 2015; Faltenbacher 2015; Faltenbacher et al. 2016; Bergk 2015

existieren gute Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung durch Reduktion der Rollwiderstände. Durchgehend hohe Steigerungspotentiale werden ebenfalls bei der Umsetzung von spezifischen Funktionen der Hybridantriebe, wie beispielsweise regenerativem Bremsen oder Lastpunktverschiebung gesehen. Insbesondere bei innerstädtischen Fahrzeugen mit vielen Stopps und geringer Durchschnittsgeschwindigkeit, der sogenannten Stop&Go-Charakteristik, können elektrifizierte Antriebe den Energiebedarf deutlich reduzieren.¹²² Auf die beiden Fahrzeugtypen Abfallsammelfahrzeuge und Linienbusse werden im Folgenden aufgrund ihrer besonderen Relevanz für diese Arbeit kurz eingegangen.

Bei verschiedenen Parallel-Hybrid Abfallsammelfahrzeugen wurden als Prototypen die Funktionen elektrisches Fahren bei niedrigen Geschwindigkeiten, regeneratives Bremsen und elektrischer Betrieb des Aufbaus umgesetzt. Dabei wurden Kraftstoffeinsparungen von mehr als 24 % im realen Einsatz erzielt.¹²³ Der Effekt des regenerativen Bremsens kann dabei bereits mehr als 9 % ausmachen.¹²⁴ Wird der Antrieb für den Aufbau durch E-Maschinen integriert in den Hochvolt-Kreis umgesetzt, hat dies zusätzlich deutliche Vorteile in der Wirkungsgradkette der Energieübertragung. Die Kraftstoffeinsparungen hybrider Antriebsstränge steigen dabei mit kürzerem Abstand der Abfallbehälter und Stopps.¹²⁵

Die Entwicklung von Hybrid- und Elektrobussen ist im Vergleich bereits weiter fortgeschritten. Dabei wurden unterschiedliche Hybrid-Antriebstopologien umgesetzt und je nach Reifegrad der Fahrzeuge bis zu 30 % Kraftstoff eingespart.¹²⁶ Weitere Effizienzsteigerungspotentiale liegen in der Elektrifizierung von Klimatisierung und Heizung der Fahrzeuge, was eine signifikante Reichweitenerhöhung zur Folge haben kann.¹²⁷

2.1.4.2 Treibhausgase und Luftschadstoffe durch Nutzfahrzeuge

Im Rahmen der Energiewende werden in Deutschland die Kapazitäten erneuerbarer Energien im Kraftwerkspark kontinuierlich ausgebaut um die Treibhausgasemissionen der Primärenergieversorgung nachhaltig zu senken. Erneuerbare Energien decken in der Stromerzeugung 2016 voraussichtlich über 30 % ab und sind die mit Abstand dominierende Energiequelle.¹²⁸ Die Klimaschutzziele für Deutschland können jedoch nur erreicht werden, wenn weitere Sektoren ebenfalls sukzessive von fossilen auf erneuerbare Energiequellen umgestellt werden.¹²⁹ Der Verkehrssektor ist für etwa 20 % der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich. Davon verursachte der Wirtschaftsverkehr im Bezugsjahr 2010 43 % mit steigender Tendenz.¹³⁰ Trotz erstmals mehr als 150 000 Fahrzeugen mit Elektro- oder Hybridantrieb, einer Vielzahl elektrischer Zweiräder und wachsenden Beförderungs-

¹²² Vgl.: Karabasoglu/Michalek 2013, S. 447; Holmberg et al. 2014, S. 94; Wu/Inderbitzin/Bening 2015

¹²³ Vgl.: Sonntag et al. 2011, S. 147; Munder 2016, S. 7

¹²⁴ Vgl.: Ivanco/Johri/Filipi 2012, S. 368

¹²⁵ Vgl.: Urban/Halm 2010, S. 125-131

¹²⁶ Vgl.: Faltenbacher 2015, S. 10; Faltenbacher et al. 2016, S. 37-43

¹²⁷ Vgl.: Jefferies et al. 2015, S. 14

¹²⁸ Vgl.: Agora Energiewende 2016, S. 13; AG Energiebilanzen e.V. 2016; Wagner et al. 2007, S. 44-52; Faltenbacher et al. 2016, S. 65

¹²⁹ Vgl.: Agora Energiewende 2016, S. 32

¹³⁰ Vgl.: Schmitz 2015, S.414; Europäische Kommission 2016, S. 9

leistungen des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) sind weiterhin 95 % der für Mobilität eingesetzten Energie fossilen Ursprungs,¹³¹ und wurden bis 2014 bis zu 90 % durch Importe abgedeckt.¹³²

Elektrifizierte Nutzfahrzeuge können dazu beitragen die Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffe durch den Wirtschaftsverkehr zu verringern, wenn durch die neue Technologie insgesamt der Verbrauch fossiler Brennstoffe reduziert wird und die Batterien hauptsächlich aus erneuerbaren Energien geladen werden.¹³³ Hybridisierte Nutzfahrzeuge mit einem städtischen Fahrprofil erreichen deutlich geringere Schadstoffemissionen durch den Betrieb in einem effizienteren Bereich im Motorkennfeld, aber auch durch einen gesteigerten Gesamtwirkungsgrad.¹³⁴ Die Umwelteinflüsse bei der Produktion von elektrifizierten Fahrzeugen sind wegen der energieintensiven Batterieherstellung zunächst wesentlich höher. Diese werden jedoch sukzessive durch geringere Emissionen während des Betriebs kompensiert. Bei der Wartung und Fahrzeugentsorgung fallen ähnliche Emissionen bei beiden Fahrzeugarten an.¹³⁵ Um den zusätzlichen Energiebedarf des Verkehrs möglichst emissionsneutral zu decken ist zukünftig ein stärkerer Ausbau von erneuerbaren Energien nötig.¹³⁶ Durch den ständig wachsenden Anteil erneuerbarer Energien werden elektrifizierte Fahrzeuge mit Netzanschluss über die Fahrzeuglebensdauer sogar immer umweltfreundlicher.¹³⁷

Ein zusätzlicher Nutzen elektrifizierter Fahrzeuge kann durch die Integration in das elektrische Versorgungsnetz realisiert werden. Durch die hohe Volatilität der erneuerbaren Energien stehen die Netzbetreiber und Energieerzeuger vor der Herausforderung die aktuell gute Verfügbarkeit und Netzsicherheit aufrechtzuerhalten. Dabei können Elektrofahrzeuge durch intelligente Ladestrategien als Energiespeicher dienen und für Lastausgleiche eingesetzt werden. Zusätzlich kann lokal die Eigennutzung von erneuerbaren Energien erhöht werden um Übertragungsverluste und -aufwände zu reduzieren.¹³⁸ Diese zusätzlichen Funktionen der Fahrzeuge können beispielsweise bei kommerziellen Flottenbetreibern durch intelligentes Lademanagement eine Reduktion des Leistungspreises bewirken oder während des Stillstands die Teilnahme am Strommarkt zulassen und so wirtschaftlich verwertet werden.¹³⁹

2.1.4.3 Geräuschemissionen elektrifizierter Fahrzeuge

Der Betrieb von kommunalen Nutzfahrzeugen mit Arbeitsaggregaten ist mit erheblichen Geräuschemissionen verbunden. Durch den Einsatz leistungsstarker Dieselmotoren und

¹³¹ Vgl.: Krafftahrt-Bundesamt 2016; Kirrmann 2014; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2015

¹³² Vgl.: Cambridge Econometrics 2016, S. 34; eurostat 2016

¹³³ Vgl.: Held et al. 2016, S. 35-77

¹³⁴ Vgl.: Faltenbacher et al. 2016, S. 11-69; Kampker/Vallée/Schnettler 2013, S. 33-34

¹³⁵ Vgl.: Aichinger 2014, S. 18

¹³⁶ Vgl.: Stöhr/Giglmair/Berlet 2015, S. 8; Kasten et al. 2016, S. 13-14

¹³⁷ Vgl.: Lutsey 2016

¹³⁸ Vgl.: Prestl 2016, S. 7-12; Mets/D'hulst/Develder 2012; Zheng et al. 2013; Liu et al. 2015

¹³⁹ Vgl.: Wohlers et al. 2015; Bessa et al. 2012; Clement/Haesen/Driesen 2009;

hydraulisch angetriebenen Arbeitsantrieben, aber auch entstehende Nebengeräusche der durchgeführten Arbeiten, werden sowohl Arbeiter als auch Anwohner im urbanen Umfeld belastet. Dementsprechend ist die Minderung von Geräuschemissionen ebenfalls ein wesentliches Ziel bei der Weiterentwicklung von Nutzfahrzeugen, insbesondere in Ballungsräumen. Dabei können Geräuschquellen während des Betriebs stark variieren, wie folgende Beispiele für ein konventionelles Fahrzeug erläutern:¹⁴⁰

- Fahrendes Fahrzeug mit abgeschaltetem Arbeitsaggregat
- Fahrendes Fahrzeug und der Arbeitsantrieb wird über den Dieselmotor betrieben
- Stehendes Fahrzeug und der Arbeitsantrieb wird über den Dieselmotor betrieben

Weitere, nicht fahrzeugbezogene Geräuschbelastungen, entstehen durch das Arbeiten der Fahrzeugnutzer unabhängig vom Fahrzeug.

Für den Betrieb der Fahrzeuge sind dabei unterschiedliche gesetzliche Rahmenbedingungen bindend, die spezifische Bereiche des Nutzfahrzeugs und der Einsatzgebiete betreffen. Fahrzeug-Fahrgestelle von Nutzfahrzeugen mit mehr als 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht müssen die Richtlinie 2007/34/EG der europäischen Kommission für zulässige Geräuschemissionen einhalten.¹⁴¹ Die Grenzwerte gelten jedoch nicht für verbaute Aufbauten auf den Fahrzeugen. Für diese definieren weitere Richtlinien die Rahmenbedingungen der Prüfungen wie beispielsweise die Richtlinie 2000/14/EG für umweltbelastende Geräuschemissionen für im Freien verwendete Maschinen.¹⁴²

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz regelt die Grenzwerte für entstehenden Lärm anhand § 48 der Verwaltungsvorschrift TA Lärm¹⁴³ für unterschiedliche Immissionsorte. Tab. 2-5 zeigt die Tages- und Nacht-Richtwerte im Außenbereich.

Tab. 2-5: Immissionsrichtwerte außerhalb von Gebäuden in dB(A)¹⁴⁴

Immissionsort	Tagsüber	Nachts
	6:00 – 22:00	22:00 – 6:00
Industriegebiete	70	70
Gewerbegebiete	65	50
Kern-, Dorf- und Mischgebiete	60	45
Allgemeine Wohngebiete	55	40
Reine Wohngebiete	50	35
Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten	45	35

Zusätzlich existieren meist regionale Bestimmungen, wie beispielsweise die Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt (VwVBU) der Berliner Senatsverwaltung, die ebenfalls

¹⁴⁰ Verallgemeinerte Darstellung ähnlich Hammer 2014, S. 44-45

¹⁴¹ Vgl.: Europäische Kommission 2007

¹⁴² Vgl.: Europäische Union 2000

¹⁴³ Vgl.: Bundesregierung 2002

¹⁴⁴ Vgl.: Bundesregierung 1998, Nr. 6.1

Geräuschemissions-Höchstwerte für spezifische Fahrzeugtypen des Landes Berlin und seinen Beteiligungen definiert.¹⁴⁵

Das Arbeitsschutzgesetz legt u.a. physikalische Normen zum Schutz der Beschäftigten fest. Die Grenzwerte beziehen sich auf gemittelte Tages- und Wochenlärmpegel, sogenannte Lärmexpositionspegel, sowie Spitzenschalldruckpegel (LärmVibrationsArbSchV).¹⁴⁶ Bei Überschreitung vorgeschriebener Grenzwerte muss der Arbeitgeber den Beschäftigten einen persönlichen Gehörschutz zur Verfügung stellen sowie für deren Verwendung Sorge tragen.

Durch Hybridisierung bei größeren Nutzfahrzeugen können die Geräuschemissionen im Vergleich mit konventionellen dieselbetriebenen Fahrzeugen deutlich reduziert werden.¹⁴⁷ Bei getesteten Linienbussen wurde die psychoakustische Lautheit um ca. 2/3 reduziert.¹⁴⁸ Typischerweise dominiert bei konventionellen Pkw das Antriebsgeräusch gegenüber dem Abrollgeräusch bis ca. 25 km/h. Bei Nutzfahrzeugen kann dieser Effekt deutlich stärker ausfallen und die Motorengeräusche bis 50 km/h überwiegen. Durch gezielten Einsatz elektrifizierter Antriebe können bei niedrigen Geschwindigkeiten situative Verbesserungen in besonders belasteten Bereichen erzielt werden.¹⁴⁹ Bei Lärmemissionsmessungen eines Hybrid-Abfallsammelfahrzeugs mit elektrifiziertem Verdichtungssystem reduzierte sich z.B. der gemessene Wert nach 2000/14/EG um bis zu 15 dB(A) auf 91 dB(A). Dies ergibt eine wahrgenommene Reduktion der Lautstärke um 96 %.¹⁵⁰

2.1.5 Anwendungsbeispiele

Um Anwendbarkeit und Variabilität zu demonstrieren wird die entwickelte Methode in dieser Arbeit auf zwei Nutzfahrzeuge mit energie-intensiven Arbeitsaggregaten aus dem Kernarbeitsbereich eines Entsorgungs- und Reinigungsbetriebs angewendet. Das Papierkorbsammelfahrzeug und die Großkehrmaschine stellen dabei in den Parametern Gewicht, variierende Zuladung, Energiebedarf und dessen Aufteilung auf Fahrtrieb und Arbeitsaggregat besonders gegensätzliche Fahrzeuge dar, wie im Folgenden beschrieben bzw. anhand der durchgeführten Analysen¹⁵¹ belegt wird.

Das Papierkorbsammelfahrzeug zur Entleerung öffentlicher Papierkörbe ist in Abb. 2-12 abgebildet. Die Fahrzeuge werden an bis zu sieben Tagen pro Woche im Zweischichtbetrieb eingesetzt. Dabei werden ca. 250 Papierkörbe je Schicht angefahren und entleert. Der Abfall wird von einem Mitarbeiter mit einem speziellen Fangsack unter den Papierkörben aufgenommen und manuell in den Laderaum der Fahrzeuge befördert. Der Laderaum ist mit einem hydraulischen Verdichtungssystem ausgestattet und wird bei ca. jedem zehnten

¹⁴⁵ Vgl.: Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt 2016

¹⁴⁶ Vgl.: Bundesregierung 2007, § 6 und § 8

¹⁴⁷ Vgl.: Keller/Lebküchner/Kljun 2006, S. 55

¹⁴⁸ Vgl.: Faltenbacher 2015, S. 12

¹⁴⁹ Vgl.: Aichinger 2014, S. 19 Michalk/Lichtfuß/Sonntag 2014

¹⁵⁰ Vgl.: Urban/Halm 2010, S. 132; Schönewolf 2016, S. 11

¹⁵¹ Vgl.: Kapitel 4.4.3

Papierkorb betätigt.¹⁵² Das Fahrzeug kann alternativ als einfacher Planenaufbau oder als Kastenaufbau mit Kippvorrichtung betrieben werden. Da diese Varianten während einer Schicht mehrfach entleert werden müssen, werden die Fahrzeuge mit Verdichtungssystem aktuell betrieblich und wirtschaftlich bevorzugt. Der Fahrzeugeinsatz erfolgt in Fußgängerzonen, im Innenstadtbereich mit beengten Verkehrsverhältnissen sowie Siedlungsgebieten. Entladen werden die Fahrzeuge am Ende der Schicht auf den Betriebshöfen. Die wichtigsten technischen Daten zum konventionellen Referenzfahrzeug sind in Tab. 2-6 zusammengefasst.



Abb. 2-12: Papierkorbsammelfahrzeug der Berliner Stadtreinigung¹⁵³

Tab. 2-6: Technische Daten des Papierkorbsammelfahrzeugs¹⁵⁴

Zulässiges Gesamtgewicht	5 000 kg
Leergewicht	3 700 kg
Leistung Antrieb	95 kW
Leistung Arbeitsaggregat	6,5 – 8 kW
Ø-Dieserverbrauch	19 l/100km
Ø-Jahresfahrleistung	26 000 km

Technisch sind die konventionellen Fahrzeuge in einen Aufbau sowie ein Fahrgestell aufgeteilt. Obwohl integrierte Lösungen zu bevorzugen sind, ist die Entwicklung eines Gesamtfahrzeugkonzeptes durch geringe Fahrzeuganzahlen in den Flotten nicht wahrscheinlich. Anwendbare Fahrgestelle mit elektrifizierten Antrieben existieren bereits vereinzelt von verschiedenen Fahrzeug-Umrüstern in Kleinserien bzw. wurden ebenfalls von großen Nutzfahrzeugherstellern angekündigt. Dabei wurden verschiedene Antriebsarchitekturen mit unterschiedlichen Spezifikationen umgesetzt. Tab. 2-7 zeigt eine Auflistung mit elektrischen und Hybrid-Fahrgestellen ohne Anspruch auf Vollständigkeit, die als Basis eingesetzt werden können. Mit Vorhandensein eines elektrischen Antriebsstrangs kann der Pressaufbau ebenfalls elektrifiziert werden. Elektrifizierte Pressaufbauten mit einer separaten

¹⁵² Vgl.: ZÖLLER-KIPPER GmbH 2016

¹⁵³ Berliner Stadtreinigungsbetriebe; Gräbener/Göhlich 2015, S. 438

¹⁵⁴ Vgl.: ZÖLLER-KIPPER GmbH 2016; Flottenbetreiber-Betriebsdaten; Hilgers 2016, S. 36

Batterie werden bereits für große Abfallsammelfahrzeuge von mehreren Herstellern serienreif vertrieben und können in die Flotte integriert werden.¹⁵⁵ Vollwertige Integrationen der Arbeitsaggregate in den Fahrantrieb sind jedoch noch ein aktuelles Forschungsthema.¹⁵⁶

Tab. 2-7: Ausgewählte Elektro- und Hybridkonzepte in der Transporter-Klasse¹⁵⁷

Fahrzeug	Antriebsarchitektur	Elektr. Reichweite	Nutzlast
IVECO Daily Electric	Elektrofahrzeug	130 km	< 2 600 kg
German e-Cars Plantos (MB Sprinter Umbau)	Elektrofahrzeug	80-120 km	1 000 – 2 200 kg
Smith Edison (Ford Transit Umbau)	Elektrofahrzeug	90 / 160 / 240 km	725 – 2 300 kg
MB Sprinter Plug-In Hybrid	Plug-in Parallel-Hybrid	30 km	1 200 kg
ELENA Plug-in Hybrid (MB Sprinter Umbau)	Plug-in Parallel-Hybrid Nachrüstbausatz	50 km	-

Die Großkehrmaschine ist in Abb. 2-13 dargestellt und wird zur maschinellen Reinigung von Straßen und Plätzen im Innenstadtbereich eingesetzt. Das Fahrzeug kehrt dabei links- oder rechtsseitig Haupt- und Nebenstraßen sowie Parkbuchten im Zweischichtbetrieb an fünf Tagen pro Woche. Die Arbeitsaggregate des Fahrzeugs sind ein Saugsystem und hydraulisch betriebene Besen, die mit pneumatischen Zylindern verstellt werden können. Das betrachtete Referenzfahrzeug verfügt über zwei separate Dieselmotoren jeweils für den Fahrantrieb sowie einen sogenannten Aufbaumotor. Alternativ existieren Fahrzeugkonzepte mit hydraulischem oder mechanischem Nebenantrieb des Fahrgestells, sodass nur ein Dieselmotor benötigt wird.¹⁵⁸ Durch einen niedrigeren Kraftstoffverbrauch wird das Referenzfahrzeug mit Aufbaumotor aktuell vom Flottenbetreiber bevorzugt. Die Fahrzeuge kommen im Betrieb jeweils am Ende der Schicht, bzw. wenn der Aufbaubehälter voll ist oder die maximale Zuladung erreicht wurde auf den Betriebshof zum Entladen. Bei den meisten Touren entspricht dies zwei Entleerungen pro Schicht. Die wichtigsten technischen Daten zum konventionellen Referenzfahrzeug mit Aufbaumotor sind in Tab. 2-8 dargestellt. Die Zuladungscharakteristik der Fahrzeugtours kann dabei stark variieren und dementsprechend den Betriebsablauf beeinflussen. Beispielsweise wird im Winter Streugut aufgenommen, sodass die Kehrmaschinen schnell ihre maximale Beladung erreichen und häufiger entleert werden müssen. Während der Laubzeit im Herbst hingegen wird das maximale Beladungsvolumen schneller erreicht, sodass ebenfalls häufiger entleert werden muss.

¹⁵⁵ Vgl.: Banke Accessory Drives 2016, Geesinknorba GmbH 2016

¹⁵⁶ Vgl.: HORIBA MIRA Ltd. 2016

¹⁵⁷ Eigene Recherche: u.a. IVECO Magirus AG 2012; German e-Cars GmbH 2012; Hofmann 2014, S. 523-525; Smith Electric Vehicles 2011; ELENA PHEV 2014

¹⁵⁸ Vgl.: FAUN Umwelttechnik GmbH & Co.KG 2016

Abb. 2-13: Großkehrmaschine der Berliner Stadtreinigung¹⁵⁹Tab. 2-8: Technische Daten Großkehrmaschine¹⁶⁰

Zulässiges Gesamtgewicht	15 000 kg
Leergewicht	9 400 kg
Leistung Antrieb	170 kW
Leistung Arbeitsaggregat	55 kW
Ø-Dieserverbrauch	95 l/100km
Ø-Jahresfahrleistung	12 900 km

Große Kehrmaschinen können wie Papierkorbsammelfahrzeuge technisch in Fahrgestell und Aufbau unterteilt werden. Kleine und mittlere Kehrmaschinen werden jedoch häufig als integriertes Spezialfahrzeug-Konzept hergestellt und erreichen so eine hohe Leistungsfähigkeit mit geringen Abmaßen und Fahrzeuggewicht. Durch die geringe Energiedichte elektro-chemischer Energiespeicher sind solche Fahrzeugentwicklungen besonders vorteilhaft.¹⁶¹ Elektrifizierte Fahrzeugkonzepte für Kehrmaschinen wurden bislang nur vereinzelt in unterschiedlichen Fahrzeuggrößen entwickelt. Tab. 2-9 zeigt eine Übersicht verschiedener Konzepte, die überwiegend als Prototypen vorgestellt wurden. Einzig Green Machines bietet eine Kleinstkehrmaschine als Elektrofahrzeug bereits in Serienreife an. Die Batteriespeicher aller Konzepte sind für eine Einsatzzeit von maximal acht Stunden konzipiert und können somit nicht wie das konventionelle Fahrzeug im Zweischichtbetrieb eingesetzt werden, beziehungsweise erfordern relevante Modifikationen wie beispielsweise Batteriewechsel- oder Schnellladetechnologie.¹⁶²

¹⁵⁹ Berliner Stadtreinigungsbetriebe; Göhlich/Gräbener 2015, S. 16

¹⁶⁰ Vgl.: FAUN Umwelttechnik GmbH & Co.KG 2016; Flottenbetreiber-Betriebsdaten

¹⁶¹ Vgl.: Kapitel 2.1.2 und 2.1.3.2

¹⁶² Vgl.: Kapitel 2.1.3.3

Tab. 2-9: Ausgewählte Elektro- und Hybridkonzepte für Kehrmaschinen¹⁶³

Fahrzeug	Antriebsarchitektur	Nutzvolumen	zGG ¹⁶⁴
Green Machines 500ze	Elektrofahrzeug	1 m ³	2 670 kg
Brock SL140 Plug-in Hybrid	Plug-in Hybridfahrzeug	4 m ³	5 000 kg
Brock SL200 Zero E	Elektrofahrzeug	6 m ³	15 000 kg
Bucher Municipal CityCat 2020ev	Elektrofahrzeug	2 m ³	4 500 kg

Während zahlreicher Tests von hybridisierten und elektrifizierten Nutzfahrzeugen beim Flottenbetreiber zeigte sich auch über die Anwendungskonzepte dieser Arbeit hinaus, dass mit den erprobten Fahrzeugen der komplexe und witterungsbedingt veränderliche Betriebsablauf nicht umgesetzt werden kann, die Nutzlast oder Reichweite der Fahrzeuge nicht ausreicht oder ein Zweischichtbetrieb nicht umsetzbar ist bzw. deutliche Veränderungen im Betriebsablauf nötig werden. Da Fahrzeuge im kommerziellen Flottenbetrieb vorgegebene und vorhersagbare Fahrprofile haben und somit kosten- und gewichtsintensive Komponenten elektrifizierter Fahrzeuge wie Energiespeicher gut an die Nutzung angepasst werden können, bietet die Anwendung ein hohes Potential zur wirtschaftlichen Umsetzung.¹⁶⁵

Eine Herausforderung dieser Arbeit ist dementsprechend die gezielte und strukturierte Aufarbeitung von Anforderungen der Flottenbetreiber, die den Einsatz elektrifizierter Fahrzeuge ermöglichen bei gleichzeitig kosten- und energieeffizienter Auslegung der Einzelkomponenten und deren Funktionen. Ein methodischer und reproduzierbarer Entwicklungsprozess soll dabei helfen die Technologieunsicherheit zukünftiger Nutzer zu reduzieren und gleichzeitig ein Verständnis über Leistungsfähigkeit und –grenzen der Fahrzeuge zu schaffen.

2.2 Grundlagen der Produktentwicklung

In diesem Kapitel werden die relevanten Bereiche der Produktentwicklung zur Durchführung dieser Arbeit beschrieben. Zunächst werden in den Ingenieurwissenschaften verbreitete und etablierte Vorgehensmodelle dargestellt und deren Inhalte miteinander verglichen. Ein Vorgehensmodell ist dabei als allgemeingültige Beschreibung der einzelnen Schritte und Handlungsfolge bei der Produktentwicklung definiert.¹⁶⁶ Im Anschluss werden die aufeinanderfolgenden und für diese Arbeit relevanten Entwicklungsphasen Anforderungsanalyse, Konzeptentwicklung und Entscheidungsfindung detailliert beschrieben und

¹⁶³ Eigene Recherche: u.a. GREEN MACHINES DEUTSCHLAND GMBH 2016; bauMAGAZIN 2013; BROCK Kehrtechnik GmbH 2016; Bucher Municipal AG 2016

¹⁶⁴ Zulässiges Gesamtgewicht

¹⁶⁵ Vgl.: Hacker/von Waldenfels/Mottschall 2015; Aichinger 2014; Raiber 2016

¹⁶⁶ Vgl.: Lindemann 2009, S. 36

spezifische Methoden¹⁶⁷ und Methodiken¹⁶⁸ der Phasen erläutert¹⁶⁹ sowie als Basis dieser Arbeit ausgewählt.

2.2.1 Allgemeingültige Vorgehensmodelle

In der Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik werden unterschiedliche Vorgehensmodelle, die den Ablauf in definierte Arbeitsschritte mit konkreten Arbeitsergebnissen und Handlungsanweisungen aufgliedern und Konstruktionsmethoden, die eine systematische Durchführung einzelner Konstruktionsschritte im Detail unterstützen, vorgestellt.¹⁷⁰ Sie sind als globale Leitlinien für ein praktisches und systematisches Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren zu verstehen und dienen einer übergeordneten, ablaforientierten Strukturierung des gesamten Entwicklungsprozesses.¹⁷¹ Häufig eingesetzte strukturgebende Vorgehensmodelle werden im Folgenden aufgelistet:¹⁷²

- TOTE-Modell: Test-Operate-Test-Exit¹⁷³
- DPS: Discursive Problem Solving¹⁷⁴
- Problemlösezyklus des System Engineering¹⁷⁵
- Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel¹⁷⁶
- MVM: Münchener Vorgehensmodell¹⁷⁷
- Generelles Vorgehen zum Entwickeln und Konstruieren – VDI-Richtlinie 2221¹⁷⁸
- Phasen des Entwickelns und Konstruierens nach Pahl/Beitz¹⁷⁹
- V-Modell: VDI-Richtlinie 2206¹⁸⁰

Wichtige Methoden in der ingenieurwissenschaftlichen Produktentwicklung sind insbesondere die Vorgehensmodelle der VDI-Richtlinien 2221 und 2206, die für viele Ansätze die Grundlage bilden.¹⁸¹ Zusätzlich wird auf das Münchener Vorgehensmodell eingegangen, welches einen deutlich verschiedenen Ansatz verfolgt. Diese werden nachfolgend exemplarisch beschrieben um Gemeinsamkeiten aufzuzeigen und die Basis für die Methode dieser Arbeit zu bilden.

¹⁶⁷ Methode: Beschreibung eines planmäßigen Vorgehens zum Erreichen eines bestimmten Ziels

¹⁶⁸ Methodik: Beschreibung eines Vorgehens unter Einschluss mehrerer Methoden und Hilfsmittel

¹⁶⁹ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 10; Ehrlenspiel/Meerkamm 2013, S. 748

¹⁷⁰ Vgl.: Lindemann 2009, S. 33;

¹⁷¹ Vgl.: Kläger 1993, S. 31

¹⁷² Vgl.: Braun 2005, S. 29; Lindemann 2009, S. 39; Pahl et al. 2007, S. 23-28

¹⁷³ Miller/Galanter/Přibram 1991

¹⁷⁴ Wulf 2002

¹⁷⁵ Haberfellner 2012

¹⁷⁶ Ehrlenspiel/Meerkamm 2013

¹⁷⁷ Lindemann 2009

¹⁷⁸ Verein Deutscher Ingenieure 1993

¹⁷⁹ Feldhusen/Grote 2013

¹⁸⁰ Verein Deutscher Ingenieure 2004

¹⁸¹ Vgl.: Wulf 2002, S. 11

Die VDI-Richtlinie 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“¹⁸² stellt ein allgemeingültiges Vorgehen als sequentielle Abfolge vor. Der Ansatz unterscheidet sieben Arbeitsschritte die jeweils mit definierten Dokumenten oder Produkten abgeschlossen werden. Dabei bezieht sich die in Abb. 2-14 dargestellte Methode auf mechanische bzw. maschinenbauliche Produkte. Trotz der vorgeschlagenen Sequenz wird explizit die Möglichkeit von Iterationen erwähnt, sodass die Prozessschritte mit unterschiedlichem Detailgrad bearbeitet werden können. Grundsätzlich wird nach dem Klären der Aufgabenstellung und Ausarbeiten einer Anforderungsliste zunächst die Funktionsstruktur ermittelt. Im Anschluss werden prinzipielle Lösungen entwickelt, die wiederum in realisierbare Module unterteilt werden. Mit den maßgebenden Modulen werden Vorentwürfe ausgearbeitet, welche im nächsten Arbeitsschritt zu einem Gesamtentwurf weiter ausgestaltet werden. Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess schließt mit der Ausarbeitung von Ausführungs- und Nutzungsangaben ab.

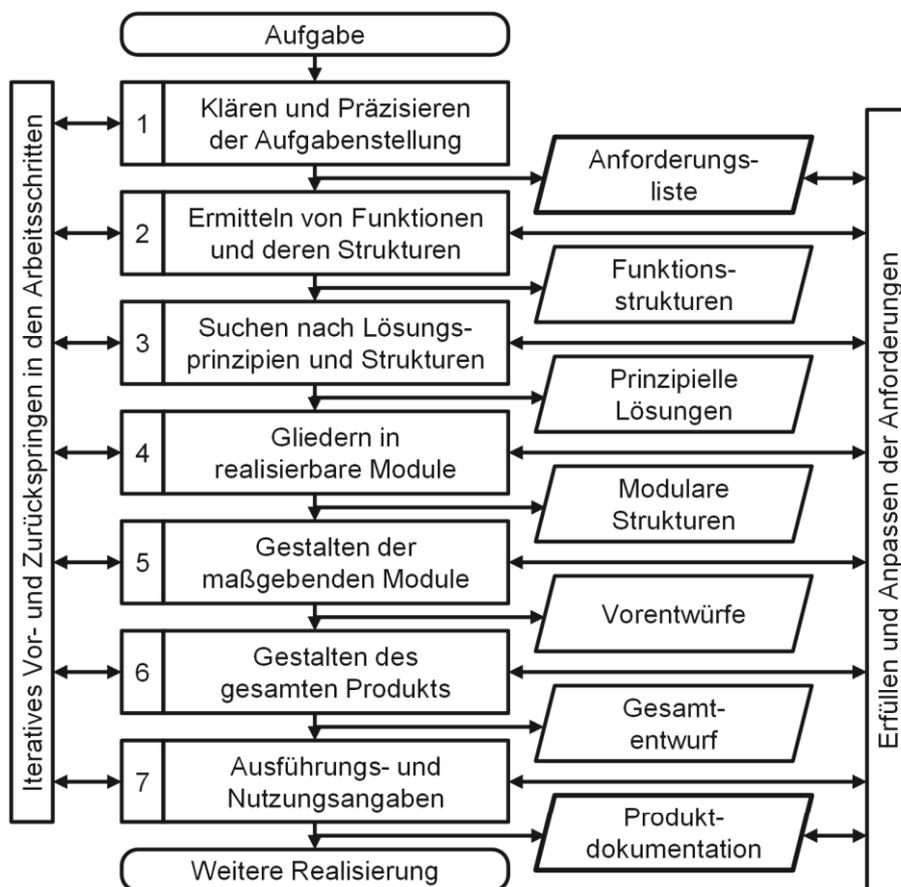


Abb. 2-14: Arbeitsschritte nach VDI-Richtlinie 2221¹⁸³

Aufbauend auf der VDI-Richtlinie 2221 wurden im Braunschweiger Konstruktionsmethodik-Vorgehen weitreichende Erweiterungen vorgenommen, die in fünf Phasen des Modells

¹⁸² Verein Deutscher Ingenieure 1993

¹⁸³ Verein Deutscher Ingenieure 1993, S. 9; Wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e.V.

Expertenwissen in den Prozess einbeziehen. Der gesamte Ablauf des Modells ist in Abb. 2-15 dargestellt und umfasst sechs Arbeitsschritte, die durch zylinderförmige Wissensspeicher unterstützt werden. Die Arbeitsschritte werden jeweils nach Abschluss einer Beurteilung unterzogen und erhalten dadurch einen iterativen Charakter.

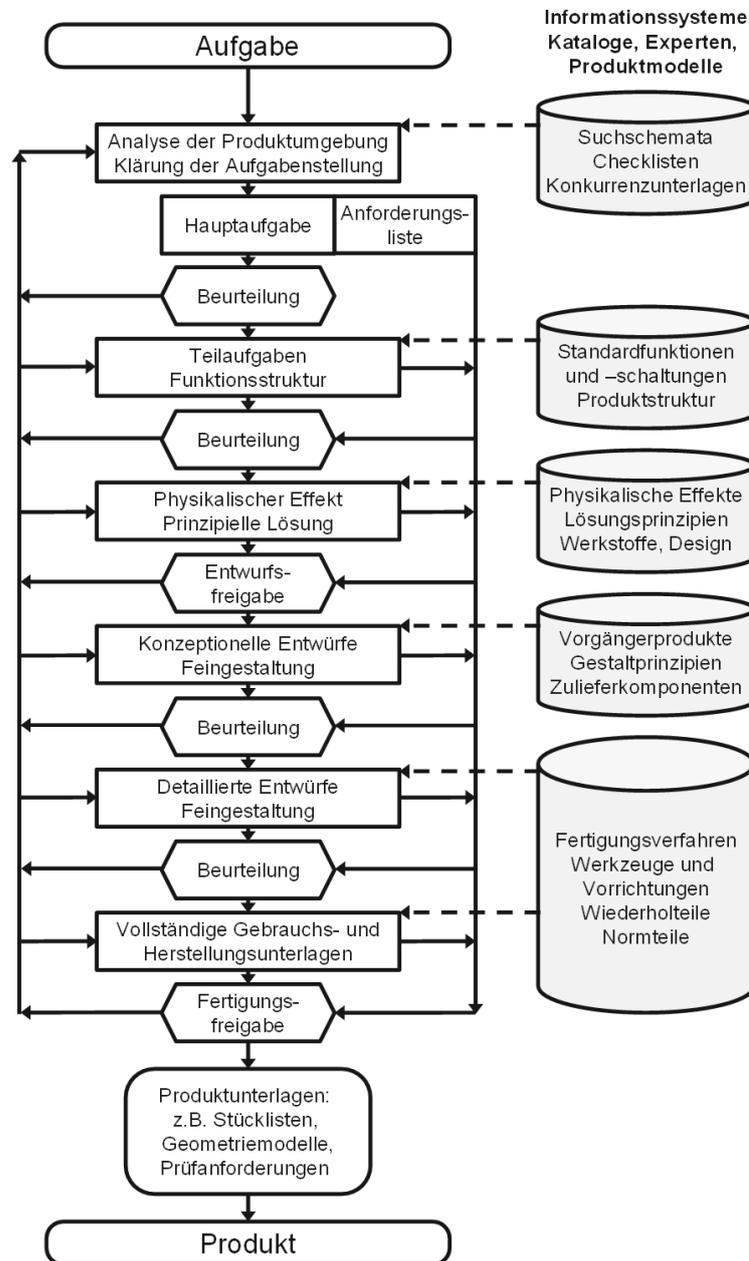


Abb. 2-15: Braunschweiger Konstruktionsmethodik-Modell¹⁸⁴

Während der Aufgabenklärungsphase werden beispielsweise Konkurrenzunterlagen und Schutzrechte einbezogen, um die Hauptaufgabe einschließlich einer Anforderungsliste zu definieren, die als Dokument den Prozess ebenfalls iterativ begleitet. In der prinzipiellen

¹⁸⁴ Abbildung angelehnt an Heinemann 2015, S. 18

Phase werden die Aufgaben in Teilaufgaben unterteilt und in Prinziplösungen überführt. Dies erfolgt unter Zuhilfenahme beispielsweise von Standardfunktionen und physikalischen Effekten. Mit Erteilung der Entwurfsfreigabe wird innerhalb der gestaltenden Phase zunächst die Grobgestaltung mit Vorgängerprodukten und Gestaltungsprinzipien unterstützt, um dann die Feingestaltung mit z.B. Fertigungsverfahren und Wiederholteilen umzusetzen. Die Produkte werden dabei nicht wie in der VDI-Richtlinie explizit in Module unterteilt. In der abschließenden Ausarbeitungsphase wird die Fertigungsfreigabe über die Erstellung vollständiger Gebrauchs- und Herstellungsunterlagen erwirkt. Das Braunschweiger Konstruktionsmethodik-Modell bildet durch die weitreichende Anwendung von Expertenwissen eine wichtige Grundlage für die nutzerorientierte Entwicklungsmethodik dieser Arbeit.

Im Gegensatz zu den vorangehenden Modellen gibt das Münchener Vorgehensmodell¹⁸⁵ keine Sequenz für die Arbeitsschritte vor. Bei der Entwicklung des Modells wurde darauf geachtet eine weitreichende Kompatibilität zu bestehenden Vorgehensmodellen der Problemlösung sicherzustellen. Daher werden die drei Hauptschritte Ziel und Problem klären, Lösungsalternativen generieren und Entscheidung herbeiführen zugrunde gelegt.

In der Methode wird ein Standardvorgehen mit den folgenden Schritten definiert:

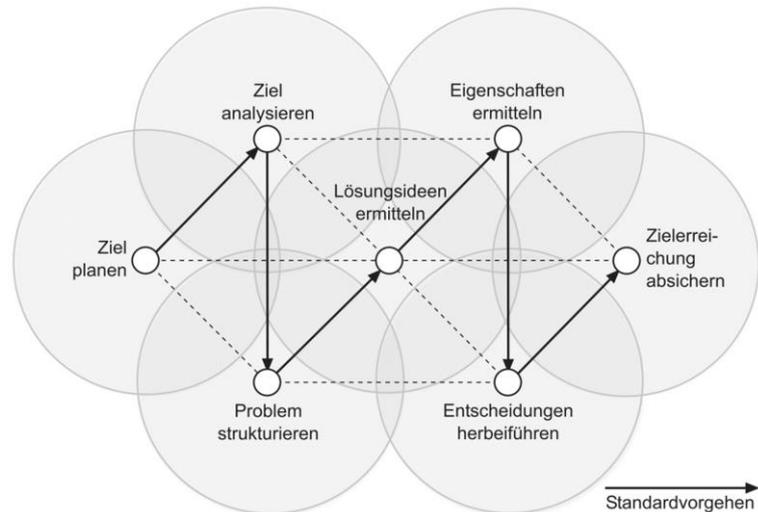
1. Ziel planen
2. Ziel analysieren
3. Problem strukturieren
4. Lösungsideen ermitteln
5. Eigenschaften ermitteln
6. Entscheidungen herbeiführen
7. Zielerreichung absichern

Jede andere Reihenfolge soll jedoch ebenfalls realisierbar sein, was in Abb. 2-16 grafisch dargestellt wird. Einzelne Schritte können dabei mehrfach durchlaufen oder ausgelassen werden. Die Darstellung wurde in Form eines Netzwerks mit sich teilweise überschneidenden Kreisen gewählt, da die einzelnen Elemente nicht immer eindeutig voneinander abgrenzbar sind. Ein besonderer Fokus der Methode liegt außerdem auf den nötigen Entscheidungen während des Prozesses sowie deren Konsequenzen für die Zielerreichung.

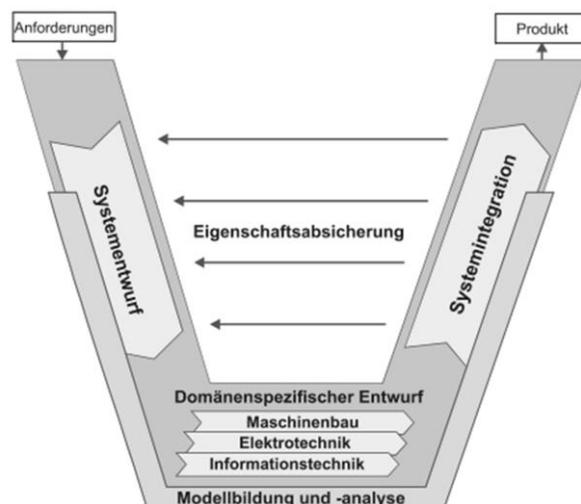
Im Vergleich deutlich spezifischer ist die VDI-Richtlinie 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme,¹⁸⁶ welche explizit auf das Zusammenspiel maschinenbaulicher, elektrotechnischer und informationstechnischer Entwicklungen eingeht. Das Vorgehen wird als ein sogenanntes V-Modell mehrerer Makrozyklen dargestellt, wobei die Detailtiefe in den aufeinanderfolgenden Makrozyklen zunimmt. Ein einzelner Makrozyklus des V-Modells beschreibt dabei das generische Vorgehen wie in Abb. 2-17 schematisch dargestellt.

¹⁸⁵ Vgl.: Lindemann 2009, S. 46

¹⁸⁶ Vgl.: Verein Deutscher Ingenieure 2004

Abb. 2-16: Münchener Vorgehensmodell¹⁸⁷

Innerhalb eines Makrozyklus werden die Anforderungen als Ausgangspunkt für die Entwicklung gesehen. Begonnen wird mit einem domänenübergreifenden Systementwurf mit Lösungskonzepten und Wirkungsweisen sowie anschließenden domänenspezifischen Entwürfen. Diese werden in der Systemintegration wieder zusammengeführt um deren gemeinsame Funktionalität analysieren zu können. Der Entwicklungsfortschritt wird fortlaufend anhand der Anforderungen überprüft und die Eigenschaften abgesichert. Der gesamte Prozess wird durch Modelle und Simulationen unterstützt. Am Ende eines Zyklus steht das Produkt als Ergebnis. Dieses ist jedoch nicht nach jedem Zyklus ein reales Erzeugnis sondern zeigt eine steigende Produktreife wie beispielsweise Labormuster, Funktionsmuster, Prototypen etc.

Abb. 2-17: V-Modell als Makrozyklus in der VDI 2206¹⁸⁸

¹⁸⁷ Lindemann 2009, S. 51; Wiedergegeben mit Erlaubnis des Springer-Verlags

Die vorgestellten Vorgehensmodelle zeigen trotz teilweise stark unterschiedlicher Terminologie und Zuordnung der Tätigkeiten in verschiedene Phasen in weiten Bereichen inhaltlich große Übereinstimmung in folgenden relevanten Gesichtspunkten:¹⁸⁹

- **Aufgabenstellung:** Die Ansätze abstrahieren die Aufgabenstellung möglichst lösungsneutral. Dabei wird der funktionale Gesamtzusammenhang über Teilfunktionen abgebildet.
- **Physikalische Sachverhalte:** Die Vorgehensweisen setzen einen großen Fokus auf die Beschreibung der physikalischen Sachverhalte als ersten Konkretisierungsschritt. Dabei sind generell Energie-, Materie- und Informationsumsätze zu beschreiben.¹⁹⁰
- **Lösungsfindung:** Vorliegende oder abgeleitete Produkthanforderungen sind Parameter bei der Lösungsfindung und begleiten den Prozess.
- **Einschränkung des Lösungsraums:** Eine frühzeitige Einschränkung des Lösungsspektrums wird generell als notwendig betrachtet. Dies geschieht durch eine konsequente Übersetzung von Anforderungen in Bewertungskriterien.
- **Dynamik der Anforderungen:** Während des Produktentwicklungsprozesses können die Anforderungen ergänzt bzw. aktualisiert werden. Ebenso sollen diese Produkthanforderungen eine zielgerichtete Einflussnahme auf die Lösungsprozesse ermöglichen. Eine logische Struktur und Aufbereitung ist damit sehr wichtig.

Allgemeingültige Vorgehensmodelle werden bei einer Anwendung auf spezifische Probleme angepasst und durch die Auswahl von konkreten Werkzeugen und Hilfsmitteln in eine Methodik überführt. Bei einer bereits verfügbaren Methodik für das spezifische Problem wird dieser Anpassungsschritt nicht benötigt.

Für den Bereich des Maschinenbaus sind Konstruktionsprozesse generell in die Phasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten unterteilbar. Diese Arbeit setzt ihren Fokus auf die ersten beiden Phasen, welche im Anschluss kurz beschrieben werden.

Die Produktplanung dient der systematischen Suche und Auswahl zukunfts-trächtiger Produktideen vor dem Hintergrund einer langfristigen Existenzsicherung von Wirtschaftsunternehmen. Diese sind entsprechend der Unternehmensziele, der vorhandenen Potentiale im Unternehmen, der Marktpotentiale sowie der Umwelteinflüsse zu bewerten.

¹⁸⁸ Verein Deutscher Ingenieure 2004, S. 29; Wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e.V.

¹⁸⁹ Vgl.: Kläger 1993, S. 36

¹⁹⁰ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 41

Ergebnisse der Planungsphase sind Entwicklungsaufträge oder –vorschläge, die folgende Angaben enthalten sollten:¹⁹¹

- Produktbeschreibung
- Technische Anforderungen
- Wirtschaftliche Anforderungen
- Zulässiger Entwicklungsaufwand
- Termine
- Kosten

Das Konzipieren der Produkte beginnt nach dem Entwicklungsauftrag mit dem Klären der Aufgabenstellung in Form einer strukturierten Anforderungsliste. Dazu werden konkrete Ziele, Ein- und Ausgangsgrößen sowie lösungsrelevante Randbedingungen definiert. Um die Lösungsalternativen später beurteilen zu können, sollten die Anforderungen in folgende Kategorien priorisiert werden:¹⁹²

- Festanforderungen, müssen von jeder Lösung erfüllt werden.
- Mindestanforderungen, können/müssen nach der günstigen Seite über- oder unterschritten werden. Diese Anforderungsart ist bewertbar.
- Wünsche, sind eventuell mit begrenztem Mehraufwand zu berücksichtigen und fließen ebenfalls in eine Bewertung ein.

Zum Finden bestmöglicher Lösungen und um eine Lösungsvorfixierung zu vermeiden, wird zu Beginn der Lösungssuche die Aufgabe auf das Wesentliche reduziert und die Gesamtfunktion in Teilfunktionen geringer Komplexität zerlegt. Der funktionale Gesamtzusammenhang in weitgehend lösungsneutraler Form wird in der sogenannten Funktionsstruktur durch eine Verknüpfung der Teilfunktionen mit Energie-, Material- oder Informationsflüssen dargestellt.¹⁹³

Die Entwicklung prinzipieller Lösungen für die Gesamtfunktion wird im Folgenden sukzessive durch die Suche und Zuordnung geeigneter physikalischer Wirkprinzipien zu einzelnen Funktionen konkretisiert. Die zugeordneten Wirkprinzipien werden zu Konzepten zusammengefasst und im Anschluss über Entscheidungsfindungsverfahren bewertet. Die ausgewählten Konzepte werden im Entwurf weiter konkretisiert.

2.2.2 Anforderungsanalyse

Wie bereits zuvor erwähnt ist das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung der erste und wichtigste Schritt zur Entwicklung und Konstruktion eines Produkts. Dies gilt insbesondere für komplexe Innovationen und Systeme, da eine unvollständige Anforderungserfassung

¹⁹¹ Vgl.: Kläger 1993, S. 33; Verein Deutscher Ingenieure 1980

¹⁹² Vgl.: Verein Deutscher Ingenieure 1997, S. 15

¹⁹³ Vgl.: Kläger 1993, S. 34

meist schwere und kosten-intensive Konsequenzen zur Folge hat.¹⁹⁴ Produktentwicklungsaufgaben beinhalten neben den konkret vorgegebenen und produktspezifischen Anforderungen typischerweise weitere, nur implizit vorhandene Anforderungen und Rahmenbedingungen, wie beispielsweise Norm-, Zoll-, Transport- oder ergonomische Kriterien. Um eine Aufgabe technisch und wirtschaftlich optimal zu lösen, muss als Grundvoraussetzung die Gesamtheit dieser Anforderungen und Randbedingungen von den Produktentwicklern vollständig erfasst und eindeutig geklärt werden. Nach erfolgtem Klärungsprozess und einer Konkretisierung der Aufgabenstellung wird dementsprechend als Ergebnis der Produktplanung nach Pahl/Beitz eine, meist vorläufige, Anforderungsliste erstellt.¹⁹⁵ Dabei werden Anforderungen nach Kickermann wie folgt definiert: „Eine Vorgabe, deren Erfüllung den zielgerichteten Verlauf des jeweiligen Konstruktionsprozesses steuert und/oder Eigenschaften des betreffenden Produktes bestimmt“.¹⁹⁶

Im Rahmen des Konzeptentwicklungsprozesses haben die hergeleiteten Anforderungen eine besonders wichtige Rolle. Zunächst dienen diese der Lösungsfindung und Einschränkung des verfügbaren Lösungsraums. Zusätzlich hängt ebenfalls die Qualität der späteren Konzeptbewertung in entscheidendem Maße von der Auswahl der Bewertungskriterien ab, die aus den Anforderungen hergeleitet werden sollen.¹⁹⁷

Besondere Herausforderung bei der umfänglichen Klärung von Konstruktionsaufgaben ist die Unkenntnis über die Gesamtheit der Systeme, die mit dem Produkt in Beziehung treten sowie die Art der Beziehung. Zielsetzungen und Kerninhalte aller Methoden zur Konkretisierung der Produkteigenschaften sind demzufolge systematische Betrachtungen des Produktumfeldes unter Berücksichtigung aller lösungsrelevanter Bereiche, um ein möglichst umfassendes und weitgehend vollständiges Spektrum von Produkthanforderungen ableiten zu können. Vor dem Hintergrund, dass nachträgliche Änderungen und Ergänzungen bestehender Konstruktionen in der Praxis häufig aus einer nicht ausreichend geklärten Aufgabenstellung entstehen, ist der Erstellung der Produkthanforderungsliste größte Sorgfalt zu widmen.¹⁹⁸ Zunächst wird im Folgenden auf die Anforderungsliste als Instrument eingegangen und nachfolgend die wichtigsten Hilfsmittel und Methoden zu deren Erstellung beschrieben.

2.2.2.1 Produkthanforderungslisten

Die Anforderungsliste dokumentiert die Anforderungen zur Entwicklung eines Produkts. Während der Entwicklung führen neue Erkenntnisse zur Überarbeitung und Ergänzung der Anforderungen, sodass die Liste bis zum Abschluss der Entwicklungsarbeiten ein dynamisches Dokument bleibt.¹⁹⁹ Darin enthalten sind qualitative und quantitative Informationen, die geforderte oder unerwünschte Eigenschaften des Produkts beschreiben.

¹⁹⁴ Vgl.: Verein Deutscher Ingenieure 1997, S. 12

¹⁹⁵ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 94; Feldhusen/Grote 2013, S. 213

¹⁹⁶ Kickermann 1995, S. 23

¹⁹⁷ Vgl.: Breiing/Knosala 1997, S. 14

¹⁹⁸ Vgl.: Kläger 1993, S. 52-53

¹⁹⁹ Vgl.: Feldhusen/Grote 2013, S. 321

Die Anforderungen sollten dabei lösungsneutral, positiv formuliert und eindeutig sein.²⁰⁰ Der Konkretisierungsgrad einer Anforderung ist dabei unterschiedlich. Kläger führt in diesem Zusammenhang die Begriffe Zwischenanforderungen²⁰¹ und Elementaranforderungen, die sich nicht weiter konkretisieren lassen, ein.²⁰² Die Konzeptentwicklung von Antriebsstrangtopologien benötigt unterschiedliche Detailtiefen für verschiedene Elemente. Dementsprechend kommen beide Arten der Anforderungen in dieser Arbeit zum Einsatz und werden je nach Notwendigkeit kombiniert.

Nach Pahl/Beitz ist bei der Erstellung der Anforderungsliste ein zweistufiges Vorgehen erkennbar. In der ersten Stufe werden die Anforderungen definiert. Diese Anforderungen werden in der zweiten Stufe mit Hilfe spezieller Methoden ergänzt und weiter spezifiziert. Das übergeordnete Vorgehen ist in Abb. 2-18 dargestellt.

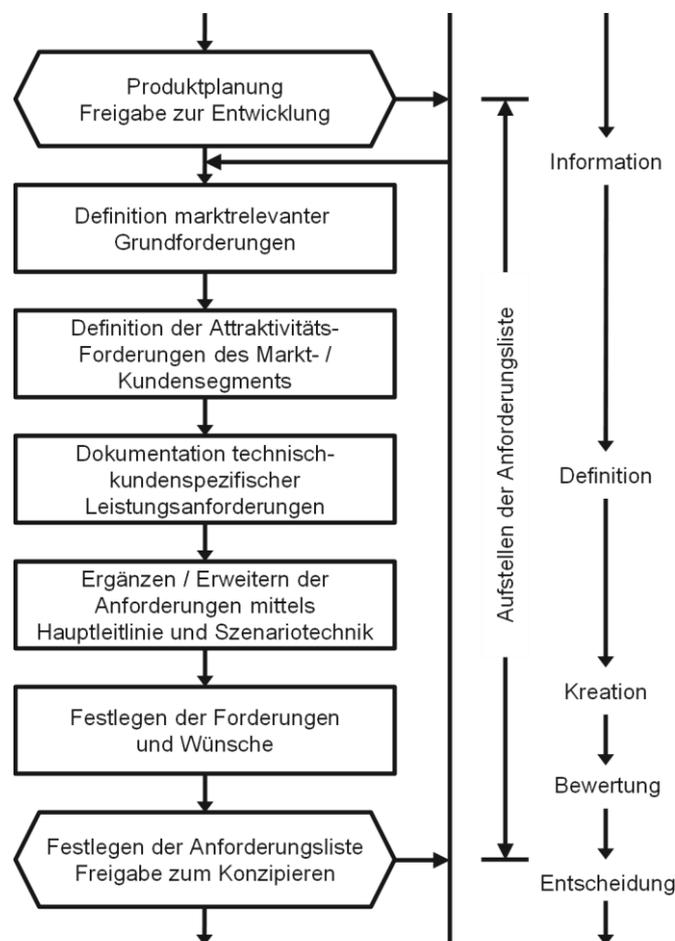


Abb. 2-18: Hauptarbeitsschritte zum Erstellen der Anforderungsliste²⁰³

²⁰⁰ Vgl.: Lindemann 2009, S. 109

²⁰¹ Zwischenanforderungen setzen sich aus mehreren Elementaranforderungen zusammen.

²⁰² Vgl.: Kläger 1993, S. 122

²⁰³ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 214; Wiedergegeben mit Erlaubnis des Springer-Verlags

Dabei werden drei grundlegende Arten der Anforderungen hinsichtlich ihrer Kommunikation unterschieden:²⁰⁴

- Grundlegende Anforderungen der Kunden werden als implizite Anforderungen nicht kommuniziert, sondern als selbstverständlich betrachtet. Sie haben für den Kunden die höchste Bedeutung und entscheiden somit über den Erfolg eines Produkts.
- Technisch-kundenspezifische Anforderungen sind explizite Anforderungen, die von den Kunden genau spezifiziert werden. Durch den konkreten Charakter können diese Angaben vom Kunden mit Konkurrenzprodukten verglichen werden.
- Attraktivitätsanforderungen sind ebenfalls implizite Anforderungen, die durch den Kunden nicht durch einen höheren Preis honoriert werden, sich aber gut zur Differenzierung von Wettbewerbern eignen.

Nachdem alle Arten der Anforderungen formuliert wurden, werden sie im Zusammenhang mit Energie-, Stoff- und Signalumsatz ergänzt und erweitert. Dies sollte zu einer Spezifizierung der Angaben führen.

Forderungen und Wünsche werden ebenfalls in die Anforderungsliste aufgenommen. In der Formulierung wird dabei erkenntlich, wie sich ihr Gewicht im Gesamtzusammenhang darstellt.

2.2.2.2 Methoden zur Anforderungsbestimmung

Entsprechend der vorherigen Beschreibung besitzt die Produkthanforderungsliste einen steuernden Charakter, sowohl für Lösungsfindungsprozesse als auch für Bewertungsmethoden im Rahmen der Produktentwicklung. Um einen Produktentwicklungsprozess durchführen zu können, müssen demnach alle Anforderungen zu Beginn der Entwicklung eindeutig spezifiziert werden. Die Literatur beschreibt dabei verschiedene Vorgehensweisen zur Ausarbeitung und Formulierung der Anforderungen. Diese unterscheiden sich deutlich im Grad der Strukturiertheit und zu betreibendem Aufwand. Die folgende Auflistung ist nach steigendem Arbeitsaufwand geordnet:²⁰⁵

- Produktfragelisten
- Assoziationslisten
- Methode der Analyse der Produktumgebung
- Methode der Analyse der Lebenslaufphasen

Entsprechend der Aspekte geplanter Entwicklungsaufwand, Komplexität der Aufgabe, angestrebter Vollständigkeitsgrad der Klärung und Neuheitsgrad der Aufgabe bzw. Konstruktionsart wird eine oder eine Kombination verschiedener Methoden ausgewählt.

²⁰⁴ Vgl.: Pahl et al. 2007, S.218-220; Kramer/Kramer 1997

²⁰⁵ Vgl.: Kläger 1993, S. 53-62

Produktfragelisten: Den geringsten Aufwand zur Erstellung von Anforderungslisten bieten Produktfragelisten oder schematische Frageschablonen als alleinige Hilfsmittel zur Klärung der Entwicklungsaufgabe. Sie sind begrenzt auf einen Umfang von 10 bis maximal 20 Fragen. Dabei wird ein Fokus auf Zweck und Eigenschaften der Lösung gesetzt um den Kern der Aufgabe zu spezifizieren. Weiterhin wird erfragt wie das Produkt mit welchen Dingen in Beziehung steht und welche Art und Auswirkung diese Beziehung hat. Durch eine spezifische Ausrichtung der Fragen auf einen Anwendungsbereich oder eine Problemstellung kann die Anwendung von Produktfragelisten sehr effizient hinsichtlich des Zeit-, Arbeits- und Ressourcenaufwands sein. Dennoch müssen die Fragelisten stets aktuell gehalten werden. In der Praxis kommt das Hilfsmittel meist nur bei einer Kurz- oder Grobanalyse zum Einsatz, wenn eine detaillierte und umfassende Analyse nicht umsetzbar ist.

Assoziationslisten: Eine Weiterentwicklung des spezifischen Ansatzes sind Assoziationslisten als einfach handhabbares Hilfsmittel zur Klärung der Konstruktionsaufgaben. Ziel dieser systemorientierten Betrachtung ist die Ableitung einer möglichst umfangreichen Sammlung von Struktur- und Verhaltenseigenschaften technischer Systeme. Dieses Hilfsmittel wird in der Literatur unter verschiedenen Bezeichnungen geführt, wie beispielsweise Leitblätter, Eigenschaftslisten, Eigenschaftsschemata oder Merkmallisten.²⁰⁶

Eine umfangreiche Zusammenstellung technischer Eigenschaften ist in der VDI-Richtlinie 2225²⁰⁷ zusammengestellt und baut auf einer Publikation von Hubka auf. Die Eigenschaften werden in seinem Ansatz in die folgenden zwölf Hauptkategorien unterteilt, wobei für Konstruktionseigenschaften zusätzlich acht Unterkategorien unterschieden werden:²⁰⁸

1. Wirkungen, Funktionen
2. Wirkungsbedingte, funktionsbedingte Eigenschaften
3. Betriebseigenschaften des Maschinensystems
4. Ergonomische Eigenschaften
5. Eigenschaften zur äußeren Erscheinung
6. Distributionseigenschaften
7. Lieferungs- und Planungseigenschaften
8. Eigenschaften der Gesetzeseinhaltung
9. Fertigungseigenschaften des Maschinensystems
10. Konstruktionseigenschaften
11. Wirtschaftliche Eigenschaften
12. Herstellungseigenschaften / Qualität der Fertigung

²⁰⁶ Vgl.: Kläger 1993, S. 55

²⁰⁷ Vgl.: Verein Deutscher Ingenieure 1998

²⁰⁸ Vgl.: Hubka 1984, S. 103-132

Pahl/Beitz definieren in allgemeingültigen Leitblättern 17 Hauptmerkmale für Produkte, die sich mit den dargestellten Kategorien inhaltlich weitestgehend decken.²⁰⁹ Die erarbeiteten Anforderungen mit Assoziationslisten sind zum großen Teil noch unspezifisch und können nicht unmittelbar in Produktparameter umgesetzt werden. Kramer schlägt zur weiteren Spezifizierung ein dreistufiges Verfahren vor, welches die Aussage zunächst vertieft und anschließend präzisiert. Die Ergebnisse werden dann in der Anforderungsliste dokumentiert.²¹⁰

Insgesamt haben Assoziationslisten einen Anspruch auf Allgemeingültigkeit und dadurch ein breites und anwendungsunabhängiges Einsatzspektrum. Assoziationslisten geben jedoch keine methodisch-formale Vorgehensweise vor, die systematisch alle relevanten Entwicklungsgesichtspunkte berücksichtigt.

Methode der Analyse der Produktumgebung: In der Methode der Analyse der Produktumgebung wird die Erstellung von Anforderungslisten auf Basis einer wirkungsbezogenen Betrachtung der sogenannten Umgebungssysteme eines Produktes durchgeführt. Dabei wirken die Umgebungssysteme als Hilfestellung zur Identifikation und Analyse anforderungsrelevanter Bereiche. Das Produkt wird bei der Methode im Gebrauchszustand betrachtet. Folgende Umgebungssysteme werden unterschieden:²¹¹

- Passive Wirksysteme²¹²
- Aktive Wirksysteme²¹³
- Befehls- oder Steuerungssysteme
- Wirkungsort
- Abstellplatz und Transportsystem
- Wartungssystem

Nach deren Definition werden die Umgebungssysteme zunächst separat betrachtet und zur Entwicklung der Anforderungen mit allgemeinen Hauptfragen²¹⁴ untersucht. Im Anschluss werden die Hauptfragen im Verlauf einer strukturierten und allgemein anwendbaren Analyse in aufbauende Einzelfragen aufgeteilt, um die nötige Informations-Detailtiefe zur Formulierung der Anforderungen zu erhalten. Durch die Verallgemeinerungen ist die Beschreibung spezifischer und detaillierter Zusammenhänge nur beschränkt möglich. Weiterhin wird in der Methode nur das Produkt im Betrieb beschrieben.²¹⁵

Methode der Analyse der Lebenslaufphasen: Eine sehr weit systematisierte und umfassende Methode zur Klärung der Aufgabenstellung im Konstruktionsprozess ist die Methode der Analyse der Lebenslaufphasen. Dabei wird auf die gesamte Produktumgebung,

²⁰⁹ Vgl.: Feldhusen/Grote 2013, S. 488

²¹⁰ Vgl.: Kramer/Kramer 1997

²¹¹ Vgl.: Kläger 1993, S. 57

²¹² Das Produkt wirkt auf das passive Wirksystem

²¹³ Das aktive Wirksystem wirkt auf das Produkt

²¹⁴ Vier Hauptfragen: Wer, was, wann, wo?

²¹⁵ Vgl.: Roth 2000, S. 68

also sämtliche Systemen, die mit dem Gesamtprodukt oder Teilen des Produkts in seinen Lebensphasen in Beziehung treten, eingegangen.²¹⁶

Für die gezielte Analyse wird die Produktumgebung systematisch in ausreichend kleine Teilbereiche zerlegt. Zur Unterstützung des Verfahrens dient ein Schema, welches die Lebensphasen eines Produkts und zu betrachtende Produktumgebungssysteme in Form einer sogenannten Suchmatrix gegenüberstellt. Dabei werden die Lebensphasen Herstellung, Verteilung, Verwendung und Liquidation systematisch untergliedert. Die Felder der Suchmatrix enthalten Begriffe, Stichworte und Anhaltspunkte als Grundgerüst für eine systematische Analyse. Zusätzlich unterstützen Checklisten den Anwender bei der Spezifizierung der Produktmerkmale. Die Suchmatrix kann dabei allgemein erweitert oder problemspezifisch angepasst werden. Checklisten werden einzelnen Suchfeldern oder Spalten zugewiesen, sodass irrelevante Aspekte vernachlässigt oder relevante Gesichtspunkte weiter differenziert werden können. Dabei wird die strukturelle und prinzipielle Allgemeingültigkeit der Suchmatrix nicht beeinträchtigt.²¹⁷

In Abhängigkeit wesentlicher Aspekte zur Klärung der Aufgabenstellung wie beispielsweise Umfang des geplanten Entwicklungsaufwands, Komplexität der Aufgabe, angestrebter Vollständigkeitsgrad der Klärung, Neuheitsgrad und Konstruktionsart können die verschiedenen Hilfsmittel entsprechend Abb. 2-19 eingestuft werden.

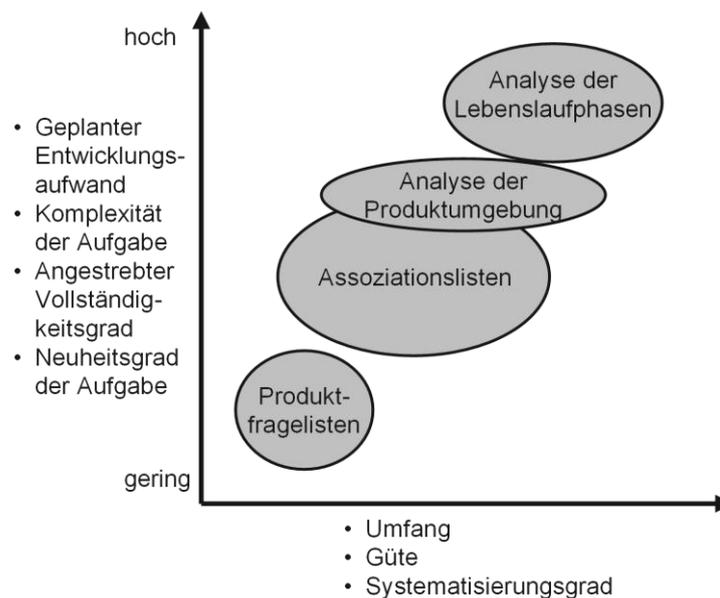


Abb. 2-19: Einstufung konstruktionsmethodischer Hilfsmittel in der Anforderungsanalyse²¹⁸

Die Methoden können außerdem kombiniert werden und somit Schwerpunkte auf relevante Bereiche während der Anforderungsanalyse setzen. Zusätzlich können Analogien zu

²¹⁶ Vgl.: Roth 2000, S. 69

²¹⁷ Vgl.: Kläger 1993, S. 61

²¹⁸ Abbildung angelehnt an Kläger 1993, S. 63

ähnlichen Produkten während des Entwicklungsprozesses aktiv genutzt werden, um die Vollständigkeit der Anforderungsliste sicherzustellen.²¹⁹

2.2.3 Konzeptentwicklung

Entsprechend dem typischen Vorgehen beim Entwickeln folgt auf das Klären der Aufgabenstellung die Konzeptphase.²²⁰ Ziel dieses Prozessschrittes ist die Festlegung einer prinzipiellen Lösung²²¹ durch das Abstrahieren auf wesentliche Merkmale, das Aufstellen von Funktionsstrukturen, die Suche geeigneter Wirkprinzipien und deren Kombination zu einer Wirkstruktur entsprechend Abb. 2-20. Begleitet wird das Vorgehen durch mehrere Bewertungs- und Auswahlprozesse.

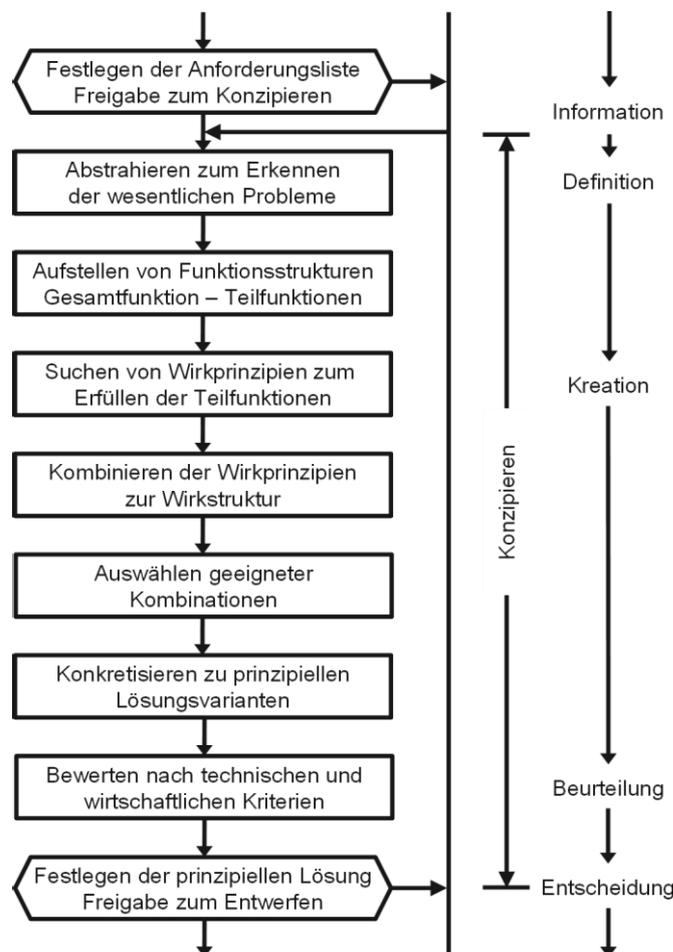


Abb. 2-20: Arbeitsschritte beim Konzipieren²²²

Zunächst wird das Problem auf das Wesentliche reduziert und allgemeingültig basierend auf der Anforderungsliste formuliert. Diese Gesamtfunktion wird bezogen auf den Energie-, Stoff-

²¹⁹ Vgl.: Proff et al. 2014, S. 18

²²⁰ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 198

²²¹ Vgl.: Verein Deutscher Ingenieure 1997, S. 6

²²² Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 232; Wiedergegeben mit Erlaubnis des Springer-Verlags

und/oder Signalumsatz²²³ mit Hilfe einer Blockdarstellung lösungsneutral erarbeitet sowie Eingangs- und Ausgangsgrößen angegeben. Häufig ist zielführend die Gesamtaufgabe in Teilfunktionen niedriger Komplexität zu zerlegen.²²⁴ Die Verknüpfung der einzelnen aufgabenspezifischen Teilfunktionen ergibt die Funktionsstruktur als Darstellung der Gesamtfunktion. Dies erleichtert die anschließende Lösungssuche und konkretisiert die angestrebte Funktion. Der zu betreibende Aufwand variiert dabei in der Praxis entsprechend des angestrebten Neuheitsgrads. Bei Neukonstruktionen wird als Ausgangspunkt tatsächlich die Anforderungsliste und die abstrakte Problemformulierung genutzt. Bei Anpassungskonstruktionen können bekannte Lösungen durch Analyse der Bauelemente als erste Ansätze zugrunde gelegt werden. Bei Baukastensystemen bestimmt die Funktionsstruktur maßgebend die einzelnen Module und deren Gliederung. Neben den Teilfunktionen werden dabei fertigungstechnische Rahmenbedingungen und Bauräume besonders relevant.²²⁵

Zur Umsetzung der Teilfunktionen werden Wirkprinzipien gesucht bzw. entwickelt.²²⁶ Generell existieren zur Lösungssuche verschiedene Methoden, welche in Kapitel 2.2.3.1 näher beschrieben werden. Zur Erfüllung der Gesamtfunktion werden die Wirkprinzipien durch Verknüpfen in eine Wirkstruktur zu Gesamtlösungen, den sogenannten prinzipiellen Lösungen, zusammengefügt. Dieser Verknüpfungsprozess wird Systemsynthese genannt und nutzt die aufgestellte Funktionsstruktur als Grundlage. Auch wenn sich mit den Methoden zur Lösungsfindung bereits Kombinationen ergeben, existieren ebenfalls spezielle Methoden zur systematischen Synthese. Grundsätzlich muss eine anschauliche und eindeutige Kombination von Wirkprinzipien unter Berücksichtigung der physikalischen, geometrischen und stofflichen Rahmenbedingungen durchgeführt werden. Zusätzlich sollten technisch und wirtschaftlich günstige Kombinationen aus dem Lösungsraum der möglichen Kombinationen bereits in dieser Phase identifiziert werden. Dies führt gegebenenfalls zu mehreren Auswahlprozessen und aufgabenspezifischen Konkretisierungen der prinzipiellen Lösungen. Aussichtsreiche Wirkstrukturen werden soweit konkretisiert, dass sie technisch und wirtschaftlich bewertet werden können.²²⁷ Somit ist zielführend, bereits während der Konkretisierung die späteren Bewertungskriterien zur zielgerichteten Informationsbereitstellung zu prüfen.²²⁸ Roth unterscheidet mehrere Vorgehensstrategien in der Produktentwicklung, in denen Prozessschritte teilweise gemeinsam durchgeführt werden. Dies kann insbesondere bei bereits festgelegten Komponenten und Architekturen zielführend sein.²²⁹

In der vorliegenden Arbeit werden Antriebsstrangarchitekturen entwickelt, in denen Funktionen mit Hilfe mehrerer Technologieoptionen umgesetzt werden können. Produktarchitekturen vereinen die Funktionsstruktur, die Produktstruktur sowie die Transformationsbeziehung zwischen beiden Strukturen, was entsprechend Abb. 2-21 in

²²³ Vgl.: Verein Deutscher Ingenieure 1997, S. 16

²²⁴ Vgl.: Ponn/Lindemann 2011, S. 66

²²⁵ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 231-256

²²⁶ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 44

²²⁷ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 159

²²⁸ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 256-267

²²⁹ Vgl.: Roth 2000, S. 47-49

einer sogenannten METUS-Raute dargestellt werden kann.²³⁰ Zusätzlich weisen die Architekturen einen modularen Charakter auf, sodass funktional und physisch relativ unabhängige, abgeschlossene Einheiten, die sogenannten Module betrachtet werden.²³¹ Durch eine Modularisierung wird die Komplexität des Entwicklungsprozesses wirkungsvoll reduziert. Die Gesamtkomplexität des Produktes verteilt sich auf verschiedene Module, die jeweils relativ unabhängig voneinander entwickelt werden können. Beziehungen untereinander beschränken sich dabei auf wenige, eindeutige Schnittstellen.²³²

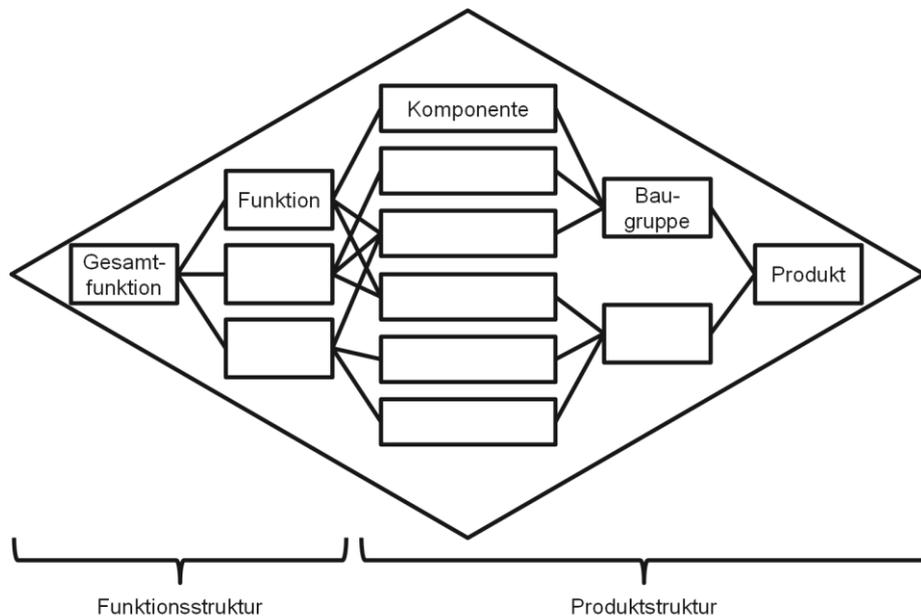


Abb. 2-21: Darstellung der Produktarchitektur in der METUS-Raute²³³

²³⁰ Vgl.: Feldhusen/Grote 2013, S. 252-277

²³¹ Vgl.: Göpfert 1998, S. 107-111

²³² Vgl.: Feldhusen/Grote 2013, S. 261

²³³ Vgl.: Feldhusen/Grote 2013, S. 257; Wiedergegeben mit Erlaubnis des Springer-Verlags

2.2.3.1 Methoden zur Lösungsfindung

Ein besonderer Vorteil der methodischen Produktentwicklung liegt im systematischen Erarbeiten einer Lösung. Von der Vielzahl verfügbarer Methoden werden in den Ingenieurwissenschaften besonders häufig die folgenden Methoden angewendet:²³⁴

- Analyse natürlicher und bekannter technischer Systeme
- Analogiebetrachtungen
- Messungen und Modellversuche
- Intuitiv betonte Methoden
- Theorie des erfinderischen Problemlösens - TRIZ²³⁵
- Lösungskombination
- Diskursiv betonte Methoden

Die Analyse natürlicher und bekannter technischer Systeme zählt zu den konventionellen Methoden und Hilfsmitteln. Unter den Begriffen Bionik oder Biomechanik werden Formen, Strukturen und Vorgänge aus der Natur analysiert, um zu neuartigen technischen Lösungen zu gelangen. Ebenso werden bereits ausgeführte Produkte untersucht, in Teilfunktionen untergliedert und in physikalische Effekte zerlegt, um neue Lösungsprinzipien zu entwickeln. Weiterhin ist nützlich, ein vorliegendes Problem oder eine Funktion auf ein analoges Problem zur Ermittlung von Systemeigenschaften und Lösungen zu übertragen. Experimente, Messungen und Modellversuche sind ebenfalls wichtige Informationsquellen eines Konstrukteurs zur Entwicklung neuer Produkte. Zusätzlich werden Lösungen zu anspruchsvollen Problemen vielfach intuitiv, d.h. durch einen guten Einfall, welcher anschließend korrigiert, überarbeitet und weiterentwickelt wird, erarbeitet. Zur Unterstützung existieren viele Kreativitätstechniken, wie z.B. das Brainstorming und die Delphi-Methode. Die Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ) legt das Hauptmerkmal der methodischen Produktentwicklung auf das Formulieren, Verstärken und Überwinden technischer und physikalischer Widersprüche und die Nutzung von Wissensspeichern. Grundlage bildet dabei die Analyse von Patenten und ermöglicht so eine gezielte Suche nach Lösungen.

Wie in den vorherigen Kapiteln bereits erwähnt, ist häufig zielführend Gesamtprobleme in Teilprobleme aufzuteilen, um die Komplexität zu reduzieren und so die zu lösenden Teilaufgaben abzuleiten. Zur Synthese der einzelnen Teillösungen existieren Methoden die eine anschauliche und eindeutige Kombination sicherstellen. Diskursiv betonte Methoden, unterstützen die Erarbeitung von Lösungen durch ein bewusst schrittweises Vorgehen. Dabei wird eine intuitive Problemlösung nicht ausgeschlossen, jedoch stärker zur Bearbeitung der einzelnen Schritte herangezogen. Beispielsweise können Konstruktionskataloge als Sammlung bekannter und bewährter Lösungen die Grundlage zur Bearbeitung darstellen. Eine weitere, sehr verbreitete diskursive Methode zur Lösungskombination in

²³⁴ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 121-150; Verein Deutscher Ingenieure 1997, S. 22-43; Ponn/Lindemann 2011, S. 94-99

²³⁵ Russische Abkürzung: Teorija Rezhnija Jzobretatelskich Zadach

komplexen Systemen ist die morphologische Analyse nach Zwicky,²³⁶ deren Vor- und Nachteile im folgenden Kapitel beschrieben werden. Sie gehört zu den systematischen Suchmethoden mit Hilfe von Ordnungsschemata und ist wegen ihrer besonderen Eignung zur Anwendung auf modularisierte Systeme die Grundlage der Entwicklungsmethodik dieser Arbeit.

2.2.3.2 Morphologische Analyse

Die morphologische Analyse nach Zwicky²³⁷ ist eine anerkannte Methode, verschiedene Teilfunktionen und Komponenten eines komplexen Gesamtsystems darzustellen und alternative Lösungen für die Gesamtfunktion eines Systems zu generieren.²³⁸ Die Arbeitsgrundlage der Methode ist der sogenannte morphologische Kasten, ein tabellarisches Schema, das in den Zeilen Teilfunktionen und die dazugehörigen Teillösungen repräsentiert.²³⁹ Die Gesamtheit aller Teillösungen, also die Menge aller Möglichkeiten, wird dabei als Lösungsraum bezeichnet.

Zum Erarbeiten der Gesamtlösung wird je eine Teillösung pro Zeile ausgewählt und alle Teillösungen grafisch miteinander verknüpft. Abb. 2-22 stellt schematisch die Kombination von zwei Gesamtlösungen dar. Die reine Kombination der Teilfunktionen führt bei größeren Lösungsräumen zu einer schwer überschaubaren Vielfalt alternativer Lösungsansätze. Entsprechend werden Maßnahmen benötigt, den Lösungsraum einzugrenzen und vorteilhafte Lösungsansätze zu identifizieren.²⁴⁰ Zusätzlich muss die Systemarchitektur berücksichtigt werden, wie zum Beispiel grobe, räumliche Anordnungen und die Verknüpfung der Teillösungen.

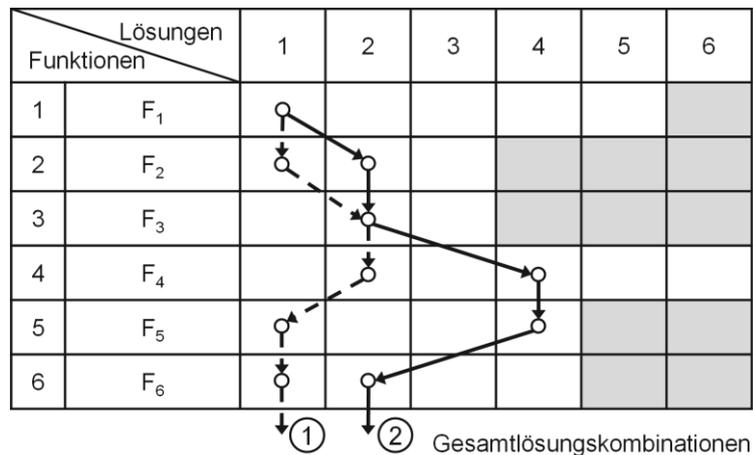


Abb. 2-22: Gesamtlösungskombinationen im morphologischen Kasten²⁴¹

²³⁶ Vgl.: Zwicky 1969

²³⁷ Vgl.: Zwicky 1969

²³⁸ Vgl.: Scheffczik 2003, S. 196; Ponn/Lindemann 2011, S. 115-119

²³⁹ Vgl.: Feldhusen/Grote 2013, S. 373

²⁴⁰ Vgl.: Ponn/Lindemann 2011, S. 114

²⁴¹ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 159; Wiedergegeben mit Erlaubnis des Springer-Verlags

Die Methode des morphologischen Kastens kann in verschiedenen Phasen der Produktentwicklung zur Lösungsfindung eingesetzt werden und ist nicht auf technische Probleme beschränkt.²⁴² Ziel der vorliegenden Arbeit ist ein strukturierter Prozess zur Entwicklung von Elektrifizierungskonzepten für Nutzfahrzeuge. Teilsysteme des Antriebs wie beispielsweise Ladesysteme, können in Strukturbäumen dargestellt werden.²⁴³ Für umfangreichere Systeme ist dieser Ansatz jedoch nicht geeignet. Die morphologische Analyse ist eine etablierte Methode zur Analyse und Lösungsfindung in komplexeren Systemen. So wurde sie u.a. auf konventionelle Pkw-Antriebe, Elektrofahrzeug-Ladeinfrastruktur-Geschäftsmodelle und Landmaschinen-Antriebstypologien bereits erfolgreich angewendet.²⁴⁴

2.2.3.3 Reduktion der Lösungsalternativen

Beim methodischen Vorgehen in der Produktentwicklung wird ein möglichst breiter Lösungsraum angestrebt. Wenn alle ordnenden Gesichtspunkte und Merkmale berücksichtigt werden, wird durch Kombination häufig eine große Anzahl an Lösungsmöglichkeiten generiert.²⁴⁵ Bei Kombinationsverfahren, wie dem morphologischen Kasten, kann schnell der sogenannte Effekt der großen Zahlen auftreten.²⁴⁶ Für den relativ einfachen Lösungsraum aus Abb. 2-22 ergeben sich bereits $N = 5 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 4 = 4\,320$ mögliche Gesamtlösungskombinationen. Das Kombinieren ist ein algorithmisches Vorgehen, welches neben geeigneten auch eine Vielzahl ungeeigneter oder nicht tragbarer Kombinationen erzeugt.²⁴⁷ Dementsprechend wird eine anschließende Beurteilung notwendig, wenn eine hohe Anzahl Varianten generiert wird und eine umfangreiche Bewertung wegen des hohen Aufwands noch nicht zweckmäßig erscheint.²⁴⁸ Einerseits ist anzustreben, alle ungeeigneten oder ersichtlich benachteiligten Varianten frühzeitig aus der Lösungsmenge auszuschließen. Andererseits ist darauf zu achten, dass geeignete Lösungen nicht entfallen, da häufig erst in der Kombination mit anderen Teillösungen eine vorteilhafte Wirkstruktur entsteht. Ein sicheres Vorgehen Fehlentscheidungen zu vermeiden existiert nicht, aber mit Hilfe eines strukturierten und nachprüfbaren Auswahlverfahrens ist die Entscheidungsfindung aus einer Fülle von Lösungsvorschlägen leichter zu bewältigen.

Aus der großen Fülle möglicher Lösungen werden anschließend die geeigneten und sinnvollen Lösungen ausgesucht. Zunächst sollte der morphologische Kasten mit seinen Teilfunktionen bereits bei der Erstellung nach Wichtigkeit geordnet werden, um Hauptfunktionen identifizierbar zu machen. Weiterhin ist hilfreich, einzelne Lösungsideen beispielsweise in mechanische, elektrische und hydraulische Lösungsklassen zusammenzufassen. Eine besondere Herausforderung bei systematischen Kombinationsverfahren ist die Prüfung, welche Lösungen miteinander verträglich sind. Damit wird der theoretische

²⁴² Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 160

²⁴³ Vgl.: Göhlich/Kunith/Ly 2014, S. 141; Göhring 1997, S. 6-21; Ponn/Lindemann 2011, S. 118

²⁴⁴ Vgl.: Naunheimer et al. 2007, S. 145; Mattes et al. 2011, S. 22; Thiebes 2012, S. 53

²⁴⁵ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 162

²⁴⁶ Vgl.: Roth 2000, S. 13

²⁴⁷ Vgl.: Ponn/Lindemann 2011, S. 118

²⁴⁸ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 164; Müller/Böckmann 2008, S. 86

Lösungsraum auf einen realisierbaren Lösungsraum beispielsweise mit Hilfe einer Verträglichkeitsmatrix eingeschränkt. Die Methode unterstützt in diesem Anwendungsfall einen systematischen und vollständigen Paarvergleich von Teillösungen im morphologischen Kasten. Eine Verträglichkeit bedeutet, dass die Elemente funktional, geometrisch, energetisch oder hinsichtlich der Anschlussbedingungen kombinierbar sind. Unverträglichkeiten führen zum Ausschluss einer Kombination.²⁴⁹

Die Lösungsalternativen sollten im Anschluss anhand der Kriterien Realisierbarkeit, Anforderungserfüllung, Aufwandsabschätzung und paarweiser Vergleich bei ähnlichen Konzepten geprüft werden. Dabei werden typischerweise Ausschlusskriterien qualitativ abgeschätzt.²⁵⁰ Somit werden geeignete Kombinationen identifiziert, die im Anschluss weiter konkretisiert werden können.

2.2.4 Entscheidungsfindung

Die geeigneten und konkretisierten Kombinationen als Lösungsvarianten werden untereinander sowie mit der konventionellen Referenzlösung verglichen und bewertet. Bei der Durchführung einer Bewertung sind unterschiedliche Dimensionen zu berücksichtigen, die durch neue Technologien beeinflusst werden können. Scheffczik schließt dafür in seinem Komponentenmodell der Technikbewertung beispielsweise die folgenden Dimensionen ein:²⁵¹

- Ethik
- Technik
- Naturwissenschaft / Mathematik / Logik
- Humanverträglichkeit
- Politik / Recht
- Sozialverträglichkeit
- Gesellschaftlich / kulturelle Verträglichkeit
- Ökonomie
- Ökologie

Diese sind ergänzt durch die Beziehungen zwischen den Dimensionen weitgehend deckungsgleich mit den Werten im technischen Handeln aus der VDI-Richtlinie 3780. Allgemeingültig und unabhängig von definierten Werten, zählt zu den Aufgaben der Technologiebewertung auch, die Argumente für und gegen bestimmte Technologien darzustellen und dabei auftretende Zielkonflikte zu verdeutlichen.²⁵²

In der Literatur existieren verschiedene Verfahren Technologien zu bewerten und den Grad der Erfüllung von Anforderungszielen zu beschreiben. Allen Verfahren gemein ist die

²⁴⁹ Vgl.: Ponn/Lindemann 2011, S. 120-121

²⁵⁰ Vgl.: Ponn/Lindemann 2011, S. 126-128; Feldhusen/Grote 2013; S. 162; Hubka 1984

²⁵¹ Vgl.: Scheffczik 2003, S. 86

²⁵² Vgl.: Verein Deutscher Ingenieure 2000, S. 12-25

Notwendigkeit eines gewissen Formalismus, damit die Bewertungsansätze und Ergebnisse nachvollziehbar und reproduzierbar dokumentiert werden können.²⁵³ Die Grundlage der Technologiebewertung in dieser Arbeit bilden drei in den Ingenieurwissenschaften und der Industrie sehr verbreitete Methoden: die Nutzwert-Analyse, die Total-Cost-of-Ownership-Analyse und die Lebenszyklusanalyse. In den folgenden Kapiteln werden die Verfahren beschrieben sowie deren Auswahl begründet.

2.2.4.1 Nutzwert-Analyse

Die Auswahl geeigneter Technologiekombinationen ist ein mehrdimensionales Entscheidungsproblem, das durch eine methodische Bewertung gelöst werden kann. In der Literatur werden mehrere Verfahren vorgeschlagen den Erfüllungsgrad von Anforderungszielen zu bestimmen. Sogenannte geschlossene Bewertungsverfahren beziehen dabei eine Kombination aus Gewichtungs- und Bewertungssystemen ein.²⁵⁴ Die verbreitetsten Methoden, die eine große Anzahl von Bewertungsgrößen berücksichtigen können, sind die Nutzwert-Analyse nach Zangemeister²⁵⁵ und die technisch-wirtschaftliche Bewertung der VDI-Richtlinie 2225²⁵⁶ nach Kesselring. Die Nutzwert-Analyse gilt im Vergleich als eindeutiger strukturiert sowie vorteilhaft im Umgang mit ungleichgewichteten Bewertungskriterien²⁵⁷ und soll deswegen als Grundlage der Entscheidungsfindung in dieser Arbeit dienen.

Die Nutzwert-Analyse ist ein mehrdimensionales Bewertungsverfahren, in dem sich eine große Anzahl Bewertungskriterien verarbeiten lassen. Dabei können sowohl quantitative und qualitative als auch monetäre und nichtmonetäre Aspekte einbezogen werden. Das Ziel des Verfahrens besteht in der Identifikation der Lösungsalternative mit dem größten Nutzen für einen Anwender mit festgelegter Zielvorstellung, häufig dargestellt in einem einheitlichen, dimensionslosen Maßstab.²⁵⁸

Im Verfahren wird als erster Schritt die Zielvorstellung der Bewertung aufgestellt, aus der die Bewertungskriterien herleitet werden. Solche Ziele ergeben sich für technische Aufgaben hauptsächlich aus der Anforderungsliste und allgemeinen Rahmenbedingungen. In der Nutzwertanalyse werden die Ziele in einem Zielsystem hierarchisch gegliedert, um die Bedeutung der Teilziele auf den Gesamtwert abschätzen zu können. Diese sogenannten Gewichtungsfaktoren w_i werden dem Zielsystem zugeordnet und werden beim Bewertungsschritt berücksichtigt. Abb. 2-23 zeigt beispielhaft ein dreistufiges Zielsystem mit zugehöriger Gewichtung.²⁵⁹

²⁵³ Vgl.: Kröll 2007, S. 23; Müller/Böckmann 2008, S. 83; Breiing/Knosala 1997, S. 227

²⁵⁴ Vgl.: Kröll 2007, S. 37-44; Pahl et al. 2007, S. 162-166 Breiing/Knosala 1997, S. 228

²⁵⁵ Vgl.: Zangemeister 1976; Kühnapfel 2014

²⁵⁶ Vgl.: Verein Deutscher Ingenieure 1998

²⁵⁷ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 181; Breiing/Knosala 1997, S. 241; Reichle 2006, S. 47

²⁵⁸ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 166-181; Schuh/Klappert 2011, S. 329; Müller/Böckmann 2008, S. 83; Welge/Al-Laham 2012, S. 731

²⁵⁹ Vgl.: Brunthaler 2010, S. 5; Verein Deutscher Ingenieure 1998, Blatt 3, S. 4-5

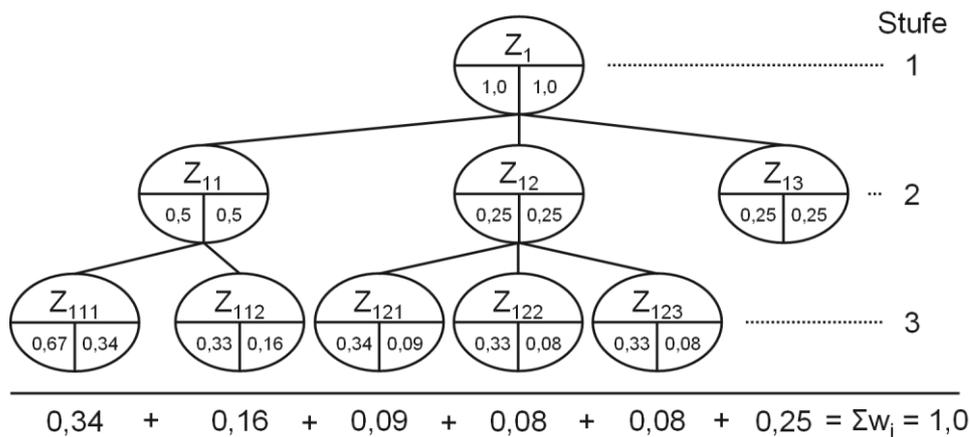


Abb. 2-23: Schematisches Zielsystem mit Gewichtungsfaktoren²⁶⁰

Im nächsten Arbeitsschritt wird die eigentliche Bewertung durchgeführt. Dazu werden für die Lösungsvarianten den Bewertungskriterien bekannte oder durch Analyse ermittelte, möglichst konkrete Eigenschaftsgrößen zugeordnet. Diese werden entsprechend den Wertevorstellungen auf einer dimensionslosen Punkteskala eingeordnet. Herausfordernd bei der Festlegung von Teilwerten sind die Subjektivität bei der Umwandlung qualitativer Effekte in Zahlenwerte und die Gewichtung der Bewertungskriterien zueinander. Der Gesamtwert N einer Lösungsvariante berechnet sich durch die gewichtete Summe der Teilwerte v_{ij} nach:

$$N = \sum_{k=1}^n v_{ij} \cdot w_i$$

Die Nutzwertanalyse zeichnet sich dadurch aus, dass komplexe Bewertungsprozesse übersichtlich strukturiert, intuitive Präferenzen offengelegt und dadurch eine rationale Bewertungsdiskussion erleichtert werden.²⁶¹ Die Subjektivität der beteiligten Personen hat jedoch einen großen Einfluss auf die Aussagekraft der Ergebnisse.²⁶²

2.2.4.2 Total-Cost-of-Ownership-Analyse

Zur Unterstützung von Beschaffungsentscheidungen sind die sogenannten Total-Cost-of-Ownership (TCO) ein weit verbreiteter Begriff, der sich in der Anschaffung von IT-Systemen etabliert hat. Überlegungen zur betriebswirtschaftlichen Betrachtung von Investitions- und Sachgütern werden in anderen Branchen analog verfolgt.²⁶³ Ellram, eine führende Wissenschaftlerin auf dem Gebiet der TCO, definiert den Begriff als Beschaffungstool und Philosophie, die tatsächlich auftretenden Kosten bestimmter Güter oder Dienstleistungen zu verstehen.²⁶⁴ Dabei ist die möglichst vollständige Berücksichtigung der Kosten,

²⁶⁰ Eigene Darstellung, angelehnt an Pahl et al. 2007, S. 169

²⁶¹ Vgl.: Kröll 2007, S. 23

²⁶² Vgl.: Schuh/Klappert 2011; Müller/Böckmann 2008

²⁶³ Vgl.: Hahn/Kaufmann 2002, S. 661

²⁶⁴ Vgl.: Ellram 1995, S. 4

Auszahlungen und ähnlicher Rechengrößen wichtig, die in Bezug mit einem Beschaffungsobjekt stehen, das zum längeren Verbleib im Unternehmen bestimmt ist.²⁶⁵ Für die Gesamtkostenbetrachtung einer Investition existiert keine Standardisierung einer eindeutig definierten Kennzahl, sondern weitere ähnliche Berechnungsmodelle neben dem TCO-Konzept unter anderen Bezeichnungen.²⁶⁶ In der Literatur zu findende Vorgehensmodelle oder Fallstudien unterscheiden sich nach Götze in folgenden Aspekten:²⁶⁷

- Konkretisierungsgrad
- Adressierter Anwender
- Betrachtungsgegenstand
- Methodik der Ermittlung
 - Modellform
 - Einbeziehung qualitativer Faktoren
- Art der Rechen- / Zielgrößen
- Umfang der Rechen- / Zielgrößen

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden verschiedene TCO-Modelle für elektrifizierte Fahrzeuge in unterschiedlichen Anwendungen identifiziert und verglichen. Neben dem Anwendungsfeld ist die zeitliche Aktualität ein relevantes Kriterium zur Beurteilung der Modelle. Tab. 2-10 listet einige Arbeiten als Grundlage des entwickelten TCO-Ansatzes auf und beschreibt jeweils kurz den Betrachtungsrahmen.

Tab. 2-10: Auflistung aktueller TCO-Modelle für elektrifizierte Fahrzeuge²⁶⁸

Autoren	Betrachtungsrahmen	Jahr
Kasten / Zimmer / Leppler	Gewerblich genutzte Pkw in Deutschland	2011
Gnann et al.	Personenwirtschaftsverkehr in Deutschland	2012
McKinsey & Company	Elektro- und Hybridbusse in Europa	2012
Goehlich / Spangenberg / Kuniith	Elektrobusse und benötigte Ladeinfrastruktur	2013
Nurhadi / Borén / Ny	Elektrobusse in Schweden	2014
Hacker / von Waldenfels / Mottschall	Elektromobilität bei Pkw, Nutzfahrzeugen	2015
Haendel / Gnann / Plötz	Fuhrparkoptimierung durch Elektrofahrzeuge	2015
Kleiner et al.	Elektro- und Brennstoffzellen-Transporter	2015
Rousseau et al.	Elektro- und Plug-in Hybridfahrzeuge in den USA und Europa	2015
Rusich / Danielis	Elektro- und Hybridfahrzeuge in Italien	2015
Schulz	Elektrofahrzeuge in gewerblichen Flotten	2015
Wu / Inderbitzin / Bening	Private Elektrofahrzeuge	2015
Hagman et al.	Elektro- und Hybridfahrzeuge in Schweden	2016

²⁶⁵ Vgl.: Götze/Weber 2008, S. 249

²⁶⁶ Vgl.: Grob/Lahme 2004, S. 157

²⁶⁷ Vgl.: Götze/Weber 2008, S. 250-252

²⁶⁸ Vgl.: Nurhadi/Borén/Ny 2014; Kasten/Zimmer/Leppler 2011; Rousseau et al. 2015; Gnann et al. 2012; Schulz 2015; Haendel/Gnann/Plötz 2015; Hacker/von Waldenfels/Mottschall 2015; Hagman et al. 2016; Wu/Inderbitzin/Bening 2015; Rusich/Danielis 2015; Kleiner et al. 2015; McKinsey & Company 2012; Goehlich/Spangenberg/Kuniith 2013

Die Vorgehensmodelle beschreiben die TCO als spezifischen Kennwert, angepasst an die Nutzung des Fahrzeugs. Häufig werden die Gesamtkosten der Fahrzeuge in €/km über die Fahrzeughaltedauer berechnet, denkbar sind jedoch ebenfalls andere Bezugsgrößen. Die Kosten werden in der ersten Strukturebene in Investitionsaufwände (Capital Expenditure = CAPEX) und Betriebsaufwände (Operational Expenditure = OPEX) aufgeteilt. Die CAPEX umfassen fahrzeugspezifische Positionen, wie Fahrgestell, Antriebsstrang, Energiespeicher, Wiederverkaufswert und weitere Fahrzeugkomponenten, aber auch anteilige Positionen für benötigte Ladeinfrastruktur, zusätzlich benötigte Flächen etc. Die OPEX umfassen wiederkehrende Aufwände beispielsweise für den Energiebedarf der Fahrzeuge, Wartung, Reparaturen, Versicherung und Steuern. Abb. 2-24 zeigt eine verallgemeinerte Kostenstruktur der analysierten Vorgehensmodelle als Grundlage dieser Arbeit.

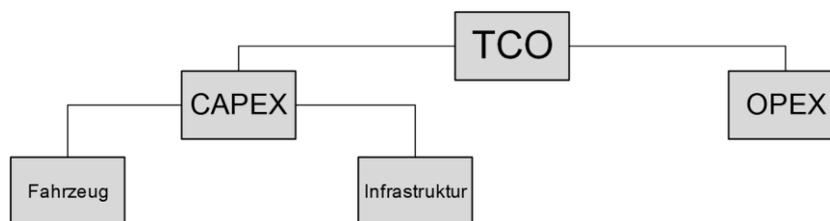


Abb. 2-24: TCO-Kostenstruktur für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte

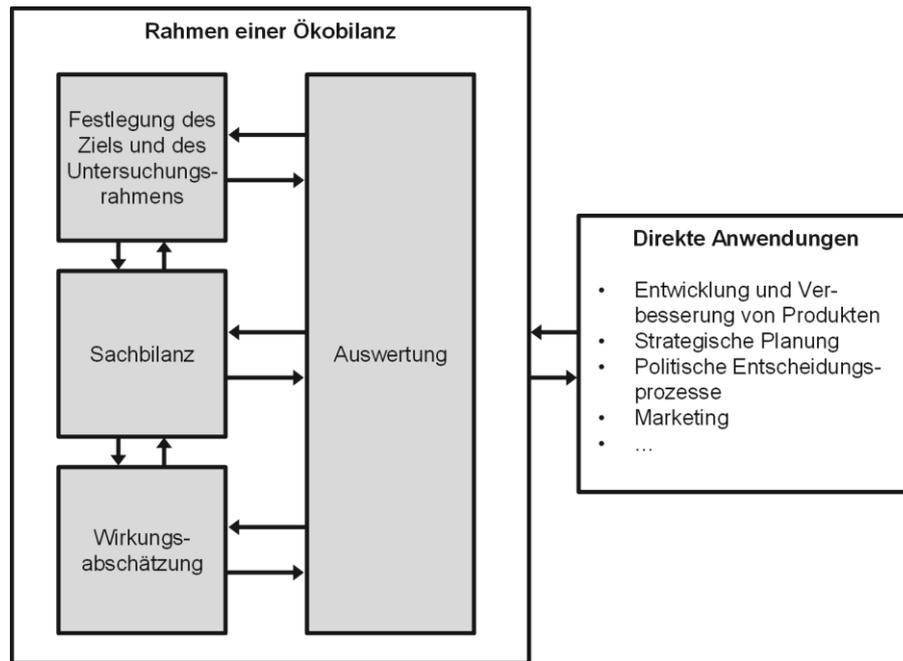
2.2.4.3 Lebenszyklusanalyse

Steigendes gesellschaftliches und politisches Interesse an der Verknappung fossiler Rohstoffe, dem globalen Klimawandel und stetig steigenden Luftschadstoffwerten in Ballungsräumen machen die Abschätzung von Umwelteinflüssen durch den Einsatz unterschiedlicher Technologien zu einem relevanten Entscheidungskriterium. Die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment = LCA), auch Ökobilanz genannt, ist ein sehr verbreitetes und etabliertes Werkzeug resultierende Umweltwirkungen auf Systemebene unter Einbeziehung von Produktion, Nutzung und Recycling zu untersuchen.²⁶⁹

Zur Vereinheitlichung der Begriffe und Vorgehensweise wurden die DIN EN ISO 14040 und 14044 erarbeitet, auf dessen Grundlage die Methodik zur Umwelteinflussanalyse in dieser Arbeit erstellt wurde.²⁷⁰ Die einzelnen Phasen einer Ökobilanz werden in Abb. 2-25 dargestellt.

²⁶⁹ Vgl.: Hellweg/Milà i Canals 2014; Messagie et al. 2014; Guinée et al. 2011

²⁷⁰ Vgl.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2006a; DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2006b

Abb. 2-25: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und 14044²⁷¹

Für die Ausarbeitung der Umwelteinflussanalyse wurden einige aktuelle Vorgehensweisen für Elektro- und Hybridfahrzeuge untersucht. Tab. 2-11 listet eine Auswahl relevanter Publikationen zur Lebenszyklusanalyse alternativer Fahrzeugkonzepte als Ausgangspunkt der Modellentwicklung auf.

Tab. 2-11: Relevante Publikationen als Grundlage der Umwelteinflussanalyse²⁷²

Autoren	Publikationstitel	Jahr
Helms et al.	UMBReLA Umweltbilanzen Elektromobilität	2011
Hawkins et al.	Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles	2012
Pötscher et al.	Ökobilanz alternativer Antriebe	2014
Messagie et al.	How to understand and perform Life Cycle Assessment of electric vehicles	2014
Girardi/Gargiulo/Brambilla	A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix	2015
Held et al.	Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen	2016
Helmerts/Dietz/Hartard	Electric car life cycle assessment based on real-world mileage and the electric conversion scenario	2017

²⁷¹ Vgl.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2006b, S. 16; Wiedergegeben mit Erlaubnis von DIN Deutsches Institut für Normung e. V.; Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Am DIN Platz, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

²⁷² Vgl.: Helms et al. 2011; Pötscher et al. 2014; Held et al. 2016; Hawkins et al. 2012; Girardi/Gargiulo/Brambilla 2015; Helmerts/Dietz/Hartard 2017; Messagie et al. 2014

Die untersuchten Herangehensweisen zur Bilanzierung der Umwelteinflüsse während der Lebensdauer eines Fahrzeugs setzen die DIN-Normen in unterschiedlichem Detailgrad um. Wie in Abb. 2-26 dargestellt, wird die Bilanzgrenze um das betrachtete System differenziert nach Herstellung der Fahrzeuge, Nutzungsphase und Recycling definiert. Bei der Fahrzeugherstellung und dem anschließenden Recycling werden verschiedene Antriebskonzepte unterschieden und die resultierenden Ressourcen und Energieaufwände für einzelne Fahrzeugkomponenten erfasst. In der Nutzungsphase wird beim Energie- und Kraftstoffverbrauch nach Art der Strombereitstellung und genutztem Kraftstoff differenziert. Diese verallgemeinerte Vorgehensweise wird als Grundlage der Analyse dieser Arbeit übernommen.

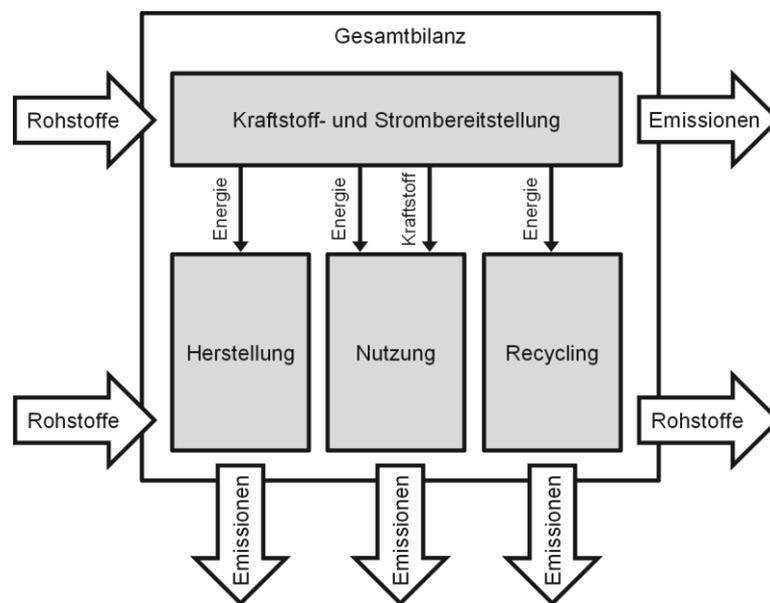


Abb. 2-26: Schematisches Modell einer Umwelteinflussanalyse für Fahrzeuge²⁷³

²⁷³ Abbildung angelehnt an Helms et al. 2011, S. 6; Pötscher et al. 2014, S. 25

3 Problemstellung und Forschungsansatz

Die Entwicklung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte für Nutzfahrzeuge ist eine anspruchsvolle Aufgabe in der Produktentwicklung. Nach der Darstellung des aktuellen Standes der Technik werden in diesem Kapitel verschiedene Herausforderungen der Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen identifiziert und daraus Forschungsfragen entwickelt. Nachfolgend wird ein Lösungsansatz beschrieben, der die hergeleiteten Forschungsfragen methodisch und systematisch bearbeitet.

3.1 Herleitung der Forschungsfragen

Aus der Aufarbeitung verfügbarer Literatur und umfangreichen Diskussionen mit großen kommunalen Flottenbetreibern werden zunächst die Forschungsfragen für diese Arbeit beschrieben.

3.1.1 Entwicklungsmethode zur Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen

In der Literatur existieren verschiedene Vorgehensweisen zur systematischen Produktentwicklung. Diese Methoden haben durch ihre branchenunabhängigen Definitionen einen allgemeingültigen Charakter. Eine Übertragung auf spezifische Probleme benötigt Konkretisierung und Spezifizierung der einzelnen Methoden.²⁷⁴ Bezogen auf die spezielle Anwendung der Fahrzeugkonzeptentwicklung und Bewertung für elektrifizierte Nutzfahrzeuge müssen besondere Schwerpunkte beispielsweise auf energieintensive Arbeitsaggregate gesetzt werden.²⁷⁵ Diese konzeptbestimmenden Faktoren müssen zunächst identifiziert und mit angemessenem Aufwand berücksichtigt werden. Eine spezifische Entwicklungsmethodik für elektrifizierte Nutzfahrzeuge ist nicht bekannt und Methodiken von konventionellen Fahrzeugen sind durch den erhöhten Komplexitätsgrad nicht übertragbar. Verzweigte Architekturen von Nutzfahrzeug-Antriebssträngen mit Arbeitsaggregaten²⁷⁶ erfordern daher die Erarbeitung eines spezifischen Vorgehensmodells zur Produktentwicklung sowie durch sorgfältige Auswahl von Hilfsmitteln und Werkzeugen eine Überführung in eine strukturierte Methodik. Daraus ergibt sich die erste Forschungsfrage:

1. Wie sollten hybridisierte und elektrifizierte Nutzfahrzeugkonzepte strukturiert und effizient unter Einbeziehung auslegungsrelevanter Faktoren entwickelt werden?

3.1.2 Relevante Aspekte für nutzergerechte Elektrifizierungskonzepte

Der Energiebedarf des Gesamtfahrzeugs nimmt bei der Elektromobilität, wie bereits in Kapitel 2.1.2 behandelt, eine besondere Rolle ein. Dementsprechend ist für die Konzeptentwicklung eine genaue Kenntnis der Fahr- und Nutzungsprofile der Fahrzeuge unter verschiedenen Einsatzszenarien erforderlich.²⁷⁷ Im Gegensatz zum Pkw existieren für die meisten Nutzfahrzeuganwendungen keine standardisierten Fahrzyklen zur Bestimmung

²⁷⁴ Vgl.: Kapitel 2.2.1

²⁷⁵ Vgl.: Kapitel 2.1.5

²⁷⁶ Vgl.: Kapitel 2.1.2 und 2.1.3

²⁷⁷ Vgl.: Kapitel 2.1.1

des Energiebedarfs, insbesondere nicht für sämtliche Einsatzszenarien und unter Einbeziehung der Arbeitsaggregate. Dementsprechend sollten gemeinsam mit den Flottenbetreibern und Fahrzeugnutzern repräsentative Fahrzyklen identifiziert und erfasst werden.²⁷⁸

Ansätze für umfangreiche und standardisierte Anforderungsanalysen von Nutzfahrzeugen mit energieintensiven Arbeitsaggregaten existieren ebenfalls nicht,²⁷⁹ sodass Messdaten und Statistiken der Betreiber mit besonderem Fokus auf elektrifizierungsrelevante Aspekte analysiert werden sollten.²⁸⁰ Aus der komplexen und interdisziplinären Auswertung ergibt sich die folgende Forschungsfrage:

2. Welche Schritte muss ein strukturierter Ansatz zur Anforderungsanalyse für elektrifizierte Nutzfahrzeuge beinhalten?

3.1.3 Strukturierter Auswahl- und Entscheidungsprozess

Im Anschluss an die Entwicklung von Elektrifizierungskonzepten für Nutzfahrzeuge müssen diese anhand von relevanten Kriterien bewertet werden.²⁸¹ Die Aufwände und Nutzen der verschiedenen Konzepte sollen umfangreich verglichen werden. Dabei sind nicht nur Energiebedarfsreduktionen und Kosten der Fahrzeuge zu berücksichtigen, sondern alle relevanten Aspekte für den Betrieb der Fahrzeuge in einer Flotte. Eine besondere Herausforderung ergibt sich dabei durch die Bewertung von theoretischen Konzepten, welche bisher nicht als Prototypen aufgebaut wurden. Hier werden sinnvoll und effizient Abschätzungen basierend auf ähnlichen Anwendungsbereichen oder Fahrzeugklassen durchgeführt.²⁸² Dementsprechend ergibt sich die dritte Forschungsfrage:

3. Wie können hybridisierte und elektrifizierte Nutzfahrzeug-Konzeptvarianten objektiv bewertet und unterschiedliche Konzepte unter Berücksichtigung aller relevanter Kriterien miteinander verglichen werden?

3.2 Lösungsansatz zur Beantwortung der Forschungsfragen

Die hier vorgestellte Methode zur Beantwortung der zuvor aufgestellten Forschungsfragen und damit zur strukturierten Entwicklung und Bewertung von elektrifizierten Nutzfahrzeugkonzepten in Metropolregionen gliedert sich, wie in Abb. 3-1 dargestellt, in drei übergeordnete Schritte. Diese orientieren sich an den beschriebenen Gemeinsamkeiten der etablierten und standardisierten Vorgehensmodelle.²⁸³

Zunächst werden interdisziplinäre und nutzerorientierte Anforderungsprofile entwickelt. Diese legen systematisch die einsatzspezifischen Rahmenbedingungen für die Fahrzeuge anhand des Betriebs der konventionellen Referenzfahrzeuge fest. Dazu werden umfassende

²⁷⁸ Vgl.: Kapitel 2.1.5

²⁷⁹ Vgl.: Kapitel 2.2.2

²⁸⁰ Vgl.: Kapitel 2.1.1

²⁸¹ Vgl.: Kapitel 2.2.4

²⁸² Vgl.: Kapitel 2.1.4

²⁸³ Vgl.: Kapitel 2.2.1

Untersuchungen von Fahrdriven und Arbeitsaggregaten unter den verschiedenen Einsatzszenarien ausgewertet. Zusätzlich werden jeweils die Energiebedarfe der Fahrzeuge auf identifizierten Referenzfahrzyklen bestimmt. Die Anforderungsanalyse wird dabei unter besonderer Berücksichtigung der relevanten Rahmenbedingungen für eine Elektrifizierung der Fahrzeuge durchgeführt.²⁸⁴

In der Konzeptentwicklung²⁸⁵ wird zunächst der gesamte Lösungsraum für die Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen mit energieintensiven Arbeitsaggregaten dargestellt. Dieser Lösungsraum wird anschließend sukzessive durch die fahrzeugspezifischen Informationen in den Anforderungsprofilen reduziert und nutzergerechte Fahrzeugkonzepte entwickelt.

Im Anschluss werden die Nutzfahrzeugkonzepte bewertet.²⁸⁶ Dabei wird ein Ansatz verwendet der auf den Entwicklungsprozess der Elektrifizierungskonzepte aufbaut und dessen logische Struktur aufgreift. Aufwand und Nutzen der Konzepte werden in verschiedenen Dimensionen beurteilt. Durchgeführt werden die Bewertungen von spezialisierten Expertenteams je Bewertungsdimension.



Abb. 3-1: Fahrzeugkonzept-Entwicklungsprozess in der Übersicht

Für objektive Ergebnisse mit hohem Vertrauensgrad sollten die Teams zur Durchführung der Methode aus hierarchisch gleichgestellten Mitgliedern unterschiedlicher Fachgebiete mit dem spezifisch erforderlichen Fachwissen bestehen.²⁸⁷ Die Entwicklung und Bewertung der Nutzfahrzeugkonzepte für die Anwendungsbeispiele in dieser Arbeit wurden beispielsweise in Teams zusammengesetzt aus den folgenden Expertengruppen erarbeitet:

- Tourenplanung
- Fuhrparkmanagement
- Fahrzeugbeschaffung
- Fahrzeugtechnik-Experten
- Innovationsabteilung
- Technologie-Experten für alternative Antriebe
- Technologie-Experten für Energiespeicher
- Technologie-Experten für Ladesysteme

²⁸⁴ Vgl.: Kapitel 2.2.2

²⁸⁵ Vgl.: Kapitel 2.2.3

²⁸⁶ Vgl.: Kapitel 2.2.4

²⁸⁷ Vgl.: Breiing/Knosala 1997, S. 46

Die Prozessschritte werden anschließend in einer Kurzbeschreibung erklärt. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Schritte dann detailliert ausgearbeitet und auf die vorgestellten Fahrzeugtypen angewendet.

3.2.1 Anforderungsanalyse

Die Grundlage aller Arbeitsschritte für die Entwicklung und Bewertung bildet eine umfangreiche Anforderungsanalyse und die daraus abgeleiteten, sogenannten Anforderungsprofile. Diese werden speziell für die betrachteten Fahrzeugtypen in Zusammenarbeit mit den Flottenbetreibern erarbeitet, damit Nutzerorientierung und die Berücksichtigung von Systemstrukturen bei der Entwicklung der elektrifizierten und hybridisierten Fahrzeugkonzepte sichergestellt werden.

Die Anforderungsprofile sind Ergebnisse aus fünf Untersuchungen in einem, wie in Abb. 3-2, dargestellten Prozess. Zunächst werden Ziele für die Elektrifizierungskonzepte aus verschiedenen Quellen wie z.B. Betreibern, Technologieunternehmen und Forschungsprojekten festgelegt und konkret beschrieben.²⁸⁸ Außerdem werden spezifische Anforderungen an die elektrifizierten Konzepte sowie Anforderungen der Flottenbetreiber definiert. Typische Beispiele dafür sind elektrische Reichweiten sowie maximale Abmaße, Gewichte und gesetzliche Rahmenbedingungen. In einer weiteren Untersuchung werden die betrieblichen Rahmenbedingungen der Fahrzeuge, wie Betriebszeiten, Reichweiten, Einsatzgebiete, Stand- und Ladezeiten erfasst.

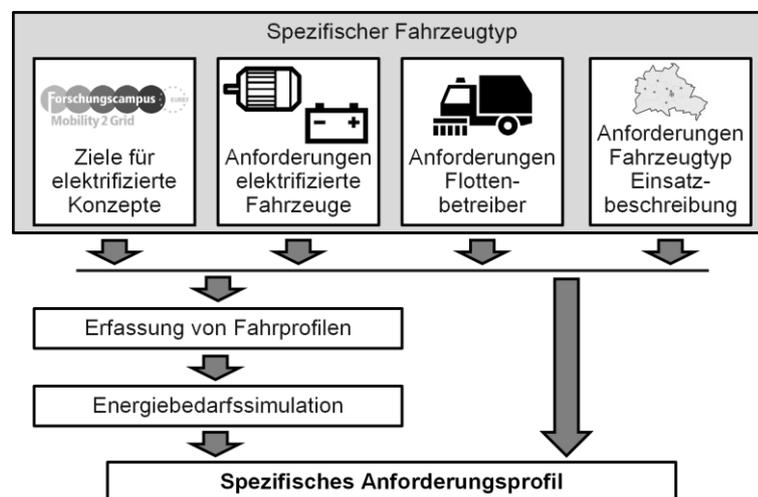


Abb. 3-2: Prozess zum Aufbau von Anforderungsprofilen

Anschließend werden repräsentative Fahrprofile gemeinsam mit den Fahrzeugnutzern identifiziert und mit Hilfe von Datenerfassungsgeräten erhoben. Dabei sind insbesondere die Einsätze der Arbeitsaggregate und der Verlauf der Zuladung relevant. Standardisierte

²⁸⁸ Vgl.: Kapitel 2.1.2

Fahrprofile zur Orientierung, wie für Pkw-Anwendungen, sind für innerstädtische Nutzfahrzeuge mit energie-intensiven Arbeitsaggregaten nicht verfügbar.²⁸⁹

Die Energiebedarfe der Fahrzeuge auf diesen repräsentativen Fahrprofilen werden in Simulationsumgebungen ermittelt. Die Ergebnisse und Auswertungen der Simulationen sind elementare Bestandteile der Anforderungsprofile und haben großen Einfluss auf die Generierung der Antriebsstrangtopologien. Dabei werden die Energiebedarfe des Fahranstriebs und der Arbeitsaggregate separat ermittelt und anhand unterschiedlicher Fahrsituationen segmentiert. Zum Einsatz kommen ein Längsdynamik-Simulationsmodell²⁹⁰ zur Bestimmung der Antriebsenergie sowie theoretisch rekuperierbarer Bremsenergie und zusätzlich eine zeitliche Integration der Arbeitsaggregat-Leistungsbedarfe.

Als Ergebnis werden in den Anforderungsprofilen nur explizite und verbindliche Kriterien aus den genannten Untersuchungsschritten je Fahrzeugtyp aggregiert, um eine definierte Eingrenzung in der frühen Konzeptphase sicherzustellen.²⁹¹ Der detaillierte Prozess der Anforderungsprofilentwicklung wird anhand der Anwendungsbeispiele in Kapitel 4 beschrieben.

3.2.2 Konzeptentwicklung

Nachdem die Grundlage der Produktplanung durch die Anforderungsprofile festgelegt wurde, können Nutzfahrzeugkonzepte mit energieintensiven Arbeitsaggregaten entwickelt werden. Abb. 3-3 zeigt den übergeordneten Prozess, der gemeinsam mit den Flottenbetreibern durchlaufen wird. Eingangsgrößen sind die zuvor beschriebenen Anforderungsprofile für spezifische Fahrzeugtypen sowie ein morphologischer Kasten, der den gesamten Lösungsraum möglicher Antriebsstrangkonfigurationen für Nutzfahrzeuge allgemein aufspannt. Da die Anzahl möglicher Kombinationen in morphologischen Lösungsräumen für komplexe Systeme im Allgemeinen sehr groß ist,²⁹² wird diese anschließend in einem strukturierten Prozess reduziert.

Die Reduktion des Lösungsraums wird durch Zusammenführung der fahrzeugtypspezifischen Anforderungsprofile mit dem allgemeingültigen morphologischen Kasten²⁹³ erreicht. Im Rahmen dieser Arbeit wird dabei ein neuartiges zweistufiges Verfahren angewendet, welches den allgemeinen Lösungsraum zunächst anhand von quantitativen Kriterien und anschließend von qualitativen Kriterien zu einem fahrzeugtypspezifischen, morphologischen Kasten einschränkt. Innerhalb dieses reduzierten Lösungsraums werden sämtliche möglichen Konzepte kompiliert und mit einem vereinfachten Vorselektionprozess weiter reduziert. Das Ergebnis des Prozesses sind nutzerorientiert entwickelte Konzepte für elektrifizierte Nutzfahrzeuge. Nachfolgend wird eine generalisierte Übersicht des Vorgehens

²⁸⁹ Vgl.: Knoke 2011, S. 27

²⁹⁰ Vgl.: Wallentowitz 2007, S. 20

²⁹¹ Vgl.: Kapitel 2.2.2

²⁹² Vgl.: Kapitel 2.2.3.3

²⁹³ Vgl.: Kapitel 2.2.3.2

bei der Konzeptentwicklung gegeben. Im Detail wird der Prozess mit allen Einzelschritten in Kapitel 5 anhand der Anwendungsbeispiele sukzessive erläutert.

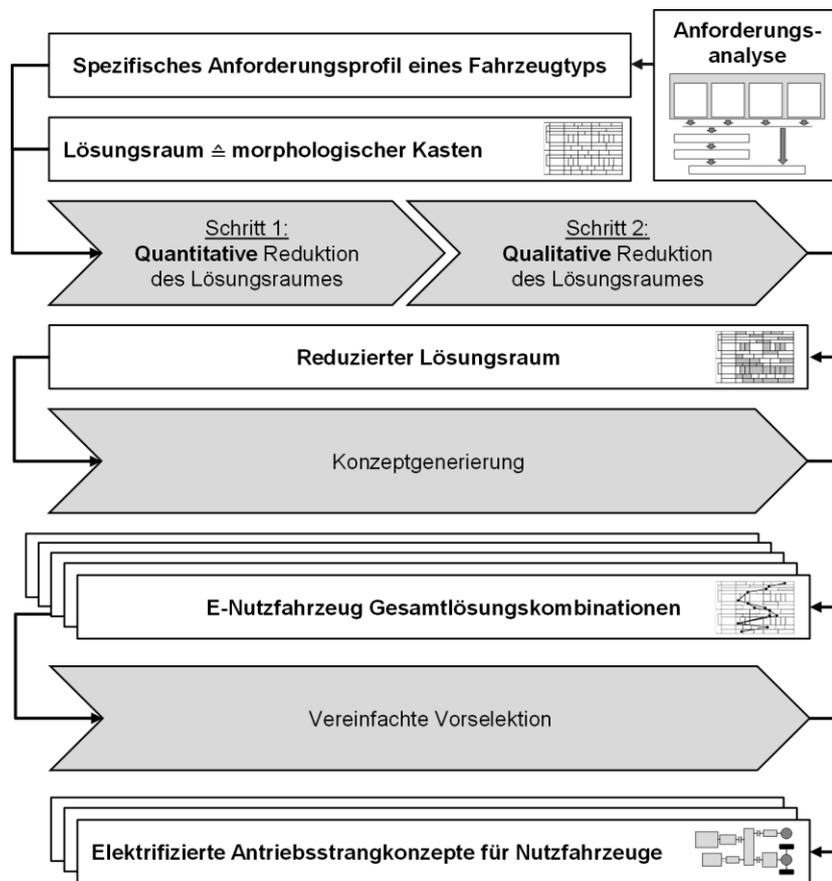


Abb. 3-3: Lösungsansatz für die Entwicklung von Elektrifizierungskonzepten

Allgemeiner Lösungsraum für elektrifizierte Nutzfahrzeuge: Der Lösungsraum für elektrifizierte Nutzfahrzeuge umfasst die Kombination von aktuellen und bekannten Technologien, die für den speziellen Betrieb mit energieintensiven Arbeitsaggregaten sowie in ähnlicher Anwendung demonstriert wurden.

Für die Visualisierung des Lösungsraums wird in dieser Arbeit der morphologische Kasten gewählt. Insbesondere für kommunale Nutzfahrzeuge,²⁹⁴ die charakteristisch in Fahrgestell und Arbeitsaggregat unterteilt werden, sowie Elektro- und Hybridfahrzeuge mit dem typisch modularen Aufbau²⁹⁵ ist diese Art der Lösungsraumdarstellung besonders geeignet.

Zweistufige Reduktion des Lösungsraums: Der allgemeingültig aufgestellte Lösungsraum wird in diesem Arbeitsschritt zu einem fahrzeugspezifischen Lösungsraum reduziert. Dies wird in einem zweistufigen Prozess umgesetzt. Dabei werden zunächst quantitative und im Anschluss qualitative Kriterien für die Reduktion des Lösungsraums angewendet. Dieses,

²⁹⁴ Vgl.: Kapitel 2.1.5

²⁹⁵ Vgl.: Kapitel 2.1.2

verglichen mit den üblichen Ansätzen,²⁹⁶ invertierte Verfahren hat bei der Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen folgenden signifikanten Vorteil. Durch die hohen Leistungsanforderungen der Fahrzeugklassen in Verbindung mit den geringen Energie- und Leistungsdichten der elektrischen Energiespeicher, verglichen mit konventionellen Kraftstoffen, lassen sich viele Kombinationen zu Beginn des Verfahrens bereits ausschließen.

In der ersten Stufe werden quantitative Faktoren anhand der konkreten Anforderungen und Nutzungsprofile des Fahrzeugs ausgewertet. Im Abgleich mit den Mindestanforderungen an die Fahrzeuge, wie beispielsweise Fahrzeuggesamtgewicht, minimale Nutzlast, maximale Fahrzeugdimensionen, durchschnittliche Reichweiten und Betriebsdauern, können verschiedene Technologien bereits in der frühen Konzeptentwicklung aus dem Lösungsraum ausgeschlossen werden. Um das zusätzliche Gewicht und die hohen Kosten der Batterie zu minimieren, wird das Fahrzeug so bestmöglich an das spätere Nutzungsprofil angepasst.

In der zweiten Stufe werden die verbleibenden Technologiealternativen anhand von qualitativen Kriterien beurteilt. Qualitative Kriterien und Konzeptspezifikationen wie beispielsweise Effizienzsteigerungspotentiale, angemessene Komplexitätssteigerung für Kleinserienproduktionen, angemessener Technologiereifegrad der eingesetzten Technologien, Ertüchtigung zum rein elektrischen Betrieb oder regenerativen Bremsen werden von Experten abgeschätzt und führen zu einer weiteren Reduktion des Lösungsraums.

Konzeptgenerierung: Nachdem der Lösungsraum fahrzeugtypenspezifisch reduziert wurde, können im anschließenden Prozessschritt nun sämtliche Topologiekonzepte zusammengestellt werden. Dies wird durch Auswahl einer oder mehrerer Optionen des Lösungsraums je Technologieoption umgesetzt. Grafisch wird eine Topologie dann mit einer Verbindung der Komponenten über eine Linie im morphologischen Kasten dargestellt. Dabei existieren Elemente mit nur einer Auswahlmöglichkeit und mehreren Auswahlmöglichkeiten. Zusätzlich werden Lösungsmöglichkeiten in sogenannte Cluster zusammengefasst, um eine logische Verknüpfung und damit eine gemeinsame Auswahl der Elemente hervorzuheben. Diese Eigenschaften stellen eine Besonderheit des Vorgehens dieser Arbeit im Vergleich mit der morphologischen Analyse nach Zwicky²⁹⁷ dar.

Vereinfachte Vorselektion: Zur weiteren Eingrenzung der Lösungsalternativen wird ein zusätzlicher Vorselektionsprozess auf die entwickelten Konzepte angewendet. Dabei werden alle ungeeigneten oder offensichtlich benachteiligten Konzepte frühzeitig aus der Lösungsmenge ausgeschlossen, um den Arbeitsumfang des Bewertungsprozesses weiter zu reduzieren. Die Fahrzeugkonzepte werden anhand der Kriterien Realisierbarkeit, Verträglichkeit, Anforderungserfüllung, Aufwandsabschätzung und paarweiser Vergleich bei ähnlichen Konzepten geprüft.²⁹⁸

²⁹⁶ Vgl.: Kapitel 2.2.3

²⁹⁷ Vgl.: Kapitel 2.2.3.2 und Zwicky 1969

²⁹⁸ Vgl.: Kapitel 2.2.3.3

Nach Abschluss der Vorselektion ergibt sich eine deutlich reduzierte Anzahl geeigneter Fahrzeugkonzepte. Diese Konzepte werden im anschließenden Bewertungsprozess verglichen.

3.2.3 Konzeptbewertung

Durch die Vielfalt und Komplexität von Technologieoptionen alternativer Antriebsstränge und deren Kombination ist eine reproduzierbare und objektive Bewertung der Konzepte eine besondere Herausforderung, insbesondere für Flottenbetreiber.²⁹⁹ Um den Umfang und individuellen Aufwand einzelner Bewertungsprozesse zu reduzieren, wird in dieser Arbeit ein neues Verfahren, die morphologische Nutzwertanalyse, unterstützt durch Gesamtkosten- und Umwelteinflussanalysen sowie Abschätzungen der Auswirkungen auf das Unternehmens-Image angewendet. Der Vorteil des Verfahrens liegt in der Reduktion von Subjektivität durch hohe Transparenz und interdisziplinäre Evaluation. Dies stellt häufig ein Problem bei Bewertungsprozessen dar, insbesondere wenn theoretische Konzepte bewertet werden sollen.³⁰⁰ Ergebnis des Bewertungsprozesses sind wenige besonders geeignete Topologien für einen speziellen Fahrzeugtypen und Anwendungsfall.

Die morphologische Nutzwertanalyse baut auf der Struktur des Lösungsraums für die Konzeptentwicklung, dem morphologischen Kasten, auf. Topologiekonzepte werden in die beschriebenen Komponenten des Lösungsraums untergliedert und als Einzelkomponenten bewertet. Die Bestandteile werden parallel mit Hilfe eines dreistufigen Gewichtungsvorgangs in Relationen zueinander gesetzt. Parallel werden die Gesamtkosten-, Umwelteinflüsse der Fahrzeugkonzepte und Effekte auf das Unternehmens-Image abgeschätzt, um ein gesamtheitliches Bewertungsergebnis zu erzielen. Einen Überblick über den Bewertungsprozess gibt die Abb. 3-4.

Das skizzierte Verfahren stützt sich insbesondere auf das Expertenwissen der interdisziplinären Teams, die nach Aufgabenstellung und Bewertungsdimension unterschiedlich zusammengestellt werden. Die Teams entwickeln dabei die Bewertungskriterien, gewichten diese zueinander und führen die Bewertung durch. Nachfolgend wird eine allgemeingültige Übersicht des Vorgehens der Konzeptbewertung unter Verwendung der morphologischen Nutzwertanalyse gegeben. Der Prozess wird in Kapitel 6 anschließend detailliert anhand der Anwendungsbeispiele beschrieben.

²⁹⁹ Vgl.: Knoke 2011

³⁰⁰ Vgl.: Kapitel 2.2.4

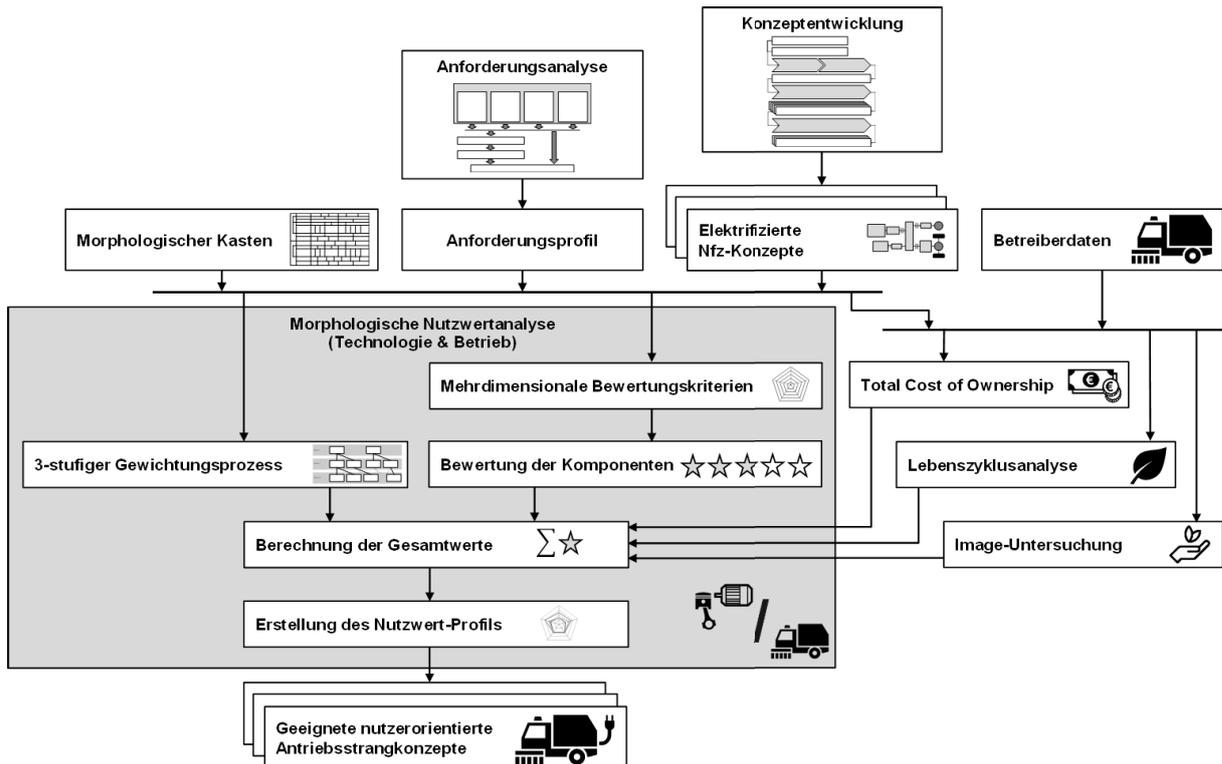


Abb. 3-4: Bewertungsprozess mit mehrstufiger morphologischer Nutzwertanalyse

Herleitung der Bewertungskriterien: Im ersten Prozessschritt werden differenzierte Bewertungsdimensionen definiert, korrespondierende Bewertungskriterien für die Fahrzeugkonzepte entsprechend der Anforderungsprofile festgelegt und den verschiedenen Elementen und Eigenschaften im morphologischen Lösungsraum zugeordnet.³⁰¹ Bei der Kriterienentwicklung ist darauf zu achten, dass möglichst alle relevanten Aspekte abgedeckt werden und keine Korrelation zwischen den Bewertungskriterien besteht.

Dreistufiger Gewichtungsprozess: Ein besonderer Bestandteil der morphologischen Nutzwertanalyse ist der mehrstufige Gewichtungsprozess. Dieser gliedert die Ziel-Hierarchie für die Bewertung³⁰² entsprechend der Struktur des morphologischen Kastens. Dedizierte Expertengruppen gewichten dabei je Bewertungsdimension die Relevanz der Teilziele zueinander.

Mehrstufige Bewertung und Erstellung der Nutzwertprofile: Parallel zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren werden die Komponenten und Eigenschaften bewertet. Dieser Prozessschritt wird unabhängig von resultierenden Systemtopologien separat je Bewertungsdimension durchgeführt.

Abschließend werden die Gesamtwerte der Bewertungsdimensionen für die zuvor entwickelten Elektrifizierungskonzepte und deren Systemtopologien berechnet. Die

³⁰¹ Vgl.: Kapitel 2.2.4

³⁰² Vgl.: Kapitel 2.2.4.1

Nutzwerte ergeben sich durch die Multiplikation der Gewichtungsfaktoren w auf drei Ebenen und dem Bewertungsergebnis v entsprechend der nachfolgenden Formel:³⁰³

$$N_{\text{Dimension}} = \sum_{i=1}^x \left[\sum_{j=1}^{y_i} \left(\sum_{k=1}^{z_j} v_{ijk} \cdot w_{ijk} \right) \cdot w_{ij} \right] \cdot w_i$$

Parallel werden Gesamtkosten, Umwelteinflüsse und Effekte auf das Unternehmens-Image anhand der Methoden Total-Cost-of-Ownership und Lebenszyklusanalyse sowie Ergebnissen thematisch relevanter Publikationen abgeschätzt.³⁰⁴ Die Bewertungsergebnisse der Konzepte werden im Anschluss in einem Radar-Diagramm dargestellt und können so als Gesamtergebnis verglichen werden.

³⁰³ Vgl.: Kapitel 2.2.4.1

³⁰⁴ Vgl.: Kapitel 2.2.4.2 und 2.2.4.3

4 Anforderungsprofile für die Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung elektrifizierter Nutzfahrzeugkonzepte wird eine umfangreiche Anforderungsanalyse bestehend aus sieben Prozessschritten durchgeführt, mit dem Ziel die relevanten Informationen für den Aufbau von Antriebsstrang-Topologien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge einschließlich der realisierbaren Ladestrategien zu identifizieren. Dazu werden fahrzeugtyp-spezifisch die unterschiedlichen Ziele und Anforderungen der elektrifizierten Fahrzeuge (4.1.1 & 4.1.2), der Flottenbetreiber (4.1.3) und der betrieblichen Rahmenbedingungen (4.1.4) systematisch erfasst. Anschließend werden die konventionellen Fahrzeuge umfangreichen Tests und Fahrprofilenerfassungen (4.2) unterzogen, um den tatsächlichen Betrieb anhand von Realdaten auswerten zu können. Die Daten werden ausgewertet, aufbereitet und zur Bestimmung des Energiebedarfs in einem Simulationsmodell (4.3) genutzt. Die Ergebnisse der Auswertungen werden in einem sogenannten Anforderungsprofil (4.4) zusammengefasst. Der Prozess ist in Abb. 4-1 dargestellt.

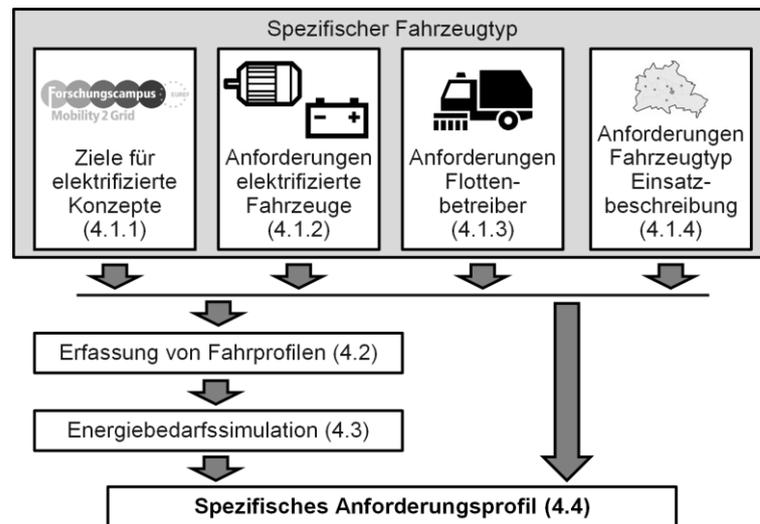


Abb. 4-1: Entwicklung der Anforderungsprofile als Prozessschabild³⁰⁵

4.1 Anforderungsanalyse

Im Folgenden werden die Vorgehensweise und Methoden zur Charakterisierung der Anforderungen an die Fahrzeugkonzepte und zum Aufbau des Anforderungsprofils erläutert. Ein besonderer Fokus wird auf die Nutzerorientierung gesetzt, damit die Fahrzeugkonzepte bestmöglich in die Flotten der Betreiber integriert werden können. Zur Identifikation funktionaler und anwendungsorientierter Fahrzeugkonzepte werden die wesentlichen technischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Anforderungen definiert. Für die Konzeptentwicklung wird dazu eine Zusammenstellung der entscheidenden Anforderungen angestrebt, welche für die anschließende Gestaltungs- und Entwurfsphase weiter detailliert

³⁰⁵ Vorgestellt in Kapitel 3.2.1

werden müssen.³⁰⁶ Die Anforderungsanalyse beschränkt sich demnach auf maßgebliche Aussagen der Betreiber zum Fahrzeugeinsatz und auslegungsrelevante Kenngrößen für Fahrzeugkonzepte. Für die weitere Lösungsfindung werden die Aspekte entsprechend einer klassischen Anforderungsanalyse aufbereitet und in ein sogenanntes Anforderungsprofil überführt.

4.1.1 Ziele der Konzeptentwicklung

In einem ersten Schritt erfolgt die Definition von Zielen und Zielgrößen für die Entwicklung der Hybrid- und Elektrofahrzeugkonzepte. Dabei werden Ziele übergeordneter Projekte, Unternehmensstrategien, konkrete Zielgrößen für die Konzeptentwicklung und Rahmenbedingungen analysiert.

Die Entwicklung der Elektrifizierungskonzepte für Nutzfahrzeuge wird im Rahmen des Forschungscampus Mobility2Grid durchgeführt. Ziel des Vorhabens ist die Integration von elektrifizierten Fahrzeugflotten als Energiespeicher in dezentrale Versorgungsnetze, um kurzfristige Lastspitzen zu vermeiden und Schwankungen im Energiebedarf zu reduzieren. Dazu ist die Anbindung der Fahrzeuge an das elektrische Versorgungsnetz nötig.³⁰⁷

Weitere Ziele für die elektrifizierte Nutzfahrzeugentwicklung sind die Reduktion des fossilen Kraftstoffverbrauchs und der emittierten Schadstoffemissionen. Neben den Kraftstoffeinsparungen, welche sowohl für den konkreten Anwender durch niedrigere Kosten als auch global für den Klimawandel positiv zu bewerten sind, wurden im Folgenden die wichtigsten Ziele zur Elektrifizierung kommunaler Fahrzeugflotten zusammengetragen:³⁰⁸

- Kraftstoffersparnis
- Emissionsreduktion³⁰⁹
- Emissionsfreiheit
- Imagegewinn
- Produktivitätssteigerung
- Verbesserung der Emissionsklassifizierung
- Zusätzliche Funktionalitäten durch weitere Freiheitsgrade
- Erhöhter Fahrkomfort
- Geringerer Wartungsaufwand
- Erhöhte Lebensdauer
- Brückentechnologie zu weiteren alternativen Antrieben
- Erfüllen gesetzlicher Vorgaben

Diese Ziele sollten für den konkreten Anwendungsfall in Fest- und Mindestanforderungen sowie Wünsche eingeteilt werden und stellen so die Basis des Zielsystems dar.³¹⁰ Die

³⁰⁶ Vgl.: Kläger 1993, S. 63

³⁰⁷ Vgl.: Mobility2Grid e.V. 2016

³⁰⁸ Ergänzte Auflistung angelehnt an Thiebes 2012, S. 44; Reif 2012, S. 2; Wallentowitz/Freialdenhoven 2011, S. 3; Hofmann 2014

³⁰⁹ Schadstoff- und Geräuschemissionen

Auswahl kann dabei durch Kunden, Marketing, Geschäftsführung oder regulatorische Rahmenbedingungen teilweise oder vollständig fremdbestimmt sein. Die Begründung der Zielauswahl ist als Teil des Anforderungsprofils zu dokumentieren.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die übergeordneten Ziele an die Fahrzeugkonzepte gemeinsam mit urbanen Flottenbetreibern sowie entsprechend der Erwartungen im Vorhaben des Forschungscampus Mobility2Grid wie folgt festgelegt. Für die Konzeptentwicklung bleiben diese Ziele zunächst auf einer prüfbar, aber abstrakten und nicht quantifizierbaren Ebene:

- Insgesamt soll bei den Konzepten eine signifikante Wirkungsgradsteigerung im Vergleich mit konventionellen Dieselfahrzeugen erreicht werden. Dies soll sich in einem deutlich reduzierten Kraftstoffverbrauch bemerkbar machen.
- Weiterhin soll das Fahrzeug, zumindest teilweise, mit erneuerbaren Energien betreibbar sein.
- Die Möglichkeit einer Verbindung mit einem elektrischen Versorgungsnetz muss vorgesehen werden, sodass die Fahrzeuge netzdienlich zur Verfügung gestellt werden können.
- Der Fahrantrieb des Fahrzeugs soll zumindest zeitweise rein elektro-motorisch und somit lokal emissionsfrei³¹¹ möglich sein.

Diese Ziele gelten als Festanforderungen und müssen somit von jedem Konzept erfüllt werden. Die zuvor genannten wichtigsten Ziele zur Elektrifizierung kommunaler Fahrzeugflotten gelten zusätzlich als Mindestanforderungen und sollten nach der positiven Seite hin überschritten werden. Sie bilden die Grundlage für die anschließende Bewertung der Konzepte.

Als Referenz wird jeweils ein dieselbetriebenes Fahrzeug des Flottenbetreibers genutzt. Teilweise existieren im Fuhrpark bei den konventionellen Fahrzeugen ebenfalls unterschiedliche Antriebsstrangkonzeppte, die parallel eingesetzt werden. Die Konzepte können bauartbedingt, beispielsweise durch unterschiedliche Nutzlasten oder –volumen, sowie im Betrieb Unterschiede aufweisen. Für diese Arbeit wird jeweils die Fahrzeugausprägung als Referenz ausgewählt, die sich aus Sicht des Flottenbetreibers im Betrieb als besonders geeignet erweist.³¹²

4.1.2 Anforderungen elektrifizierter Fahrzeuge

Mit der Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen können verschiedene Funktionen umgesetzt werden, mit denen gewählte Ziele erreicht werden können. Die Funktionen werden wesentlich durch den Aufbau und der Verknüpfung verschiedener Antriebsstrangkomponenten bestimmt oder sind durch die Betriebsstrategie der Fahrzeuge implementierbar.

³¹⁰ Vgl.: Kapitel 2.2.1

³¹¹ Dies ist in Vorbereitung auf zukünftige Null-Emissionen Umweltzonen sinnvoll.

³¹² Vgl.: Kapitel 2.1.5

Im Folgenden werden bekannte Funktionen entsprechend Kapitel 2.1.2 antriebskonzept-unabhängig in einer Übersicht dargestellt:

- Rekuperation³¹³ von kinetischer Energie
- Regeneration³¹⁴
- Verschleißarmes Bremsen durch generatorischen Betrieb der elektrischen Maschine
- Start/Stop-Funktionalität der Verbrennungskraftmaschine (VKM)
- Fremdstart der VKM und dadurch Entfall des konventionellen Anlassers
- Betriebspunktverschiebung³¹⁵
- Phlegmatisierung³¹⁶
- Downsizing / Rightsizing³¹⁷
- Entkopplung der Nebenaggregate vom Fahrtrieb
- Bedarfsgerechter Betrieb von Arbeits- und Nebenaggregaten
- Emissionsfreier Betrieb
- Boosten³¹⁸
- Segeln³¹⁹
- Generatorbetrieb zur mobilen Stromversorgung
- Entfall von Gangstufen durch Drehmomentunterstützung

Zusätzlich ergeben sich Anforderungen durch den spezifischen Energie- und Leistungsinhalt von Batteriespeichern und Kondensatoren, welche die batterieelektrische Reichweite und die zuvor benannten Funktionen im Umfang definieren. Die Charakteristika der Komponenten wurden bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben.

Die maximale Leistungsabgabe der Energiespeicher wird durch die auftretenden Leistungen im Fahrtrieb³²⁰ sowie die gleichzeitig wirkenden Arbeitsaggregate bestimmt. Das Potential zur Rekuperation wird in elektrifizierten Fahrzeugen meist limitiert durch die maximale Leistungsaufnahmekapazität der Energiespeicher.³²¹ Die Auslegung wird auf eine maximale Rekuperationsrate ist jedoch durch die hohen resultierenden Massen, Bauräume und Kosten der Energiespeicher zu vermeiden. Gleiche Rahmenbedingungen gelten für die Auslegung von maximalen Ladeleistungen. Falls bei der Technologieauswahl und dem Betriebsmodell

³¹³ Rückgewinnung und Speicherung der kinetischen und potentiellen Energie eines Fahrzeugs

³¹⁴ Rückgewinnung und direkte Nutzung der kinetischen und potentiellen Energie eines Fahrzeugs

³¹⁵ Lastanhebung, -absenkung der VKM bei konstanter Drehzahl

³¹⁶ Lastpunktverschiebung in Drehzahl und Drehmoment der VKM

³¹⁷ Die VKM kann in einem Hybridkonzept besser an die Auslastung angepasst ausgelegt werden, da die elektrische Maschine zusätzlich zum Antrieb beiträgt.

³¹⁸ Beim sogenannten Boosten wird ein zusätzliches Moment durch die elektrische Maschine bereitgestellt und damit die Leistungsfähigkeit kurzfristig erhöht.

³¹⁹ Ein besonderer Fahrzustand, bei dem das Fahrzeug komplett entkoppelt von den Antriebsaggregaten unverzögert rollt.

³²⁰ Vgl.: Wallentowitz 2007, S. 72

³²¹ Vgl.: Knoke 2011, S. 62; Kapitel 2.1.3

kein besonderer Fokus auf Schnellladen³²² gesetzt wird, sind diese jedoch deutlich unter den Antriebsleistungen.

Durch die wesentlich geringere spezifische Energiedichte der elektro-chemischen Energiespeicher im Vergleich mit Diesel-Kraftstoff ist die elektrische Reichweite durch die verfügbare Kapazität des Energiespeichers beschränkt.³²³ Berücksichtigt wird in diesem Fall eine notwendige emissionsfreie Reichweite der Fahrzeuge um beispielsweise in eine Umweltzone einzufahren. Zusätzlich können Einschränkungen in den Führerscheinklassen durch zulässige Gesamtgewichte der Fahrzeuge auftreten, welche ebenfalls vom Gesetzgeber bereits teilweise adressiert werden. So gestattet der Gesetzgeber das Fahren mit Führerscheinklasse B für elektrifizierte Fahrzeuge mit mehr als 3,5 t und weniger als 4,25 t Gesamtmasse³²⁴ oder erhöht das zulässige Gesamtgewicht für Busse³²⁵.

Quantifizierbare Anforderungen für diesen Bereich können dementsprechend erst nach einer detaillierten Analyse der Fahrzeuge festgelegt werden, welche in den Kapiteln 4.2 und 4.3 durchgeführt wird. Weitere Anforderungen hinsichtlich der Betriebsabläufe beim Flottenbetreiber und spezifische Spezifikationen der Fahrzeugtypen werden in den folgenden Kapiteln behandelt.

4.1.3 Anforderungen der Flottenbetreiber im Entsorgungsverkehr

Die Anforderungen urbaner Flottenbetreiber an die Elektrifizierungskonzepte für deren Nutzfahrzeugflotte bestehen in einer langfristigen Kostenreduktion oder Kostenneutralität, einem emissionsreduzierten und geräuschärmeren Betrieb insbesondere für ein verbessertes Arbeitsumfeld der Mitarbeiter und einer geringeren Beeinträchtigung der Anwohner sowie einer Erhöhung der Lebensdauer der Fahrzeuge. Weiterhin sind kommunale Flottenbetreiber dazu angehalten, Technologieentwicklungen zur Weiterentwicklung des Fuhrparks und eine positive Außenwirkung des Unternehmens durch die Nutzung neuer ressourcenschonender Technologien anzustreben. Ein erhöhter Fahrkomfort durch die Elektrifizierung der Fahrzeugflotten wird ebenfalls positiv betrachtet.³²⁶

Zusätzlich setzen Flottenbetreiber keine unausgereiften Technologien in ihrem Fuhrpark ein. Dies gilt insbesondere für die Zuverlässigkeit unkonventioneller Lösungen. Im Rahmen von Forschungsprojekten werden regelmäßig Prototypen und Vorserien-Fahrzeuge getestet und bewertet. Für eine längerfristige Planung sollten diese Tests jedoch bereits erfolgreich abgeschlossen worden sein.³²⁷ Das Technology Readiness Level (TRL) ist ein Indikator der NASA³²⁸ für den Entwicklungsstand einer Technologie auf Basis einer systematischen

³²² Vgl.: Kapitel 2.1.3.3

³²³ Vgl.: Kapitel 2.1.3

³²⁴ Vgl.: Akademie für Kommunalfahrzeugtechnik 2015

³²⁵ Vgl.: Bundesverband Deutscher Omnibusunternehmer (bdo) 2014

³²⁶ Vgl.: Knoke 2011; Hammer 2014; Thiebes 2012; Ivanco/Johri/Filipi 2012

³²⁷ Vgl.: Gräbener/Ruhl/Raab 2015, S. 79

³²⁸ National Aeronautics and Space Administration

Analyse. In Anlehnung an die ursprüngliche Kategorisierung für die Anwendung auf Raumfahrttechnologien wird die folgende Definition angewendet:

Tab. 4-1: Technology Readiness Level Definition³²⁹

Level	Definition
TRL 1	Grundprinzipien beobachtet
TRL 2	Technologiekonzept formuliert
TRL 3	Experimenteller Nachweis des Konzepts
TRL 4	Technologie im Labor überprüft
TRL 5	Technologie in relevanter / industrieorientierter Umgebung überprüft
TRL 6	Technologie in relevanter / industrieorientierter Umgebung getestet
TRL 7	Test eines System-Prototyps im realen Einsatz
TRL 8	System ist komplett und qualifiziert
TRL 9	System funktioniert in operationeller Umgebung / wettbewerbsfähiger Fertigung

Angelehnt an die zuvor beschriebene Kategorisierung entspricht der geforderte Reifegrad der Flottenbetreiber mindestens einem TRL-Level 6. Insbesondere vor dem Hintergrund einer zukünftigen Kleinserienproduktion der Fahrzeuge, welche in dieser Branche durch relativ geringe Stückzahlen üblich ist,³³⁰ sind Elektrifizierungskonzepte auf Komplexität zu untersuchen. Dabei sind weniger komplexe Lösungen für Betriebe mit eigener Werkstatt und Wartung bevorzugt. Im Entsorgungs- und Reinigungsverkehr kann von Entwicklungen in anderen Fahrzeugklassen wie beispielsweise dem Stadtbusverkehr,³³¹ dem Straßengüterverkehr³³² oder der Stadtlogistik³³³ profitiert und somit steile Lernkurven trotz geringer Stückzahlen erzielt werden.

Durch Kostenoptimierung im aktuellen Betriebsablauf der Flottenbetreiber ist besonders bedeutend, dass die Handhabung vergleichbar mit konventionellen Fahrzeugen ist und durch neue effiziente Technologien keine längeren Zyklusdauern oder geringere Arbeitsgeschwindigkeiten entstehen. Insbesondere bei der Umstellung von hydraulischen auf elektrische Antriebe können solche Effekte auftreten und müssen dementsprechend frühzeitig adressiert werden.³³⁴

4.1.4 Anforderungen der Fahrzeugtypen und der Einsatzbeschreibung

Ziel dieses Teils der Anforderungsanalyse ist die Ermittlung charakteristischer Größen zur Beschreibung des Fahr- und Einsatzprofils der spezifischen Fahrzeuge. Zu den Anforderungen an die Fahrzeugtypen zählen unter anderem die Leistungskennwerte der Fahrtriebe und Arbeitsaggregate, Energiebedarfe, Kraftstoffbedarfe der Fahrzeuge,

³²⁹ Vgl.: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2016

³³⁰ Vgl.: Munder 2016, S. 8

³³¹ Vgl.: Bergk 2015

³³² Vgl.: Hartung et al. 2014

³³³ Vgl.: Raiber 2016, S. 5

³³⁴ Vgl.: Zimantovski 2015, S. 79

benötigte Nutzlasten und zulässiges Gesamtgewicht. Die Einsatzbeschreibung umfasst zurückgelegte Strecken, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Zuladungsprofile, Einsatzprofile über den Tag einschließlich Schichtwechsel, eingeplante und betriebsbedingte Standzeiten, Anzahl und Ort der Entleerungen und die Topographie. Als Referenz werden dabei die konventionellen Fahrzeuge aus dem Fuhrpark des Flottenbetreibers analysiert.³³⁵ Mit Hilfe der technischen Daten der Referenzfahrzeuge, statistischen Daten der Flottenbetreiber hinsichtlich der Leistungsanforderungen und Zuladungen sowie Interviews mit Experten des Flottenmanagements werden für die elektrifizierten Fahrzeugkonzepte die Anforderungen in Tab. 4-2 und Tab. 4-3 zusammengefasst.

Tab. 4-2: Fahrzeugspezifische Anforderungen des Papierkorbsammelfahrzeug

Fahrzeug Parameter	Anforderung
Abmessungen (L x B x H)	< 6,00 m x 2,05 m x 2,47 m
Gesamtgewicht	< 5 000 kg
Ø-Nutzlast	250 kg
Nutzlastobergrenze	440 kg
Nutzvolumen	> 8 m ³
Ø-Reichweite	> 50 km x 2 ³³⁶
Reichweitenobergrenze	> 60 km x 2
Betriebszeit	> 8 h x 2
Geplante Standzeit	30 min bei Schichtwechsel
Leistung Arbeitsaggregat	> 8,1 kW
Leistung Fahrtrieb	Wie Referenzfahrzeug

Tab. 4-3: Fahrzeugspezifische Anforderungen der Großkehrmaschine

Fahrzeug Parameter	Anforderung
Abmessungen (L x B x H)	< 6,85 m x 2,97 m x 3,32 m
Gesamtgewicht	< 15 000 kg
Ø-Nutzlast	800 kg
Nutzlastobergrenze	2 500 kg
Nutzvolumen	> 5 m ³
Ø-Reichweite	> 55 km x 2
Reichweitenobergrenze	> 80 km x 2
Betriebszeit	> 8 h x 2
Geplante Standzeit	30 min bei Schichtwechsel
Leistung Arbeitsaggregat	> 30 – 36,5 kW
Leistung Fahrtrieb	Wie Referenzfahrzeug

Zur Gewährleistung eines uneingeschränkten Einsatzes beider Fahrzeugarten wird seitens der Flottenbetreiber festgelegt, dass die maximalen Außenabmessungen der Fahrzeuge erhalten bleiben. Dies ist notwendig, um weiterhin in den limitierenden Bedingungen der

³³⁵ Vgl.: Kapitel 2.1.5

³³⁶ Fahrzeug wird im Zwei-Schichtbetrieb gefahren.

Straßenbreite und Wenderadius operieren zu können. Denkbar wäre eine geringfügige Erhöhung der Fahrzeuge, jedoch ist diese ebenfalls für Brücken- und Allee-Durchfahrten zu überprüfen und entsprechend beschränkt. Ähnliche Beschränkungen gelten für die Verfügbarkeit der Nutzlasten. Diese müssen in jedem Fall den Spezifikationen der konventionellen Fahrzeuge entsprechen. Bei einer späteren Auslegung ist dabei zu beachten, dass die Extremwerte der Großkehrmaschine deutlich vom Durchschnitt abweichen und nur in seltenen Ausnahmefällen auftreten. Dahingegen ist die Abweichung zwischen Durchschnitt und Extremwert beim Papierkorbsammelfahrzeug relativ gering. Zusätzlich wird berücksichtigt, dass die Fahrzeuge im Zwei-Schichtbetrieb arbeiten sowie eine Pause je Schicht haben. Die Großkehrmaschine führt diese Pause auf dem Betriebshof zur Entleerung aus, sodass über eine Schicht das Fahrzeug zweifach entleert wird. Das Papierkorbsammelfahrzeug wird dagegen nur am Ende der Schicht entleert und verbringt die Pause im Arbeitsgebiet.

Zur hinreichenden Beschreibung und energetischen Dimensionierung der elektrifizierten Fahrzeugkonzepte ist die Betrachtung der Maximalleistung von Dieselmotoren nicht ausreichend. Relevant für den Betrieb der Fahrzeuge sind mögliche Fahrleistungswerte wie maximale Beschleunigungen und Endgeschwindigkeiten, die nur indirekt mit den Nennleistungen der Dieselmotoren zusammenhängen.

Um diese sowie weitere Kennwerte des Fahrzeugs, wie spezifische Energiebedarfe von Fahrtrieb, Arbeitsaggregat und Zuladungsprofilen, zu erfassen wird die Methode der Fahrprofilerfassung angewendet. Dazu werden geeignete repräsentative Fahrprofile sowie Extremszenarios für die Analyse interdisziplinär mit den Flottenbetreibern diskutiert und festgelegt. Der Vorteil einer gezielten Auswahl von wenigen Fahrprofilen im Vergleich mit einer Langzeitdatenerfassung liegt in der Einbeziehung von Expertenwissen³³⁷ über die Betriebsabläufe und geringere Einflüsse statistischer Effekte auf die Ergebnisse. Insbesondere durch die Vielzahl unterschiedlicher Einsatzprofile sowie deutlich verschiedener Fahrzeug-Nutzung ist die synthetische Generierung von Fahrprofilen bei der Analyse der untersuchten Nutzfahrzeuge nicht sinnvoll.³³⁸ Im Pkw-Bereich beispielsweise liegen die Energiebedarfe in einem Band mit bis zu 27 % Mehrverbrauch im Vergleich mit dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), einem synthetisch generierten Fahrzyklus zum Vergleich von Verbrauchswerten.³³⁹ Dies liegt insbesondere an unterschiedlich starken Beschleunigungen, geringeren Konstantfahrzeiten und häufigen Stopps.

Die repräsentativen Fahrprofile werden anschließend einer umfangreichen Auswertung unterzogen und in eine Energiebedarfssimulation überführt.

³³⁷ Vgl.: Kapitel 2.2.1

³³⁸ Montazeri-Gh/Naghizadeh 2003

³³⁹ Vgl.: Linssen et al. 2012, S. 80

4.2 Fahrprofilerfassung

Ein Fahrprofil beschreibt die Betriebszustände der Komponenten eines Fahrzeugantriebsstranges sowie der Arbeitsaggregate gemeinsam mit Nutzlastveränderungen.³⁴⁰ Das Ergebnis sind zeitabhängige Vektoren der Fahrzeuggeschwindigkeit, des Leistungsbedarfs der Arbeitsaggregate und der Nutzlast.

Zur Erfassung von hochauflösenden Geschwindigkeitsprofilen stehen verschiedene Hilfsmittel und Vorgehensweisen zur Verfügung. Die in der Literatur regelmäßig angewendeten Alternativen werden im Folgenden kurz dargestellt:

- Verwendung von CAN-Bus-Daten³⁴¹
- Drehzahlmessung über Sensoren
- Chase-Car Methode
- Erfassungssysteme auf Basis eines Global Navigation Satellite System (GNSS)

Eine zuverlässige Möglichkeit zur Erfassung von Fahrdaten bietet das Auslesen des CAN-Bus eines Fahrzeugs. Die serielle Schnittstelle verbindet die wesentlichen Steuergeräte im Fahrzeug und liefert Daten über den Antrieb oder das Fahrwerk.³⁴² Daten können direkt über die Schnittstelle bzw. über den OBD-II-Stecker ausgelesen werden, wenn die Daten entschlüsselt werden können oder standardisiert zur Diagnose verfügbar sind. Entsprechende Entschlüsselungsmatrizen können vom Fahrzeughersteller bereitgestellt werden.³⁴³

Drehzahlmessungen im Antriebsstrang oder über externe Messgeräte sind eine weitere Möglichkeit der Datenerfassung. Diese arbeiten zum Beispiel auf Basis von mechanischen oder optischen Messprinzipien.³⁴⁴

Die sogenannte Chase-Car Methode beschreibt das Verfolgen eines Fahrzeugs mit einem weiteren Messfahrzeug, für welches die benötigten Daten ausgelesen werden können.³⁴⁵ Eine direkte Messung des Fahrzeugs wird dabei nicht durchgeführt und damit ist die Erfassungsqualität stark von den Fähigkeiten des Messfahrers abhängig.³⁴⁶

Eine verbreitete Methode ist die Erfassung von Bewegungsdaten mit GNSS, welche mit geringem Aufwand installiert werden können und keine unmittelbare Verbindung zu Antriebskomponenten oder Fahrwerk benötigen.³⁴⁷

³⁴⁰ Vgl.: Knoke 2011, S. 27; Ivanco/Johri/Filipi 2012, S. 366

³⁴¹ Der CAN-Bus (Controller Area Network) ist ein serielles Bussystem u.a. zur Vernetzung von Steuergeräten in Automobilen.

³⁴² Vgl.: Robert Bosch GmbH 2014, S. 1260

³⁴³ Vgl.: Ducharme/Ouellette 2013

³⁴⁴ Vgl.: Montazeri-Gh/Naghizadeh 2003

³⁴⁵ Vgl.: Kamble/Mathew/Sharma 2009

³⁴⁶ Vgl.: Morey/Limanond/Niemeier 2000

³⁴⁷ Vgl.: Duran/Earleywine 2012

Durch die Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeugtypen bei urbanen Flottenbetreibern wurde von der Ausstattung der Einzelfahrzeuge mit festen Messinstrumenten abgesehen. Weiterhin wurden bei Eingriff in den Antriebsstrang sowie die Elektronik Sicherheitsbedenken geäußert. Die GNSS-Erfassungstechnik ist als Alternative zur Auswertung von CAN-Daten sehr vielversprechend. Zudem konnte gezeigt werden, dass bei Weiterverwendung in einer Energiebedarfssimulation nur geringe Abweichungen zu erwarten sind.³⁴⁸ Das kostengünstige und kompakte Messsystem kann innerhalb weniger Minuten aufgebaut und einsatzfähig gemacht werden, was insbesondere bei Messungen in Nutzfahrzeugen während des laufenden Betriebs vorteilhaft ist. Auf Basis dieser Vorteile wurde für diese Arbeit die Fahrprofil-Erfassung mit einem GNSS-System durchgeführt.

Das verwendete System ist ein GNSS Evaluation Kit EVK-M8N mit NEO-M8N Chip der Firma u-blox. Das verwendete Gerät bietet eine Aufzeichnungsrate von 5 Hz und ist in der Lage, gleichzeitig Satelliten des US-amerikanischen Global Position Systems (GPS), des russischen Globalen Satellitennavigationssystems (GLONASS) sowie des chinesischen BeiDou Satellitensystems für die Aufzeichnung zu nutzen.³⁴⁹ Eine ausschließliche Aufzeichnung von GPS-Satellitendaten ist mit bis zu 10 Hz möglich, was in vorausgegangenen Tests allerdings zu keiner Verbesserung der Datenqualität beitragen konnte.³⁵⁰ Folglich wird das Gerät im 5 Hz-Modus unter gleichzeitiger Nutzung aller zur Verfügung stehenden Satellitensysteme betrieben. Abb. 4-2 zeigt das verwendete GNSS-System.



Abb. 4-2: u-blox EVK-M8N Evaluation Kit³⁵¹

Im Gegensatz zu den Geschwindigkeitsprofilen müssen Arbeitsaggregateinsatz und Nutzlastveränderungen während des Betriebs manuell erfasst werden. Unterschieden wird dabei in dieser Arbeit zwischen Start und Ende betriebsrelevanter Segmente, den sogenannten Points of Interest (POI) (Schichten, Pausen und Sonderereignissen) sowie

³⁴⁸ Vgl.: Ly/Graebener/Goehlich 2014

³⁴⁹ Vgl.: u-blox AG 2013

³⁵⁰ Vgl.: Ly/Graebener/Goehlich 2014

³⁵¹ u-blox AG 2013

fahrzeugspezifischer Ereignisse. Bei den analysierten Fahrzeugtypen werden folgende POI erfasst:

- Papierkorbsammelfahrzeug: Aufbaubetrieb Anfang / Ende; Papierkorbaufnahme
- Großkehrmaschine: Aufbaubetrieb Anfang / Ende; Kehren Anfang / Ende

Ziel ist eine differenzierte Auswertung des Fahrzeugnutzungsprofils in unterschiedlichen Segmenten während des Betriebs. Hier werden im Rahmen dieser Arbeit die Hin-, Rück- und Transferfahrten sowie der Werkbetrieb des Fahrzeugs unterschieden. Zusätzlich werden die Betriebszeiten des Fahrzeugs nach Fahrantrieb und Aufbau differenziert. Außerdem findet eine Identifizierung von Standzeiten und somit Lademöglichkeiten der Fahrzeuge in Pausen und während der Schichtwechsel statt.

Bei der Erhebung von Positionsdaten mit Hilfe von GNSS-Systemen können verschiedene Messfehler auftreten, die Qualität und Präzision der Fahrprofile beeinträchtigen und müssen deshalb vor Fahrzyklenanalysen und Energiebedarfssimulationen nachbearbeitet werden.³⁵² Duran und Earlywine schlagen hierfür eine schrittweise durchgeführte Korrektur der Daten vor, die eine Entfernung von Ausreißern und Glättung der Daten ermöglicht, ohne zentrale Größen, wie durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit oder Standzeit signifikant zu verändern.³⁵³ Im Gegensatz zu vergleichbaren Publikationen, die sich auf die Analyse einzelner Filterstufen wie z.B. der Glättung beschränken, bietet die Methode einen umfangreichen Ansatz dessen Qualität mit Hilfe statistischer Größen belegt wird. Dementsprechend dient diese Methode als Grundlage der durchgeführten Datenaufbereitung.

Angepasst an die Anwendung auf Nutzfahrzeuge mit energie-intensiven Arbeitsaggregaten und den Besonderheiten im Stadtreinigungsbetrieb in Kombination mit dem verwendeten GNSS-System wird eine modifizierte Methode angelehnt an das Vorgehen von Duran und Earlywine angewendet. Die Methode gliedert sich in acht aufeinanderfolgende Teilschritte:

1. Festlegen von Geschwindigkeitsgrenzwerten
2. Entfernen von Null-Geschwindigkeits-Driften
3. Ersetzen von falschen Nullwerten
4. Interpolation von Signalabbrüchen
5. Korrektur von statistischen Sonderfällen bei Beschleunigungswerten
6. Entstören und Konditionieren des Signals
7. Überprüfen der Filterqualität
8. Korrektur der aufgezeichneten POI-Daten

Im Folgenden werden die Teilschritte kurz inhaltlich beschrieben. Eine detaillierte Erklärung des Vorgehens wird im Anhang dieser Arbeit aufgezeigt. Im ersten Schritt werden Grenzwerte für den Geschwindigkeitsbereich gesetzt um unrealistische Ausreißer zu

³⁵² Vgl.: Jun/Guensler/Ogle 2006

³⁵³ Vgl.: Duran/Earleywine 2012, S. 2-5

korrigieren. Null-Geschwindigkeits-Driften beschreibt den Effekt, dass trotz Stillstand des Fahrzeugs stets sehr kleine Geschwindigkeitswerte aufgezeichnet werden. Dies wird im zweiten Teilschritt eliminiert. Die anschließenden beiden Schritte korrigieren Signalabbrüche, durch plötzliches Abfallen der Geschwindigkeit auf null oder fehlende Messwerte. Nachfolgend werden im fünften Teilschritt der Korrektur systematischer Fehler unrealistische Beschleunigungswerte ersetzt.

Die Beseitigung von nicht-systematischen Fehlern wird im sechsten Teilschritt durchgeführt. Dies wird durch die Anwendung eines Savitzki-Golay-Filters erreicht, um Rauschen und weitere Messartefakte zu entfernen.³⁵⁴ Zur Verifizierung der Filterqualität werden die gefilterten Datensätze mit den Originaldaten anhand von relevanten Kenngrößen verglichen. Zuletzt werden die separat erfassten POI-Daten mit den Fahrdaten zeitlich korrekt zugeordnet und gegebenenfalls korrigiert. Das Ergebnis eines exemplarischen Fahrprofils der Großkehrmaschine findet sich in Abb. 4-3.

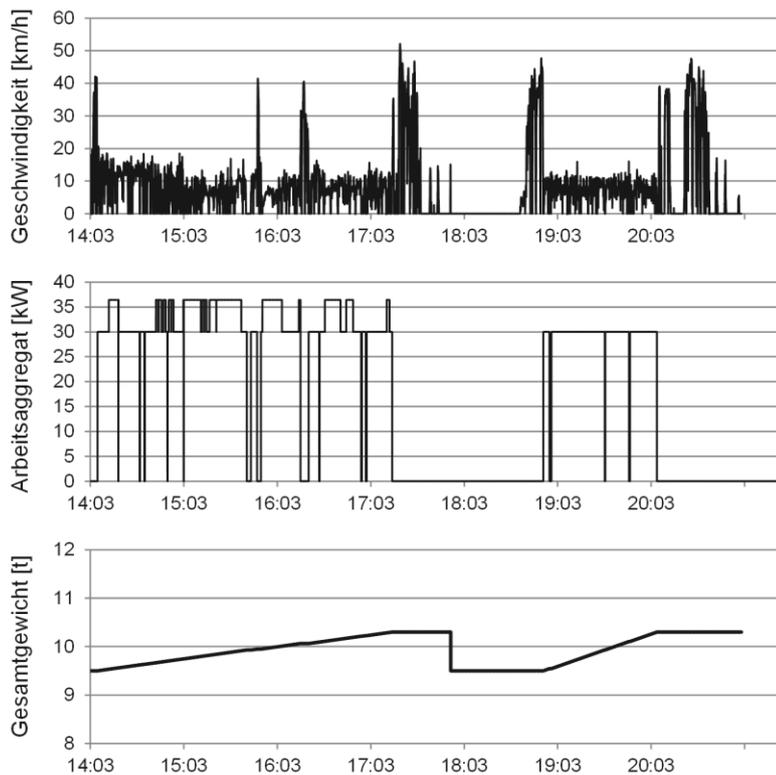


Abb. 4-3: Beispiel für ein Fahrprofil der Großkehrmaschine

4.3 Energiebedarfssimulation

Die Kenntnis der benötigten Energie für den Betrieb eines Fahrzeugs ist von elementarer Bedeutung für die Entwicklung elektrifizierter Fahrzeuge. Anhand des Energiebedarfs werden Antriebsstrangkonfigurationen und Energiespeicher auf ihre grundsätzliche Eignung

³⁵⁴ Vgl.: Press et al. 2007, S. 766-772

in speziellen Fahrzeuganwendungen untersucht. Die Fahrwiderstandssimulation unter Anwendung realer Fahrzyklen ist eine etablierte Methode um Energiebedarfe von Fahrzeugen abzuschätzen.³⁵⁵ Erhoben werden dabei die Energiebedarfe von Fahrtrieb und Arbeitsaggregaten separat, da durch den jeweils hohen Bedarfsanteil auch entkoppelte Lösungen bereits in konventionellen Fahrzeugen umgesetzt werden.³⁵⁶ Zusätzlich wird im Simulationsmodell erfasst, wie hoch Rekuperationspotentiale im jeweiligen Fahrbetrieb der Fahrzeuge sind und somit Energie wieder in den Energiespeicher zurückgeführt werden kann. Die Simulationsergebnisse sind somit ein wichtiger Bestandteil der Anforderungsanalyse und maßgeblich bestimmend für die Entwicklung und Auswahl von elektrisch betriebenen Konzepten. In diesem Kapitel werden nun zunächst Simulationsmethoden für Fahrzeugantriebe beschrieben und im Anschluss physikalische Grundlagen zur Energiebedarfssimulation sowie die Funktionsweise des Simulationsmodells erläutert.

4.3.1 Simulationsmethoden für Fahrzeugantriebe

Die Simulation von Fahrzeugantrieben ermöglicht unter anderem die Untersuchung von Leistungs- und somit Energieflüssen im Antriebsstrang. Dabei werden verschiedene Vorgehensweisen folgendermaßen klassifiziert:³⁵⁷

- Vorwärtssimulation
- Rückwärtssimulation
- Rück- / Vorwärtssimulation

Bei der Vorwärtssimulation entspricht der Berechnungsweg der Kausalkette eines realen Fahrzeugs. Folglich werden für die Fahrsimulation ein Fahrzeug- und ein Fahrermodell benötigt. Die Interaktion der Modelle wird als geschlossener Regelkreis entsprechend Abb. 4-4 dargestellt. Dabei ist der Fahrer als Regler und Ursache implementiert und bekommt eine Fahraufgabe als Führungsgröße, auf welche die Fahrzeuggeschwindigkeit als Wirkung geregelt wird.

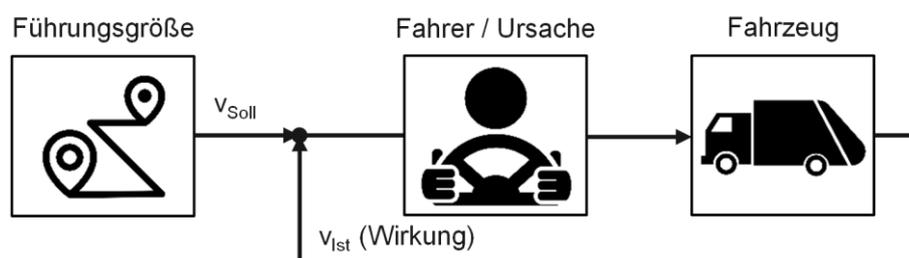


Abb. 4-4: Struktur einer Vorwärtssimulation³⁵⁸

³⁵⁵ Vgl.: Ly/Graebener/Goehlich 2014; Linssen et al. 2012, S. 64

³⁵⁶ Vgl.: Kapitel 2.1.5

³⁵⁷ Vgl.: Knoke 2011, S. 20

³⁵⁸ Darstellung ähnlich Linssen et al. 2012, S. 60

Die Rückwärtssimulation dreht diese Kausalkette um. Der Geschwindigkeits-Zeit-Vektor wird als Eingangsgröße in ein Fahrzeugmodell gegeben. Dieses bestimmt die benötigten Fahrwiderstände und somit die benötigte Energie um den vorgegebenen Zyklus zu fahren. Schematisch ist dies in Abb. 4-5 dargestellt.

In Rückwärtssimulationen werden häufig quasi-statische Modelle umgesetzt, welche eine deutlich geringere Rechenzeit im Vergleich mit der Lösung von Differentialgleichungen bei Vorwärtssimulationen aufweisen. Die Berücksichtigung von Betriebsgrenzen der Komponenten ist bei der Rückwärtssimulation nur indirekt über einen Simulationsabbruch und einer Korrektur der Eingangsdaten möglich. Da die Energiebedarfe auf erfassten Realprofilen bestimmt werden, ist die Rückwärtssimulation in dieser Arbeit eine geeignete Methode und kommt kombiniert mit einem zeitsynchronen Vektor zur Nutzung des Arbeitsaggregats zu Anwendung.

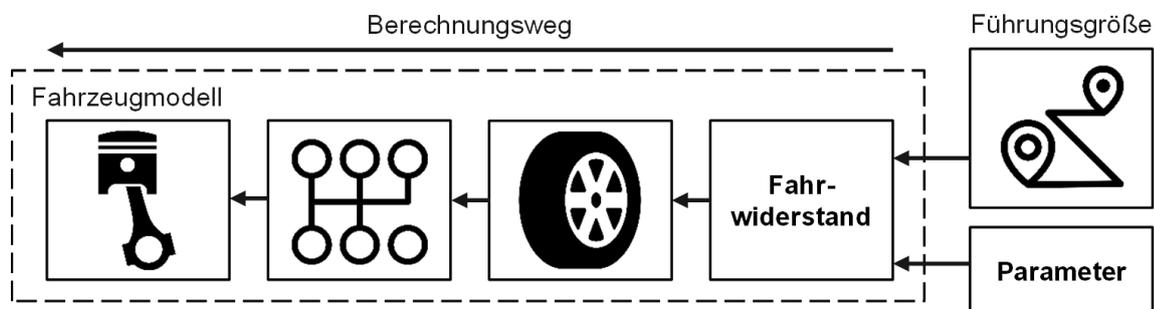


Abb. 4-5: Struktur einer Rückwärtssimulation³⁵⁹

Im Sinne der Vollständigkeit wird die Rück-/Vorwärtssimulation hier ebenfalls erwähnt. Diese Methode kombiniert beide zuvor erwähnten Ansätze und liegt beim Rechenaufwand zwischen den Methoden. Nachteilig ist die Notwendigkeit von zwei separaten Modellen für jede Simulation, da diese hintereinander durchgeführt werden.³⁶⁰

4.3.2 Energiebedarf des Fahrtriebs

Als Grundlage zur Energiebedarfsberechnung für den Fahrtrieb wird der Gesamtfahrwiderstand bestimmt, welcher der längsdynamischen Fortbewegung des Fahrzeugs entgegenwirkt. Dabei setzt sich die Widerstandskraft nach Gleichung Gl. 4-1 aus Luftwiderstand F_L , Rollwiderstand F_R , Steigungswiderstand F_{St} und Beschleunigungswiderstand F_a zusammen.³⁶¹ Dieser wird mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v multipliziert und über die Zeit integriert.

$$E_{\text{Fahr}} = \int [(F_L + F_R + F_{St} + F_a) \cdot v] dt \quad \text{Gl. 4-1}$$

³⁵⁹ Darstellung ähnlich Linssen et al. 2012, S. 60

³⁶⁰ Vgl.: Knoke 2011, S. 22

³⁶¹ Vgl.: Linssen et al. 2012, S. 57; Wallentowitz 2007, S. 20

Der Luftwiderstand wird vereinfacht über Gleichung Gl. 4-2 berechnet und beschreibt die Widerstandskraft eines Körpers durch eine Atmosphäre. Deren Gestaltung hat einen erheblichen Einfluss auf den resultierenden Luftwiderstand und wird über den dimensionslosen Luftwiderstandsbeiwert c_W vereinfacht zusammengefasst. Dieser muss für jedes Fahrzeug experimentell bestimmt werden. Die Querschnittsfläche A des Fahrzeugs sowie die Dichte der Luft ρ_L gehen ebenfalls in die Berechnung des Widerstands ein. Zu beachten ist der quadratische Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit v , welcher bei höheren Geschwindigkeiten den Luftwiderstand zum dominierenden Anteil des Gesamtwiderstands werden lässt.³⁶²

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot c_W \cdot A \cdot v^2 \quad \text{Gl. 4-2}$$

Der Rollwiderstand resultiert aus Einflussgrößen der rollenden Räder die der Fahrzeugbewegung entgegenwirken. Die Widerstandskräfte durch den rollenden Reifen setzen sich aus Walk-, Reib- und Lüfterwiderstand zusammen und werden über den dimensionslosen Rollwiderstandsbeiwert f_R multipliziert mit der Masse des Fahrzeugs m , der Gravitationskonstante g und dem Cosinus des Steigungswinkels α berechnet.³⁶³

$$F_R = m \cdot g \cdot f_R \cdot \cos(\alpha) \quad \text{Gl. 4-3}$$

Gewinnt oder verliert ein Fahrzeug während der Fahrt an Höhe, so wird dies auch im Energiebedarf berücksichtigt. Die benötigte potentielle Energie lässt sich als Steigungswiderstand Gl. 4-4 in den Gesamtwiderstand integrieren.

$$F_{St} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad \text{Gl. 4-4}$$

Der letzte Bestandteil ist der Beschleunigungswiderstand, welcher sich aus der Massenträgheit des Fahrzeugs ergibt. Typischerweise wird in Simulationen nur der translatorische Teil betrachtet, woraus sich die Gleichung Gl. 4-5 ergibt.

$$F_a = m \cdot a \quad \text{Gl. 4-5}$$

Durch die Nutzung des Motors für den Bremsvorgang als Generator kann potentielle Energie des Fahrzeugs wieder in den Energiespeicher zurückgeführt werden. Die rekuperierbare Bremsenergie berechnet sich aus dem negativen Beschleunigungswiderstand abzüglich Luft-, Roll- und Steigungswiderstand.

³⁶² Vgl.: Wallentowitz 2007, S. 47

³⁶³ Vgl.: Hofmann 2014, S. 300-301

4.3.3 Energiebedarf des Arbeitsaggregats

Unabhängig vom Bewegungsprofil des Fahrzeugs wird der Energiebedarf für die Arbeitsaggregate durch die Integration der benötigten Leistung über die Betriebszeit entsprechend Gl. 4-6 ermittelt.

$$E_{\text{Aux}} = \int [P_{\text{Aux}}] dt \quad \text{Gl. 4-6}$$

Notwendig für die Berechnung ist dabei das Leistungsprofil der Verbraucher. Im Rahmen dieser Arbeit wurden durchschnittliche Leistungen gemeinsam mit Flottenbetreiber und Fahrzeug-OEM abgestimmt.

4.4 Auswertung der Daten

Die Ergebnisse der Auswertungen werden in einem Anforderungsprofil zusammengefasst. Dazu zählen die konkreten Ziele des Entwicklungsprozesses für elektrifizierte Nutzfahrzeuge in Metropolregionen, die Anforderungen spezifisch für elektrifizierte Fahrzeuge, zur Gewährleistung des Flottenbetriebs sowie spezielle Anforderungen der Fahrzeugtypen. Zunächst werden die Fahrprofile und Energiebedarfe analysiert und am Ende des Kapitels in die Anforderungsprofile aggregiert.

Die Anforderungsprofile sind nicht als vollständige Anforderungsliste zu verstehen. Vielmehr wird eine hinreichende Darstellung der Anforderungen zur Entwicklung und Auswahl elektrifizierter Fahrzeugsysteme in der Konzeptphase angestrebt. Nach Durchlauf des Entwicklungsprozesses in dieser Arbeit werden die Konzepte weiter spezifiziert.³⁶⁴

4.4.1 Datenanalyse Fahrprofile

Die Datengrundlage wurde 2014 im realen Einsatz beim Flottenbetreiber erhoben. Für die Anwendungsbeispiele wurden nach der Identifikation repräsentativer Routen insgesamt zwölf Schichten begleitet. Dabei wurden jeweils zwei aufeinanderfolgende Schichten an einem Tag erhoben.

Nach der Datenaufbereitung und Überprüfung der Filterqualität werden die Fahrprofile in Fahrbetrieb und Werkbetrieb sowie Pausen segmentiert und relevante Kennwerte der Profile ausgewertet. Dabei werden jeweils Mittelwerte und Standardabweichungen zur besseren Auswertung gebildet. Tab. 4-4 und Tab. 4-5 zeigen die Auswertungen von Großkehrmaschine und Papierkorbsammelfahrzeug. An den Kennwerten der Auswertungen kann abgelesen werden in welchem Bereich sich Fahrleistungen der Fahrzeuge auf den repräsentativen Fahrzyklen befinden und wie stark diese im Vergleich der verschiedenen Fahrzyklen variieren.

³⁶⁴ Vgl.: Kapitel 2.2.2.1

Die aufgezeichneten Daten für die Großkehrmaschine zeigen, dass der Werkbetrieb durchschnittlich 56 % der Gesamtbetriebszeit ausmacht, dieser Wert sowie die Fahrstrecken jedoch relativ stark variieren. Dies zeigt die Vielfalt unterschiedlicher Fahrprofile der Fahrzeuge je Einsatzgebiet. Leistungskennwerte wie Beschleunigungen, Verzögerungen und Geschwindigkeiten sind im Vergleich dazu gleichbleibend. Das Fahrzeug steht zu 35 % der Gesamtbetriebszeit, welches durch einen hohen Standzeit-Anteil beim Fahrbetrieb von 42 % und beim Werkbetrieb von 13 % entsteht. Weiterhin sind insbesondere die Anzahl der Stopps je Kilometer oder je Stunde im Vergleich mit beispielsweise einem Abfallsammelfahrzeug oder Papierkorbsammelfahrzeug deutlich geringer. Ebenfalls unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Beschleunigungen und Verzögerungen kann bei der Großkehrmaschine nicht von einem besonders ausgeprägten Stop&Go-Verhalten gesprochen werden. Ein hoher Anteil der Standzeit begünstigt in diesem Fall positiv den Effekt einer Gesamtwirkungsgradsteigerung durch die Elektrifizierung. Regeneratives Bremsen wird bei relativ gleichförmigen Bewegungen eines konstanten Kehrbetriebs dahingegen keine deutlichen Vorteile erzielen.³⁶⁵

Das Arbeitsaggregat ist auf den repräsentativen Fahrprofilen 48 % der gesamten Betriebszeit und 86 % während des Werkbetriebs aktiv. Entsprechend der Einsatzbeschreibung werden bei der Zuladung zwei verschiedene Szenarien unterschieden. Die durchschnittliche Zuladung der Fahrzeuge beträgt 0,8 t. Eine maximale Zuladung von 2,5 t, also entsprechend der maximal zulässigen Zuladung, kann in seltenen Fällen beim Aufsammeln von Streugut ebenfalls vorkommen. Der Schmutzbehälter wird bei den Fahrzeugen während einer Pause und am Ende der Schicht geleert, sodass die Zuladung über die Schicht dem doppelten Wert entspricht.

Die Datenauswertung des Papierkorbsammelfahrzeugs zeigt ebenfalls einen deutlichen Anteil des Werkbetriebs der Fahrzeuge von 64 %, sowie eine ähnlich stark ausgeprägte Standardabweichung der Betriebszeitanteile. Die Fahrleistungen des Fahrzeugs sind deutlich über den Werten der Großkehrmaschine. Insbesondere die durchschnittlichen Beschleunigungen und Verzögerungen im Werkbetrieb sowie die hohe Standzeiten von 62 % und eine hohe Anzahl der Stopps deuten bei diesem Fahrzeugtypen auf ein ausgeprägtes Stop&Go-Verhalten hin. Dies ist beim Einsatzprofil zur Entleerung einzelner Papierkörbe im Stadtgebiet zu erwarten und lässt auf hohe Wirkungsgradsteigerungspotentiale durch Elektrifizierung schließen.³⁶⁶

Im Vergleich mit der Großkehrmaschine wird der Aufbau des Papierkorbsammelfahrzeugs über die Schicht mit 3 % der Zeit nur weniger häufig genutzt sowie mit durchschnittlich 1,27 Minuten über eine wesentlich kürzere Dauer je Einsatz betrieben. Das Arbeitsaggregat wird dazu jedoch ebenfalls während Rück- und Transferfahrten betätigt, sodass hier parallel die volle Leistungsfähigkeit von Arbeitsaggregat und Fahrtrieb sichergestellt werden muss. Die verschiedenen Szenarien der Zuladung variieren im Falle des Papierkorbsammelfahrzeugs relativ gering voneinander, sodass keine deutlichen Einschränkungen durch die

³⁶⁵ Vgl.: Kapitel 2.1.4.1

³⁶⁶ Vgl.: Kapitel 2.1.4.1

Extremwertbetrachtung zu erwarten sind. Zusätzlich wird das Papierkorbsammelfahrzeug nicht während der Schicht sondern nur am Ende dieser entleert.

Tab. 4-4: Datenauswertung Großkehrmaschine

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> M = Mittelwert SD = Standardabweichung </div>		Gesamt		Fahrbetrieb		Werkbetrieb		Pause	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Betriebszeit	[min]	421,54	16,36	115,58	28,53	236,07	46,15	69,89	22,23
Relative Betriebszeit	[%]	100	-	28	7	56	10	17	5
Fahrstrecke	[km]	60,19	7,31	30,45	12,43	29,40	8,06	0,34	0,10
Relative Fahrstrecke	[%]	100	-	49	17	50	17	1	1
Maximale Geschwindigkeit	[km/h]	54,36	3,05	53,98	3,42	48,07	4,36	23,32	11,42
Mittlere Geschwindigkeit	[km/h]	10,81	2,51	23,14	2,71	8,54	0,75	2,02	3,03
Maximale Beschleunigung	[m/s ²]	2,40	0,11	2,40	0,11	2,20	0,14	1,90	0,26
Mittlere Beschleunigung	[m/s ²]	0,28	0,04	0,48	0,07	0,19	0,02	0,35	0,13
Maximale Verzögerung	[m/s ²]	- 3,09	0,34	-2,99	0,43	- 2,66	0,55	- 1,97	0,16
Mittlere Verzögerung	[m/s ²]	- 0,29	0,06	-0,48	0,06	- 0,19	0,02	- 0,37	0,14
Anzahl der Stopps		206,20	21,41	67,00	20,72	129,20	36,14	10,00	10,18
Standzeit	[min]	145,39	14,38	47,18	13,17	30,87	7,20	67,34	20,68
Standzeit bezogen auf die Betriebszeit	[%]	35	3	42	12	13	2	97	2
Anzahl Stopps pro Stunde		29,30	2,10	34,39	2,84	32,52	3,43	7,69	6,92
Anzahl Stopps pro Kilometer		3,50	0,70	2,54	1,08	4,47	0,63	26,50	14,48
Anzahl der Aufbaueinsätze		24,40	12,75	0,50	0,63	23,90	13,05	-	-
Einsatzdauer Aufbau	[min]	204,46	45,55	0,13	0,16	204,33	45,56	-	-
Einsatzdauer Aufbau bezogen auf die Betriebszeit	[%]	48	10	-	-	86	5	-	-
Einsatzdauer Aufbau pro Einsatz	[min]	11,10	6,22	0,11	0,14	11,50	6,43	-	-
Anzahl der Aufbaueinsätze pro Stunde		3,43	1,72	0,24	0,33	6,00	2,79	-	-
Anzahl der Aufbaueinsätze pro Kilometer		0,41	0,25	0,02	0,02	0,77	0,26	-	-
Durchschnittliche Zuladung	[t]	1,60	-	-	-	1,60	-	-	-
Resultierende Zuladung pro Aufbaueinsatz	[kg]	89,03	50,11	-	-	92,03	50,62	-	-
Maximale Zuladung	[t]	5,00	-	-	-	5,00	-	-	-
Resultierende Zuladung pro Aufbaueinsatz	[kg]	278,21	156,59	-	-	278,21	156,59	-	-

Tab. 4-5: Datenauswertung Papierkorbsammelfahrzeug

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> M = Mittelwert SD = Standardabweichung </div>		Gesamt		Fahrbetrieb		Werkbetrieb		Pause	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Betriebszeit	[min]	400,92	14,39	76,31	22,56	254,91	40,45	69,70	41,17
Relative Betriebszeit	[%]	100	-	19	5	64	11	17	10
Fahrstrecke	[km]	45,08	8,75	15,37	7,02	29,70	7,87	0,02	0,03
Relative Fahrstrecke	[%]	100	-	34	14	66	14	-	-
Maximale Geschwindigkeit	[km/h]	52,79	1,56	50,20	1,10	51,20	3,55	5,89	10,45
Mittlere Geschwindigkeit	[km/h]	8,80	1,44	20,20	6,00	7,82	1,39	0,02	0,03
Maximale Beschleunigung	[m/s ²]	4,12	1,90	3,89	1,94	4,02	1,94	0,65	0,74
Mittlere Beschleunigung	[m/s ²]	0,42	0,06	0,65	0,19	0,58	0,02	0,36	0,42
Maximale Verzögerung	[m/s ²]	-3,73	0,81	-3,55	0,96	-3,55	0,84	-0,62	0,76
Mittlere Verzögerung	[m/s ²]	-0,42	0,09	-0,53	0,02	-0,61	0,05	-0,21	0,26
Anzahl der Stopps		251,40	46,87	44,40	13,40	206,80	51,76	0,20	0,40
Standzeit	[min]	265,39	20,84	36,68	15,90	159,06	28,91	69,65	41,18
Standzeit bezogen auf die Betriebszeit	[%]	66	4	48	13	62	5	80	40
Anzahl Stopps pro Stunde		37,65	6,95	36,04	7,81	48,09	6,51	0,18	0,36
Anzahl Stopps pro Kilometer		5,74	1,34	3,18	0,76	7,18	1,72	865,71	1731,43
Anzahl der Aufbaueinsätze		8,80	1,94	1,80	0,98	7,00	1,41	-	-
Einsatzdauer Aufbau	[min]	10,87	2,69	2,29	1,81	8,57	0,95	-	-
Einsatzdauer Aufbau bezogen auf die Betriebszeit	[%]	3	1	3	3	3	1	-	-
Einsatzdauer Aufbau pro Einsatz	[min]	1,27	0,32	1,23	0,42	1,28	0,30	-	-
Anzahl der Aufbaueinsätze pro Stunde		1,32	0,30	1,52	0,78	1,72	0,51	-	-
Anzahl der Aufbaueinsätze pro Kilometer		0,20	0,04	0,13	0,05	0,25	0,07	-	-
Durchschnittliche Zuladung	[t]	0,38	0,04	-	-	0,38	0,04	-	-
Resultierende Zuladung pro Aufbaueinsatz	[kg]	45,64	10,92	-	-	56,95	12,37	-	-
Maximale Zuladung	[t]	0,49	0,05	-	-	0,49	0,05	-	-
Resultierende Zuladung pro Aufbaueinsatz	[kg]	58,35	13,96	-	-	72,81	15,81	-	-

4.4.2 Ergebnisse der Energiebedarfssimulation

Zur Auswertung der Fahrzeugenergiebedarfe werden die repräsentativen Fahrprofile separat in der Simulationsumgebung ausgewertet. Dazu werden für jedes Fahrprofil zwei Szenarien mit einem durchschnittlichen und einem extremen Zuladungsprofil angenommen. Als skalierbare Ergebnisse werden Mittelwerte der Gesamtenergiebedarfe sowie spezifische

Kilometerenergiebedarfe bestimmt. Insbesondere erfolgt eine Auswertung nach unterschiedlichen Betriebssegmenten, wie Werkbetrieb und Fahrbetrieb sowie differenziert nach Arbeitsaggregat und Fahrtrieb. Weiterhin wird das Rekuperationspotential der Fahrten dargestellt um die Vorteile beim spezifischen Einsatzprofil zu analysieren. In diesem Kapitel werden zur Darstellung und energetischen Beschreibung der Fahrzeugtypen die Ergebnisse der \emptyset -Szenarien in jeweils einer Schicht verwendet. Der dargestellte Energiebedarf ist außerdem der aufzubringende Bedarf an den Rädern bzw. am Arbeitsaggregat der Fahrzeuge, sodass Wirkungsgradverluste im Antriebsstrang in dieser technologieneutralen Simulation nicht berücksichtigt werden. Die grafische Aufbereitung der Extremszenarien wird im Anhang gezeigt. Die einzelnen Ergebnisse werden als Festanforderungen an die Konzepte verstanden, die durch die Fahrzeugsysteme geleistet werden müssen. Skaliert auf ein durchschnittliches Tageswerk muss die mindestens berechnete Energie mit entsprechenden Reserven zur Verfügung gestellt werden.

Der Gesamtenergiebedarf einer Großkehrmaschine auf den repräsentativen Profilen in einer Schicht beträgt 142 kWh, wobei 75 % durch den Bedarf des Arbeitsaggregats verursacht werden. Bei der energetischen Auswertung des Arbeitsaggregats ergeben sich deutliche Unterschiede durch die variierende Länge des Werkbetriebs unterschiedlicher Fahrten, wie in Abb. 4-6 dargestellt. In der Betrachtung des Extremszenarios wird die Zuladung des Fahrzeugs während des Betriebs deutlich erhöht. Dementsprechend steigt der Energiebedarf des Fahrtriebs durchschnittlich um 25 % und der Anteil des Arbeitsaggregats sinkt auf 70 %. Bei dieser Auswertung wird insbesondere die Signifikanz des Arbeitsaggregats für die Fahrzeugsystementwicklung der Großkehrmaschine deutlich.

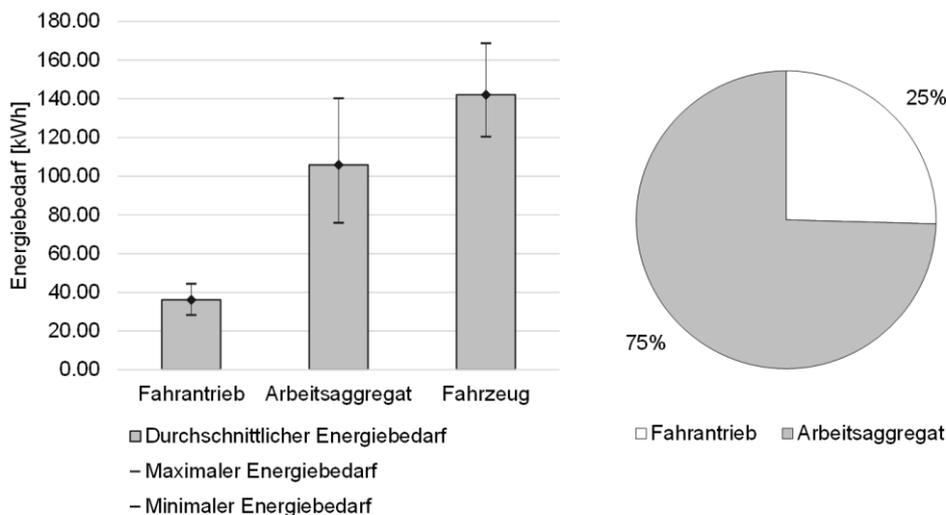


Abb. 4-6: \emptyset -Gesamtenergiebedarf der Großkehrmaschine pro Schicht

Im Vergleich ist der Energiebedarf des Papierkorbsammelfahrzeugs deutlich geringer. Das Fahrzeug benötigt für die Umsetzung einer Schicht ca. 15 kWh. Dabei fallen 10 % des Energiebedarfs auf das Arbeitsaggregat, welches deutlich seltener und kürzer genutzt

wird.³⁶⁷ In Abb. 4-7 wird ebenfalls ersichtlich, dass der Energiebedarf unterschiedlicher Touren deutlich vom Durchschnitt abweichen kann. Bei den erhobenen repräsentativen Touren lag der Energiebedarf teilweise 34 % höher, was durch deutlich längere Touren erklärt wird. Im Szenario mit maximaler Zuladung verändert sich der Energiebedarf des Fahrtrieb des Papierkorbsammelfahrzeug nur um 0,1 kWh, da die Zuladung bei diesem Fahrzeugtypen als relativ gleichbleibend beschrieben werden kann.

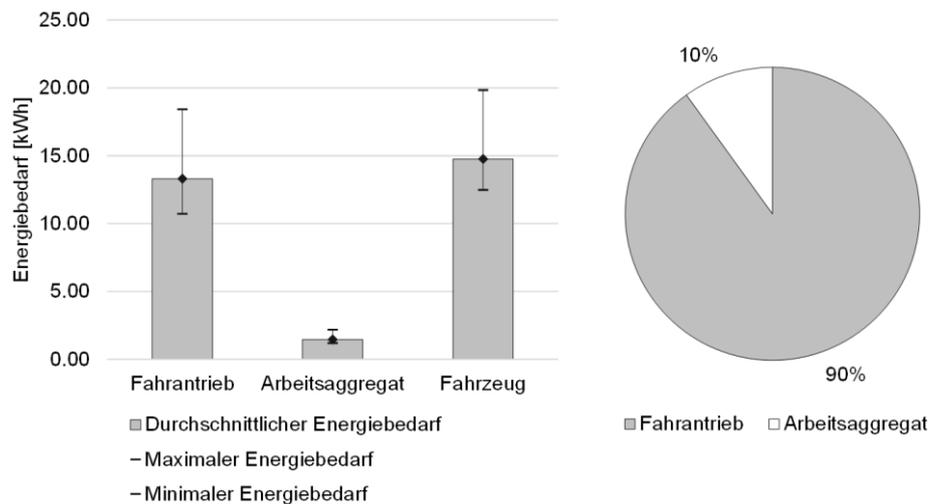


Abb. 4-7: Ø-Gesamtenergiebedarf des Papierkorbsammelfahrzeugs pro Schicht

Für die Großkehrmaschine ergibt die systematische Aufteilung des Fahrzeugbetriebs in Segmente ebenfalls eine deutliche Differenzierung der Fahrzeugnutzung, wie in Abb. 4-8 dargestellt. Besonders ausgeprägt ist dabei der Energiebedarf des Werkbetriebs von 85 %, bei dem das Arbeitsaggregat betrieben wird. Ebenfalls der sechsfach höhere spezifische Energiebedarf von 4,24 kWh/km während des Werkbetriebs ist ein charakteristisches Merkmal der Großkehrmaschine. Bei der Extremwertbetrachtung wird die Differenz durch die hohe Zuladung auf 82 % leicht reduziert.

³⁶⁷ Vgl.: Kapitel 4.4.1

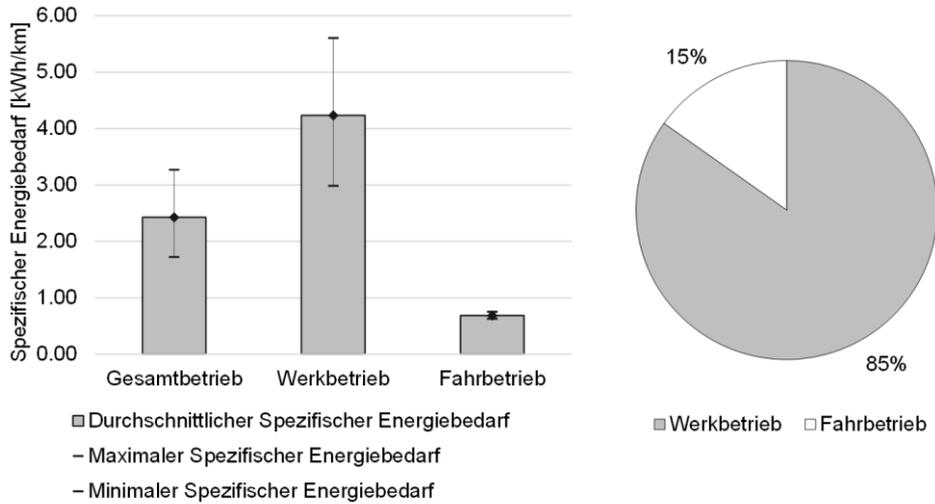


Abb. 4-8: Ø-Energiebedarfsanteil der Betriebssegmente der Großkehrmaschine

Das Papierkorbsammelfahrzeug benötigt ebenfalls den größten Anteil der Energie für den Werkbetrieb, welcher 69 % ausmacht. Dieser resultiert jedoch aus einem hohen Werkbetriebs-Zeitanteil und nicht einem deutlich erhöhten Energiebedarf wie aus Abb. 4-10 abgelesen werden kann.

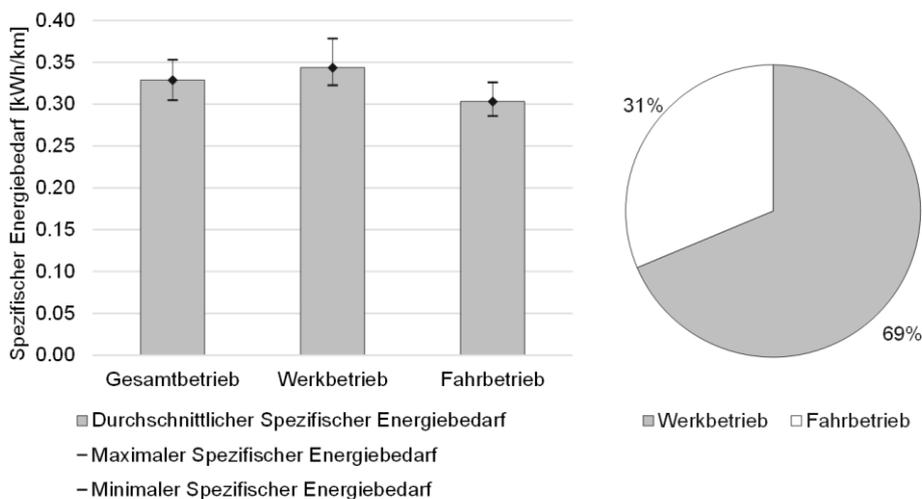


Abb. 4-9: Ø-Energiebedarfsanteil der Betriebssegmente des Papierkorbsammelfahrzeugs

Während des Werkbetriebs benötigt das Arbeitsaggregat 88 % der Energie bei der Großkehrmaschine. Der spezifische Energiebedarf kann dabei deutlich variieren. Dies ist durch unterschiedliche Leistungsstufen des Arbeitsaggregats zu erklären sowie kürzere Fahrten ohne Einsatz des Arbeitsaggregats während des Werkbetriebs. Durch die höhere Zuladung während des maximalen Szenarios steigt der spezifische Energiebedarf des Antriebs auf durchschnittlich 0,61 kWh/km, was eine Reduktion des Arbeitsaggregatsanteils auf 86 % zur Folge hat.

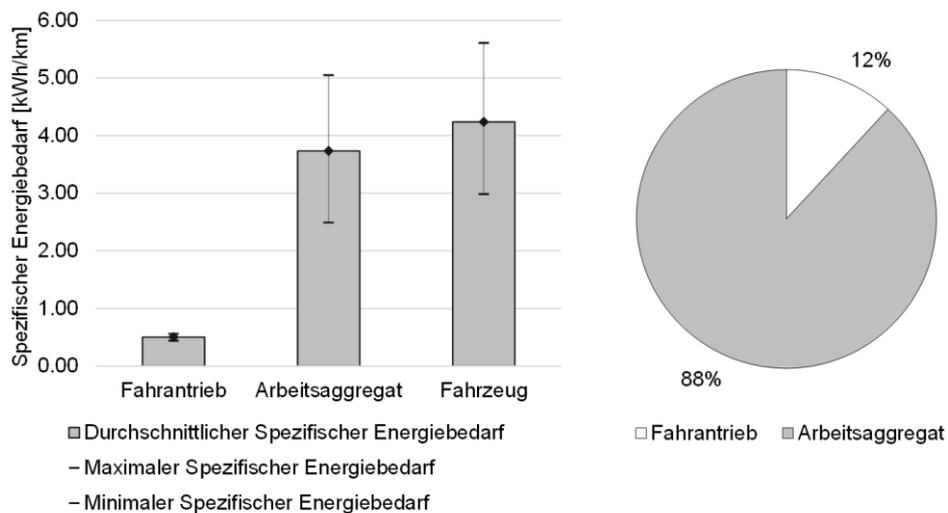


Abb. 4-10: Ø-Energiebedarf im Werkbetrieb der Großkehrmaschine nach Antriebsaggregat

Die Aufteilung der Energiebedarfe beim Papierkorbsammelfahrzeug stellt sich deutlich anders dar. Während des Werkbetriebs benötigt das Arbeitsaggregat 13 % des Gesamtenergiebedarfs durch die relativ geringe Leistungsaufnahme und nicht kontinuierliche Nutzung.³⁶⁸ Dies wird ebenfalls im spezifischen Energiebedarf, dargestellt in Abb. 4-11, deutlich.

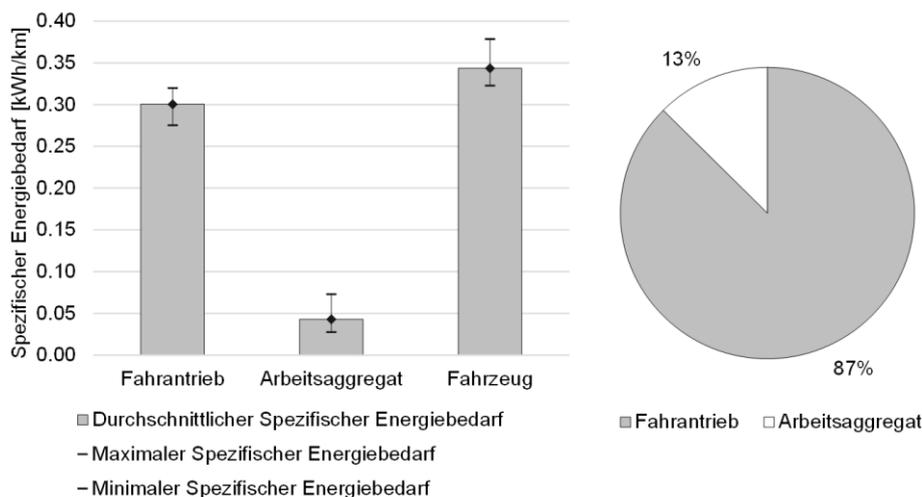


Abb. 4-11: Ø-Energiebedarf im Werkbetrieb des Papierkorbsammlers nach Antriebsaggregat

Für die Elektrifizierung ebenfalls besonders relevant ist die Auswertung der Fahrantriebsnutzung während des Fahrbetriebs und des Werkbetriebs. In der Gesamtbilanz wird 59 % der Energie während des reinen Fahrbetriebs benötigt. Der spezifische Energiebedarf liegt im Durchschnitt 0,19 kWh/km höher im Vergleich mit dem relativ gleichförmigen Betrieb

³⁶⁸ Vgl.: Kapitel 2.1.5

während des Werkbetriebs. Im Szenario mit extremer Zuladung steigert sich der spezifische Energiebedarf sogar um 0,27 kWh/km.

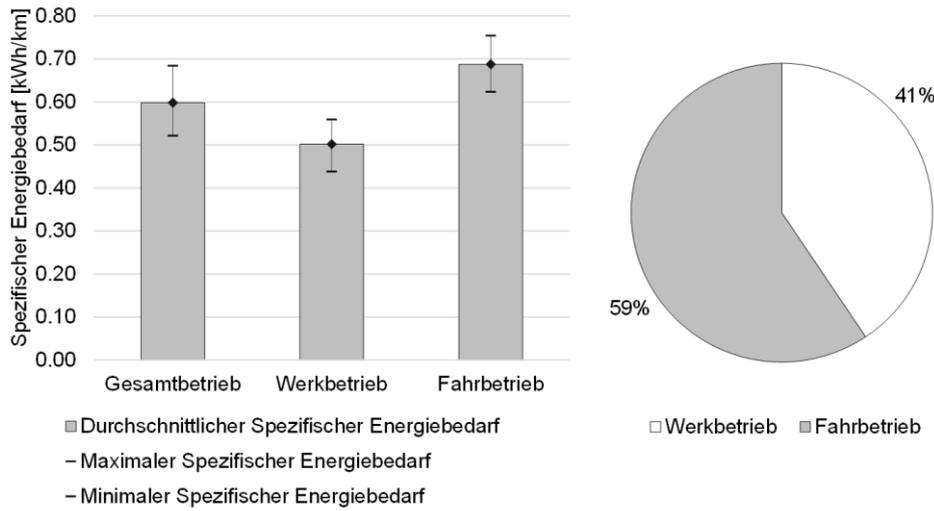


Abb. 4-12: Ø-Fahrtriebenergiebedarf der Großkehrmaschine nach Betriebssegment

Der Energiebedarf des Fahrtriebs beim Papierkorbsammelfahrzeug wird zu 68 % im Werkbetrieb benötigt. Der höhere spezifische Energiebedarf während des Werkbetriebs ist dabei auf einen intensiveren Stop&Go-Betrieb zurückzuführen.

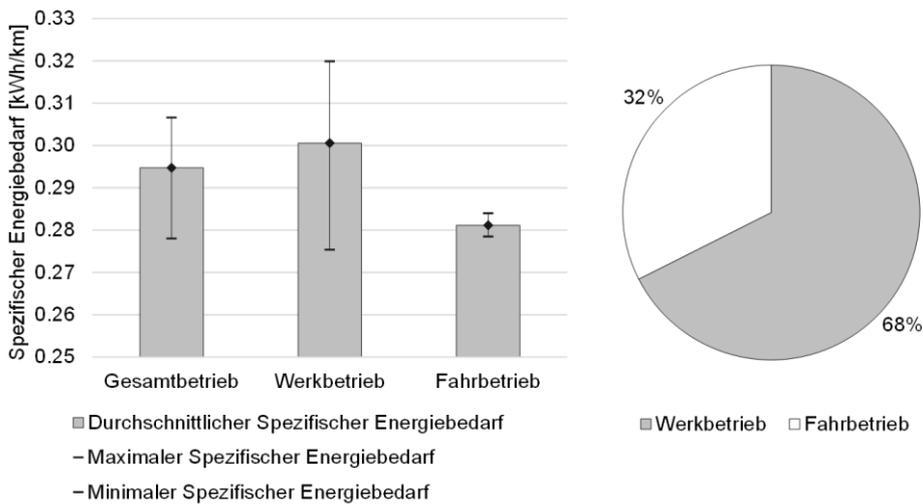


Abb. 4-13: Ø-Fahrtriebenergiebedarf des Papierkorbsammlers nach Betriebssegment

Das theoretische Potential zur Rekuperation bei der Großkehrmaschine beträgt durchschnittlich 0,19 kWh/km, bzw. 32 % der benötigten Energie für den Fahrtrieb. Differenziert ausgewertet nach Betriebssegmenten ist die Verteilung deutlich unterschiedlich. Im Fahrbetrieb können theoretisch bis zu 38 % zurückgewonnen werden; im Werkbetrieb bis

zu 24 % der Energie. Im Extremszenario sind die Werte etwas höher. Von diesem theoretischen Potential werden in realen Fahrzeugen ca. 1/3 technisch umgesetzt.³⁶⁹

Beim Papierkorbsammelfahrzeug ist das theoretische Potential mit 0,14 kWh/km und 48 % deutlich höher, was ebenfalls für eine stärkere Ausprägung des Stop&Go-Betriebs spricht. Dabei erreicht der Werkbetrieb sogar 50 %; der Fahrbetrieb 39 %. Die Potentiale sind zum Vergleich in Abb. 4-14 dargestellt. Bei der Interpretation muss dabei insbesondere auf die deutlich unterschiedlichen Fahrzeuggewichte geachtet werden.

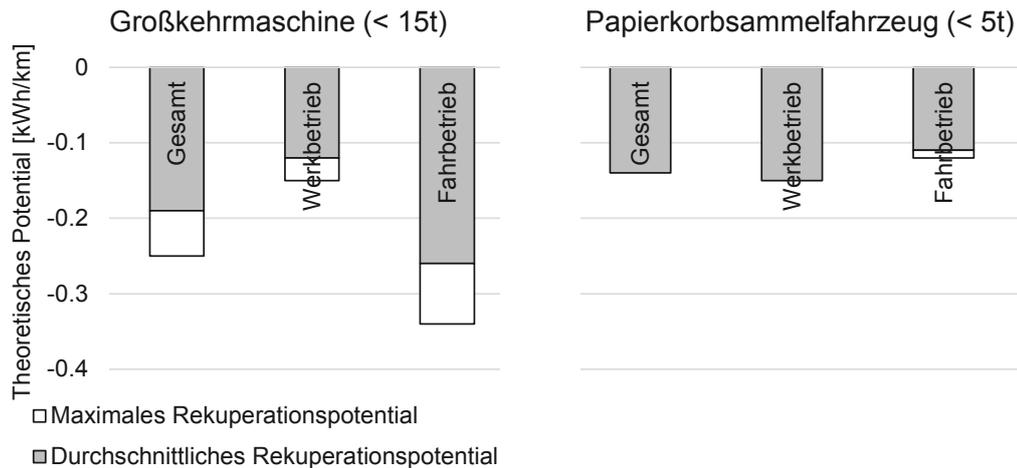


Abb. 4-14: Theoretisches Rekuperationspotential der Fahrzeugtypen

4.4.3 Anforderungsprofile für die Anwendungsbeispiele

Aus den vorhergehenden Analysen werden die relevanten Ergebnisse in eine Anforderungsliste der wichtigsten Angaben für die Konzeptentwicklung, dem sogenannten Anforderungsprofil, zusammengefasst. Dieses hat das Ziel, den Fokus auf wesentliche Anforderungen zu lenken und eine zielgerichtete Auswahl geeigneter Konzepte zu unterstützen.

Im Anforderungsprofil werden die Fest- und Mindestanforderungen sowie Wünsche in quantifizierbare und qualitative Anforderungen unterteilt. Zunächst werden vorwiegend technische und betriebliche Anforderungen im Anforderungsprofil quantifiziert um die technische Machbarkeit während der Konzeptphase zu gewährleisten. Zusätzlich werden qualitative Anforderungen für die Bereiche Technik, Betrieb, Wirtschaftlichkeit und Umwelteinflüsse aufgenommen, um eine erweiterte Grundlage für die anschließende Konzeptauswahl und Konzeptbewertung zu liefern.

Die Abbildung Tab. 4-6 zeigt das Anforderungsprofil für die Großkehrmaschine. Zunächst werden quantitativ die wesentlichen fahrzeugspezifischen und nutzungsspezifischen Daten aus dem Betrieb der Fahrzeuge zusammengetragen. Im Anschluss werden aus den Ergebnissen der Energiebedarfssimulation spezifische Energiebedarfe für durchschnittliche

³⁶⁹ Vgl.: Kapitel 2.1.4.1

Tagesstrecken berechnet. Dabei werden ausdrücklich nicht die Gesamtstrecken der repräsentativen Fahrprofile genutzt, sondern skalierte Energiebedarfe entsprechend der Reichweiten-Anforderungen der Flottenbetreiber. Die wesentlichen qualitativen Anforderungen können im Konzeptentwicklungsprozess als Ausschlusskriterien genutzt werden und dienen nach dem Prozess als Grundlage für die Bewertung. Tab. 4-7 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für das Papierkorbsammelfahrzeug.

Tab. 4-6: Anforderungsprofil Großkehrmaschine

Quantitative Anforderungen – Technik und Betrieb	Fahrzeugparameter	Länge	≤ 6,85 m
		Höhe	≤ 3,32 m
		Breite	≤ 2,97 m
		Gewicht	≤ 15 t
		Nutzlast	≥ 2,5 t
		Nutzvolumen	≥ 5 m ³
		Leistungsaufnahme Arbeitsaggregat	30 – 36,5 kW
	Betriebsparameter	Anzahl der Schichten pro Tag	2
		Mittlere Fahrstrecke pro Schicht	55 km
		Maximale Fahrstrecke pro Schicht	80 km
		Betriebszeit pro Schicht	7,8 h
		Anfahrten Abladestellen pro Schicht	2
		Verweildauer Abladestelle	-
		Pausendauer	30 min
	Energiebedarf pro Schicht Simulationsdaten skaliert anhand der Leistungsanforderungen des Flottenbetreibers	Gesamt (80 km)	140 – 260 kWh
		Fahrbetrieb (40 km)	25 – 30 kWh
		Werkbetrieb (40 km)	120 – 225 kWh
Fahrtrieb (80 km)		40 – 55 kWh	
Arbeitsaggregat (40 km)		100 – 200 kWh	
Qualitative Anforderungen	Technik	Rein elektrisches Fahren möglich	
		Rekuperation von Bremsenergie möglich	
		Integration in das elektrische Versorgungsnetz möglich	
	Betrieb	Beibehaltung aktueller Betriebsabläufe	
		Angemessener Innovationsgrad für Kleinserienproduktionen (TRL 6)	
		Vergleichbare Zuverlässigkeit mit dem konventionellen Fahrzeug	
	Wirtschaftlichkeit	Vergleichbare TCO mit dem konventionellen Fahrzeug	
	Umwelteinflüsse	Reduktion des Emissionsausstoßes	
		Kraftstoffverbrauchsreduktion	
Geräuschemissionsreduktion			

Tab. 4-7: Anforderungsprofil Papierkorbsammelfahrzeug

Quantitative Anforderungen – Technik und Betrieb	Fahrzeugparameter	Länge	≤ 6,00 m
		Höhe	≤ 2,47 m
		Breite	≤ 2,05 m
		Gewicht	≤ 5 t
		Nutzlast	≥ 0,5 t
		Nutzvolumen	≥ 8 m ³
		Leistungsaufnahme Arbeitsaggregat	8,1 kW
	Betriebsparameter	Anzahl der Schichten pro Tag	2
		Mittlere Fahrstrecke pro Schicht	50 km
		Maximale Fahrstrecke pro Schicht	60 km
		Betriebszeit pro Schicht	7,8 h
		Anfahrten Abladestellen pro Schicht	1
		Verweildauer Abladestelle	-
		Pausendauer	30 min
	Energiebedarf pro Schicht Simulationsdaten skaliert anhand der Leistungsanforderungen des Flottenbetreibers	Gesamt (60 km)	18 – 21 kWh
		Fahrbetrieb (20 km)	6 – 7 kWh
		Werkbetrieb (40km)	13 – 15 kWh
Fahrtrieb (60 km)		17 – 19 kWh	
Arbeitsaggregat (40 km)		1 – 3 kWh	
Qualitative Anforderungen	Technik	Rein elektrisches Fahren möglich	
		Rekuperation von Bremsenergie möglich	
		Integration in das elektrische Versorgungsnetz möglich	
	Betrieb	Beibehaltung aktueller Betriebsabläufe	
		Angemessener Innovationsgrad für Kleinserienproduktionen (TRL 6)	
		Vergleichbare Zuverlässigkeit mit dem konventionellen Fahrzeug	
	Wirtschaftlichkeit	Vergleichbare TCO mit dem konventionellen Fahrzeug	
	Umwelteinflüsse	Reduktion des Emissionsausstoßes	
		Kraftstoffverbrauchsreduktion	
Geräuschemissionsreduktion			

5 Entwicklung von Elektrifizierungskonzepten für Nutzfahrzeuge

Nach Erstellung der Anforderungsprofile als Grundlage der Produktplanung werden im folgenden Schritt die hybridisierten oder elektrifizierten Nutzfahrzeugkonzepte ausgearbeitet. Abb. 5-1 zeigt die übergeordnete Vorgehensweise mit mehreren Prozessschritten sowie Eingangs- und Ausgangsgrößen, wie bereits in Kapitel 3.2.2 vorgestellt. Neben dem fahrzeugspezifischen Anforderungsprofil wird ein allgemeingültiger Lösungsraum für Elektrifizierungskonzepte bei Nutzfahrzeugen mit energieintensiven Arbeitsagregaten (5.1) in Form eines morphologischen Kastens ausgearbeitet. Der Lösungsraum wird mit Hilfe des Anforderungsprofils als Zusammenstellung von Eingangsparametern in einem zweistufigen Verfahren zunächst anhand quantitativer Kriterien (5.2.1) und anschließend anhand qualitativer Kriterien (5.2.2) reduziert. Das Zwischenergebnis ist ein fahrzeugspezifischer Lösungsraum zur Ausarbeitung von anwendungsorientierten Elektrifizierungskonzepten. In diesem Lösungsraum werden sämtliche mögliche Lösungen generiert (5.3) und in einem vereinfachten Vorselektionsprozess (5.4) weiter reduziert. Das Ergebnis ist eine deutlich reduzierte Anzahl von nutzerorientiert entwickelten Fahrzeugsystemkonzepten.

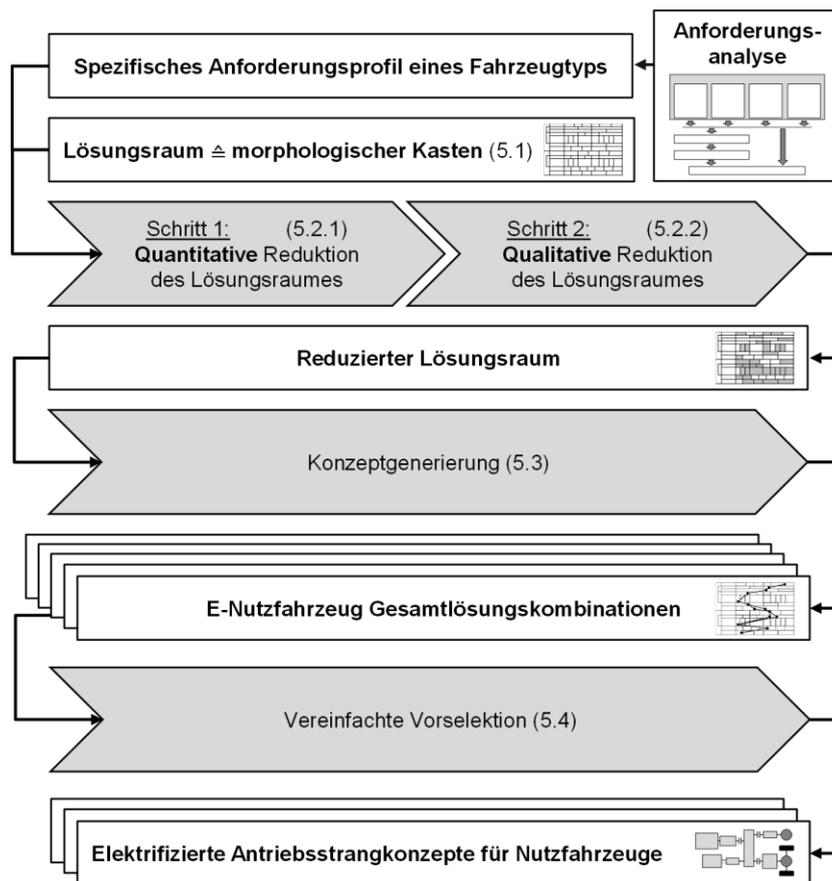


Abb. 5-1: Entwicklungsprozess der Elektrifizierungskonzepte in der Übersicht³⁷⁰

³⁷⁰ Vorgestellt in Kapitel 3.2.2

5.1 Morphologischer Kasten e-Nutzfahrzeuge

Entsprechend des typischen Vorgehens in etablierten Produktentwicklungsmodellen folgt das Aufstellen der Funktionsstruktur zur Ausgestaltung der Konzepte nach der Anforderungsdefinition.³⁷¹ Dabei wird die Gesamtfunktion soweit aufgegliedert, dass sich unterschiedliche Technologien zur Lösung der Teilfunktionen zuordnen lassen. Die Betrachtung von drei Ebenen in Teilfunktionen während des Entwicklungsprozesses ist dabei ein guter Kompromiss zwischen Detaillierung und Übersichtlichkeit von neuen Konzepten.³⁷² Der allgemeingültige Lösungsraum für Elektrifizierungskonzepte bei Nutzfahrzeugen mit energieintensiven Arbeitsaggregaten wird durch einen morphologischen Kasten in Abb. 5-2 dargestellt.

Antriebsstrangtyp		Elemente		Komponenten und Eigenschaften													
Fahrertrieb	Primär-antrieb	Antriebsstrang-konfiguration		Konventionelles Fahrzeug		Serieller Hybrid		Paralleler Hybrid		Kombinierter Hybrid		Leistungsverzweigter Hybrid		Elektrofahrzeug			
		Primärmaschine		Hubkolbenmotor				Gasturbine				Elektromaschine					
	Art des Primärspeichers		Kraftstofftank										Batterie		Brennstoffzelle mit Wasserstofftank		
	Sekundär-antrieb	Sekundärmaschine		nicht vorhanden				Hubkolbenmotor		Gasturbine		Hydraulikmaschine		Elektromaschine			
		Art des Sekundärspeichers		nicht vorhanden	mechanisches Schwungrad		Federspeicher		Kraftstofftank				pneumatischer Speicher		Batterie	Brennstoffzelle mit Wasserstofftank	elektromechanisches Schwungrad
	Kopplung Antriebswelle der Räder mit		Primärmaschine				Sekundärmaschine				Umschaltgetriebe		Verteilergetriebe				
Elektrische Ladekonzepte - Fahrertrieb		nicht vorhanden		Fahrzeuginternes Ladekonzept				Übernacht Ladekonzept		"Opportunity Charging" Ladekonzept		Batteriewechsel					
Arbeitsaggregat	Energieform Arbeitsaggregat		mechanischer Verbraucher				pneumatischer Verbraucher		hydraulischer Verbraucher		elektrischer Verbraucher		chemischer Verbraucher				
	Arbeits-antrieb	Arbeitsmaschine		nicht vorhanden		Kompressor		Hubkolbenmotor		Gasturbine		Hydraulikmaschine		Elektromaschine			
		Art des Arbeitsspeichers		nicht vorhanden	mechanisches Schwungrad		Federspeicher		Kraftstofftank				pneumatischer Speicher		Batterie	Brennstoffzelle mit Wasserstofftank	elektromechanisches Schwungrad
	Kopplung Arbeitsantrieb mit		nicht vorhanden		anderem Arbeitsantrieb		Primärmaschine		Sekundärmaschine		Primärspeicher		Sekundärspeicher		Verteilergetriebe		
Elektrische Ladekonzepte - Arbeitsantrieb		nicht vorhanden		Fahrzeuginternes Ladekonzept				Übernacht Ladekonzept		"Opportunity Charging" Ladekonzept		Batteriewechsel					

Abb. 5-2: Morphologischer Lösungsraum für elektrifizierte Nutzfahrzeuge

Dabei begünstigt der modulare Aufbau von kommunalen Nutzfahrzeugen³⁷³ sowie von Hybrid- und Elektrofahrzeugen³⁷⁴ die Struktur des Lösungsraums. Teil des Lösungsraums sind jeweils aktuelle und bekannte Technologien³⁷⁵, die bereits im speziellen Betrieb mit energieintensiven Arbeitsaggregaten oder in ähnlicher Anwendung demonstriert wurden.

³⁷¹ Vgl.: Kapitel 2.2.3

³⁷² Vgl.: Rübhelke et al. 2015, S. 345; Brink 2011, S. 123

³⁷³ Vgl.: Kapitel 2.1.2

³⁷⁴ Vgl.: Pflieger 2015, S. 73

³⁷⁵ Vgl.: Kapitel 2.1.3

Topologiekonzepte im morphologischen Kasten werden durch die Kombination von Struktureigenschaften und Komponenten zusammengestellt. Im Folgenden werden die Inhalte beschrieben und Besonderheiten herausgearbeitet.

Grundsätzlich ist der morphologische Kasten in drei Strukturebenen von links nach rechts in Antriebsstrangtypen, Antriebsstrang-Elemente sowie spezifische Komponenten und Eigenschaften unterteilt. Vertikal werden in der ersten Strukturebene der Fahrtrieb für den Fahrzeugvortrieb und der Antrieb für das Arbeitsaggregat unterschieden. Die Unterteilung entspricht der typischen Architektur von Nutzfahrzeugen in Fahrgestell und Aufbau.³⁷⁶ Prinzipiell sind weitere Arbeitsaggregate in der gegebenen Struktur darstellbar und werden analog hinzugefügt. Für eine bessere Übersichtlichkeit wird in dieser Arbeit nur das energieintensivste Arbeitsaggregat behandelt. Die sogenannten Elemente in der zweiten Spalte des morphologischen Kastens bilden die zweite Strukturebene, welche qualitative Konfigurationsaspekte und technische Funktionseinheiten unterscheidet. In der dritten Strukturebene, den sogenannten Komponenten, werden konkrete Ausprägungen der Elemente als Teillösungen dargestellt. Diese werden möglichst von oben nach unten sukzessive ausgewählt.

Für die Festlegung des Fahrtriebs wird zunächst die grundsätzliche Antriebsstrangkongfiguration entsprechend der typischen Nomenklatur definiert. Dabei wird auf Grundlagen im Lkw, Omnibus und Pkw-Bereich zurückgegriffen.³⁷⁷ Anschließend werden für den Primär- und Sekundärtrieb jeweils die Antriebsmaschine und der Energiespeicher festgelegt. Dabei liefert der Primärspeicher den Hauptteil der Energie für den Vortrieb, während der Sekundärtrieb eine unterstützende Funktion besitzt.³⁷⁸ Eine weitere relevante Eigenschaft ist die Kopplung der Antriebswelle der Räder mit Primär- und Sekundärtrieb. Dabei kann die Verbindung jeweils direkt über die Antriebsmaschinen, über ein Verteilergetriebe oder ein Umschaltgetriebe erfolgen. Elektrifizierte Antriebe können dem elektrischen Energiespeicher mit verschiedenen Ladetechnologien Energie zuführen. Zunächst besteht die Möglichkeit Energie über einen Antriebsstrang fahrzeug-intern zu erzeugen. Zusätzlich können Energiespeicher aus dem elektrischen Versorgungsnetz geladen werden. Dazu stehen die zuvor beschriebenen Konzepte Übernacht-Laden mit niedrigen Leistungen, Schnell-Laden und Batteriewechsel zur Verfügung.³⁷⁹

Der Lösungsraum für das Arbeitsaggregat wird zunächst durch die benötigte Energieform bestimmt. Dementsprechend werden eine Arbeitsmaschine und der korrespondierende Energiespeicher ausgewählt. Die Besonderheit beim Arbeitsaggregat besteht darin, dass auf einen eigenständigen Energiespeicher verzichtet werden kann, wenn die Kopplung des Arbeitsaggregats mit dem Fahrtrieb erfolgt. Eine Kopplung kann durch eine Verbindung zu den Antriebsmaschinen, zu den Energiespeichern, zu anderen Arbeitsaggregaten sowie über ein Verteilergetriebe erfolgen. Das Arbeitsaggregat kann ebenfalls mit einem eigenen

³⁷⁶ Vgl.: Hofmann 2014, S. 495-500; Hoepke/Breuer 2013

³⁷⁷ Vgl.: Kapitel 2.1.2

³⁷⁸ Vgl.: Kapitel 2.1.3

³⁷⁹ Vgl.: Kapitel 2.1.3.3

elektrischen Ladekonzept ausgestattet werden, insbesondere wenn keine Verbindung zum Fahrzeugantrieb vorgesehen ist. Damit ergeben sich drei grundlegend verschiedene Konfigurationen für das Arbeitsaggregat:

- Das Arbeitsaggregat arbeitet unabhängig mit eigenem Energiespeicher
- Das Arbeitsaggregat ist mit dem Fahrtrieb gekoppelt und besitzt keinen eigenen Energiespeicher
- Das Arbeitsaggregat ist mit dem Fahrtrieb gekoppelt und besitzt zusätzlich einen Energiespeicher

Die Verknüpfung mindestens einer Komponente oder Eigenschaft je Zeile zu einem Lösungspfad stellt eine Lösung dar. Somit lassen sich beispielsweise mehrere Ladekonzepte kombinieren ohne die Komplexität des Lösungsraums zu erhöhen. Dies ist eine Besonderheit des vorgestellten Verfahrens verglichen mit der Vorgehensweise nach Zwicky.³⁸⁰

Eine weitere Besonderheit des vorgestellten Lösungsraums ist die Zusammenfassung von kompatiblen Auswahlmöglichkeiten zu sogenannten Clustern. Diese werden durch etwas breitere Linien verdeutlicht und verbinden zum Beispiel Verbrennungskraftmaschinen mit einem Kraftstofftank als Energiespeicher. Zur Sicherstellung der Kompatibilität werden in der klassischen morphologischen Analyse häufig Verträglichkeitsmatrizen angewendet. Diese können jedoch bei einer Vielzahl an Lösungsoptionen sehr komplex und aufwändig werden.³⁸¹ Demgegenüber bietet sich das Zusammenfassen der Lösungsoptionen zur Komplexitätsreduktion durch den modularen Aufbau von elektrifizierten Antrieben an.

Der entwickelte und in Abb. 5-2 dargestellte Lösungsraum für elektrifizierte Nutzfahrzeugkonzepte mit energie-intensiven Arbeitsaggregaten umfasst in seiner allgemeingültigen Form über acht Millionen Lösungskombinationen.

5.2 Systematische Eingrenzung des Lösungsraums

Nach der Definition des allgemeingültigen Lösungsraums für elektrifizierte Nutzfahrzeugkonzepte wird mit Hilfe der Anforderungsprofile ein fahrzeugspezifischer Lösungsraum erarbeitet. Dazu werden Teillösungen aus dem morphologischen Kasten sukzessive eliminiert.³⁸² Im invertierten Ansatz³⁸³ werden zunächst quantitative Anforderungen ausgewertet, um ungeeignete Lösungsgruppen zu identifizieren und anschließend qualitative Anforderungen mit den Teillösungen verglichen, um den Lösungsraum weiter zu reduzieren. Im Folgenden werden die Prozessschritte anhand der Anwendungsbeispiele detailliert beschrieben.

³⁸⁰ Vgl.: Kapitel 2.2.3.2

³⁸¹ Vgl.: Feldhusen/Grote 2013, S. 803; Pahl et al. 2007, S. 260

³⁸² Vgl.: Pflieger 2015, S. 74

³⁸³ Vgl.: Kapitel 3.2.2

5.2.1 Schritt 1 – Quantitative Ausschlusskriterien

Die Ausschlusskriterien zur quantitativen Reduktion des Lösungsraums resultieren aus den quantitativen Anforderungen des Anforderungsprofils gemeinsam mit aktuellen technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der einzusetzenden Technologien. Durch die wesentlich geringere Energie- und Leistungsdichte elektrochemischer Energiespeicher im Vergleich mit konventionellen Kraftstoffen³⁸⁴ entstehen neue Herausforderungen, die bei der Antriebsstrangauslegung beachtet werden müssen. Die Ergebnisse der Energiebedarfs-simulation³⁸⁵ unter Anwendung realer Fahrzyklen stellen spezifische Mindestanforderungen an die Kapazität der Energiespeicher bei Elektrofahrzeugen dar. Neben dem Fahrprofil muss bei innerstädtischen Nutzfahrzeugen die Betätigung der Arbeitsaggregate ausgewertet werden. Zusätzlich zum Gesamtenergiebedarf werden Energiebedarfe für verschiedene Segmente des Fahrzeugbetriebs (z.B. Hin- & Rückfahrt, Werkbetrieb, Transferfahrt) sowie Fahrtrieb und Arbeitsaggregate separat berechnet. Im Abgleich mit den Leistungskennzahlen der Fahrzeuge, wie beispielsweise Fahrzeuggesamtgewicht, minimale Nutzlast, maximale Fahrzeugdimensionen, durchschnittliche Reichweiten und Betriebsdauern sowie wirtschaftliche Rahmenbedingungen können verschiedene Technologien bereits in diesem frühen Entwicklungsstadium aus dem Lösungsraum ausgeschlossen werden.

Dabei ist darauf zu achten, dass bei der Reduktion von zusammenhängenden Lösungsgruppen keine Einzellösungen entfallen, die in anderer Kombination neue vorteilhafte Wirkstrukturen aufzeigen.³⁸⁶ Weitere unmittelbare Ausschlusskriterien entstehen aus quantifizierbaren Entwicklungszielen, wie relevante elektrische Reichweiten oder eine Integration der Fahrzeuge in das elektrische Versorgungsnetz.

Bei der Durchführung des Verfahrens für das Papierkorbsammelfahrzeug wird zunächst der Gesamtenergiebedarf der Fahrzeuge betrachtet. Dieser liegt bei ca. 20 kWh je Schicht ohne Berücksichtigung der Verluste in den Antriebssträngen. Basis dieser Berechnung ist der durchschnittliche Energiebedarf der Fahrzeuge auf den repräsentativen Fahrprofilen³⁸⁷ sowie die geforderte maximale Fahrstrecke des Flottenbetreibers³⁸⁸. Durch auftretende Verluste und eine übliche Entladetiefe von 80 % wird die benötigte Energiespeicherkapazität im elektrifizierten Fahrzeug weiter erhöht.³⁸⁹ Diese ist jedoch weiterhin rein batterie-elektrisch umsetzbar. Zusätzlich muss der geforderte Zwei-Schicht-Betrieb bei der Entwicklung des Fahrzeugsystems beachtet werden, welcher jedoch durch Schnellladen oder Batteriewechsel während der Pause bzw. durch eine entsprechend größere Batteriekapazität realisiert werden kann.

Im Anwendungsfall des Papierkorbsammelfahrzeugs wurde der Energiebedarf des Arbeitsaggregats separat mit einem Ergebnis von zusätzlich ca. 2 kWh ausgewertet, also

³⁸⁴ Vgl.: Kapitel 2.1.3.2

³⁸⁵ Vgl.: Kapitel 4.4.2

³⁸⁶ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 162

³⁸⁷ Vgl.: Abb. 4-9

³⁸⁸ Vgl.: Tab. 4-7

³⁸⁹ Vgl.: Kapitel 2.1.3.2 und 4.3

10 % des gesamten Bedarfs. Die benötigte Energie sollte dementsprechend über den Fahrtrieb bereitgestellt werden und kein weiterer Antriebsstrang exklusiv für das Arbeitsaggregat einschließlich Energiespeicher vorgesehen werden, um die Komplexität des Antriebs zu reduzieren und Kosten zu sparen. Diese Lösungen werden folgerichtig aus dem morphologischen Kasten für das Papierkorbsammelfahrzeug gestrichen. Weiterhin werden keine zusätzlichen Ladekonzepte ausschließlich für den Arbeitsantrieb benötigt.

Weitere Reduktionen des Lösungsraums in diesem Schritt resultieren aus den konkreten Produktentwicklungszielen für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte. Durch die Forderung nach rein elektrischem Fahren werden konventionelle Konzepte sowie nicht elektrische Energiespeicher aus der Lösungsmenge herausgenommen. Weiterhin muss im Primär- oder Sekundärantrieb ein Elektromotor mit Speicher vorgesehen werden. Da über den Energieträger Wasserstoff netzdienliche Leistungen in einem sehr geringen Wirkungsgrad resultieren³⁹⁰ und Rückspeisefähigkeit nur umständlich über dezentrale Wasserstoffherstellung umsetzbar ist, wird in diesem Schritt außerdem die Brennstoffzelle als Primärenergiequelle ausgeschlossen. Nach Abschluss des ersten Reduktionsschritts ergibt sich dementsprechend der Lösungsraum in Abb. 5-3 für das Papierkorbsammelfahrzeug.

Antriebsstrangtyp		Elemente		Komponenten und Eigenschaften								
Antriebsstrang-konfiguration		Konventionelles Fahrzeug	Serieller Hybrid	Paralleler Hybrid	Kombinierter Hybrid	Leistungsverzweigter Hybrid	Elektrofahrzeug					
Fahrtrieb	Primär-antrieb	Primärmaschine		Hubkolbenmotor		Gasturbine		Elektromaschine				
		Art des Primärspeichers		Kraftstofftank				Batterie		Brennstoffzelle mit Wasserstofftank		
	Sekundär-antrieb	Sekundärmaschine		nicht vorhanden		Hubkolbenmotor	Gasturbine	Hydraulikmaschine	Elektromaschine			
		Art des Sekundärspeichers		nicht vorhanden	mechanisches Schwungrad	Federspeicher	Kraftstofftank		pneumatischer Speicher	Batterie	Brennstoffzelle mit Wasserstofftank	elektromechanisches Schwungrad
	Kopplung Antriebswelle der Räder mit		Primärmaschine		Sekundärmaschine		Umschaltgetriebe		Verteilergetriebe			
	Elektrische Ladekonzepte - Fahrtrieb		nicht vorhanden	Fahrzeuginternes Ladekonzept		Übernacht Ladekonzept		"Opportunity Charging" Ladekonzept		Batteriewechsel		
Arbeitsaggregat	Energieform Arbeitsaggregat		mechanischer Verbraucher		pneumatischer Verbraucher		hydraulischer Verbraucher	elektrischer Verbraucher	chemischer Verbraucher			
	Arbeits-antrieb	Arbeitsmaschine		nicht vorhanden	Kompressor	Hubkolbenmotor	Gasturbine	Hydraulikmaschine	Elektromaschine			
		Art des Arbeitsspeichers		nicht vorhanden	mechanisches Schwungrad	Federspeicher	Kraftstofftank		pneumatischer Speicher	Batterie	Brennstoffzelle mit Wasserstofftank	elektromechanisches Schwungrad
	Kopplung Arbeitsantrieb mit		nicht vorhanden	anderem Arbeitsantrieb	Primärmaschine	Sekundärmaschine	Primärspeicher	Sekundärspeicher	Verteilergetriebe			
	Elektrische Ladekonzepte - Arbeitsantrieb		nicht vorhanden	Fahrzeuginternes Ladekonzept		Übernacht Ladekonzept		"Opportunity Charging" Ladekonzept		Batteriewechsel		

Abb. 5-3: Erster Reduktionsschritt für das Papierkorbsammelfahrzeug

³⁹⁰ Vgl.: Kapitel 2.1.2.1

Für die Großkehrmaschine sind die energetischen Rahmenbedingungen deutlich anspruchsvoller und resultieren im reduzierten Lösungsraum in Abb. 5-4.

Antriebsstrangtyp		Elemente		Komponenten und Eigenschaften								
Antriebsstrang-konfiguration		Konventionelles Fahrzeug	Serieller Hybrid	Paralleler Hybrid	Kombinierter Hybrid	Leistungsverzweigter Hybrid	Elektro-fahrzeug					
Fahrertrieb	Primär-antrieb	Primärmaschine		Hubkolbenmotor		Gasturbine		Elektromaschine				
		Art des Primärspeichers		Kraftstofftank				Batterie		Brennstoffzelle mit Wasserstofftank		
	Sekundär-antrieb	Sekundärmaschine		nicht vorhanden		Hubkolbenmotor	Gasturbine	Hydraulikmaschine	Elektromaschine			
		Art des Sekundärspeichers		nicht vorhanden	mechanisches Schwungrad	Federspeicher	Kraftstofftank	pneumatischer Speicher	Batterie	Brennstoffzelle mit Wasserstofftank	elektromechanisches Schwungrad	Kondensator
	Kopplung Antriebswelle der Räder mit		Primärmaschine		Sekundärmaschine		Umschaltgetriebe		Verteilergetriebe			
	Elektrische Ladekonzepte - Fahrertrieb		nicht vorhanden	Fahrzeuginternes Ladekonzept	Übernacht Ladekonzept		"Opportunity Charging" Ladekonzept		Batteriewechsel			
Arbeitsaggregat	Energieform Arbeitsaggregat		mechanischer Verbraucher		pneumatischer Verbraucher		hydraulischer Verbraucher		elektrischer Verbraucher		chemischer Verbraucher	
	Arbeits-antrieb	Arbeitsmaschine		nicht vorhanden	Kompressor	Hubkolbenmotor	Gasturbine	Hydraulikmaschine	Elektromaschine			
		Art des Arbeitsspeichers		nicht vorhanden	mechanisches Schwungrad	Federspeicher	Kraftstofftank	pneumatischer Speicher	Batterie	Brennstoffzelle mit Wasserstofftank	elektromechanisches Schwungrad	Kondensator
	Kopplung Arbeitsantrieb mit		nicht vorhanden	anderem Arbeitsantrieb	Primärmaschine	Sekundärmaschine	Primärspeicher	Sekundärspeicher	Verteilergetriebe			
	Elektrische Ladekonzepte - Arbeitsantrieb		nicht vorhanden	Fahrzeuginternes Ladekonzept	Übernacht Ladekonzept		"Opportunity Charging" Ladekonzept		Batteriewechsel			

Abb. 5-4: Erster Reduktionsschritt für die Großkehrmaschine

Das Fahrzeug benötigt analog zu der oben genannten Abschätzungsmethode ca. 195 kWh je Schicht. Dies führt zu einem Energiespeichergewicht von 1 500 kg bei einer Energiedichte der Lithium-Ionen-Zellen von 160 Wh/kg³⁹¹ und 80 % Entladetiefe. Weiterhin kann von einem zusätzlich Gewicht von mindestens 500 kg für Gehäuse und Batteriemanagementsystem ausgegangen werden, welches die Fahrzeugnutzlast weiter reduziert. Durch den Fahrzeugbetrieb in zwei Schichten mit kurzen Pausen wird zur Umsetzung eines Elektrofahrzeugs ein Batteriewechselsystem oder eine Hochleistungs-Schnellladetechnologie notwendig. Bei angenommenen Batteriesystemkosten von mindestens 300 €/kWh³⁹² erreichen die Energiespeicher für zwei Schichten Kosten von mehr als 146 000 €. Ein Batteriesystem mit Eignung zum Hochleistungs-Schnellladen erreicht ähnliche Kostendimensionen.³⁹³ Dabei ist die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur nicht berücksichtigt. Aus den zuvor aufgezählten Gründen, sind rein-elektrische Konzepte mit Lithium-Ionen-Batterien als Primärspeicher für die Großkehrmaschine nicht weiter Teil der Lösungsmenge. Aus den Produktentwicklungszielen zum elektrischen Fahren und Anschluss

³⁹¹ Vgl.: Sauer et al. 2015, S. 4

³⁹² Batteriesystemkosten für Pkw nach Thielmann et al. 2012, S. 8; Sauer et al. 2016

³⁹³ Vgl.: Sauer et al. 2016, S. 6-13

an ein elektrisches Versorgungsnetz muss der Sekundärtrieb elektromotorisch umgesetzt werden. Somit werden Energiespeicher anderer Form aus der Lösungsmenge herausgenommen.

5.2.2 Schritt 2 – Qualitative Ausschlusskriterien

Im zweiten Reduktionsschritt des Verfahrens werden qualitative Kriterien zur Einschränkung der Lösungsmenge bewertet. Die verbleibenden Technologieoptionen werden dazu in interdisziplinären Expertenteams analysiert. Das Expertenteam³⁹⁴ sollte dazu die Bereiche Technik, Flottenbetrieb, Wirtschaftlichkeit und Umwelteinflüsse sowie Produktentwicklung und regulatorische Rahmenbedingungen abdecken können. Insbesondere werden die Inhalte der Anforderungsprofile³⁹⁵ aufgegriffen, die in Tab. 5-1 noch einmal für beide Anwendungsbeispiele zusammengefasst sind.

Tab. 5-1: Qualitative Anforderungen an die Fahrzeugtypen

Qualitative Anforderungen	Technik	Rein elektrisches Fahren möglich
		Rekuperation von Bremsenergie möglich
		Integration in das elektrische Versorgungsnetz möglich
	Betrieb	Beibehaltung aktueller Betriebsabläufe
		Angemessener Innovationsgrad für Kleinserienproduktionen (TRL 6)
		Vergleichbare Zuverlässigkeit mit dem konventionellen Fahrzeug
	Wirtschaftlichkeit	Vergleichbare TCO mit dem konventionellen Fahrzeug
	Umwelteinflüsse	Reduktion des Emissionsausstoßes
		Kraftstoffverbrauchsreduktion
		Geräuschemissionsreduktion

Die einzelnen Technologien und Konfigurationsmerkmale im morphologischen Kasten werden sukzessive abgearbeitet. Dabei werden die jeweiligen Vor- und Nachteile diskutiert. Das Projektteam einigt sich im Anschluss auf eine weitere Anwendung oder das Herausnehmen aus der Lösungsmenge. Die Ergebnisse werden einschließlich einer Entscheidungsbegründung systematisch und detailliert zur Transparenz und Reproduzierbarkeit dokumentiert. Für die Anwendungsbeispiele Papierkorbsammelfahrzeug und Großkehrmaschine soll im Folgenden anhand relevanter Beispiele das Vorgehen aufgezeigt werden.

Papierkorbsammelfahrzeuge sind Spezialfahrzeuge und werden typischerweise in Kleinserienproduktionen hergestellt. Durch den niedrigen Technologiereifegrad elektrifizierter Fahrzeuge bei diesem Fahrzeugtypen (TRL < 6)³⁹⁶ werden die komplexen Antriebsstrangkonfigurationen kombinierter Hybrid und leistungsverzweigter Hybrid aus der Lösungsmenge herausgenommen. Die Gasturbine als Verbrennungsmotor stellt für die Energiebereitstellung

³⁹⁴ Vgl.: Kapitel 3.2

³⁹⁵ Vgl.: Kapitel 4.4.3

³⁹⁶ Vgl.: Kapitel 4.1.3

im Fahrzeug beim Flottenbetreiber keine signifikante Verbesserung im Wirkungsgrad dar. Zusätzlich haben Gasturbinen schlechte dynamische Eigenschaften und eine starke Geräusentwicklung.³⁹⁷ Da der Flottenbetreiber aktuell nicht über Erfahrungen mit dieser Technologie verfügt, werden Gasturbinen nicht weiter betrachtet. Wasserstoffbrennstoffzellen sind eine weitere Alternative zur emissionsfreien Energiebereitstellung. Die Technologie wird jedoch ebenfalls ausgeschlossen, da die Betreiberanforderung eines ausreichenden Technologiereifegrads aktuell nicht gewährleistet werden und eine Integration ins elektrische Versorgungsnetz nur unverhältnismäßig aufwändig erfolgen kann. Neben dem elektrischen Energiespeicher weitere mechanische oder pneumatische Energiespeicher zu integrieren, erhöht den Komplexitätsgrad des Fahrzeugs ohne einen relevanten Nutzen zu generieren. Folglich werden diese ebenfalls aus der Lösungsmenge herausgenommen. Das Arbeitsaggregat eines Papierkorbsammelfahrzeugs ist ein Pressaufbau und wird über Hydraulikzylinder betätigt. Deshalb wird eine Hydraulikmaschine im Arbeitsantrieb benötigt. Die Hydraulikpumpe kann mechanisch angebunden oder über einen Elektromotor angetrieben sein. Da andere Energieformen im Antrieb nicht vorgesehen sind, werden diese entfernt. Nach Abschluss der Lösungsraumreduktion ergibt sich der morphologische Kasten für das Papierkorbsammelfahrzeug entsprechend Abb. 5-5.

Antriebsstrangtyp		Elemente		Komponenten und Eigenschaften							
Fahrerantrieb	Antriebsstrang-konfiguration			Serieller Hybrid	Paralleler Hybrid	Kombinierter Hybrid	Leistungsverzweigter Hybrid	Elektrofahrzeug			
	Primär-antrieb	Primärmaschine	Hubkolbenmotor	Gasturbine			Elektromaschine				
	Art des Primärspeichers	Kraftstofftank				Batterie					
	Sekundär-antrieb	Sekundärmaschine	nicht vorhanden		Hubkolbenmotor	Gasturbine			Elektromaschine		
		Art des Sekundärspeichers	nicht vorhanden			Kraftstofftank		Batterie	Brennstoffzelle mit Wesselstofftank	elektromechanisches Schwingungsd	Kondensator
	Kopplung Antriebswelle der Räder mit	Primärmaschine		Sekundärmaschine		Umschaltgetriebe			Verteilergetriebe		
	Elektrische Ladekonzepte - Fahrerantrieb			Fahrzeuginternes Ladekonzept		Übernacht Ladekonzept	"Opportunity Charging" Ladekonzept		Batteriewechsel		
Arbeitsaggregat	Energieform Arbeitsaggregat	mechanischer Verbraucher		pneumatischer Verbraucher		hydraulischer Verbraucher		elektrischer Verbraucher		chemischer Verbraucher	
	Arbeitsmaschine					Hydraulikmaschine		Elektromaschine			
	Art des Arbeitsspeichers	nicht vorhanden									
	Kopplung Arbeitsantrieb mit				Primärmaschine	Sekundärmaschine	Primärspeicher	Sekundärspeicher	Verteilergetriebe		
	Elektrische Ladekonzepte - Arbeitsantrieb	nicht vorhanden									

Abb. 5-5: Zweiter Reduktionsschritt für das Papierkorbsammelfahrzeug

³⁹⁷ Vgl.: Kapitel 2.1.3.1

Die Großkehrmaschine wird unter vergleichbaren Rahmenbedingungen und unter Anwendung der gleichen qualitativen Ziele und Anforderungen entwickelt. Dementsprechend ergeben sich für den Fahrtrieb im oberen Bereich des morphologischen Kastens identische Einschränkungen. Im direkten Vergleich der Fahrzeugtypen wird das Arbeitsaggregat unter unterschiedlichen Bedingungen betrieben. Zusätzliche Möglichkeiten bei der Großkehrmaschine eröffnet die rotierenden Aggregate vollständig elektrisch umzusetzen und die Hydraulik zu substituieren. Durch den hohen Energiebedarf des Arbeitsaggregats kann die Energie ebenfalls mit einem eigenständigen Diesellaggregat bereitgestellt werden. Speicher mit weiteren Energieformen werden zur Reduktion der Komplexität auch hier aus dem Lösungsraum ausgeschlossen. Dementsprechend verbleiben Kraftstofftank, Batterie und Kondensator als Möglichkeiten zur unabhängigen Energiebereitstellung für das Arbeitsaggregat. Eine weitere Möglichkeit ist die Energie über eine Verbindung zum Fahrtrieb zu beziehen, sodass kein eigenständiger Energiespeicher nötig wird. Der reduzierte Lösungsraum nach dem zwei-stufigen Verfahren für die Großkehrmaschine ist in Abb. 5-6 dargestellt.

Antriebsstrangtyp		Elemente		Komponenten und Eigenschaften							
Fahrtrieb	Antriebsstrang-konfiguration			Serieller Hybrid	Paralleler Hybrid	Kombinierter Hybrid	Leistungsverzweigter Hybrid				
	Primär-antrieb	Primärmaschine	Hubkolbenmotor		Gasmaschine						
		Art des Primärspeichers	Kraftstofftank								
	Sekundär-antrieb	Sekundärmaschine						Elektromaschine			
		Art des Sekundärspeichers						Batterie	Brennstoffzelle mit Wasserstofftank	elektromechanisches Schwungrad	Kondensator
	Kopplung Antriebswelle der Räder mit		Primärmaschine		Sekundärmaschine	Umschaltgetriebe		Verteilergetriebe			
Elektrische Ladekonzepte - Fahrtrieb	nicht vorhanden		Fahrzeuginternes Ladekonzept		Übernacht Ladekonzept	"Opportunity Charging" Ladekonzept		Batteriewechsel			
Arbeitsaggregat	Energieform Arbeitsaggregat		mechanischer Verbraucher		pneumatischer Verbraucher	hydraulischer Verbraucher	elektrischer Verbraucher	chemischer Verbraucher			
	Arbeits-antrieb	Arbeitsmaschine	nicht vorhanden	Kompressor	Hubkolbenmotor	Gasmaschine	Hydraulikmaschine	Elektromaschine			
		Art des Arbeitsspeichers	nicht vorhanden	mechanisches Schwungrad	Federspeicher		Kraftstofftank	pneumatischer Speicher	Batterie	Brennstoffzelle mit Wasserstofftank	elektromechanisches Schwungrad
	Kopplung Arbeitsantrieb mit	nicht vorhanden	anderem Arbeitsantrieb	Primärmaschine	Sekundärmaschine	Primärspeicher	Sekundärspeicher	Verteilergetriebe			
	Elektrische Ladekonzepte - Arbeitsantrieb	nicht vorhanden		Fahrzeuginternes Ladekonzept		Übernacht Ladekonzept	"Opportunity Charging" Ladekonzept		Batteriewechsel		

Abb. 5-6: Zweiter Reduktionsschritt für die Großkehrmaschine

5.3 Generierung von Konzepten

Innerhalb der fahrzeugspezifisch reduzierten morphologischen Kästen werden in diesem Prozessschritt Topologiekonzepte entwickelt. Dazu werden die verbleibenden Teillösungen

Blockdiagramm nach der Nomenklatur in Abb. 5-8 sowie eine detaillierte Funktionsbeschreibung als Grundlage für die Vorselektion im interdisziplinären Team.³⁹⁹

Die Konzeptgenerierung für das Papierkorbsammelfahrzeug ist insbesondere bei den Varianten des Arbeitsaggregat-Antriebsstrangs eingeschränkt. Nur die zwei Lösungen, die eines elektro-hydraulischen Arbeitsaggregats mit elektrischer Energieübertragung und die eines hydraulischen Arbeitsaggregats mit mechanischer Energieübertragung sind möglich. Dementsprechend muss jeweils eine passende Schnittstelle zur Energieübertragung vom Fahrtrieb bereitgestellt werden. Als grundsätzlich unterschiedliche Fahrzeugarchitekturen wurden für das Papierkorbsammelfahrzeug ein Elektrofahrzeugkonzept, vier Parallel-Hybridkonzepte und vier Seriell-Hybridkonzepte identifiziert. Je Architektur entstehen mehrere Varianten, wie beispielsweise die Auswahl von Batterie oder Kondensator als elektrischer Energiespeicher sowie langsamem und/oder Schnellladen bzw. Batteriewechsel als Energiebereitstellungskonzept. Insgesamt ergeben sich 60 Konzepte für elektrifizierte Papierkorbsammelfahrzeuge.

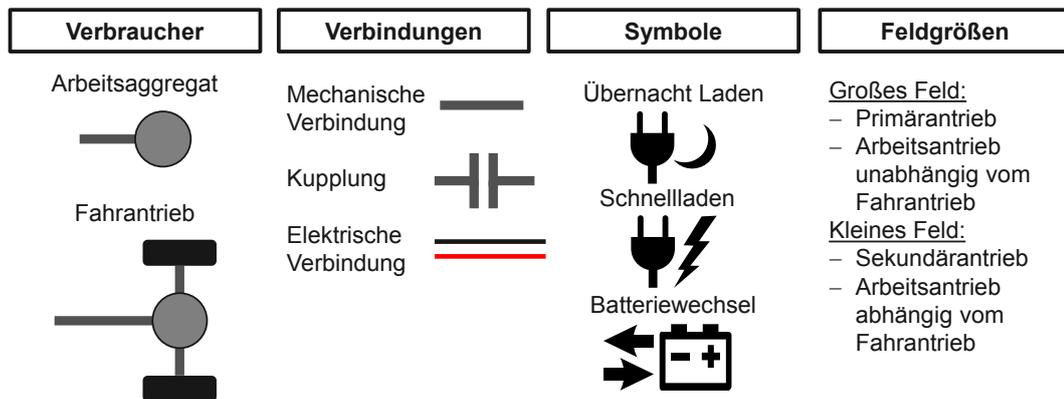


Abb. 5-8: Nomenklatur für die Konzeptdarstellung in Blockdiagrammen

Durch die signifikant unterschiedlichen Energiebedarfe bei der Großkehrmaschine werden in diesem Anwendungsbeispiel, wie zuvor beschrieben, Fahrtrieb und Aufbau separat betrachtet und anschließend kombiniert. Dabei entstehen für den Fahrtrieb fünf unterschiedliche Architekturen mit insgesamt sieben Varianten. Der Arbeitsantrieb ermöglicht für diesen Fahrzeugtypen neun Architekturen, welche insgesamt 46 Ausprägungen zulassen. Die Gesamtsumme der entwickelten Konzepte für die Großkehrmaschine ergibt sich somit zu 322. Abb. 5-9 zeigt die unterschiedlichen Berechnungswege der Fahrzeugarchitekturen im Vergleich.

³⁹⁹ Vgl.: Kapitel 3.2

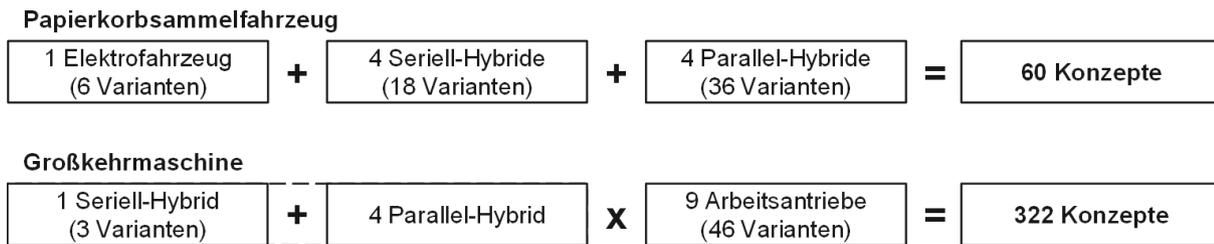


Abb. 5-9: Entwickelte Fahrzeugsystemarchitekturen der Anwendungsbeispiele

5.4 Vorselektion der Topologien zur Bewertung

Nachdem alle Topologien der Elektrifizierungskonzepte zusammengestellt wurden, werden diese zur Begrenzung der Entscheidungsalternativen für die anschließende Bewertung einem Vorselektionsprozess unterzogen. Ziel des Prozessschrittes ist, alle ungeeigneten oder ersichtlich benachteiligten Konzepte frühzeitig aus der Lösungsmenge herauszunehmen. Dadurch werden die Bewertungsalternativen reduziert und so der Arbeitsumfang der Bewertungsprozesse verringert.⁴⁰⁰ Nach Pahl/Beitz kann dies bei zahlreichen Lösungsvorschlägen mit Hilfe einer Auswahlliste umgesetzt werden und sollte schon nach dem Aufstellen von Funktionsstrukturen, aber auch bei allen folgenden Schritten der Lösungssuche, durchgeführt werden.⁴⁰¹ Dazu werden die folgenden Kriterien überprüft:⁴⁰²

- Konzept ist mit der Aufgabe und in sich verträglich
- Die Forderungen der Anforderungsliste sind erfüllt
- Die Realisierungsmöglichkeit hinsichtlich Wirkungshöhe, Größe, notwendiger Anordnung usw. ist gegeben
- Ein zulässiger Aufwand ist zu erwarten
- Im paarweisen Vergleich ist ein Konzept bei ähnlichen Konfigurationen eindeutig zu bevorzugen

In Experten-Workshops werden die erarbeiteten Konzepte anhand der Kriterien überprüft. Die Zusammenstellung der Teams sollte die gleichen Themenschwerpunkte entsprechend der Reduktion des Lösungsraums abdecken können.⁴⁰³ Bestmöglich war der Personenkreis bereits in die vorhergehenden Prozessschritte involviert. Hier werden nun vollständige Fahrzeugkonzepte und deren Konfiguration analysiert. Auf Grundlage der detaillierten Dokumentationen und grafischen Darstellungen zu den einzelnen Fahrzeugkonzepten werden jeweils Vor- und Nachteile diskutiert, sodass Entscheidungen zur Auswahl von vielversprechenden Lösungen getroffen werden können. Nach Abschluss des Prozesses ergibt sich eine deutlich reduzierte Anzahl von Konzepten unterschiedlicher Technologie-

⁴⁰⁰ Vgl.: Kapitel 2.2.3.3

⁴⁰¹ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 162-163

⁴⁰² Vgl.: Ponn/Lindemann 2011; Feldhusen/Grote 2013, S. 162

⁴⁰³ Vgl.: Kapitel 5.2.2

kombinationen. Diese werden als Eingangsgröße für den anschließenden Bewertungsprozess benötigt.

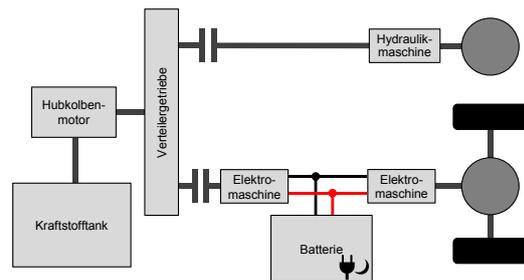
Nach Abschluss der Vorselektion und damit auch des gesamten Konzeptentwicklungsprozesses ergeben sich für das Papierkorbsammelfahrzeug neun unterschiedliche Vorschläge. Die weitere Reduzierung der Gesamtlösungen resultiert bei diesem Fahrzeugtypen insbesondere aus drei Entscheidungen. Durch die seltene Betätigung des Arbeitsaggregats ist die Leistungsübertragung über eine Elektro-Hydraulik durch höhere Wirkungsgrade und geringere Komplexität gegenüber einem mechanischen Nebenantrieb zu bevorzugen. Außerdem ist nach der Konzeptgenerierung ein paarweiser Vergleich unterschiedlicher Ladekonzepte möglich. Einige aufwändige Technologien, wie Batteriewechsel oder Schnellladen, können zu diesem Zeitpunkt bereits auf Basis einer qualitativen Abschätzung bei einigen Konzepten ausgeschlossen werden. Zusätzlich wurde auf das weitere Ausgestalten von Konzepten mit Kondensator-Energiespeicher verzichtet, da der Nutzen nicht die zusätzlichen Kosten rechtfertigt.

Als Ergebnis für das Papierkorbsammelfahrzeug und als Eingangsgröße für die Technologiebewertung werden nun entsprechend Abb. 5-10 ein Elektrofahrzeugkonzept mit elektro-hydraulischem Nebenantrieb, jeweils mit Batteriewechsel- oder Schnellladetechnologie und ein Plug-in Parallel-Hybrid-Fahrzeugkonzept ebenfalls mit elektro-hydraulischem Nebenantrieb und optionalem Schnellladen vorgeschlagen. Zusätzlich werden ein Plug-in Seriell-Hybridfahrzeugkonzept als Range-Extended-Electric-Vehicle (REEV) optional mit Schnelllade- oder Batteriewechseltechnologie und zwei Plug-in Seriell-Hybridfahrzeugkonzepte mit kleinerem Batteriespeicher jeweils mit elektro-hydraulischem oder hydraulischem Arbeitsaggregat empfohlen.

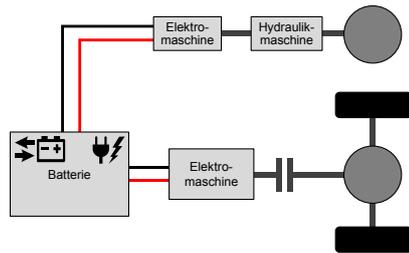
Die Vorselektion führte bei der Großkehrmaschine zu zehn unterschiedlichen Elektrifizierungskonzepten als Ergebnis einer separaten Untersuchung von Fahrtrieb und Arbeitsaggregat. Die nochmals deutliche Reduktion der Gesamtlösungen nach der Konzeptgenerierung ergibt sich nun insbesondere aus der Prüfung der Kompatibilität unterschiedlicher Fahr- und Arbeitsantriebe. Zusätzlich wurden wie bereits beim Papierkorbsammelfahrzeug die Ladesysteme und der Einsatz von kapazitiven Energiespeichern im Gesamtfahrzeugkontext analysiert. Für die Großkehrmaschine wurde außerdem relevant, dass mit einigen Gesamtfahrzeugkonzepten kein elektrisches Fahren umsetzbar ist. Einige Konzepte weisen eine sehr hohe Komplexität durch mehrere Dieselmotoren und zusätzlich mehrere Energiespeicher auf, welche dem Fahrzeugsegment und dem aktuellen Technologiereifegrad nicht gerecht werden. Weiterhin können in den Gesamtfahrzeugkonzepten die resultierenden Wirkungsgradketten betrachtet werden. Ergibt die Analyse eine hohe Anzahl verlustbehafteter Energiewandlungen bzw. energetisch ungünstige Betriebspunkte für die Motoren, sind deutlich benachteiligte Konzepte auszuschließen.



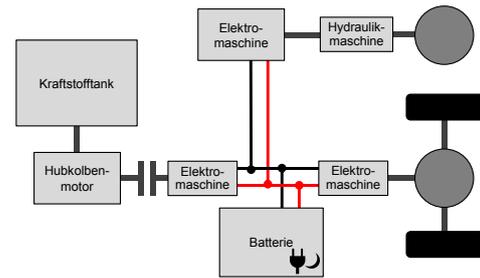
Elektrifizierungskonzepte für das
Papierkorbsammelfahrzeug



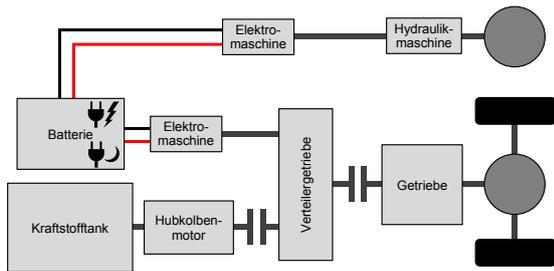
Seriell-Hybrid-Konzept 1 mit
Langsamladung



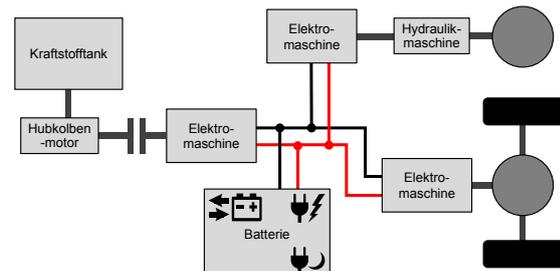
Elektrofahrzeugkonzept mit
Batteriewechsel / Schnellladung



Seriell-Hybrid-Konzept 3 mit
Langsamladung



Parallel-Hybrid-Konzept 3 mit
Langsam- / Schnellladung



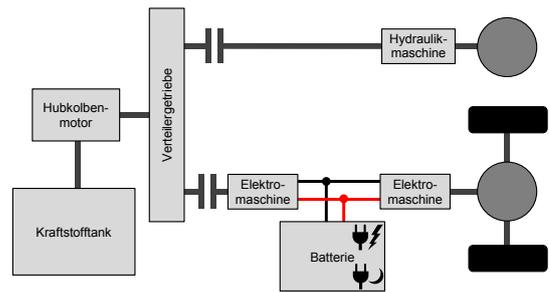
REEV Seriell-Hybrid-Konzept 4 mit
Langsam- / Schnellladung / B.-Wechsel

Abb. 5-10: Elektrifizierungskonzepte für das Papierkorbsammelfahrzeug

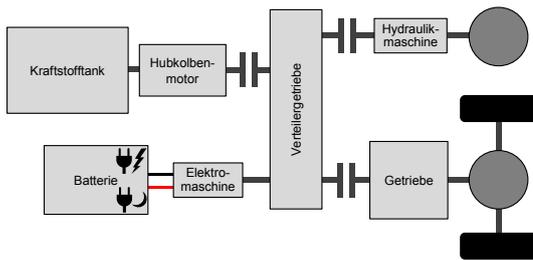
Abb. 5-11 zeigt die zehn erarbeiteten Konzepte des Entwicklungsprozesses als Antriebstopologien für die Großkehrmaschine. Zwei Plug-in Parallel-Hybridkonzepte mit dem Arbeitsaggregat angetrieben über einen separaten Getriebeausgang des Fahrtriebs sowie mit eigenem Dieselmotor wurden erarbeitet. Außerdem entstanden drei Plug-in Seriell-Hybridkonzepte, welche die Arbeitsaggregatsantriebe identisch umsetzen sowie ein weiteres Konzept mit elektrischem Betrieb des Arbeitsaggregats über den Sekundärspeicher des Fahrtriebs. Alle Konzepte können jeweils optional mit Schnellladetechnologie für den Batteriespeicher ausgestattet werden.



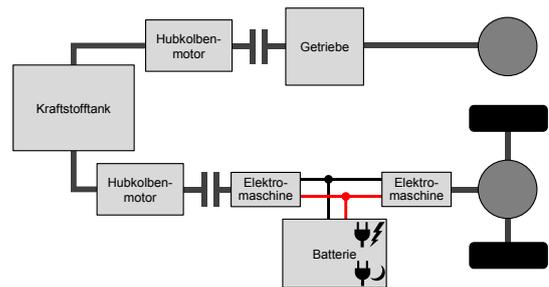
Elektrifizierungskonzepte für die Großkehrmaschine



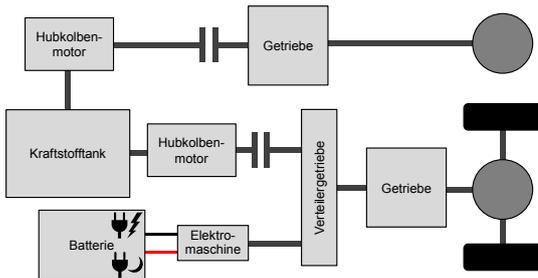
Seriell-Hybrid-Konzept 1 mit Langsam- / Schnellladung



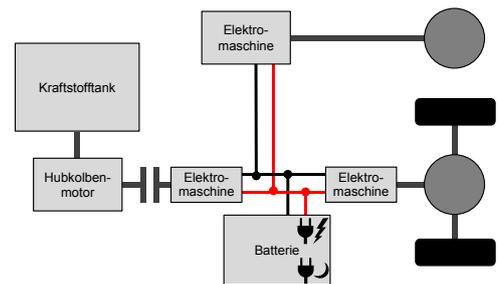
Parallel-Hybrid-Konzept 1 mit Langsam- / Schnellladung



Seriell-Hybrid-Konzept 2 mit Langsam- / Schnellladung



Parallel-Hybrid-Konzept 2 mit Langsam- / Schnellladung



Seriell-Hybrid-Konzept 3 mit Langsam- / Schnellladung

Abb. 5-11: Elektrifizierungskonzepte für die Großkehrmaschine

6 Bewertung der Konzepte

Nach der Entwicklung umsetzbarer Elektrifizierungskonzepte für einzelne Fahrzeugtypen werden die Konzepte im abschließenden Schritt dieser Arbeit auf Zielerfüllung der Anforderungen überprüft, um die geeignetsten und vielversprechendsten Lösungen zu identifizieren. Abb. 6-1 stellt den Bewertungsprozess sowie die benötigten Eingangsgrößen, wie bereits in Kapitel 3.2.3 vorgestellt, dar. Deutlich hervorgehoben sind die Prozessschritte der morphologischen Nutzwertanalyse, auf die im Rahmen dieser Arbeit ein besonderer Schwerpunkt aufgrund des wissenschaftlichen Neuheitsgrads gelegt wird. Die starke Orientierung des Prozesses an der morphologischen Analyse verbessert die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit des Bewertungsverfahrens bei gleichzeitiger Reduktion des Aufwandes und höherem Konkretisierungsgrad der Ergebnisse. Der vorgestellte Prozess hat einen ausgeprägten interdisziplinären Charakter und wird in dieser Arbeit in Teams aus verschiedenen Bereichen des Flottenbetreibers und externen Technologie-Experten durchgeführt.⁴⁰⁴

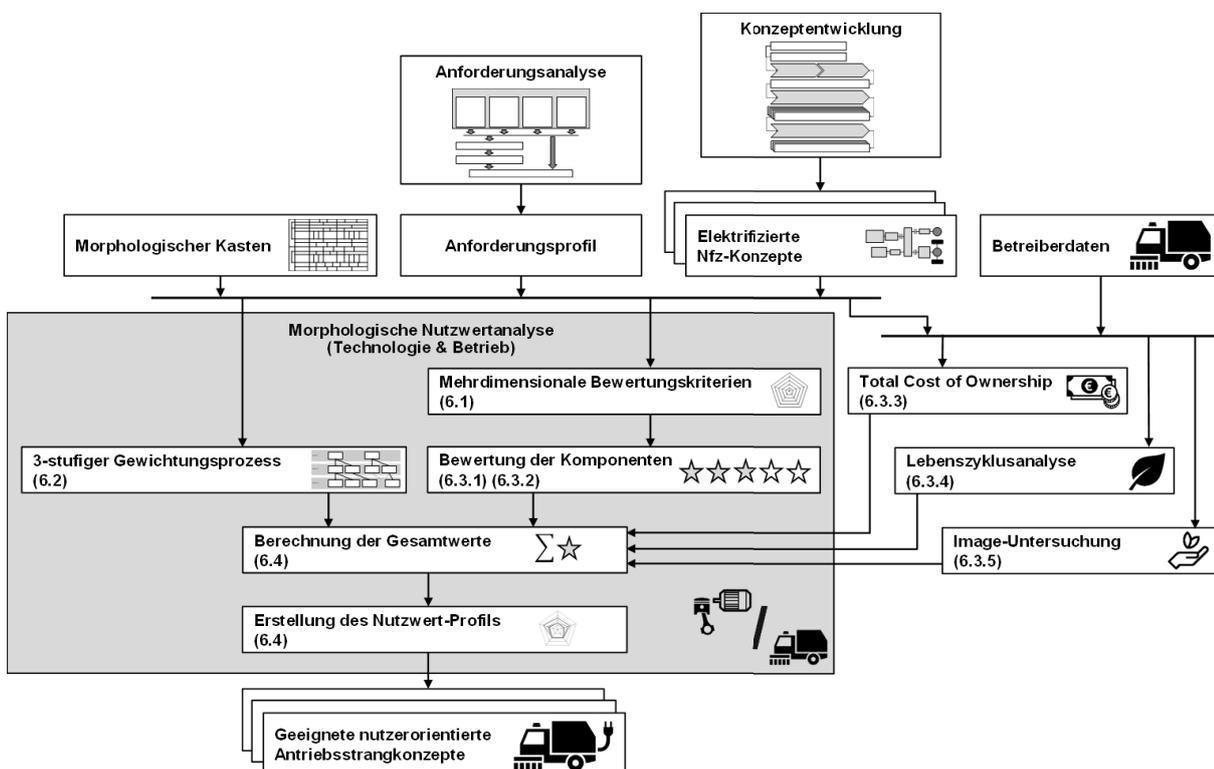


Abb. 6-1: Bewertungsprozess mit mehrstufiger morphologischer Nutzwertanalyse⁴⁰⁵

Im Bewertungsprozess der morphologischen Nutzwertanalyse werden ausgehend vom Anforderungsprofil und den definierten Zielen der Konzeptentwicklung Bewertungskriterien (6.1) in mehreren Dimensionen festgelegt. Im Anschluss folgt die Gewichtung (6.2) der Bewertungskriterien sowie die Definition der Relevanz einzelner Fahrzeugsystem-

⁴⁰⁴ Vgl.: Kapitel 3.2

⁴⁰⁵ Vorgestellt in Kapitel 3.2.3

Bestandteile. Parallel wird die Bewertung (6.3) in den einzelnen Dimensionen durchgeführt. Dabei werden sukzessiv Analogien zu anderen Fahrzeugklassen analysiert und auf die Anwendungsbeispiele übertragen.⁴⁰⁶

Bestandteile der ganzheitlichen Bewertung der Fahrzeugkonzepte sind zusätzlich Gesamtkostenbetrachtungen (6.3.2), Umwelteinflussanalysen (6.3.4) und Untersuchungen der Rückwirkungen auf das Unternehmens-Image (6.3.5). Die Bewertungsergebnisse zusammen mit den Gewichtungsfaktoren ergeben die Gesamtwerte je Elektrifizierungskonzept. Diese werden übersichtlich und vergleichend in Nutzwert-Profilen (6.4) als Radar-Diagramm aufbereitet.

6.1 Dimensionen der Bewertung und Bewertungskriterien

Im ersten Prozessschritt werden Bewertungskriterien anhand der Anforderungsprofile sowie entscheidungsrelevanter Konzeptentwicklungsziele festgelegt. Durch die Definition verschiedener Bewertungsdimensionen wird sichergestellt, dass relevante Anforderungen berücksichtigt werden und das Ergebnis nicht durch bestimmte Optimierungsgrößen, wie beispielsweise Kosten, dominiert wird.⁴⁰⁷ Für die Bewertung der Elektrifizierungskonzepte in dieser Methodik werden die folgenden Bewertungsdimensionen unterschieden:⁴⁰⁸

- Technologie
- Betrieb
- Wirtschaftlichkeit
- Umwelteinflüsse
- Unternehmens-Image

Die Bewertungsdimension Technologie beurteilt dabei die Funktionsfähigkeit des Systems. Dazu wird untersucht, ob das Konzept den technischen Anforderungen entspricht und dabei als System möglichst gute Robustheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer aufweist. Zusätzlich soll ein hoher energetischer Wirkungsgrad erzielt werden.

Für Flottenbetreiber ist der reibungslose Ablauf der Fahrzeugumläufe besonders relevant. Demnach müssen neue technische Systeme in bestehende Betriebsabläufe integriert werden können und Einschränkungen bei wichtigen Kenngrößen, wie beispielsweise Nutzlasten minimiert werden. Zusätzlich sind Aufwände und Risiken in der Wartung zu reduzieren und Mitarbeiter durch Geräusche und Schadstoffe geringstmöglich zu belasten.

Technische Entscheidungen unterliegen dem ökonomischen Rationalprinzip, das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand zu maximieren. Damit eine Wirtschaftlichkeit sichergestellt werden kann, wird Kostenminimierung bei Anschaffungs- und Betriebskosten angestrebt.

⁴⁰⁶ Vgl.: Proff et al. 2014, S. 18

⁴⁰⁷ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 167; Breiing/Knosala 1997, S. 241

⁴⁰⁸ Angelehnt an Verein Deutscher Ingenieure 2000, S. 12-25

Weitere wichtige Aspekte sind durch den Einsatz technischer Systeme verursachte Umwelteinflüsse. Die Betrachtung schließt dabei globale Effekte, wie Treibhausgasemissionen und lokale Effekte, wie Luftschadstoffe und Lärmemissionen ein. Zusätzlich ist die Energieintensität bei Produktion und Recycling des technischen Systems zu bewerten.

Die abschließende Bewertungsdimension analysiert Effekte eines innovativen Systems auf das Unternehmens-Image. Diese können Rückwirkungen auf das Einnehmen einer Vorreiterrolle, Erhöhung der Akzeptanz und verbesserte Mitarbeitermotivation haben.

Eine Übersicht der relevanten Bewertungskriterien zeigt Tab. 6-1. Die Bewertungskriterien werden in Kapitel 6.3 spezifisch nach Bewertungsdimension beschrieben und ähnliche Kriterien voneinander abgegrenzt.

Tab. 6-1: Kriterien der fünf Bewertungsdimensionen

Technologie	Betrieb	Wirtschaftlichkeit	Umwelteinflüsse	Image
<ul style="list-style-type: none"> • Wirkungsgrad • Komplexität • Wartungsintensität • Elektrifizierungsgrad • Rekuperationsmöglichkeit • Drehmoment-/Leistungsdichte • Robustheit • Temperatureinsatzbereich • Smart Grid Funktionalität • Flexibilität 	<ul style="list-style-type: none"> • Wartungsintensität • Elektrifizierungsgrad • Lokale Emissions- & Lärmreduktion • Temperatureinsatzbereich • Flexibilität • Einschränkung Nutzlast / -volumen • Integrierbarkeit in Betriebsabläufe • Handling 	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebskosten • Anschaffungskosten • Komplexität • Prognose der Kostentreiber • Risikoabschätzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Treibhausgasreduktion • Schadstoffreduktion • Lärmreduktion • Eigennutzung erneuerbarer Energien 	<ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeitermotivation • Einnahme Vorreiterrolle • Außenwirkung • Akzeptanzsteigerung

6.2 Mehrstufiger Gewichtungprozess und Ermittlung der Gewichtungsfaktoren

Die Bewertungsdimensionen Technologie und Betrieb werden in dieser Arbeit mit Hilfe der morphologischen Nutzwertanalyse bewertet. Eine Besonderheit der morphologischen Nutzwertanalyse ist der Gewichtungprozess, da sich die entwickelte Ziel-Hierarchie an der Struktur des morphologischen Kastens orientiert. Dazu wird die Beeinflussung der Bewertungsergebnisse durch Komponenten und Eigenschaften der Fahrzeugsysteme beurteilt und Kriterien relevanten Zeilen des morphologischen Kastens zugeordnet. Der Gewichtungprozess unterscheidet drei Ebenen entsprechend Abb. 6-2.

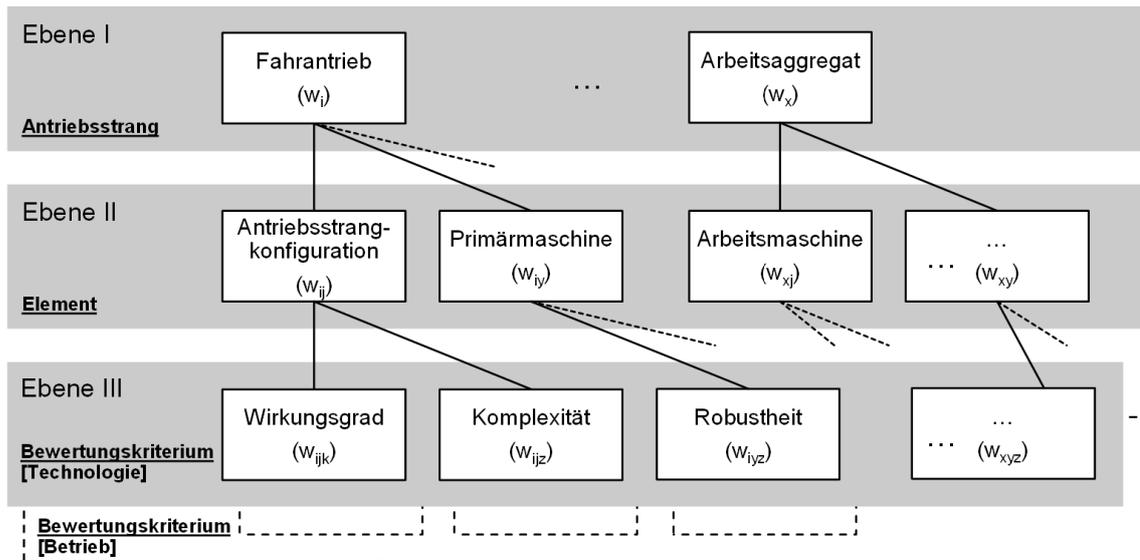


Abb. 6-2: Dreistufige Gewichtungshierarchie des morphologischen Kastens

Auf der **ersten Ebene** werden die unterschiedlichen Antriebsstränge für Vortrieb und Arbeitsaggregate ins Verhältnis gesetzt. Zur besseren Darstellbarkeit und geringerer Komplexität wird für die Anwendungsbeispiele in dieser Arbeit nur das jeweils energieintensivste Arbeitsaggregat berücksichtigt. Die Methode ermöglicht jedoch den Einbezug mehrerer Arbeits- und Nebenaggregate im Bewertungsprozess ohne Beeinträchtigung der Funktionalität. Für die Gewichtung werden dazu die Energiebedarfe sowie die Anschaffungskosten von Fahrgestell beziehungsweise des Arbeitsaggregats ausgewertet. Abb. 6-3 zeigt die Ergebnisse für die Anwendungsbeispiele Papierkorbsammelfahrzeug und Großkehrmaschine.

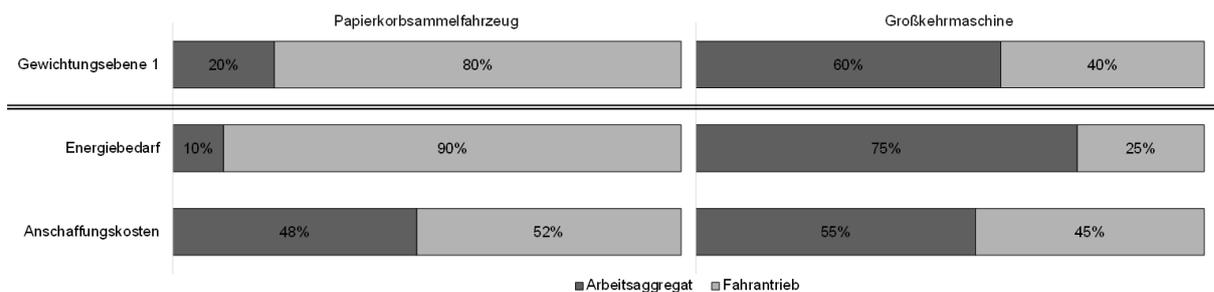


Abb. 6-3: Gewichtungsergebnisse der Anwendungsbeispiele auf Ebene I

Die Energiebedarfe der Anwendungsbeispiele und insbesondere die Aufteilung zwischen Arbeitsaggregat und Fahrtrieb unterscheiden sich deutlich, wie bereits in Kapitel 4.4.2 beschrieben. Werden jedoch die Kostenanteile von Fahrzeug und Arbeitsaggregat verglichen, ist der Unterschied zwischen den Fahrzeugen nicht so ausgeprägt. Infolgedessen wurde ein integrativer Ansatz bei den Fahrzeugen gefunden, der beide Aspekte einbezieht, um eine realistische Entscheidungsgrundlage zu bilden.

Die **zweite Ebene** gewichtet die Elemente des morphologischen Kastens zueinander. Dazu werden im Bewertungsteam⁴⁰⁹ paarweise Vergleiche in Präferenzmatrizen durchgeführt.⁴¹⁰ Alle relevanten und grundsätzlich unterschiedlichen Antriebsstrangkonfigurationen müssen dabei berücksichtigt und unterschieden werden.⁴¹¹ Die Ergebnisse für den Fahrtrieb sowie das Arbeitsaggregat der Bewertungsdimension Technologie sind in Tab. 6-2 exemplarisch dargestellt.

Tab. 6-2: Exemplarische Gewichtungsergebnisse der Ebene II für Technologie

Fahrtrieb	Antriebsstrangkonfiguration				Arbeitsaggregat	Arbeitsaggregat		
	Konventionelle Antriebsstrangkonfiguration	Elektrische Antriebsstrangkonfiguration	Seriell-Hybrid Antriebsstrangkonfiguration	Parallel-Hybrid Antriebsstrangkonfiguration		Arbeitsaggregat ohne eigenen Energiespeicher & Ladekonzept mit Kopplung zum Fahrtrieb	Arbeitsaggregat ohne Kopplung zum Fahrtrieb	Arbeitsaggregat mit eigenem Energiespeicher & Ladekonzept mit Kopplung zum Fahrtrieb
Antriebsstrangkonfiguration	8.3%	5.0%	26.2%	26.2%				
Primärmaschine	41.7%	30.0%	16.7%	21.4%	Energieform Arbeitsaggregat	33.3%	8.3%	20.0%
Art des Primärspeichers	41.7%	30.0%	16.7%	21.4%	Arbeitsmaschine	33.3%	16.7%	20.0%
Sekundärmaschine	-	-	16.7%	7.1%	Art des Arbeitsspeichers	-	41.7%	15.0%
Art des Sekundärspeichers	-	-	7.1%	7.1%	Kopplung Arbeitsantrieb mit	33.3%	-	35.0%
Kopplung Antriebswelle der Räder mit	8.3%	5.0%	2.4%	9.5%	Elektrische Ladekonzepte - Arbeitsantrieb	-	33.3%	10.0%
Elektrische Ladekonzepte - Fahrtrieb	-	30.0%	14.3%	7.1%				

Die Auswahl der Antriebsstrangkonfiguration ist für Funktion und Betrieb der Fahrzeugsysteme entscheidend und definiert die Relevanz der einzelnen Komponenten der Antriebe. Deutlich erkennbar sind beispielsweise nicht vorhandene sekundäre Fahrtriebe bei konventionellen und elektrischen Fahrzeugen. Außerdem wird die höhere Bedeutung des Primärtriebs bei seriellen Hybridantrieben durch die hintereinander geschalteten Komponenten abgebildet. Das elektrische Ladekonzept der Fahrzeuge hat durch die geforderte Smart Grid Funktionalität der Konzepte ebenfalls eine relativ hohe Gewichtung. Im Vergleich dazu zeigt Tab. 6-3 die Gewichtungen auf der zweiten Ebene in der Bewertungsdimension Betrieb. Die Unterschiede in den Gewichtungsfaktoren entstehen durch verschiedene Schwerpunkte. So existieren bei dieser Bewertung für Systemkonzepte keine Bewertungskriterien, die durch die Anbindung des Antriebs an die Räder beeinflusst werden. Im Gegensatz dazu wirken sich z.B. die Ladesysteme, Energiespeicher und elektrische Motoren stark auf Betriebsabläufe, verfügbare Nutzlasten oder Geräuschbelastungen der Fahrzeugnutzer aus.

⁴⁰⁹ Vgl.: Kapitel 3.2

⁴¹⁰ Vgl.: Breiing/Knosala 1997, S. 160

⁴¹¹ Vgl.: Kapitel 5.1

Tab. 6-3: Exemplarische Gewichtungsergebnisse der Ebene II für Betrieb

Fahrertrieb	Arbeitsaggregat			
	Konventionelle Antriebsstrangkonfiguration	Elektrische Antriebsstrangkonfiguration	Seriell-Hybrid Antriebsstrangkonfiguration	Parallel-Hybrid Antriebsstrangkonfiguration
Antriebsstrangkonfiguration	33.3%	8.3%	33.3%	33.3%
Primärmaschine	33.3%	25.0%	16.7%	20.0%
Art des Primärspeichers	33.3%	41.7%	16.7%	20.0%
Sekundärmaschine	-	-	13.3%	6.7%
Art des Sekundärspeichers	-	-	6.7%	6.7%
Kopplung Antriebswelle der Räder mit	-	-	-	-
Elektrische Ladekonzepte - Fahrertrieb	-	25.0%	13.3%	13.3%

Arbeitsaggregat	Arbeitsaggregat ohne eigenen Energiespeicher & Ladekonzept mit Kopplung zum Fahrertrieb		
	Energieform Arbeitsaggregat	Arbeitsmaschine	Art des Arbeitsspeichers
Energieform Arbeitsaggregat	50.0%	8.3%	33.3%
Arbeitsmaschine	50.0%	16.7%	25.0%
Art des Arbeitsspeichers	-	41.7%	25.0%
Kopplung Arbeitsantrieb mit	-	-	-
Elektrische Ladekonzepte - Arbeitsantrieb	-	33.3%	16.7%

In der **dritten Ebene** wird die Relevanz der einzelnen Bewertungskriterien eines spezifischen Elements im morphologischen Kasten beurteilt. Die einzelnen Bewertungsebenen werden in interdisziplinären Teams⁴¹² analysiert und Gewichtungswerte festgelegt. Abb. 6-4 zeigt exemplarisch die Gewichtungshierarchie für die Arbeitsmaschine im Arbeitsaggregat-Antriebsstrang. Analog wird der Gewichtungsprozess für jedes Element des morphologischen Kastens durchgeführt.

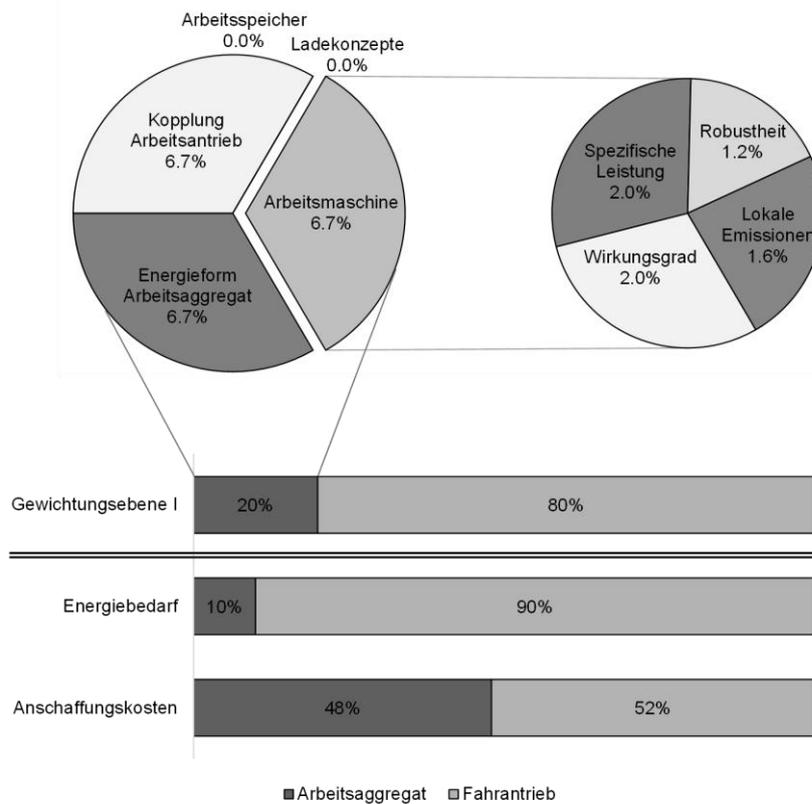


Abb. 6-4: Gesamtstruktur der Gewichtungshierarchie an einem Beispiel

⁴¹² Vgl.: Kapitel 3.2

6.3 Bewertung der Konzepte

Parallel zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren wird die Bewertung der Dimensionen Technologie und Betrieb in der morphologischen Nutzwertanalyse durchgeführt. Der idealisierte Bewertungsprozess ist schematisch in Abb. 6-5 dargestellt und wird jeweils in spezifischen Expertengruppen mit einem Bewertungsverantwortlichen (BV) durchlaufen.

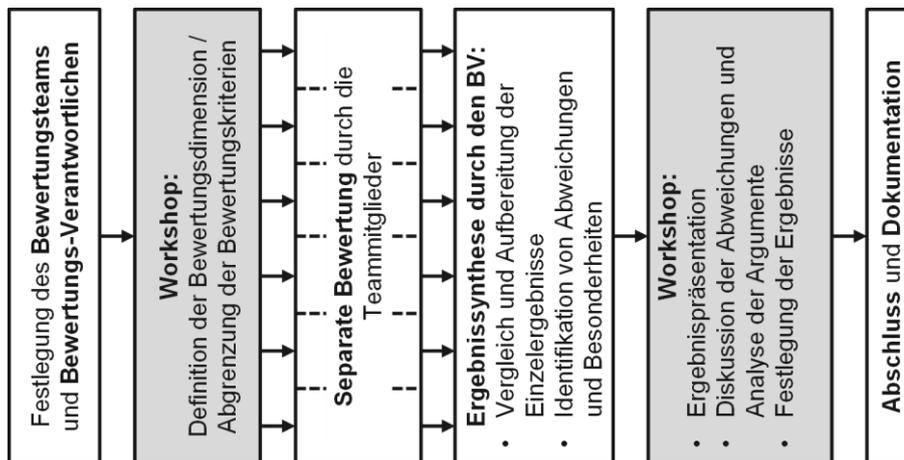


Abb. 6-5: Schematische Prozessdarstellung zur Entscheidungsfindung

Im Bewertungsprozess werden zunächst die Bewertungsteams sowie ein Verantwortlicher für die Durchführung in einer Dimension, möglichst mit hoher fachlicher Expertise, festgelegt. In einem Workshop werden die Bewertungsdimension und -kriterien definiert, sowie Abgrenzungen zu weiteren Dimensionen und Kriterien geklärt. Die Bewertungskriterien der zugeordneten Bewertungsdimensionen werden im Anschluss separat von den Teammitgliedern beurteilt. Dementsprechend werden alle technischen Ausprägungen der Komponenten und Eigenschaften auf Zielerfüllung der Bewertungskriterien untersucht.

Der Bewertungsverantwortliche führt die Ergebnisse zusammen, erstellt empirische Mittelwerte und bereitet die Ergebnisse anschaulich auf, mit dem Ziel Besonderheiten und signifikante Abweichungen zu identifizieren. In einem weiteren Workshop werden diese präsentiert und im Team die Bewertungsergebnisse z.B. anhand des Mittelwerts festgelegt.⁴¹³ Bei Abweichungen oder Besonderheiten sollen die Kriterien diskutiert und Argumente analysiert werden, um eine endgültige Festlegung der Bewertung zu erzielen. Der Prozess wird mit einer Dokumentation abgeschlossen. Eine geeignete und nachvollziehbare grafische Darstellungsform komplexer Gewichtungs- und Bewertungsergebnisse sind sogenannte Werteprofile, deren Flächeninhalt die Nutzwerte repräsentieren und in dieser Arbeit zur Anwendung kommen.⁴¹⁴

⁴¹³ Vgl.: Breiing/Knosala 1997, S. 130

⁴¹⁴ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 180f; Feldhusen/Grote 2013, S. 403f; Breiing/Knosala 1997, S. 201

Die Bewertung der Dimensionen Wirtschaft und Umwelteinflüsse wird parallel mit Hilfe einer Total-Cost-of-Ownership-Analyse⁴¹⁵ sowie einer vereinfachten Lebenszyklusanalyse⁴¹⁶ bearbeitet. Alternative Antriebstechnologien, insbesondere für Nutzfahrzeuge, befinden sich aktuell noch in einer frühen Entwicklungsphase. Deswegen sind zum jetzigen Zeitpunkt ökonomische und ökologische Aussagen mit hohen Unsicherheiten behaftet.⁴¹⁷ Zum Vergleich sind bei Stadtbussen unter ähnlichen urbanen Rahmenbedingungen bereits verschiedene hybridisierte und elektrifizierte Vorserienfahrzeuge bei Flottenbetreibern im Einsatz. Für Hybridfahrzeuge werden von der Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus⁴¹⁸ aktuell Mehrkosten von 12-19 % berechnet.⁴¹⁹ Diese sind jedoch im Vergleich mit einer ersten Gegenüberstellung von 2012 bereits deutlich gefallen und werden in ähnlichem Umfang bei Nutzfahrzeugen erwartet.⁴²⁰

Der Effekt auf das Unternehmens-Image bezüglich unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte wird anhand aktueller Ergebnisse in der Akzeptanzforschung qualitativ abgeschätzt. Die separaten Analysen werden in den folgenden Kapiteln ausführlich dokumentiert.

Als Ergebnisse der Bewertungen werden nach dem Vorgehen der Nutzwert-Analyse⁴²¹ normierte Nutzwerte berechnet. Diese ergeben sich aus der Multiplikation der Gewichtungsfaktoren w mit den normierten Bewertungsergebnissen v auf einer linearen fünfstufigen Skala. Für einen hohen Vertrauensgrad in die Ergebnisse sind Objektivität, Plausibilität, Robustheit, Sensibilität und Reproduzierbarkeit von besonderer Relevanz.⁴²² Am Beispiel der zuvor behandelten drei-stufigen morphologischen Nutzwertanalyse ergeben sich die Nutzwerte nach der folgenden Formel je Bewertungsdimension:

$$N_{\text{Dimension}} = \sum_{i=1}^{x_i} \left[\sum_{j=1}^{y_j} \left(\sum_{k=1}^{z_k} v_{ijk} \cdot w_{ijk} \right) \cdot w_{ij} \right] \cdot w_i$$

Im Folgenden wird auf die einzelnen Bewertungsdimensionen zunächst allgemeingültig und anschließend in Anwendung auf die spezifischen Fahrzeugtypen Papierkorbsammelfahrzeug und Großkehrmaschine eingegangen.

6.3.1 Technologie

Die Bewertungsdimension Technologie beurteilt die technische Funktionalität der Konzepte auf Zielerfüllung und Technologiepotentiale der Systeme. Dazu zählen mehrere Bewertungskriterien, die im Status der Fahrzeugkonzeptentwicklung nicht exakt quantifiziert werden können, wie beispielsweise der resultierende Antriebsstrangwirkungsgrad,

⁴¹⁵ Vgl.: Kapitel 2.2.4.2

⁴¹⁶ Vgl.: Kapitel 2.2.4.3

⁴¹⁷ Vgl.: Schmitz 2015, S. 413

⁴¹⁸ Begleitforschung der Schaufensterprogramme Elektromobilität mit Förderung von BMVi und BMUB

⁴¹⁹ Vgl.: Faltenbacher 2015, S. 14

⁴²⁰ Mehrkosten von 22-26 % im Rahmen der Begleitforschung Modellregionen Elektromobilität

⁴²¹ Vgl.: Kapitel 2.2.4.1

⁴²² Vgl.: Breiung/Knosala 1997, S. 209-214

Rekuperationspotentiale, Robustheit oder Effekte durch den Einsatz der Fahrzeuge in einer Smart Grid Infrastruktur. Deren Zielerreichung ist dennoch außerordentlich wichtig, sodass in dieser Arbeit eine Abschätzung der Systemeigenschaften mit ähnlichen Fahrzeuganwendungen höheren Technologiereifegrads erfolgt.⁴²³ Weitere Bewertungskriterien sind an konkrete technische Eigenschaften der Fahrzeugsysteme oder einzelner Komponenten gebunden und können für die Fahrzeugkonzepte im Vergleich mit hoher Genauigkeit abgeschätzt werden. Dazu zählen Kriterien wie die Komplexität und Wartungsintensität der Systeme, der erreichbare Elektrifizierungsgrad, Drehmoment- und Leistungsdichten, der Temperatureinsatzbereich und die potentielle Einsatzflexibilität. Die resultierenden Bewertungsergebnisse werden im Anschluss als Werteprofil nach Pahl/Beitz⁴²⁴ für verschiedene Fahrzeugkonfigurationen dargestellt.

Wirkungsgrade elektrifizierter Antriebe sind im Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen höher, wie bereits in Kapitel 2.1.4.1 behandelt. Zusätzlich werden in dieser Arbeit mehrere Hybrid- und Elektroantriebskonfigurationen⁴²⁵ unterschieden, deren resultierende Wirkungsgrade von vielen Faktoren abhängen. Werden die Komponenten der Antriebsstränge separat betrachtet, weisen elektrische Maschinen verglichen mit Verbrennungskraftmaschinen deutlich höhere Wirkungsgrade auf.⁴²⁶ Lassen sich bei starkem Stop-and-Go-Betrieb die Energiewandlungsverluste gering halten und möglichst häufig elektromotorisch beschleunigen und bremsen, sind hohe Gesamtwirkungsgrade des Fahrzeugs zu erwarten.⁴²⁷ Zusätzlich ergeben sich hohe Energieeinsparpotentiale durch den Einsatz von Energiespeichern um die Antriebsstrangkomponenten in möglichst optimalen Betriebspunkten betreiben zu können.⁴²⁸ Dabei liegen die größten Energieeinsparpotentiale im Fahrbetrieb der Fahrzeuge.⁴²⁹

Elektrische Antriebe gelten im Vergleich mit Verbrennungsmotoren als wartungsarm und robust, sodass Aufwände für Wartung und Reparaturen perspektivisch reduziert werden.⁴³⁰ Durch regeneratives Bremsen reduziert sich zudem der Verschleiß an den Bremsen. Bisher liegen dazu jedoch durch das frühe Entwicklungsstadium der Fahrzeuge keine umfassenden Daten vor.⁴³¹ Zusätzlich muss in Betracht gezogen werden, dass Hybridantriebe entsprechend ihrer Definition mehrere Energiewandler und Speicher kombinieren und für diese Komponenten ebenfalls Wartung und Reparaturen anfallen, sowie Energiespeicher während der Fahrzeuglebensdauer getauscht werden könnten.⁴³²

⁴²³ Vgl.: Proff et al. 2014, S. 18

⁴²⁴ Vgl.: Pahl et al. 2007, S. 180-181

⁴²⁵ Vgl.: Kapitel 2.1.2

⁴²⁶ Vgl.: Kapitel 2.1.3.1

⁴²⁷ Vgl.: Kapitel 2.1.3; Fischer 2016, S. 11; Schmetz 2015, S. 158; Göhring 1997, S. 25-28, 158-160

⁴²⁸ Vgl.: Jähne 2013, S. 128; Bach et al. 2015, S. 11; Kohmäscher 2008, S. 94-128;

Hu/Smaling/Baseley 2012, S. 204; Mi/Masrur/Gao 2014, S. 163-168

⁴²⁹ Vgl.: Sturm 2015, S. 136-142; Engelsmann/Wachtmeister 2013, S. 9-10; Hammer 2014, S. 124

⁴³⁰ Vgl.: Kapitel 2.1.3.1

⁴³¹ Vgl.: Hacker/von Waldenfels/Mottschall 2015, S. 34

⁴³² Vgl.: Kapitel 2.1.2.2 und 2.1.3.2

Die Bewertung der Drehmoment- und Leistungsdichte einzelner Komponenten sowie deren Temperatureinsatzbereich resultieren aus den festgelegten technischen Eigenschaften. Durch Kühlung und Beheizung beispielsweise der Energiespeicher können die Einsatzgrenzen vergrößert und die Leistungsfähigkeit erhöht werden.⁴³³

Die Flexibilität der Fahrzeuge ist unmittelbar abhängig von der Energiemenge, die im Fahrzeug mitgeführt werden kann. Da alle Fahrzeugkonzepte im Bewertungsprozess die Anforderungsprofile⁴³⁴ erfüllen, ist in diesem Kriterium nur außerplanmäßige Flexibilität zu bewerten.

Die Integration der Fahrzeugkonzepte in einem Smart Grid wird basierend auf Energiespeichergrößen und Verfügbarkeiten der Fahrzeuge für die netzdienliche Einbindung beurteilt.⁴³⁵ Grundsätzlich stellen elektrifizierte Nutzfahrzeuge eine zusätzliche Last auf dem Energieversorgungsnetz dar. Bei hoher Gleichzeitigkeit kann eine elektrifizierte Flotte den durchschnittlichen Leistungsbedarf eines Betriebshofs um ein vielfaches übersteigen⁴³⁶ und sollte dementsprechend intelligent mit dem allgemeinen Lastprofil anderer Verbraucher abgestimmt werden.⁴³⁷ Durch eine intelligente Einbindung von Elektrofahrzeug-Energiespeichern kann jedoch die elektrische Versorgungssicherheit und die Zuverlässigkeit durch Entlastung des Verteilernetzes und schnelle Reaktionszeiten erhöht werden.⁴³⁸ Ebenfalls ist eine kurzzeitige Unterstützung der Netzstabilität durch Speicherung und Rückspeisung in Zeiten hohen Energiebedarfs möglich.⁴³⁹ Trotz zusätzlicher Lastzyklen ist die verstärkte Alterung einer Batterie durch Netzdienstleistungen nicht zu erwarten, wenn die Belastungen der Einzelfahrzeuge in einem moderaten Betriebsbereich⁴⁴⁰ gehalten werden.⁴⁴¹

Die Ergebnisse der Bewertung sowie des Gewichtungsprozesses werden in Form von Werteprofilen grafisch aufbereitet. In diesem Kapitel werden einige, anhand des Bewertungsergebnisses, ausgewählte Beispiele beschrieben und verglichen. Sämtliche bewertete Konzepte werden am Ende des Kapitels in einer Tabelle aufgeführt. Abb. 6-6 mit Abb. 6-7 zeigen eine solche Darstellung für ein Elektrofahrzeugkonzept mit Batteriewechsel-Technologie für das Papierkorbsammelfahrzeug. Das Konzept erreichte von den entwickelten Konzepten mit 4,0 die höchste Bewertung. Besonders gut abgeschnitten hat der elektrische Antrieb, abgesehen von der Batterie als Energiespeicher. Das Ladekonzept Batteriewechsel bekommt im Vergleich die höchste Bewertung, da das Schnellladen zwischen den Schichten eine geringere Smart Grid Funktionalität aufweist.

⁴³³ Vgl.: Kapitel 2.1.3

⁴³⁴ Vgl.: Kapitel 4.4.3

⁴³⁵ Vgl.: Kapitel 2.1.3.3

⁴³⁶ Vgl.: Gräbener/Ruhl/Raab 2015, S. 75

⁴³⁷ Vgl.: Stöhr/Giglmaier/Berlet 2015, S. 12

⁴³⁸ Vgl.: Mi/Masrur/Gao 2014, S. 156

⁴³⁹ Vgl.: Linssen et al. 2012, S. 130

⁴⁴⁰ Das sind für Batteriespeicher eine moderate Temperatur, Ladezustand, Entladehub und auftretende Ströme.

⁴⁴¹ Vgl.: Arndt/Döge/Marker 2016, S. 159-180, 232



Abb. 6-6: Technik-Bewertung Legende für Elektrofahrzeuge

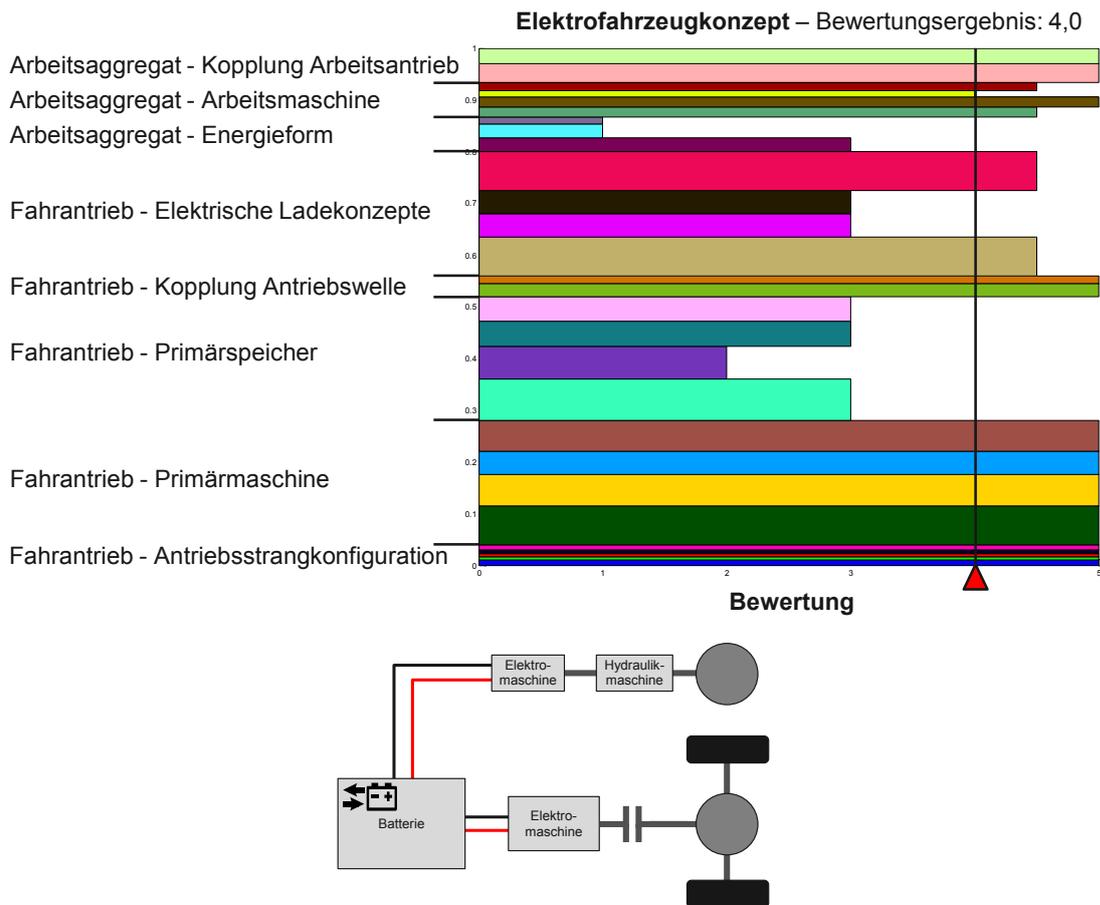


Abb. 6-7: Technik-Bewertung eines Elektrofahrzeugkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug

Eine deutlich komplexere Antriebsstrangtopologie ist das Parallel-Hybridkonzept aus Abb. 6-8 und Abb. 6-9. Diesel als Kraftstoff im Primärtrieb sowie die elektrische Maschine als Sekundärmaschine beeinflussen das Bewertungsergebnis positiv. Die Verbrennungskraftmaschine, der Batteriespeicher und die Verbindung der Antriebe über ein Verteilergetriebe werden jedoch deutlich schlechter als der Durchschnitt von 3,4 beurteilt. Das Schnellladekonzept bekommt gegenüber dem Übernacht-Laden eine ausgeglichener Bewertung, die nur unwesentlich besser abschneidet.

Arbeitsaggregat - Kopplung Arbeitsantrieb: Komplexität
Arbeitsaggregat - Kopplung Arbeitsantrieb: Wirkungsgrad
Arbeitsaggregat - Arbeitsmaschine: Lokale Emissions- & Lärmreduktion
Arbeitsaggregat - Arbeitsmaschine: Robustheit
Arbeitsaggregat - Arbeitsmaschine: Drehmoment- / Leistungsdichte
Arbeitsaggregat - Arbeitsmaschine: Wirkungsgrad
Arbeitsaggregat - Energieform: Ausprägung „Energierückgewinnung“
Arbeitsaggregat - Energieform: Ausprägung „Elektrischer Betrieb“
Arbeitsaggregat - Energieform: Wartungsintensität
Fahrertrieb - Elektrische Ladekonzepte: Robustheit
Fahrertrieb - Elektrische Ladekonzepte: Einschränkung Nutzlast / Nutzvolumen
Fahrertrieb - Elektrische Ladekonzepte: Flexibilität
Fahrertrieb - Elektrische Ladekonzepte: Smart Grid Funktionalität
Fahrertrieb - Kopplung Antriebswelle: Komplexität
Fahrertrieb - Kopplung Antriebswelle: Wirkungsgrad
Fahrertrieb - Sekundärspeicher: Robustheit
Fahrertrieb - Sekundärspeicher: Temperatureinsatzbereich
Fahrertrieb - Sekundärspeicher: Leistungsdichte
Fahrertrieb - Sekundärspeicher: Energiedichte (Zuladung/Bauraum)
Fahrertrieb - Sekundärmaschine: Lokale Emissions- & Lärmreduktion
Fahrertrieb - Sekundärmaschine: Robustheit
Fahrertrieb - Sekundärmaschine: Drehmoment- / Leistungsdichte
Fahrertrieb - Sekundärmaschine: Wirkungsgrad
Fahrertrieb - Primärspeicher: Robustheit
Fahrertrieb - Primärspeicher: Temperatureinsatzbereich
Fahrertrieb - Primärspeicher: Leistungsdichte
Fahrertrieb - Primärspeicher: Energiedichte (Zuladung/Bauraum)
Fahrertrieb - Primärmaschine: Lokale Emissions- & Lärmreduktion
Fahrertrieb - Primärmaschine: Robustheit
Fahrertrieb - Primärmaschine: Drehmoment- / Leistungsdichte
Fahrertrieb - Primärmaschine: Wirkungsgrad
Fahrertrieb - Antriebsstrangkonfiguration: Rekuperatives Bremsen
Fahrertrieb - Antriebsstrangkonfiguration: Ausprägung „Elektrischer Fahrbetrieb“
Fahrertrieb - Antriebsstrangkonfiguration: Wartungsintensität
Fahrertrieb - Antriebsstrangkonfiguration: Komplexität
Fahrertrieb - Antriebsstrangkonfiguration: Wirkungsgrad

Abb. 6-8: Technik-Bewertungs-Legende für Hybridfahrzeuge

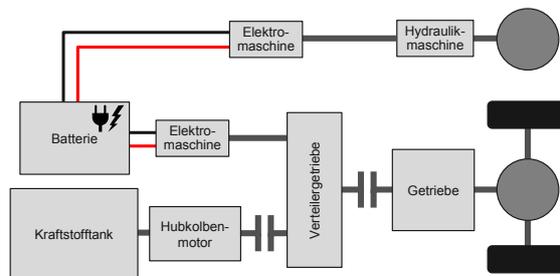
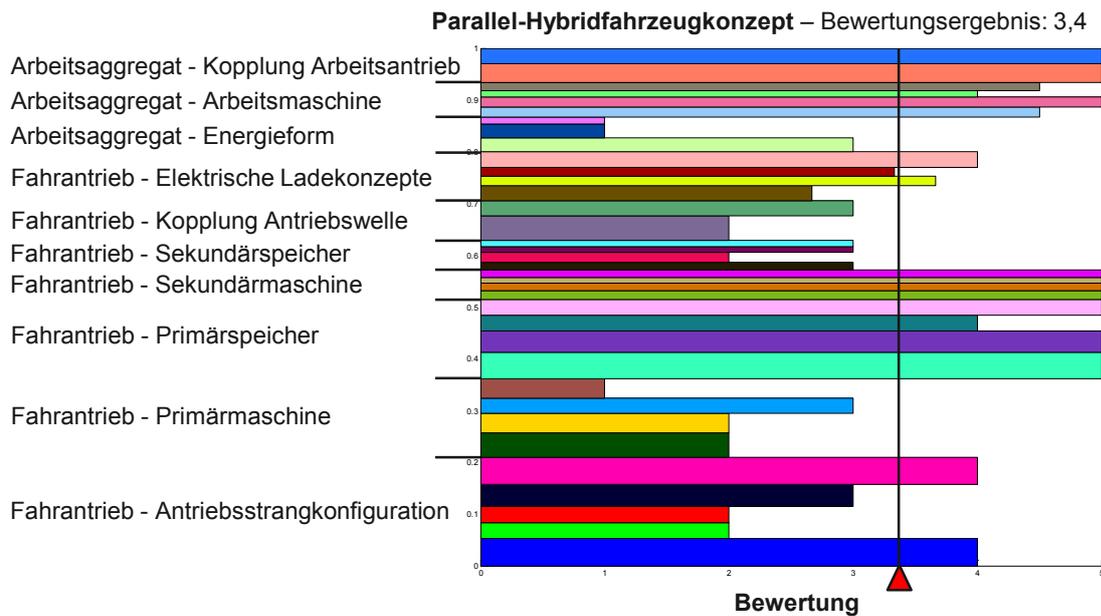


Abb. 6-9: Technik-Bewertung eines Parallel-Hybridfahrzeugkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug

Von den drei bewerteten und grundsätzlich unterschiedlichen Seriell-Hybridantriebsstrangarchitekturen bekam die Variante mit einer Batterie als Sekundärspeicher die höchste Bewertung, wie in Abb. 6-10 dargestellt. Das Konzept profitiert von der positiven Einschätzung der elektrischen Maschine im Fahrtrieb und den positiven Eigenschaften des Kraftstoffes als Energiequelle. Zusätzlich wird die serielle Konfiguration des Antriebes sowie das elektro-hydraulische Arbeitsaggregat angebunden an die Batterie technisch gut beurteilt. Auch bei den Seriell-Hybridkonzepten treten in der rein technischen Bewertung nur geringe Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Ladekonzepten auf, da nur eine zusätzliche Gelegenheit zum Aufladen zwischen den Schichten existiert.

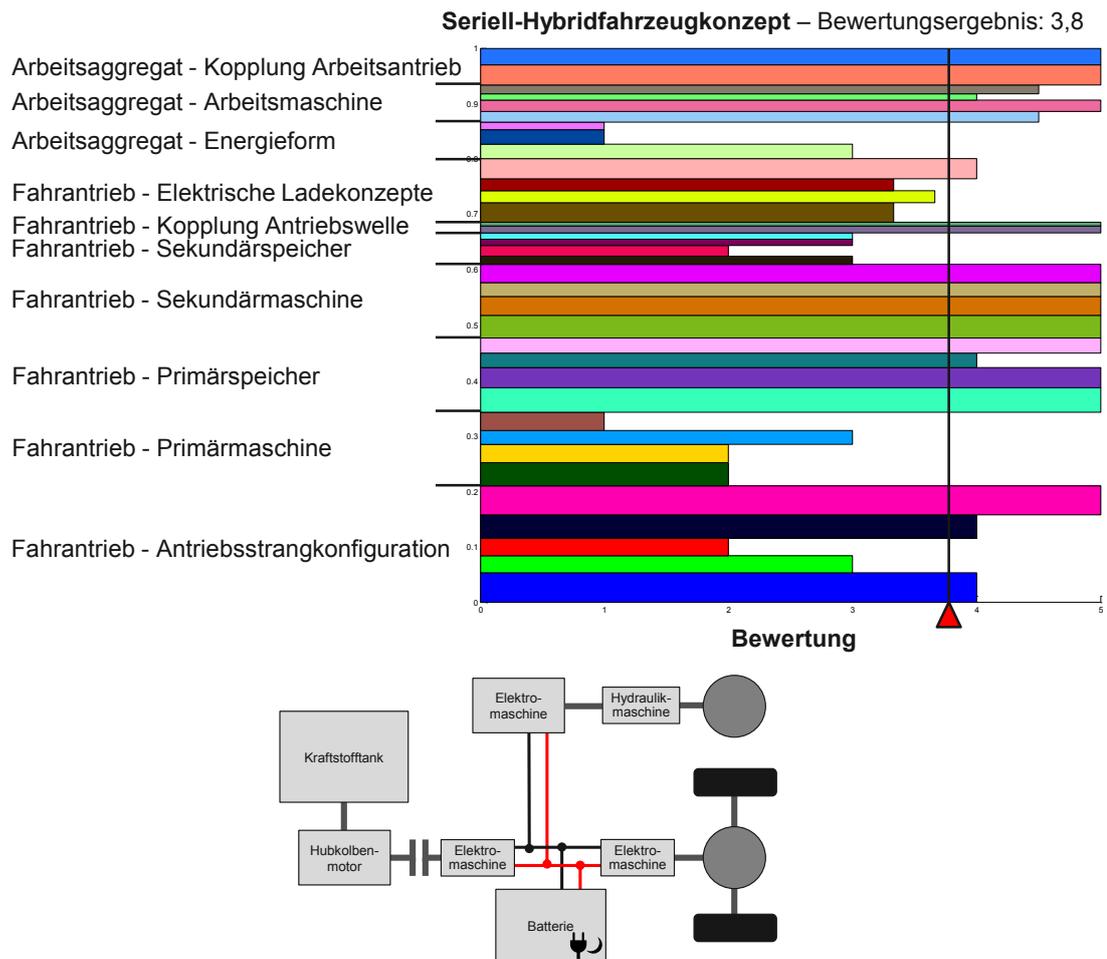


Abb. 6-10: Technik-Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug

Die entwickelten Konzepte der Großkehrmaschine umfassen zwei Parallel- und drei Seriell-Hybridkonzepte jeweils mit Übernacht- und Schnellladetechnologie, jedoch durch den hohen Energiebedarf des Fahrzeugs keine reinen Elektrofahrzeugkonzepte.⁴⁴² Für die Großkehrmaschine werden in diesem Kapitel ebenfalls ausgewählte Konzepte ausgewertet und verglichen. Im Anschluss werden alle Bewertungsergebnisse in einer tabellarischen Übersicht dargestellt. Abb. 6-11 zeigt das Werteprofil für ein Parallel-Hybridtopologiekonzept mit separatem Aufbaumotor. Im Vergleich mit dem Papierkorbsammelfahrzeug werden die hohe Gewichtung des Arbeitsaggregats und damit die Bedeutung für das Bewertungsergebnis deutlich. Positiv auf das Ergebnis von 3,2 wirken die Energiebereitstellung für das Arbeitsaggregat unmittelbar über den Aufbaumotor sowie die Wartungsintensität der mechanischen Kopplung von Arbeitsaggregat und Aufbaumotor. Der elektrische Sekundärtrieb, Schnellladetechnik sowie die zusätzlichen Funktionalitäten des Hybridantriebs besitzen einen relativ geringen Anteil am Endergebnis, sodass die Nachteile

⁴⁴² Vgl.: Kapitel 5.2.1

z.B. durch höhere Komplexität und Wartungsintensität zu einem insgesamt schlechteren Ergebnis im Vergleich mit dem Referenzantrieb führen.

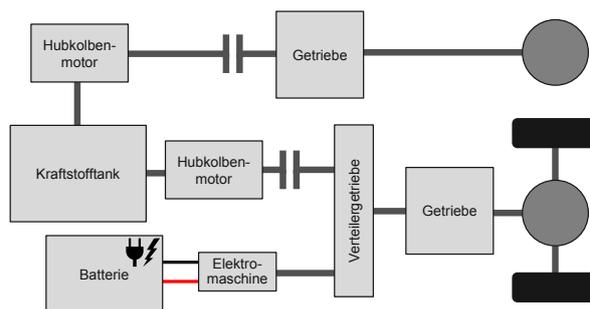
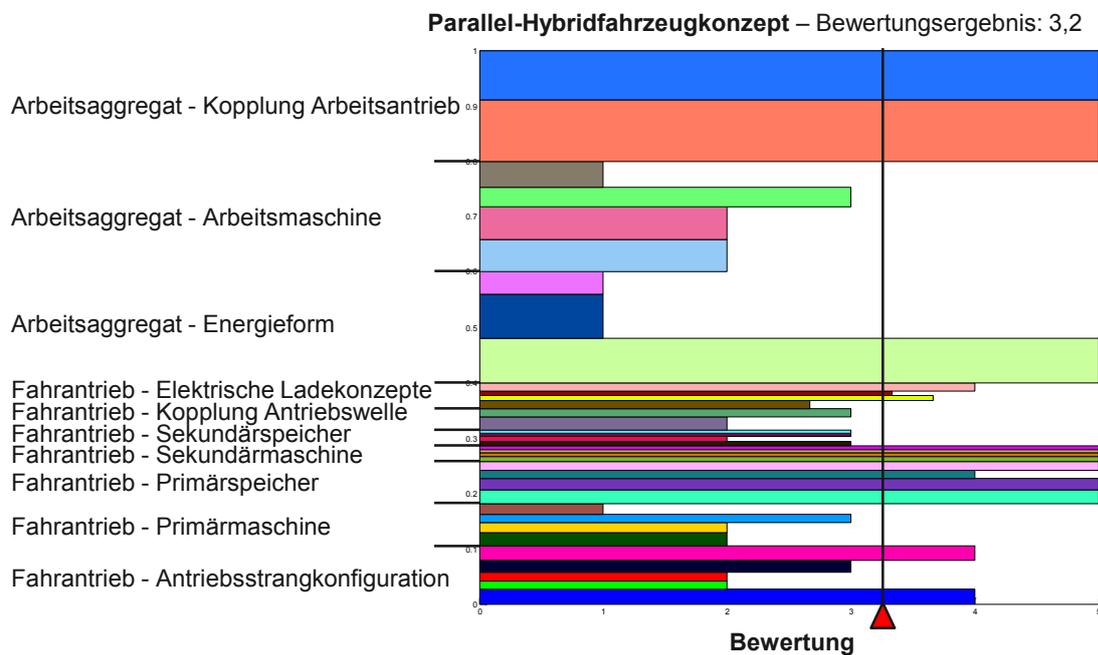


Abb. 6-11: Technik-Bewertung eines Parallel-Hybridkonzepts mit Aufbaumotor für die Großkehrmaschine

Abb. 6-12 zeigt das technische Bewertungsergebnis für ein Seriell-Hybridkonzept ebenfalls mit Aufbaumotor. Folgerichtig ist die Bewertung für das Arbeitsaggregat identisch. Der Fahrtrieb wird bei der Seriell-Hybridarchitektur höher bewertet, was in einem Bewertungsergebnis von 3,4 resultiert. Insgesamt hat der sekundäre Elektro-Fahrtrieb einen höheren Anteil am Bewertungsergebnis und größere Effekte durch die Hybridfunktionen bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten ergeben eine höhere Bewertung.

Das technisch mit Abstand am besten bewertete Konzept ist eine Seriell-Hybridarchitektur mit elektrischem Arbeitsaggregat, das in Abb. 6-13 dargestellt wird. Ausschlaggebend dafür ist die positive Bewertung des elektrischen Antriebes für das Saugsystem. Ohne einen Aufbau-Verbrennungsmotor lassen sich kurze Abschnitte rein-elektrisch und damit geräusch- und schadstofffrei betreiben. Die Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten im Antriebsstrang wurden bei der Bewertung berücksichtigt. Jedoch sollten Wirkungsgradketten

verschiedener Topologien insbesondere bei dynamischen Fahrprofilen zusätzlich beachtet werden.

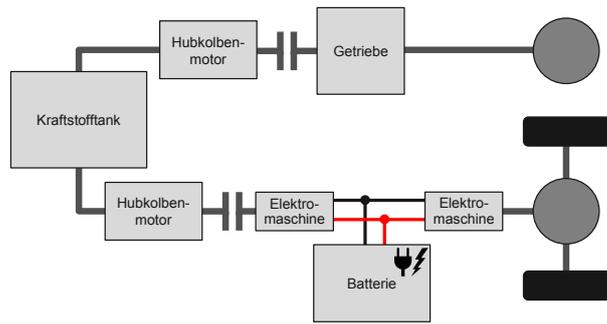
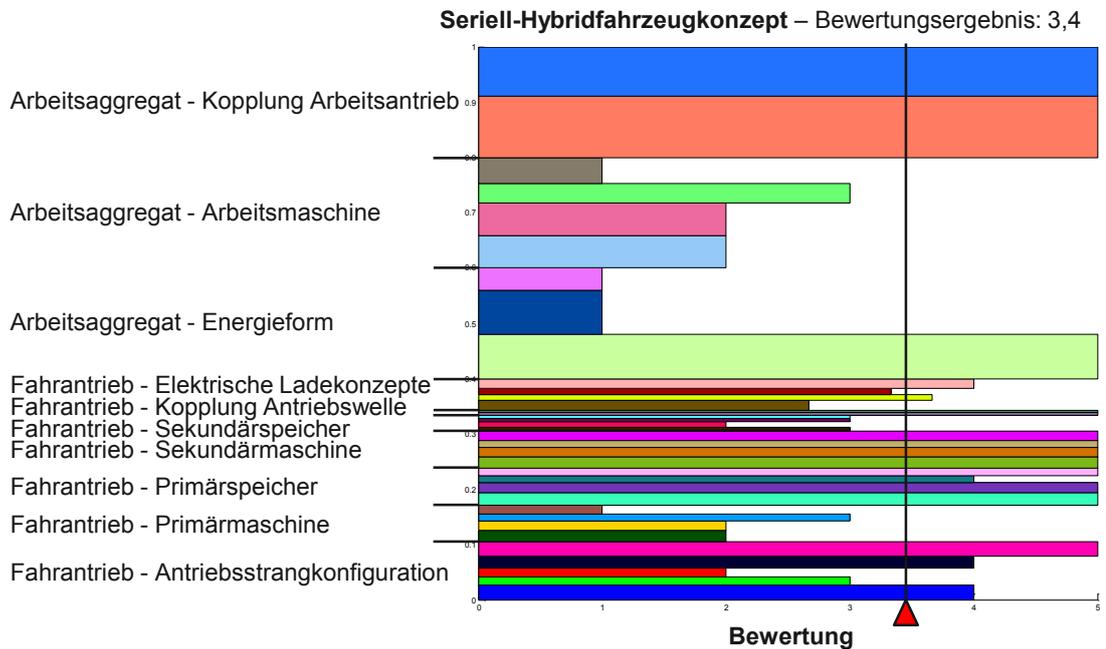


Abb. 6-12: Technik-Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts mit Aufbaumotor für die Großkehrmaschine

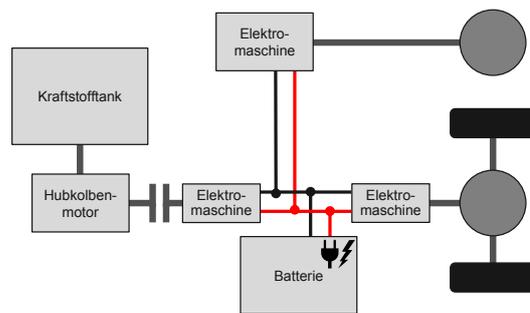
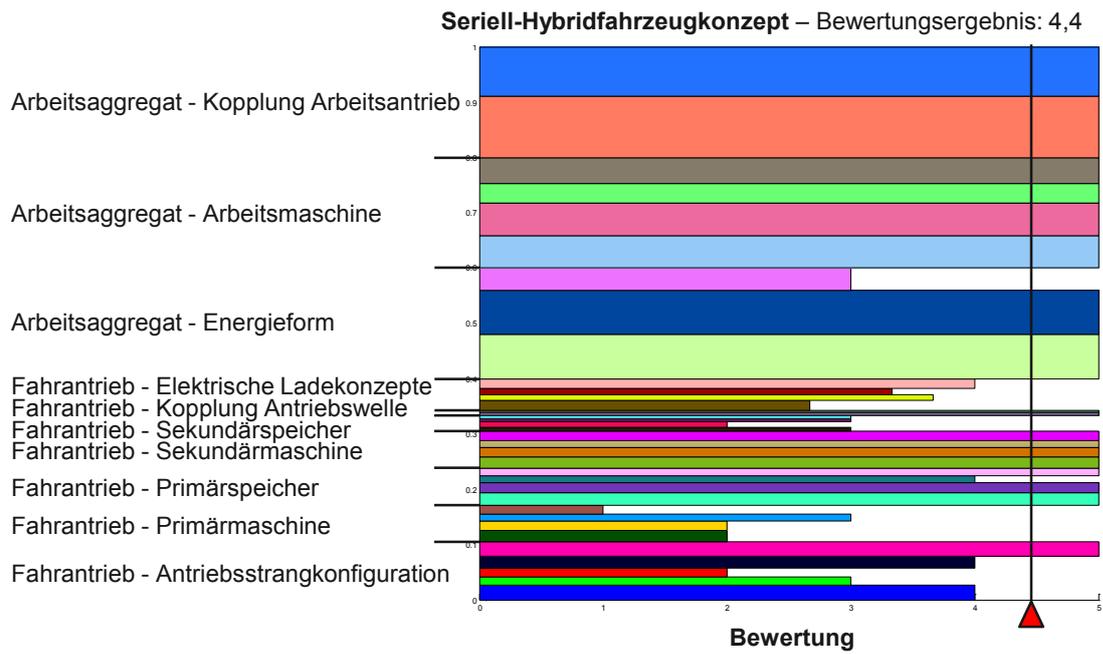


Abb. 6-13: Technik-Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts mit elektrischem Arbeitsaggregat für die Großkehrmaschine

Tab. 6-4 zeigt alle Nutzwerte der technischen Bewertung für die Papierkorbsammelfahrzeug-Konzepte in einer Übersicht. Zunächst wird deutlich, dass sämtliche elektrifizierte Konzepte vom Bewertungsteam im Vergleich mit dem konventionellen Fahrzeug besser bewertet werden. Dabei werden die Parallel-Hybridkonzepte marginal besser beurteilt, die Elektrofahrzeugkonzepte aber deutlich vorteilhafter gesehen. Ebenfalls hat ein elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat einen ausgeprägten positiven Effekt auf das Bewertungsergebnis.

Tab. 6-4: Nutzwerte der technischen Bewertung für das Papierkorbsammelfahrzeug

Antriebskonzept	Arbeitsaggregatkonzept	Bewertung
Elektrofahrzeug (Batteriewechselsystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	4,0
Elektrofahrzeug (Schnellladesystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,9
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,4
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,4
REEV (langsames Laden)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,6
REEV (Schnellladesystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,6
REEV (Batteriewechselsystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,6
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,6
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,8
Konventioneller Antrieb	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,3

Die verschiedenen Konzepte für die Großkehrmaschine werden in Tab. 6-5 in einer Übersicht gezeigt. Beim Anwendungsfall der Großkehrmaschine wird deutlich, dass durch die Elektrifizierung der Fahrzeuge auch negative technische Effekte erwartet werden. Insbesondere Konzepte mit hydraulischem Arbeitsaggregat erhalten schlechtere Nutzwerte im Vergleich mit dem konventionellen Fahrzeug. Fahrzeugkonzepte mit einem Aufbaumotor werden vergleichbar mit dem Referenzfahrzeug eingeschätzt. Signifikante Vorteile werden durch die Integration eines elektrischen Arbeitsaggregats gesehen, was in einem deutlichen Anstieg des Nutzwerts resultiert.

Tab. 6-5: Nutzwerte der technischen Bewertung für die Großkehrmaschine

Antriebskonzept	Arbeitsaggregatkonzept	Bewertung
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	2,9
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	2,9
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,2
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,2
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,1
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,1
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,4
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,4
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Elektrisches Arbeitsaggregat	4,4
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Elektrisches Arbeitsaggregat	4,4
Konventioneller Antrieb	Hubkolben-Aufbaumotor	3,3

Fahrzeugtyp-übergreifend haben die unterschiedlichen Ladekonzepte nur geringe Effekte auf die Nutzwerte der Fahrzeugkonzepte, da insgesamt lediglich eine Gelegenheit zwischen den Schichten zur Nutzung von Schnellladetechnologie oder Batteriewechsel existiert.

6.3.2 Betrieb

Die betriebliche Bewertung der Fahrzeugkonzepte wird anhand mehrerer Bewertungskriterien beurteilt. Teilweise können sich die Bezeichnungen einzelner Kriterien mit anderen Bewertungsdimensionen überdecken. Evaluiert werden jedoch explizit betriebliche Aspekte und Auswirkungen auf die Fahrzeugnutzer. Insbesondere relevant sind dabei Faktoren, die Nutzlasten und –volumen der Fahrzeuge beeinflussen sowie Anpassungen der aktuellen Betriebsabläufe nötig machen. Weiterhin werden die flexible Einsetzbarkeit, klimatische Einschränkungen und das Handling der Technologie durch Mitarbeiter beim Flottenbetreiber bewertet. Positiv für den Betreiber sind hoher Komfort während des elektrischen Fahrens, geringere Schadstoff- und Lärmemissionen sowie reduzierte Wartungsintensität zu beurteilen. Nachfolgend werden die Ergebnisse der betrieblichen Bewertung qualitativ beschrieben und im Anschluss als Wertepprofile zusammengestellt.

Hybride Antriebsstrangkonfigurationen kombinieren per Definition mehrere Energiespeicher und –wandler. Daraus resultieren meist höhere Fahrzeugleergewichte und Fahrzeuggesamtmassen. Gleiches gilt für Elektrofahrzeuge mit gewichts-intensiven Energiespeichern.⁴⁴³ Schwere Nutzfahrzeuge insbesondere im innerstädtischen Betrieb unterliegen im Gegensatz zu Pkw häufig Gewichtsbeschränkungen, die durch maximale Flächenpressungen auf Straßen oder Gehwegen, maximale Brückenlasten oder Führerscheinbeschränkungen resultieren. Dementsprechend wirken sich steigende Fahrzeugleergewichte negativ auf die verfügbare Nutzlast der Fahrzeuge und damit die Einsetzbarkeit aus. Bei manchen konventionellen Fahrzeugtypen wird die aktuell verfügbare Nutzlast bereits vollständig ausgenutzt und weitere Reduzierungen sind betrieblich nicht realisierbar. Zusätzlich sind benötigte Nutzvolumen der Fahrzeuge durch die Zuladung vorgegeben und müssen identisch zu konventionellen Fahrzeugen bereitgestellt werden. Durch maximale Abmaße der Fahrzeuge um eine Manövrierfähigkeit in engen Verkehrsräumen und Durchfahrtshöhen unter Brücken zu gewährleisten, können durch volumen-intensive Antriebskomponenten ebenfalls Einschränkungen entstehen.⁴⁴⁴

Die Betriebsabläufe der Flottenbetreiber sind typischerweise kostenoptimiert, sodass der Einsatz elektrifizierter Fahrzeuge den Aufwand des Fahrzeugbetriebs nicht erhöhen sollte. Zusätzliche Aufwände können durch zusätzliche Fahrten oder Personalaufwand beispielsweise bei Ladevorgängen oder Batteriewechsel zwischen den Schichten entstehen. Die Fahrzeuge sind Teil einer Fahrzeugflotte und werden entsprechend der Anforderungsprofile auf Touren durchschnittlicher Längen mit einer bestimmten Streuung eingesetzt.⁴⁴⁵ Der Einsatz der Fahrzeuge kann jedoch über das Jahr verteilt stark variieren.

⁴⁴³ Vgl.: Kapitel 2.1.2.2

⁴⁴⁴ Vgl.: Kapitel 2.1.5

⁴⁴⁵ Vgl.: Kapitel 4.4.3

So wird die Großkehrmaschine während eines Kalenderjahres größtenteils unter den definierten durchschnittlichen Bedingungen eingesetzt. Zum Ende des Winters treten jedoch wegen des Aufsammelns von Streugut sehr hohe Zuladungen sowie zur Laubzeit eine sehr starke Ausnutzung des maximalen Nutzvolumens auf.

Die Verringerungen der Lärm- und Schadstoffemissionen⁴⁴⁶ sowie erhöhter Komfort⁴⁴⁷ durch elektrifizierte Antriebe sind besonders für die Nutzer der Fahrzeuge, aber auch für Anwohner und Passanten bedeutend und positiv zu bewerten. Direkte arbeitsschutz- oder umweltrechtliche Konsequenzen entstehen dadurch nicht. Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz von elektrisch betriebenen Nutzfahrzeugen nachts und zu Ruhezeiten an Orten an denen dies aktuell nicht zulässig ist.⁴⁴⁸

Die konkreten Ergebnisse der betrieblichen Bewertung für die ausgewählten Fahrzeugsystemkonzepte aus der vorhergehenden Beschreibung werden im Folgenden übersichtlich als Wertepprofile dargestellt. Eine vollständige Ergebnisübersicht aller entwickelten Konzepte wird am Ende des Kapitels als Tabelle zusammengefasst. Abb. 6-14 mit Abb. 6-15 zeigen das Werteprofil für ein Elektrofahrzeugkonzept mit Batteriewechselsystem des Papierkorbsammelfahrzeugs mit dem Bewertungsergebnis 3,4. Besonders positiv beim Elektrofahrzeug werden das elektrische Antriebskonzept und die elektrische Maschine für den Fahrantrieb beurteilt. Den größten Einfluss auf das Bewertungsergebnis hat der Batteriespeicher in diesem Konzept und wird in Bezug auf den Temperatureinsatzbereich durchschnittlich bewertet. Unterschiedliche Ladekonzepte haben beim Elektrofahrzeug keinen Einfluss auf das Endergebnis, jedoch erzielt das Batteriewechselkonzept ein besser ausgeglichenes Werteprofil.

■	Arbeitsaggregat - Arbeitsmaschine: Lokale Emissions- & Lärmreduktion
■	Arbeitsaggregat - Energieform: Ausprägung „Elektrischer Betrieb“
■	Fahrantrieb - Elektrische Ladekonzepte: Betriebliche Integrierbarkeit / Handling
■	Fahrantrieb - Elektrische Ladekonzepte: Einschränkung Nutzlast / Nutzvolumen
■	Fahrantrieb - Elektrische Ladekonzepte: Flexibilität
■	Fahrantrieb - Primärspeicher: Temperatureinsatzbereich
■	Fahrantrieb - Primärmaschine: Lokale Emissions- & Lärmreduktion
■	Fahrantrieb - Antriebsstrangkonfiguration: Ausprägung „Elektrischer Fahrbetrieb“
■	Fahrantrieb - Antriebsstrangkonfiguration: Wartungsintensität

Abb. 6-14: Betriebliche Bewertungs-Legende für Elektrofahrzeuge

⁴⁴⁶ Vgl.: Schönewolf 2016, S. 11

⁴⁴⁷ Vgl.: Fischer 2016, S. 11

⁴⁴⁸ Vgl.: Stöhr/Giglmaier/Berlet 2015, S. 10

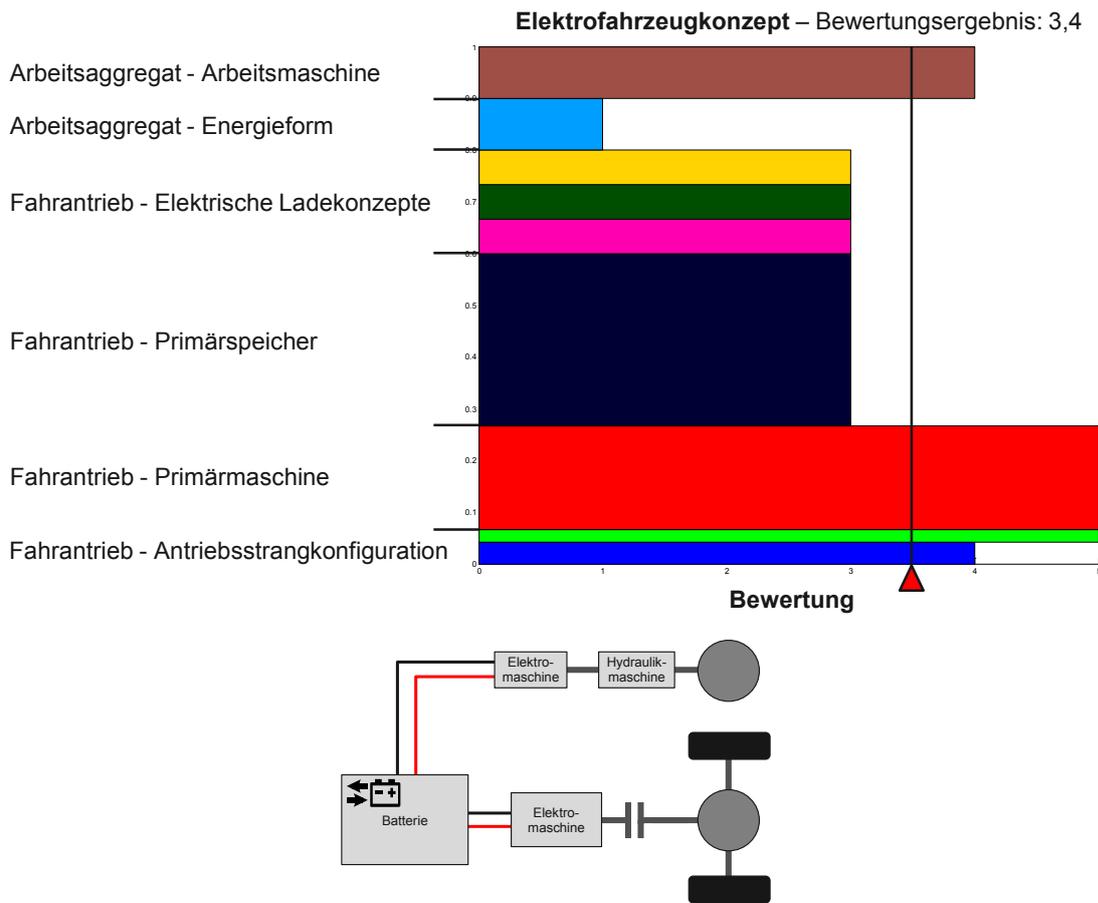


Abb. 6-15: Betriebliche Bewertung eines Elektrofahrzeugkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug

Das betriebliche Werteprofil für das Parallel-Hybridkonzept erhält eine signifikant niedrigere Gesamtbewertung von 2,9, wie in Abb. 6-16 und Abb. 6-17 dargestellt. Positiv werden die elektrische Maschine im Sekundärtrieb sowie Kraftstoff als primäre Energiequelle gesehen. Ein wesentlicher Nachteil stellt die Erhöhung des Wartungsaufwands durch den komplexeren Parallel-Hybridantriebsstrang sowie die zusätzlichen Aggregate dar. In der betrieblichen Bewertung wird das Schnellladekonzept insbesondere durch die zusätzlichen Aufwände im Betriebsablauf schlechter bewertet als ein identisches Fahrzeug mit Übernachtladesystem. Dieser Effekt ist bei allen Konzepten beobachtbar.



Abb. 6-16: Betriebliche Bewertungs-Legende für Hybridfahrzeuge

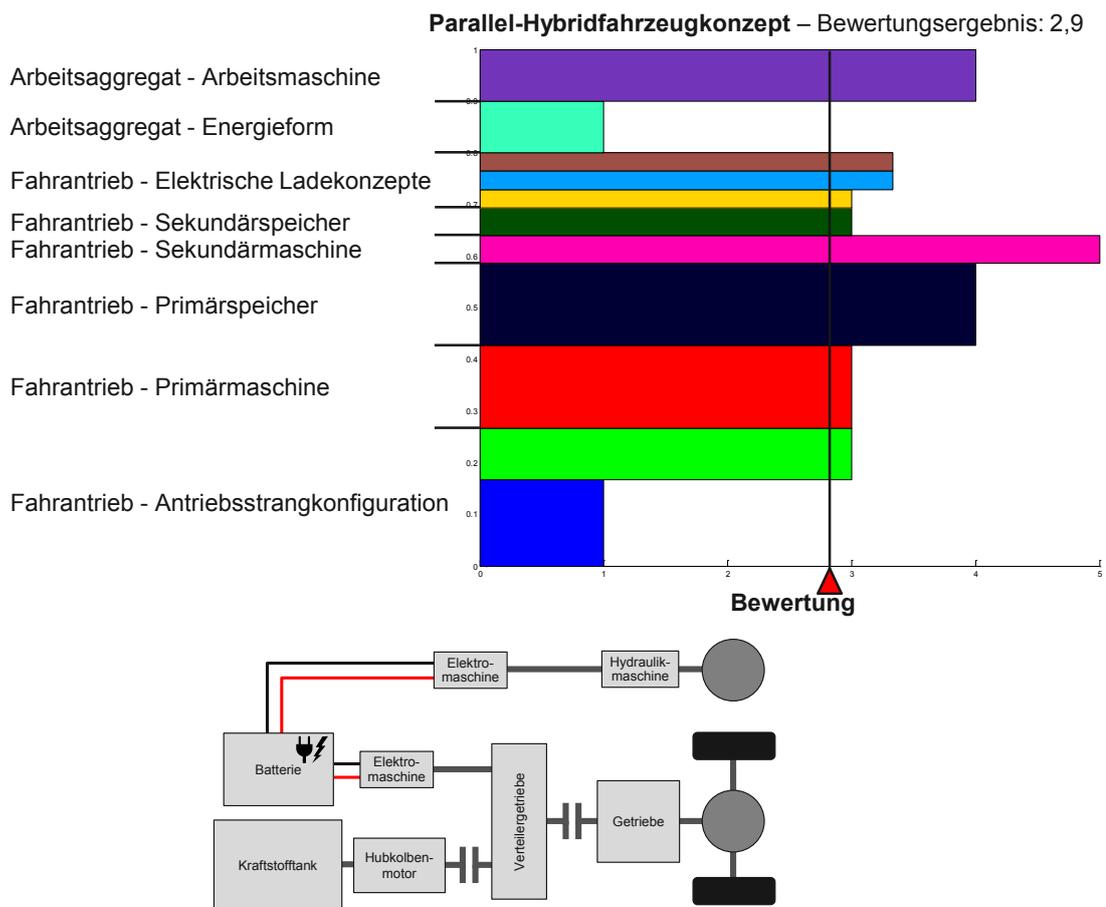


Abb. 6-17: Betriebliche Bewertung eines Parallel-Hybridfahrzeugkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug

In der betrieblichen Bewertung schneidet das Seriell-Hybridkonzept mit elektrohydraulischem Arbeitsaggregat, gespeist durch die Sekundärbatterie, unter den hybriden Antriebskonzepten mit 3,2 am besten ab. Durch die höhere Gewichtung des elektrischen Antriebsstrangs sowie die geringere Wartungsintensität eines Seriell-Hybridfahrzeugs erzielt dieses Konzept das hohe Bewertungsergebnis aus Abb. 6-18.

Alle erarbeiteten Konzepte des Papierkorbsammelfahrzeugs sind mit einem elektrohydraulischen oder hydraulischen Arbeitsaggregat ohne separaten Energiespeicher

ausgestattet. Dementsprechend ist die Bewertung für das Arbeitsaggregat, abgesehen von einem Konzept, identisch. Die betrieblichen Ergebnisse zeigen insgesamt geringere Unterschiede zwischen den Konzepten verglichen mit den technologischen Bewertungsergebnissen, sodass betrieblich keine deutlichen Veränderungen erwartet werden.

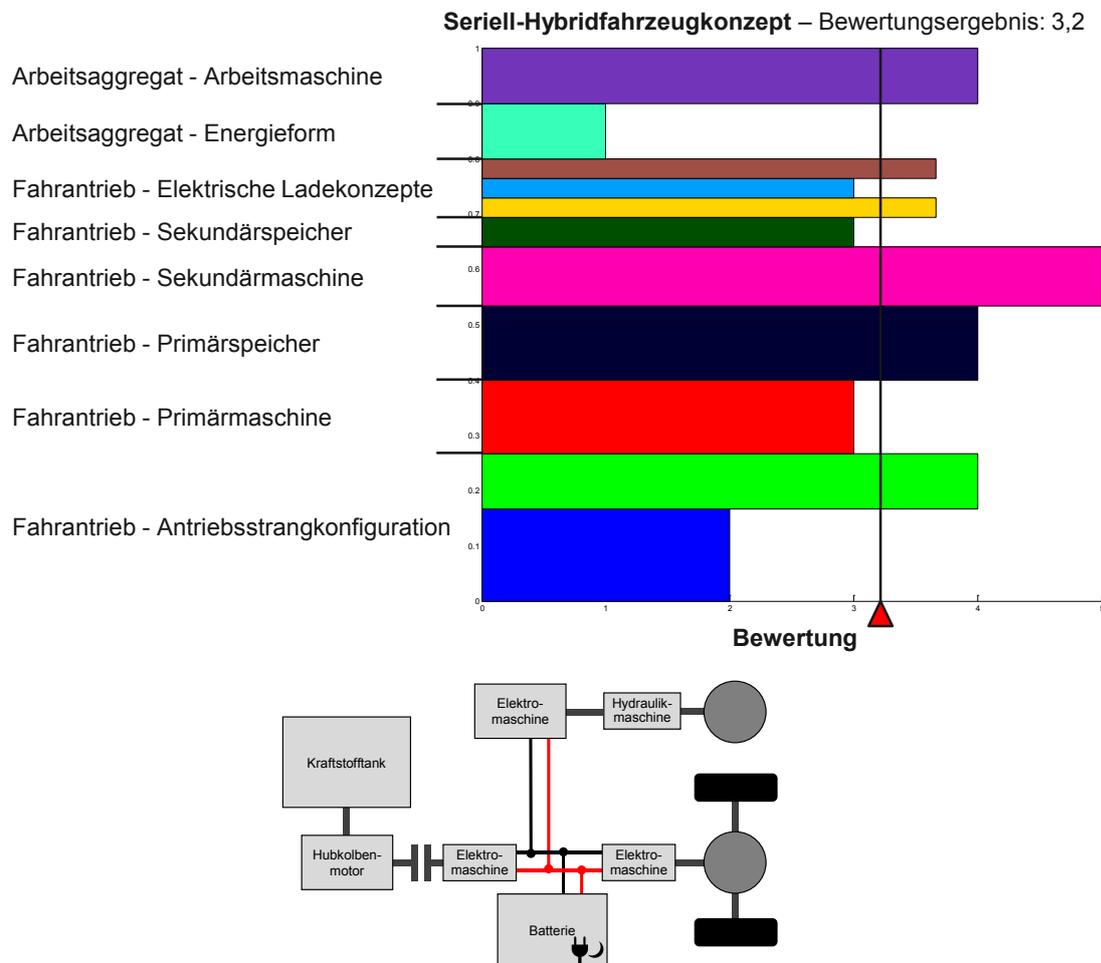


Abb. 6-18: Betriebliche Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts für das Papierkorbsammelfahrzeug

Die betriebliche Bewertung der Elektrifizierungskonzepte für Großkehrmaschinen wird anhand der ausgewählten Konzepte in Kapitel 6.3.1 beschrieben. Auch die betrieblichen Werteprofile verdeutlichen die starke Gewichtung des Arbeitsaggregats. Somit wird ein besonderer Fokus auf das Emissions- und Schadstoffreduktionspotential der Konzepte sowie die Elektrifizierung des Arbeitsaggregats entsprechend der Zieldefinition gesetzt.⁴⁴⁹ Abb. 6-19 zeigt das betriebliche Bewertungsergebnis für ein Parallel-Hybridkonzept mit Aufbaumotor. Bei Fahrzeugkonzepten mit Aufbaumotor ist konzeptbedingt die Elektrifizierung des Arbeitsaggregats nicht möglich. Der Aufbaumotor wird insbesondere für

⁴⁴⁹ Vgl.: Kapitel 6.1

das Saugsystem betrieben und emittiert dementsprechend Geräusche sowie Luftschadstoffe lokal am Fahrzeug. Durch die niedrige Gewichtung des elektrischen Sekundäranstriebs und der im Vergleich schlechteren Beurteilung einer parallelen Konfiguration resultiert ein Bewertungsergebnis von 2,4. Auch bei den Konzepten der Großkehrmaschine führt die Vereinfachung der Ladetechnologie zum reinen Übernachts-Laden durch die erwartete Aufwandsreduzierung zu einer marginalen Erhöhung aller Bewertungsergebnisse.

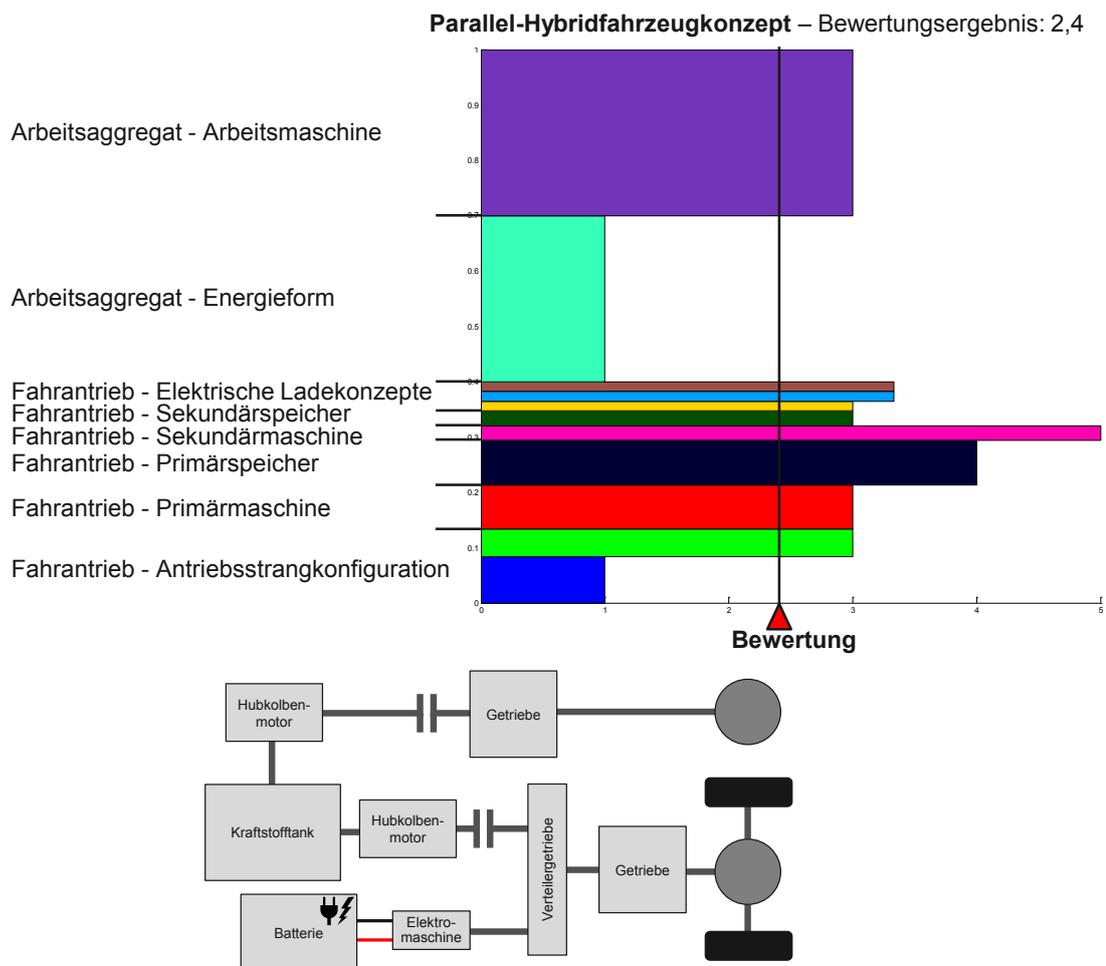


Abb. 6-19: Betriebliche Bewertung eines Parallel-Hybridkonzepts mit Aufbaumotor für die Großkehrmaschine

Bei identischer Bewertung des Arbeitsaggregats mit Aufbaumotor erreicht das Seriell-Hybridkonzept in Abb. 6-20 mit 2,6 ein höheres Bewertungsergebnis. Dies resultiert aus der höheren Gewichtung des elektrischen Antriebsstrangs und dem höheren Elektrifizierungsgrad der seriellen Hybridantriebe. Wird das Arbeitsaggregat in den elektrischen Antriebsstrang integriert, erhöht sich das betriebliche Bewertungsergebnis durch die zusätzlichen Freiheitsgrade und die Möglichkeit zur zeitweisen Vollelektrifizierung deutlich auf 4,4, wie in Abb. 6-21 dargestellt. Dies stellt betrieblich das höchste Bewertungsergebnis dar und wird maßgeblich durch die 60 % Gewichtung des Arbeitsaggregats sowie die Erwartung einer deutlichen Verbesserung durch den elektrischen Antrieb erreicht.

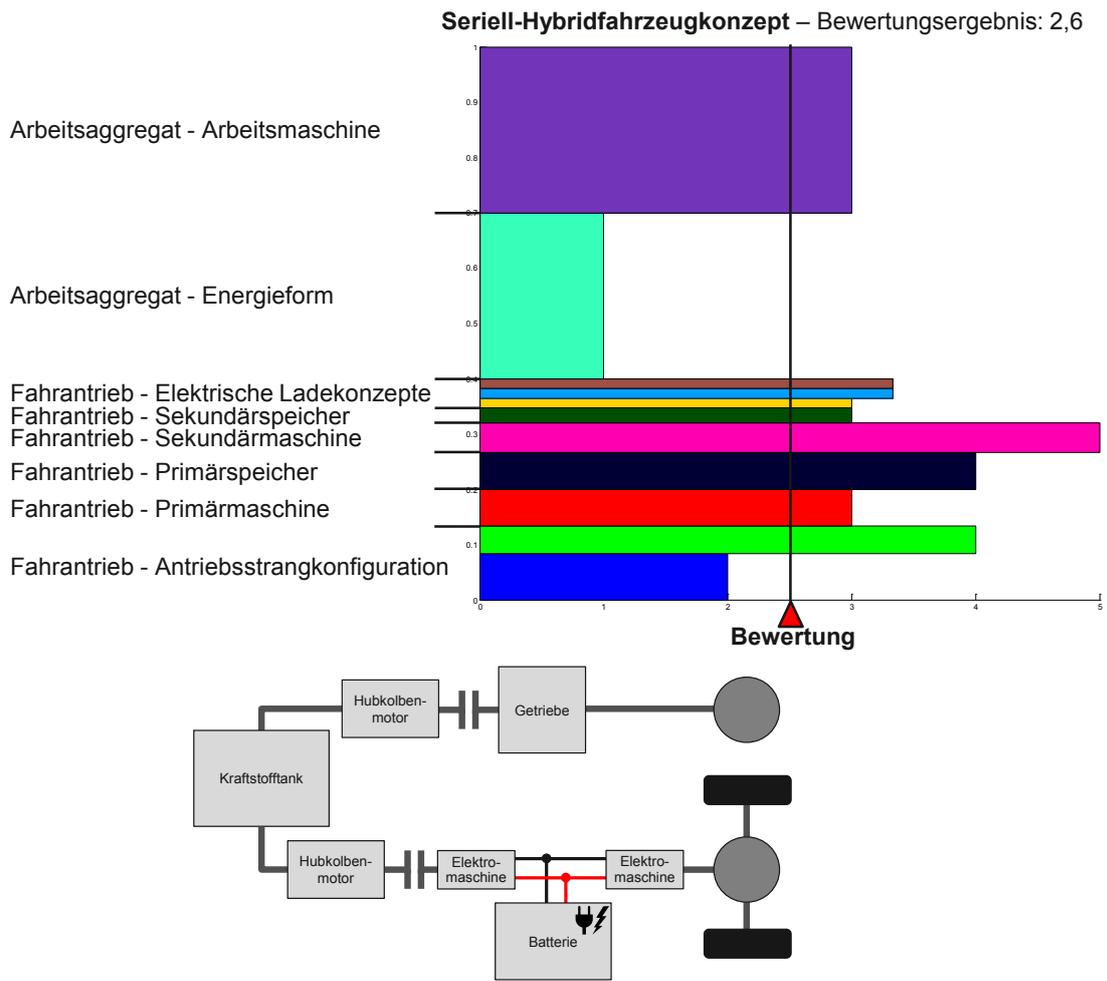


Abb. 6-20: Betriebliche Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts mit Aufbaumotor für die Großkehrmaschine

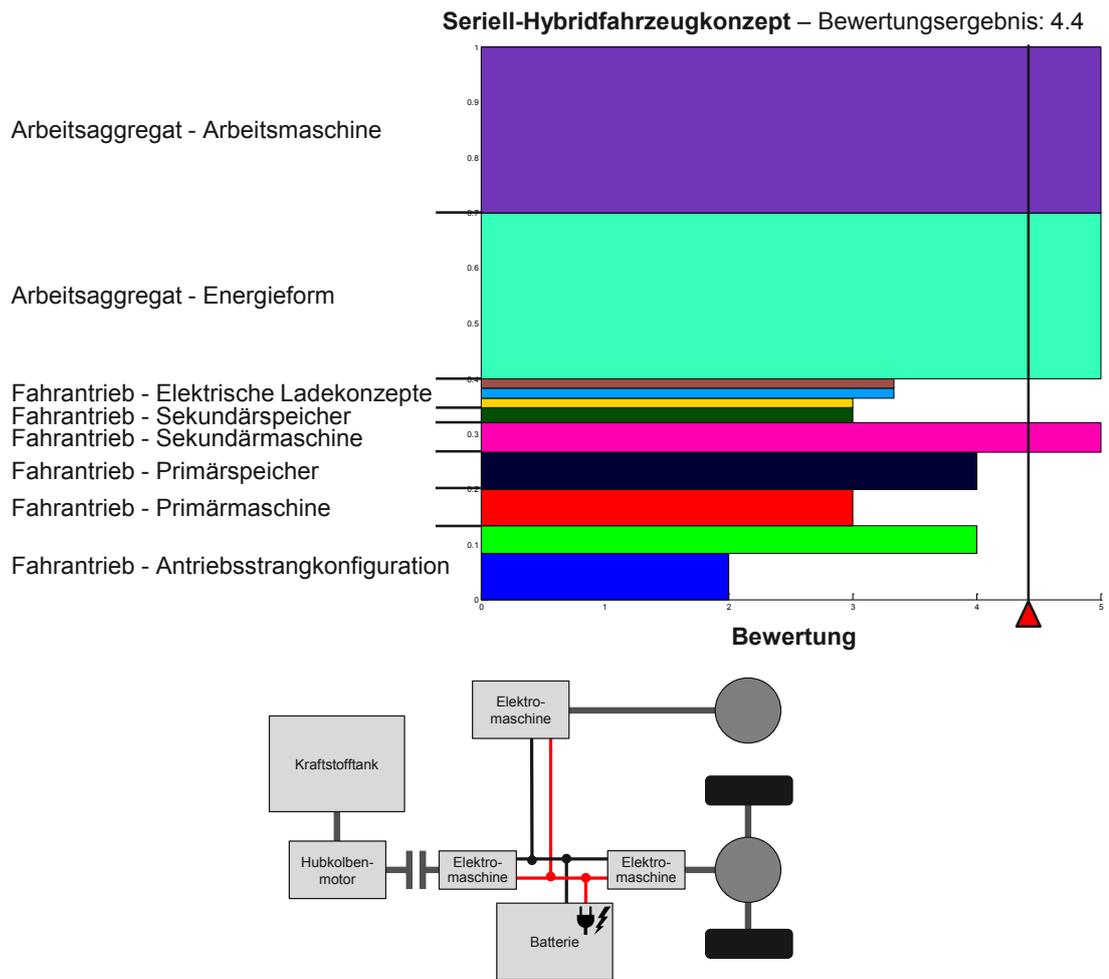


Abb. 6-21: Betriebliche Bewertung eines Seriell-Hybridkonzepts mit elektrischem Arbeitsaggregat für die Großkehrmaschine

Die resultierenden Nutzwerte der betrieblichen Bewertung für das Papierkorbsammelfahrzeug werden in Tab. 6-6 in einer Übersicht dargestellt. Die entwickelten Fahrzeugkonzepte weisen, abgesehen vom Parallel-Hybridkonzept, einen gesteigerten Nutzen aus. Die Elektrofahrzeugkonzepte erhalten die höchsten Nutzwerte, jedoch ist die Bandbreite insgesamt gering. Dementsprechend werden durch elektrifizierte Papierkorbsammelfahrzeuge geringfügige Verbesserungen des Fahrzeugbetriebs erwartet.

Tab. 6-6: Nutzwerte der betrieblichen Bewertung für das Papierkorbsammelfahrzeug

Antriebskonzept	Arbeitsaggregatkonzept	Bewertung
Elektrofahrzeug (Batteriewechselsystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,4
Elektrofahrzeug (Schnellladesystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,4
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	2,9
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	2,9
REEV (langsames Laden)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,2
REEV (Schnellladesystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,2
REEV (Batteriewechselsystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,2
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,2
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	3,2
Konventioneller Antrieb	Hydraulisches Arbeitsaggregat	2,9

Bei Großkehrmaschinen ergibt sich eine andere Ausgangssituation. Wie in Tab. 6-7 dargestellt, wird das konventionelle Fahrzeug vom Bewertungsteam bereits deutlich schlechter bewertet. Durch die hohe Gewichtung des Arbeitsaggregats sowie identischer Beurteilung von Aufbaumotor und Arbeitshydraulik ändern sich Nutzwerte entsprechender alternativer Konzepte nur marginal. Eine besondere Ausnahme sind die Bewertungen der Großkehrmaschinen mit elektrischen Arbeitsaggregaten. Durch den Einsatz elektrischer Maschinen werden betrieblich deutliche Steigerungen des Nutzens erwartet, was durch den hohen Anteil am Ergebnis einen großen Effekt auf den Nutzwert hat.

Tab. 6-7: Nutzwerte der betrieblichen Bewertung für die Großkehrmaschine

Antriebskonzept	Arbeitsaggregatkonzept	Bewertung
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	2,4
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	2,4
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Hubkolben-Aufbaumotor	2,4
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Hubkolben-Aufbaumotor	2,4
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	2,6
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	2,6
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hubkolben-Aufbaumotor	2,6
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Hubkolben-Aufbaumotor	2,6
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Elektrisches Arbeitsaggregat	4,4
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Elektrisches Arbeitsaggregat	4,4
Konventioneller Antrieb	Hubkolben-Aufbaumotor	2,4

Unterschiedliche Ladekonzepte haben auch bei der betrieblichen Bewertung nur geringe Auswirkungen auf die Nutzwerte der Fahrzeugkonzepte, da lediglich betrieblich umsetzbare Fahrzeugkonzepte von der Konzeptentwicklung in den Bewertungsprozess übergeben werden. Dementsprechend werden keine betrieblichen Einschränkungen erwartet.

6.3.3 Wirtschaftlichkeit

Die wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Fahrzeugkonzepte wird mit Hilfe eines Total-Cost-of-Ownership-Ansatzes durchgeführt um die Bewertungskriterien Betriebskosten, Anschaffungskosten und Komplexität zu quantifizieren. Zusätzlich wird über eine Prognose der zukünftigen Entwicklung einzelner Kostentreiber das Risiko des Technologieeinsatzes abgeschätzt.

Das TCO-Modell sowie die Datengrundlage wurden basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche⁴⁵⁰ und realen Betreiberdaten entwickelt. Im nachfolgenden Kapitel wird zunächst auf die Struktur des verwendeten Modells eingegangen und die Einzelpositionen sowie getroffene Annahmen beschrieben. Abb. 6-22 zeigt das übergeordnete Modell zur Abschätzung der Gesamtkosten für die entwickelten elektrifizierten Nutzfahrzeuge. Die Kostenstruktur untergliedert die Gesamtkosten, wie bereits in Kapitel 2.2.4.2 beschrieben, in Investitionsaufwände für das Fahrzeug und die benötigte Infrastruktur sowie Betriebsaufwände mit insgesamt 19 Einzelpositionen.

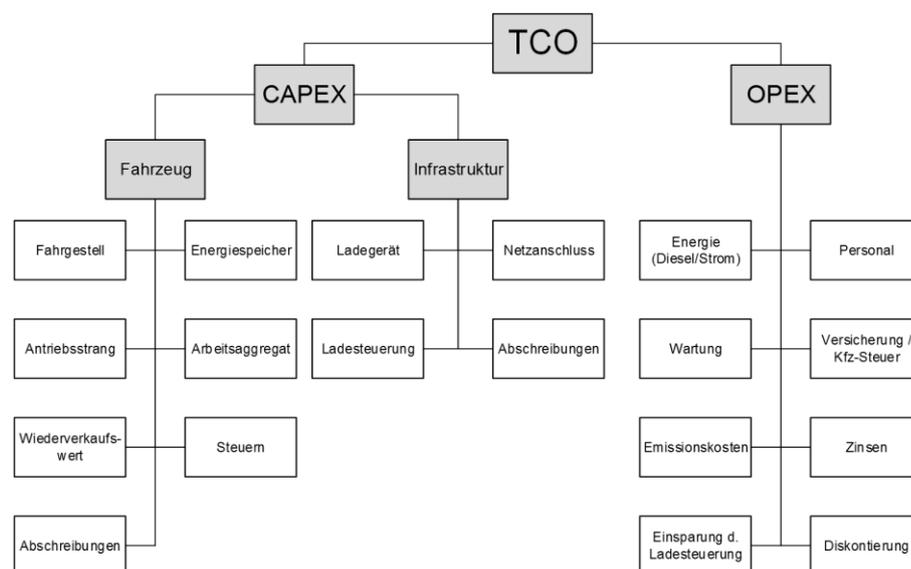


Abb. 6-22: Struktur des verwendeten TCO-Ansatzes

Unter den Investitionsaufwänden für das Fahrzeug werden in dieser Arbeit die Kosten für das Fahrzeugfahrgestell, den Antriebsstrang, vorhandene Energiespeicher, das Arbeitsaggregat, anfallende Steuern während der Beschaffung sowie der Wiederverkaufswert und Effekte durch Abschreibung über die Fahrzeuglebensdauer berücksichtigt.

⁴⁵⁰ Vgl.: Kapitel 2.2.4.2

Die Fahrzeugbeschaffungskosten, anfallende Steuern, übliche Wiederverkaufswerte und die Höhe der Abschreibungen wurden in enger Abstimmung mit Flottenbetreibern auf der Basis von Bestandsdaten bestimmt. Tendenziell werden bei elektrifizierten Fahrzeugen höhere Fahrzeuganschaffungskosten im Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen mit Diesel-Antrieb erwartet,⁴⁵¹ jedoch ist die Notwendigkeit immer komplexerer Abgasnachbehandlungssysteme ebenfalls mit erheblichen Mehrkosten verbunden.⁴⁵² Durch fortschreitende Technologieentwicklung wird zukünftig von einer sukzessiven Kostenreduktion bei elektrischen Antrieben ausgegangen, während die Aufwände für Verbrennungsmotorensysteme steigen.⁴⁵³ Eine Quantifizierung dieser Effekte stellt bei Nutzfahrzeugen aktuell noch eine große Herausforderung dar und wird dementsprechend in dieser Arbeit vernachlässigt. Die Fahrzeuge und benötigte Ladeinfrastruktur werden über eine Lebensdauer von zehn Jahren abgeschrieben.

Ein wesentlicher Kostentreiber elektrifizierter Fahrzeuge heute und zukünftig ist der elektrische Energiespeicher. Grundsätzlich wird in einschlägigen Quellen mit einem mittelfristigen Rückgang der Batteriesystempreise für Lithium-Ionen-Batterien durch Skaleneffekte, Verfügbarkeit von Materialien und technologischen Fortschritten gerechnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf Basis mehrerer Studien für Pkw die Batteriesystempreisentwicklung bis 2030 prognostiziert. Die Kosten für Energiespeicher bei Nutzfahrzeugen, insbesondere Linienbussen, liegen in aktuellen Veröffentlichungen deutlich höher. Grund für die hohen Preise sind geringe Stückzahlen und ein resultierender hoher spezifischer Anteil an den Entwicklungskosten sowie anspruchsvolle Anforderungen bei hohen Ladeleistungen.⁴⁵⁴ Da in dieser Arbeit Konzepte für zukünftige Nutzfahrzeuge entwickelt werden, wird ein konservativer Basispreis für Nutzfahrzeuggatterien mit einer Preisdegression, vergleichbar zum Pkw-Sektor, entsprechend Abb. 6-23 zugrunde gelegt. Alternativ kann ebenfalls von einer langfristigen Annäherung der Batteriepreise für Pkw und Lkw ausgegangen werden und somit ein Fallen der Batteriepreise bewirken. Demgegenüber können erwartete Kostenreduktionen in der Zukunft durch steigende Material-, Energie-, Personalkosten oder Komponentenpreise kompensiert werden und somit ausbleiben,⁴⁵⁵ wovon in dieser Arbeit jedoch nicht ausgegangen wird.

Die Unsicherheiten der Prognosen werden im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung durch die Definition eines Pro-Elektro sowie Kontra-Elektro Szenarios, wie in Tab. 6-8 beschrieben, berücksichtigt und deren Einfluss analysiert.

⁴⁵¹ Vgl.: Munder 2016, S. 8; Bergk 2015, S. 10-14

⁴⁵² Vgl.: Holloway 2016

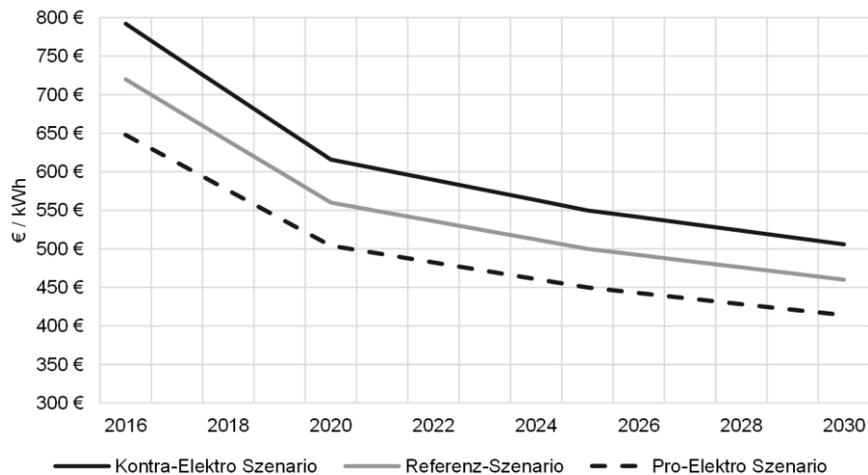
⁴⁵³ Vgl.: Valentine-Urbschat/Bernhart 2009, S. 52

⁴⁵⁴ Vgl.: Hacker/von Waldenfels/Mottschall 2015, S. 18-20; Faltenbacher et al. 2016

⁴⁵⁵ Vgl.: Weiss et al. 2012, S. 382

Tab. 6-8: Szenarien-Definition für die Kostenentwicklung relevanter Parameter

Szenario	Beschreibung	Kostenentwicklung		
		Batterie	Strom	Kraftstoff
Referenz	Preisprognose nach Literaturrecherche	-	-	-
Pro-Elektro	Begünstigt Elektrofahrzeug-Wirtschaftlichkeit	↓	↓	↑
Kontra-Elektro	Benachteiligt Elektrofahrzeug-Wirtschaftlichkeit	↑	↑	↓

Abb. 6-23: Batteriesystempreisentwicklung des TCO-Modells⁴⁵⁶

Basierend auf den Analysen der Betriebsabläufe, Energiebedarfssimulationen⁴⁵⁷ sowie Abstimmungen mit den Flottenbetreibern wurden für die Fahrzeugkonzepte verschiedene Batteriegrößen entsprechend Tab. 6-9 festgelegt. Grundlage bilden drei unterschiedliche Kapazitäten für Plug-In Hybridfahrzeuge, wobei die kleinste Batteriegröße grundsätzliche Hybridfunktionen⁴⁵⁸ sicherstellt. Die mittleren und maximalen Batteriegrößen sind entsprechend dem Betriebsablauf fahrzeugspezifisch definiert. Das Papierkorbsammel-fahrzeug realisiert einen elektrischen Werkbetrieb⁴⁵⁹ für eine bzw. zwei Schichten, um eine hohe Schadstoff- und Lärmemissionsreduktion in sensiblen Bereichen umzusetzen. Bei der Großkehrmaschine ist das Lärmreduktionspotential während des Werkbetriebs durch den kontinuierlichen Betrieb des Arbeitsaggregats gering. Dementsprechend wird zunächst der Fahrbetrieb in zwei Schichten elektrifiziert und anschließend die Energie für den Werkbetrieb elektrisch bereitgestellt. Die Batteriekapazität für ein Elektrofahrzeug legt die operative

⁴⁵⁶ Vgl.: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) 2016; Schulz 2015, S. 70; Gnann et al. 2012, S. 42; Hacker/von Waldenfels/Mottschall 2015, S. 34; Haendel/Gnann/Plötz 2015; S. 23; Richter/Lindenberger 2010, S. 78

⁴⁵⁷ Vgl.: Kapitel 4.4.2

⁴⁵⁸ Vgl.: Kapitel 2.1.2.2

⁴⁵⁹ Vgl.: Kapitel 4.4.1

Erfüllung eines repräsentativen Tages-Solls einschließlich eines Sicherheitszuschlags entsprechend der Anforderungsprofile⁴⁶⁰ zugrunde.

Tab. 6-9: Fahrzeugkonzept-Batteriekapazitäten entsprechend den Anforderungsprofilen

	Hybridfahrzeug			Elektrofahrzeug
	Minimum	Mittel	Maximum	
Papierkorbsammelfahrzeug	3 kWh	23 kWh	47 kWh	73 kWh
Großkehrmaschine	5 kWh	92 kWh	250 kWh	-

Die Aufwände für Ladeinfrastruktur werden in die Positionen Ladegerät, Ladesteuerung, Netzanschluss sowie Abschreibung aufgeteilt. Für die Ladegeräte und Ladesteuerung werden Preise verfügbarer Produkte für den Automobilbereich verwendet.⁴⁶¹ Die Bandbreite angebotener Ladeleistungen ist für die entwickelten Fahrzeugkonzepte und Standzeiten ausreichend, da besonders energieintensive Fahrzeuge nicht als reine Elektrofahrzeuge umgesetzt werden.⁴⁶² Potentielle zusätzliche Kosten für die Erweiterung eines Netzanschlusses sind individuell zu prüfen und können Kosten für die Fahrzeuge deutlich übersteigen.⁴⁶³ Synergieeffekte durch die Nutzung von Schnellladeinfrastruktur mit mehreren Fahrzeugen sowie längere Abschreibungsdauern der Ladeinfrastruktur werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Betriebsaufwände der Fahrzeuge umfassen die Kosten für zugeführte Energie als Kraftstoff oder Elektrizität, die wiederkehrenden Aufwände für Wartung der Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur, zusätzliche Personalkosten, Fahrzeugversicherung und –steuern, Zinsen für die Finanzierung und Diskontierung sowie Einsparungen durch intelligente Ladesteuerung, Hybrid- und Elektroantriebe.

Die angenommenen Energiepreise dieser Arbeit wurden aufbauend auf der Energiereferenzprognose⁴⁶⁴ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie abgeschätzt. Für das Jahr 2016 wurden betriebs-typische Energiepreise zugrunde gelegt und entsprechend dem Trend der Prognose fortgeschrieben. Analog zur Vorgehensweise bei den Batterien werden bei den Energiepreisen optimistische und pessimistische Szenarien definiert. Da Dieselpreise durchschnittlich stärker schwanken, wird eine größere Unsicherheit bezogen auf die Prognose angenommen.⁴⁶⁵ Deutlich erkennbar ist der geplante Rückgang der EEG-Umlage beim Strompreis ab 2020. Abb. 6-24 und Abb. 6-25 zeigen die Energiepreis-Eingangswerte des TCO-Modells.

⁴⁶⁰ Vgl.: Kapitel 4.4.3

⁴⁶¹ Vgl.: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) 2015, S. 12

⁴⁶² Vgl.: Kapitel 5.4

⁴⁶³ Vgl.: Hacker/von Waldenfels/Mottschall 2015, S. 35; Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) 2015, S. 12

⁴⁶⁴ Vgl.: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2014

⁴⁶⁵ Vgl.: Hacker/von Waldenfels/Mottschall 2015, S. 14-18

Mit Hilfe intelligenter Ladesteuerung kann die maximal benötigte Gesamtleistung eines Fuhrparks reduziert werden. Theoretisch kann zu günstigeren Zeiten Energie bezogen und mit den Energiespeicher-Kapazitäten am Strommarkt teilgenommen werden. Aktuell sind diese Modelle für Fahrzeugflottenbetreiber in den Rahmenbedingungen des Strommarkts noch nicht vorgesehen und dementsprechend finanzielle Effekte sehr gering.⁴⁶⁶ Somit werden sie in dieser Arbeit vernachlässigt.

Zusätzliche Personalkosten werden in dieser Arbeit durch die Beibehaltung der Betriebsabläufe konventioneller Fahrzeuge vermieden. Dies wird durch die Erfüllung der Anforderungsprofile und der anwendungs-orientierten Entwicklung der elektrifizierten Fahrzeugkonzepte sichergestellt.

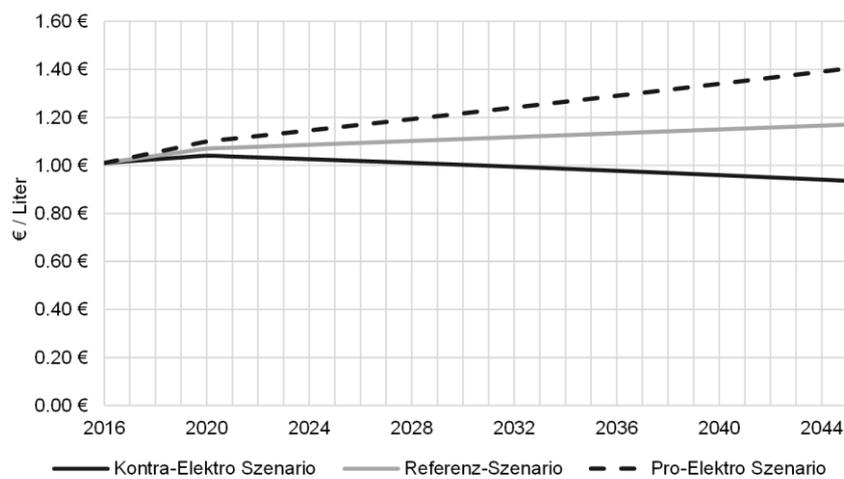


Abb. 6-24: Prognose der Dieselpreisentwicklung

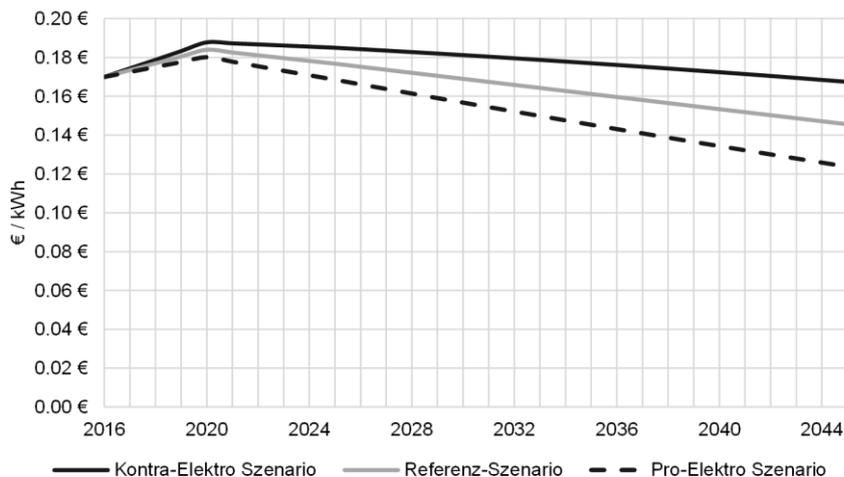


Abb. 6-25: Prognose der Strompreisentwicklung

⁴⁶⁶ Vgl.: Wohlers et al. 2015; Arndt/Döge/Marker 2016, S. 203

Für elektrifizierte Fahrzeuge werden deutlich reduzierte Wartungsaufwände durch Komponenten mit weniger beweglichen Elementen und reduziertem Bremsenverschleiß erwartet. Auch bei Hybridfahrzeugen können diese Effekte trotz zwei unterschiedlicher Antriebe beobachtet werden.⁴⁶⁷ Insbesondere, da in den verwendeten Daten anwendungsspezifische Arbeiten wie z.B. Behälterreinigung oder Besenwechsel enthalten sind, ist eine anteilige Abschätzung schwierig. Da für alle betrachteten Technologien aktuell keine belastbare Datengrundlage existiert, werden die Wartungsaufwände in dieser Arbeit als konstant angenommen.

Auch für Versicherungsprämien und Kfz-Steuern existieren aktuell keine Erfahrungen bei schweren Elektro- und Hybrid-Nutzfahrzeugen. Demnach werden auch hier keine Veränderungen vorgesehen, obwohl durch sinkende Fahrzeugpreise und geringere Emissionen zukünftig Kostenreduktionen zu erwarten sind.

Die Emissionskosten werden nach der Clean Vehicle Directive (Richtlinie 2009/33/EC) des europäischen Parlaments berechnet.⁴⁶⁸ Die Position legt einen zusätzlichen Aufwand für zukünftig emittierte CO₂- und Schadstoffemissionen durch Fahrzeugbeschaffungen mit dem Ziel der Förderung effizienter und schadstoff-reduzierter Technologien fest. Die Emissionskosten werden bei Beschaffungsentscheidungen öffentlicher Auftraggeber berücksichtigt, ohne dass diese tatsächlich gezahlt werden.

Abb. 6-26 zeigt die ermittelten TCO-Werte für die untersuchten Parallel-Hybridkonzepte des Papierkorbsammelfahrzeugs. Verglichen mit dem konventionellen Fahrzeug werden sowohl kosten-intensivere als auch kosten-günstigere Konzepte dargestellt. Bei den gezeigten Fahrzeugkonzepten mit kleinen und mittleren Energiespeichern ist demnach der Effekt eines höheren Wirkungsgrads stärker als die zusätzlichen Kosten des alternativen Antriebes. Die TCO des Schnellladekonzepts mit mittlerer Batteriegröße sind in 2017 signifikant höher, gleichen sich aber bis 2027 den Kosten des Parallel-Hybridkonzepts mit kleinem Batteriespeicher an. Fahrzeugkonzepte mit hohem Elektrifizierungsgrad und großen Batteriespeichern sind im Vergleich deutlich kosten-intensiver, zeigen unter den getroffenen Annahmen aber ebenfalls eine stärkere Kostendegression. In 2027 nähern sich die Kosten langsam ladender Konzepte dem konventionellen Fahrzeug deutlich an. Bei schnell-ladenden Fahrzeugen wurde in diesem TCO-Ansatz keine Kostendegression für die Hochleistungs-Ladeinfrastruktur sowie deren Nutzung durch mehrere Fahrzeuge berücksichtigt, wodurch die Aufwände in Zukunft zusätzlich reduziert werden können. Auch eine Annäherung der Batteriepreise an den Pkw-Sektor hätte bei großen Energiespeichern den stärksten Kostenreduktionseffekt.

⁴⁶⁷ Vgl.: Michalk/Lichtfuß/Sonntag 2014, S. 67

⁴⁶⁸ Vgl.: European Parliament and Council 2009

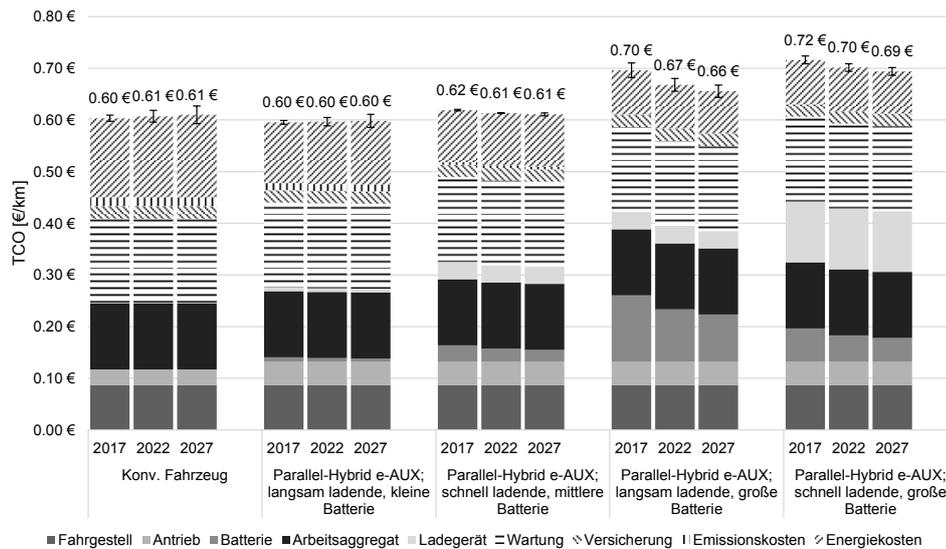


Abb. 6-26: TCO-Werte für ausgewählte Parallel-Hybridkonzepte des Papierkorbsammelfahrzeugs

Abb. 6-27 zeigt die Ergebnisse der Kostenanalyse für die untersuchten Seriell-Hybrid bzw. REEV-Konzepte. Durch einen angenommenen höheren Wirkungsgrad des Fahrzeugantriebs und höhere Rekuperationsraten resultieren niedrigere TCO-Werte für Hybridfahrzeuge mit kleinen Energiespeichern. Bei Steigerung des Elektrifizierungsgrads und der elektrischen Reichweite wird dieser Kostenvorteil reduziert, sodass die TCO für Fahrzeuge mit mittleren und großen Energiespeichern deutlich steigen.

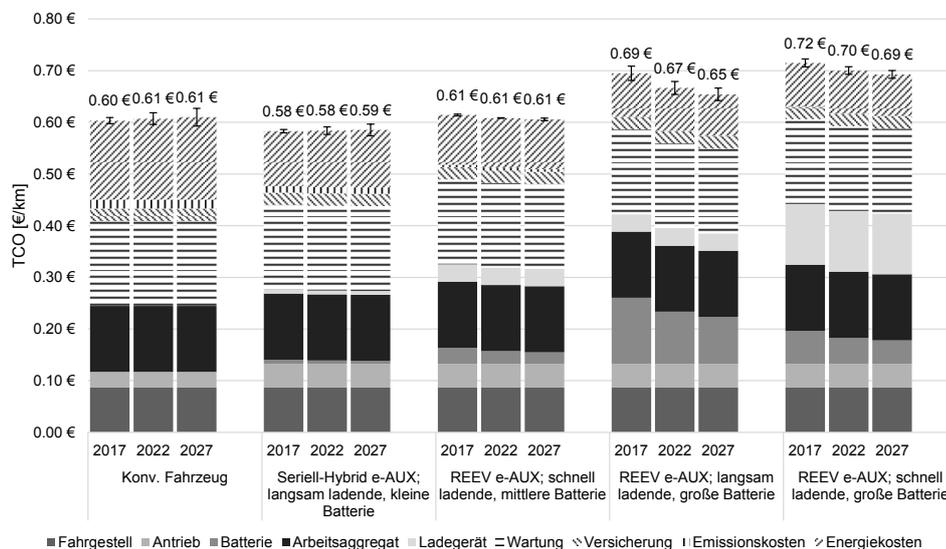


Abb. 6-27: TCO-Werte für ausgewählte Seriell-Hybridkonzepte des Papierkorbsammelfahrzeugs

Die pessimistische bzw. optimistische Entwicklung relevanter Kostentreiber in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen ist mit Hilfe der Indikatoren am oberen Rand der Balkendiagramme dargestellt. Der hohe Anteil der Energiebereitstellung durch Dieselkraftstoff bei Hybrid-Konzepten mit kleinen Energiespeichern führt bei optimistischer Energie- und Batteriepreisentwicklung insgesamt noch zu Kostensteigerungen. Bei Konzepten mit mittleren Batteriespeichern kompensieren sich die Effekte bereits deutlich, sodass die Indikatoren nur einen sehr schmalen Bereich einschließen. Konzepte mit einem hohen Elektrifizierungsgrad und großen Energiespeichern werden von einer optimistischen Entwicklung der Kostentreiber positiv beeinflusst, sodass die Bandbreite wieder deutlich sichtbar wird und die Gesamtkosten reduziert werden.

Einige hybrid-typische Funktionen, wie elektrisches Fahren, oder versorgungsnetzdienliche Leistungen benötigen eine relevante Energiespeichergröße der Fahrzeuge. Dementsprechend werden im Gesamtvergleich in Abb. 6-28 das Parallel-Hybridfahrzeug mit mittlerem Energiespeicher sowie ein REEV-Konzept mit großem Energiespeicher mit den Elektrofahrzeugkonzepten verglichen, obwohl die Fahrzeugkonzepte mit kleinen Energiespeichern die geringsten Kosten aufweisen.

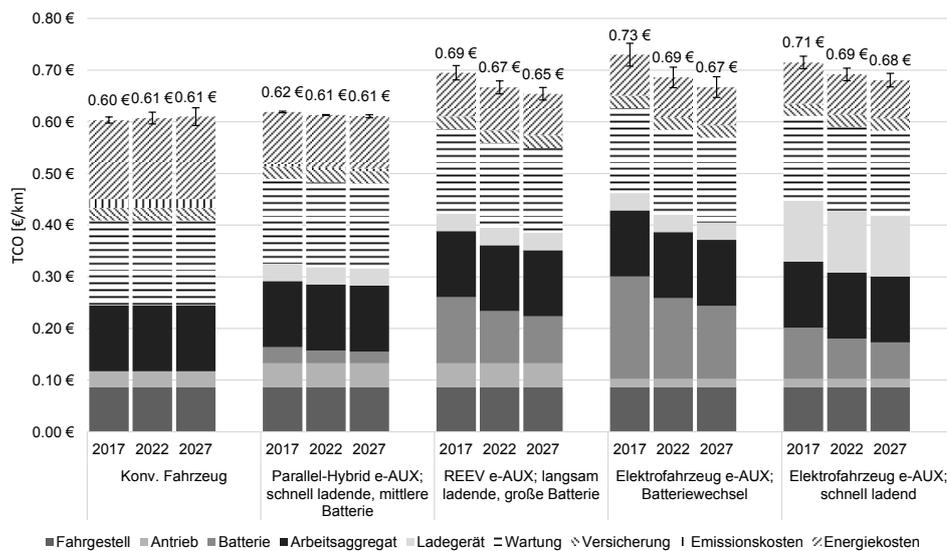


Abb. 6-28: Vergleich der TCO-Werte für ausgewählte Hybrid- und Elektrofahrzeugkonzepte des Papierkorbsammelfahrzeugs

Die entwickelten Elektrofahrzeugkonzepte weisen im Vergleich deutlich höhere Kosten, insbesondere durch den Energiespeicher und die Ladeinfrastruktur, auf. Weiterhin sind bei den angegebenen TCO zwei Wechselbatterien je Fahrzeug berücksichtigt, jedoch keine Aufwände für die Wechseltechnologie enthalten, die als automatisiertes System hohe zusätzliche Investitionskosten oder zusätzlichen Personalaufwand bei manueller Ausführung bedeuten können. Bei Fahrzeugsystemkonzepten mit Schnellladetechnologie wurden je nach Batteriegröße und Standzeit Ladegeräte mit entsprechend skalierten Ladeleistungen vorgesehen. Insgesamt werden beim Papierkorbsammelfahrzeug somit bei fast allen

Konzepten unter den gegebenen konservativen Annahmen Kostensteigerungen des Fahrzeugbetriebs erwartet. Diese werden mit steigendem Technologiereifegrad sukzessive reduziert und können durch eine stärkere Kostendegression und Synergieeffekte von Wechselbatterien und Ladetechnik in der Flottennutzung auch früher eine Wirtschaftlichkeit erreichen.

Die TCO-Analyseergebnisse ausgewählter Parallel-Hybridkonzepte für die Großkehrmaschine sind in Abb. 6-29 dargestellt. Sehr gut erkennbar sind die insgesamt deutlich höheren Kosten und der hohe Anteil der Energiebereitstellung sowie Wartungsaufwände. Durch den hohen Energiebedarf des Arbeitsaggregats werden für die Großkehrmaschine ebenfalls unterschiedliche Antriebskonzepte für das Arbeitsaggregat relevant. Wegen des geringeren Wirkungsgrads durch häufigere Energiewandlungen eines hydraulischen Nebenantriebs sind die Kraftstoffkosten dieser Konzepte deutlich höher. Im Vergleich sinkt der kumulierte Kraftstoffverbrauch durch den effizienteren Fahrtrieb bei Konzepten mit Aufbaumotor jedoch nur leicht. Steigende elektrische Reichweiten resultieren bei der Großkehrmaschine insgesamt in höheren Gesamtkosten, da Einsparungen in der Energiebereitstellung die zusätzlichen Kosten durch den elektrischen Antriebsstrang nicht kompensieren. Dies wird insbesondere durch die Betrachtung der Indikatoren für optimistische bzw. pessimistische Preisentwicklungen deutlich. Erst bei großen Energiespeichern sind die Größenordnungen durch reduzierte Energieaufwände und zusätzliche Antriebs- und Energiespeicher annähernd gleich.

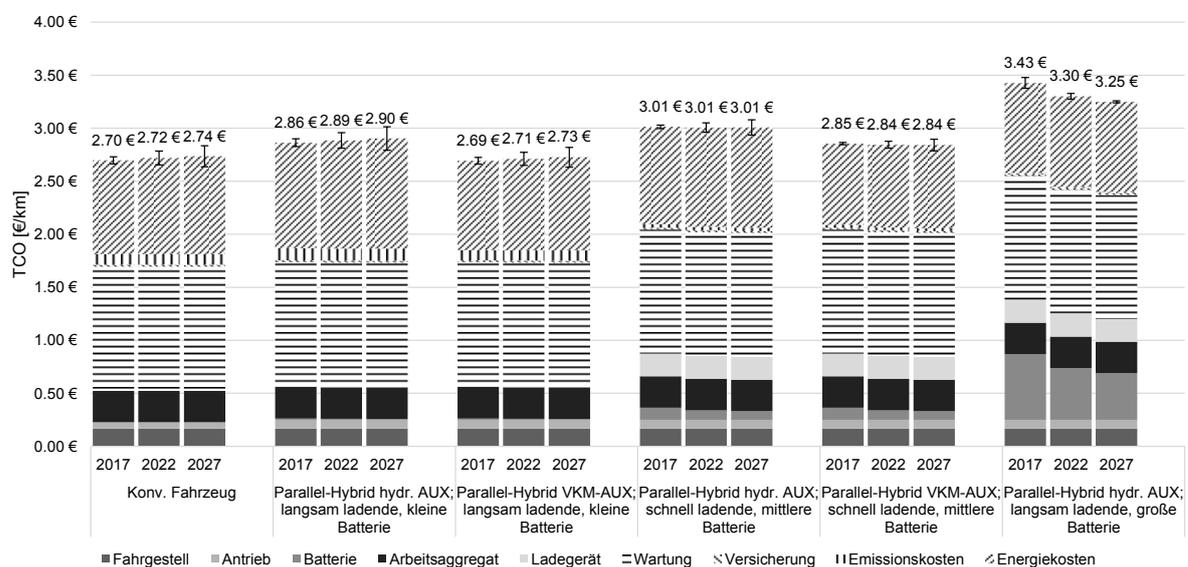


Abb. 6-29: TCO-Werte für ausgewählte Parallel-Hybridkonzepte der Großkehrmaschine

Die TCO einer Auswahl betrachteter Seriell-Hybridkonzepte für die Großkehrmaschine werden in Abb. 6-30 dargestellt. Das Arbeitsaggregat der Konzepte wird jeweils elektrisch oder mit einem Aufbaumotor angetrieben. Das elektrisch angetriebene Arbeitsaggregat resultiert in einem niedrigeren Kraftstoffverbrauch verglichen mit den hydraulischen Konzepten. Der Aufbaumotor ist in Bezug auf die TCO durch den hohen Wirkungsgrad

jedoch weiterhin überlegen. Seriell-Hybridkonzepte mit kleinen und mittleren Batteriegrößen können wie bei den Parallel-Hybridkonzepten zukünftig konkurrenzfähig werden, insbesondere wenn sich Batterie- und Energiekosten positiv entwickeln. Konzepte mit hohem Elektrifizierungsgrad sind auch bei Seriell-Hybriden durch hohe Investitionsaufwände kostenintensiv und können die Mehrkosten durch Energieeinsparungen nicht kompensieren.

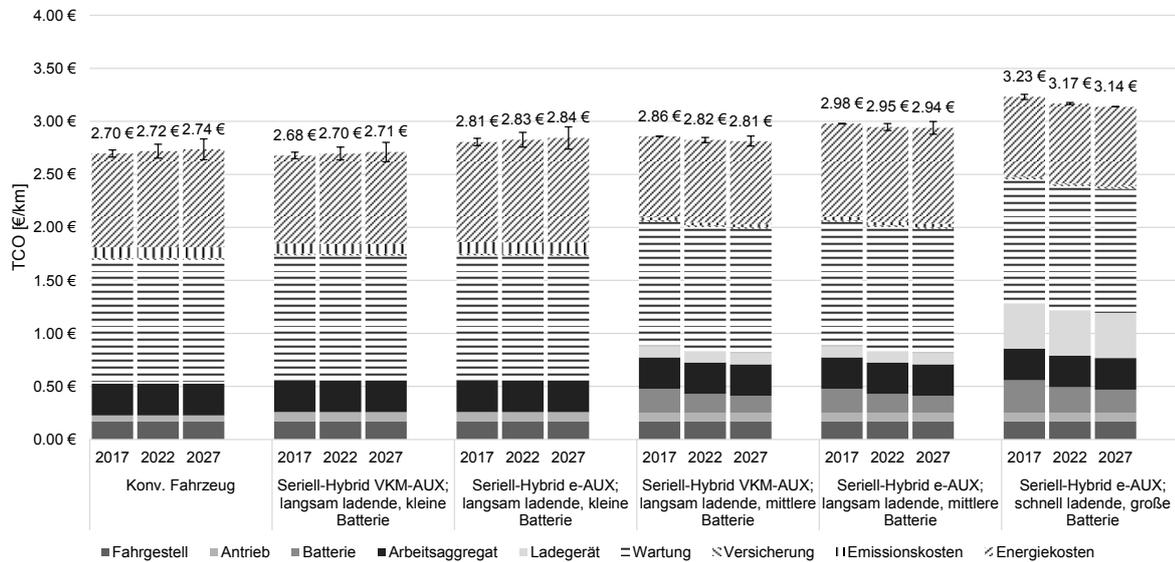


Abb. 6-30: TCO-Werte für ausgewählte Seriell-Hybridkonzepte der Großkehrmaschine

Eine Gesamtübersicht ausgewählter Elektrifizierungskonzepte für die Großkehrmaschine zeigt Abb. 6-31. Deutlich erkennbar ist das höhere Kostenniveau aller Fahrzeugkonzepte mit Ausnahme des Hybridkonzepts mit Aufbaumotor und kleinem Energiespeicher.

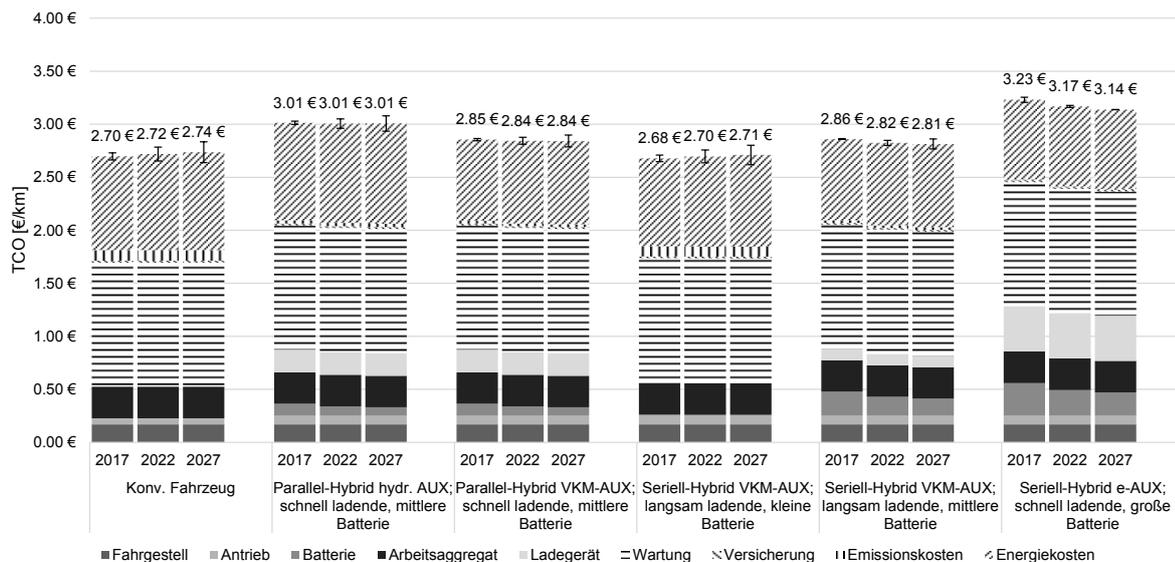


Abb. 6-31: Vergleich der TCO-Werte für ausgewählte Hybrid-Konzepte der Großkehrmaschine

Mehrere Energieumwandlungen zum Betrieb des Arbeitsaggregats führen beim hydraulisch und elektrisch betriebenen Arbeitsaggregat zu höheren Energie- und damit Gesamtkosten. Eine weitere Elektrifizierung mit mittleren und großen Energiespeichern kann ebenfalls nicht während der Fahrzeuglebensdauer amortisiert werden. Unter den getroffenen Annahmen amortisiert das Hybrid-Fahrzeug mit Aufbaumotor und kleinem Energiespeicher die Investition des alternativen Antriebsstrangs über die Fahrzeuglebensdauer und ist theoretisch bereits wirtschaftlich in die Flotte zu integrieren.

Im Anschluss an die Bestimmung der Gesamtkosten werden in dieser Arbeit dimensionslose Nutzwerte für die einzelnen Antriebsarchitektur-Konzepte je Fahrzeugtyp entwickelt. Dazu werden zunächst die durchschnittlichen TCO der Konzepte sowie des konventionellen Fahrzeugs aus den Beschaffungsjahren 2017, 2022 und 2027 berechnet. Die Nutzwerte für die untersuchten Konzepte werden anschließend unter der folgenden Konvention einer Skala von 1,0 bis 5,0 zugeordnet:

- Der höchste auftretende TCO-Wert eines Fahrzeugtypen definiert den niedrigsten Nutzwert 1,0.
- Die durchschnittlichen TCO des konventionellen Fahrzeugs definieren den mittleren Nutzwert 3,0.
- Der Nutzwert je Fahrzeugkonzept wird mit Hilfe der durchschnittlichen TCO auf dieser Skala interpoliert.

Die resultierenden Nutzwerte der Fahrzeugkonzepte des Papierkorbsammelfahrzeugs werden in Tab. 6-10 dargestellt. Während Fahrzeugkonzepte mit großen Energiespeichern signifikant schlechtere Bewertungen erhalten, sind Konzepte mit mittleren Energiespeichergrößen im Durchschnitt konkurrenzfähig. Bessere Bewertungen im Vergleich mit dem konventionellen Fahrzeug erhalten ausschließlich Fahrzeuge mit kleinen Batteriespeichern, die von den umgesetzten Hybridfunktionen profitieren.

Tab. 6-10: Nutzwerte der Wirtschaftlichkeitsbewertung für das Papierkorbsammelfahrzeug

Antriebskonzept	Arbeitsaggregatkonzept	Bewertung		
		Batteriegrößen		
		Min.	Mittel	Max.
Elektrofahrzeug (Batteriewechselsystem)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	-	1,6
Elektrofahrzeug (Schnellladesystem)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	-	1,6
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	3,2	-	1,9
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	2,9	1,4
REEV (langsames Laden)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	2,5	1,9
REEV (Schnellladesystem)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	3,0	1,4
REEV (Batteriewechselsystem)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	-	1,9
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,4	-	-
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	3,4	-	-
Konventioneller Antrieb	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,0	-	-

Betrachtete Fahrzeugsystemkonzepte für die Großkehrmaschine werden in Tab. 6-11 in einer Übersicht gezeigt. Dabei erhält kein Konzept eine bessere Bewertung im Vergleich mit dem konventionellen Fahrzeug. Bei der Großkehrmaschine werden Konzepte mit zunehmendem Elektrifizierungsgrad ebenfalls tendenziell wirtschaftlich schlechter mit absolut geringeren Nutzwerten bewertet.

Tab. 6-11: Nutzwerte der Wirtschaftlichkeitsbewertung für die Großkehrmaschine

Antriebskonzept	Arbeitsaggregatkonzept	Bewertung		
		Batteriegrößen		
		Min.	Mittel	Max.
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	2,5	2,2	1,3
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	-	2,2	1,4
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,0	-	-
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Hubkolben-Aufbaumotor	-	2,6	-
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,0	-	-
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	-	2,2	-
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,0	2,7	-
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Hubkolben-Aufbaumotor	-	2,6	-
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Elektrisches Arbeitsaggregat	2,8	2,3	1,6
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Elektrisches Arbeitsaggregat	-	2,3	1,7
Konventioneller Antrieb	Hubkolben-Aufbaumotor	3,0	-	-

6.3.4 Umwelteinflüsse

Als Teil der Umwelteinflüsse entwickelter Fahrzeugkonzepte werden die entstehenden Treibhausgas- (THG) und Schadstoffemissionen in dieser Arbeit anhand einer vereinfachten Lebenszyklusanalyse bewertet. Zusätzlich wird die Möglichkeit der Eigennutzung erneuerbarer Energien auf den Liegenschaften der Flottenbetreiber betrachtet, sowie potentielle Lärmreduktionen durch den Einsatz alternativer Antriebssysteme bewertet.⁴⁶⁹

In dieser Arbeit wird basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche zur Lebenszyklusanalyse eine sogenannte Sachbilanz-Studie durchgeführt, welche die nachfolgenden Phasen umfasst:⁴⁷⁰

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz
- Auswertung

Ziel der Untersuchung ist den ökologischen Effekt des Einsatzes innovativer Fahrzeugkonzepte im Vergleich mit dem konventionellen Fahrzeug in einem frühen Entwicklungsstadium zu bestimmen. Die auftretenden Emissionen werden dabei unmittelbar mit den voraussichtlichen Veränderungen der Fahrzeuge und deren Betrieb in Zusammenhang

⁴⁶⁹ Vgl.: Kapitel 2.1.4

⁴⁷⁰ Vgl.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2006b, S. 16

gebracht, sodass die Ergebnisse in Form einer Sachbilanz-Studie vergleichbar sind. Bereiche die nicht verändert werden, wie beispielsweise Fahrzeugkarosserien oder Arbeitsaggregat-Gehäuse sind dabei explizit nicht Teil der Umweltbilanz. Basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche⁴⁷¹ wurde das Modell in Abb. 6-32 erarbeitet und im Rahmen dieser Arbeit auf die entwickelten alternativen Nutzfahrzeugkonzepte angewendet. Im Folgenden wird auf die einzelnen Prozessschritte eingegangen und relevante Eingangsparameter erläutert. Die Umwelteinflussanalyse dieser Arbeit unterscheidet dazu die Schritte Kraftstoff- und Strombereitstellung, Fahrzeug-Herstellung und -Recycling sowie Fahrzeug-Nutzung.

Auftretende Treibhausgasemissionen während der Kraftstoffbereitstellung (Well-to-Tank) für den Betrieb der Nutzfahrzeuge wurden vom Joint Research Center der europäischen Kommission ausgiebig untersucht. Im Well-to-Tank Report wird gemeinsam mit dem europäischen Umweltverband der Mineralölforschung und dem europäischen Verband für Fahrzeugforschung und -entwicklung das CO₂-Äquivalent für die Diesel-Kraftstoffherstellung auf 15,5 gCO₂/MJ bestimmt.⁴⁷² Für die gesetzlich vorgeschriebene Beimischung von Biodiesel wird in dieser Arbeit ein CO₂-Äquivalent von 55 gCO₂/MJ angenommen.⁴⁷³

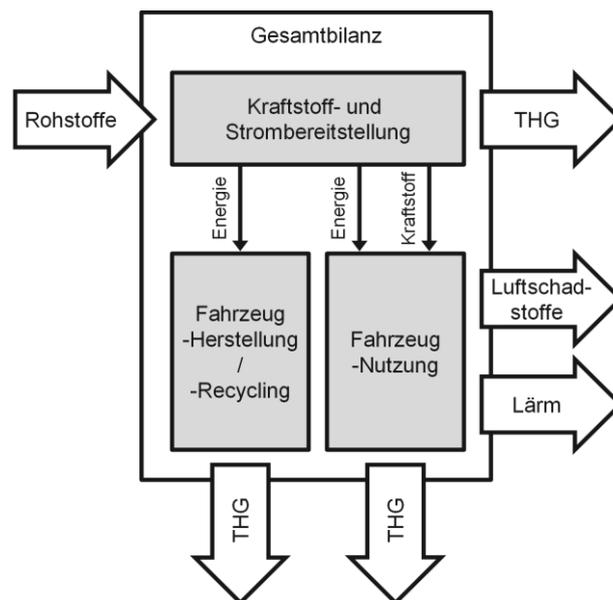


Abb. 6-32: Struktur des verwendeten Umwelteinflussanalyse-Modells

Durch die Strombereitstellung für den Betrieb der Elektro- und Hybridfahrzeuge werden ebenfalls Treibhausgase emittiert. Abhängig vom eingesetzten Kraftwerkstyp bzw. der Kombination unterschiedlicher Kraftwerke unterscheiden sich die Emissionsfaktoren deutlich. Relevant für die Gesamtbilanz der Treibhausgasemissionen ist der deutsche Strom-Mix mit 29 % erneuerbaren Energien und 535 gCO₂/kWh in 2015, welcher dieser Arbeit zugrunde

⁴⁷¹ Vgl.: Kapitel 2.2.4.3

⁴⁷² Vgl.: Edwards et al. 2013, S. 77;

⁴⁷³ Vgl.: Fehrenbach et al. 2016, S. 141-150

gelegt wird.⁴⁷⁴ Durch einen kontinuierlich steigenden Anteil erneuerbarer Energien kann der Ausstoß klimaschädlicher Gase über die Lebensdauer der Fahrzeuge jedoch sukzessive reduziert werden.⁴⁷⁵ Abb. 6-33 zeigt unterschiedliche Kraftwerkstypen im Vergleich mit dem deutschen Strom-Mix.

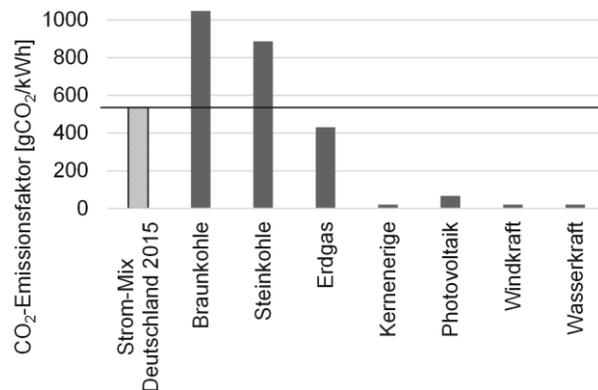


Abb. 6-33: CO₂-Emissionsfaktoren verschiedener Kraftwerkstypen im Vergleich⁴⁷⁶

Ebenfalls werden erhöhte Aufwände für die Herstellung und das Recycling der elektrifizierten Fahrzeuge berücksichtigt. Auftretende THG-Emissionen von Motoren und benötigten Zusatzbauteilen sind bei konventionellen und elektrischen Fahrzeugen annähernd identisch.⁴⁷⁷ Insbesondere die Batterie als Energiespeicher im Antriebsstrang verursacht jedoch einen signifikanten zusätzlichen Energiebedarf bei der Fahrzeugproduktion, der zusätzlich über die Lebensdauer kompensiert werden muss.⁴⁷⁸ Anzusetzende CO₂-Äquivalente variieren mit der eingesetzten Lithium-Ionen-Zellchemie. In dieser Arbeit wird ein durchschnittlicher Wert mehrerer Studien von 140 kgCO₂/kWh für Herstellung und Recycling der Batteriesysteme angenommen.⁴⁷⁹

Ein besonderer Fokus wird auf den Betrieb der Fahrzeuge und den dabei auftretenden Umwelteinflüssen gesetzt. Durch den Verbrennungsprozess im Hubkolbenmotor entstehen lokal am Fahrzeug Treibhausgase, Luftschadstoffe und Lärmemissionen, welche durch die Elektrifizierung der Fahrzeuge teilweise bzw. vollständig eliminiert werden können.⁴⁸⁰ In dieser Arbeit wird von emittierten Luftschadstoff-Emissionen der Diesel-Motoren entsprechend der aktuell bestehenden Kohlenmonoxid- (CO), Stickstoffoxid- (NO_x) und Partikelmasse-Grenzwerte (PM) für die betrachteten Nutzfahrzeuge entsprechend der berechneten Kraftstoffverbräuche⁴⁸¹ ausgegangen. Die angewendeten Grenzwerte, wie in

⁴⁷⁴ Vgl.: Umweltbundesamt 2017; AG Energiebilanzen e.V. 2016

⁴⁷⁵ Vgl.: Kapitel 1.1

⁴⁷⁶ Aufbereitete Daten entsprechend AG Energiebilanzen e.V. 2016; Icha/Kuhs 2016; Memmler et al. 2014; Wagner et al. 2007, S. 44-52

⁴⁷⁷ Vgl.: Girardi/Gargiulo/Brambilla 2015; Helms et al. 2011, S. 18, 30; Notter et al. 2010, S. 6552

⁴⁷⁸ Vgl.: Held et al. 2016, S. 39

⁴⁷⁹ Vgl.: Helms et al. 2014, S. 21

⁴⁸⁰ Vgl.: Kapitel 2.1.2

⁴⁸¹ Vgl.: Kapitel 4.4.2

Tab. 6-12 dargestellt, werden im Nutzfahrzeubereich bereits heute in realen Fahrprofilen überprüft und gelten damit als zuverlässig im Vergleich mit den Pkw-Grenzwerten.⁴⁸²

Tab. 6-12: Emissionsgrenzwerte für die betrachteten Nutzfahrzeuge [mg/kWh]⁴⁸³

Motorentyp	Gesetzestext	Stufe	CO-Grenzwert	NO _x -Grenzwert	PM-Grenzwert
Fahrtrieb	Verordnung (EG) Nr. 595/2009	Euro VI	4 000	460	10
Aufbaumotor	Richtlinie 2004/26/EG	III B	5 000	4 700 ⁴⁸⁴	25

Mit Hilfe elektrischer und hybridisierter Antriebe werden Treibhausgasemissionen im verbrennungsmotorischen Fahrzeugbetrieb durch die Steigerung des Gesamtfahrzeug-Wirkungsgrads reduziert und entsprechend der Auswertung aktueller wissenschaftlicher Publikationen⁴⁸⁵ in Verbindung mit dem Energiebedarf⁴⁸⁶ für die spezifischen Fahrzeugtypen abgeschätzt. Der unmittelbare Ausstoß von Luftschadstoffen am Fahrzeug in urbanen Ballungsräumen wird analog durch den niedrigeren Kraftstoffverbrauch und die Betriebspunktoptimierung der Motoren reduziert.⁴⁸⁷

Werden Fahrzeuge elektrisch angetrieben, sind klimaschädliche Emissionen, wie bereits erwähnt, von der Stromerzeugung abhängig. Luftschadstoffe direkt am Fahrzeug werden nicht erzeugt, können aber durch die Stromerzeugung unmittelbar am Kraftwerk entstehen. Dieser Aspekt wird wegen der spezifischen Betrachtung des Fahrzeugbetriebs innerhalb von Metropolregionen vernachlässigt.

Die Ergebnisse der antriebssystemspezifischen THG- und Luftschadstoff-Emissionsprognose werden für das Papierkorbsammelfahrzeug in Abb. 6-34 übersichtlich dargestellt. Die abgebildeten Fahrzeugkonzepte stoßen durch niedrigere Kraftstoffverbräuche hybridisierter Fahrzeuge signifikant weniger CO₂ aus. Bei steigenden elektrischen Reichweiten reduziert sich der Ausstoß im Vergleich jedoch deutlich langsamer, da die zusätzlichen Emissionen der Stromerzeugung und der Batterieherstellung die reduzierten Emissionen durch die Kraftstoffverbrennung kompensieren. Die auftretenden Luftschadstoff-Emissionen werden stufenweise und proportional zum Elektrifizierungsgrad reduziert sowie bei Elektrofahrzeugen vollständig eliminiert.

⁴⁸² Vgl.: International Council on Clean Transportation 2017

⁴⁸³ Vgl.: Europäisches Parlament 2009b; Europäisches Parlament 2004

⁴⁸⁴ Die Richtlinie definiert ebenfalls eine Stufe IV mit einem signifikant auf 400 mgNO_x/kWh reduzierten Grenzwert. Die Werte sind ab 2013, jedoch nur für Motoren > 56 kW verbindlich.

⁴⁸⁵ Vgl.: Kapitel 2.1.4.1

⁴⁸⁶ Vgl.: Kapitel 4.4.2

⁴⁸⁷ Vgl.: Kapitel 2.1.2.2

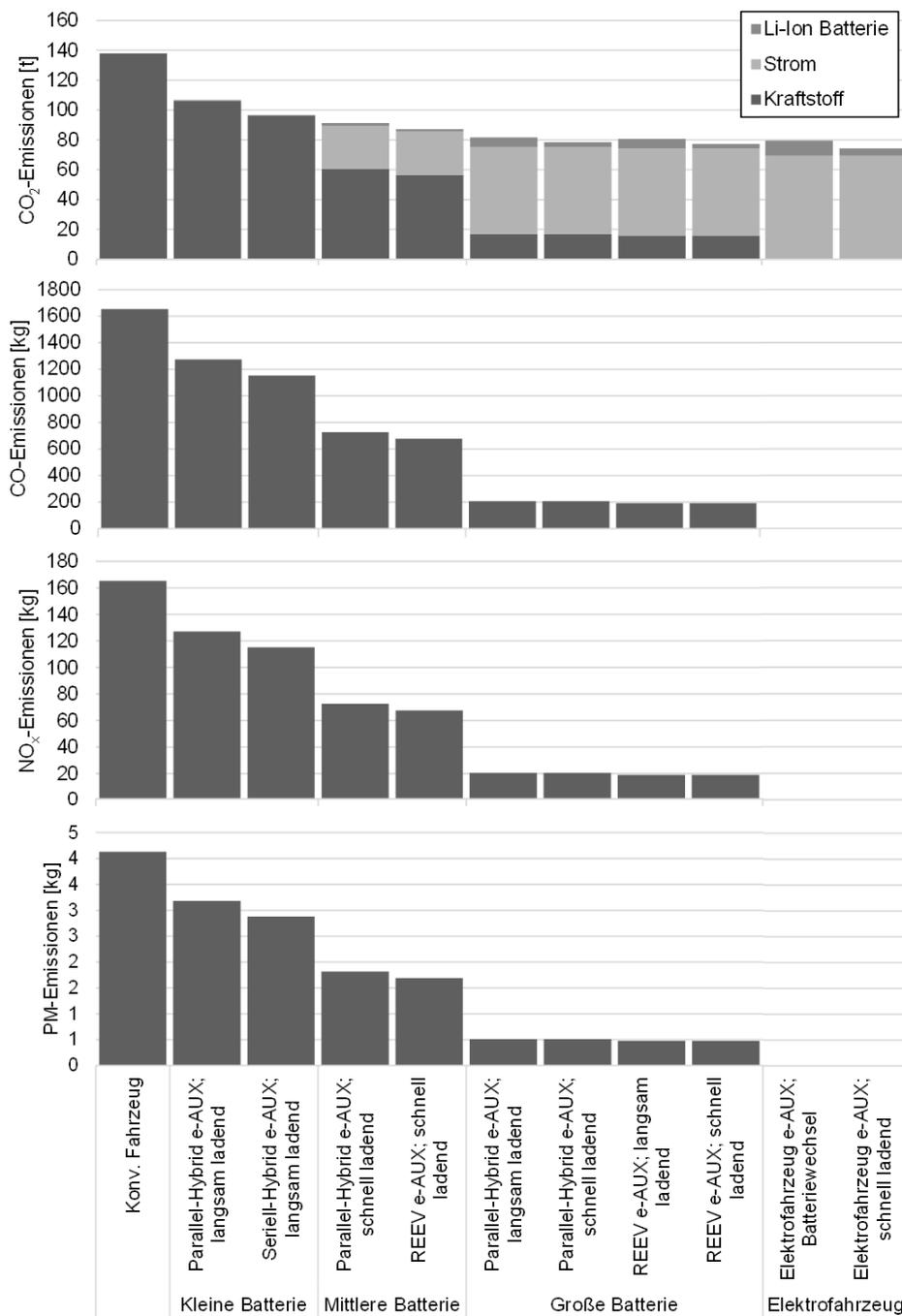


Abb. 6-34: Antriebssystemspezifische Emissionen der Papierkorbsammelfahrzeug-Konzepte

Die Ergebnisse der betrachteten Fahrzeugsystemkonzepte für die Großkehrmaschine sind in Abb. 6-35 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Aufteilung der Emissionen in Kraftstoffverbrennung des Fahrtriebs und des Arbeitsaggregats. Wie beim Papierkorbsammelfahrzeug resultiert der reduzierte Kraftstoffverbrauch des Fahrtriebs durch Hybridisierung in niedrigeren THG- und Luftschadstoffemissionen. Der hohe Anteil des Arbeitsaggregats am Gesamtenergiebedarf führt zu einem starken Einfluss dessen Energiebereitstellung und Wirkungsgradkette auf das Ergebnis. Dementsprechend führen

häufige Energiewandlungen bei hydraulisch oder elektrisch betriebenen Arbeitsaggregaten zu höheren CO₂-Emissionen, mit Ausnahme der Konzepte mit großen Energiespeichern.

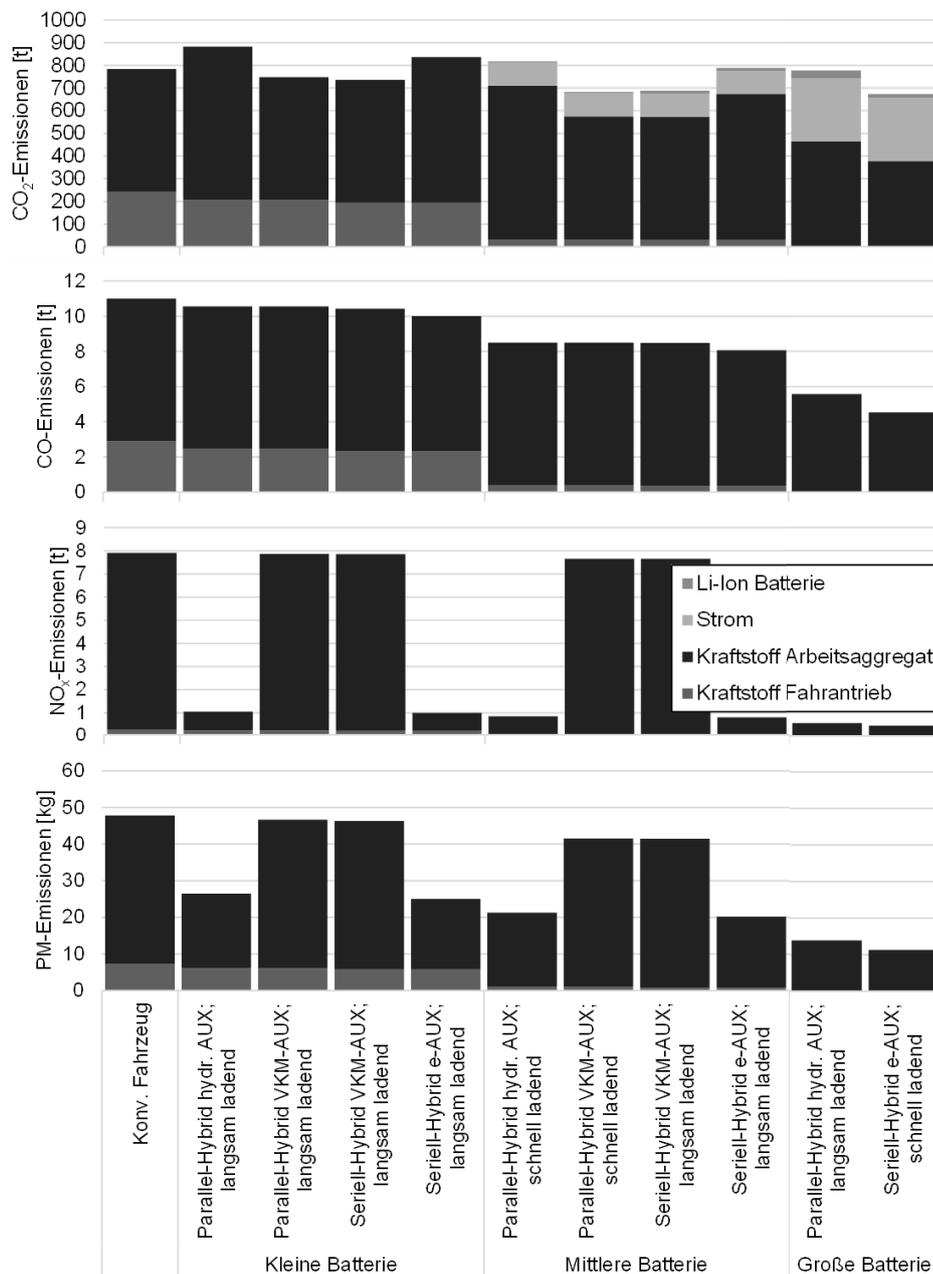


Abb. 6-35: Antriebssystemspezifische Emissionen der Großkehrmaschinen-Konzepte

Bei Betrachtung der Luftschadstoff-Emissionen der Konzepte für die Großkehrmaschine wird die Unterscheidung der unterschiedlichen Emissionsgrenzwerte für Aufbau und Fahrtrieb relevant. Bei auftretenden Kohlenmonoxid-Emissionen führen striktere Emissionsgrenzwerte für das Arbeitsaggregat zu sukzessive reduziertem Ausstoß, trotz teilweise höherem Kraftstoffverbrauch. Die Stickoxid- und Partikelemissionen profitieren jedoch deutlich von

den geringeren Schadstoff-Grenzwerten des Fahrtriebs bei Fahrzeugkonzepten ohne separaten Aufbaumotor.

Fahrzeugunabhängig sind die Abgasgrenzwerte relevante Parameter um reduzierte Kraftstoffverbräuche der Hybridfahrzeuge effektiv in reduzierte Luftschadstoffemissionen zu überführen. Zusätzlich zeigt der Anteil der Stromerzeugung an den antriebsspezifischen THG-Emissionen ein deutliches Potential zur weiteren Reduktion durch Elektrifizierung zusammen mit stärkerer Nutzung erneuerbarer Energien. In Deutschland werden die Kapazitäten erneuerbarer Energien kontinuierlich ausgebaut und deren Anteil an der Stromerzeugung infolgedessen gesteigert. Gleichzeitig werden die Kernkraftwerke bis 2022 sukzessive abgeschaltet, sodass beispielsweise in der Energierferenzprognose des BMWi nur ein leichter Rückgang der fossilen Energieerzeugung erwartet wird.⁴⁸⁸ Dieses Vorgehen gleicht resultierende THG-Effekte aus, was zu einem nur leichten Rückgang der emittierten Emissionen durch die Energiebereitstellung bis 2030 führt. Andere Studien gehen jedoch von einem deutlichen Rückgang der Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strom-Mix aus.⁴⁸⁹ Dementsprechend stellt einer Prognose der zukünftigen Entwicklung eine große Herausforderung dar und wird in der Auswertung dieser Umwelteinflussanalyse nicht einbezogen.

Die dimensionslosen Nutzwerte der unterschiedlichen Fahrzeugkonzepte werden analog zur Wirtschaftlichkeitsbewertung bestimmt. Dabei werden jeweils ein Nutzwert für die Treibhausgas-Emissionen sowie die Luftschadstoffe, als Mittelwert der einzelnen Ergebnisse ermittelt. Das konventionelle Fahrzeug stellt bei der Interpolation die Bezugsgröße für den Nutzwert 3,0 und das fahrzeugspezifische Konzept mit den geringsten Emissionen den Nutzwert 5,0 dar.

Die Nutzwerte sämtlicher Fahrzeugkonzepte für das Papierkorbsammelfahrzeug werden in Tab. 6-13 sowie für die Großkehrmaschine in Tab. 6-14 zusammengefasst.

Tab. 6-13: Nutzwerte der Emissionsanalyse für das Papierkorbsammelfahrzeug

Antriebskonzept	Arbeitsaggregatkonzept	Bewertung (THG / Schadst.)		
		Batteriegrößen		
		Min.	Mittel	Max.
Elektrofahrzeug (Batteriewechselsystem)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	-	4,8 / 5,0
Elektrofahrzeug (Schnellladesystem)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	-	5,0 / 5,0
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	4,0 / 3,5	-	4,8 / 4,8
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	4,5 / 4,1	4,9 / 4,8
REEV (langsames Laden)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	4,5 / 4,2	4,8 / 4,8
REEV (Schnellladesystem)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	4,6 / 4,2	4,9 / 4,8
REEV (Batteriewechselsystem)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	-	-	4,8 / 4,8
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	4,3 / 3,6	-	-
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Elektro-hydr. Arbeitsaggregat	4,3 / 3,6	-	-
Konventioneller Antrieb	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,0 / 3,0	-	-

⁴⁸⁸ Vgl.: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2014, S. 78, 212-220

⁴⁸⁹ Vgl.: Held et al. 2016, S. 101-102

Tab. 6-14: Nutzwerte der Emissionsanalyse für die Großkehrmaschine

Antriebskonzept	Arbeitsaggregatkonzept	Bewertung (THG / Schadst.)		
		Batteriegrößen		
		Min.	Mittel	Max.
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	1,2 / 4,1	2,3 / 4,4	3,1 / 4,8
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	-	2,4 / 4,4	3,4 / 4,8
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,7 / 3,1	-	-
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Hubkolben-Aufbaumotor	-	4,8 / 3,4	-
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	1,4 / 4,1	-	-
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	-	2,4 / 4,4	-
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,9 / 3,1	4,8 / 3,4	-
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Hubkolben-Aufbaumotor	-	4,9 / 3,4	-
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Elektrisches Arbeitsaggregat	2,0 / 4,1	2,9 / 4,4	4,7 / 5,0
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Elektrisches Arbeitsaggregat	-	3,0 / 4,4	5,0 / 5,0
Konventioneller Antrieb	Hubkolben-Aufbaumotor	3,0 / 3,0	-	-

Ebenfalls wird durch Hybridisierung und Elektrifizierung der Nutzfahrzeuge eine deutliche Reduktion der Lärmemissionen am Fahrzeug erwartet. Wie im Stand der Technik dargestellt, hat sowohl der Einsatz von elektrischen Maschinen im Fahrantrieb als auch im Arbeitsaggregat⁴⁹⁰ einen signifikanten Effekt.⁴⁹¹ Da in diesem Bewertungsprozess Fahrzeugkonzepte bewertet werden, wird eine qualitative Abschätzung über den Elektrifizierungsgrad und einer Analyse der Emissionsquellen basierend auf Ergebnissen vergleichbarer Fahrzeugtypen durchgeführt.

Für das Papierkorbsammelfahrzeug werden die Geräuschquellen und spezifische Lärmreduktions-Maßnahmen entsprechend Abb. 6-36 aufgeteilt. Diese orientieren sich an den Antriebsarchitekturen in den entwickelten Fahrzeugkonzepten.⁴⁹² Dementsprechend existieren Fahrgestelle mit konventionellem, hybridisiertem oder elektrischem Fahrantrieb, sowie das Arbeitsaggregat einschließlich Hydraulik und mechanischer Abfallpresse. Die Papierkörbe sind ebenfalls eine Geräuschquelle, werden jedoch vom Fahrzeugkonzept nicht beeinflusst und deshalb in dieser Arbeit vernachlässigt.⁴⁹³

⁴⁹⁰ Vgl.: Faltenbacher et al. 2016, S. 69; Fischer 2016, S. 11

⁴⁹¹ Vgl.: Kapitel 2.1.4.3

⁴⁹² Vgl.: Kapitel 5.1

⁴⁹³ Vgl.: Kapitel 2.1.5

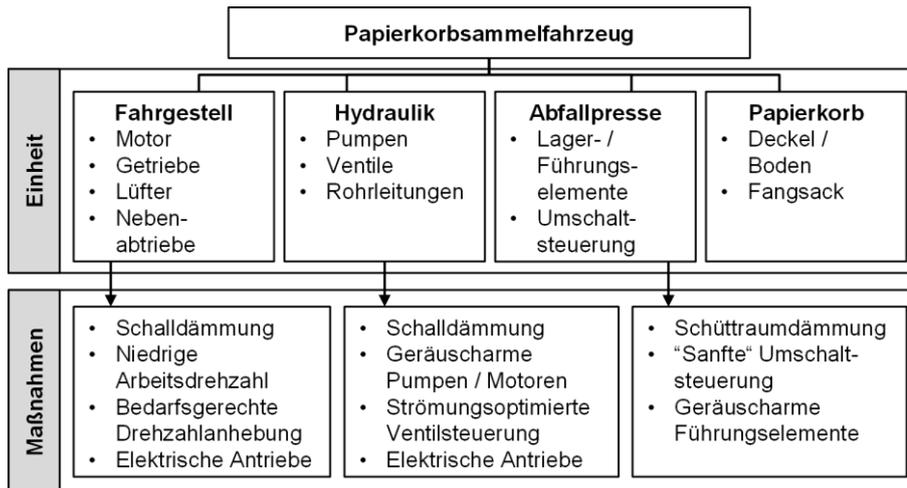


Abb. 6-36: Quellspezifische Lärmreduktions-Maßnahmen für Papierkorbsammelfahrzeuge⁴⁹⁴

Die Großkehrmaschine besitzt weitere Geräuschquellen, die durch eine Elektrifizierung beeinflusst werden. Neben dem Fahrtrieb und der Hydraulik benötigt eine Kehrmaschine mehrere Kehrheiten, die im konventionellen Fahrzeug hydraulisch betrieben werden, sowie einen Aufbaumotor für das Saugsystem. Eine Übersicht der Geräuschquellen und mögliche Maßnahmen zu deren Reduktion zeigt Abb. 6-37.

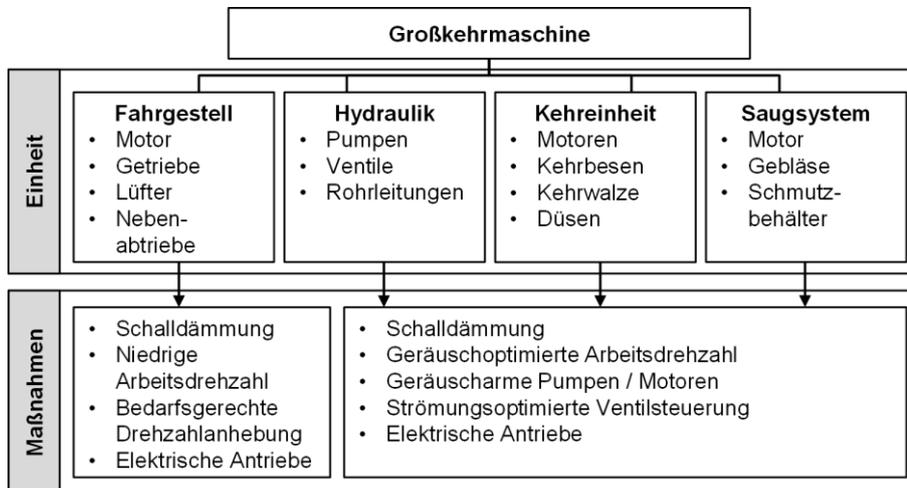


Abb. 6-37: Quellspezifische Lärmreduktions-Maßnahmen für Großkehrmaschinen⁴⁹⁵

Die aufgeführten Einheiten je Fahrzeugtyp werden nicht permanent betrieben, sodass die spezifischen Lärmemissionen während des Fahrzeugeinsatzes differenziert betrachtet werden sollten. Maßgeblich für die resultierende Lärmreduktion sind dabei die jeweiligen Einsatzdauern im Fahr- bzw. Werkbetrieb sowie die Betriebsdauer des Arbeitsaggregats, die

⁴⁹⁴ Angelehnt an Hammer 2014; Silvan 2008

⁴⁹⁵ Angelehnt an Hammer 2014; Silvan 2008

auf den repräsentativen Fahrprofilen⁴⁹⁶ anhand des dargestellten Zielsystems in Abb. 6-38 ausgewertet werden. Für den Fahrtrieb wird eine Reduktion der Lärmemissionen mit zunehmender Elektrifizierung angenommen, die in einen linear ansteigenden Nutzwert übersetzt wird. Auf Basis eines Fahrzeugkonzepts ist die qualitative Bewertung der insgesamt emittierten Lärmemissionen bei gleichzeitigem Betrieb des Arbeitsaggregats nur unter hoher Unsicherheit möglich und voraussichtlich gering. Deswegen wird dieser Effekt in der Bewertung vernachlässigt.⁴⁹⁷

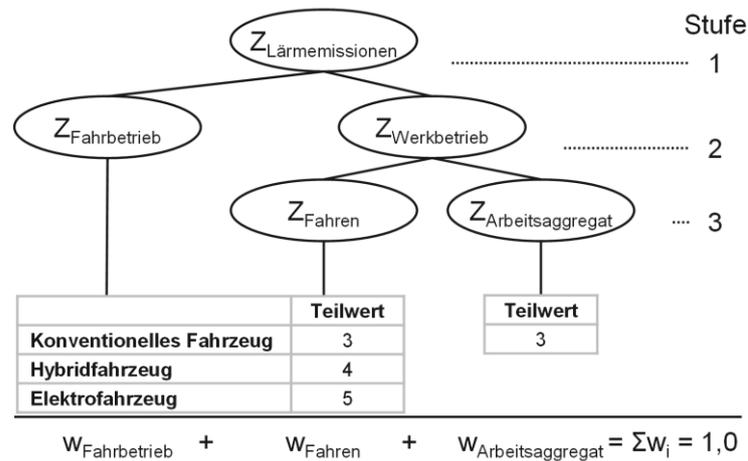


Abb. 6-38: Zielsystem zur Bewertung der Lärmemissionen

Die resultierenden Nutzwerte für die elektrifizierten Fahrzeugkonzepte im Vergleich mit dem diesel-betriebenen Referenzfahrzeug werden in Tab. 6-15 dargestellt. Das Potential zur Lärmreduktion durch Elektrifizierung ist beim Papierkorbsammelfahrzeug im Vergleich zur Großkehrmaschine signifikant höher. Dies liegt insbesondere an der kurzen Betriebszeit des Arbeitsaggregats eines Papierkorbsammelfahrzeugs während des Werkbetriebes von nur 3 % im Vergleich mit 87 %, obwohl der Fahrbetrieb-Anteil mit 19 % deutlich geringer als 28 % bei der Großkehrmaschine ist.

Tab. 6-15: Nutzwerte der Lärmemissionsreduktion elektrifizierter Fahrzeugkonzepte

	Papierkorb-sammelfahrzeug	Großkehr-maschine
Konventionelles Fahrzeug	3	3
Hybridfahrzeug	3,8	3,3
Elektrofahrzeug	4,6	3,7

Durch die Einbindung elektrifizierter Flotten in intelligente Netze können zusätzlich zu den netztechnischen Funktionen auch erneuerbare Energien gespeichert und besser nutzbar

⁴⁹⁶ Vgl.: Kapitel 4.4.1

⁴⁹⁷ Vgl.: Kapitel 2.1.4.3

gemacht werden.⁴⁹⁸ Eine gleichmäßige Verteilung der Ladevorgänge auf die nächtlichen Schwachlaststunden erhöht die Windstromnutzung und hat durch die Lastglättung einen deutlich positiven Effekt auf das Stromerzeugungssystem, wenn die Kapazitäten des Übertragungsnetzes dies zulassen.⁴⁹⁹ Somit können auch ohne Zubau von Kraftwerken vorhandene Erzeugungskapazitäten besser ausgelastet werden.⁵⁰⁰ Selbst erzeugte erneuerbare Energien auf einer Flottenbetreiber-Liegenschaft können mangels Gleichzeitigkeit meist nicht unmittelbar in den Fahrzeugen genutzt werden, insbesondere wenn diese in zwei Schichten betrieben werden. Während eines Schichtwechsels am Tag ist die Schnellladung mit hoher Leistung für einzelne Fahrzeuge direkt aus den lokalen PV-Kapazitäten theoretisch möglich. Mangels regelmäßiger Verfügbarkeit wird der Effekt in dieser Arbeit jedoch ebenfalls vernachlässigt.

Die ermittelten Nutzwerte für Treibhaus-, Luftschadstoff- und Lärmemissionen werden in dieser Arbeit gleichgewichtet und ergeben einen Mittelwert, der als Nutzwert der Umwelteinflüsse im Gesamtergebnis abgebildet wird.

6.3.5 Unternehmens-Image

Abschließend für die gesamtheitliche Bewertung in dieser Arbeit werden Effekte durch elektrifizierte Fahrzeuge auf die Reputation einer Organisation, die Einnahme einer Vorreiterrolle, die Mitarbeitermotivation sowie die interne und externe Akzeptanz der neuen Technologie qualitativ abgeschätzt. Die Analyse stützt sich dazu auf aktuelle Ergebnisse der Akzeptanzforschung für Elektrofahrzeuge und überträgt die Aussagen auf den Einsatz elektrifizierter Nutzfahrzeuge bei Flottenbetreibern.

Grundsätzlich werden dabei Elektrofahrzeuge als sehr gut für das Image der Organisation eingeschätzt und von Mitarbeitern befürwortet.⁵⁰¹ Die positiven Effekte werden insbesondere mit den geringeren Umwelteinflüssen durch Lärm- und Luftschadstoff- sowie Treibhausgasemissionen in Verbindung gebracht. Unmittelbare Vorteile für die Mitarbeiter werden weniger erwartet.⁵⁰² Zusätzlich kann durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen in der Organisation eine Vorreiterrolle eingenommen werden. Insgesamt werden Abstriche bei Komfort, Zuverlässigkeit und Sicherheit sowie negative Nutzerreaktionen meist als unwahrscheinlich gesehen, jedoch Mehraufwand und Mobilitätseinschränkungen befürchtet.⁵⁰³ Die Technologien werden in Studien von Verantwortungsträgern und gewerblichen Fahrern nicht nur sehr übereinstimmend positiv bewertet, sondern ein Imageverlust wird befürchtet, wenn die Flotte nicht sukzessive elektrifiziert wird.⁵⁰⁴

⁴⁹⁸ Vgl.: Mi/Masrur/Gao 2014, S. 156

⁴⁹⁹ Vgl.: Harder 2014; Linssen et al. 2012, S. 130

⁵⁰⁰ Vgl.: Arndt/Döge/Marker 2016, S. 217-224

⁵⁰¹ Vgl.: Frenzel et al. 2015, S. 32-33; Schulz 2015, S. 47-50

⁵⁰² Vgl.: Globisch/Dütschke/Ensslen 2016, S. 3-4; Wickert et al. 2013, S. 147; Jonuschat/Wölk/Handke 2012, S. 20

⁵⁰³ Vgl.: Dütschke et al. 2015, S. 28-29; Plötz et al. 2014a, S.13; Zott et al. 2015

⁵⁰⁴ Vgl.: Grausam/Parzinger/Müller 2015, S. 26

Um die Erkenntnisse sinngemäß auf die anwendungsorientiert entwickelten, elektrifizierten Nutzfahrzeugkonzepte dieser Arbeit zu übertragen, werden die Rahmenbedingungen des Entwicklungsprozesses rekapituliert.⁵⁰⁵ Alle bewerteten Fahrzeugsystemkonzepte erfüllen die Anforderungsprofile und können somit vollwertig im aktuellen Betriebsablauf der Flottenbetreiber eingesetzt werden. Dementsprechend entstehen keine negativen Auswirkungen für den Flottenbetreiber.

Die qualitative Abschätzung der Auswirkungen einzelner Fahrzeugkonzepte auf das Unternehmens-Image erfolgt in dieser Arbeit basierend auf dem Elektrifizierungsgrad des Fahrantriebes und Arbeitsaggregats⁵⁰⁶, der Umsetzung von Hybrid- und Elektrofahrzeug-spezifischen Funktionen⁵⁰⁷ und der umgesetzten elektrischen Reichweite oder dem Elektrifizierungsumfang des Arbeitsaggregats. Die Kriterien werden anhand eines Bewertungsschemas dimensionslos skaliert. Das konventionelle Fahrzeug dient für die Bewertung mit einem neutralen Nutzwert 3,0 als Referenz.

Für das Papierkorbsammelfahrzeug wurden im Konzeptentwicklungsprozess neun elektrifizierte Antriebskonzepte entwickelt. Diese sind in Tab. 6-16 aufgelistet und der Elektrifizierungsgrad der Antriebsstrangkonfigurationen einschließlich der Arbeitsaggregate bewertet. Die Nutzwerte wurden in Bezug auf den Elektrifizierungsgrad in Elektrofahrzeug, REEV mit vorwiegend elektrischem Betrieb sowie Hybridantriebe abgestuft. Ein relevanter Image-Mehrwert durch verschiedene Ladetechnologien auf die Unternehmens-Außendarstellung wird aktuell nicht erwartet. Zusätzlich werden für REEV und Hybrid-Konzepte die drei verschiedenen Energiespeichergrößen⁵⁰⁸ unterschieden.

Der Entwicklungsprozess für die Großkehrmaschine ergab zehn unterschiedliche Antriebsstrangtopologien und ebenfalls drei Batteriespeicher-Dimensionierungen für die Hybrid-Topologien. Das Bewertungsergebnis ist in Tab. 6-17 übersichtlich dargestellt.

Im Vergleich mit dem Papierkorbsammelfahrzeug benötigt die Großkehrmaschine deutlich mehr Energie sowie einen großen Anteil der Energie für den Betrieb des Arbeitsaggregats. Da das Arbeitsaggregat aufgrund der geringen Verluste und dem konstanten Betrieb häufig direkt durch einen separaten Hubkolben-Aufbaumotor betrieben wird, sind die sichtbaren und außendarstellungswirksamen Effekte geringer. Weiterhin emittiert das elektromotorisch oder elektro-hydraulisch angetriebene Saugsystem antriebsunabhängig signifikante Geräusch-emissionen und kann somit nicht so deutlich von einer Lärmreduktion während des Werkbetriebs profitieren. Daraus resultiert ein geringerer Nutzwert für die Hybridfahrzeuge der Großkehrmaschine. Die Ausnahme bilden Konzepte mit elektrischem Arbeitsaggregat, die zeitweise einen vollständig elektrischen Betrieb des Fahrzeugs zulassen. Der aggregierte Nutzwert für Effekte auf das Unternehmens-Image bezieht die betrachteten Kriterien gleichwertig ein.

⁵⁰⁵ Vgl.: Kapitel 4.4.3

⁵⁰⁶ Vgl.: Kapitel 2.1.2 Abb. 2-6

⁵⁰⁷ Vgl.: Kapitel 2.1.2.1 und Kapitel 2.1.2.2

⁵⁰⁸ Vgl.: Kapitel 6.3.3

Tab. 6-16: Image-Relevanz unterschiedlicher Papierkorbsammelfahrzeug-Konzepte

Antriebskonzept	Arbeitsaggregatkonzept	Bewertung
Elektrofahrzeug (Batteriewechselsystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	5
Elektrofahrzeug (Schnellladesystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	5
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	4
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	4
REEV (langsames Laden)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	4,5
REEV (Schnellladesystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	4,5
REEV (Batteriewechselsystem)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	4,5
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	4
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Elektro-hydraulisches Arbeitsaggregat	4
Konventioneller Antrieb	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3

Energiespeicher-Dimensionierung	Elektrifizierungsumfang	Bewertung
-	-	3
3 kWh (2,4 kWh nutzbar)	Volle Hybridfunktionalitäten	3,5
23 kWh (18,7 kWh nutzbar)	Elektrischer Werkbetrieb – 1 Schicht	4
47 kWh (37,3 kWh nutzbar)	Elektrischer Werkbetrieb – 2 Schichten	4,5
73 kWh (53,3 kWh nutzbar)	Elektrofahrzeug	5

Tab. 6-17: Image-Relevanz unterschiedlicher Großkehrmaschine-Konzepte

Antriebskonzept	Arbeitsaggregatkonzept	Bewertung
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,5
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,5
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,5
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,5
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,5
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Hydraulisches Arbeitsaggregat	3,5
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,5
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Hubkolben-Aufbaumotor	3,5
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden)	Elektrisches Arbeitsaggregat	4
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnellladesystem)	Elektrisches Arbeitsaggregat	4
Konventioneller Antrieb	Hubkolben-Aufbaumotor	3

Energiespeicher-Dimensionierung	Elektrifizierungsumfang	Bewertung
-	-	3
5 kWh (4 kWh nutzbar)	Volle Hybridfunktionalitäten	3,5
92 kWh (73,3 kWh nutzbar)	Elektrischer Fahrbetrieb – 2 Schichten	4
250 kWh (200 kWh nutzbar)	E-Arbeitsaggregat – 1 Schicht	4,5

6.4 Bewertungsergebnisse

Im Anschluss an die separaten Auswertungen der einzelnen Bewertungsdimensionen Technologie, Betrieb, Wirtschaftlichkeit, Umwelteinflüsse und Unternehmens-Image werden die Nutzwerte in sogenannten Radar-Diagrammen zusammengeführt und die Konzepte in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit verglichen. Stellvertretend werden in diesem Kapitel vielversprechende Konzepte mit signifikanten Unterschieden in der Bewertung auf Konzeptebene dargestellt. Eine vollständige Nutzwert-Tabelle für alle bewerteten Fahrzeugkonzepte wird im Anhang zusammengestellt.

Abb. 6-39 zeigt jeweils das Seriell-Hybrid, Parallel-Hybrid, Range-Extended-Electric-Vehicle und Elektrofahrzeugkonzept für das Papierkorbsammelfahrzeug mit der höchsten Nutzwert-Gesamtsumme. Außerdem wurden jeweils die besten Ergebnisse für die unterschiedlichen Batteriegrößen dargestellt.

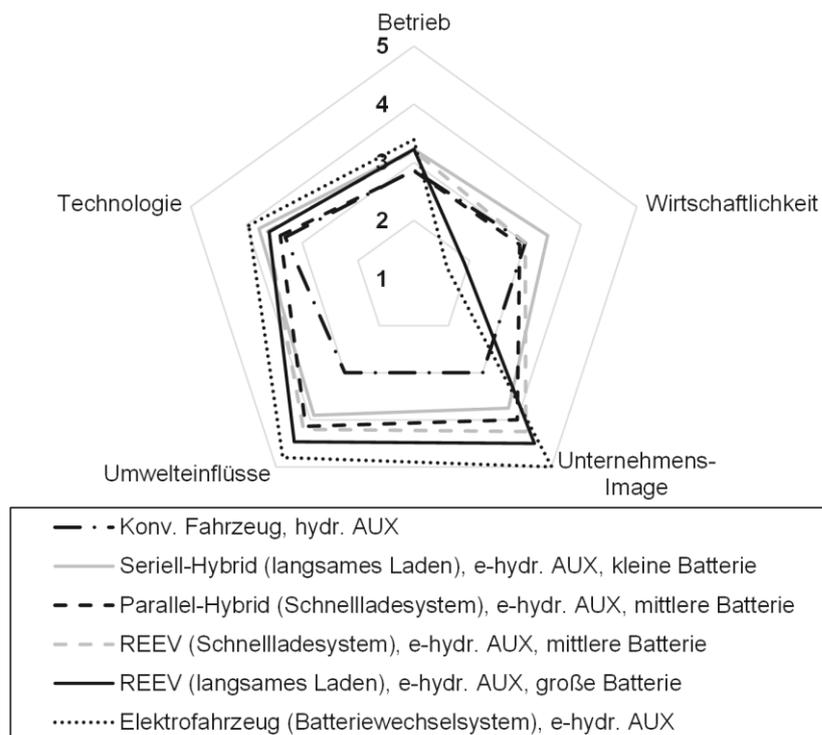


Abb. 6-39: Bewertungsergebnisse für das Papierkorbsammelfahrzeug im Radar-Diagramm

Im Vergleich mit der Referenz wird deutlich, dass die elektrifizierten Konzepte in den Bewertungsdimensionen Technologie und Betrieb jeweils marginal besser beurteilt werden. Mit steigendem Elektrifizierungsgrad wird dieser Effekt stärker, die gesamte Nutzwertbandbreite ist jedoch nicht besonders weit. Deutlich stärker ausgeprägt sind die Bewertungsergebnisse in den Dimensionen Umwelteinflüsse und Unternehmens-Image, was aus der Definition der Bewertungsskalen resultiert. Weiterhin werden wesentliche Entwicklungsziele der Elektromobilität in diesen Bewertungsdimensionen mit den konkreten Fahrzeugkonzepten in Bezug gesetzt und haben dementsprechend besondere Relevanz.

Die Herausforderung eines wirtschaftlichen Betriebes elektrifizierter Fahrzeuge wird in der fünften Bewertungsdimension gezeigt. Die Ergebnisse machen unter den getroffenen Annahmen deutlich, dass Fahrzeuge mit großen Energiespeichern die zusätzlichen Investitionskosten nicht über die Lebensdauer amortisieren. Das Radar-Diagramm zeigt aber ebenfalls Fahrzeugkonzepte mit kleinen und mittleren Batteriegrößen, die mit dem konventionellen Referenzfahrzeug wirtschaftlich konkurrenzfähig sind.

Die Ergebnisse für die Fahrzeugkonzepte der Großkehrmaschine wurden analog der zuvor genannten Konventionen ausgewählt und in Abb. 6-40 als Radar-Diagramm dargestellt. Dabei fällt zunächst die deutlich unterschiedliche Verteilung der Nutzwerte im Diagramm auf.

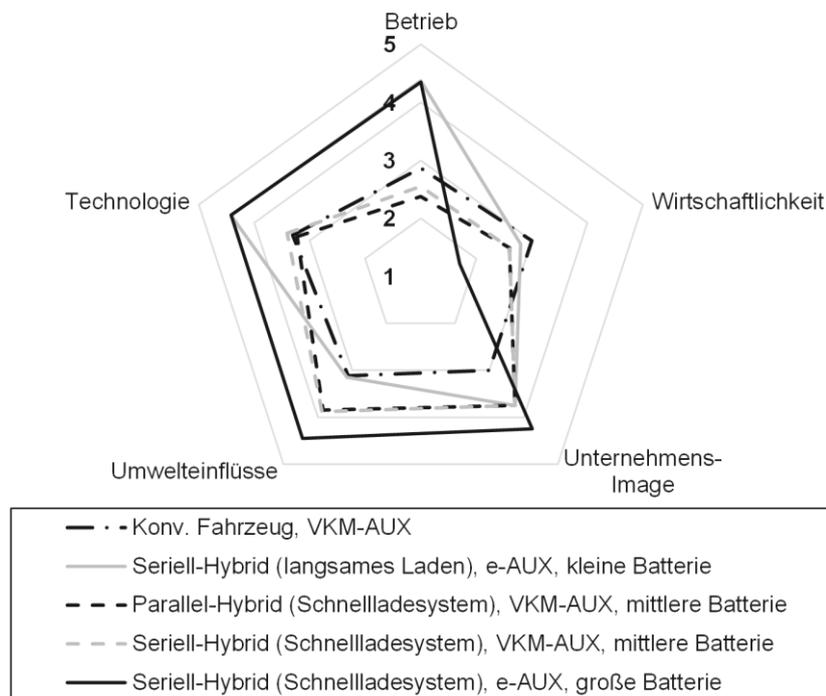


Abb. 6-40: Bewertungsergebnisse für die Großkehrmaschine im Radar-Diagramm

In der Bewertungsdimension Technologie werden durch die Hybridisierung bei unverändertem Betrieb des Arbeitsaggregats über einen Aufbaumotor in Summe keine Vorteile erwartet. Durch die Elektrifizierung des Arbeitsaggregats werden hingegen signifikante Vorteile identifiziert, die in einem deutlich gesteigerten Nutzwert resultieren. Die Auswertung der betrieblichen Bewertung zeigt ebenfalls hohe Nutzwerte der Konzepte mit elektrischem Arbeitsaggregat. Im Vergleich mit dem konventionellen Fahrzeug werden hybridisierte Fahrtriebe ohne elektrisches Arbeitsaggregat jedoch betrieblich schlechter beurteilt. Die Umwelteinflüsse und Effekte auf das Unternehmens-Image der Hybrid-Konzepte werden durchgehend besser bewertet und mit Erhöhung des Elektrifizierungsgrads steigt das Bewertungsergebnis konsequent an. Die Ausnahme bildet ein Seriell-Hybridkonzept, bei welchem häufigere Energiewandlung durch die höheren Wirkungsgrade elektrischer Antriebe nicht vollständig kompensiert werden können. Eine wichtige Erkenntnis liefert die Wirtschaftlichkeitsanalyse. Unter den getroffenen Annahmen kann bei der

Großkehrmaschine kein Fahrzeugkonzept die höheren Investitionskosten der elektrifizierten Fahrzeuge kompensieren.

Fahrzeugtyp-übergreifend bietet die Darstellung der Bewertungsergebnisse in Radar-Diagrammen den Vorteil einer individuellen Schwerpunktsetzung bei der Entscheidungsfindung. Demensprechend liefert die Gesamtsumme der Nutzwerte aller Bewertungsdimensionen lediglich einen Hinweis auf insgesamt positiv beurteilte Fahrzeugkonzepte. Flottenbetreiber können jedoch beispielsweise technologisch überlegene Fahrzeuge mit geringeren Umwelteinflüssen und positiven Effekten auf das Unternehmens-Image aus strategischen Gründen gegenüber den kostengünstigsten Konzepten bevorzugen. Infolgedessen liefert diese Arbeit Vorschläge zur Entwicklung und Beurteilung elektrifizierter Fahrzeugsysteme für Nutzfahrzeuge entsprechend einer ganzheitlichen Bewertungslogik und nicht als Ergebnis ein scheinbar bestes Konzept.

7 Fazit

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und deren wissenschaftlicher Mehrwert sowie Neuheitsgrad für Technologieunternehmen und Flottenbetreiber aufgezeigt. Abschließend werden im Ausblick Anknüpfungspunkte für weiterführende Forschungsarbeiten sowie mögliche Schnittstellen und Übertragbarkeit des verallgemeinerten Vorgehensmodells beschrieben.

7.1 Zusammenfassung

Die Reduktion des Verbrauchs fossiler Ressourcen sowie die Vermeidung des globalen Klimawandels und Luftschadstoffen insbesondere im urbanen Umfeld sind in den letzten Jahren immer stärker in den öffentlichen Fokus gerückt. Eine anerkannte Möglichkeit um den Beitrag des Verkehrs zu reduzieren, stellt die Systemwirkungsgradsteigerung von Fahrzeugen durch Elektrifizierung und Hybridisierung der Antriebe dar. Durch die zurzeit hohen Anschaffungskosten der Fahrzeuge und vergleichsweise geringe Jahreslaufleistung in der privaten Anwendung entstehen lange Amortisationszeiten für die neuen Technologien, die in Kombination mit möglichen Mobilitätseinschränkungen einer schnellen und weitreichenden Markteinführung entgegensteht. Der Nutzfahrzeugbereich weist im Vergleich lange Betriebszeiten und intensive Fahrzeugnutzung auf, was signifikant unterschiedliche Rahmenbedingungen für die Wirtschaftlichkeit einer neuen Technologie bedeutet.

Die hohe Kostensensitivität im Wirtschaftsverkehr bedingt eine effiziente Vorgehensweise und ein gezieltes Auslegen der Fahrzeuge auf den spezifischen Anwendungszweck. Bereits geringe Einschränkungen des Fahrzeugnutzens können zu Unwirtschaftlichkeit und schlechter Akzeptanz beim Flottenbetreiber führen. Dementsprechend sind umfassende Analysen der Einsatzbedingungen und Fahrprofile im Rahmen eines strukturierten Entwicklungs- und Bewertungsprozesses für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte erfolgsentscheidend. Zusätzlich ist die Darstellung weiterer positiver Aspekte der Fahrzeugkonzepte, beispielsweise Emissionsreduktionen, Wirkungsgradsteigerungen oder Verbesserung der Unternehmens-Reputation, von grundlegender Bedeutung.

Nach einer umfangreichen Literaturrecherche stellen sich verfügbare allgemeingültige Vorgehensmodelle bei der Produktentwicklung prinzipiell als anwendbar dar, sie wurden bisher aber nicht spezifisch für die Entwicklung elektrifizierter Nutzfahrzeuge ausgeführt. Dementsprechend wurden im Rahmen dieser Arbeit die Vorgehensmodelle weiterentwickelt und zu einer Methodik für die spezielle Anwendung mit den folgenden Teilschritten konkretisiert:

- Aufbau von Anforderungsprofilen
- Entwicklung von Elektrifizierungskonzepten
- Bewertung von Elektrifizierungskonzepten

Im ersten Schritt wurden umfassende Analysen der Fahrzeuge und deren Betrieb durchgeführt. In der vorgestellten Methodik wird separat auf die konkreten Entwicklungsziele

sowie die Anforderungen durch die Elektrifizierung der Fahrzeuge, durch den Flottenbetreiber und durch die Einsatzbeschreibung der Fahrzeuge eingegangen. Nach Durchführung und Auswertung der Analysen wurden mit repräsentativen Fahrprofilen realistische Energiebedarfe der Fahrzeuge, aufgeteilt auf vorhandene Antriebe und Betriebsmodi, bestimmt. Die Ergebnisse wurden in sogenannten Anforderungsprofilen zusammengeführt, die eine geeignete Basis für die anschließende Konzeptentwicklung bieten. Die Anwendungsbeispiele zeigten dabei deutliche Unterschiede, die großen Einfluss auf die Ergebnisse des nachfolgenden Entwicklungsprozesses haben. Somit wurde die zweite Forschungsfrage, welche Schritte ein strukturierter Ansatz zur Anforderungsanalyse für elektrifizierte Nutzfahrzeuge beinhalten muss, hinreichend beantwortet.

Die vorgestellte Methodik zur Entwicklung der elektrifizierten Nutzfahrzeugkonzepte nutzt als Grundlage die Anforderungsprofile sowie einen allgemeingültigen morphologischen Lösungsraum und stellt den zweiten Schritt im entwickelten Vorgehen dar. Im interdisziplinären, zweistufigen Reduktionsprozess wird der Lösungsraum sukzessive anhand quantitativer und qualitativer Kriterien fahrzeugspezifisch eingeschränkt. Im reduzierten Lösungsraum werden Lösungskombinationen generiert und mit Hilfe eines Vorselektionsprozesses eine deutlich reduzierte Anzahl geeigneter elektrifizierter Nutzfahrzeugkonzepte für den speziellen Anwendungsfall festgelegt. Bei Anwendung auf das Papierkorbsammelfahrzeug und die Großkehrmaschine wurden mit der Methodik Fahrzeugsystemkonzepte mit charakteristisch unterschiedlichen Schwerpunkten erarbeitet. Für das Papierkorbsammelfahrzeug wurden dabei Elektrofahrzeug- und Hybridfahrzeugkonzepte entwickelt. Dabei lag der Schwerpunkt auf alternativen Architekturen des Fahrantriebs. Bei der Großkehrmaschine wurden, bedingt durch den hohen Energiebedarf, ausschließlich Hybridfahrzeugkonzepte entwickelt. Ein großer Fokus wurde dabei auf die Energieeffizienz des Arbeitsaggregats und dessen Integration in die Antriebsarchitektur gelegt. Durch geringe und relativ konstante Geschwindigkeiten ergeben sich niedrigere Effizienzsteigerungspotentiale für den Fahrantrieb, was bei der Konzeptentwicklung ebenfalls berücksichtigt wurde. Demnach wird gemeinsam mit den Anforderungsanalysen in Bezug auf die erste Forschungsfrage ein Ansatz vorgestellt und angewendet, wie hybridisierte und elektrifizierte Nutzfahrzeugkonzepte strukturiert und effizient unter Einbeziehung auslegungsrelevanter Faktoren entwickelt werden sollten.

Der dritte und abschließende Schritt beinhaltet einen umfangreichen Bewertungsprozess für die entwickelten Fahrzeugsystemkonzepte. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurde die sogenannte morphologische Nutzwertanalyse als interdisziplinärer Prozess vorgestellt, der Bewertungen von Fahrzeugsystemen in der Konzeptphase strukturiert und vereinfacht. Das Bewertungsverfahren orientiert sich dabei an der Produktarchitektur und ordnet Bewertungskriterien verschiedenen Komponenten und Eigenschaften zu. In der vorliegenden Arbeit wurde das Verfahren auf die entwickelten Fahrzeugkonzepte in den Bewertungsdimensionen Technologie und Betrieb angewendet. Die erarbeiteten Ergebnisse in der Darstellungsform von Werteprofilen zeichnen sich durch eine hohe Reproduzier- und Nachvollziehbarkeit aus. Insbesondere eignen sich die Ergebnisse als Diskussionsgrundlage zur spezifischen Auswertung und Entscheidungsfindung. Um eine ganzheitliche Betrachtung der Konzepte zu

ermöglichen, wurden zusätzlich voraussichtliche TCO der Fahrzeuge, erwartete Umwelteinflüsse sowie Auswirkungen auf das Unternehmens-Image analysiert. Dabei stellten sich insbesondere nach Auswertung der Wirtschaftlichkeit Hybridantriebe im betrachteten Nutzfahrzeugbereich nicht nur als Brückentechnologie, sondern auch längerfristig als erfolgsversprechende Lösung für emissions-reduzierte schwere Nutzfahrzeuge in Metropolregionen dar. Ebenfalls ist die strukturierte Analyse von Luftschadstoff- und Lärmemissionen ein wichtiges Hilfsmittel Potentiale der Elektrifizierung zu identifizieren und deren Wirkung im Gesamtsystem einzuordnen.

Ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeit wurde ein ganzheitlicher Ansatz zur Entwicklung und Bewertung elektrifizierter Nutzfahrzeugkonzepte basierend auf umfangreichen Analysen der technischen Rahmenbedingungen und des Fahrzeugeinsatzes, sowie einer energetischen Auswertung hybrider und elektrifizierter Antriebe erarbeitet. Mit Hilfe eines strukturierten Prozesses wurden interdisziplinär im engen Austausch mit Flottenbetreibern technisch umsetzbare und besonders geeignete Fahrzeugsystemkonzepte identifiziert und konzipiert. Das Ergebnis der anschließenden Bewertung verdeutlicht, dass die isolierte Betrachtung der Anschaffungskosten und der Einsparpotentiale zur strategischen Entscheidungsfindung nicht zielführend ist. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Auswertung des Fahrzeugnutzens unter Einbeziehung von Kosten, Umwelteinflüssen, technologischen Potentialen, betrieblichen Faktoren sowie der Bedeutung für das Unternehmens-Image liefert dagegen eine objektive Entscheidungsgrundlage für zukunftsfähige und umfassende Lösungen. Somit wurde ebenfalls auf die dritte Forschungsfrage, wie hybridisierte und elektrifizierte Nutzfahrzeugkonzeptvarianten objektiv bewertet und unterschiedliche Konzepte unter Berücksichtigung aller relevanten Kriterien miteinander verglichen werden können, ein anwendungsorientiertes Ergebnis erarbeitet.

7.2 Ausblick

Diese Dissertation und die entwickelte Herangehensweise zur systematischen Entwicklung elektrifizierter Nutzfahrzeuge bieten zahlreiche Möglichkeiten zur Vertiefung und Erweiterung der Forschungsarbeiten. Auf diese wird im Folgenden anhand der Struktur dieser Arbeit eingegangen.

Zukünftige Forschungsfelder liegen zunächst in der Weiterentwicklung und Detaillierung der Methodik zur Erstellung der Anforderungsprofile. Neben einer weiteren Konkretisierung der Anforderungen an elektrifizierte Fahrzeuge im Rahmen der Fahrzeugentwicklung können Langzeit-Fahrprofilfassungen neben den repräsentativen Fahrprofilen dabei unterstützend wirken, den Betrieb der Fahrzeuge einschließlich Standzeiten und Bandbreiten der Tourenlängen besser einzugrenzen. Weiterhin können Ergebnisse der Energiebedarfssimulation durch einen höheren Detailgrad und die konkrete Modellierung der Energieflüsse im elektrifizierten und hybridisierten Fahrzeug einschließlich der Arbeits- und Nebenaggregate verbessert werden.

Der Konzeptentwicklungsprozess basiert in dieser Arbeit auf einem morphologischen Lösungsraum auf Systemebene. Bei steigendem Technologiereifegrad der betreffenden Fahrzeugtypen oder Anwendung auf andere Fahrzeugklassen kann eine Erhöhung des Detailgrads und die Differenzierung weiterer Technologievarianten zielführend sein, insbesondere wenn dadurch weitere vielversprechende Lösungen entstehen. Eine weitere Möglichkeit zur Konkretisierung der Konzepte, stellt eine frühzeitige überschlägige Dimensionierung der wesentlichen Komponenten in den Fahrzeugantriebssträngen dar, um eine bessere Bewertung zu ermöglichen.

Der Bewertungsprozess für die entwickelten Nutzfahrzeugkonzepte basiert in dieser Arbeit auf mehreren Annahmen, die aufgrund von Entwicklungen in vergleichbaren Fahrzeugklassen getroffen wurden. Mit fortschreitendem Entwicklungsstand elektrifizierter Nutzfahrzeuge können diese Annahmen konkretisiert werden, um hochwertigere Aussagen zur Leistungsfähigkeit der Fahrzeugkonzepte treffen zu können. Mit höherem Detailgrad können ebenfalls technische Kenngrößen, wie beispielsweise Wirkungsgrade, besser abgeschätzt werden. Insbesondere relevant für die Methodik und Prognosequalität sind Validierung und Kalibrierung der Parameter im Bewertungsprozess durch reale elektrifizierte Fahrzeuge, sobald diese verfügbar sind und getestet werden können.

Abschließend bietet die entwickelte Methodik ein hohes Potential zur Übertragbarkeit auf weitere Anwendungen. Zunächst kann die Methodik für verschiedene Fahrzeugklassen mit Hilfe einer Anpassung auf deren Besonderheiten, wie beispielsweise den Lösungsraum, genutzt werden. Die Methodik kann jedoch deutlich weiter zu einem Vorgehensmodell⁵⁰⁹ abstrahiert werden, sodass auch andere Produkte und Anwendungsfelder von den Forschungsarbeiten profitieren. In einem ersten Ansatz wurde das Vorgehen beispielsweise bereits erfolgreich abstrahiert und in der Geschäftsmodellentwicklung für Pkw-Ladestrategien⁵¹⁰ eingesetzt.

⁵⁰⁹ Vgl.: Kapitel 2.2.1

⁵¹⁰ Wohlers et al. 2015

8 Literatur

AG Energiebilanzen e.V. (2016): Stromerzeugung nach Energieträgern 1990 - 2016. http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20161216_brd_stromerzeugung1990-2016.pdf. Zuletzt geprüft am 02.02.2017.

Agora Energiewende (2016): Die Energiewende im Stromsektor. Stand der Dinge 2015. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2016, Berlin.

Aichinger, W. (2014): Elektromobilität im städtischen Wirtschaftsverkehr. Chancen und Handlungsspielräume in den Kommunen, Berlin.

Akademie für Kommunalfahrzeugtechnik (2015): Fahrer von Elektro-Kleintransportern bis 4,25 Tonnen Gesamtgewicht benötigen die Schlüsselnummer 192 im Führerschein. <http://www.kommunalfahrzeuge.biz/schluesselnummer-192.html>. Zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Anderman, M. (2014): The Tesla Battery Report. Tesla Motors: Battery Technology, Analysis of the Gigafactory, and the Automakers' Perspectives.

Arndt, W.-H./Döge, N./Marker, S. (Hrsg.) (2016): Elektrifizierungspotenzial kommerzieller Kraftfahrzeug-Flotten im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource in städtischen Verteilnetzen - komDRIVE, Berlin.

Babiel, G. (2014): Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik. Lehr- und Arbeitsbuch, Wiesbaden.

Bach, M., et al. (2015): Entwicklung und Erprobung eines energieeffizienten Antriebs- und Steuerungssystems für den Grünen Radlader, in: 5. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen 2015, S. 1–18.

Backé, W. (1993): The present and future of fluid power, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering 1991-1996 (vols 205-210) 207, 49, S. 193–212.

Banke Accessory Drives (2016): E-PTO Large 70060H. <http://www.banke.pro/de/products-2/>. Zuletzt geprüft am 30.11.2016.

bauMAGAZIN (2013): Brock – Kehrmachine setzt auf Hybridantrieb. <http://www.baumagazin.eu/kehrmaschine-setzt-auf-hybridantrieb/>. Zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Bergk, F. (2015): Electric traction for buses. yes, but which system? The Trolley-hybrid as an efficient possibility to use renewable energy in public transport, Berlin.

Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (2016): Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt. VwVBU.

Berliner Stadtreinigungsbetriebe (2016a): BSR Biogasanlage. Anlage zur energetischen Verwertung von Biogut. <http://www.bsr.de/9495.html>. Zuletzt geprüft am 26.08.2016.

Berliner Stadtreinigungsbetriebe (2016b): Gasbetriebene Müllfahrzeuge. <http://www.bsr.de/13785.html>. Zuletzt geprüft am 06.10.2016.

Bessa, R. J., et al. (2012): Optimized Bidding of a EV Aggregation Agent in the Electricity Market, in: IEEE Trans. Smart Grid 3, 1, S. 443–452.

Biermann, J.-W. (2014): Market-oriented Design of Electrified Commercial Vehicles, Shanghai.

Bille, S., et al. (2011): Elektromobilität. Perspektiven und Chancen für Unternehmen, Paderborn.

Braun, T. E. (2005): Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld. Dissertation, München.

Breiling, A./Knosala, R. (Hrsg.) (1997): Bewerten technischer Systeme. Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio.

Brink, V. (2011): Verfahren zur Entwicklung konsistenter Produkt- und Technologiestrategien. Dissertation, Paderborn.

BROCK Kehrtechnik GmbH (2016): SL ZERO E. <https://issuu.com/certoma/docs/sl200zeroe-pt>. Zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Brunthaler, S. (2010): Systemdenken und Gestaltungsmethodik. Lösungsauswahl durch Bewertung. Vorlesungsskript, Wildau.

Bucher Municipal AG (2016): CityCat 2020ev. http://www.citycat2020ev.com/index_en.html. Zuletzt geprüft am 02.12.2016.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2012): Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Energie auf neuen Wegen.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2014): Entwicklung der Energiemärkte. Energiereferenzprognose. Endbericht, Basel/Köln/Osnabrück.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2014. <http://www.erneuerbare->

energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/erneuerbare-energien-in-zahlen-2014.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Zuletzt geprüft am 01.03.2016.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016): Technology Readiness Level (TRL). <http://nks-kmu.de/teilnahme-trl.php>. Zuletzt geprüft am 29.01.2016.

Bundesregierung (1998): Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm).

Bundesregierung (2002): Bundes-Immissionsschutzgesetz. BImSchG.

Bundesregierung (2007): Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen. LärmVibrationsArbSchV.

Bundesregierung (2015): Gesetz zur Bevorrechtigung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge. Elektromobilitätsgesetz - EmoG.

Bundesverband Deutscher Omnibusunternehmer (bdo) (2014): EU-Verkehrsausschuss für 19,5 Tonnen als zulässiges Gesamtgewicht für Busse. bdo überwindet weitere Hürde und feiert Etappensieg. <http://www.bdo-online.de/presse/pressemitteilungen/eu-verkehrsausschuss-fur-19-5-tonnen-als-zulassiges-gesamtgewicht-fur-busse-bdo-uberwindet-weitere-hurde-und-feiert-etappensieg>. Zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Cambridge Econometrics (2016): Oil Market Futures. A report for the European Climate Foundation, Cambridge, UK.

Clement, K./Haesen, E./Driesen, J. (2009): Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grids, in: IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition 2009.

Committee to Assess Fuel Economy Technologies for Medium- and Heavy-Duty Vehicles/National Research Council/Transportation Research Board (Hrsg.) (2010): Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty Vehicles, Washington, D.C.

Dellenback, P. A. (2002): Improved Gas Turbine Efficiency Through Alternative Regenerator Configuration, in: J. Eng. Gas Turbines Power 124, 3, S. 441–446.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2006a): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006-10) 13.020.10, Berlin.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2006b): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006-10) 13.020.10, Berlin.

dpa Deutsche Presse-Agentur GmbH (2016): Elektroautos in Israel. Das 800-Millionen-Dollar-Desaster, in: Handelsblatt, 17.10.2016.

- <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/elektroautos-in-israel-das-800-millionen-dollar-desaster/14697142.html>.
- Ducharme, P./Ouellette, S. (2013): Transit Fleet Optimization Planning, in: EVS27 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2013, S. 1–9.
- Duran, A./Earleywine, M. (2012): GPS Data Filtration Method for Drive Cycle Analysis Applications. SAE Technical Paper, in: SAE World Congress and Exhibition 2012.
- Dütschke, E., et al. (2015): Elektromobilität in Haushalten und Flotten. Was beeinflusst die Kauf- und Nutzungsbereitschaft?, Berlin.
- Eckstein, L. (2010): Unkonventionelle Fahrzeugantriebe. Vorlesungsumdruck unkonventionelle Fahrzeugantriebe, Aachen.
- Edwards, R., et al. (2013): Well-to-Tank Report Version 4.0, Luxembourg.
- Ehrlenspiel, K./Meerkamm, H. (2013): Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, München.
- Eichlseder, H./Klell, M. (2012): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung, Wiesbaden.
- ELENA PHEV (2014): Der erste Elektro Plug-In Hybrid Transporter. [http://www.elena-
phev.com/app/download/10723157924/20141105_ELENA_Brosch%C3%BCre_DE.pdf?t=14
15187390](http://www.elena-phev.com/app/download/10723157924/20141105_ELENA_Brosch%C3%BCre_DE.pdf?t=1415187390). Zuletzt geprüft am 30.11.2016.
- Ellram, L. M. (1995): Total cost of ownership. An analysis approach for purchasing, in: Int Jnl Phys Dist & Log Manage 25, 8, S. 4–23.
- Emadi, A., et al. (2005): Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations, in: IEEE Trans. Veh. Technol. 54, 3, S. 763–770.
- Engelsmann, D./Wachtmeister, G. (2013): Untersuchung von Betriebsstrategien für einen elektrisch hybridisierten Traktor mittels einer multiphysikalischen Gesamtfahrzeugsimulation, in: 4. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen 2013, S. 1–12.
- Europäische Kommission (2007): Richtlinie 2007/34/EG der Kommission vom 14. Juni 2007 zur Anpassung der Richtlinie 70/157/EWG des Rates über den zulässigen Geräuschpegel und die Auspuffvorrichtung von Krafffahrzeugen an den technischen Fortschritt. 2007/34/EG.
- Europäische Kommission (2011): Verordnung (EU) Nr. 582/2011 der Kommission vom 25. Mai 2011 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Emissionen von schweren

Nutzfahrzeugen (Euro VI) und zur Änderung der Anhänge I und III der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates Text von Bedeutung für den EWR.

Europäische Kommission (2013): Verordnung (EU) Nr. 397/2013 der Kommission vom 30. April 2013 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Überwachung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen Text von Bedeutung für den EWR.

Europäische Kommission (2014): Verordnung (EU) Nr. 133/2014 der Kommission vom 31. Januar 2014 zur Anpassung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 der Kommission an den technischen Fortschritt hinsichtlich der Emissionsgrenzwerte Text von Bedeutung für den EWR.

Europäische Kommission (2016): Eine europäische Strategie für emissionsarme Mobilität. COM(2016) 501.

Europäische Union (2000): Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über umweltbelastende Geräuschemissionen von zur Verwendung im Freien vorgesehenen Geräten und Maschinen. 2000/14/EG.

Europäische Union (2007): Richtlinie zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge. 2007/46/EG.

Europäisches Parlament (2004): Richtlinie 2004/26/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte.

Europäisches Parlament (2009a): Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen.

Europäisches Parlament (2009b): Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2009 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 und der Richtlinie 2007/46/EG sowie zur Aufhebung der Richtlinien 80/1269/EWG, 2005/55/EG und 2005/78/EG Text von Bedeutung für den EWR.

Europäisches Parlament (2014): Verordnung (EU) Nr. 333/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. März 2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen.

European Parliament and Council (2009): Directive 2009/33/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles. Clean Vehicles Directive.

eurostat (2016): Energiebilanzen. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances>. Zuletzt geprüft am 25.10.2016.

Faltenbacher, M. (2015): Bus 2.0. Ergebnisse aus der gemeinsamen Arbeitsgruppe ‚Innovative Antriebe Bus‘ von BMUB und BMVI, Berlin.

Faltenbacher, M., et al. (2016): Hybrid- und Elektrobussprojekte in Deutschland. Statusbericht 2015/16, Berlin.

FAUN Umwelttechnik GmbH & Co.KG (2015): FAUN Ecopower. Hydropower, E-Power und Dualpower. <http://www.faub.com/ecopower/>. Zuletzt geprüft am 05.09.2016.

FAUN Umwelttechnik GmbH & Co.KG (2016): Kehrraschinen. <http://www.faub.com/kehrmaschinen/>. Zuletzt geprüft am 26.10.2016.

Fehrenbach, H., et al. (2016): Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm), Dessau-Roßlau.

Feldhusen, J./Grote, K.-H. (Hrsg.) (2013): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung.

Findeisen, D./Helduser, S. (2015): Ölhydraulik. Handbuch der hydraulischen Antriebe und Steuerungen, Berlin.

Fischer, C. (2016): Umweltfreundliches Kommunalfahrzeug. Der MC 50 HED (Hybrid Electric Drive), Leipzig.

Frenzel, I., et al. (2015): Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung, Berlin.

Geesinknorba GmbH (2016): Hybridtechnik für Abfallsammelfahrzeuge. <http://www.geesinknorba.com/wp-content/uploads/2015/01/Geesinknorba-Hybrid-Systems-DE.pdf>. Zuletzt geprüft am 30.11.2016.

Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (2014): Fortschrittsbericht 2014. Bilanz der Marktvorbereitung, Berlin.

Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (2015): Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland. Statusbericht und Handlungsempfehlungen. AG 3 – Ladeinfrastruktur und Netzintegration, Berlin.

Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (2016): Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland. AG 2 – Batterietechnologie, Berlin.

German e-Cars GmbH (2012): PLANTOS. Die saubere Lösung. http://www.german-e-cars.de/app/download/13911100325/PLANTOS_Flyer_A5_2012_deutsch.pdf?t=1466429546. Zuletzt geprüft am 30.11.2016.

Girardi, P./Gargiulo, A./Brambilla, P. C. (2015): A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix. the Italian case study, in: The International Journal of Life Cycle Assessment 20, 8, S. 1127–1142.

Globisch, J./Dütschke, E./Ensslen, A. (2016): Akzeptanz für Elektrofahrzeuge in gewerblichen Flotten. Ergebnisse aus Get eReady, Leipzig.

Gnann, T., et al. (2012): Elektromobilität im Personenwirtschaftsverkehr. Eine Potenzialanalyse, Karlsruhe.

Goehlich, D./Spangenberg, F./Kunith, A. (2013): Stochastic Total Cost of Ownership Forecasting for innovative Urban Transport Systems, in: IEEE - Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2013.

Göhlich, D./Gräbener, S. (2015): Methodische Konzeptauswahl von Antriebssystemen für elektrifizierte Nutzfahrzeuge, in: Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug 2015.

Göhlich, D./Gräbener, S. (2016): Identification of User-oriented Electric Commercial Vehicle Concepts with a Particular Focus on Auxiliaries, in: 25th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2016, S. 1521–1540.

Göhlich, D./Kunith, A./Gräbener, S. (2013): Systemtechnologien für elektrische Stadtbusse - die richtige Wahl, in: Internationales Verkehrswesen 64, 4, S. 75–77.

Göhlich, D./Kunith, A./Ly, T. (2014): Technology assessment of an electric urban bus system for Berlin, in: Urban Transport 2014 Conference 2014, S. 137–149.

Göhring, M. (1997): Betriebsstrategien für serielle Hybridantriebe. Dissertation, Aachen.

Göpfert, J. (1998): Modulare Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation, Wiesbaden.

Gorbea Díaz, C. E. (2011): Vehicle Architecture and Lifecycle Cost Analysis in a New Age of Architectural Competition. Dissertation, München.

Gordon, D./Burdelski, J./Cannon, J. S. (2003): Greening Garbage Trucks. New Technologies for Cleaner Air, New York.

Götze, U./Weber, T. (2008): ZP-Stichwort: Total Cost of Ownership, in: Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung 19, 2, S. 249–257.

Gräbener, S./Göhlich, D. (2015): Entwicklung elektrifizierter Nutzfahrzeugkonzepte auf Basis einer mehrstufigen morphologischen Nutzwertanalyse, in: Symposium für Vorausschau und Technologieplanung 11, 347, S. 427–445.

Gräbener, S./Ruhl, S./Raab, A. F. (2015): Forschungscampus Mobility2Grid Abschlussbericht AP 4. Gesamtkonzept für die Elektrifizierung von öffentlichem Bus- und Entsorgungsverkehr. Technische Universität Berlin, Berlin.

Graebener, S./Tarnowski, M./Goehlich, D. (2015a): Commercial Vehicle Drivetrain Technology and Topology Pre-selection, in: IEEE Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) Conference 2015.

Graebener, S./Tarnowski, M./Goehlich, D. (2015b): Multi-dimensional Value-Benefit Analysis for Electrified Commercial Vehicle Concepts, in: IEEE Vehicular Power and Propulsion (VPPC) Conference 2015.

Grausam, M./Parzinger, G./Müller, U. (2015): Elektromobilität in Flotten. Handlungsleitfaden, Berlin.

GREEN MACHINES DEUTSCHLAND GMBH (2016): 500ze. Technische Spezifikationen. http://www.greenmachines.com/wp-content/uploads/2016/07/500ze_TECHNISCHE_SPEZ_DE.pdf. Zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Grob, H. L./Lahme, N. (2004): Total Cost of Ownership-Analyse mit vollständigen Finanzplänen, in: Controlling 16, 3, S. 157–164.

Grosjean, C., et al. (2012): Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews 16.

Guinée, J. B., et al. (2011): Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future, in: Environmental Science & Technology 45, 1, S. 90–96.

Haag, M./Ade, L. (2015): Elektromobilität in kommunalen Reinigungsflotten, Stuttgart.

Haberfellner, R. (Hrsg.) (2012): Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung, Zürich.

Hacker, F./von Waldenfels, R./Mottschall, M. (2015): Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO₂-Minderung. Abschlussbericht, Berlin.

Hackmann, M./Hermann, P./Robert, S. (2015): Total Cost of Ownership Analyse für Elektrofahrzeuge. <http://bit.ly/1A8tZEw>. Zuletzt geprüft am 27.02.2016.

Haendel, M./Gnann, T./Plötz, P. (2015): Fuhrparkoptimierung für Elektrofahrzeuge, Karlsruhe.

Hagman, J., et al. (2016): Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion, in: *Research in Transportation Business & Management* 18, S. 11–17.

Hahn, D./Kaufmann, L. (Hrsg.) (2002): Handbuch industrielles Beschaffungsmanagement. Internationale Konzepte - innovative Instrumente - aktuelle Praxisbeispiele, Wiesbaden.

Hammer, J. (2014): Auslegung und Bewertung hybrider Nutzfahrzeugantriebe am Beispiel eines Abfallsammelfahrzeugs. Dissertation, Aachen.

Hammer, J./Biermann, J.-W. (2010): Hybridantriebe. Einsatzpotenzial in Nutzfahrzeugen, in: 2. VDI Fachkonferenz Elektrik und Elektronik im Nutzfahrzeug 2010.

Harder, J. (2014): Analyse und Bewertung von Energiebedarfsprofilen im elektrischen Straßengüterverkehr zur Versorgung durch Erneuerbare Energien. Masterarbeit, Berlin.

Hartung, F., et al. (2014): Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs. Wissenschaftliche Begleitforschung der TU Dresden im Projekt ENUBA, in: *Internationales Verkehrswesen* 66, 3, S. 112–115.

Hawkins, T. R., et al. (2012): Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles, in: *Journal of Industrial Ecology* 17, 1, S. 53–64.

Heinemann, S. (2015): Methodische Unterstützung der Betriebsmittelentwicklung partiell formgehärteter Bauteile, Berlin.

Held, M., et al. (2016): Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen. Abschlussbericht, Berlin.

Helduser, S. (2013): Grundlagen elektrohydraulischer Antriebe und Steuerungen, Mainz.

Hellweg, S./Milà i Canals, L. (2014): Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment, in: *Science* 344, 6188, S. 1109–1113.

- Helmers, E./Dietz, J./Hartard, S. (2017): Electric car life cycle assessment based on real-world mileage and the electric conversion scenario, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22, 1, S. 15–30.
- Helms, H., et al. (2011): *UMBReLA - Umweltbilanzen Elektromobilität. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht*, Heidelberg.
- Helms, H., et al. (2014): *Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität. Endbericht*, Heidelberg.
- Helms, H., et al. (2016): *Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen*, Dessau-Roßlau.
- Helms, H./Heidt, C. (2014): *Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungs-optionen für den Bestand*, Dessau-Roßlau.
- Hilgers, M. (2016): *Getriebe und Antriebsstrangauslegung*, Wiesbaden.
- Hill, N., et al. (2011): *Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles. Lot 1: Strategy*, Didcot.
- Hoepke, E./Breuer, S. (Hrsg.) (2013): *Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten*, Wiesbaden.
- Hofmann, P. (2014): *Hybridfahrzeuge. Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*, Wien.
- Hofmann, T., et al. (2007): *Parametric modeling of components for selection and specification of hybrid vehicle drivetrains*, in: *World Electric Vehicle Journal* Nr. 1/2007, S. 215–224.
- Hohenberger, T./Mühlenhoff, J. (2014): *Energiewende im Verkehr. Potentiale für erneuerbare Mobilität*, Berlin.
- Holloway, H. (2016): *Hyundai's new hybrid could challenge diesel in future*. <http://www.autocar.co.uk/blogs/new-cars/hyundais-new-hybrid-could-challenge-diesel-future>. Zuletzt geprüft am 21.01.2016.
- Holmberg, K., et al. (2014): *Global energy consumption due to friction in trucks and buses*, in: *Tribology International* 78, S. 94–114.
- HORIBA MIRA Ltd. (2016): *Hybrid Integrated Urban Commercial Vehicle (HiUCV)*. <http://www.horiba-mira.com/research/hybrid-integrated-urban-commercial-vehicle>. Zuletzt geprüft am 30.11.2016.

Hu, H./Smaling, R./Baseley, S. J. (2012): Advanced hybrid powertrains for commercial vehicles, Warrendale, PA.

Hua, T., et al. (2014): Status of hydrogen fuel cell electric buses worldwide, in: Journal of Power Sources 269, S. 975–993.

Hubka, V. (1984): Theorie technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre, Berlin, New York.

Icha, P./Kuhs, G. (2016): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015, Dessau-Roßlau.

International Council on Clean Transportation (2017): NOx emissions from heavy-duty and light-duty diesel vehicles in the EU: Comparison of real-world performance and current type-approval requirements, Brüssel.

Ivanco, A./Johri, R./Filipi, Z. (2012): Assessing the Regeneration Potential for a Refuse Truck Over a Real-World Duty Cycle, in: SAE International Journal of Commercial Vehicles 5, 1, S. 364–370.

IVECO Magirus AG (2012): Der neue Daily Electric. http://www.iveco.com/Germany/collections/catalogues/Documents/Neue_Materialien_DE/Daily_Electric.pdf. Zuletzt geprüft am 30.11.2016.

Jähne, H. (2013): Struktursystematik und Effizienzpotentiale hydraulischer Fahrtriebe unter Einbeziehung der Applikation, Aachen.

Jefferies, D., et al. (2015): Energiebedarf verschiedener Klimatisierungssysteme für Elektro-Linienbusse. Technisch-wirtschaftliche Bewertung, in: DKV-Tagung 2015.

Jonuschat, H./Wölk, M./Handke, V. (2012): Untersuchung zur Akzeptanz von Elektromobilität als Stellglied im Stromnetz, Berlin.

Jun, J./Guensler, R./Ogle, J. H. (2006): Smoothing Methods to Minimize Impact of Global Positioning System Random Error on Travel Distance, Speed, and Acceleration Profile Estimates, in: Transportation Research Record 1972, S. 141–150.

Kamble, S. H./Mathew, T. V./Sharma, G. K. (2009): Development of real-world driving cycle: Case study of Pune, India, in: Transportation Research Part D: Transport and Environment 14, 2, S. 132–140.

Kampker, A./Vallée, D./Schnettler, A. (Hrsg.) (2013): Elektromobilität, Berlin, Heidelberg.

Karabasoglu, O./Michalek, J. (2013): Influence of driving patterns on life cycle cost and emissions of hybrid and plug-in electric vehicle powertrains, in: Energy Policy 60, S. 445–461.

Kasten, P., et al. (2016): Electric mobility in Europe. Future impact on the emissions and the energy systems, Berlin.

Kasten, P./Zimmer, W./Leppler, S. (2011): CO₂-Minderungspotenziale durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in Dienstwagenflotten. Ergebnisbericht im Rahmen des Projektes „Future Fleet“ AP 2.7, Berlin.

Kautzmann, T. (2013): Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. Dissertation, Karlsruhe.

Keller, M./Lebküchner, M./Kljun, N. (2006): Diesel-, Gas- oder Trolley-Bus? Schlussbericht, Bern.

Kickermann, H. (1995): Rechnerunterstützte Verarbeitung von Anforderungen im methodischen Konstruktionsprozess. Dissertation, Braunschweig.

Kirrmann, S. (2014): Energiewende im Verkehrssektor kommt nur langsam in Gang. <https://www.unendlich-viel-energie.de/energiewende-im-verkehrssektor-kommt-nur-langsam-in-gang>. Zuletzt geprüft am 01.03.2016.

Kläger, R. (1993): Modellierung von Produktanforderungen als Basis für Problemlösungsprozesse in intelligenten Konstruktionssystemen, Aachen.

Kleiner, F., et al. (2015): Electrification of transport logistic vehicles. A techno-economic assessment of battery and fuel cell electric transporter, in: EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2015.

Kley, F. (2011): Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens. Dissertation, Stuttgart.

Knoke, T. (2011): Entwurf und Betrieb hybrid-elektrischer Fahrzeugantriebe am Beispiel von Abfallsammelfahrzeugen. Dissertation, Paderborn.

Kohmäscher, T. (2008): Modellbildung, Analyse und Auslegung hydrostatischer Antriebsstrangkonzeppte, Aachen.

Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Berlin, Heidelberg.

Krafftfahrt-Bundesamt (2015): Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Nutzfahrzeugen, Krafftfahrzeugen insgesamt und Krafftfahrzeuganhängern nach technischen Daten. 1. Januar 2015.

Krafftfahrt-Bundesamt (2016): Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2016. http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html?nn=644526. Zuletzt geprüft am 25.10.2016.

Kramer, F./Kramer, M. S. (1997): Bausteine der Unternehmensführung. Kundenzufriedenheit und Unternehmenserfolg, Berlin.

Kröll, M. (2007): Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung. Dissertation, Stuttgart.

Kühnapfel, J. B. (2014): Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb, Wiesbaden.

Lajunen, A. (2011): Evaluation of energy storage system requirements for hybrid mining loader, in: IEEE Vehicular Power and Propulsion (VPPC) Conference 2011, S. 1–6.

Land Berlin (2016): Berliner Energiewendegesetz. EWG Bln.

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2015): Luftschadstoff-Emissionskataster. Baden-Württemberg 2012, Karlsruhe.

Law, K./Jackson, M. D./Chan, M. (2011): European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles. Report, Cupertino, California.

Lenz, B., et al. (2010): Shell LKW-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030, Hamburg/Berlin.

Lienkamp, M. (2016): Status Elektromobilität 2016 oder wie Tesla nicht gewinnen wird, München.

Lindemann, U. (Hrsg.) (2009): Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, Berlin, Heidelberg.

Linssen, J., et al. (2012): Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen (NET-ELAN). [Endbericht] ; Advances in Systems Analyses 1, Jülich.

Liu, Z., et al. (2015): Aggregation and Bidirectional Charging Power Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicles. Generation System Adequacy Analysis, in: IEEE Transactions on Sustainable Energy 6, 2, S. 325–335.

Löwenberg, K., et al. (2011): Evolutionäre vs. revolutionäre Trends in der Nutzfahrzeugindustrie. Führt die CO₂-Diskussion zum Strukturwandel?, Berlin.

Lutsey, N. (2016): Turning over a new leaf. Electric vehicle carbon emissions. <http://www.theicct.org/blogs/staff/turning-over-new-leaf-electric-vehicle-carbon-emissions>. Zuletzt geprüft am 21.01.2016.

Ly, T.-A./Graebener, S./Goehlich, D. (2014): Evaluation of independent sensor systems for accurate drive cycle determination, in: IEEE Vehicular Power and Propulsion (VPPC) Conference 2014.

- Mattes, K., et al. (2011): Anwendungsfelder mobiler Energiespeicher. Eine Bestandsaufnahme und Perspektiven für die Konzeption aussichtsreicher Geschäftsmodelle für Elektrofahrzeuge, in: Working Paper Sustainability and Innovation Nr. 2/2011.
- McKinsey & Company (2012): Urban buses. alternative powertrains for Europe.
- Meinzolt, S. (2015): Analyse der Energiebedarfe einer Busflotte anhand einer durchgeführten Fahrprofil erfassung. Masterarbeit, Berlin.
- Melaina, M./Penev, M. (2013): Hydrogen Station Cost Estimates. Comparing Hydrogen Station Cost Calculator Results with other Recent Estimates, Golden, CO.
- Memmler, M., et al. (2014): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013, Dessau-Roßlau.
- Messagie, M., et al. (2014): How to understand and perform Life Cycle Assessment of electric vehicles. VPPC Tutorial, in: Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) 2014.
- Mets, K./D'hulst, R./Devellder, C. (2012): Comparison of intelligent charging algorithms for electric vehicles to reduce peak load and demand variability in a distribution grid, in: Journal of Communications and Networks 14, 6, S. 672–681.
- Mi, C./Masrur, M. A./Gao, D. W. (2014): Hybridkraftfahrzeuge. Grundlagen und Anwendungen mit Perspektiven für die Praxis, Weinheim.
- Michalk, P./Lichtfuß, K.-G./Sonntag, H. (2014): KV-E-Chain. Vollelektrische Lieferkette im kombinierten Verkehr, in: Internationales Verkehrswesen 66, 3.
- Miller, G. A./Galanter, E./Příbram, K. (1991): Strategien des Handelns. Pläne und Strukturen des Verhaltens, Stuttgart.
- Mobility2Grid e.V. (2016): Forschungscampus Mobility2Grid. Die Herausforderung: Energiewende und Verkehrs zusammen denken! www.mobility2grid.de. Zuletzt geprüft am 07.03.2016.
- Montazeri-Gh, M./Naghizadeh, M. (2003): Development of car drive cycle for simulation of emissions and fuel economy, in: 15th European Simulation Symposium 2003.
- Morey, J. E./Limanond, T./Niemeier, D. A. (2000): Validity of Chase Car Data Used in Developing Emissions Cycles, in: Journal of Transportation and Statistics 2000, S. 15–28.
- Müller, W./Böckmann, J. (2008): Methoden der Produktgestaltung. Forschungspapier, Dortmund.
- Munder, E. (2016): Wirtschaftlichkeitsperspektive von kommunalen teilelektrischen Entsorgungsfahrzeugen, Leipzig.

Murrenhoff, H./Eckstein, L. (2011): Fluidtechnik für mobile Anwendungen. Umdruck zur Vorlesung, Aachen.

Naunheimer, H., et al. (Hrsg.) (2007): Fahrzeuggetriebe. Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion, Berlin.

Notter, D. A., et al. (2010): Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles, in: Environ. Sci. Technol. 44, 17, S. 6550–6556.

Nurhadi, L./Borén, S./Ny, H. (2014): A Sensitivity Analysis of Total Cost of Ownership for Electric Public Bus Transport Systems in Swedish Medium Sized Cities, in: Transportation Research Procedia 3, S. 818–827.

Pahl, G., et al. (Hrsg.) (2007): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung, Berlin.

Pflieger, W. (2015): Ein methodischer Ansatz zur modularen Auslegung von Antriebsstrangkomponenten im Rahmen der Entwicklung von Hybridfahrzeugen. Dissertation, Karlsruhe.

Pihlatie, M. (2015): Fully electric city buses. The viable option, Tampere.

Pistoia, G. (Hrsg.) (2010): Electric and hybrid vehicles. Power sources, models, sustainability, infrastructure and the market, Amsterdam, Boston.

Plötz, P., et al. (2014a): Elektromobilität in gewerblichen Flotten, Karlsruhe.

Plötz, P., et al. (2014b): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. Langfassung, Karlsruhe.

Ponn, J./Lindemann, U. (2011): Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungsösungen, Heidelberg.

Pötscher, F., et al. (2014): Ökobilanz alternativer Antriebe. Elektrofahrzeuge im Vergleich, Wien.

Press, W. H., et al. (2007): Numerical recipes in C. The art of scientific computing, Cambridge.

Prestl, W. (2016): Energieautarke Elektromobilität im Smart Micro Grid. vom Einfamilienhaus bis zum Parkhaus, Leipzig.

PRNewswire (2016): Electric vehicles to be 35% of global new car sales by 2040. Continuing reductions in battery prices will bring the total cost of ownership of EVs below that for conventional-fuel vehicles by 2025, even with low oil prices.

<http://www.prnewswire.com/news-releases/electric-vehicles-to-be-35-of-global-new-car-sales-by-2040-300225689.html>. Zuletzt geprüft am 26.02.2016.

Proff, H., et al. (2014): Management des Übergangs in die Elektromobilität. Radikales Umdenken bei tiefgreifenden technologischen Veränderungen, Wiesbaden.

Raiber, S. (2016): Urbaner logistischer Wirtschaftsverkehr, Leipzig.

Randall, T. (2016): Here's how electric cars will cause the next oil crisis. A shift is under way that will lead to widespread adoption of EVs in the next decade. <http://www.bloomberg.com/features/2016-ev-oil-crisis/>. Zuletzt geprüft am 26.02.2016.

Reichle, M. (2006): Bewertungsverfahren zur Bestimmung des Erfolgspotenzials und des Innovationsgrades von Produktideen und Produkten. Dissertation, Stuttgart.

Reif, K. (Hrsg.) (2012): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Wiesbaden.

Richter, J./Lindenberger, D. (2010): Potenziale der Elektromobilität bis 2050. Eine szenarienbasierte Analyse der Wirtschaftlichkeit, Umweltauswirkungen und Systemintegration. Endbericht, Köln.

Robert Bosch GmbH (Hrsg.) (2014): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Wiesbaden.

Roth, K. (2000): Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 1. Konstruktionslehre, Berlin.

Rousseau, A., et al. (2015): Comparison of Energy Consumption and Costs of Different Plug-in Electric Vehicles in European and American Context EVS24, in: EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2015.

Rübbelke, R., et al. (2015): Innovationsorientierte Kompetenzplanung in der strategischen Produktplanung, in: Symposium für Vorausschau und Technologieplanung 11, 347, S. 337–358.

Rusich, A./Danielis, R. (2015): Total cost of ownership, social lifecycle cost and energy consumption of various automotive technologies in Italy, in: Research in Transportation Economics 50, S. 3–16.

Sauer, D. U., et al. (2016): Entwicklungen im Batteriebereich, Auswirkungen auf Planung, Betrieb und Sicherheit von Elektrobussen und Ladeinfrastruktur, Berlin.

Sauer, U., et al. (2015): Speicherbedarf, -belastung, -verfügbarkeit für Busse in verschiedenen Elektrifizierungskonzepten für den ÖPNV, Berlin.

Savitzky, A./Golay, M. J. E. (1964): Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, in: Analytical Chemistry 36, 8, S. 1627–1639.

Scheffczik, W. (2003): Technikbewertung und Technikfolgenabschätzung. Dissertation, Oldenburg.

Schlott, S. (2016): Mehr Effizienz für die Batterieentwicklung. <https://www.springerprofessional.de/batterie/elektromobilitaet/mehr-effizienz-fuer-die-batterieentwicklung/7178106>. Zuletzt geprüft am 22.01.2016.

Schmetz, R. (2015): Überschlägige Berechnung der Verluste in elektrisch serienhybriden Antriebsträngen, in: 5. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen 2015.

Schmitz, M. (2015): Alternative Antriebe. ein Entwicklungsszenario, in: Verkehr und Technik Nr. 11/2015, S. 413–414.

Schönewolf, W. (2016): Herausforderungen der City-Logistik mit elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen, Leipzig.

Schuh, G./Klappert, S. (Hrsg.) (2011): Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2, Berlin, Heidelberg.

Schulz, A. (2015): Batterieelektrische Fahrzeuge im gewerblichen Flottenbetrieb. Dissertation, Berlin.

Semin, R. A. B. (2008): A Technical Review of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines, in: American J. of Engineering and Applied Sciences 1, 4.

Silvan, E. (2008): Strategien der Hersteller von Entsorgungsfahrzeugen zur Verringerung der Lärm- und NO₂-Emissionen, Hannover.

Smith Electric Vehicles (2011): Smith Edison. Der weltweit erfolgreichste vollständig elektrische Leicht-Lkw. http://www.smithelectric.com/wp-content/uploads/2016/02/Edison_Brochure_2011_GERMAN.pdf. Zuletzt geprüft am 30.11.2016.

Sonntag, M., et al. (2011): Validierung der Hybrid-Betriebsstrategie des Econic BlueTec Hybrid im realen Müllsammelleinsatz, in: Autoreg 2011, 5. Fachtagung Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren VDI-Berichte 2135.

Spangenberg, F./Göhlich, D. (2012): Unterstützung des Technology Roadmapping bei Systeminnovation durch stochastische Simulation, in: Vorausschau und Technologieplanung 306, S. 399–418.

Stan, C. (Hrsg.) (2012): Alternative Antriebe für Automobile. Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger, Berlin, Heidelberg.

Stöhr, M./Giglmaier, S./Berlet, R. (2015): Folgenabschätzung zum Einsatz batteriebetriebener vollelektrifizierter Landmaschinen. erstellt im Rahmen des Verbundprojektes SESAM - Entwicklung eines vollelektrifizierten Traktors. Teilvorhaben Folgenabschätzung, Ergebnisverbreitung und Managementunterstützung, München.

Sturm, C. (2015): Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger. Dissertation, Karlsruhe.

Thiebes, P. (2012): Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. Dissertation, Karlsruhe.

Thielmann, A., et al. (2012): Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, Karlsruhe.

Thielmann, A./Sauer, A./Wietschel, M. (2015): Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030, Karlsruhe.

u-blox AG (2013): EVK-7 / EVK-M8 Evaluation Kits. User Guide, Thalwil, Schweiz.

Umweltbundesamt (2016a): Treibhausgas-Emissionsquellen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen>. Zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Umweltbundesamt (2016b): Berliner Stadtreinigung: Fahrgestelle mit Erdgasmotor. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltfreundliche-beschaffung/gute-praxisbeispiele/kommunalfahrzeuge-omnibusse/berliner-stadtreinigung-fahrgestelle-erdgasmotor>. Zuletzt geprüft am 06.10.2016.

Umweltbundesamt (2017): Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2015. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>. Zuletzt geprüft am 02.02.2017.

Urban, A. I./Halm, G. (Hrsg.) (2010): Praktikable Klimaschutz-Potenziale in der Abfallwirtschaft, Kassel.

US EPA/OAR/Office of Transportation & Air Quality (2004): Clean Automotive Technology-Innovation that Works: World's First Full Hydraulic Hybrid SUV Presented at 2004 SAE World Congress (EPA-420-F-04-019, March 2004) | US EPA ARCHIVE DOCUMENT.

- Valentine-Urbschat, M./Bernhart, W. (2009): Powertrain 2020. The future drives electric, München.
- van Basshuysen, R./Schäfer, F. (Hrsg.) (2015): Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven, Wiesbaden.
- van der Giessen, A. (2015): Electric Mobility in Amsterdam. <http://www.emoberlin.de/de/mediathek/>.
- Verband der Automobilindustrie e.V. (2012): Nutzfahrzeuge. Motor der Zukunft, Berlin.
- Verein Deutscher Ingenieure (1980): VDI-Richtlinie 2220. Produktplanung. Ablauf, Begriffe und Organisation, Berlin.
- Verein Deutscher Ingenieure (1993): VDI-Richtlinie 2221. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Berlin.
- Verein Deutscher Ingenieure (1997): VDI-Richtlinie 2222. Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, Berlin.
- Verein Deutscher Ingenieure (1998): VDI-Richtlinie 2225. Technisch-Wirtschaftliches Konstruieren. Technisch-wirtschaftliche Bewertung, Berlin.
- Verein Deutscher Ingenieure (2000): VDI-Richtlinie 3780. Technikbewertung. Begriffe und Grundlagen, Berlin.
- Verein Deutscher Ingenieure (2004): VDI-Richtlinie 2206. Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, Berlin.
- Vogel, M. (2016): Ergebnispapier Querschnittsthema Wirtschaftsverkehr. 10 Thesen zur Elektromobilität in Flotten, Frankfurt am Main.
- Wagner, H.-J., et al. (2007): CO₂-Emissionen der Stromerzeugung. Ein ganzheitlicher Vergleich verschiedener Techniken, Bochum.
- Wallentowitz, H. (Hrsg.) (2007): Längsdynamik von Kraftfahrzeugen. Verkehrssystem Kraftfahrzeug, Leistungs- und Energiebedarf, Antriebsstrang, Fahrzeugdynamik ; Vorlesungsumdruck Kraftfahrzeuge I, Aachen.
- Wallentowitz, H./Freialdenhoven, A. (Hrsg.) (2011): Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Technologien, Märkte und Implikationen.
- Weiss, M., et al. (2012): On the electrification of road transport. Learning rates and price forecasts for hybrid-electric and battery-electric vehicles, in: Energy Policy 48, S. 374–393.
- Welge, M. K./Al-Laham, A. (Hrsg.) (2012): Strategisches Management. Grundlagen - Prozessimplementierung, Wiesbaden.

- Wermuth, M., et al. (2012): Mobilitätsstudie "Kraftfahrzeuge in Deutschland 2010" (KiD 2010). Ergebnisse im Überblick, Braunschweig.
- Wickert, M., et al. (2013): Wissenschaftliche Unterstützung bei der Erstellung von fahrzeugbezogenen Analysen zur Netzintegration von Elektrofahrzeugen unter Nutzung erneuerbarer Energien. Endbericht zum Vorhaben FKZ UM 11 96 107, Kassel.
- Wohlers, J., et al. (2015): Intelligente Ladesteuerung von Fahrzeugpools. Eine technisch-wirtschaftliche Bewertung auf Grundlage des aktuellen Strommarktes in Deutschland, in: Internationales Verkehrswesen 67, 4, S. 81–85.
- Wu, G./Inderbitzin, A./Bening, C. (2015): Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles. A probabilistic analysis and projection across market segments, in: Energy Policy 80, S. 196–214.
- Wulf, J. E. (2002): Elementarmethoden zur Lösungssuche. Dissertation, München.
- Zangemeister, C. (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. E. Methodik zur multidimensionalen Bewertung u. Ausw. von Projektalternativen, Hamburg.
- Zhang, S. (2016): Whole-series electronic sanitation vehicles debut in Beijing. <http://english.cri.cn/12394/2016/08/20/3821s938008.htm>. Zuletzt geprüft am 05.09.2016.
- Zheng, J., et al. (2013): Aggregation Model-Based Optimization for Electric Vehicle Charging Strategy, in: IEEE Transactions on Smart Grid 4, 2, S. 1058–1066.
- Zimantovski, D. (2015): Untersuchung der Effizienz eines Elektro-Radladers, in: 5. Fachtagung Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen 2015.
- ZÖLLER-KIPPER GmbH (2016): MICRO HG. <http://www.zoeller-kipper.de/produkte/micro-hg/>. Zuletzt geprüft am 26.10.2016.
- Zott, V., et al. (2015): Elektromobile Fuhrparks. Ein Blick auf die Vorreiter, in: Neue Mobilität Nr. 17/2015.
- Zwicky, F. (1969): Discovery, Invention, Research through the morphological approach, Toronto.

A Anhang

Studentische Arbeiten

Folgende studentische Arbeiten wurden in Zusammenhang mit den Forschungsarbeiten dieser Dissertation angefertigt und während der Bearbeitungszeit vom Autor intensiv betreut. Die Arbeiten können am Fachgebiet für Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik der Technischen Universität Berlin eingesehen werden:

Nissen, Y. (2014): Energiebedarfsanalyse eines elektrifizierten Abfallsammelfahrzeugs für den Einsatz bei der Berliner Stadtreinigung, Studienarbeit.

Harder, J. (2014): Analyse und Bewertung von Energiebedarfsprofilen im elektrischen Straßengüterverkehr zur Versorgung durch Erneuerbare Energien, Masterarbeit.

Meinzolt, S. (2015): Analyse der Energiebedarfe einer Busflotte anhand einer durchgeführten Fahrprofilenerfassung, Masterarbeit.

Tarnowski, M. (2015): Methodische Analyse von Elektrifizierungskonzepten im Entsorgungs- und Stadtreinigungsverkehr, Diplomarbeit.

Wohlers, J. (2015): Potentialanalyse der intelligenten Ladesteuerung von Traktionsbatterien, Masterarbeit.

Conrad, C. C. (2017): Entwicklung einer Methode zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von elektrifizierten und hybridisierten Nutzfahrzeugkonzepten für Entsorgungsunternehmen in Metropolregionen, Masterarbeit.

Wimmelbücker, M. (2017): Umwelteinflussanalyse elektrifizierter und hybridisierter Nutzfahrzeugkonzepte für den Entsorgungs- und Reinigungsverkehr, Bachelorarbeit.

Veröffentlichungen

Inhalte dieser Arbeit wurden in den folgenden Veröffentlichungen verwendet:⁵¹¹

Göhlich, D./Kunith, A./Gräbener, S. (2013): Systemtechnologien für elektrische Stadtbusse - die richtige Wahl, in: Internationales Verkehrswesen 64, 4, S. 75–77.

Ly, T.-A./Graebener, S./Goehlich, D. (2014): Evaluation of independent sensor systems for accurate drive cycle determination, in: IEEE Vehicular Power and Propulsion (VPPC) Conference 2014.

Graebener, S./Tarnowski, M./Goehlich, D. (2015a): Commercial Vehicle Drivetrain Technology and Topology Pre-selection, in: IEEE Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) Conference 2015.

Göhlich, D./Gräbener, S. (2015): Methodische Konzeptauswahl von Antriebssystemen für elektrifizierte Nutzfahrzeuge, in: Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug 2015.

Graebener, S./Tarnowski, M./Goehlich, D. (2015b): Multi-dimensional Value-Benefit Analysis for Electrified Commercial Vehicle Concepts, in: IEEE Vehicular Power and Propulsion (VPPC) Conference 2015.

Gräbener, S./Göhlich, D. (2015): Entwicklung elektrifizierter Nutzfahrzeugkonzepte auf Basis einer mehrstufigen morphologischen Nutzwertanalyse, in: Symposium für Vorausschau und Technologieplanung 11, 347, S. 427–445.

Wohlers, J., et al. (2015): Intelligente Ladesteuerung von Fahrzeugpools. Eine technisch-wirtschaftliche Bewertung auf Grundlage des aktuellen Strommarktes in Deutschland, in: Internationales Verkehrswesen 67, 4, S. 81–85.

Gräbener, S./Ruhl, S./Raab, A. F. (2015): Forschungscampus Mobility2Grid Abschlussbericht AP 4. Gesamtkonzept für die Elektrifizierung von öffentlichem Bus- und Entsorgungsverkehr. Technische Universität Berlin, Berlin.

Göhlich, D./Gräbener, S. (2016): Identification of User-oriented Electric Commercial Vehicle Concepts with a Particular Focus on Auxiliaries, in: 25th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2016, S. 1521–1540.

⁵¹¹ Göhlich/Kunith/Gräbener 2013; Ly/Graebener/Goehlich 2014; Graebener/Tarnowski/Goehlich 2015a; Göhlich/Gräbener 2015; Graebener/Tarnowski/Goehlich 2015b; Gräbener/Göhlich 2015; Wohlers et al. 2015; Gräbener/Ruhl/Raab 2015; Göhlich/Gräbener 2016

Datenaufbereitung für Fahrprofile

In diesem Kapitel wird die modifizierte Methode zur Aufbereitung von Fahrdaten aus einem GNSS-System angelehnt an das Vorgehen von Duran und Earleywine⁵¹² beschrieben. Die Methode gliedert sich in acht aufeinanderfolgende Teilschritte:

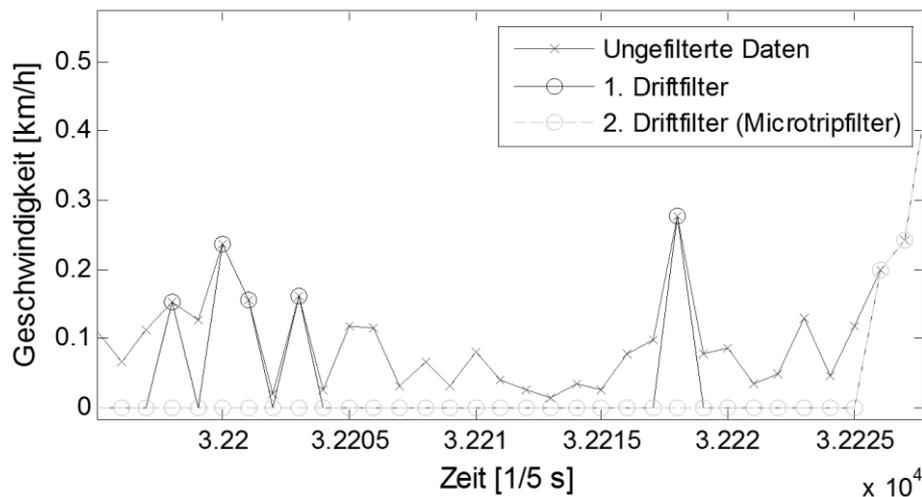
1. Festlegen von Geschwindigkeitsgrenzwerten
2. Entfernen von Null-Geschwindigkeits-Driften
3. Ersetzen von falschen Nullwerten
4. Interpolation von Signalabbrüchen
5. Korrektur von Ausreißern bei Beschleunigungswerten
6. Entstören und Konditionieren des Signals
7. Überprüfen der Filterqualität
8. Korrektur der aufgezeichneten POI-Daten

Festlegen von Geschwindigkeitsgrenzwerten: Beim Teilschritt Festlegen von Geschwindigkeitsgrenzwerten werden physikalische Grenzen für den Geschwindigkeitsverlauf des Fahrprofils definiert, um fehlerhafte Messwerte beziehungsweise einzelne, signifikante Ausreißer zu eliminieren. Dabei liegt die untere Grenze bei null km/h, während die obere Grenze fahrzeugtypabhängig ist. Da im Entsorgungs- und Stadtreinigungsverkehr davon ausgegangen werden kann, dass aus technischen Gründen und aufgrund der Straßenverkehrsordnung keine Geschwindigkeiten von über 100 km/h erreicht werden, wird hier der obere Grenzwert für alle Fahrzeugtypen festgelegt. Dieser Grenzwert muss nach Erfassung der Geschwindigkeitsprofile verifiziert werden. Sollten sich Messwerte außerhalb dieser Grenzen befinden so werden diese ausgehend von benachbarten Werten, die innerhalb des Grenzbereichs liegen, laut Duran und Earleywine mit Hilfe einer kubischen Spline Interpolation berichtigt.

Entfernen von Null-Geschwindigkeits-Driften: Der Null-Geschwindigkeits-Drift beschreibt den Effekt, dass trotz des Stillstands eines Empfängers niedrige Geschwindigkeitswerte durch den Sensor aufgezeichnet werden, was durch Verbindungsabbrüche und Wiederherstellungen zwischen dem GNSS-Gerät und den zur Verfügung stehenden Satelliten entsteht. Zunächst werden alle Geschwindigkeitswerte $\leq 0,15\text{km/h} = 0$ gesetzt. Die Gesamtheit der zu filternden Fahrdaten werden anschließend in einzelne kurze Fahrabschnitte, sogenannte Mikrotrips⁵¹³ zerlegt und ihre Distanzen mit einem Grenzwert verglichen. Liegt die ermittelte Distanz unter dem Grenzwert, werden sämtliche zugehörige Geschwindigkeitswerte des Mikrotrips 0 gesetzt. Die Wirkungsweise des Verfahrens ist in Abb. A-1 dargestellt.

⁵¹² Vgl.: Duran/Earleywine 2012

⁵¹³ Vgl.: Montazeri-Gh/Naghizadeh 2003

Abb. A-1: Zweistufiger Drift-Filter⁵¹⁴

Ersetzen von falschen Nullwerten: Aufgrund von kurzzeitigen Signalabbrüchen fällt die gemessene Geschwindigkeit für einige Sekundenbruchteile auf 0, um anschließend wieder auf die tatsächliche Geschwindigkeit anzusteigen. Der Filter für falsche Nullwerte untersucht die Umgebung von allen Messpunkten deren Geschwindigkeit gleich 0 ist und interpoliert jene Werte, in deren unmittelbarer Umgebung lediglich Werte größer Null existieren.

Interpolation von Signalabbrüchen: Aufgrund hoher Gebäude und enger Bebauung sowie Brücken im Innenstadtbereich entstehen kurze Signalausfälle. Wird durch Abschattung der Messeinheit für kurze Zeitintervalle kein Wert in die Messdatei geschrieben, existieren in den Messdaten Zeitsprünge zwischen den ansonsten gleich verteilten Messwerten. Der Effekt ist exemplarisch in Abb. A-2 abgebildet und wird durch Interpolation zwischen den Messwerten korrigiert.

Korrektur von Ausreißern bei Beschleunigungswerten: Während der Analyse der Beschleunigung werden Werte korrigiert, die außerhalb des physikalisch möglichen Bereichs liegen und ausschließlich durch Messfehler des GNSS-Messsystems verursacht worden sind. Die umgesetzte Programmlogik identifiziert zunächst die zu hohen Beschleunigungswerte und interpoliert die zugehörigen Stellen im Geschwindigkeitsbereich so lange, bis ein definierter Beschleunigungsgrenzwert an der untersuchten Stelle nicht mehr überschritten wird.

⁵¹⁴ Meinzolt 2015, S. 25

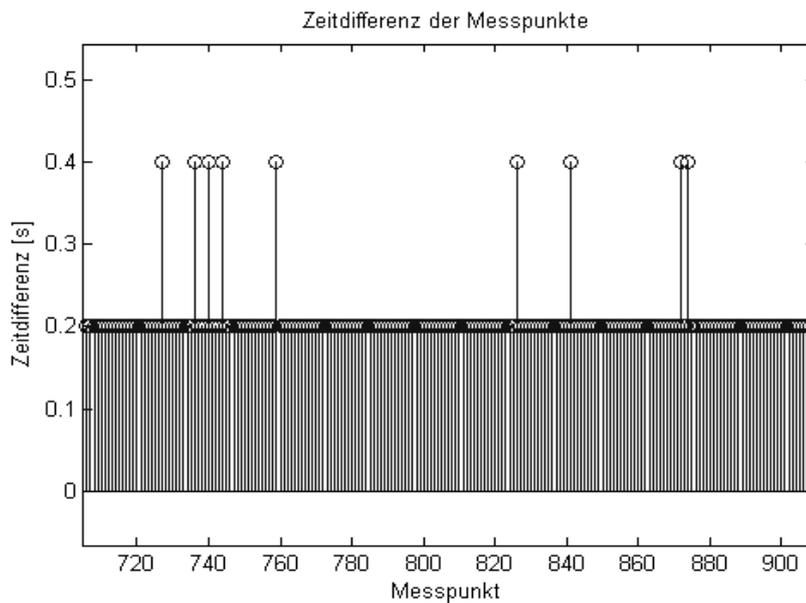


Abb. A-2: Inkonstante Zeitdifferenz der Messpunkte⁵¹⁵

Entstören und Konditionieren des Signals: Zur Entfernung von Rauschen und weiteren Messartefakten, ist eine abschließende Glättung der GNSS-Messdaten zweckmäßig. Zur Glättung der Daten wird ein Tiefpassfilter nach dem Verfahren von Savitzky und Golay⁵¹⁶ verwendet, da dieser im Vergleich zum gleitenden Mittelwert die Form und Amplitude des Signals besser erhält.

Überprüfen der Filterqualität: Zur Verifizierung der Filterqualität werden die gefilterten Daten mit den Originaldaten anhand von relevanten Kenngrößen verglichen. Als Basis für den Vergleich werden die Kenngrößen Maximalgeschwindigkeit, durchschnittliche Reisegeschwindigkeit, durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit, Standardabweichung der Geschwindigkeit und Standzeitanteil ausgewählt. Zusätzlich wird die Abweichung des Energiebedarfs durch Simulation bestimmt.

Korrektur der aufgezeichneten POI-Daten: Arbeitsaggregateinsatz, Nutzlastveränderungen sowie die sogenannten Points of Interest (POI) (Schichten, Pausen und Sonderereignisse) während des Betriebs wurden manuell erfasst. Dabei können Falscheingaben und Verzögerungen entstehen die korrigiert und mit den Fahrprofilen synchronisiert werden. Abb. A-3 zeigt einen typischen Indikationsfehler für einen Fahrzeugstillstand.

⁵¹⁵ Meinzolt 2015, S. 26

⁵¹⁶ Vgl.: Savitzky/Golay 1964

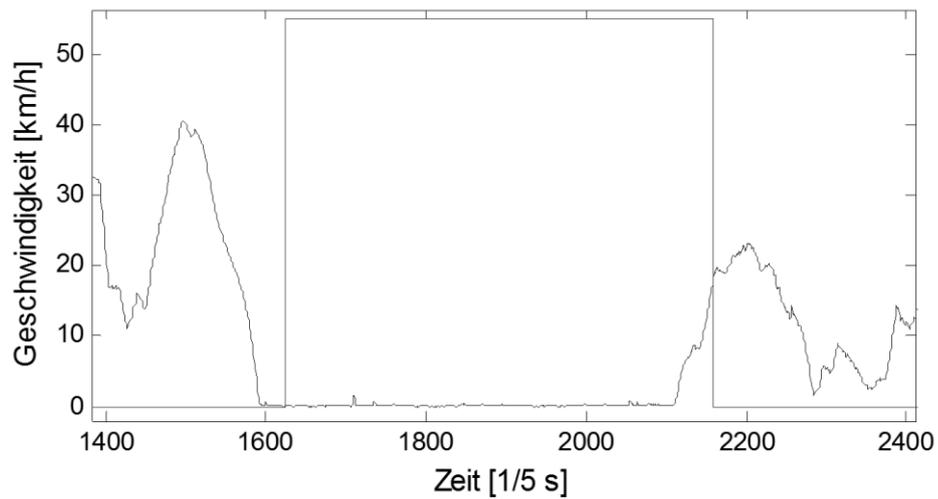


Abb. A-3: Typischer Indikationsfehler⁵¹⁷

Ziel der POI-Filterung ist die Harmonisierung der Daten aus dem POI-Skript und den Messdaten des GNSS-Sensors um eine korrekte Berechnung von Kennzahlen sowie eine korrekte Simulation der Energiebedarfe zu gewährleisten.

⁵¹⁷ Vgl.: Meinzolt 2015, S. 30

Energiebedarfe der Fahrzeugtypen mit maximaler Zuladung

Simulationsergebnisse Papierkorbsammelfahrzeug

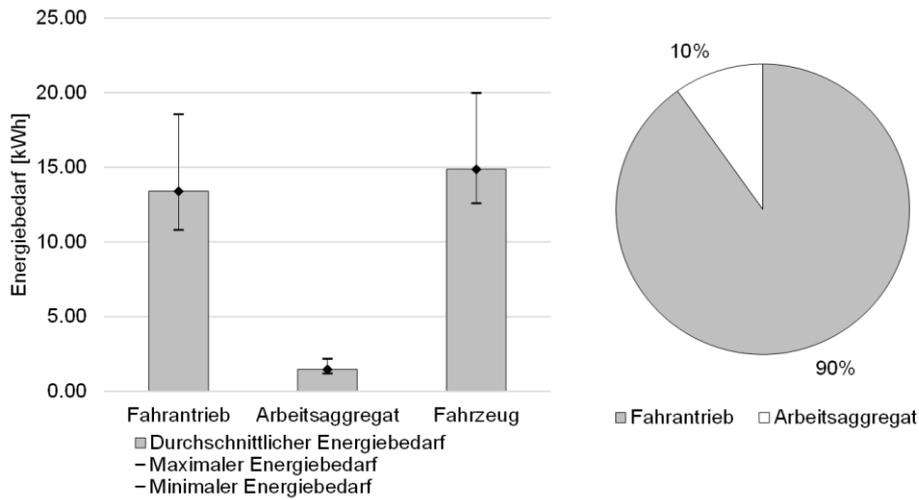


Abb. A-4: Maximaler Gesamtenergiebedarf des Papierkorbsammelfahrzeugs pro Schicht

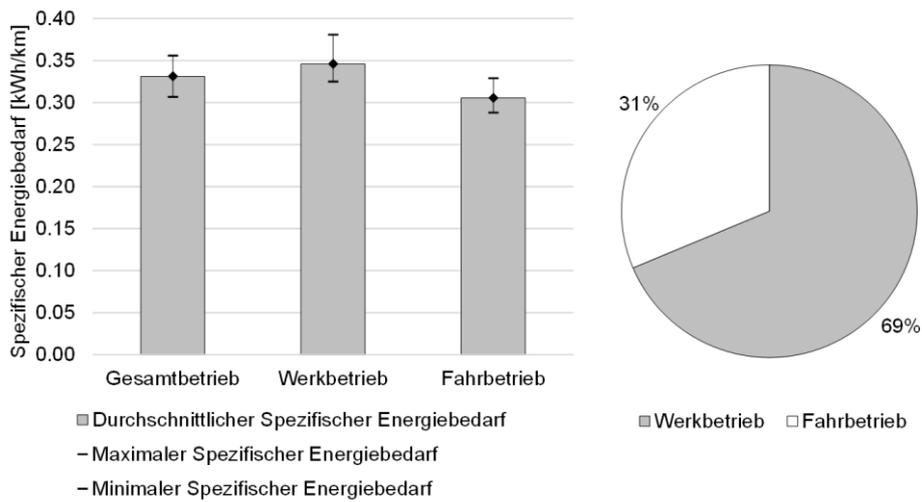


Abb. A-5: Maximaler Energiebedarfsanteil der Betriebssegmente des Papierkorbsammlers

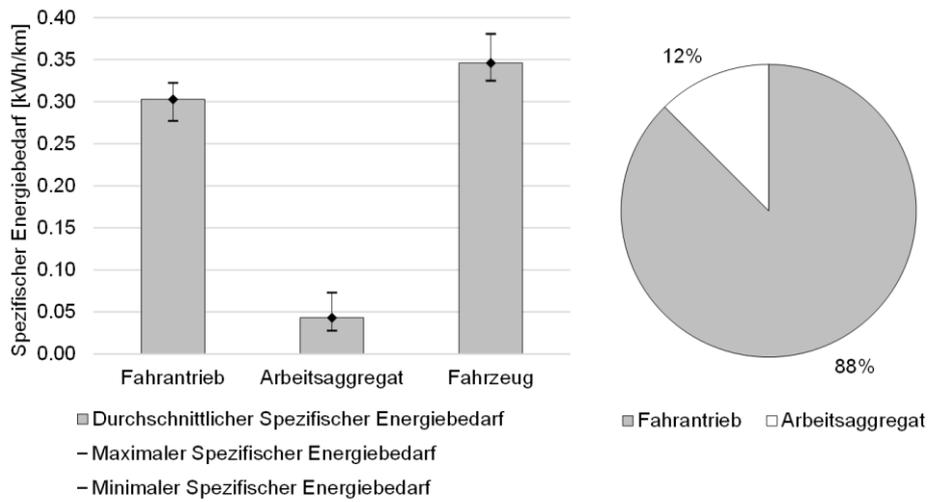


Abb. A-6: Maximaler Energiebedarf im Werkbetrieb des Papierkorbsammlers

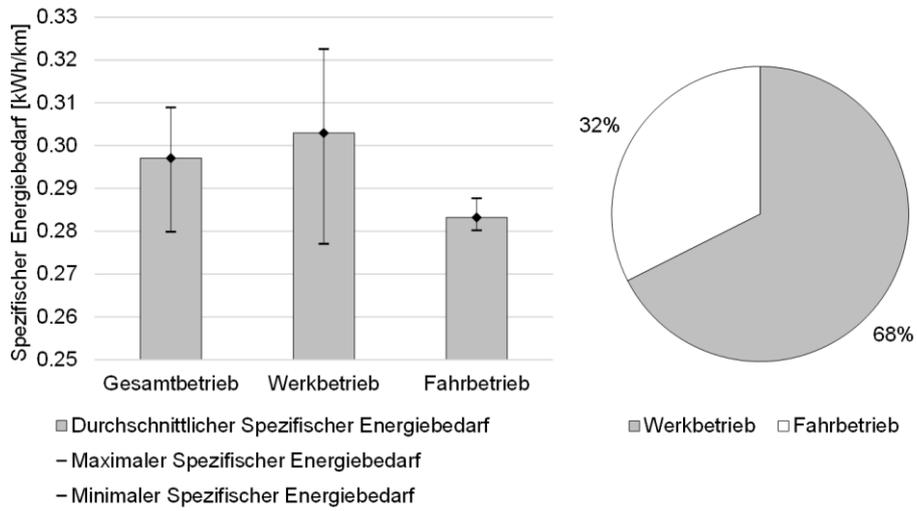


Abb. A-7: Maximaler Fahrantriebsenergiebedarf des Papierkorbsammlers

Simulationsergebnisse Großkehrmaschine

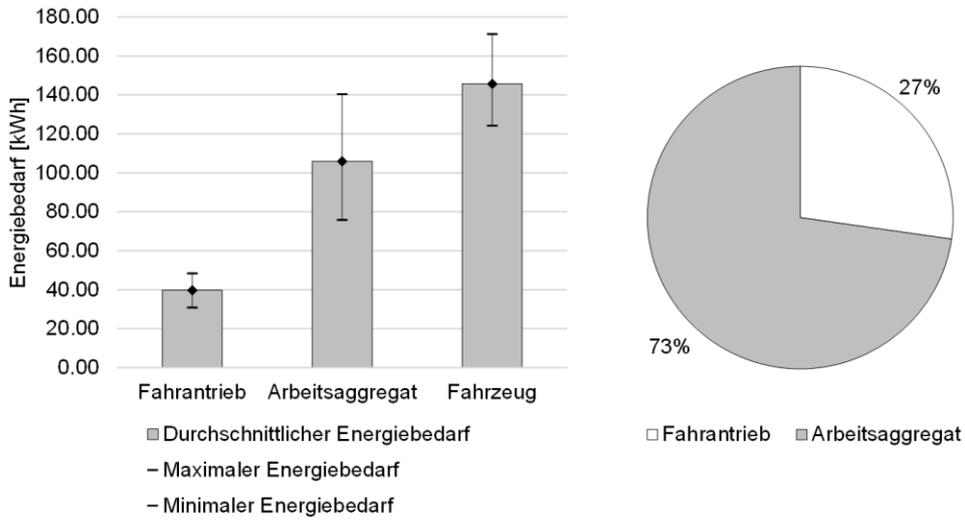


Abb. A-8: Maximaler Gesamtenergiebedarf der Großkehrmaschine pro Schicht

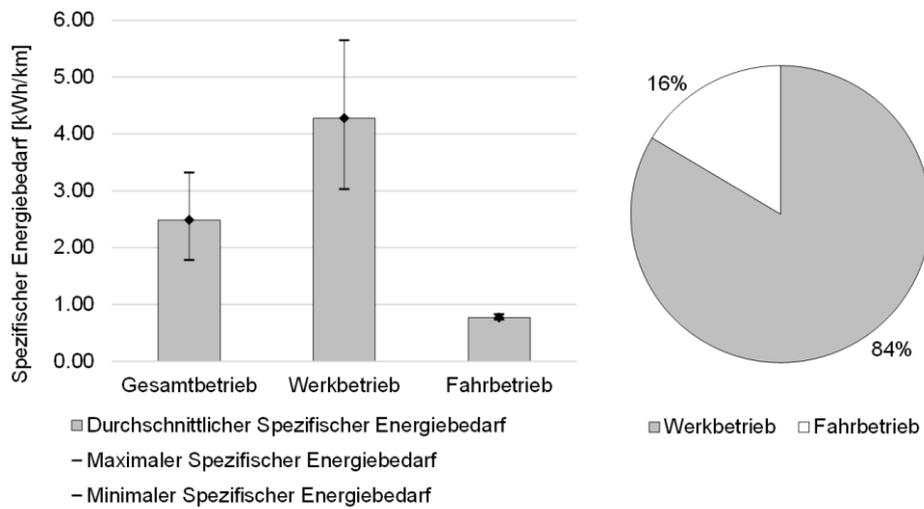


Abb. A-9: Maximaler Energiebedarfsanteil der Betriebssegmente der Großkehrmaschine

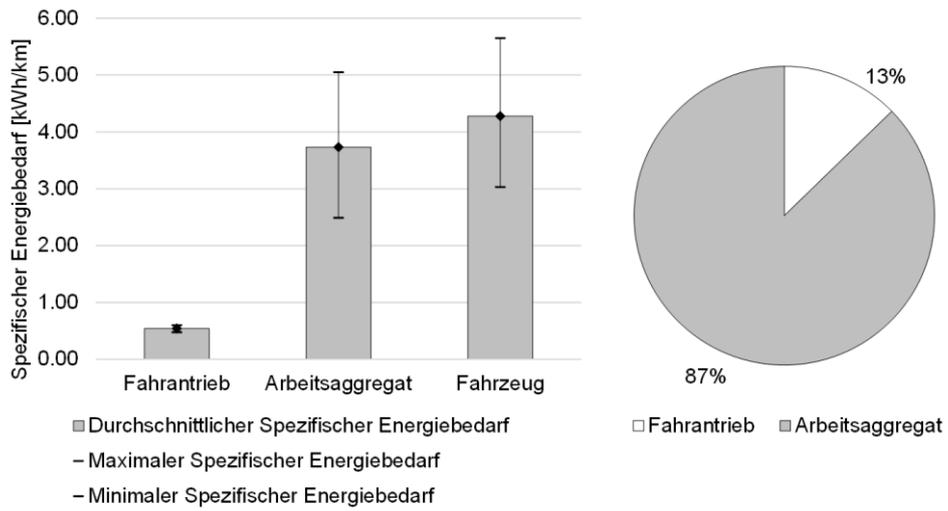


Abb. A-10: Maximaler Energiebedarf im Werkbetrieb der Großkehrmaschine

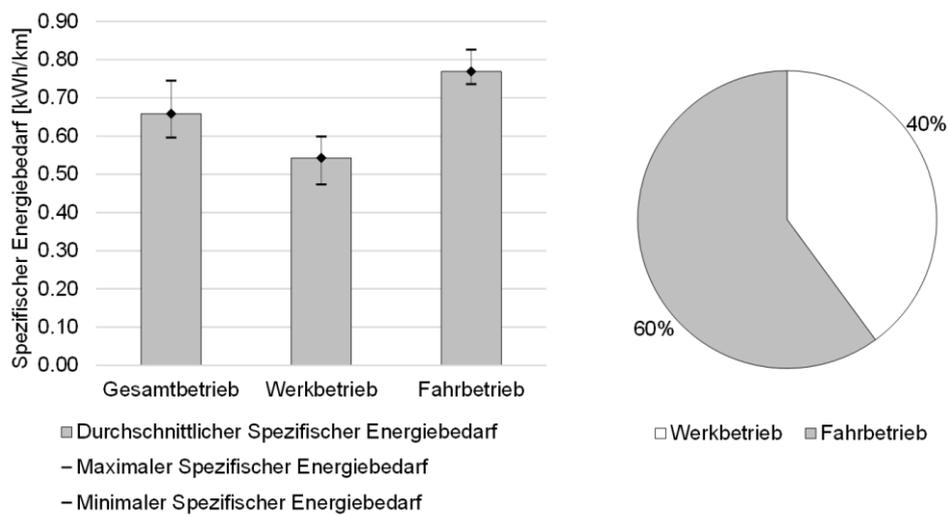


Abb. A-11: Maximaler Fahrantriebsenergiebedarf der Großkehrmaschine

Nutzwerte der Elektrifizierungskonzepte

Kleine Batteriegröße	Betrieb	Wirtschaftlichkeit	Image	Umwelteinflüsse	Technologie	Summe
Elektrofahrzeug (Batteriewechselsystem), Elektro-hydr. AUX						
Elektrofahrzeug (Schnellladesystem), Elektro-hydr. AUX						
Plug-In Parallel-Hybrid (langames Laden), Elektro-hydr. AUX	2.9	3.2	3.8	3.8	3.4	17.0
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem), Elektro-hydr. AUX						
REEV Seriell-Hybrid (langames Laden), Elektro-hydr. AUX						
REEV Seriell-Hybrid (Schnellladesystem), Elektro-hydr. AUX						
REEV Seriell-Hybrid (Batteriewechselsystem), Elektro-hydr. AUX	3.2	3.4	3.8	3.9	3.6	17.8
Plug-In Seriell-Hybrid (langames Laden), Hydraulisches AUX	3.2	3.4	3.8	3.9	3.8	18.1
Plug-In Seriell-Hybrid (langames Laden), Elektro-hydr. AUX						
Konventionelles Fahrzeug, Hydraulisches AUX	2.9	3.0	3.0	3.0	3.3	15.2
Mittlere Batteriegröße	Betrieb	Wirtschaftlichkeit	Image	Umwelteinflüsse	Technologie	Summe
Elektrofahrzeug (Batteriewechselsystem), Elektro-hydr. AUX						
Elektrofahrzeug (Schnellladesystem), Elektro-hydr. AUX						
Plug-In Parallel-Hybrid (langames Laden), Elektro-hydr. AUX	2.9	2.9	4.0	4.1	3.4	17.3
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem), Elektro-hydr. AUX	3.2	2.5	4.3	4.2	3.6	17.7
REEV Seriell-Hybrid (langames Laden), Elektro-hydr. AUX	3.2	3.0	4.3	4.2	3.6	18.3
REEV Seriell-Hybrid (Schnellladesystem), Elektro-hydr. AUX						
REEV Seriell-Hybrid (Batteriewechselsystem), Elektro-hydr. AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (langames Laden), Hydraulisches AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (langames Laden), Elektro-hydr. AUX	2.9	3.0	3.0	3.0	3.3	15.2
Konventionelles Fahrzeug, Hydraulisches AUX						
Große Batteriegröße	Betrieb	Wirtschaftlichkeit	Image	Umwelteinflüsse	Technologie	Summe
Elektrofahrzeug (Batteriewechselsystem), Elektro-hydr. AUX	3.4	1.6	5.0	4.8	4.0	18.8
Elektrofahrzeug (Schnellladesystem), Elektro-hydr. AUX	3.3	1.6	5.0	4.9	3.9	18.7
Plug-In Parallel-Hybrid (langames Laden), Elektro-hydr. AUX	2.9	1.9	4.3	4.5	3.4	16.9
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnellladesystem), Elektro-hydr. AUX	2.9	1.4	4.3	4.5	3.4	16.4
REEV Seriell-Hybrid (langames Laden), Elektro-hydr. AUX	3.2	1.9	4.5	4.5	3.6	17.7
REEV Seriell-Hybrid (Schnellladesystem), Elektro-hydr. AUX	3.2	1.4	4.5	4.5	3.6	17.2
REEV Seriell-Hybrid (Batteriewechselsystem), Elektro-hydr. AUX	3.2	1.9	4.5	4.5	3.6	17.6
Plug-In Seriell-Hybrid (langames Laden), Hydraulisches AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (langames Laden), Elektro-hydr. AUX						
Konventionelles Fahrzeug, Hydraulisches AUX	2.9	3.0	3.0	3.0	3.3	15.2

Abb. A-12: Gesamtergebnis der Nutzwertanalyse für das Papierkorbsammelfahrzeug

Kleine Batteriegröße	Betrieb	Wirtschaftlichkeit	Image	Umwelteinflüsse	Technologie	Summe
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden), Hydraulisches AUX	2.4	2.5	3.5	2.9	2.9	14.2
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnelladesystem), Hydraulisches AUX						
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden), Hubkolben-AUX	2.4	3.0	3.5	3.4	3.2	15.5
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnelladesystem), Hubkolben-AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden), Hydraulisches AUX	2.6	3.0	3.5	2.9	3.1	15.1
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnelladesystem), Hydraulisches AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden), Hubkolben-AUX	2.6	3.0	3.5	3.4	3.4	15.9
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnelladesystem), Hubkolben-AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden), Elektrisches AUX	4.4	2.8	3.8	3.1	4.4	18.5
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnelladesystem), Elektrisches AUX						
Konventionelles Fahrzeug, Hubkolben-AUX	2.9	3.0	3.0	3.1	3.3	15.3
Mittlere Batteriegröße	Betrieb	Wirtschaftlichkeit	Image	Umwelteinflüsse	Technologie	Summe
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden), Hydraulisches AUX	2.4	2.2	3.8	3.3	2.9	14.6
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnelladesystem), Hydraulisches AUX	2.4	2.2	3.8	3.4	2.9	14.6
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden), Hubkolben-AUX						
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnelladesystem), Hubkolben-AUX	2.4	2.6	3.8	3.8	3.2	15.8
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden), Hydraulisches AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnelladesystem), Hydraulisches AUX	2.6	2.2	3.8	3.4	3.1	15.0
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden), Hubkolben-AUX	2.6	2.7	3.8	3.8	3.4	16.3
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnelladesystem), Hubkolben-AUX	2.6	2.6	3.8	3.9	3.4	16.2
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden), Elektrisches AUX	4.4	2.3	4.0	3.5	4.4	18.6
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnelladesystem), Elektrisches AUX	4.4	2.3	4.0	3.6	4.4	18.7
Konventionelles Fahrzeug, Hubkolben-AUX	2.9	3.0	3.0	3.1	3.3	15.3
Große Batteriegröße	Betrieb	Wirtschaftlichkeit	Image	Umwelteinflüsse	Technologie	Summe
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden), Hydraulisches AUX	2.4	1.3	4.0	3.7	2.9	14.4
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnelladesystem), Hydraulisches AUX	2.4	1.4	4.0	3.8	2.9	14.5
Plug-In Parallel-Hybrid (langsames Laden), Hubkolben-AUX						
Plug-In Parallel-Hybrid (Schnelladesystem), Hubkolben-AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden), Hydraulisches AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnelladesystem), Hydraulisches AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden), Hubkolben-AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnelladesystem), Hubkolben-AUX						
Plug-In Seriell-Hybrid (langsames Laden), Elektrisches AUX	4.4	1.6	4.3	4.3	4.4	19.0
Plug-In Seriell-Hybrid (Schnelladesystem), Elektrisches AUX	4.4	1.7	4.3	4.4	4.4	19.2
Konventionelles Fahrzeug, Hubkolben-AUX	2.9	3.0	3.0	3.1	3.3	15.3

Abb. A-13: Gesamtergebnis der Nutzwertanalyse für die Großkehrmaschine