

Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion von Nutzfahrzeugen

Empirische Untersuchung des organisationalen Adoptionsverhaltens und
systemdynamische Prognose für den deutschen Automobilmarkt

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Wirtschaftswissenschaften

(Dr. rer. pol.)

von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl. Wi.-Ing. Claudio Seitz

Tag der mündlichen Prüfung:	01.07.2015
Referent:	Prof. Dr. Orestis Terzidis
Korreferent:	Prof. Dr. Wolf Fichtner

DOI: 10.5445/IR/1000049334

Vorwort

Der Nutzfahrzeugmarkt ist ein absolut spannender Markt, mit Fahrzeugen von beeindruckender Größe und Motorleistung. Kaum ein Lebensmittel im Supermarkt ist nicht mit einem LKW transportiert worden; Busse sind fester Bestandteil des ÖPNV. Die Zuverlässigkeit, mit welcher diese Fahrzeuge und ihre Fahrer den Puls unserer Wirtschaft am Leben erhalten, ist es mindestens ebenso. In vielen persönlichen Gesprächen mit Freunden und Kollegen außerhalb des Transportsektors und des Nutzfahrzeugmarktes wird dies viel zu selbstverständlich erachtet. Wenn LKW und Busse überhaupt bewusst wahrgenommen werden, dann oftmals nur als lästiges Übel auf der Autobahn oder als stinkende, laute ‚Brummies‘ in der Stadt.

Zwar werden wir ganz ohne LKW und Busse auch in Zukunft nicht auskommen. Jedoch besteht durch die aufkeimende Entwicklung von neuen Antriebstechnologien eine berechtigte Zuversicht, den Güter- und öffentlichen Personenverkehr auf der Straße von seinen negativen Umwelteinflüssen zu entkoppeln. Dieser gesamtwirtschaftlichen Bedeutung und dem Umwelteinfluss wird die wissenschaftliche Forschung bisher jedoch nicht gerecht. Deshalb möchte ich mit meiner Forschungsarbeit einen Beitrag dazu leisten, diesen Markt mit seinen handelnden Akteuren besser zu verstehen, um vielleicht doch das ein oder andere alternativ angetriebene Nutzfahrzeug in den kommenden Jahren mehr auf der Straße zu sehen. Denn in diesen neuen Antriebstechnologien besteht ein riesen Potential.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Kollegen, Freunde und natürlich meine Familien einen tollen Anteil beigetragen. Vielen Dank Euch allen!

Ganz besonders möchte ich dabei meinen Doktorvater Prof. Dr. Orestis Terzidis hervorheben. Er ist für viele wertvolle Pointen der Ergebnisse verantwortlich und hat jedes Treffen durch sein interdisziplinäres Denken mit inspirierenden Einblicke in die Technik- und Innovationsgeschichte zu einem Highlight gemacht. Das war klasse – Danke!

Ebenso möchte ich Prof. Dr. Wolf Fichtner für die Übernahme des Zweitgutachtens, die interessanten Diskussionen und Hinweise zu meiner Arbeit danken.

Möglich gemacht haben mein Forschungsprojekt erst Michael Bitter und Calogero Palumbo. Vielen Dank für die super Diskussionen zum Simulationsmodell, die überlassenen Freiheiten aber auch die richtige Unterstützung zum richtigen Zeitpunkt! Dazu gehören natürlich auch Ellen Mailänder als Ratgeberin und allwissende Heavy-Duty

Expertin sowie Wolfgang Sorg als Trendscout zum Fachsimpeln über den Automobilmarkt. Danke Euch!

Toll eingebettet und unterstützt war ich im Kreis der WiSo-Doktoranden. Danke Anja Hoeft, Anne Schwenkenberg, Christoph Heinecke, Daniel Oeschger, Dirk Bluhm, Dr. Friederike Neugebauer, Holger Wendt, Marc Flad, Mathias Krug, Dr. Minea Schwenk, Patric Finkbeiner, Peter Rück und Dr. Steffen Rahn. Vor allem aber Felix Pretschke für die Schreib-Ashrams und das proof-reading. Ebenso habe ich mich am Lehrstuhl und in den Doktoranden-Klausurtagungen wohl gefühlt sowie viele Anregungen mitgenommen. Vielen Dank an das gesamte Team für die Unterstützung bis auf die letzten Meter zum Doktorhut: Alexander, Christine, Gennadi, Joachim, Max, Nadia, Sabrina sowie insbesondere Abilio Avila und Florian Wohlfeil fürs gegenseitige Gegenlesen.

Ganz großen Dank an Oliver Beuttenmüller, in deiner Master-Thesis hast Du mit deiner Expertise zur Quantitativen Forschung den Grundstein für unsere Veröffentlichung gelegt und fast jeden NFZ-Verband aufgemischt sowie an Fabian Angst für die interessanten Interviews und das gemeinsame Modellieren in Rahmen der Masterarbeit.

Für die eigentliche Grundlagenausbildung war die Talentschmiede des CF Vorwärts La Nucia zuständig. Hieraus besonderen Dank an Konstantin Biel und Felix Braun für Euer unerschütterliches Gegenlesen der Arbeit mit viel Witz. Iem.

Egal wie hoch der inhaltliche Beitrag eines Einzelnen auch sein kann – diese bedingungslose Unterstützung und Zuversicht von Dir, Carina, haben meine Aufgabe so selbstverständlich zu unserem gemeinsamen Projekt gemacht. Dabei ist das jedoch was absolut Außergewöhnliches und hat den wertvollsten Beitrag für mich in dieser Zeit ausgemacht.

Karlsruhe, im Juli 2015

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	I
INHALTSVERZEICHNIS	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	VI
TABELLENVERZEICHNIS.....	X
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XI
KAPITEL 1 EINLEITUNG	1
1.1 Energieeffizienz im Transportsektor	1
1.2 Der Dieselmotor als dominantes Design auf dem NFZ-Markt	5
1.3 Forschungsfragen	7
1.4 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	8
KAPITEL 2 UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND.....	11
2.1 Untersuchungsrahmen: Die NFZ-Branche	11
2.1.1 <i>Wirtschaftliche Bedeutung</i>	11
2.1.2 <i>Struktur des NFZ-Marktes</i>	13
2.2 Stand der Forschung zu CO ₂ -sparenden Technologien in NFZ.....	16
KAPITEL 3 THEORETISCHER RAHMEN.....	23
3.1 Technologiediffusion.....	23
3.1.1 <i>Kategorisierung von Adopter und User</i>	24
3.1.2 <i>Dominant Design</i>	27
3.2 Organisationales Adoptionsverhalten.....	31
3.2.1 <i>Modelle zur Erklärung des organisationalen Adoptionsverhaltens</i>	31
3.2.2 <i>TOE-Modell</i>	33
3.3 Modellierung und Prognose der Technologiediffusion auf dem Automobilmarkt	35
3.3.1 <i>System Dynamics</i>	36
3.3.2 <i>Agentenbasierte Modellierung</i>	37
3.3.3 <i>Diffusions- und Zeitreihenmodelle</i>	38
3.3.4 <i>Diskrete Entscheidungsmodelle</i>	38
3.3.5 <i>Auswahl einer geeigneten Modellierungsmethodik</i>	39

KAPITEL 4	TECHNOLOGISCHER KONTEXT DER DIFFUSION.....	43
4.1	Antriebskonzepte und CO ₂ -sparende Technologien.....	43
4.1.1	<i>Der konventionelle Dieselmotor</i>	43
4.1.2	<i>Alternative Motorenkonzepte</i>	45
4.1.3	<i>CO₂-sparende Technologien für NFZ</i>	52
4.1.4	<i>Verfügbarkeit und Reifegrad alternativer Antriebstechnologien</i>	58
4.2	Anwendungsfallspezifische Technikpakete	61
4.2.1	<i>Methodik</i>	62
4.2.2	<i>Technikpakete in den Anwendungsfällen</i>	63
KAPITEL 5	ORGANISATIONALER KONTEXT DER DIFFUSION	67
5.1	Stand der Forschung	67
5.2	Organisationales Adoptionsverhalten auf dem NFZ-Markt.....	68
5.2.1	<i>Organisationales Beschaffungsverhalten</i>	69
5.2.2	<i>Variablen und Hypothesen</i>	70
5.2.3	<i>Methodik und Datenerhebung</i>	76
5.2.4	<i>Statistische Analyse der Ergebnisse</i>	81
5.2.5	<i>Diskussion der Ergebnisse</i>	86
5.3	Präferenzen von NFZ-Käufern in der Auswahlentscheidung für Antriebstechnologien	95
5.3.1	<i>Theorie zur Conjoint-Analyse</i>	96
5.3.2	<i>Methodik und Datenerhebung</i>	99
5.3.3	<i>Ergebnisse</i>	104
5.3.4	<i>Zusammenfassung</i>	108
5.4	Implikationen für die Technologiediffusion	110
KAPITEL 6	ORGANISATIONSEXTERNER KONTEXT DER DIFFUSION	113
6.1	Regulatorischer und politischer Rahmen des NFZ-Marktes.....	113
6.1.1	<i>Europäische Ebene</i>	114
6.1.2	<i>Nationale Ebene</i>	118
6.1.3	<i>Regionale und kommunale Ebene</i>	119
6.2	Komplementäres Ökosystem.....	120
6.3	Qualitative empirische Studie	123
6.3.1	<i>Theoretische und methodische Grundlagen</i>	124
6.3.2	<i>Methodik und Datenerhebung</i>	130
6.3.3	<i>Ergebnisse</i>	136
KAPITEL 7	SYSTEMDYNAMISCHES PROGNOSEMODELL	147
7.1	Modellierung mit System Dynamics	148
7.1.1	<i>Grundlagen zu System Dynamics</i>	148
7.1.2	<i>Anwendung von System Dynamics auf Automobilmärkte</i>	150

7.1.3	<i>System Dynamics Modellierungsprozess</i>	152
7.2	Entwicklung des Simulationsmodells	154
7.2.1	<i>Konzeptioneller Aufbau des Simulationsmodells</i>	155
7.2.2	<i>Investitionsentscheidung</i>	161
7.2.3	<i>Kundenvertrautheit</i>	165
7.2.4	<i>Verfügbarkeit der Technologien</i>	167
7.2.5	<i>Betankungsinfrastruktur</i>	169
7.2.6	<i>Attraktivität der Technologien</i>	172
7.3	Validierung des Simulationsmodells	179
7.3.1	<i>Strukturvalidität</i>	179
7.3.2	<i>Verhaltensvalidität</i>	183
KAPITEL 8	SZENARIOANALYSE	189
8.1	Szenariotechnik	189
8.2	Beschreibung und Analyse der Szenarien	192
8.2.1	<i>Basisszenario</i>	193
8.2.2	<i>CO₂-Politik</i>	197
8.2.3	<i>Biogas</i>	198
8.2.4	<i>Elektrische Mobilität</i>	200
8.2.5	<i>Rezession</i>	202
8.3	Abschließende Diskussion der Forschungsfragen	203
8.3.1	<i>CO₂-Reduktionspotenzial</i>	203
8.3.2	<i>Dominantes Design</i>	205
8.3.3	<i>Frühe Adopter und Lead User</i>	206
KAPITEL 9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	209
9.1	Zusammenfassung	209
9.2	Limitationen und weiterer Forschungsbedarf	212
9.3	Praktische Implikationen	213
9.4	Schluss	214
ANHANG	215
LITERATURVERZEICHNIS	278

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzeptioneller Aufbau der Arbeit.....	9
Abbildung 2: Transportaufkommen nach Verkehrsträger EU27	12
Abbildung 3: Klassifizierung von NFZ nach deren Anwendungsfall	14
Abbildung 4: Spezifikation von NFZ-Anwendungsfällen und deren Anteil an Neuzulassungen.....	15
Abbildung 5: Neuzulassungen alternativer Antriebe in Deutschland 2013.....	16
Abbildung 6: Adopterkategorien nach Rogers (2003) und Moore (2006)	25
Abbildung 7: Positiver Regelkreis durch die Entstehung von Industriestandards	29
Abbildung 8: Ablösung eines dominanten Designs durch eine neue Technologie.....	30
Abbildung 9: TOE Modell	32
Abbildung 10: Anforderungen an das Simulationsmodell und Erfüllung durch die Methodik	41
Abbildung 11: Well-to-Wheel CO ₂ -Emissionen [g/MJ] von alternativen Kraftstoffen im Vergleich zu Diesel	45
Abbildung 12: Entwicklungspotenzial und Eignung der Batterietechnik für den Einsatz in Automobilen.....	49
Abbildung 13: Verbesserung der Aerodynamik von LKW	55
Abbildung 14: Kraftstoffreduktionspotenzial aerodynamischer Verbesserungsmaßnahmen	56
Abbildung 15: Berücksichtigte Technikpakete pro Anwendungsfall	64
Abbildung 16: Hypothesenkonstrukt zur Auswahlbereitschaft CO ₂ -sparender Antriebstechnologien.....	76
Abbildung 17: Zusammenfassung der Interviews mit Bestätigung der abhängigen Variablen.....	78
Abbildung 18: Beschreibung der Stichprobe	81
Abbildung 19: Kundengruppen des deutschen NFZ-Marktes	88
Abbildung 20: Beschaffungsformen pro Cluster	90
Abbildung 21: Heutige Adoption und zukünftige Berücksichtigung kraftstoffsparender Maßnahmen in NFZ	91
Abbildung 22: Nutzung, Kaufintention und Käuferwägung alternativer Antriebe in ausgewählten Anwendungsfällen.....	93
Abbildung 23: Auswahl der Merkmale für die CBCA.....	101
Abbildung 24: Stichprobe nach Rolle der Teilnehmer im <i>buying center</i> und Unternehmensgröße.....	104
Abbildung 25: Nutzenfunktionen für Antriebsmerkmale des Anwendungsfalls Fernverkehr in Deutschland	105

Abbildung 26: Vergleich der Zahlungsbereitschaft für Kraftstoffeinsparung und CO ₂ -Emissionen.....	105
Abbildung 27: Vergleich der relativen Wichtigkeiten von Merkmalen in der Antriebswahl von NFZ.....	106
Abbildung 28: Wichtigkeit von Kaufkriterien für NFZ der deutschen Befragungsteilnehmer.....	107
Abbildung 29: Dichte des Tankstellennetzes für alternative Kraftstoffe in Deutschland	122
Abbildung 30: Interne Struktur der <i>action situation</i> des IAD-Frameworks.....	126
Abbildung 31: Vorgehen im Kodierungsprozess nach Kim und Andersen (2012)	127
Abbildung 32: Methoden zur Generierung von Erkenntnissen für System Dynamics Modelle.....	129
Abbildung 33: Aufbau der qualitativen Studie	131
Abbildung 34: <i>Action situation</i> der Diffusion CO ₂ -sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt	140
Abbildung 35: Kausaldiagramm auf Basis der Interviewergebnisse	143
Abbildung 36: Grundlegende Wirkzusammenhänge der Attraktivitätssteigerung innovativer Antriebstechnologien	144
Abbildung 37: Positiver Regelkreis des Aufbaus der komplementären Infrastruktur	145
Abbildung 38: Darstellungsformen von System Dynamics Modellgrößen am Beispiel Anzahl Tankstellen.....	149
Abbildung 39: System Dynamics Modellierungsprozess.....	153
Abbildung 40: Im Simulationsmodell abgebildete Anwendungsfälle und (Antriebs-) Technologien.....	156
Abbildung 41: Konzeptioneller Aufbau des Gesamtmodells aus Teilmodellen.....	158
Abbildung 42: Kausaldiagramm als dynamische Hypothese zur Prognose der zukünftigen Marktdurchdringung von Antriebstechnologien.....	159
Abbildung 43: Konzeptioneller Aufbau des Systemarchetyps der Technologie Attraktivität	160
Abbildung 44: Berechnung des Marktanteils	163
Abbildung 45: Prognostizierte Neuzulassungen von LKW und Bussen in Deutschland	164
Abbildung 46: NFZ-Bestand und Nutzerbasis von Technologien.....	165
Abbildung 47: Implementierung der Kundenvertrautheit im Simulationsmodell	167
Abbildung 48: Herstellerinteresse und Verfügbarkeit alternativer Antriebstechnologien.....	168
Abbildung 49: Funktion zum Zusammenhang von Profitabilität und potentieller Adopter	171
Abbildung 50: Darstellung des Teilmodells Betankungsinfrastruktur am Beispiel städtische Tankstellen.....	171

Abbildung 51: Berechnung der Hersteller Marge zur Deckung von Entwicklungskosten und Erzielung von Gewinnen.....	173
Abbildung 52: Berechnung der Komponentenkosten am vereinfachten Beispiel LNG	174
Abbildung 53: Exogen angenommene Kraftstoffpreise	175
Abbildung 54: Berechnung des Teilnutzenwertes Betriebskosten.....	175
Abbildung 55: Berechnung des Teilnutzenwertes Nützlichkeit	177
Abbildung 56: Berechnung des Teilnutzenwertes Anwenderfreundlichkeit	177
Abbildung 57: Berechnung des Teilnutzenwertes Image.....	179
Abbildung 58: Extremwerttest bei einem Anschaffungspreis-Plus von 50 T€ für den Dieselmotor ab 2020.....	181
Abbildung 59: Extremwerttest einer Ausstattungsquote von 100 % aller öffentlichen Straßen im urbanen Raum mit induktivem Laden	182
Abbildung 60: Extremwerttest einer 100 % Modellverfügbarkeit von LNG-NFZ ab 2015	183
Abbildung 61: Sensitivitätsanalyse des LNG-Gesamtmarktanteils für die Jahre 2020 und 2030 in relativer Veränderung zum Basisszenario.....	184
Abbildung 62: Sensitivitätsanalyse des BEV-Gesamtmarktanteils für die Jahre 2020 und 2030 in relativer Veränderung zum Basisszenario.....	185
Abbildung 63: Konfidenzintervall des Marktanteils der Abgaswärmenutzung im Fernverkehr in Abhängigkeit der Höhe der CO ₂ -Grenzwerte	185
Abbildung 64: Monte Carlo Simulation des LNG Marktanteils im Fernverkehr (links) und Ergebnisplot im Jahr 2035 (rechts) in Abhängigkeit der erwarteten Tankstellendichte.....	186
Abbildung 65: Explorative Szenariotechnik.....	190
Abbildung 66: Beispielhaftes Vorgehen in der Szenariotechnik	191
Abbildung 67: Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO ₂ -Reduktion im Basisszenario.....	194
Abbildung 68: Anwendungsfallsspezifische Diffusion im Basisszenario (ohne Diesel).....	196
Abbildung 69: Marktentwicklung im Szenario <i>CO₂-Politik</i>	198
Abbildung 70: Anteil an Biogas am Gasverbrauch von LNG- und CNG-NFZ im Szenario <i>Biogas</i>	199
Abbildung 71: Marktentwicklung im Szenario <i>Biogas</i>	200
Abbildung 72: Marktentwicklung im Szenario <i>Elektrische Mobilität</i>	201
Abbildung 73: Marktentwicklung im Szenario <i>Rezession</i>	203
Abbildung 74: Vergleich der CO ₂ -Reduktion der neu zugelassenen NFZ Flotte im Jahr 2035 gegenüber 2014 in den Szenarien und ohne Diffusion einer CO ₂ -sparenden Technologie.....	204
Abbildung 75: Eintrittswahrscheinlichkeit der CO ₂ -Reduktion im Jahr 2035 gegenüber 2014 in Abhängigkeit einer gleichverteilten multivariaten Veränderung der Szenarioparameter	205

Abbildung 76: Vergleich der Häufigkeit, mit welcher CO ₂ -sparende Antriebstechnologien die Alternative mit der höchsten Marktdurchdringung sind....	206
Abbildung 77: Präsentation der drei unterschiedlichen Designs der Auswahlentscheidungen	261
Abbildung 78: Funktionaler Zusammenhang zwischen Tankstellendichte und Nutzenparameter Tankstelleninfrastruktur	272
Abbildung 79: Ergänzende Modellansicht zur Berechnung der Modellverfügbarkeit	273
Abbildung 80: Ergänzende Modellansicht Anschaffungspreis.....	274
Abbildung 81: Ausführliche Modellansicht zur städtischen Betankungsinfrastruktur	275
Abbildung 82: Ergänzende Modellansicht zur der gesamthaften Berechnung des Nutzenwertes Betankungsinfrastruktur	276
Abbildung 83: Ergänzende Modellansicht zur Berechnung der Strafzahlung aus Überschreitung der CO ₂ -Grenzwerte	277

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Literaturübersicht zu Diffusionsstudien auf dem Automobilmarkt	40
Tabelle 2: Übersicht über Technologie und Kosten von Elektromotoren	48
Tabelle 3: Verfügbarkeit alternativer Antriebstechnologien	60
Tabelle 4: Technikpakete Fernverkehr	65
Tabelle 5: Ergebnis der multiplen Regressionsanalyse	84
Tabelle 6: Merkmalsausprägungen für die Conjoint-Analyse	102
Tabelle 7: Stakeholdergruppen mit Interesse an der und Einfluss auf die Diffusion CO ₂ -sparender Antriebstechnologien	132
Tabelle 8: Interviewpartner für die qualitative Studie auf Basis der Stakeholderanalyse	135
Tabelle 9: Vergleich der Szenarien	192
Tabelle 10: Ergebnis der Faktorenanalyse	237
Tabelle 11: Parametrisierung Basisszenario	271

Abkürzungsverzeichnis

ABM	Agent-based Modelling, auf Deutsch Agentenbasierte Modellierung
AdBlue	Markenname für eine auf Harnstoff basierende Flüssigkeit zur Abgasnachbehandlung
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Customer
bb1	Barrel, Maßeinheit im Rohölhandel (Entspricht ca. 159 l)
BEV	Rein batterieelektrisches NFZ
BSZ	Brennstoffzelle
CNG	Compressed Natural Gas, auf Deutsch druckgespeichertes Erdgas
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSR	Corporate Social Responsibility, auf Deutsch Unternehmerische Sozialverantwortung
DOI	Diffusion of Innovations Theorie
EC	Europäische Kommission
EU	Europäische Union
EU15	Umfasst alle Mitgliedstaaten der Europäischen Union bis zur Osterweiterung im Jahr 2004
EVU	Energieversorgungsunternehmen
HEV	Hybrid-elektrisches NFZ
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition, auf Deutsch Homogene Kompressionszündung
ICCT	International Council of Clean Transportation
KEP	Kurier-Express-Paket-Dienst

LKW	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas, auf Deutsch verflüssigtes Erdgas
LPG	Liquefied Petroleum Gas, auf Deutsch Autogas.
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung
MNL	Multi-nominal Logit
MwSt.	Mehrwertsteuer
N ₂ O	Lachgas
NFZ	Nutzfahrzeug, -e, -en
NO _x	Stickoxide
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	Plug-In Hybrid-elektrisches NFZ
PKW	Personenkraftwagen
R&D	Research and Development, auf Deutsch Forschung und Entwicklung
REX	Range Extender
SCR	Selective Catalytic Reduction, auf Deutsch selektive katalytische Reduktion
TAM	Technology Acceptance Model
TCO	Total Cost of Ownership, auf Deutsch Gesamtbetriebskosten
Tkm	Tonnenkilometer
TtW	Tank-to-Wheel
VECTO	Vehicle energy consumption calculation tool
Vgl.	Vergleiche
VTG	Verstellbare Turbinengeometrie
WtW	Well-to-Wheel

“There are no passengers on Spaceship Earth. We are all crew.“

(Marshall McLuhan, Philosoph und Kommunikationswissenschaftler, 1911–1980)

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Energieeffizienz im Transportsektor

Der europäische Transportsektor befindet sich vor einer der größten Herausforderungen der kommenden Jahrzehnte. Während die CO₂-Emissionen von LKW und Bussen kontinuierlich ansteigen, muss gleichzeitig, zur Erreichung der von der Europäischen Kommission angestrebten Klimaziele, eine signifikante Reduktion der Treibhausgas-Emissionen erfolgen. Ebenso führt die Urbanisierung zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen in Städten, während parallel Lärm- und Schadstoff-Emissionen im urbanen Raum minimiert werden sollen. Aus diesem Spannungsfeld heraus zeichnet sich für einen nachhaltigen Straßengüter- und Personenverkehr zunehmend der Bedarf nach alternativen Antriebskonzepten in Nutzfahrzeugen (NFZ) ab.

Die globalisierte Logistik erfordert eine fortschreitende Flexibilisierung und Geschwindigkeit im europäischen Güterverkehr, was voraussichtlich zu einer weiteren Zunahme des straßengebundenen Verkehrs führen wird.¹ So bilden NFZ heute und auch zukünftig das Rückgrat des europäischen Transportsektors. 2012 wurden etwa drei Viertel des gesamten Frachtaufkommens in der Europäischen Union durch den Straßengüterverkehr bewegt.² Darüber hinaus übernahmen Busse knapp 10 % des europäischen Personen-Binnenverkehrs.³ Die Zunahme des straßengebundenen Verkehrs wird bei konstanter Energieeffizienz des Transportsektors zu einem proportionalen Anstieg von CO₂- und Schadstoff-Emissionen führen.

Gleichzeitig hat sich die Europäische Kommission zum Ziel gesetzt, die Treibhausgas-Emissionen des Transportsektors bis 2050 um 60 % gegenüber 1990 zu reduzieren, um ihren Beitrag zur Reduzierung der Erderwärmung zu leisten.⁴ Derzeit entfernt sich der Transportsektor durch steigende CO₂-Emissionen allerdings immer deutlicher von der Erreichung dieses Zieles⁵, obwohl schon zahlreiche Maßnahmen zur CO₂-Emissionsreduktion von PKW und leichten NFZ

¹ Vgl. Wittenbrink (2011), S. 149–166.

² In Tonnenkilometer vgl. Europäische Kommission (2012).

³ In Personenkilometer vgl. Eurostat (2014).

⁴ Vgl. Europäische Kommission (2011c), S. 5.

⁵ Vgl. Europäische Kommission (2011c), S. 5.

ergriffen wurden. Schwere NFZ⁶ sind bisher in den Aktivitäten der Europäischen Kommission nicht berücksichtigt worden, obwohl LKW und Busse ein Viertel der CO₂-Emissionen des gesamten europäischen Straßentransports verursachen.⁷

Zwar hatte die Vereinigung der Europäischen NFZ-Hersteller (ACEA) schon 2008 eine Selbstverpflichtung zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs neu zugelassener NFZ bis 2020 von 20 % erklärt, die Anstrengungen dazu wurden jedoch seitens der EU-Kommission als nicht ausreichend erachtet. 2012 hat die europäische Kommissarin für Klimapolitik daher angekündigt, eine Strategie zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der damit verbundenen CO₂-Emissionen von schweren NFZ zu erarbeiten.

Hierbei werden insbesondere Maßnahmen wie CO₂-Emissionsgrenzwerte für neu zugelassene LKW und Busse erwartet, welche den Druck auf NFZ-Hersteller zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs weiter erhöhen. Gleichzeitig steigt durch einen zunehmenden Wettbewerbsdruck im Transportsektor auch die Nachfrage seitens Transport- und Verkehrsunternehmen nach Lösungen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von NFZ.⁸ Denn etwa 30 % der Gesamtkosten eines typischen LKW im Fernverkehrseinsatz werden durch die Kraftstoffkosten determiniert.⁹ Darüber hinaus werden CO₂-Emissionen von Transportmitteln zukünftig ein entscheidendes Kaufkriterium in der Logistik- und Transportbranche sein.¹⁰

Die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der damit korrelierenden CO₂-Emissionen von schweren NFZ kann sowohl durch die Optimierung der gesamten Transportkette sowie durch eine Optimierung des individuellen Fahrzeugs im Betrieb erfolgen. Im Fokus der anstehenden EU-Gesetzgebung steht im Wesentlichen die Optimierung des individuellen Fahrzeugs. Hierfür kommen Technologien in Frage, welche durch die Optimierung des Gesamtfahrzeugs, die Optimierung des Antriebsstrangs sowie durch alternative Antriebe und Kraftstoffe CO₂-Emissionen einsparen.

Insbesondere vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Anwendungsfälle von schweren NFZ nimmt die Vielfalt und Spezifität dieser CO₂-sparenden Technologien zu.¹¹ Der Einsatz von LKW reicht vom Güterfern- und -nahverkehr über den Bauverkehr bis hin zu Sonderanwendungen wie dem städtischen Entsorgungsverkehr. Ebenso werden Busse im innerstädtischen, öffent-

⁶ In dieser Arbeit werden NFZ entsprechend ihres zulässigen Gesamtgewichts klassifiziert. Leichte NFZ sind Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von kleiner 6t, schwere NFZ sind LKW und Busse mit einem zulässigen Gesamtgewicht zwischen 6 und 40t. Eine detaillierte Segmentierung erfolgt in Kapitel 2.13.

⁷ Vgl. *Europäische Kommission* (2014), S. 2.

⁸ Vgl. *Wittenbrink* (2011), S. 2-3;81 und 158-175

⁹ Auf Basis eines 26 t Fernverkehrs-LKW mit 135.000 km Jahresfahrleistung und einem durchschnittlichen Verbrauch von ca. 35 l Diesel pro 100km. Die Gesamtkosten setzen sich aus Anschaffungspreis, Kraftstoffkosten, Personalkosten für Fahrer, Wartungskosten und sonstigen Unterhaltskosten zusammen.

¹⁰ Vgl. *Piecyk und McKinnon* (2010), S. 41; *Wittenbrink* (2011), S. 158–160; *Müller* (2010), S. 39–61.

¹¹ Vgl. *Hill et al.* (2011), S. V.

lichen Nahverkehr bis hin zum Personentransport von privaten Fernreiseunternehmen genutzt. Durch diese unterschiedlichen Anwendungsfälle werden wiederum die spezifischen Anforderungen an CO₂-sparende Technologien determiniert. Gleichzeitig herrscht in Wissenschaft und Praxis Uneinigkeit über das zukünftige technische wie wirtschaftliche Potenzial der Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von NFZ.¹²

Zusätzlich zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen¹³ bewegt derzeit ein weiterer Trend die europäische Logistik, welcher Einfluss auf die Wahl von Antriebstechnologien in NFZ hat. Striktere Vorschriften zur Reduktion von Lärm- und Schadstoff-Emissionen¹⁴ in Städten werden zu einem weiteren Treiber für den Einsatz alternativer Antriebskonzepte. Einerseits führt die Urbanisierung zu einer verstärkten Zunahme des städtischen Verkehrs. Andererseits erhöht die Urbanisierung in Kombination mit der zunehmenden Bedeutung einer gesunden wie nachhaltigen Lebensführung den Bedarf an einer signifikanten Reduktion der negativen gesundheitlichen Folgen des Stadtverkehrs.¹⁵ Daher implementieren in Europa immer mehr Städte Restriktionen für Lärm- und Schadstoff-Emissionen sowie Zufahrtsbeschränkungen für umweltschädliche NFZ. Dieser Trend wird sich zukünftig verschärfen und den Bedarf an lokal emissionsfreien NFZ weiter erhöhen.¹⁶

Zusammenfassend wird es also aufgrund von politischem Druck zu einer Reduktion der Treibhausgas- und Schadstoff-Emissionen im Transportsektor kommen müssen. Dafür stehen aus heutiger Sicht eine Vielzahl an technologischen Maßnahmen zur Verfügung, sodass unter den Akteuren im Markt derzeit eine erhöhte Unsicherheit in Bezug auf das Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz des Transportsektors sowie ihren Handlungsoptionen auf diese Entwicklung herrscht.¹⁷ Um jedoch das zukünftige Einsparpotenzial im Transportsektor zu bestimmen, legislative Maßnahmen zu definieren sowie Entwicklungstätigkeiten zu fokussieren, sind quantifizierende Studien zur zukünftigen Marktdurchdringung innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion notwendig. Bisher wurde hierfür hauptsächlich auf Annahmen, qualitative Expertenschätzungen oder vereinfachte Kosten-Nutzen-Analysen zurückgegriffen.¹⁸ Zwar gibt es zahlrei-

¹² Vgl. Kapitel 2.2.

¹³ Unter Treibhausgasen wird in dieser Arbeit gasförmigen Stoffen definiert, welche von der Erde reflektierte Wärmestrahlung absorbieren und so zur Erderwärmung beitragen. Die wesentlichen globalen Treibhausgase sind CO₂, Methan, Lachgas (N₂O) und FCKW (Fluor- und Fluorchlorkohlenwasserstoffe). Von vorrangiger Bedeutung für den Transportsektor sind die CO₂-Emissionen. Daneben kann Methan aus der Leckage in der Erzeugung und dem Transport von Erdgas sowie dessen unvollständiger Verbrennung emittieren.

¹⁴ Unter Schadstoffen sind in dieser Arbeit umweltbelastende und toxische Bestandteile des Abgases von NFZ verstanden, welche in der Euro-Abgasnorm reguliert werden. Diese sind CO, NO_x, Kohlenwasserstoffe und Dieselpartikel. Vgl. hierzu Kapitel 4.1.1 und Kapitel 6.1.

¹⁵ Vgl. Müller (2010), S. 19; Balderjahn und Peyer (2012); Lindholm (2013), S. 1–5; Souren (2012), S. 136–137; Corsten und Roth (2012), S. 7–9.

¹⁶ Vgl. Lindholm (2013), S. 85–86.

¹⁷ Vgl. den Boer et al. (2013), S. 11.

¹⁸ Vgl. hierzu Kapitel 2.2.

che quantitative Marktprognosen und quantifizierende Studien zur Diffusion alternativer Antriebe für PKW und leichte NFZ.¹⁹ Aufgrund der verschiedenen Marktstrukturen und Rahmenbedingungen können diese Erkenntnisse des PKW-Marktes jedoch nur sehr bedingt auf den Markt für schwere NFZ übertragen werden.

Deshalb besteht in diesem Kontext ein Beitrag dieser Arbeit darin, quantifizierte Szenarien zur Marktdurchdringung CO₂-sparender Technologien in NFZ zu erarbeiten, um Rückschlüsse auf die zukünftigen CO₂-Emissionen des europäischen Transportsektors zu ziehen. Weiterhin sollen die Handlungsoptionen der Akteure und die Einflussfaktoren auf den bevorstehenden Wandel hin zu einem CO₂-neutralen Transport im Straßengüter- und öffentlichen Personenverkehr herausgearbeitet werden.

¹⁹ Vgl. *Al-Alawi und Bradley* (2013); *Shafiei et al.* (2013) und Kapitel 3.3.

„Ich glaube an das Pferd.
Das Automobil ist eine vorübergehende Erscheinung.“

(Kaiser Wilhelm II., 1859/1941)

1.2 Der Dieselmotor als dominantes Design auf dem NFZ-Markt

Die zukünftige Marktdurchdringung CO₂-sparender Antriebstechnologien ist eng mit dem Bezugsrahmen der aktuellen Technologien im NFZ-Markt verbunden. Der konventionelle Dieselantrieb ist mit einem Marktanteil von nahezu 100 %²⁰ die dominierende Antriebstechnologie und damit ein *De-facto-Standard*²¹ auf dem Markt für schwere NFZ. Im Zuge des Wandels hin zu einem energieeffizienten und emissionsarmen Transportsektor werden alternative Antriebskonzepte und andere CO₂-sparende Technologien für NFZ zunehmend an Bedeutung gewinnen und in den Markt diffundieren.²²

Eine ähnliche Konstellation bestand vor 125 Jahren. Damals war das Pferd statt des Dieselmotors die dominante Antriebsform für NFZ. Erstmals begann Ende des 19. Jahrhunderts die Entwicklung von „alternativen“ Antriebskonzepten in NFZ. 1895 entwickelte der badische Erfinder Carl Benz den ersten Omnibus mit einem Verbrennungsmotor.²³ Ein Jahr später brachte der Schwabe Gottlieb Daimler den ersten verbrennungsmotorisch angetriebenen LKW erfolgreich auf den Markt.²⁴ Ebenfalls gab es damals Bestrebungen, batteriebetriebene oder oberleitungsgebundene Elektro-NFZ im Markt zu etablieren. Zusätzlich konkurrierten Anfang des 20. Jahrhunderts neben Diesel, Benzin und elektrischer Energie auch Gas und die Dampfmaschine um die Ablösung des Pferdes als Energiequelle zum Antrieb von Fahrzeugen.²⁵ Das Zitat von Kaiser Wilhelm II. belegt, dass es damals Zweifel an der nachhaltig erfolgreichen Entwicklung des Automobils gab. Zunächst war das Pferd noch günstiger in der Anschaffung, einfacher zu unterhalten und für Käufer wie Nutzer von weitaus höherer Vertrautheit als ein Verbrennungsmotor. Jedoch setzte sich der Dieselmotor, aufgrund einer enormen Verbesserung der Antriebs-eigenschaften sowie mit der damit zusammenhängend entstehenden Zulieferindustrie²⁶ und der sich aufbauenden Infrastruktur, langfristig gegenüber den anderen Antriebsformen durch und wurde so zum *dominanten Design*²⁷ auf dem NFZ-Markt.

²⁰ Vgl. Kapitel 2.1.2.

²¹ Vgl. Definition Kapitel 3.1.2, S. 26.

²² Vgl. *den Boer et al.* (2013), S. 11 und Kapitel 2.2.

²³ Vgl. *Huss und Schenk* (1982), S. 108–110.

²⁴ Vgl. *Daimler AG* (2000), online; *Cole* (1999), S. 11–12; *Davies und Görtz* (2000), S. 17.

²⁵ Vgl. *König* (2010), S. 54–75.

²⁶ Vgl. *Cole* (1999), S. 12.

²⁷ *Dominantes Design* ist ein Begriff des Technologiemanagements und beschreibt die grundlegenden technologischen Eigenschaften ganzer Produktklassen in einem Markt. Vgl. Kapitel 3.1.2, S. 26.

Heute ist der Dieselmotor als dominantes Antriebskonzept durch ein umfangreiches Produktangebot, ein dichtes Netz an Infrastruktur zur Betankung, Wartung und Reparatur sowie eine hohe Akzeptanz der Käufer und Nutzer gekennzeichnet. Dies hängt mit den sogenannten *indirekten externen Netzwerkeffekten* zusammen.²⁸ Je mehr Nutzer ein bestimmtes Produkt adoptieren, desto wahrscheinlicher ist die Entwicklung komplementärer Produkte und des zugehörigen *Ökosystems*²⁹. Dies wiederum erhöht den Nutzen für weitere potentielle neue Kunden und führt so zu einem positiven Regelkreis, welcher die Diffusion von neuen Technologien in einem Markt vorantreibt.

Wie auch vor über 100 Jahren sind es derzeit erneut sogenannte *Lead User*, welche Jahre vor der breiten Käuferschicht die neuen Antriebstechnologien adoptieren. Diese organisationalen³⁰ *Lead User* setzen sich frühzeitig mit den zukünftigen Anforderungen in ihrem Markt auseinander und nutzen deshalb schon heute innovative Antriebskonzepte in NFZ. Diese Gruppe von industriellen und institutionellen Nutzern ist daher essentiell für das Verständnis, wie und aufgrund welcher Faktoren eine Ablösung des konventionellen Dieselmotors als dominantes Antriebskonzept im NFZ-Markt eintreten kann. Jedoch müssen die Bedürfnisse und Anforderungen von *Lead Usern* nicht zwingend denen der Mehrheit am Markt entsprechen.³¹ Daher ist es von entscheidender Bedeutung, die Gesamtheit der organisationalen Adopter mit ihren unterschiedlichen Verhaltensweisen und Kaufkriterien für Antriebstechnologien und anderen CO₂-sparenden Technologien in NFZ zu untersuchen, um Rückschlüsse auf die zukünftige Marktdurchdringung dieser technologischen Innovationen zu ziehen. Für den PKW-Markt als vorwiegenden *Business-to-Customer* (B2C)-Markt existieren hierfür schon zahlreiche Untersuchungen. NFZ als Produkte in einem *Business-to-Business* (B2B)-Markt sind hingegen bisher noch kaum Gegenstand breiter wissenschaftlicher Untersuchungen hinsichtlich des Adoptions- und Kaufverhaltens für alternative Antriebstechnologien gewesen.³²

Zusammenfassend trägt diese Arbeit daher zum Verständnis der Nachfrageseite des NFZ-Marktes bei, indem das organisationale Adoptions- und Kaufverhalten auf dem Markt analysiert

²⁸ Vgl. *Mohr et al.* (2010), S. 19–21.

²⁹ Unter *Ökosystem* wird in diesem Kontext das Umfeld verstanden, in welches eine innovative Technologie eingebettet ist. Es umfasst die komplementäre Infrastruktur zur Nutzung der Innovation sowie das Netzwerk der beeinflussten und beeinflussenden Akteure der Diffusion.

³⁰ Der Begriff *organisational* (aus dem Englischen: *organizational*) ist im Duden nicht definiert. *Industriell* oder *institutionell* würden den Begriffsumfang nur unzureichend beschreiben, da Betreiber von NFZ sowohl industrielle als auch institutionelle Organisationen sind. *Organisatorisch* ist im Duden als „die Organisation von etwas betreffend“ (vgl. *Wissenschaftlicher Rat der Dudenredaktion*) definiert und nicht zutreffend. Daher beschreibt in der folgenden Arbeit *organisational*, „die durch eine industrielle Unternehmung oder öffentliche Institution ausführenden Handlungen und zugehörigen Mitglieder“.

³¹ Vgl. *Hippel* (1986), S. 802.

³² Vgl. hierzu Kapitel 2.2 und Kapitel 3.3.

wird. Weiterhin wird in dieser Arbeit das sogenannte *Henne-Ei-Problem*³³ in der Marktdurchdringung CO₂-sparender Technologien auf dem NFZ-Markt untersucht: Die Entstehung einer breiten Kundennachfrage nach neuen Produkten bedingt sich wechselseitig mit der Entwicklung eben dieser Produkte und des komplementären Ökosystems. Daher werden die Einflussfaktoren und wechselseitigen Abhängigkeiten der Marktdurchdringung CO₂-sparender Technologien auf dem NFZ-Markt analysiert, um den zukünftigen Marktanteil dieser Technologien zu prognostizieren.

1.3 Forschungsfragen

Die vorhergehenden Erläuterungen zeigen, dass aufgrund des bevorstehenden Wandels hin zu einem emissionsarmen Transportsektor eine Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien in NFZ stattfinden muss. Diese Diffusion spielt sich aufgrund des B2B-Marktes in einem organisationalen Kontext ab und ist stark durch die bisher dominierende Antriebstechnologie des Dieselmotors geprägt. Weiterhin wird angenommen, dass der positive Regelkreis in der Entwicklung von Nachfrage, Angebot und des komplementären Ökosystems durch indirekte, externe Netzwerkeffekte eine maßgebliche Rolle für die Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion einnimmt.

Um die Unsicherheit der Akteure am Markt zu reduzieren und deren Handlungsoptionen auf diese Marktdurchdringung zu analysieren, soll in unterschiedlichen Szenarien der zukünftige Marktanteil dieser Technologien in Abhängigkeit der wesentlichen Einflussgrößen prognostiziert werden. Um eine solche Prognose zu erarbeiten, muss im Rahmen dieser Arbeit die folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

Welche Einflussgrößen und Wirkzusammenhänge determinieren die gegenwärtige und zukünftige Marktdurchdringung innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion auf dem NFZ-Markt?

Durch die Beantwortung dieser übergeordneten Forschungsfrage werden entsprechend der aufgezeigten Problemstellung drei weitere wesentliche Fragestellungen diskutiert, um das Verständnis der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt zu erweitern. Dabei wird insbesondere auf die für die einzelnen Akteure wesentlichen Aspekte eingegangen:

Kunden und Ökosystem: *Welche Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion werden sich als dominantes Design auf dem NFZ-Markt etablieren?*

Hersteller: *Welche früh adoptierenden Lead User werden die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien vorantreiben?*

³³ Das *Henne-Ei Problem* beschreibt die nicht aufzulösende Frage nach dem Ursprung einer Kausalkette. Übertragen auf Diffusionsprozesse geht es dabei um die Entstehung von Nachfrage und Angebot eines Produktes.

Politik: *Welches zukünftige CO₂-Reduktionspotenzial ist durch technische Maßnahmen im straßengebundenen Güter- und öffentlichen Personenverkehr realisierbar?*

Aus wissenschaftlicher Sicht ergibt sich durch die Beantwortung der Forschungsfrage und der weiterführenden Fragestellungen ein tieferes Verständnis des organisationalen Adoptions- und Kaufverhaltens auf Automobilmärkten. Weiterhin werden die vielfältigen quantitativen Prognosen und Studien zur Technologiediffusion auf dem Markt für PKW und leichte NFZ um den Markt für schwere NFZ erweitert. Dies ermöglicht es, Rückschlüsse für den gesamten Straßenverkehr zu ziehen. Darüber hinaus werden die wissenschaftlichen, technischen, politischen und unternehmerischen Entwicklungen und Trends auf dem NFZ-Markt analysiert sowie deren systemdynamischen Abhängigkeiten untersucht. Schließlich trägt die Arbeit dazu bei, Handlungsoptionen für die Akteure des NFZ-Marktes zu erarbeiten sowie unternehmerische Chancen für etablierte wie neue Marktteilnehmer im Kontext eines energieeffizienten Transportsystems aufzuzeigen.

1.4 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die formulierte Forschungsfrage führt zu dem Ziel dieser Arbeit, die Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion von NFZ zu prognostizieren und zu analysieren. Hierfür wird zunächst die gegenwärtige Situation innovativer Antriebstechnologien und anderer CO₂-sparender Technologien auf dem NFZ-Markt erhoben. Um darauf aufbauend Erkenntnisse über die zukünftige Marktdurchdringung zu erhalten, wird ein Prognosemodell zur Diffusion dieser Technologien in den NFZ-Markt implementiert. Anhand dieses Prognosemodells werden die drei aufgezeigten Fragestellungen beantwortet. Der zeitliche Rahmen umfasst dabei die kommenden zwei Jahrzehnte. Zur Erreichung des Hauptziels dieser Arbeit werden fünf konzeptionelle Unterziele zur besseren Strukturierung definiert. Entsprechend orientieren sich auch der Aufbau sowie die zugehörigen Kapitel dieser Arbeit an den Unterzielen. Abbildung 1 gibt einen Überblick über den konzeptionellen Aufbau.

Unterziel 1 umfasst die Erarbeitung anwendungsfallspezifischer Technikpakete, welche zukünftig auf dem NFZ-Markt zur CO₂-Reduktion angeboten und in der späteren Prognose berücksichtigt werden. Die Analyse der Nachfrageseite im späteren Prognosemodell ist Gegenstand des **Unterziels 2**. Ziel ist es, das gegenwärtige organisationale Adoptionsverhalten von Lead Usern und der breiten Käuferschicht im NFZ-Markt zu analysieren, ihren Kaufentscheidungsprozess zu beleuchten sowie die Präferenzstruktur in der Auswahlentscheidung für Antriebstechnologien allgemein zu erheben. Als drittes Element zur Erhebung der gegenwärtigen Situation werden in **Unterziel 3** die Einflussfaktoren, Akteure sowie deren Wechselwirkungen auf dem NFZ-Markt analysiert, um die indirekten, externen Netzwerkeffekte in der Prognose der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien zu berücksichtigen. Darauf aufbauend besteht **Unterziel 4** darin, ein quantitatives Prognosemodell zur zukünftigen Marktdurchdringung CO₂-sparender Techno-

logien zu entwickeln, um schließlich **Unterziel 5** mit einer Szenarioanalyse der Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion auf dem deutschen NFZ-Markt zu erreichen.

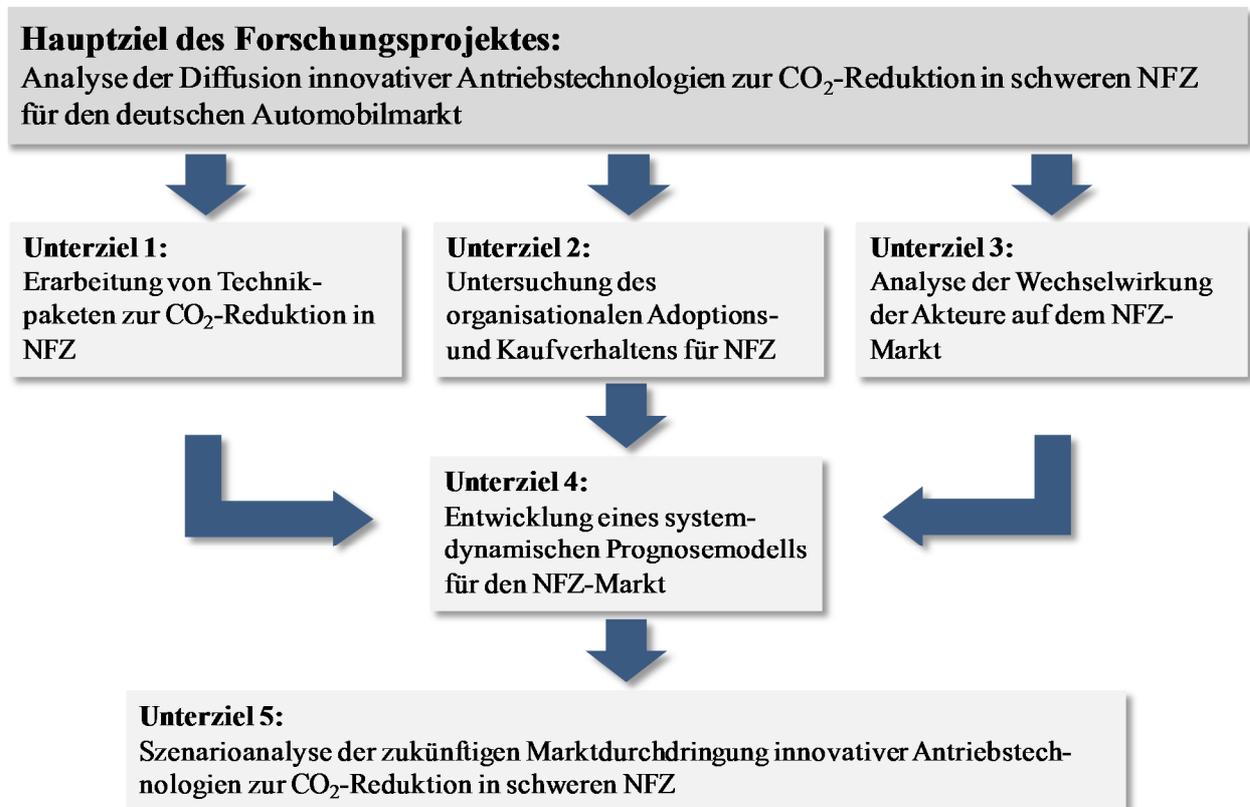


Abbildung 1: Konzeptioneller Aufbau der Arbeit³⁴

Zur Beantwortung der Forschungsfrage und Erreichung der konzeptionellen Unterziele ist die Arbeit daher anhand der folgenden Kapitel aufgebaut. Die Kapitel 4 bis 8 stellen dabei eigenständige Arbeitspakete zur Erreichung der formulierten Unterziele dar.

Kapitel 2 beschreibt den Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit. Daher wird die grundlegende Struktur des NFZ-Marktes erläutert sowie die Anwendung von NFZ im Rahmen der Logistik und des straßengebundenen öffentlichen Personentransports diskutiert. Schließlich erfolgt ein Überblick über den Stand der Forschung zu CO₂-sparenden Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt.

Kapitel 3 legt den theoretischen Bezugsrahmen dieser Arbeit anhand eines technologischen, organisationalen und organisationsexternen Kontextes der Diffusion fest. Dafür wird auf die Besonderheit der Innovationsdiffusion auf einem Markt mit einem bestehenden dominanten Design eingegangen und das organisationale Adoptionsverhalten diskutiert. Darüber hinaus werden Instrumente zur Analyse und Prognose der Technologiediffusion im Allgemeinen und auf dem Automobilmarkt im Besonderen vorgestellt.

³⁴ Eigene Abbildung.

Kapitel 4 untersucht den technologischen Kontext der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt. Dafür erfolgt zunächst ein Überblick über die technologischen Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Darauf aufbauend werden anwendungsfall-spezifische Technikpakete erarbeitet (Unterziel 1) und diese hinsichtlich Kosten, Einsparpotenzial, Nutzen und Reifegrad bewertet.

Kapitel 5 untersucht den organisationalen Kontext der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt (Unterziel 2). Zunächst wird ein theoretisches Variablenmodell zum organisationalen Adoptionsverhalten erarbeitet, und mithilfe einer quantitativen Studie getestet. Darauf aufbauend wird mittels einer Conjoint-Analyse die heutige Präferenzstruktur in der Auswahlentscheidung für Antriebstechnologien von NFZ-Kunden erhoben.

Kapitel 6 untersucht den organisationsexternen Kontext der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt (Unterziel 3). Die wesentlichen Akteure der Problemstellung werden mittels einer Stakeholderanalyse identifiziert. Die Positionen, das Entscheidungsverhalten und die Einflussmöglichkeiten der Akteure werden in qualitativen, Leitfadengestützten Interviews erhoben und schließlich mittels einer systemdynamischen Kodierung für die Erstellung des Prognosemodells ausgewertet.

Kapitel 7 vereint die gewonnenen empirischen Erkenntnisse der vorherigen Kapitel zur Entwicklung eines systemdynamischen Prognosemodells (Unterziel 4). Auf Basis von validierten Prognosemodellen auf dem PKW-Markt werden zunächst die Systemarchetypen der Technologiediffusion auf Automobilmärkten herausgearbeitet und um die empirischen Erkenntnisse des NFZ-Marktes erweitert. Schließlich erfolgt eine kritische Diskussion der Validität des Prognosemodells.

Kapitel 8 analysiert mithilfe des Prognosemodells die Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion von NFZ. Hierfür werden fünf konsistente Szenarien der zukünftigen Marktentwicklung in Deutschland beschrieben und anhand des Prognosemodells simuliert. Schließlich werden auf Basis der Szenarioanalyse die drei leitenden Fragestellungen abschließend beantwortet (Unterziel 5).

Kapitel 9 fasst die gewonnenen Erkenntnisse der Arbeit zusammen und diskutiert die Limitationen dieser Arbeit kritisch. Dabei wird der weitere Forschungsbedarf im Umfeld der Diffusion alternativer Antriebstechnologien in den NFZ-Markt aufgezeigt. Zuletzt wird auf die Implikationen für Entscheidungsträger in Wirtschaft und Politik eingegangen.

“Everything that can be invented has been invented.“

Charles Duell, US Patentamt, 1899

Kapitel 2

Untersuchungsgegenstand

Um für die weitere Arbeit ein grundlegendes Verständnis des Untersuchungsobjektes *innovative Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion in NFZ* zu legen, gibt Kapitel 2 einen Überblick über den NFZ-Markt, dessen Struktur und die Anwendung von NFZ im Rahmen des Transportsektors. Darüber hinaus wird der Stand der Forschung zum Untersuchungsobjekt dargelegt und anhand dessen der weitere Forschungsbedarf verdeutlicht.

2.1 Untersuchungsrahmen: Die NFZ-Branche

NFZ sind Kraftfahrzeuge, welche „nach ihrer Bauart und Einrichtung zur Beförderung von Personen, zum Transport von Gütern und/oder zum Ziehen von Anhängfahrzeugen bestimmt sind“³⁵. Daher wird der Großteil an NFZ kommerziell genutzt. Der NFZ-Markt unterliegt somit dem Rahmen und Eigenschaften eines Industriegütermarktes. Organisationen oder Personen, welche in NFZ investieren, sind wiederum Unternehmungen, die diese Fahrzeuge als Produktionsfaktoren nutzen, um Produkte oder Dienstleistungen für ihre Kunden auf anderen Märkten anzubieten.

2.1.1 Wirtschaftliche Bedeutung

Der Güterverkehr ist die bedeutendste Anwendung für NFZ, da im Bezug auf transportierte Tonnenkilometer etwa drei Viertel des gesamten Frachtaufkommens der Europäischen Union durch straßengebundene NFZ bewegt werden. Dieser Anteil von 73 % hat sich in den vergangenen 20 Jahren gegenüber dem schienengebundenen Verkehrsträgern (17 %) und der Binnenschifffahrt (11 %) um 15 % erhöht. Mengenmäßig wird bis 2030 eine weitere Zunahme des innereuropäischen Straßengüterverkehrs prognostiziert (vgl. Abbildung 2).

Ein Grund für den hohen Anteil des Straßengüterverkehrs am Transportaufkommen liegt insbesondere darin, dass ein Großteil der Güter gewichtsbezogen auf vergleichsweise kurzen Strecken transportiert wird. Daher werden in vielen Anwendungsfällen andere Verkehrsträger auch lang-

³⁵ Vgl. *Kraftfahrt-Bundesamt* (2014), S. 7.

fristig den straßengebundenen Verkehr nicht vollständig substituieren können.³⁶ Dies unterstreicht die gesamtwirtschaftliche Bedeutung des Straßengüterverkehrs in den kommenden Jahrzehnten.

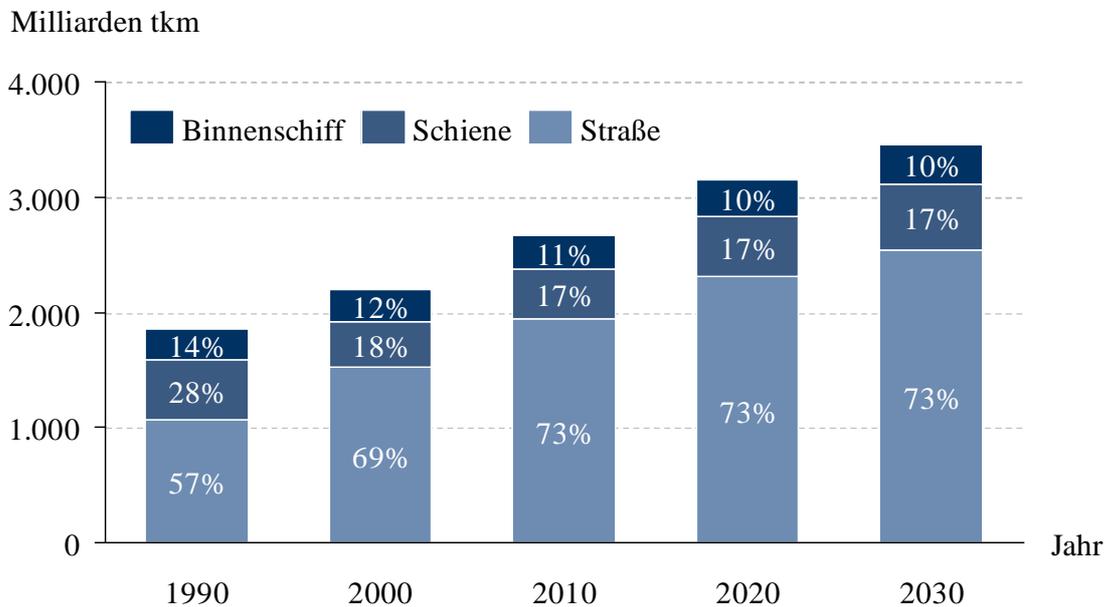


Abbildung 2: Transportaufkommen nach Verkehrsträger EU27³⁷

2012 wurden in Europa etwa 360.000 mittlere und schwere NFZ neu zugelassen. Hierbei entfielen auf den westeuropäischen Markt (EU 15³⁸) knapp 81 % der Neuzulassungen, wobei der deutsche Markt den größten Absatzmarkt (etwa 100.000 Fahrzeuge) darstellt, gefolgt vom britischen und französischen Markt.³⁹ Die Neuzulassungszahlen belegen die Bedeutung des westeuropäischen Marktes für die Erstverwendung. Der osteuropäische NFZ-Markt spielt hingegen für Gebrauchtfahrzeuge aus Westeuropa eine große Rolle. So werden aus Deutschland rund 40 % der gebrauchten Sattelzugmaschinen und knapp 61 % der sonstigen gebrauchten NFZ in osteuropäische Länder, inklusive Russland und der Ukraine, ausgeführt.⁴⁰

Die schwere NFZ-Industrie in Europa ist vorwiegend durch sechs große Marken gekennzeichnet: Mercedes-Benz, MAN, Scania, Volvo, DAF und Iveco. Darüber hinaus gibt es noch kleinere Bushersteller, Spezialfahrzeughersteller sowie kleine osteuropäische Anbieter. Der Import von NFZ spielt in Europa unter den Neuzulassungen keine Rolle. In den vergangenen Jahren hat unter den weltweiten NFZ-Herstellern eine Konsolidierung stattgefunden. Die global agierenden

³⁶ Vgl. Storey (2007), S. 20.

³⁷ Eigene Abbildung, vgl. Daten Europäische Kommission (2010), S. 125.

³⁸ EU 15 umfasst alle Mitgliedstaaten der Europäischen Union vor der sogenannten Ost-Erweiterung im Jahr 2004. Das sind Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Italien, Irland, Luxemburg, Niederlande, Österreich, Portugal, Schweden und Spanien.

³⁹ Vgl. IHS Automotive, Medium- and Heavy-duty Vehicle Forecasts für das Jahr 2012.

⁴⁰ Vgl. Fritz et al. (2013), S. 51.

Unternehmen Daimler (Mercedes-Benz, Freightliner, Fuso, Bharat Benz, Setra, Evobus, Thomas Built Buses, Western Star), Paccar (DAF, Peterbilt, Kenworth), VW (VW, MAN, Neoplan, Scania), Volvo (Volvo, Renault, Mack) und Toyota beherrschen mit ihren Marken sowie den aufstrebenden asiatischen Herstellern (Dongfeng, FAW, Tata, BAIC, etc.) den weltweiten NFZ-Markt.⁴¹

2.1.2 Struktur des NFZ-Marktes

Eine gängige Klassifizierung von NFZ erfolgt auf Basis des zulässigen Gesamtgewichts (zGG) von NFZ und unterscheidet drei wesentliche Segmente:

- Leichte NFZ (LD) zGG von 3,5t bis 6t
- Mittelschwere NFZ (MD) zGG von 6t bis 16t
- Schwere NFZ (HD) zGG von 16t bis 40t

Jede dieser drei unterschiedlichen Fahrzeugklassen weist gewisse Vor- und Nachteile in bestimmten gewerblichen Anwendungen auf. Darüber hinaus können aus technischer und produkt-spezifischer Sicht, leichte NFZ nicht vollumfänglich mit mittelschweren und schweren LKW oder Bussen verglichen werden. Leichte LKW umfassen insbesondere Modelle wie den Mercedes Sprinter, VW Crafter oder Iveco Daily und bauen meist auf leicht modifizierte und aus PKW stammenden Komponenten auf. Zudem gelten für leichte NFZ andere gesetzliche Bestimmungen.⁴² Der Fokus dieser Arbeit liegt auf mittelschweren und schweren NFZ.⁴³

Die Klassifizierung von NFZ kann weiter spezifiziert werden, indem die jeweiligen Transportaufgaben berücksichtigt werden, welche sich durch den Einsatz in unterschiedlichen Branchen ergeben. Kriterien der Klassifizierung nach Anwendungsfällen sind dabei einerseits das zulässige Gesamtgewicht und die damit zusammenhängende Nutzlast der Fahrzeuge sowie andererseits der Einsatz zum Transport von Gütern oder Personen. Ferner unterscheiden sich diese Anwendungsfälle durch die Branchenzugehörigkeit der betreibenden Organisation. Hierdurch bedingen sich insbesondere die typischen Fahrzyklen (Anteil Fernverkehr, Regionalverkehr und Stadtverkehr) und jährlichen Fahrleistungen. Auf Basis dieser Klassifizierung resultieren sieben grundsätzliche Anwendungsfälle für mittelschwere und schwere NFZ vom Fernverkehr bis zum Stadtbus (vgl. Abbildung 3).

⁴¹ Vgl. VDA (2014), S. 76–77.

⁴² Vgl. Dressler et al. (2012), S. 80; Kelp und Stolz (2011), S. 12.

⁴³ Im Folgenden werden unter NFZ daher nur die mittelschweren und schweren Fahrzeuge (6 t bis 40 t) verstanden.

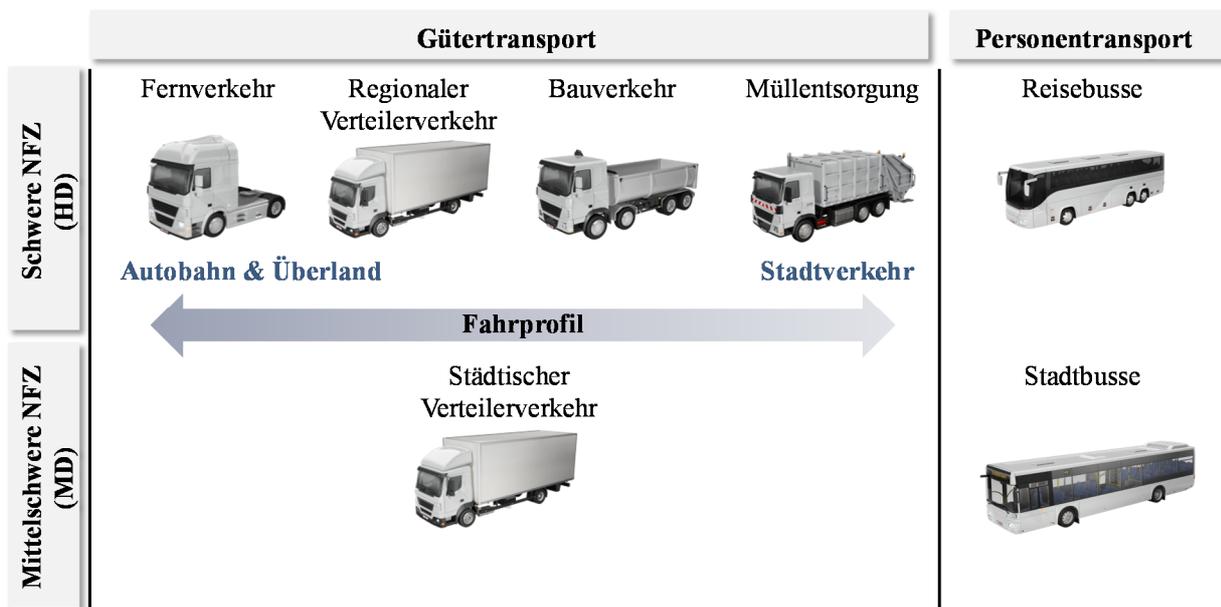


Abbildung 3: Klassifizierung von NFZ nach deren Anwendungsfall⁴⁴

Die Klassifizierung nach Anwendungsfällen wird von der Europäischen Kommission in der Verfolgung der zukünftigen CO₂-Gesetzgebung sowie seitens des Verbands der europäischen NFZ-Hersteller verwendet.⁴⁵ Die Zuordnung neu zugelassener Fahrzeuge auf diese Segmente ist in der Praxis nicht immer überschneidungsfrei möglich. Einerseits kommt es zu einer Mischnutzung von Fahrzeugen, andererseits ist die Vielfalt an möglichen Einsatzzwecken und damit auch an Aufbauarten der Fahrzeuge enorm. Die Statistik des deutschen Kraftfahrzeugbundesamtes unterscheidet alleine für Lastkraftwagen 18 verschiedene Aufbauarten zusätzlich zu den Sonderfahrzeugen wie Kranwagen, Feuerwehr-, Militär-, oder Betonpumpfahrzeugen.⁴⁶ Dies verdeutlicht die vielfältigen Anwendungsgebiete schwerer und mittelschwerer NFZ. Allerdings existieren für diese Klassifizierung keine verlässlichen Zulassungsstatistiken oder Spezifikationen, weshalb für ein einheitliches Verständnis in der weiteren Arbeit, die Anwendungsfälle auf Basis bestehender Informationen definiert und deren Marktanteil berechnet werden. Abbildung 4 zeigt diese Spezifikationen.

Dennoch lässt sich über Zuordnung der Neuzulassungszahlen von NFZ-Modellen (6 t bis 40 t) zu den Anwendungsfällen eine erste Abschätzung zur aktuellen Marktdurchdringung alternativer Antriebstechnologien erarbeiten. Hierzu wird die Neuzulassungsdatenbank von IHS Polk⁴⁷ herangezogen und die alternativen Hauptantriebsformen Erdgas- (NG), Hybrid- (HEV) und Elektrofahrzeug (EV) aller Neuzulassungen pro Anwendungsfall für das Jahr 2013 analysiert.

⁴⁴ Eigene Abbildung. Die Fahrzeugabbildungen werden mit freundlicher Genehmigung der Robert Bosch GmbH verwendet.

⁴⁵ Vgl. beispielsweise Hill et al. (2011), S. 158–162; Luz et al. (2014); ACEA (2010).

⁴⁶ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2012), S. 62–68.

⁴⁷ Siehe www.polk.com. Es ist dabei zu beachten, dass einige Neuzulassungen nicht korrekt zu den Antriebstechnologien zugeordnet werden und als *undefiniert* im Datensatz gelistet sind.

Anwendungsfall		Güterverkehr / LKW					Personenverkehr	
		Fernverkehr	Verteiler Städtisch	Verteiler Regional	Bauverkehr	Abfallsammlung	Stadtbus	Reisebus
Aufbau								
Kaufpreis	T€	100	65	90	145	190	250	350
Kraftstoffverbrauch	l/100 km	34,5	16,5	25,0	40,0	70,0	50,0	32,0
CO ₂ -Emissionen	g/km	800	522	663	905	1.624	1.160	719
Reichweite	km/Tank	1.200	700	1.000	700	300	500	1.500
Leistung	kW	350	175	300	330	220	220	315
Tankvolumen	l	400	120	280	280	200	280	490
Jährliche Laufleistung	Tkm	135	40	55	40	25	55	80
Erstverwendungsdauer	Jahre	5	8	8	9	10	13	7
Anteil an Neuzulassungen		42%	22%	20%	12%	4%	60%	40%

Abbildung 4: Spezifikation von NFZ-Anwendungsfällen und deren Anteil an Neuzulassungen⁴⁸

Abbildung 5 zeigt, dass im Anwendungsfall Stadtbus absolut die meisten NFZ mit alternativen Antrieben 2013 in Deutschland neu zugelassen worden sind. Ebenso ist im Abfallsammelverkehr (Entsorgung) im Verhältnis zu den Gesamtneuzulassungen die Marktdurchdringung relativ betrachtet höher als im Stadtbus. Bei etwa 1000 neu zugelassenen Abfallsammelfahrzeugen in Deutschland entspricht dies einem Marktanteil von 2,6 %. Im Gegensatz zu den städtischen Anwendungsfällen mit geringen täglichen Laufleistungen wurde 2013 kein NFZ mit alternativem Antrieb im Güter- und Personenfernverkehr zugelassen. Des Weiteren entfallen 74 % der Neuzulassungen mit alternativen Antriebstechnologien auf Gas-betriebene Fahrzeuge, rein elektrisch betriebene NFZ spielen bisher eine sehr untergeordnete Rolle.

⁴⁸ Eigene Abbildung auf Basis eigener Recherche sowie in Anlehnung an Hill et al. (2011).

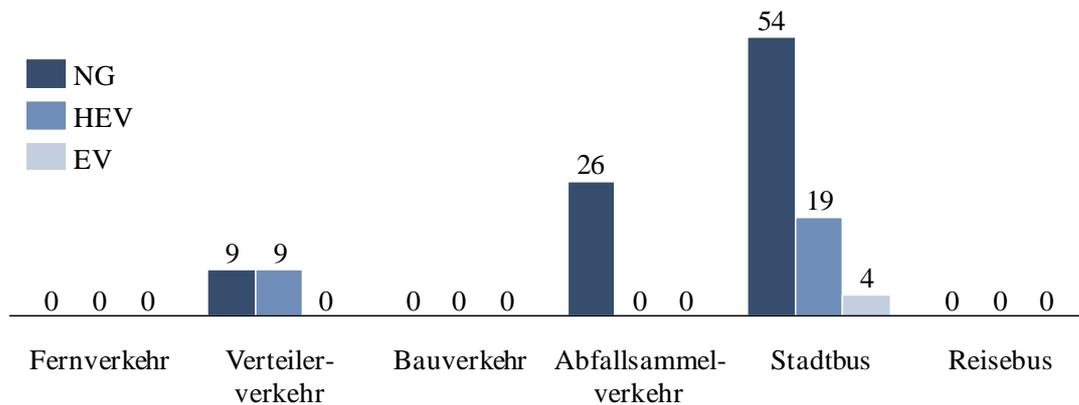


Abbildung 5: Neuzulassungen alternativer Antriebe in Deutschland 2013⁴⁹

2.2 Stand der Forschung zu CO₂-sparenden Technologien in NFZ⁵⁰

Im Gegensatz zum PKW-Markt ist der wissenschaftliche Diskurs bezogen auf den NFZ-Markt, trotz seiner volkswirtschaftlichen Bedeutung und des signifikanten ökologischen Fußabdrucks, vergleichsweise gering. Die zukünftige Marktdurchdringung CO₂-sparender Antriebstechnologien ist darüber hinaus bisher in noch viel geringerem Ausmaß Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen gewesen. Ein Großteil an Studien für den europäischen NFZ-Markt und zu CO₂-sparenden Technologien erfolgte durch Forschungsgesellschaften und Technologieberatungsunternehmen im Auftrag der Europäischen Kommission. Daher wird im Folgenden der Stand der Forschung zum Untersuchungsobjekt, unter Einbeziehung aller verfügbaren Veröffentlichungen, dargestellt und die für die Problemstellungen wesentlichen Erkenntnisse diskutiert.

Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen neu zugelassener PKW sind seit dem Jahr 2000 um knapp 23 % gesunken.⁵¹ Bis 2021 hat die Europäische Kommission einen Emissionsgrenzwert von maximal 95 g CO₂/km für PKW festgelegt, was einem gesamten Reduktionspotenzial von knapp 45 % gegenüber 2000 entspricht. Im Gegensatz dazu haben sich die durchschnittlichen CO₂-Emissionen von LKW im Fernverkehr in dieser Periode kaum verändert. Ein wesentlicher Grund dafür ist die stufenweise Einführung der Euro-Abgasnormen zur Reduktion der Schadstoff-Emissionen (Feinstaubpartikel, Stickoxide NO_x, Kohlenstoffmonoxid CO und Kohlenwasserstoffverbindungen) von LKW. Die Erfüllung der Euro-Abgasnormen erfordert den Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen, welche technologisch bedingt zu einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs führen.⁵² 2014 wurde die aktuell letzte Schadstoff-Emissionsklasse Euro 6 für alle neu zugelassenen LKW und Busse mit einem zulässigen Gesamtgewicht von über 3,5 t

⁴⁹ Eigene Abbildung mit Daten der Neuzulassungsdatenbank IHS Polk 2014.

⁵⁰ Dieser Abschnitt basiert überwiegend auf einem veröffentlichten Arbeitsbericht: *Seitz* (2014), S. 7–9.

⁵¹ Vgl. *European Environment Agency* (2013).

⁵² Vgl. *Zeitzen* (2012a), S. 26–30; *FHWA* (2012); *ACEA* (2010), S. 8; *Lenz et al.* (2010), S. 24–29.

verpflichtend eingeführt. Der Fokus der Gesetzgebung verschiebt sich infolgedessen auf die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und den damit direkt korrelierenden CO₂-Emissionen von schweren NFZ.⁵³

Grundsätzlich existieren mehrere Möglichkeiten zur Reduktion der Treibhausgase im Straßengüter- und Personenverkehr: Diese umfassen die Optimierung der gesamten Transportkette, die Verschiebung des Modalsplits hin zu CO₂-ärmeren Verkehrsträgern, den Einsatz CO₂-sparender Technologien oder die Optimierung des Fahrbetriebs. Zahlreiche Studien diskutieren das Reduktionspotenzial aus der Optimierung der Transportkette⁵⁴ und durch die Veränderung des Modalsplits.⁵⁵ Die technischen Maßnahmen können darüber hinaus in die Erhöhung des thermischen Wirkungsgrads konventioneller Verbrennungsmotoren, den Einsatz effizienzsteigernder Technologien in der Motorperipherie, den Einsatz von Technologien zur Reduktion des Roll- und Luftwiderstands des Gesamtfahrzeugs sowie die Nutzung alternativer Energiequellen als Substitut zu Diesel unterteilt werden.⁵⁶ Aufgrund des Fokus der Arbeit werden im Folgenden ausschließlich Veröffentlichungen betrachtet, welche entweder den NFZ-Markt in seiner Gesamtheit betrachten oder sich mit dem Einsatz und Potenzial CO₂-sparender Technologien beschäftigen.

Die 2010 veröffentlichte *Shell LKW Studie* hatte das Ziel, den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs bis 2030 abzuschätzen. Dafür erfolgte zunächst eine Einordnung der Industrie in den gesamtwirtschaftlichen und verkehrlichen Kontext. Darauf aufbauend wurden Trends und Strukturen des Marktes sowie das Potenzial heutiger und zukünftig verfügbarer Technologien für NFZ mit Fokus auf die Senkung der CO₂-Emissionen diskutiert. In der Szenarioanalyse wurden technischen Maßnahmen zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs von schweren NFZ gesamthaft ein Potenzial zwischen 16 % und 21 % bis 2030 zugeschrieben. Hierbei resultierten etwa 10 % aus Effizienzsteigerungen an Verbrennungsmotor und Getriebe, 2 % bis 5 % aus der elektrischen Hybridisierung und 5 % bis 10 % aus der Reduktion des Roll- und Luftwiderstands des Gesamtfahrzeugs. Auf die Marktanteile oder Marktdurchdringung dieser Maßnahmen wurde in der Studie nicht eingegangen.⁵⁷

Im Auftrag der Europäischen Kommission erstellte die Energieberatungsagentur AEA 2011 eine Studie zur Evaluierung technologischer und politischer Maßnahmen zur CO₂-Emissionsreduktion schwerer NFZ. Auf Basis einer ausführlichen Evaluierung der potentiell zukünftig verfügbaren Technologien, wurde eine Szenarioanalyse durchgeführt. Das zukünftige Reduktionspotenzial wurde dabei aus der erwarteten Amortisationsdauer der unterschiedlichen technologischen Maßnahmen sowie aus dem Einfluss politischer Direktiven abgeleitet. Das

⁵³ Chemisch ist in einem Liter Diesel durchschnittlich immer die gleiche Menge an Kohlenstoffatomen gebunden. Durch die Umwandlung des Diesels im Verbrennungsmotor zu thermischer Energie oxidieren daher diese C-Atome immer zu rund 2,65 kg Kohlenstoffdioxid.

⁵⁴ Vgl. zum Beispiel *Noland und Wadud* (2009); *Léonardi und Baumgartner* (2004).

⁵⁵ Vgl. zum Beispiel *Ballis und Golias* (2002).

⁵⁶ Vgl. *Hill et al.* (2011), S. 121–148 oder *Law et al.* (2011), S. 16–17.

⁵⁷ Vgl. *Lenz et al.* (2010).

Ergebnis zeigt, dass die Amortisationsdauer und das CO₂-Einsparpotenzial der Technologien erheblich vom Einsatzzweck der NFZ abhängen. Eine detaillierte Analyse der Diffusion CO₂-sparender Technologien erfolgte allerdings nicht.⁵⁸

Ebenfalls im Auftrag der Europäischen Kommission hat die Technologieberatung *TIAX* 2011 das Reduktionspotenzial von Treibhausgasemissionen und Gesamtbetriebskosten von schweren NFZ ermittelt. Zunächst wurden für den europäischen und nordamerikanischen NFZ-Markt aktuelle Referenzfahrzeuge für die unterschiedlichen Anwendungsfälle definiert und anschließend eine anwendungsfallsspezifische Kosten-Nutzen-Analyse der technologischen Maßnahmen erarbeitet. Demnach wird insbesondere von Maßnahmen wie der Abgaswärmerückgewinnung, der elektrischen und hydraulischen Hybridisierung sowie alternativen Kraftstoffen das höchste zukünftige Einsparpotenzial ausgehen.⁵⁹

In einer Masterthesis an der KTH Stockholm wurde mittels des Bass-Diffusion-Modells versucht, den zukünftigen Marktanteil von Hybrid-NFZ zu bestimmen. Dafür wurden die Diffusionsparameter anhand der Marktdurchdringung von Stahlgürtelreifen, ABS-Systemen und Scheibenbremsen bestimmt. Die Ergebnisse in den drei unterschiedlichen Szenarien unterscheiden sich nicht wesentlich. Es zeigt sich jedoch, dass es für alternative Antriebe in NFZ schwierig ist, geeignete analoge Absatzzahlen zur Bestimmung der Diffusionsparameter zu finden.⁶⁰

Auf Basis der *AEA* und *TIAX* Studien untersuchte die private Forschungsgesellschaft *CE Delft* 2012 im Auftrag der ICCT⁶¹ die technologischen, institutionellen und finanziellen Barrieren zur Einführung kraftstoffeffizienter Technologien im europäischen Transportsektor. Hierfür wurden Endkunden und Hersteller anhand einer nicht-repräsentativen Befragung hinsichtlich ihrer Anforderungen und Hürden gegenüber diesen Technologien befragt. Als wesentliche Barrieren wurden dabei die mangelnde Zuversicht in das Einsparpotenzial CO₂-sparender Technologien sowie die fehlenden Finanzinstrumente, um in diese Produkte zu investieren, identifiziert.⁶²

Darauf aufbauend evaluierte *CE Delft* in einer weiteren Studie das Potenzial lokal emissionsfreier LKW im Verteiler- und Fernverkehr. Für den Fernverkehr ist demnach die Brennstoffzelle langfristig das vielversprechendste lokal emissionsfreie Antriebskonzept. Mittelfristig wird die Hybridisierung des konventionellen Diesel-Verbrennungsmotors den Wandel zu reinen Elektro-NFZ ebnen. Die Szenarioanalyse hierfür basiert allerdings nicht auf logischen oder quantitativen Modellen, sondern auf qualitativen „what-if“⁶³ Abschätzungen.⁶⁴

⁵⁸ Vgl. *Hill et al.* (2011).

⁵⁹ Vgl. *Law et al.* (2011).

⁶⁰ Vgl. *Brauer* (2011).

⁶¹ Das International Council on Clean Transportation (ICCT) ist unabhängige, gemeinnützige Organisation zu Erreichung eines umweltfreundlichen und nachhaltigen Transportsystems: www.theicct.org

⁶² Vgl. *Aarnink et al.* (2012).

⁶³ Die „What-if“ Analyse (zu Deutsch: was wäre wenn) ist ein Instrument der Szenarioanalyse und dient dem Verständnis zwischen dem Zusammenhang unabhängiger und abhängiger Variablen eines Systems.

Zur weiteren Verfolgung der Strategie zur Einführung von CO₂-Grenzwerten für schwere NFZ wird derzeit durch ein Forschungsverbund aus der *TU Graz*, dem *TÜV Nord* und der niederländischen Forschungsgesellschaft *TNO* ein Simulationstool (VECTO) zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs neuer NFZ in Abhängigkeit von deren Einsatzzweck und Konfiguration entwickelt. Darin werden Testprozeduren für die unterschiedlichen Anwendungsfälle definiert und Einsparpotenziale der Technologien bestimmt.⁶⁵

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Veröffentlichungen der Forschungsgesellschaften und Beratungsunternehmen stark auf die Bestimmung des technologischen Potenzials CO₂-sparender Technologien sowie die Erarbeitung von Treibhausgas-Reduktions-szenarien fokussiert sind. Dabei werden in allen Fällen die zukünftigen Marktanteile CO₂-sparender Technologien anhand einfacher qualitativer Methoden oder anhand von Annahmen abgeschätzt. Quantifizierende Methoden werden dabei nicht angewandt.

Neben den bereits erwähnten Studien existieren weitere wissenschaftliche Arbeiten für den Transportsektor im Allgemeinen und den Straßengüterverkehr im Besonderen. Diese Arbeiten untersuchen insbesondere die derzeitige Situation und Nutzung effizienzsteigernder Technologien in NFZ. Eine Ausnahme bildet hierbei die Arbeit von Tzeng et al. (2005). In einer anwendungsfallspezifischen Analyse mit Fokus auf Stadtbusse wird das Marktpotenzial elf unterschiedlicher alternativer Antriebskonzepte untersucht. Hierzu wird eine multikriterielle Optimierung angewandt, welche nicht nur Kosten und CO₂-Emissionen, sondern auch Kriterien wie Lärm- und Schadstoff-Emissionen, Geschwindigkeit und Komfort auf Basis von Expertenschätzungen berücksichtigt. Allerdings werden diese Kriterien statisch betrachtet. Eine dynamische Veränderung über die Zeit erfolgt nicht. Ebenso werden die Ergebnisse nicht validiert. Das Ergebnis prognostiziert, dass kurz- bis mittelfristig Hybridbusse und langfristig rein elektrische Busse die alternativen Antriebstechnologien mit dem höchsten Markterfolg sein würden.⁶⁶

Unter Berücksichtigung der gesamten Transportkette schätzten Piecyk und McKinnon (2010) die CO₂-Emissionen des britischen Straßengüterverkehrs im Jahre 2020 ab. Dafür wurden Einflussfaktoren auf das zukünftige Transportaufkommen und die daraus abgeleiteten CO₂-Emissionen identifiziert. Durch Gruppendiskussionen mit Experten und einer Delphi-Umfrage wurden drei Szenarien der zukünftigen Entwicklung erstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass heute bereits ca. 50 % der Befragten durch Maßnahmen und Bedenken in Zusammenhang mit dem Klimawandel beeinflusst sind. Dieser Anteil wird bis 2020 auf über 80 % ansteigen. Jedoch sind die Ergebnisse der Delphi-Methode nur eingeschränkt nutzbar, da sich ein uneinheitliches Bild unter den Befragten ergab.⁶⁷

⁶⁴ Vgl. *den Boer et al.* (2013).

⁶⁵ Vgl. *Luz et al.* (2014).

⁶⁶ Vgl. *Tzeng et al.* (2005).

⁶⁷ Vgl. *Piecyk und McKinnon* (2010).

Liimatainen (2014) erstellte eine ähnliche Studie bezogen auf den finnischen Straßengüterverkehr. Unter Verwendung der Delphi-Methode wurde die zukünftige Veränderung von Indikatoren, wie beispielsweise dem Bruttoinlandsprodukt, welche CO₂-Emissionen im Transportwesen determinieren, prognostiziert. Es ergaben sich stark unterschiedliche Ergebnisse, jedoch wurde bis 2030 in allen Szenarien mindestens ein CO₂-Einsparpotenzial des Straßengüterverkehrs in Finnland von 26 % erwartet.⁶⁸

Liimatainen (2013) erhob und verglich die derzeitige Nutzung und Haltung gegenüber energieeffizienter Maßnahmen im Transportsektor in den skandinavischen Ländern mittels eines quantitativen Fragebogens. Es zeigte sich ein relativ einheitliches Bild in den befragten Ländern, dass erwartungsgemäß insbesondere einfache und kostengünstige Maßnahmen heute schon häufig eingesetzt werden.⁶⁹

Schließlich existieren noch zahlreiche Studien verschiedener Managementberatungen, welche sich mit der Gesamtmarktentwicklung, den zukünftigen Marktanteilen von alternativen Antriebstechnologien und derzeitigen Kundenbedürfnissen auf dem NFZ-Markt beschäftigen. Die Inhalte dieser Studien bestätigten die bisher diskutierten Ergebnisse. Zusätzlich wurden Kundenanforderungen gesammelt⁷⁰, zukünftige Herausforderungen für NFZ-Hersteller herausgearbeitet und zukünftige Marktanteile von Technologien abgeschätzt.⁷¹ Jedoch sind die, den Studien zugrunde liegenden, Methoden und Datenerhebungen nicht auf Basis wissenschaftlicher Standards durchgeführt und publiziert worden.⁷²

Zusammenfassend zeigt sich, dass der Schwerpunkt von Studien über den NFZ-Markt auf der Analyse des technologischen Potenzials CO₂-sparender Technologien, den zukünftigen CO₂-Reduktionsszenarien des Transportsektors sowie dem derzeitigen Umgang mit energieeffizienten Maßnahmen und Technologien in dieser Branche liegt. Es erfolgt jedoch auf Basis der heutigen Situation im Transportsektor und der NFZ-Branche keine stringente Prognose und Analyse der zukünftigen Situation sowie der daraus resultierenden Marktdurchdringung CO₂-sparender Technologien in NFZ. Überwiegend wird die zukünftige Marktentwicklung abgeschätzt oder mittels einfacher qualitativer Methoden unter Zuhilfenahme von Expertenwissen prognostiziert. Darüber hinaus erfolgt keine systemische Erfassung der gegenwärtigen Situation. Die überwiegende Anzahl an Arbeiten fokussiert sich auf wenige Teilbereiche aus Sicht von Kunden, Politik oder technologischen Optionen zur CO₂-Reduktion von schweren NFZ. Ebenso wird die Adoption und die Diffusion alternativer Antriebskonzepte und anderer CO₂-sparender Technologien

⁶⁸ Vgl. *Liimatainen et al.* (2014).

⁶⁹ Vgl. *Liimatainen et al.* (2013).

⁷⁰ Vgl. *Becker* (2011); *Dressler et al.* (2012).

⁷¹ Vgl. *Kelp und Stolz* (2011); *Klink et al.* (2010); *VDA* (2014).

⁷² Daher werden diese Ergebnisse in dieser Arbeit nicht explizit genutzt, dienen jedoch als Bestätigung von Ergebnissen oder Bildung von Hypothesen.

nicht auf Basis anerkannter wissenschaftlicher Theorien untersucht, wie dies beispielsweise auf dem PKW-Markt der Fall ist.⁷³

Ziel dieser Arbeit ist es daher, diese Forschungslücke zu schließen und auf Basis eines systemischen Verständnisses der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt, valide Szenarien zur zukünftigen Marktdurchdringung anhand eines quantitativen Prognosemodells zu erarbeiten.

⁷³ Vgl. dazu zum Beispiel *Shafiei et al.* (2013); *Al-Alawi und Bradley* (2013).

„Wenn der Wind des Wandels weht, bauen die einen Mauern,
die anderen Windmühlen“

Chinesisches Sprichwort

Kapitel 3

Theoretischer Rahmen

Um das langfristige Ziel eines möglichst CO₂-neutralen Transports zu realisieren, muss es zu einer Verbreitung von neuen Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt kommen. Dies entspricht einem typischen Diffusionsprozess von Innovationen. Um zu verstehen, welche Faktoren, Beziehungen und Prozesse diesen Vorgang der Marktdurchdringung beeinflussen, werden in diesem Kapitel die theoretischen Grundlagen der Innovationsdiffusion auf Industriegütermärkten erläutert. Des Weiteren werden Instrumente und Methoden diskutiert, um diesen Prozess der Innovationsdiffusion zu analysieren und prognostizieren. Dabei werden die vielfältigen Erkenntnisse in den breit erforschten Domänen der Technologiediffusion auf PKW-Märkten und der organisationalen Innovationsadoption kombiniert, um diese auf die bis dato weitestgehend vernachlässigte Fragestellung der Technologiediffusion auf automobilen Industriegütermärkten zu übertragen.

3.1 Technologiediffusion

Diffusion beschreibt einen Prozess durch welchen sich eine Innovation unter den Mitgliedern eines sozialen Systems, und damit eines Marktes, entlang von Kommunikationskanälen in einem zeitlich bestimmten Rahmen verbreitet.⁷⁴ Der Begriff Innovation ist dabei weit gefasst und umschließt Ideen, Verhaltensweisen und Objekte, welche von den Mitgliedern des Systems als neu angesehen werden. In der vorliegenden Arbeit geht es in diesem Kontext daher um die Akzeptanz und Adoption neuer Technologien zur CO₂-Reduktion in NFZ.

Ein weit verbreitetes generisches Modell zur Erklärung der Adoption von Innovationen ist die *Diffusion of Innovations* (DOI) von Rogers (2003).⁷⁵ In seinem Modell erklärt er die wesentlichen Einflussgrößen der Adoption durch potentielle Kunden. Der relative Vorteil (*relative advantage*) gegenüber anderen Technologien, die Kompatibilität zu aktuellen Verhaltensweisen und Produkten (*compatibility*), die Möglichkeit die Innovation zu testen (*trialability*), die Beobachtbarkeit (*observability*), die Kommunizierbarkeit der Vorteile (*ability to communicate*) und

⁷⁴ Vgl. Rogers (2003), S. 5–6.

⁷⁵ Vgl. Rogers (2003).

eine geringere Komplexität in der Anwendung (*complexity*) erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass eine Innovation schnell adoptiert wird und in den Markt diffundiert.⁷⁶

Der Diffusionsprozess von Innovation in soziale Systeme, respektive im vorliegenden Fall von Technologien in Märkte, beschreibt Rogers mit einer sogenannten *S-Kurve*. Verschiedene Kategorien von Adoptern, also Mitgliedern des sozialen Systems, entscheiden sich sequentiell dafür, eine Innovation zu adoptieren. Zu Beginn eines Diffusionsprozesses adoptiert zunächst nur eine kleine Gruppe von *Innovatoren* eine Innovation. Mit zunehmender Dauer verbreitet sich die Innovation innerhalb des Systems und erhöht damit wiederum die Wahrscheinlichkeit, dass weitere potentielle Adopter von der Innovation erfahren und somit den Prozess erneut beschleunigen. Mit zunehmender Dauer des Diffusionsprozesses sinkt jedoch die Wahrscheinlichkeit neuer Adoptionen, da aufgrund des begrenzten Systems die Masse neuer potentieller Adopter naturgemäß sinkt. Daher flacht die Rate neuer Adoptionen zum Ende eines erfolgreichen Diffusionsprozesses einer Innovation ab und erfährt eine Sättigung. Die maximale Aufnahmefähigkeit eines Marktes ist erreicht und die Innovation wurde von den unterschiedlichen Mitgliedergruppen des Systems adoptiert.

3.1.1 Kategorisierung von Adopter und User

Bedürfnisse und Eigenschaften der verschiedenen Adopter in einem Markt unterscheiden sich deutlich.⁷⁷ Das Verständnis, welche Art von Nutzern eine Technologie zuerst adoptiert und wie sich die Bedürfnisse und Anforderungen an neue Technologien in den Kundenkategorien unterscheiden, ist von zentraler Bedeutung für die Analyse und Prognose der zukünftigen Marktdurchdringung von Technologien.

Nach der DOI-Theorie werden fünf Adopterkategorien unterschieden: Innovatoren (*Innovators*), frühe Adopter (*Early Adopters*), frühe Mehrheit (*Early Majority*), späte Mehrheit (*Late Majority*) und Nachzügler (*Laggards*). Dabei charakterisiert Rogers nicht explizit Unterschiede zwischen organisationalen und individuellen Adoptern. Generell schreibt Rogers frühen Adoptern (*Innovators*, *Early Adopters*, *Early Majority*) zu, dass diese tendenziell besser mit Unsicherheit und einer sich wandelnden Umwelt umgehen können, eine höhere Aufgeschlossenheit gegenüber Neuem haben, offener kommunizieren und eine geringere Preissensitivität aufweisen.

Moore (2006) hat die Adoptions- und Diffusionstheorie von Rogers (2003) aufgegriffen und dabei insbesondere auf die Kluft, das sogenannte *Chasma* (engl. *chasm*), zwischen den Anforderungen und Bedürfnissen des frühen Marktes von Visionären (*Innovators*, *Early Adopters*) und der breiten Masse an pragmatischen Käufern (*Early Majority*, *Late Majority* und *Laggards*) hervorgehoben.⁷⁸ Dieses Chasma im Diffusionsprozess kommt zwischen den *Early Adoptern*

⁷⁶ Vgl. Rogers (2003), S. 221–222; Mohr et al. (2010), S. 236–240.

⁷⁷ Vgl. Rogers (2003), S. 282–285.

⁷⁸ Vgl. Moore (2006).

und der *Early Majority* zustande, weil der frühe Markt mit den ersten Produkten bereits befriedigt ist, während der breite Massenmarkt noch nicht bereit ist, eine neue Technologie zu adoptieren (vgl. Abbildung 6).

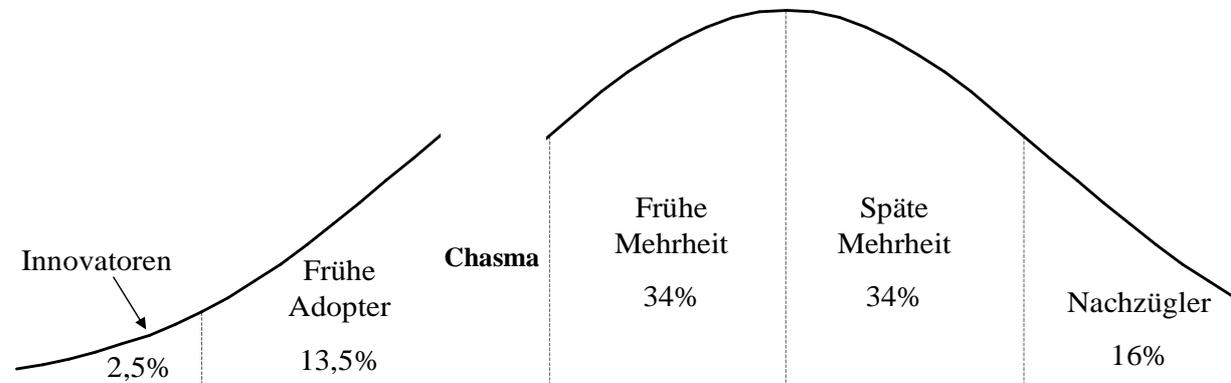


Abbildung 6: Adopterkategorien nach Rogers (2003) und Moore (2006)⁷⁹

Um diesen Einfluss auf die Technologiediffusion zu berücksichtigen, werden im Folgenden die unterschiedlichen Adopter vorgestellt und charakterisiert.⁸⁰

Innovators oder auch *Technology Enthusiasts* sind von der Technik als solche begeistert. Sie legen Wert darauf, neue und radikale Ideen in ihrem Umfeld zu verankern, und dienen darüber hinaus als Ratgeber in ihrem Netzwerk. Diese Gruppe von Adoptern toleriert anfängliche Probleme und Umständlichkeit in der Nutzung neu in den Markt eingeführter Produkte und bringt sich zudem motiviert in die Problemlösung mit ein.

Early Adopter sind die eigentlichen Visionäre im Markt. Neue Technologien werden von dieser Gruppe adoptiert, um mit einem revolutionären Durchbruch einen Wettbewerbsvorteil im Markt zu erreichen. Dabei ist diese Gruppe kaum preissensitiv, geht hohe Risiken ein und tauscht sich unternehmens- sowie industrieübergreifend aus. Diese Adopterkategorie legt besonderen Wert auf die Erfüllung ihrer spezifischen Bedürfnisse und erwartet dabei schnelle und kompetente Beratung sowie Service.

Early Majority oder auch *Pragmatists* sind generell bestrebt, das Risiko bei der Adoption neuer Technologien zu reduzieren. Diese Gruppe ist weniger an revolutionären Ideen und Technologien, als vielmehr an der evolutionären Weiterentwicklung zur Produktivitätssteigerung ihrer Unternehmen interessiert. Daher ist diese Gruppe im Gegenzug bestrebt, negative Einflüsse auf ihren Geschäftsbetrieb zu minimieren, und erwartet somit erprobte Konzepte, einen zuverlässigen Service und verlässliche Ergebnisse.

⁷⁹ Eigene Abbildung in Anlehnung an Moore (2006), S. 17; Rogers (2003), S. 281.

⁸⁰ Die folgenden Erläuterungen zu den Adopterkategorien erfolgen in Anlehnung an Moore (2006), S. 30–55; Mohr et al. (2010), S. 239–242.

Late Majority oder *Conservatives* umfasst risikoaverse und wenig technologieaffine Adopter, welche sehr preissensitiv sind und vollkommen zuverlässige Komplettlösungen erwarten. Sie werden eher zur Adoption neuer Technologien getrieben, um mit dem Wettbewerb Schritt halten zu können.

Laggards oder auch *Skeptics* versuchen vorrangig, den Status Quo zu erhalten. Neuen Technologien wird grundsätzlich nicht zugeschrieben, die Produktivität ihrer eigenen Unternehmung zu verbessern. Deshalb werden dahingehende Neuanschaffungen zu verhindern versucht, bis wirklich alle anderen Optionen gegenüber der Innovation überzeugend schlechter sind. Dies ist besonders durch die tiefe Zufriedenheit der *Laggards* mit der aktuellen Technologie sowie der Befürchtung einer zeitaufwendigen Umstellung auf die neue Technologie begründet.

Über die Adopterkategorien nach Rogers (2003) und Moore (2006) hinaus gibt es ein weiteres Konzept zur Kategorisierung von Adoptern neuer Technologien: die Abgrenzung sogenannter *Lead User*. *Lead User* sind solche Nutzer, welche zukünftige Bedürfnisse im Markt schon Monate und Jahre vor der breiten Käuferschicht erfahren. Daher profitieren *Lead User* überproportional stark von der Nutzung innovativer Technologien und adoptieren dementsprechend Innovationen weit früher als der restliche Markt. Teilweise treiben *Lead User* Innovationen selbst im Markt voran und entwickeln diese weiter.⁸¹ Somit sind *Lead User* hauptsächlich den Kategorien *Innovators* und *Early Adopters* zuzuordnen.⁸² Allerdings unterscheiden sich die Kategorisierungsansätze insbesondere durch den Segmentierungsansatz. Den Adopterkategorien nach der *DOI* liegt ein verhaltensbasierter Segmentierungsansatz zugrunde, während der *Lead-User*-Ansatz einer psychographische, einstellungsorientierte Segmentierung folgt.⁸³

Das Konzept der *Lead-User*-Integration in der Kommerzialisierung neuer Technologien wird insbesondere in der Marktforschung und im Produktmanagement neuer Innovationen eingesetzt. Es dient dazu, mittels der Bedürfnisse heutiger *Lead User* die zukünftigen Anforderungen des breiten Massenmarkts zu prognostizieren. Allerdings müssen die Bedürfnisse und Anforderungen an neue Technologien von *Lead Usern* nicht denen der breiten Käuferschicht entsprechen.⁸⁴ Dies unterstützt die These des *Chasma* zwischen *Early Adoptern* und dem Massenmarkt. Allerdings soll diese Problematik aufgrund des nach vorwiegend ökonomischen Gesichtspunkten entscheidenden Industriegütermarktes weit weniger stark auftreten als in Konsumgütermärkten, da sich die Evaluierungskriterien früh adoptierender Unternehmen nur marginal von denen des Massenmarktes unterscheiden.⁸⁵

Zusammenfassend sind *Lead User* und *Frühe Adopter* für das Verständnis der Entwicklung und Diffusion neuer Produkte in Phasen des frühen Produktlebenszyklus von entscheidender Bedeu-

⁸¹ Vgl. Hippel (1986), S. 796–797.

⁸² Vgl. Morrison et al. (2004).

⁸³ Vgl. in Anlehnung an Runia (2007), S. 95–111.

⁸⁴ Vgl. Hippel (1986), S. 802.

⁸⁵ Vgl. Hippel (1986), S. 802–803.

tung. Denn diese Gruppe von potentiellen Nutzern sind den Anforderungen in ihrem Markt voraus und daher in einer besseren Position, die Attraktivität dieser neuen Produkte zu bewerten. Gleichzeitig ist eine wesentliche Herausforderung, die Anforderungen von *Lead Users* auf die restlichen Nutzer des Massenmarkts analog zum Phänomen des *Chasmas* zu übertragen, falls Rückschlüsse auf die zukünftige Diffusion innovativer Technologien gezogen werden sollen.

3.1.2 Dominant Design

Anderson und Tushman (1990) beschreiben in ihrem zyklischen Modell des technologischen Wandels den Zusammenhang zwischen der Diffusion neuer Technologien und einem sogenannten *Dominant Design*.⁸⁶ Ein *Dominant Design* einer Produktklasse, ist ein Design, welches eine marktbeherrschende Stellung einnimmt. Damit definiert es für Marktakteure die grundlegenden technologischen Eigenschaften und ist somit ein *De-facto-Standard* auf einem Markt oder in einer Industrie.⁸⁷ Ein *De-facto-Standard* – oder Industriestandard – ist ein Produkt, oder System von Technologien, welches durch hohe Kundenakzeptanz eine marktbeherrschende Stellung erreicht hat und daher „ohne offizielle Normierung ein von den meisten Herstellern eingehaltener technischer Standard“⁸⁸ ist.⁸⁹

Die Entstehung eines dominanten Designs ist dabei direkt mit der Diffusion einer neuen Technologie verknüpft. In der Entwicklungsphase neuer Technologien stehen potentielle Adopter zahlreichen unterschiedlichen Produktkonzepten und Versionen dieser Technologie gegenüber, da die Unternehmen am Markt durch nicht vorhandene industrieweite Standards oder klare Kundenanforderungen mit neuen Materialien, Formen und Systemen experimentieren.⁹⁰ Daher ist die Entscheidung für eine dieser Alternativen zu diesem Zeitpunkt risikoreich. Denn wird eine andere als die gewählte Variante das spätere dominante Design auf dem Markt, entstehen Umstellungs- oder Opportunitätskosten aus entgangenen Vorteilen durch sich einstellende Skalen- und Netzwerkeffekte. Aus diesem Grund wird die Mehrheit der potentiellen Adopter die Entstehung eines Industriestandards abwarten, bis sie in neue Technologien oder Produkte investieren.⁹¹

Entwickelt sich aus der Vielfalt der miteinander konkurrierenden Technologien oder Varianten zunehmend ein Industriestandard, so steigt die Akzeptanz potentieller Adopter für eine Innovation, da sich der einstellende Vorteil gegenüber bestehenden, alten Konzepten erhöhen wird. Insbesondere steigt die *compatibility* und *ability to communicate* des Industriestandards und damit auch dessen Wahrscheinlichkeit von potentiellen Adoptern angenommen zu werden.⁹²

⁸⁶ Vgl. Anderson und Tushman (1990).

⁸⁷ Vgl. Mohr et al. (2010), S. 12 und S. 12-24.

⁸⁸ Vgl. Scholze-Stubenrecht (2013).

⁸⁹ Vgl. Mohr et al. (2010), S. 21.

⁹⁰ Vgl. Utterback (1996), S. 23–32.

⁹¹ Vgl. Anderson und Tushman (1990), S. 614–615.

⁹² Vgl. Mohr et al. (2010), S. 21.

Gleichzeitig beginnt die Entwicklung der sogenannten direkten und indirekten externen Netzwerkeffekte. Netzwerkeffekte entstehen, wenn sich der Wert eines Produktes oder einer Technologie mit der zunehmenden Anzahl an Adoptern erhöht. *Direkte externe Netzwerkeffekte* treten auf, wenn der Nutzen einer Technologie direkt mit der Anzahl anderer Nutzer dieser Technologie zusammenhängt. Klassische Beispiele dafür sind Telefone oder soziale Netzwerke.⁹³ Eine zunehmende Nutzeranzahl führt somit zu einem steigenden Nutzen, welcher wiederum zu einer höheren Attraktivität der neuen Technologie führt. So entsteht ein positiver Regelkreis, welcher die Diffusion einer Innovation vorantreibt.

Indirekte externe Netzwerkeffekte sind das Ergebnis der Entwicklung komplementärer Technologien oder Services. Mit zunehmender Anzahl an Adoptern steigt der Bestand einer Technologie im Markt, was die Entwicklung komplementärer Güter attraktiver macht. Dies hat wiederum einen positiven Einfluss auf den wahrgenommenen Nutzen potentieller Adopter und führt dadurch ebenso zu einem positiven Regelkreis, welcher von sich bildenden Industriestandards ausgehen kann. Dieses Phänomen kann auch zum sogenannten *Henne-Ei-Problem* führen, in welchem Nutzer eine Technologieplattform nicht adoptieren, falls komplementäre Produkte und Services nicht verfügbar sind. Jedoch werden auch die Hersteller dieser Komplementärprodukte bei einer zu geringen Nachfrage keine Entwicklungstätigkeiten starten. Für Anderson und Tushman (1990) ist daher die Entstehung von Industriestandards die wesentliche Voraussetzung für eine breite Adoption durch Nutzer und die damit zusammenhängende Massenproduktion einer neuen Technologiegeneration.⁹⁴ Abbildung 7 fasst den positiven Regelkreis aus externen Netzwerkeffekten zusammen.

Der Netzwerkeffekt kann sich jedoch auch nachteilig auswirken. Dieses Phänomen wird *Pfadabhängigkeit* genannt und beschreibt, warum es zu suboptimalen Konstellationen auf Märkten kommt, in denen es vermeintlich rentabler ist, ein dominantes Design in Form ineffizienter Produkte oder Marktstrukturen weiterzuentwickeln, anstatt dieses abzuschaffen. Dynamische und statische Skaleneffekte, direkte und indirekte externe Netzwerkeffekte sowie kollektives Lernen und Eigendynamik führen zur pfadabhängigen Weiterentwicklung unrentabler Systeme.⁹⁵ Schewe und Liesenkötter (2014) haben das Phänomen der Pfadabhängigkeit für die Automobilindustrie am Beispiel der Elektromobilität in Bezug auf PKW dargestellt. Insbesondere führen starke produzentenseitige Lern- und Erfahrungseffekte, und somit signifikante Kostenvorteile, sowie die direkten und indirekten Netzwerkexternalitäten der Infrastruktur für Betankung, Wartung und Reparatur zu der andauernden Weiterentwicklung konventioneller Verbrennungsmotoren.⁹⁶

⁹³ Vgl. *Mohr et al.* (2010), S. 19.

⁹⁴ Vgl. *Anderson und Tushman* (1990), S. 615.

⁹⁵ Vgl. *Schewe und Liesenkötter* (2014).

⁹⁶ Vgl. *Schewe und Liesenkötter* (2014), S. 30.

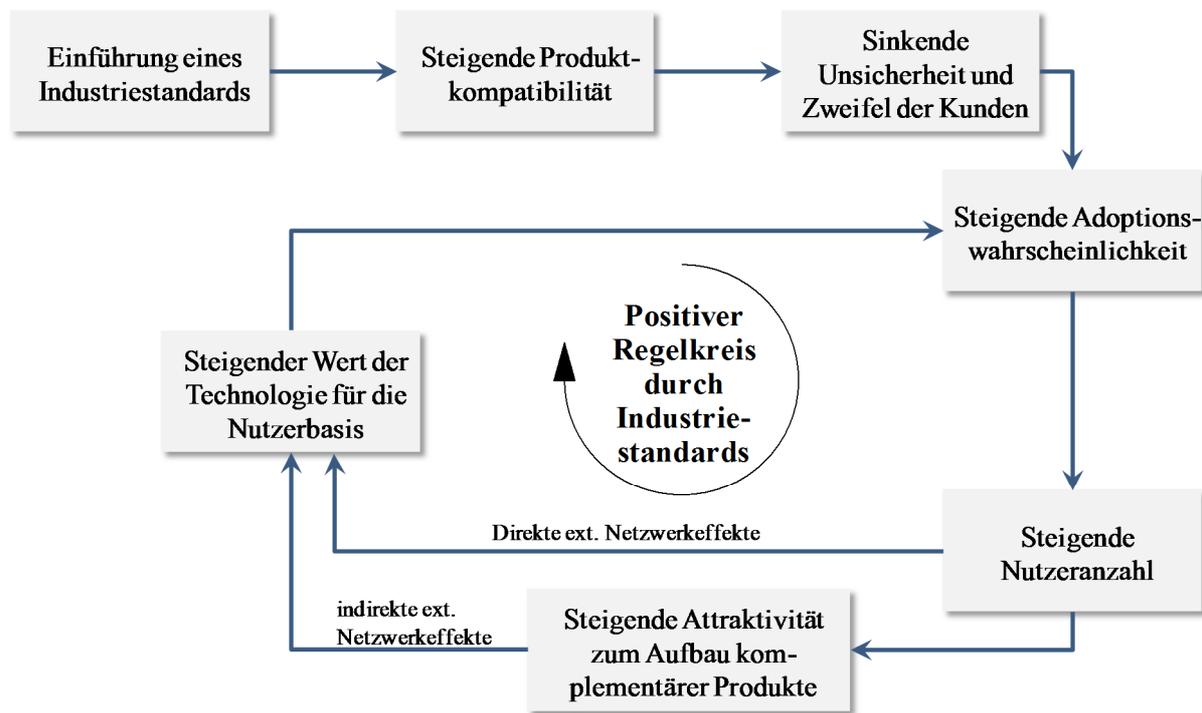


Abbildung 7: Positiver Regelkreis durch die Entstehung von Industriestandards⁹⁷

Die Pfadabhängigkeit zeigt zugleich den Einfluss eines bestehenden dominanten Designs auf die Diffusion neuer Technologie in einen Markt: In einem reifen und gesättigten Markt mit einem dominanten Design kommt es zu einem disruptiven Technologiesprung. Zu Beginn ist die daraus resultierende innovative Technologie jedoch in ihren Leistungsmerkmalen der etablierten Technologie unterlegen. Allerdings treten neue Teilnehmer in den Markt ein, welche mit der neuen Technologie experimentieren. So entsteht eine Vielzahl unterschiedlicher Konzepte, die um die Ablösung des dominanten Designs konkurrieren.⁹⁸ Dabei verringert sich sukzessive die Rate der Produktinnovationen der neuen Technologie, indem sich durch soziale, politische und organisationale Dynamiken die Freiheitsgrade durch verfestigende Erwartungen und Standards eingrenzen. Gleichzeitig verschieben sich zunehmend die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der im Markt tätigen Unternehmen hin zu Prozessinnovationen der neuen Technologie, sodass sich Kosten reduzieren und Leistungsmerkmale der neuen Technologie ebenso signifikant verbessern.⁹⁹ Zu einem Zeitpunkt $T1$ ist die neue Technologie entsprechend ihrer Leistungsmerkmale zwar dem dominanten Design überlegen. Dennoch führt die Pfadabhängigkeit auch weiterhin zu einem höheren Gesamtnutzen und einer Weiterentwicklung des dominanten Designs. Mit zunehmender Dauer entscheiden sich immer mehr Adopter für eine Variante der neuen Technologie, sodass es zur Bildung eines Industriestandards für die Innovation kommt und der positive Regelkreis durch Netzwerkeffekte angeschoben wird. Dadurch übersteigt zu einem Zeitpunkt $T2$

⁹⁷ Eigene Abbildung in Anlehnung an *Mohr et al.* (2010), S. 21.

⁹⁸ Vgl. *Mohr et al.* (2010), S. 18; *Anderson und Tushman* (1990).

⁹⁹ Vgl. *Utterback* (1996), S. 23–32.

der Gesamtnutzen der neuen Technologie den der ursprünglichen und wird so langfristig das neue dominante Design auf dem Markt (vgl. Abbildung 8).¹⁰⁰

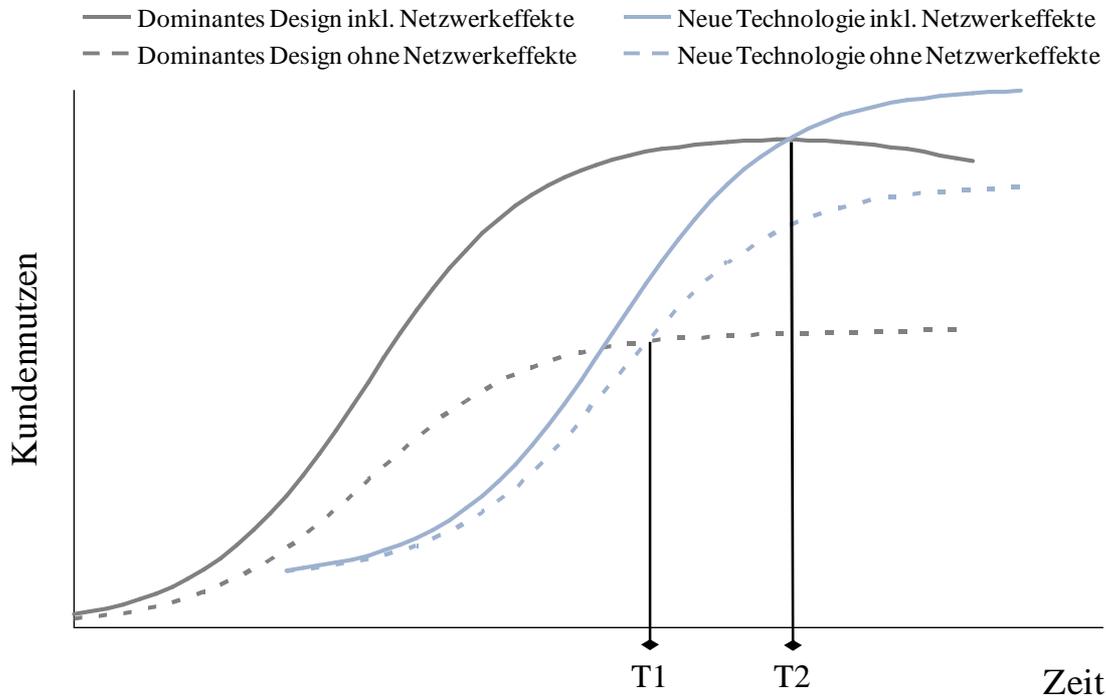


Abbildung 8: Ablösung eines dominanten Designs durch eine neue Technologie¹⁰¹

Zusammenfassend führt ein dominantes Design auf einem Markt durch die Pfadabhängigkeit zur Verzögerung der Diffusion neuer Technologien.¹⁰² Ein wesentliches Kriterium sind dabei die externen Netzwerkeffekte. Etabliert sich allerdings ein Industriestandard und führt zu einem positiven Regelkreis, so kann die neue Technologie langfristig ein bestehendes dominantes Design ablösen. Der Zusammenhang von *dominantem Design*, *externen Netzwerkeffekten* und der *Pfadabhängigkeit* mit der Diffusion von Technologien wurde für den Automobilmarkt beispielsweise durch Abernathy (1978)¹⁰³ und Basalla (1990)¹⁰⁴ diskutiert. Neuere Studien analysieren diese Problematik am Beispiel des Elektrofahrzeugs im PKW-Markt.¹⁰⁵

Die theoretischen Überlegungen zur Technologiediffusion zeigen, dass einerseits die Diffusion durch unterschiedliche Adopter wesentlich beeinflusst ist und andererseits die Wechselwirkungen zwischen Technologie, Adopter und Ökosystem einen mächtigen, positiven Regelkreis der Diffusion darstellen kann.

¹⁰⁰ Vgl. Anderson und Tushman (1990).

¹⁰¹ Eigene Abbildung in Anlehnung an Mohr et al. (2010), S. 18; Anderson und Tushman (1990).

¹⁰² Vgl. Tidd und Bessant (2009), S. 366–369.

¹⁰³ Vgl. Abernathy (1978).

¹⁰⁴ Vgl. Basalla (1990).

¹⁰⁵ Vgl. beispielsweise Hekkert und den Hoed (2004) oder Midler und Beaume (2010).

3.2 Organisationales Adoptionsverhalten

Die Theorien zur Technologiediffusion im Umfeld eines dominanten Designs haben gezeigt, dass das Verständnis der Adopter, respektive der zukünftigen Nutzer, neuer Technologien essenziell für die Analyse der zukünftigen Entwicklung und Marktchancen ist. Um das Verständnis des Adoptionsverhaltens dieser Nutzer auf dem NFZ-Markt, als überwiegender Industriegütermarkt, zu erweitern, wird in diesem Abschnitt auf die Besonderheit, Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren des organisationalen Adoptionsverhaltens eingegangen. Im Hinblick auf die durchgeführte quantitative empirische Erhebung des organisationalen Adoptionsverhaltens für CO₂-sparende Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt, werden deshalb die wesentlichen Theorien und Modelle dazu ausführlich vorgestellt.

3.2.1 Modelle zur Erklärung des organisationalen Adoptionsverhaltens

Ein grundlegender Ansatz zur Erklärung des Adoptionsverhaltens von Innovationen basiert auf dem *Technology Acceptance Model* (TAM) von Davis (1993).¹⁰⁶ In seinem Model definiert er die Variablen der wahrgenommenen Nützlichkeit *Perceived Usefulness* und Anwenderfreundlichkeit *Perceived Ease of Use* als die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Adoption innovativer Informationstechnologien von Nutzern in Unternehmen. Hierbei beschreibt *Usefulness* das Potenzial einer Innovation zur Leistungssteigerung des Adopters in seiner betrieblichen Arbeit. *Ease of Use* gibt dagegen den Grad des mit der Implementierung und Anwendung der Innovationen verbundenen Aufwands an. Nach dem TAM sind Adoptionsentscheidungen das Ergebnis eines Prozesses, der mittels eines externen Stimulus (der Ausgestaltung der Innovation) initiiert wird. Dieser Stimulus wird wiederum durch eine kognitive Antwort über die Bewertung der Innovation mittels der Kriterien *Perceived Usefulness* und *Perceived Ease of Use* erwidert. Hieraus entwickelt ein potentieller Adopter eine Haltung gegenüber der Innovation. Dieser Prozess schließt letztlich entweder in einer Entscheidung für oder gegen die Adoption der Innovation ab. Das TAM wurde durch die Varianten TAM2¹⁰⁷ und TAM3¹⁰⁸ erweitert. Diese Varianten beziehen weitere Variablen mit ein, die die Faktoren *Perceived Usefulness* und *Perceived Ease of Use* erklären sollen. Jedoch bleiben diese Modelle auf die individuelle Ebene von Innovationsentscheidungen begrenzt und beziehen keine organisationalen Prozesse mit ein.¹⁰⁹

Im Standardwerk von Rogers *Diffusion of Innovations* wird das Adoptionsverhalten von Innovationen auf organisationaler Ebene beschrieben. Rogers definiert drei unabhängige Variablen zur Beschreibung der organisationalen Innovationsfähigkeit: (1) Individuelle, (2) interne und (3) externe Merkmale der Organisationsstruktur.¹¹⁰ Daher misst das DOI organisationales Adopti-

¹⁰⁶ Vgl. Davis (1993).

¹⁰⁷ Vgl. Venkatesh und Davis (2000).

¹⁰⁸ Vgl. Venkatesh und Bala (2008).

¹⁰⁹ Vgl. Davis (1993); Davis (1989); Venkatesh und Davis (2000); Venkatesh et al. (2003); Venkatesh und Bala (2008).

¹¹⁰ Vgl. Rogers (2003), S. 407–416.

onsverhalten durch die Aufgeschlossenheit des Managements gegenüber Innovationen und Wandel, durch deskriptive Charakteristika der Organisation wie Größe, Grad der Zentralisierung und *Slack* (überschüssige Ressourcen), sowie durch die Aufgeschlossenheit des Organisationsumfeldes für Innovationen.

Ein weiteres Modell zur Erklärung des organisationalen Adoptionsverhaltens ist das *Technology-Organization-Environment* (TOE)-Modell von Tornatzky und Fleischer (1990).¹¹¹ Das TOE-Modell beschreibt mit sehr ähnlichen Kriterien wie in der DOI das organisationale Adoptionsverhalten mittels der Charakteristika der potentiell adoptierenden Organisation und externen Umwelteinflüssen. Ein Vergleich der beiden Modelle auf organisationaler Ebene und die jeweilige empirische Validität wurden von Oliveira und Martins (2011) diskutiert.¹¹²

Zusätzlich wird im TOE-Modell der Einfluss der technologischen Eigenschaften einer Innovation auf die Adoptionsentscheidung betrachtet. Des Weiteren wird angenommen, dass die drei unterschiedlichen Kontexte, welche die Entscheidung über technologische Innovationen in Organisationen determinieren, wiederum voneinander abhängig sind (vgl. Abbildung 9). Hauptsächlich wurde das TOE-Modell zur Erklärung der Diffusion von Informationstechnologien in Unternehmen herangezogen. In den vergangenen Jahren wurde das Modell jedoch ebenso auf viele Industrien, technologische Innovationen sowie unterschiedliche regionale und kulturelle Hintergründe angewandt.¹¹³

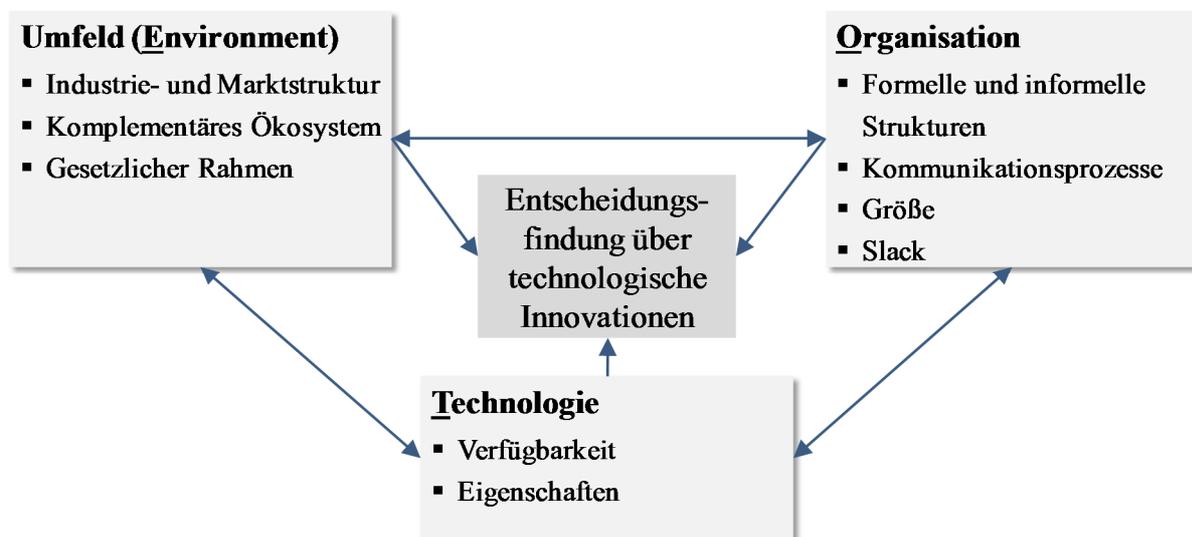


Abbildung 9: TOE Modell¹¹⁴

Frambach und Schillewaert (2002) bauen in einem weiteren Modell zum organisationalen Adoptionsverhalten auf diese Erkenntnisse auf und beschreiben ebenso drei wesentliche Faktoren für

¹¹¹ Vgl. Tornatzky und Fleischer (1990), S. 151–175.

¹¹² Vgl. Oliveira und Martins, M, F. (2011), S. 110–121.

¹¹³ Vgl. Baker (2012); David et al. (2010); Oliveira und Martins, M, F. (2011).

¹¹⁴ Eigene Abbildung in Anlehnung an Tornatzky und Fleischer (1990), S. 153.

Innovationsentscheidungen: wahrgenommene Eigenschaften der technologischen Innovation *perceived innovation characteristics*, Eigenschaften der organisationalen Adopter *adopter characteristics* und Umfeldeinflüsse *environmental influences*. Die wahrgenommenen Eigenschaften einer Innovation hängen wiederum vom sozialen Netzwerk der Organisation *organization's social network*, den Marketingaktivitäten der Zulieferer *organization's social network* und den *environmental influences* ab. Darüber hinaus berücksichtigen Frambach und Schillewaert (2002) die externen Netzwerkeffekte, da der Wert einer Innovation und damit ihre Adoptionswahrscheinlichkeit durch die Anzahl anderer Nutzer determiniert ist.¹¹⁵

Zusammenfassend erklären die Modelle das organisationale Adoptionsverhalten von technologischen Innovationen im Wesentlichen anhand der Einflussfaktoren von drei Kontexten: dem *technologischen Kontext*, dem *organisationalen Kontext* und dem *Kontext des externen Umfeldes*. Daher werden die Einflussfaktoren im Folgenden anhand der Kontexte ausführlicher definiert, um diese in der vorliegenden Arbeit zur Analyse der zukünftigen Adoption und Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien anzuwenden. Aufgrund der breiten Anwendbarkeit des TOE-Modells auf unterschiedliche Branchen und Arten von Innovationen, erfolgt eine starke Orientierung am TOE-Modell.

3.2.2 TOE-Modell

Technologische Einflussfaktoren

Der technologische Kontext umfasst die Verfügbarkeit von Technologien und die für die jeweilige Organisation relevanten Eigenschaften der zu adoptierenden Technologie.

Die Verfügbarkeit einer Technologie hat eine interne und eine externe Dimension. Einerseits hängt die Adoptionsentscheidung von den derzeit im Geschäftsbetrieb der adoptierenden Organisation verwendeten Technologien und der damit verbundenen Wissensbasis und Erfahrung in der Nutzung zusammen. Dies bestärkt die Bedeutung der Pfadabhängigkeit bei Adoptionsentscheidungen von neuen Technologien. Andererseits ist das organisationale Adoptionsverhalten über die generelle Verfügbarkeit und dem damit verbundenen Angebot einer Innovation am Markt determiniert. Die Verfügbarkeit bestimmt sich durch die Anzahl, die Qualität und die Anwendbarkeit auf die eigenen Prozesse und Aufgaben der Innovationen am Markt. Ferner bestimmen die Eigenschaften einer Technologie die wahrgenommene Bewertung einer Innovation durch die Organisation. Diese Eigenschaften sind jedoch nicht statisch, sondern unterliegen einer dynamischen Veränderung in Abhängigkeit von der gesamten Zulieferindustrie, dem Marktumfeld und regulatorischer Rahmenbedingungen.¹¹⁶

¹¹⁵ Vgl. Frambach und Schillewaert (2002), S. 167.

¹¹⁶ Vgl. Tornatzky und Fleischer (1990), S. 163–166.

Organisationsinterne Einflussfaktoren

Der organisationale Kontext beschreibt die organisationsinternen Eigenschaften, welche die Adoptionsentscheidungen von Organisationen beeinflussen. Analog zum DOI sind diese deskriptiven Eigenschaften die verfügbaren Ressourcen sowie die internen Strukturen und Prozesse. Dezentrale und flexible Strukturen sowie eine vom Top-Management getragene und kommunizierte Aufgeschlossenheit gegenüber Innovation und Wandel unterstützen die Adoption von Innovationen. Ebenso führt die zunehmende Größe einer Organisation zu einem höheren Adoptionsverhalten, wobei die Wirkung dieses Einflussfaktors kontrovers diskutiert ist. Einerseits sind die Strukturen großer Organisationen eher inflexibel und zentralisiert, was sich negativ auf Innovationsentscheidungen auswirkt. Gleichzeitig wird aber angenommen, dass große Organisationen einem höheren Druck ausgesetzt sind, Innovationen zu adoptieren, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten.¹¹⁷

Darüber hinaus sind Adoptionsentscheidungen von den wahrgenommenen technologischen Eigenschaften abhängig. Diese Eigenschaften werden von den Mitgliedern des organisationalen Einkaufsgremiums, dem *buying center*, mit bereits adoptierten Technologien auf Basis individuell gewichteter Kriterien verglichen. Diese Kriterien unterscheiden sich von Organisation zu Organisation und sind das Ergebnis der spezifischen Zusammensetzung der Mitglieder des *buying centers*, der Unternehmenskultur sowie zwischenmenschlicher (hierarchischer) Kontakte. Frambach und Schillewaert (2002) unterteilen die Einflussgrößen zur Beurteilung einer Innovation in Anlehnung an Rogers (2003): *relative advantage*, *complexity*, *trialability*, *observability* und *compatibility*. Zusätzlich hat nach diesem Modell die wahrgenommene Unsicherheit *uncertainty* der technologischen Innovation einen wesentlichen Einfluss auf die Adoptionsentscheidung.¹¹⁸

Einflussfaktoren des organisationsexternen Umfeldes

Für Adoptionsentscheidungen ist ebenfalls das Umfeld eines Unternehmens entscheidend. Es ist durch die Struktur und Dynamik der Branche, das für die technologische Innovation komplementäre Ökosystem sowie die gesetzlichen Rahmenbedingungen definiert. Diese Einflussfaktoren sind typischerweise außerhalb des Einflussbereiches der Organisation.

Zwar existiert keine durchgängige empirische Bestätigung, inwieweit und in welcher Richtung die Wachstumsrate einer Branche das Adoptionsverhalten beeinflusst. Jedoch führen dynamische und schnell wachsende Industrien eher zu einem innovationsfreundlichen Umfeld und könnten somit die Adoptionsbereitschaft technologischer Innovationen erhöhen. Andererseits herrscht in reifen Märkten ein hoher Wettbewerbsdruck, welcher Organisationen dazu zwingt, Effizienzverbesserungen oder neue Geschäftsmodelle einzuführen.¹¹⁹

¹¹⁷ Vgl. Baker (2012), S. 233; Frambach und Schillewaert (2002), S. 165.

¹¹⁸ Vgl. Frambach und Schillewaert (2002), S. 164–165.

¹¹⁹ Vgl. Baker (2012), S. 235.

Des Weiteren haben – wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben – externe Netzwerkeffekte einen positiven Einfluss auf Adoptionsentscheidungen.¹²⁰ Die externen Netzwerkeffekte führen zum Aufbau einer komplementären, unterstützenden Infrastruktur zur Wartung und zum Betrieb der technologischen Innovation.¹²¹ Daher spielen die Wechselwirkungen innerhalb einer Industrie für das Adoptionsverhalten von Organisationen eine wesentliche Rolle.

Schließlich sind die gesetzlichen Rahmenbedingungen ein wesentlicher Treiber des organisationsexternen Umfeldes. Gesetzliche Vorschriften können die Diffusion von Innovationen sowohl beschleunigen als auch hemmen. Beispielsweise führen striktere Umweltauflagen zur schnelleren Entwicklung und Diffusion neuer Technologien, ebenso wie Fördergelder, Subventionen und Steuererleichterungen. Im Gegensatz dazu hemmen Vorschriften, wie beispielsweise ein erhöhter Testaufwand zur Erreichung von Sicherheitsstandards und eine zunehmende Bürokratie (z. B. Patent- oder Lizenzrecht), die Diffusionsgeschwindigkeit.¹²²

Bisher gibt es keine empirische Validierung für das organisationale Adoptionsverhalten auf Automobilmärkten. Jedoch wurde insbesondere das TOE-Modell in unterschiedlichen Branchen und auf unterschiedliche, innovative Technologien angewandt.¹²³ Zwar liegt der Fokus vieler Diffusionsstudien im organisationalen Kontext auf Informationstechnologien, allerdings ist das TOE-Modell ein generisches Modell zur Vorhersage der Technologiediffusion und kann daher für unterschiedliche Arten von Innovationen angewandt werden.¹²⁴ Daher dient das TOE-Modell als generischer theoretischer Rahmen für die vorliegende Arbeit, um die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien in den NFZ-Markt zu analysieren.

3.3 Modellierung und Prognose der Technologiediffusion auf dem Automobilmarkt¹²⁵

Es gibt zahlreiche Verfahren, um die Diffusion von Technologien in Märkte zu prognostizieren. Zur Analyse der zukünftigen Marktdurchdringung und Bestimmung des Marktanteils CO₂-sparender Antriebstechnologien von NFZ wird ebenfalls eine solche Prognose durchgeführt. Kapitel 2.2 zeigt, dass für den NFZ-Markt quantitative Prognosen nur sehr begrenzt Anwendung finden. Hingegen ist die breite Anwendung von Prognoseverfahren und Marktmodellen zur Diffusion alternativer Antriebskonzepte für den Markt von PKW und leichten NFZ etabliert. Daher wird im Folgenden ein Literaturüberblick zur Anwendung dieser Verfahren anhand des Automobilmarkts gegeben, sowie die jeweiligen Stärken und Schwächen der Methodik aufge-

¹²⁰ Vgl. *Frambach und Schillewaert* (2002), S. 166–167.

¹²¹ Vgl. *Baker* (2012), S. 235; *Mohr et al.* (2010), S. 20–21.

¹²² Vgl. *Baker* (2012), S. 235; *Frambach und Schillewaert* (2002), S. 166–167.

¹²³ Für einen Überblick über die Anwendung des TOE-Modells wird auf *Baker* (2012) verwiesen.

¹²⁴ Vgl. *Zhu und Kraemer* (2005), S. 63.

¹²⁵ Dieser Abschnitt basiert überwiegend auf einem publizierten Arbeitsbericht: *Seitz* (2014), S. 10–13.

zeigt. Auf dieser Basis erfolgt die Auswahl einer geeigneten Methodik zur Prognose der Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion von NFZ.

Shafiei et al. (2013)¹²⁶ sowie Al-Alawi und Bradley (2013)¹²⁷ haben jeweils einen umfassenden Literaturüberblick über Prognoseverfahren und Marktmodelle für den Automobilmarkt erstellt. Shafiei et al. (2013) betrachten in ihrer Studie zur Erarbeitung eines Diffusionsmodells für alternative PKW-Antriebe ausschließlich die Methoden *System Dynamics* und *Agentenbasierte Modellierung*. Al-Alawi und Bradley (2013) beschränken sich in ihrem Literaturüberblick auf Marktmodelle für Hybrid- und Elektro-PKW, beziehen jedoch weitere Methoden wie Kaufentscheidungs-, Diffusions- und Zeitreihenmodelle mit ein.

Fasst man die Erkenntnisse dieser beiden Arbeiten zusammen, so können Marktmodelle zur Prognose der Technologiediffusion auf Automobilmärkten im Wesentlichen in drei Gruppen eingeteilt werden: makroökonomische Top-down-Ansätze (System Dynamics sowie Diffusions- und Zeitreihenmodelle), mikroökonomische Bottom-up-Ansätze (Agentenbasierte Modellierung sowie diskrete Entscheidungsmodelle) sowie weitere eher praxisorientierte qualitative Ansätze (Delphi-Methode, Kosten-Nutzen-Analyse, Szenarioanalyse, etc.).¹²⁸ Um eine valide Basis für ein mathematisches Prognosemodell zu erhalten werden daher im Folgenden die vier quantitativen Prognosemethoden *System Dynamics*, *Agentenbasierte Modellierung*, *Diffusions- und Zeitreihenmodelle* sowie *diskrete Entscheidungsmodelle* näher erläutert.

3.3.1 System Dynamics

System Dynamics, oder Systemdynamik, ist eine Modellierungsmethode zur ganzheitlichen Analyse komplexer und dynamischer Fragestellungen im sozio-ökonomischen Umfeld.¹²⁹ Im Bereich der Marktmodellierung und Prognose der Technologiediffusion ist System Dynamics ein Top-down-Ansatz zur ganzheitlichen Betrachtung der Marktstruktur und der daraus resultierenden Entwicklung. System Dynamics wird genutzt, um ein Verständnis der Wechselwirkungen unterschiedlicher Einflussfaktoren und Stakeholder eines komplexen Systems zu schaffen.¹³⁰ Darüber hinaus wird die Methode umfangreich als Entscheidungsunterstützung für Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft angewandt.¹³¹ Die Anwendung von System Dynamics zur Analyse des Automobilmarktes ist vielfältig, jedoch auf PKW und leichte NFZ beschränkt.¹³²

¹²⁶ Vgl. Shafiei et al. (2013).

¹²⁷ Vgl. Al-Alawi und Bradley (2013).

¹²⁸ Vgl. Al-Alawi und Bradley (2013), S. 191–198; Shafiei et al. (2013), S. 45–49.

¹²⁹ Vgl. Weikl (2010), S. 18.

¹³⁰ Vgl. Shafiei et al. (2013), S. 45.

¹³¹ Vgl. bspw. Bosshardt (2009); Janssen (2005); Kieckhäfer et al. (2012); Weikl (2010); Liebert (2001).

¹³² In Kapitel 7.1 wird näher auf System Dynamics und dessen Anwendung zur Modellierung und Prognose des Automobilmarktes eingegangen.

Die Stärken von System Dynamics liegen in der Bereitstellung einer Methode zum Aufbau eines systemischen Verständnisses für Problemstellungen oder Märkte. Dabei können Regelkreise berücksichtigt werden, um die existierende Dynamik in einem Markt abzubilden sowie aus dessen Struktur auf das zukünftige Verhalten zu schließen. Des Weiteren erlaubt System Dynamics die Durchführung von Szenarioanalysen zur Evaluierung von Handlungsoptionen für Entscheidungsträger. Stärke und Schwäche zugleich sind die simplifizierte und aggregierte Abbildung von Problemstellungen, welche eher qualitative Aussagen statt exakter Vorhersagen zulassen. Ebenso kann die Nutzung qualitativer, schwer zu quantifizierender Parameter zu einer willkürlichen Anwendung durch den Modellierer führen.¹³³

3.3.2 Agentenbasierte Modellierung

Agent-based modeling (ABM), oder Agentenbasierte Modellierung, ist eine Simulationsmethodik, welche individuelle Entscheidungseinheiten auf Mikroebene, sogenannte Agenten, nutzt, um aus deren Verhalten auf die Entwicklung eines Gesamtsystems zu schließen. Jeder Agent agiert auf Basis seines repräsentierenden Mikrosystems, seinen internen Eigenschaften sowie den Beziehungen zu anderen Agenten des Gesamtsystems.¹³⁴ Damit ist ABM ein typischer Bottom-up-Ansatz und wird zur Simulation des Automobilmarktes sowie der Technologiediffusion auf diesem umfangreich angewandt. Hierbei repräsentieren die Agenten die wesentlichen Akteure des Marktes: Hersteller, unterschiedliche Kundengruppen, Energie- und Kraftstoffversorgungssystem und politische Entscheidungsträger. Ebenfalls ist die Anwendung von ABM auf den Markt für PKW und leichte NFZ beschränkt.¹³⁵ Für einen ausführlichen Literaturüberblick zur Anwendung von ABM im Automobilmarkt wird auf Shafiei et al. (2013) und Al-Alawi und Bradley (2013) verwiesen.¹³⁶

Die Stärken von ABM liegen insbesondere in der Simulation des individuellen Agentenverhaltens. Denn dadurch kann die Heterogenität der Agenten mit unterschiedlichen Interessen auf einem Markt erfasst werden. Darüber hinaus kann ein hoher Detaillierungsgrad der Interaktion zwischen den Agenten abgebildet werden. Agentenbasierte Modelle sind im Gegensatz zu System Dynamics Modellen schwierig zu kalibrieren und zu validieren und sind mit höherem Rechenaufwand verbunden.¹³⁷

¹³³ Vgl. Shafiei et al. (2013), S. 45–46; Bosshardt (2009), S. 31; Weikl (2010), S. 22–23. Für eine ausführlichere Beschreibung von System Dynamics vgl. Kapitel 7.1.

¹³⁴ Vgl. Axelrod (2001), S. 3–5; Garcia (2005), S. 381; Bonabeau (2002), S. 7280.

¹³⁵ Vgl. beispielsweise Garcia (2005); Schwoon (2006); Mueller und Haan (2009).

¹³⁶ Vgl. Al-Alawi und Bradley (2013), S. 191–193; Shafiei et al. (2013), S. 47–48.

¹³⁷ Vgl. ebenda.

3.3.3 Diffusions- und Zeitreihenmodelle

Diffusions- und Zeitreihenmodelle (DZM) basieren auf der Diffusionstheorie DOI und versuchen damit, den zeitlichen Verlauf von Technologien über den Produktlebenszyklus zu erfassen.¹³⁸ Wie in Kapitel 3.1 dargestellt, wird der Adoptionsprozess durch die Innovation selbst, die Kommunikation zwischen den potentiellen Adoptern, die Zeit und das soziale System determiniert. Auf Basis dieser Einflussgrößen werden die Diffusionsparameter einer Technologie entweder durch historische Absatzzahlen mittels einer Regressionsanalyse bestimmt oder – falls keine historischen Daten vorhanden sind – Daten von möglichst analogen Technologien dafür herangezogen. Ein weit verbreitetes DZM ist das sogenannte *Bass-Diffusionsmodell*, welches zur Prognose der Innovationsdiffusion auf dem Automobilmarkt am häufigsten angewandt wird. Im Bezug auf den NFZ-Markt bleiben diese Verfahren bis auf eine Master Thesis zu schweren Hybrid-NFZ¹³⁹ auf die Anwendung im Markt für PKW und leichte NFZ beschränkt.¹⁴⁰

Da die zukünftige Adoptionsrate vergleichsweise einfach mittels historischer Daten oder vergleichbarer Technologien abgeschätzt werden kann, können Diffusions- und Zeitreihenmodelle schnell implementiert werden. Jedoch ist die Parameterschätzung mittels vergleichbarer Technologien kritisch zu betrachten, da dies die Ergebnisvalidität der Modelle senkt.¹⁴¹ Des Weiteren sind Innovationen, welche scheiterten, kaum untersucht und damit in solchen Modellen auch nicht berücksichtigt. Ebenso eignen sich Diffusions- und Zeitreihenmodelle nicht zur Prognose der Technologiediffusion auf Märkten mit konkurrierenden Produkten.¹⁴²

3.3.4 Diskrete Entscheidungsmodelle

Discrete Choice Modeling (DCM), oder diskrete Entscheidungsmodellierung, ist eine Methodik zur Beschreibung und Abschätzung von Kauf- und Auswahlentscheidung von jedweden Entscheidungsträgern aus einer endlichen Anzahl an Alternativen. Diese Entscheidungsträger können sowohl Individuen, Haushalte oder größere Entscheidungsgremien wie beispielsweise ein *buying center* sein. Basierend auf der endlichen Menge aller verfügbaren Auswahlalternativen, die untereinander klar unterscheidbar sind, wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der ein Entscheidungsträger eine dieser Alternativen auswählt. Annahme ist dabei, dass der Entscheidungsträger völlig rational sowie nutzenmaximierend handelt.

Zur Analyse von Marktanteilen oder der Marktdurchdringung neuer Technologien auf dem Automobilmarkt wird DCM hauptsächlich als multinomiale Auswahlentscheidung mit drei oder

¹³⁸ Vgl. *Al-Alawi und Bradley* (2013), S. 195.

¹³⁹ Vgl. *Brauer* (2011) und Zusammenfassung zu dieser Arbeit in Kapitel 2.2.

¹⁴⁰ Vgl. ebenda. Für einen ausführlichen Literaturüberblick zur Anwendung von DZM auf dem Automobilmarkt wird auf *Al-Alawi und Bradley* (2013), S. 195 verwiesen.

¹⁴¹ Vgl. *Brauer* (2011), S. 42; *Al-Alawi und Bradley* (2013), S. 195.

¹⁴² Vgl. *Al-Alawi und Bradley* (2013), S. 195.

mehr Alternativen implementiert. Bei einer Abhängigkeit zwischen den Alternativen erfolgt eine Implementierung mittels *Nested-Logit-Modellen*, bei untereinander unabhängigen Alternativen werden *Multinomial-Logit-* oder *Conditional-Logit-Modelle* angewandt. Für eine ausführlichere Beschreibung diskreter Entscheidungsmodelle wird auf Train (2003) oder Bierlaire (1993) verwiesen, ein Literaturüberblick zur Anwendung auf dem Automobilmarkt haben Al-Alawi und Bradley (2013) erstellt.¹⁴³

Sind umfangreiche empirische Daten zur Präferenzstruktur und Nutzenverteilung der Entscheidungsträger vorhanden, ist die DCM eine verlässliche Approximation zukünftiger Auswahlentscheidungen. Stehen keine empirischen Daten zur Verfügung, müssen diese auf Basis von Hypothesen oder durch eine quantitative oder qualitative Datenerhebung bestimmt werden.¹⁴⁴ Ebenso können sich verändernde Marktstrukturen oder das zeitlich verändernde Verhalten von Entscheidungsträgern nicht erfasst werden.¹⁴⁵

3.3.5 Auswahl einer geeigneten Modellierungsmethodik

Zusammenfassend haben die unterschiedlichen Verfahren ihre jeweiligen spezifischen Vor- und Nachteile. Daher eignet sich jede dieser und weiterer Methoden¹⁴⁶ auf die Anwendung jeweils problemspezifischer Phänomene. Viele Forschungsarbeiten zur Prognose zukünftiger Marktanteile alternativer Antriebstechnologien auf dem Automobilmarkt, wenden allerdings eine Kombination mehrerer Methoden an, um die jeweiligen Vor- und Nachteile der Methoden auszugleichen und ein problemspezifisches Forschungsdesign zu nutzen. Besonders weit verbreitet ist dabei die Erweiterung von System Dynamics Modellen und Agentenbasierter Modellierung durch diskrete Entscheidungsmodelle, um die Kundenentscheidung für oder gegen den Kauf neuer Technologien am Markt abzubilden.¹⁴⁷ Des Weiteren haben hybride Simulationsmodelle aus der Kombination von ABM und System Dynamics in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen, da sich die Stärken beider Ansätze je nach Modellierungsproblem optimal ergänzen.¹⁴⁸

Tabelle 1 fasst die wesentlichen Studien zur Prognose zukünftiger Marktanteile alternativer Antriebstechnologien auf dem Automobilmarkt zusammen und zeigt die vielfältige Kombination der vorgestellten Verfahren. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Untersuchung der Diffusion unterschiedlichster Technologien auf dem PKW-Markt breit erforscht ist. Der NFZ-Markt hingegen ist bislang nur stark eingeschränkt Gegenstand quantitativer Prognoseverfahren gewesen.

¹⁴³ Vgl. Kapitel 5.3.1 und Train (2003); Bierlaire (1998); Al-Alawi und Bradley (2013).

¹⁴⁴ Vgl. Al-Alawi und Bradley (2013), S. 195.

¹⁴⁵ Vgl. Bosshardt (2009), S. 31.

¹⁴⁶ Hierbei wird neben der bereits erwähnten Delphi-Methode, Szenarioanalyse und Kosten-Nutzen-Analyse auch auf weitere Methoden hingewiesen. Unter diesen sind – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – die Spieltheorie, Optimierungsmodelle wie beispielsweise MARKAL oder zelluläre Automaten.

¹⁴⁷ Vgl. beispielsweise Kieckhäfer et al. (2012); Janssen (2005); Shafiei et al. (2013); Zhang et al. (2011); Keith (2012); Bosshardt (2009); Weikl (2010).

¹⁴⁸ Vgl. Shafiei et al. (2013), S. 49; Kieckhäfer et al. (2012).

Die für die Problemstellung gängigsten Methoden System Dynamics und ABM sind bisher auf diesen Markt noch nicht angewandt worden.

Autor	Jahr	Methodik					Markt		Technologien				
		SD	ABM	DCM	DZM	andere	PKW	NFZ	ICE*	BEV*	Hybrid	Gas	BSZ*
Al-Alawi	2013	x	x	x		x	x		x	x	x		
Bandivadekar	2008					x	x		x	x	x	x	x
Bauer	2011				x			x	x	x			
Bosshardt	2009	x		x			x		x		x	x	x
de Haan & Müller	2009		x				x						
Eppstein et al.	2011		x				x		x		x		
Janssen	2005	x		x			x		x		x	x	x
Keith	2012	x		x			x		x		x		
Keles et al.	2008	x					x		x				x
Kieckhäfer et al.	2012	x	x	x			x		x	x	x		
Park et al.	2011	x					x		x		x		x
Santa-Eulalia et al.	2011	x					x			x			
Schneider et al.	2003	x					x						x
Schwoon	2006		x				x						x
Shafiei et al.	2012	x	x	x			x		x	x	x	x	x
Shepherd et al.	2012						x		x	x	x		
Struben	2006	x		x	x		x		x		x		x
Struben & Sterman	2008	x		x			x		x		x		x
Tzeng et al.	2005					x		x	x	x	x		x
van Vliet et al.	2010		x				x		x				
Wansart & Schnieder	2010	x					x		x	x			
Weikl	2010	x		x			x		x	x	x	x	
Zhang et al.	2011		x	x			x		x	x	x		

ICE*: Verbrennungsmotor (internal combustion engine) BEV***: Elektrofahrzeug (battery electric vehicle) BSZ***: Brennstoffzelle

Tabelle 1: Literaturübersicht zu Diffusionsstudien auf dem Automobilmarkt¹⁴⁹

Eine Erklärung dafür könnte in der unterschiedlichen Struktur des NFZ-Marktes gegenüber dem PKW-Markt liegen. Ferner könnten die für die Modellierung mit System Dynamics und Agentenbasierte Modellierung benötigten, aber bisher begrenzt erhobenen, empirischen Daten oder die bisher noch sehr geringe Marktreife alternativer Antriebe und anderer CO₂-sparender Technologien Gründe für die geringe Anzahl an wissenschaftlichen Arbeiten zur Prognose des NFZ-Marktes sein.¹⁵⁰

¹⁴⁹ Eigene Abbildung.

¹⁵⁰ Vgl. zu diesen Vermutungen Kapitel 2.2.

Die Auswahl einer geeigneten Modellierungsmethodik orientiert sich am Ziel der Arbeit, die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien in schweren NFZ zu analysieren. Dafür sollen die wesentlichen Einflussgrößen und Wirkzusammenhänge der zukünftigen Marktdurchdringung untersucht und Handlungsoptionen für die unterschiedlichen Akteure am Markt evaluiert werden. Gleichzeitig ist der NFZ-Markt noch vergleichsweise wenig erforscht, sodass empirische Daten sehr begrenzt vorhanden sind und zunächst ein grundlegendes Verständnis der systemischen Marktmechanismen geschaffen werden muss. Ebenso wurde die Bedeutung der externen Netzwerkeffekte für die Diffusion von Technologien vorgestellt, sodass Rückkopplungsschleifen der Marktentwicklung durch eine dynamische Simulation implementiert werden müssen.

Vergleicht man diese Ziele mit den zuvor vorgestellten Methoden, zeigt sich System Dynamics für die Anforderungen am besten. Gegen die Verwendung von System Dynamics spricht jedoch die Berücksichtigung der unterschiedlichen Akteure am Markt. Des Weiteren wurde dargelegt, dass durch die aggregierte Methodik eher qualitative Aussagen statt punktgenaue Prognosen möglich sind. Abbildung 10 fasst die Anforderungen an das Modell zusammen.

	System Dynamics	ABM	DCM	DZM
Identifikation Einflussfaktoren	✓	✓	✓	✓
Wechselwirkungen der Akteure	✓	✓		
Dynamische Simulation	✓	✓		
Anforderungen an quantitative Daten	Mittel	Hoch	Hoch	Mittel
Entwicklung von Marktverständnis	Hoch	Mittel	Mittel	
Heterogenität der Akteure abbildbar		✓	✓	

Abbildung 10: Anforderungen an das Simulationsmodell und Erfüllung durch die Methodik¹⁵¹

Aus diesen Einschränkungen heraus werden daher – wie auch in den zum Teil vorgestellten Forschungsarbeiten – mehrere Methoden miteinander kombiniert. Die übergeordnete Modellierungsmethodik ist System Dynamics. Ferner wird das Konzept unterschiedlicher Agenten der ABM aufgenommen und in ein System Dynamics Modell integriert.¹⁵² Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit besteht in der Analyse des organisationalen Adoptions- und Kaufverhaltens, sodass dieses mittels eines auf DCM basierenden Kauf- und Adoptionsentscheidungsmodell im Simulationsmodell abgebildet wird.

¹⁵¹ Eigene Abbildung.

¹⁵² Wie die Umsetzung dazu aussieht, wird detailliert in Kapitel 7 beschrieben.

“640K [RAM] ought to be enough for anybody.“

Bill Gates, Gründer von Microsoft, 1981

Kapitel 4

Technologischer Kontext der Diffusion

Ziel dieses Kapitels ist es, den technologischen Kontext der Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur Reduktion der CO₂-Emissionen von NFZ zu untersuchen. Der technologische Kontext ist im Wesentlichen durch die Eigenschaften und die Verfügbarkeit der zu adoptierenden technologischen Innovationen determiniert.¹⁵³ Kapitel 2.2 hat gezeigt, dass das technische Potenzial des Untersuchungsobjekts gut erforscht ist. Daher schafft dieses Kapitel zunächst aufbauend auf diesen Erkenntnissen einen Überblick über Antriebstechnologien und technische Maßnahmen zur CO₂-Reduktion von NFZ. Hierfür wird der aktuelle Stand der Technik in NFZ vorgestellt und die grundlegenden Konzepte der in dieser Arbeit berücksichtigten CO₂-sparenden Antriebstechnologien erläutert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Analyse von Eigenschaften mit Einfluss auf den *relative advantage*. Des Weiteren haben Technologien in der Peripherie des Antriebsstranges und am Gesamtfahrzeug das Potenzial signifikante Mengen an Emissionen einzusparen und können so kurz- bis mittelfristig eine Konkurrenz zu den alternativen Antrieben darstellen. Daher werden die CO₂-sparenden Maßnahmen über alternative Antriebstechnologien hinaus im Simulationsmodell berücksichtigt.

Im zweiten Schritt werden im Hinblick auf das Simulationsmodell sogenannte Technikpakete erarbeitet. Technikpakete definieren in diesem Rahmen die technische Spezifikation der betrachteten Technologien (Antriebstechnologien, zusätzliche Technologien in der Motorperipherie und Fahrzeugmaßnahmen) zum Einsatz in den unterschiedlichen NFZ-Anwendungsfällen.

4.1 Antriebskonzepte und CO₂-sparende Technologien¹⁵⁴

4.1.1 Der konventionelle Dieselmotor

Die Technologie moderner Dieselmotoren ist weitestgehend ausgereift und bewährt. Leistungssteigerung steht nicht mehr im Fokus der Entwicklung, vielmehr ist es das primäre Ziel, die Emissionen (CO₂, CO, NO_x, Ruß und unverbrannte Kohlenwasserstoffe) im Betrieb zu senken.

¹⁵³ Vgl. Abbildung 9: TOE Modell und Kapitel 3.2.2 TOE-Modell.

¹⁵⁴ Auszugsweise entsprechen Abbildung und Textpassagen zur allgemeinen Automobiltechnik und Spezifizierung der Hybride Seitz (2012), S. 40–48.

Die Weiterentwicklung des Dieselmotors ist gegenwärtig vorwiegend auf verbrennungsvorgelagerte (Einspritzung, Aufladung, Ladeluftkühlung) und nachgelagerte (Abgasnachbehandlung und -wärmenutzung) Technologien fokussiert. Langfristig können ebenso neue Brennverfahren, wie HCCI¹⁵⁵, Verbrauch und Emissionen senken.

Dieselmotoren für NFZ mit einem zulässigen Gesamtgewicht größer 6 t werden technologisch im Wesentlichen in Motoren für schwere NFZ (HD) und mittelschwere NFZ (MD) eingeteilt. HD-Motoren haben einen Hubraum von 10 l bis 16 l, mit überwiegend sechs Zylindern – einzig Scania bietet noch einen Achtzylindermotor an. Die Leistung von HD-Motoren bewegt sich heute in der straßengebundenen Anwendung der NFZ zwischen 250 kW und 500 kW. Modernste Motoren arbeiten unter einem mittleren Zylinderdruck von 220 bar mit einer Common-Rail-Mehrfacheinspritzung des Dieselmotorkraftstoffs unter 2500 bar.¹⁵⁶ Die Motoren sind mehrfach Turboaufgeladen und mit VTG¹⁵⁷-Turboladern ausgestattet. Die Erfüllung der Euro-Abgasnorm 6 erfolgt über eine Abgasrückführung (EGR) in den Brennraum, einen Dieselpartikelfilter und einen SCR-Katalysator¹⁵⁸ mit AdBlue-Einspritzung. Heutige HD-Motoren erreichen in der Spitze einen thermischen Wirkungsgrad von bis zu 44 %.¹⁵⁹

MD-Motoren sind mit einem Hubraum von 4 l bis 8 l und vier bis sechs Zylindern auf eine Leistung von 100 kW bis 260 kW ausgelegt. Ausnahme bilden in Deutschland die Iveco Daily und Fuso Canter Modelle, welche mit LD-Motoren und einem Fahrzeugaufbau aus dem Sprintersegment mit einem zulässigen Gesamtgewicht von bis zu 7,5 t erhältlich sind. Alle anderen Modelle in diesem Gewichtssegment sind mit MD-Motoren ausgestattet, welche bei einem Zylinderdruck von etwa 200 bar arbeiten. Dabei wird der Kraftstoff über ein Common-Rail-System unter 2000 bar in den Brennraum eingespritzt. Die Motoren sind ebenso Turboaufgeladen, die Abgasreinigung erfolgt durch eine Abgasrückführung, Dieselpartikelfilter und SCR-Katalysator äquivalent zu der Abgasreinigung in HD-Motoren. Der Wirkungsgrad von MD-Motoren reicht nicht an den von HD-Motoren heran, wobei in der Spitze ein Wirkungsgrad von bis zu 42 % erreichbar ist.¹⁶⁰

¹⁵⁵ HCCI steht für Homogene Kompressionszündung (engl.: Homogeneous Charge Compression Ignition) und ist ein Motorkonzept, bei dem die Verbrennung eines homogenen Gemisches im gesamten Brennraum gleichzeitig beginnt. Im Gegensatz zur Verbrennung des inhomogenen Diesel-Gemisches in heutigen Motoren, soll eine nahezu schadstofffreie Verbrennung möglich werden. Vgl. *Appel et al. (2013)*, S. 439.

¹⁵⁶ Vgl. *Appel et al. (2013)*, S. 380 und *Law et al. (2011)*, S. 4-1 - 4-10.

¹⁵⁷ VTG steht für verstellbare Turbinengeometrie. „Mit dem VTG-Lader ist es möglich, die Turbinengeometrie [Anm.: des Turboladers] in Abhängigkeit vom Motorbetriebspunkt zu verstellen. Durch die Möglichkeit der variablen Turbinenverstellung wird bei jeder Drehzahl des Motors die gesamte Abgasenergie genutzt, was sich günstig auf den Wirkungsgrad der Turbine auswirkt und den Gesamtwirkungsgrad des Motors verbessert.“ Vgl. *Appel et al. (2013)*, S. 445.

¹⁵⁸ SCR beschreibt die selektive katalytische Reduktion (engl.: selective catalytic reduction) von Stickoxiden in Abgasen mittels Ammoniak.

¹⁵⁹ Vgl. *Law et al. (2011)*, S. 4-1 - 4-10 und *Hill et al. (2011)*, S. 115.

¹⁶⁰ Vgl. *Law et al. (2011)*, S. 4-1 - 4-10; *Hill et al. (2011)*, S. 115.

Dem Dieselantrieb in NFZ werden durch höhere Einspritzdrücke, weitere Reduktion der Reibungsverluste im Antriebsstrang, optimierte Kraftstoffeinspritzung, eine Abgasreinigung ohne EGR, zusätzliche Aufladung mit verbundenem Downsizing und Downsizing des Motors ein weiteres Kraftstoffeinsparpotenzial von etwa 2 bis 4 % zugesprochen. Darüber hinaus könnten weitere marginale Verbesserungen durch neue Grundmotorkonzeptionen ermöglicht werden.¹⁶¹

4.1.2 Alternative Motorenkonzepte

Alternative Kraftstoffe können eine wirksame Maßnahme zur Reduktion der CO₂-Emissionen des Straßengüterverkehrs und des öffentlichen Personenverkehrs sein. Durch geringere Emissionen in der Herstellung und Förderung der Kraftstoffe (WtT¹⁶²) sowie geringere spezifische Emissionen in der Verbrennung des Kraftstoffs (TtW¹⁶³) können die Treibhausgas-Emissionen des Transportsektors reduziert werden (vgl. Abbildung 11). Für den Einsatz in NFZ kommen aus heutiger Sicht neben fossilem Diesel, biogene Flüssigkraftstoffe, fossiles Erdgas (CNG), Biogas (CBG), elektrische Energie und Wasserstoff in Frage.¹⁶⁴

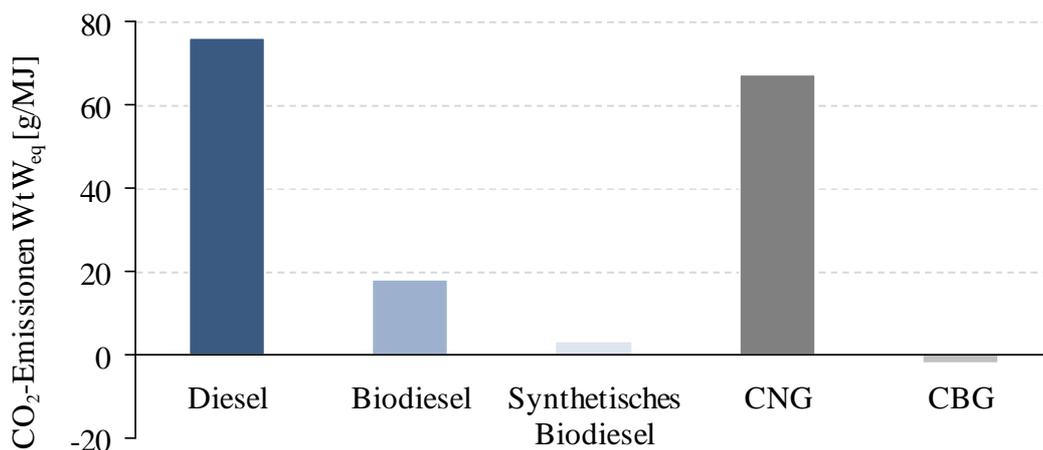


Abbildung 11: Well-to-Wheel CO₂-Emissionen [g/MJ] von alternativen Kraftstoffen im Vergleich zu Diesel¹⁶⁵

¹⁶¹ Vgl. Schöffmann et al. (2014).

¹⁶² WtT: Well-to-Tank, beschreibt die Wertschöpfungskette sowie den damit verbundenen energetischen Aufwand in der Bereitstellung von Kraftstoffen von der Quelle bis zum Tank eines Verkehrsträgers.

¹⁶³ TtW: Tank-to-Wheel beschreibt die Wirkkette der Umwandlung der chemischen Bindungsenergie von Kraftstoffen in die kinetische Energie zum Antrieb von Fahrzeugen.

¹⁶⁴ Vgl. Geitmann (2008).

¹⁶⁵ Eigene Abbildung in Anlehnung an Edwards et al. (2011). Die Werte sind auf Basis der durchschnittlichen Zusammensetzung der Kraftstoffe auf Basis ihrer Herkunft berechnet. Beispielsweise können die WtW-Emissionen von CNG deutlich höher als die des Diesels sein, falls das Gas beispielsweise per LNG Tanker nach Europa verschifft wurde. Ebenso ist der Pipeline Transport von Erdgas aus Russland mit Leitungsverlusten verbunden, was sich ebenso negativ auf die WtW-Bilanz auswirkt. Europäisches Erdgas hingegen hat eine bessere WtW-Bilanz als der angegebene Durchschnittswert. Gleiches gilt für die Prämissen hinter der Herstellung der biogenen Kraftstoffe. Biogas hat durch die Verwertung von Gülle eine negative WtW CO₂-Emissionsbilanz.

Moderne Dieselmotoren können mit 100 % Biodiesel betrieben werden. Die Vorteile von biogenen Kraftstoffen sind insbesondere die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern, die Nutzung nachwachsender Rohstoffe zum nahezu CO₂-neutralen Transport sowie die Beibehaltung der bewährten Antriebskonzepte und Kraftstoffeigenschaften. Allerdings sind die Erzeugungskosten biogener Kraftstoffe derzeit noch weit über denen konventioneller Kraftstoffe. Darüber hinaus kann es beim Anbau von Biomasse für energetische Zwecke zu einem Interessenskonflikt mit dem Anbau von Nahrungsmitteln kommen.¹⁶⁶ Synthetische Kraftstoffe, *sogenannte Designerkraftstoffe*, könnten zukünftig dahingehend weiterentwickelt werden, dass die molekulare Struktur der Energieträger der chemischen Kraftstoffeigenschaften gezielt so konstruiert werden, um den Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren weiter zu erhöhen.¹⁶⁷

Zum Betrieb von NFZ mit gasförmigen Energieträgern oder elektrischer Energie werden neue Antriebskonzepte notwendig. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

4.1.2.1 Gasmotoren

Gasmotoren sind aus Sicht der NFZ-Hersteller interessant, da die TtW-Emissionen deutlich unter denen des Dieselmotors liegen und Erdgasmotoren im Vergleich zu elektrisch betriebenen NFZ weitaus geringere Modifikationen an Fahrzeug und Antriebsstrang erfordern. Allerdings stellen Gasmotoren in NFZ für die Automobilindustrie eine größere Herausforderung als im PKW-Segment dar, weil Gasmotoren technologisch überwiegend Ottomotoren entsprechen. Jedoch wird Benzin als Kraftstoff für mittelschwere und schwere NFZ nicht verwendet, sodass es keine Erfahrungen und Komponenten für Ottomotoren zum Einsatz in NFZ gibt. Daher werden Gasmotoren für NFZ derzeit von Dieselmotoren abgeleitet.¹⁶⁸

Erdgas-betriebene Motoren bieten einige Vorteile: Der Kraftstoff wird in einem gasförmigen Zustand in die Zylinder eingespritzt, sodass im Zylinder ein homogenes Kraftstoff-Luft-Gemisch entsteht, welches eine gleichmäßige, geräuscharme Verbrennung begünstigt. Erdgas-NFZ sind dadurch wesentlich leiser als die baugleichen Modelle, die mit Diesel betrieben werden. Darüber hinaus sind Schadstoff-Emissionen von Gasfahrzeugen durch die homogene Verbrennung im Vergleich zum Dieselmotor signifikant geringer.¹⁶⁹ Jedoch findet die Verbrennung von Erdgas nicht durch Selbst- sondern Fremdzündung statt, wodurch eine umfangreiche Anpassung der Komponenten notwendig wird. Ebenfalls sind derzeit Zylinder, Kolben und andere Komponenten nicht auf die Verbrennung von Erdgas optimiert, sodass sich ein geringerer Wirkungsgrad als möglich einstellt.¹⁷⁰ Aufgrund des durch die Selbstzündung bedingten höheren Verdichtungsverhältnisses, besitzt der Diesel- im Vergleich zum Ottomotor ohnehin einen höheren Wirkungsgrad. Die höhere Abgaswärme des fremdgezündeten Motors bietet jedoch die Möglichkeit, durch

¹⁶⁶ Vgl. *Bräuninger et al.* (2007), S. 23.

¹⁶⁷ Vgl. *Stan* (2012), S. 260.

¹⁶⁸ Vgl. *Heuser et al.* (2014), S. 392.

¹⁶⁹ Vgl. *Geitmann* (2008), S. 120–121.

¹⁷⁰ Vgl. *Dietsche* (2007), S. 691.

die zusätzliche Nutzung der Abgaswärme, die prinzipbedingten Wirkungsgradnachteile teilweise zu kompensieren.¹⁷¹ Ferner wären durch eine spezifische Auslegung der Motoren auf die Verbrennung von Erdgas unter Fremdzündung Kosteneinsparungen durch schlankere Bauweise aufgrund geringerer Mitteldrücke möglich. Zusätzlich kann durch die homogene Verbrennung des Erdgases die Abgasreinigung reduziert werden. Statt einem Dieselpartikelfilter und SCR-Katalysator genügt ein vergleichsweise einfacher Drei-Wege-Katalysator zur Erreichung der Euro-6 Abgasnorm.¹⁷²

Der wesentliche Nachteil von Erdgas betriebenen Fahrzeugen liegt im geringen Heizwert pro Volumeneinheit des Kraftstoffs, was die Reichweite bei gleicher Tankgröße drastisch reduziert. Bei Normaldruck hat Erdgas nur ein Tausendstel des Heizwertes eines Liters Diesel. Daher wird Erdgas entweder unter hohem Druck gasförmig gespeichert (CNG) oder in kryogenen Tanks als Flüssigkraftstoff (LNG) gelagert.¹⁷³ CNG hat unter 200 bar etwa ein Viertel des Heizwertes von Diesel, LNG bei -163°C etwa 70 % des Heizwertes pro Volumeneinheit Diesel. Neben der geringeren Reichweite bzw. dem Mehrbedarf an Platz für die Tanks, sind die CNG und LNG-Tanks deutlich teurer als reguläre Dieseltanks. Besonders Kryotanks sind durch die viel aufwändigere Konstruktion und zusätzlichen Komponenten wesentlich teurer und komplexer zu fertigen.

4.1.2.2 Elektroantrieb

Der Elektroantrieb hebt sich insbesondere durch den lokal emissionsfreien Betrieb, auf Basis eines universell herstellbaren Energieträgers, von anderen Antriebskonzepten ab. Eine nahezu vollständige CO₂-Emissionsvermeidung ist allerdings nur durch Nutzung elektrischer Energie aus regenerativen Quellen erreichbar. Die Entwicklung von Elektro-NFZ wird durch den vergleichsweise einfachen Systemaufbau begünstigt. Der Antriebsstrang besteht im Wesentlichen lediglich aus den Komponenten Energiespeicher, Elektromotor, Leistungselektronik und Steuergeräten.¹⁷⁴ Werden Radnabenmotoren eingesetzt entfällt darüber hinaus das Differentialgetriebe.¹⁷⁵ Tabelle 2 verdeutlicht die Vor- und Nachteile von verschiedenen Elektromotoren.

Aufgrund der Drehmomentcharakteristik ist der Elektromotor zum Antrieb von NFZ ideal, da das volle Drehmoment bereits bei Drehzahl Null zur Verfügung steht.¹⁷⁶ Im Gegensatz zum konventionellen Antriebsstrang sind dadurch keine Getriebe oder Kupplungen notwendig. Daher entstehen in der Anordnung des Antriebs neue Freiheitsgrade: Zentralmotor (ein Motor je Fahrzeug) vs. Achsmotor (ein Motor je Achse) vs. Radnabenmotor (ein Motor je Rad).¹⁷⁷ Tabelle 2

¹⁷¹ Vgl. *Heuser et al.* (2014), S. 400.

¹⁷² Vgl. *Dietsche* (2007), S. 691–693.

¹⁷³ CNG steht für engl. Compressed Natural Gas, komprimiertes Erdgas. LNG steht für engl. Liquefied Natural Gas, verflüssigtes Erdgas.

¹⁷⁴ Vgl. *Wallentowitz und Freialdenhoven* (2011), S. 72–73.

¹⁷⁵ Vgl. *Naunin* (2007), S. 28.

¹⁷⁶ Vgl. *Stan* (2012), S. 268.

¹⁷⁷ Vgl. *Wallentowitz und Freialdenhoven* (2011), S. 90.

zeigt, dass Elektromotoren mit adäquaten Fahreigenschaften bereits verfügbar sind. Die Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen konzentrieren sich daher derzeit hauptsächlich auf die Verbesserung der Energiespeicherung mit Akkumulatoren und die Ladetechnologie.

	Gleichstrom		Synchron		Asyn- chron	Trans- versal- fluss	Re- luktanz	
	elektr. erregt	perm. erregt	elektr. erregt	perm. erregt				
Leistungsdichte	o	+	+	++	+	++	++	
Zuverlässigkeit	o	+	+	+	++	+	++	
Wirkungsgrad	--	-	+	++	o	++	+	
Regel-/Steuerbarkeit	++	++	+	+	o	+	++	
Geräuschpegel	-	-	+	+	+	+	+	
Therm.Überlastschutz	-	-	+	++	+	+	+	
Entwicklungsstand	++		o	o	+	-	o	
Kosten Motor	--		-	-	+	--	++	
Kosten Steuerung	++		-	--	-	o	o	
Kosten gesamt	o		o	-	+	--	+	
	++	sehr gut	+	gut	o	durchschnittlich	-	schlecht
						--	sehr schlecht	

Tabelle 2: Übersicht über Technologie und Kosten von Elektromotoren¹⁷⁸

Die Lithium-Ionen-Technologie ist derzeit eine vielversprechende Alternative. Sie bietet eine hohe Energiedichte und besitzt darüber hinaus ein signifikantes Entwicklungspotenzial. Derzeit sind die Kosten für Lithium-Batterien jedoch noch sehr hoch und die Lebensdauer entspricht nicht den Anforderungen von NFZ. Allerdings wird dieser Technologie ein großes Potenzial zur Kostendegression und Weiterentwicklung unterstellt. Die Entwicklung der Batterietechnologie ist gegenwärtig durch das Spannungsfeld zu hoher Produktionskosten einerseits und der Erhöhung von Energie- und Leistungsdichte, Lebensdauer und Sicherheit andererseits geprägt. Batterien für den Einsatz in NFZ müssen sowohl ausreichend Energie bei möglichst geringem Gewicht speichern (Energiedichte → Reichweite pro kg Batteriegewicht) als auch aufgrund der hohen Fahrzeugmasse ausreichend Leistung bereitstellen (Leistungsdichte → Beschleunigung/Rekuperation) können. Eine lange Lebensdauer der Batterien macht einen etwaigen Austausch hinfällig und reduziert somit die Gesamtbetriebskosten. Eine geringe Ladezeit und höchste Sicherheit erhöhen die Alltagstauglichkeit batterieelektrisch-betriebener NFZ.¹⁷⁹ Abbildung 12 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile sowie den Entwicklungsstand diverser Batterien.

¹⁷⁸ Eigene Abbildung in Anlehnung an Wallentowitz und Freialdenhoven (2011), S. 103; Naunin (2007), S. 28.

¹⁷⁹ Vgl. Naunin (2007), S. 34f.

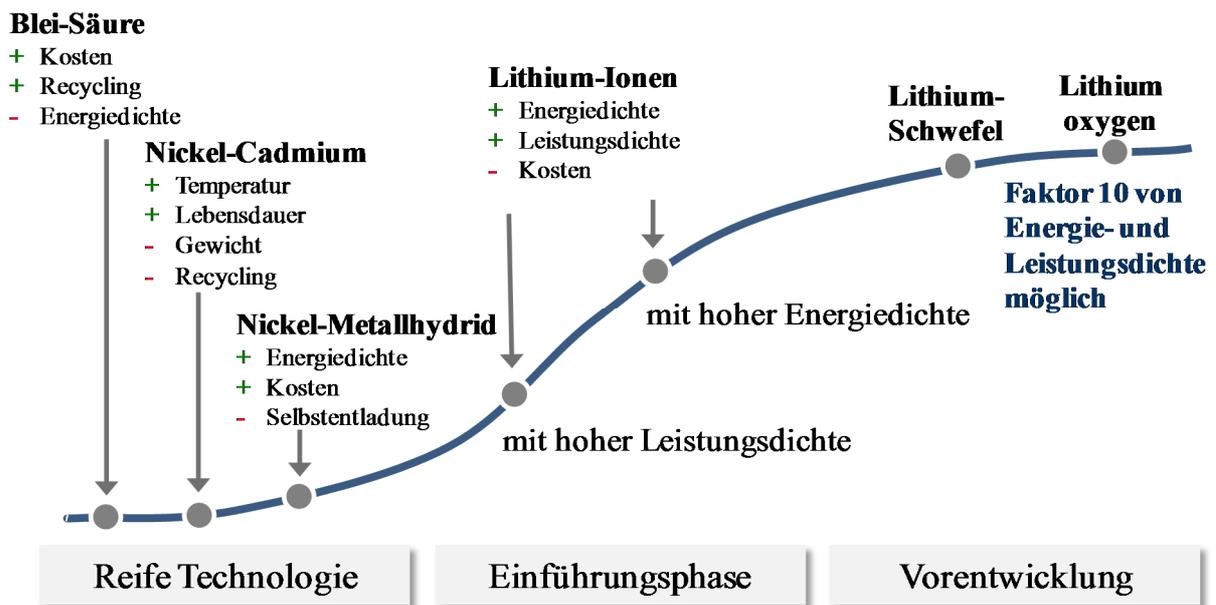


Abbildung 12: Entwicklungspotenzial und Eignung der Batterietechnik für den Einsatz in Automobilen¹⁸⁰

Es gibt zahlreiche Konzepte zur Bereitstellung der Energie für batteriebetriebene elektrische NFZ. Das vergleichsweise simpelste Konzept sind Steckerladegeräte. Standardladegeräte können über Nacht (~ 8h) die Batterie von MD-NFZ vollständig aufladen, Schnellladegeräte sind dazu heute schon sogar in etwa drei Stunden für MD und in sechs Stunden für HD-NFZ in der Lage. Jedoch liegt die Reichweite batteriebetriebener Elektro-NFZ deutlich unter der von Gas- und Dieselfahrzeugen.

Eine weitere Alternative ist das induktive Laden. Dabei wird über ein elektromagnetisches Feld zwischen Ladestation und Empfängereinheit des Fahrzeugs Strom übertragen. Da die Sendeeinheit des Ladegeräts beispielsweise auch im Straßenboden installiert werden kann, sind vielfältige Einsatzmöglichkeiten vom stationären bis hin zum volldynamischen Laden von Elektro-NFZ im Fahrbetrieb realisierbar. Allerdings sind mit induktiven Ladestationen hohe spezifische Investitionskosten verbunden.¹⁸¹

Des Weiteren kann die Energieversorgung von elektrischen NFZ auch über den Austausch von Batterien erfolgen, um somit die Ladezeit auf ein zum Dieselantrieb vergleichbares Niveau zu reduzieren.¹⁸² Ebenso gibt es den Einsatz von Oberleitungen im Stadtbetrieb oder Versuche mit Oberleitungs-LKW auf Autobahnen.¹⁸³ Diese Varianten sind allerdings mit massiven Investitionskosten in die Infrastruktur verbunden.

Die Stromerzeugung aus Wasserstoff mit Brennstoffzellen (BSZ) ist eine weitere Möglichkeit, NFZ mit Elektromotoren zu betreiben. Wasserstoff wird entweder unter hohem Druck (bis zu

¹⁸⁰ Eigene Abbildung in Anlehnung an *Duleep et al.* (2011), S. 12.

¹⁸¹ Vgl. *den Boer et al.* (2013), S. 33–39.

¹⁸² Vgl. *den Boer et al.* (2013), S. 39–42 beispielsweise *E-FORCE ONE AG* (2014), online.

¹⁸³ Vgl. *den Boer et al.* (2013), S. 42–47 beispielsweise *Martini* (2012), online.

700 bar) oder tiefen Temperaturen (bis zu -253 °C) gespeichert, um die Dichte des Gases zu erhöhen und damit die Reichweite von Fahrzeugen pro Volumeneinheit Tankgröße zu steigern. Für den Betrieb von NFZ kommen meist Niedertemperatur-BSZ mit Polymer-Elektrolyt-Membranen zum Einsatz.¹⁸⁴ Die Niedertemperatur-BSZ haben heute eine vergleichbare Leistungsdichte wie konventionelle Dieselmotoren, müssen allerdings bei einer ausreichend leistungsstarken Batterie nicht dieselbe Spitzenleistung wie Verbrennungsmotoren erzeugen können, da diese nur den durchschnittlichen Energieverbrauch des Elektromotors decken müssen. Eine wesentliche Barriere heutiger wasserstoffbetriebener NFZ sind die Lebensdauernforderungen der NFZ-Industrie sowie die Herstellung und Verteilung von Wasserstoff.¹⁸⁵ Außerdem führt der Einsatz wasserstoffbetriebener NFZ nur dann zu einer signifikanten CO_2 -Reduktion, wenn der Wasserstoff auf Basis von regenerativem Strom hergestellt wurde. Insgesamt befinden sich BSZ-NFZ noch in einem sehr frühen Vorentwicklungsstadium, sodass gegenwärtig keine verlässlichen Aussagen zum zukünftigen technischen und wirtschaftlichen Potenzial dieses Antriebskonzeptes getroffen werden kann.¹⁸⁶ Die BSZ wird für die kommenden Jahrzehnte eine Nischenanwendung bleiben.¹⁸⁷

4.1.2.3 Hybridantriebe

Als Hybridfahrzeuge werden Fahrzeugantriebe bezeichnet, die über mindestens zwei unterschiedliche Energiewandler und Energiespeichersysteme verfügen.¹⁸⁸ Üblicherweise wird unter einem Hybridfahrzeug die Kombination eines Verbrennungsmotors (inklusive des spezifischen Flüssigkraftstofftanks) mit einem Elektromotor (inklusive Batterie) verstanden. Solche Fahrzeuge umfassen verschiedene Betriebsmodi: Rein *elektrisches Fahren*; *Boosten* bezeichnet die Unterstützung des Verbrennungsmotors in Beschleunigungsphasen; in der *Rekuperation* wird für die elektrischen Fahrzeugsysteme in Verzögerungsphasen Strom erzeugt; im *Generatorbetrieb* wird ein Teil der Energie des Verbrennungsmotors für den Antrieb verwendet, der andere Teil wird in der Batterie gespeichert; *Segeln* bezeichnet das Fahren ohne aktiven Antrieb, d.h. Verbrennungs- und Elektromotor laufen nicht; die *Start/Stop-Funktion* schaltet den Verbrennungsmotor nahezu verzögerungsfrei in Stand- oder Segelphasen an und aus.¹⁸⁹

Hybrid-NFZ werden nach ihrem Hybridisierungsgrad unterschieden¹⁹⁰: Ein *Mikro-Hybrid*, die schwächste Hybridvariante, verzichtet auf den Einbau eines elektrischen Antriebsaggregates zum Vortrieb des Fahrzeugs. Stattdessen dient der Elektromotor dem verzögerungsfreien Starten des Verbrennungsmotors. Mittels Rekuperation, Segeln und Start/Stop soll der Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors gesenkt werden. Dieses System ist vergleichsweise einfach und preis-

¹⁸⁴ Vgl. Dietsche (2007), S. 328–329; Stan (2012), S. 240–241.

¹⁸⁵ Vgl. den Boer et al. (2013), S. 49.

¹⁸⁶ Vgl. Appel et al. (2013), S. 10; Law et al. (2011), S. 63.

¹⁸⁷ Vgl. Wallentowitz und Freialdenhoven (2011), S. 88; Hill et al. (2011), S. 129.

¹⁸⁸ Vgl. Naunin (2007), S. 67.

¹⁸⁹ Vgl. Dietsche (2007), S. 748–750.

¹⁹⁰ Vgl. Stan (2012), S. 344.

wert zu bauen, spart allerdings vergleichsweise geringe Mengen an Kraftstoff. Beim *Mild-Hybrid* wird der Verbrennungsmotor durch ein kleines elektrisches Antriebsaggregat für das Boosten erweitert. Um das Fahrzeug alleine zu bewegen ist der Elektromotor allerdings zu schwach. Ein *Vollhybrid* schließt die Funktionen des Mild-Hybrid ein, darüber hinaus kann das Fahrzeug rein elektrisch gefahren werden. Autarke Vollhybride können des Weiteren um eine *Plug-in* Funktion erweitert sein, sodass die Batterie des Fahrzeugs auch über eine externe Stromquelle (Ladestation oder Hausstromanschluss) geladen werden kann.¹⁹¹

Derzeit existieren zwei prinzipielle technische Konzepte für die getriebeseitige Integration von Elektro- und Verbrennungsmotor auf dem NFZ-Markt: Beim *seriellen Hybrid* treibt der Elektromotor allein das Fahrzeug an und wird dabei von Verbrennungsmotor und Batterie mit Energie versorgt. Dadurch kann der Verbrennungsmotor stets im optimalen Drehzahlbereich betrieben werden, um somit den bestmöglichen Wirkungsgrad zu erzielen. Nachteilig ist der niedrigere Wirkungsgrad der rein elektrischen Kraftübertragung zwischen Verbrennungsmotor und Antriebsachse im Vergleich zu einer mechanischen Kopplung. Ein Fahrzeug mit *parallelem Hybrid* wird sowohl vom Verbrennungs- als auch vom Elektromotor angetrieben. Dabei wird der Verbrennungsmotor als Hauptantrieb und der Elektromotor nur als Hilfsaggregat, das z. B. beim Beschleunigen zusätzliche Kraft aufbringt, verwendet. Der Vorteil besteht darin, dass der Verbrennungsmotor in seinen ineffizienten Wirkungsgradbereichen unterstützt wird.¹⁹²

Zusätzlich zur Reduzierung der CO₂-Emissionen ergeben sich durch die Hybridisierung besonders im Stadtverkehr weitere Vorteile. Dabei können die folgenden Verbesserungspotenziale gegenüber einem konventionellen Dieselmotor realisiert werden:

- Wirkungsgradoptimierte Betriebsweise des Verbrennungsmotors
- geringere Schadstoff- und Lärmemissionen in Ballungsgebieten und Umweltzonen
- reduzierter Energieverbrauch durch Nutzung der Bremsenergie
- Reduktion Erdölverbrauch durch ‚Zutanken‘ von elektrischer Energie¹⁹³

Diesen Vorteilen stehen Mehrkosten für Batterie und elektrifizierte Antriebskomponenten gegenüber. Die Abstimmung der elektrifizierten mit den konventionellen Komponenten und die technisch anspruchsvolle Integration dieser erfordern von Bauraummanagement, Antrieb und Fahrwerk ein hohes Systemwissen sowie langfristig ausgelegte Entwicklungsprogramme auf Seiten der Hersteller.

¹⁹¹ Vgl. Naunin (2007), S. 70; Wallentowitz und Freialdenhoven (2011), S. 58–70; Dietsche (2007), S. 746–747; 750.

¹⁹² Vgl. Wallentowitz und Freialdenhoven (2011), S. 58–70; Dietsche (2007), S. 744–746; Naunin (2007), S. 67–72.

¹⁹³ Vgl. Naunin (2007), S. 67.

4.1.2.4 Hydraulische Hybridisierung

Das Grundkonzept des hydraulischen Hybrids oder Hydrostatisch Regenerativen Bremssystems entspricht dem des elektrischen Hybrids. Ziel ist es die kinetische Energie beim Bremsen nicht zu vernichten, sondern in hydraulische Energie umzuwandeln und zu speichern. Beim nächsten Beschleunigungsvorgang wird die gespeicherte Energie wieder in den Fahrantrieb eingespeist und entlastet so den antreibenden Verbrennungsmotor. Eine hydraulische Axialkolbeneinheit ist über ein Getriebe mit der Kurbelwelle verbunden. Bei Bremsvorgängen wandelt die Axialkolbeneinheit die kinetische Energie in potentielle Energie um, indem der Druck in einem Druckspeicher durch das Einpumpen von Hydraulikflüssigkeit ansteigt. In Beschleunigungsphasen wird der Prozess umgekehrt und die Hydraulikflüssigkeit treibt die Axialkolbeneinheit an, die nun als Motor fungiert. Die Auslegung des Hybrid erfolgt für straßengebundene NFZ mit einem mechanischen Antriebsstrang parallel.¹⁹⁴

Der hydraulische Hybrid entfaltet seine Vorteile insbesondere bei schweren NFZ, die in sehr kurzen Stop-and-Go-Fahrzyklen mit hoher Anfahrts- und Bremsleistung eingesetzt werden, da der hydraulische Hybrid im Gegensatz zum elektrischen Hybrid eine weitaus höhere Leistungsdichte besitzt. Bei Müllsammelfahrzeugen sind Kraftstoffeinsparungen von bis zu 25 % möglich.¹⁹⁵ Allerdings sind mit dem hydraulischen Hybrid ein hohes Zusatzgewicht und eine hohe Bauraumanforderung verbunden. Ferner ist für den hydraulischen Hybrid eine starke Umstellung im Fahrstil des Fahrers notwendig, um das maximale Einsparpotenzial dieser Maßnahme zu erreichen.

4.1.3 CO₂-sparende Technologien für NFZ

Langfristig wird ein CO₂-neutraler Transport ausschließlich durch alternative Kraftstoffe möglich sein. Kurz- bis mittelfristig werden zusätzliche CO₂-sparende Maßnahmen in der Verbrennungsmotorperipherie, am Gesamtfahrzeug und im Fahrbetrieb den ökologischen Fußabdruck des straßengebundenen Transportsystems schon deutlich reduzieren können. Während die Abgaswärmenutzung oder Optimierung der Getriebe an den Einsatz von Verbrennungsmotoren gebunden sind, führen die Optimierungsmaßnahmen am Gesamtfahrzeug und im Fahrbetrieb auch langfristig und unabhängig vom Antriebskonzept zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs.

4.1.3.1 Abgaswärmenutzung

Ein wesentlicher Teil der durch die Kraftstoffverbrennung im Motor erzeugten Energie geht über das Abgas in Form thermischer Energie verloren. Um die Verlustenergie zu reduzieren, kann die Abgaswärme in einer weiteren Abgasturbine (Turbocompound Technologie) oder mittels eines

¹⁹⁴ Vgl. *Kliffken et al.* (2009).

¹⁹⁵ Vgl. *Kliffken et al.* (2009), S. 38–40.

Rankine-Prozesses genutzt werden, um diese in mechanische oder elektrische Energie umzuwandeln.

Bei der Turbocompound-Technologie wird dem normalen Turbolader eine weitere, hochdrehende, Abgasturbine nachgeschaltet. Die Rotationsenergie der Abgasturbine kann anschließend entweder als mechanische oder elektrische Energie verwendet werden. Bei der mechanischen Turbocompound-Technologie wird das Drehmoment mittels eines mechanischen oder hydraulischen Getriebes auf die Kurbelwelle des Antriebsstrangs übertragen. Die zusätzliche Rotationsenergie am Schwungrad kann so entweder als zusätzliche Antriebskraft oder zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs genutzt werden. Alternativ kann die Abgasturbine einen Generator antreiben, um elektrische Energie zu erzeugen, welche zum Betrieb elektrifizierter Nebenverbraucher oder zur Ladung der Batterie genutzt wird.¹⁹⁶

Einen hohen Nutzen bietet die Turbocompound-Technologie in Anwendungsfällen, in denen der Verbrennungsmotor über eine längere Dauer in höchsten Lastbereichen arbeitet. Dies spricht für den Einsatz in Bauverkehrs-LKW, allerdings führt das Downsizing und die Hybridisierung des Antriebsstrangs zu einer höheren mittleren Leistung von Verbrennungsmotoren, sodass zukünftig auch der Einsatz in städtischen Verteilerfahrzeugen oder Stadtbussen interessant werden könnte.

Die Abgaswärmenutzung kann alternativ über einen thermischen Rankine-Kreisprozess erfolgen. Dabei wird über einen Wärmetauscher mit der Abgaswärme ein Fluid verdampft, das anschließend in einem Kreisprozess eine Dampfturbine oder einen Hubkolben antreibt. Als Arbeitsfluid wird meist Ethanol verwendet, um den Anforderungen an Frostschutz, Umweltverträglichkeit und Verfügbarkeit zu entsprechen. Bei einem typischen Fernverkehrsfahrzeug können so knapp 20 kW zusätzliche Leistung generiert werden.¹⁹⁷ Der Rankine-Prozess eignet sich eher für den Fernverkehrseinsatz mit kontinuierlichem Teillastbetrieb, während die Turbocompound-Technologie ihr volles Potenzial unter Volllast (beispielsweise Bauverkehr) entfaltet. Je nach Anwendungsfall ist durch die Abgaswärmenutzung ein Kraftstoffeinsparpotenzial von 1-6 % realisierbar.¹⁹⁸

4.1.3.2 Weitere Maßnahmen in der Motorperipherie

Getriebe

Moderne NFZ sind heute schon mit ausgereiften und hoch effizienten Getrieben ausgestattet. Zwar kommen vereinzelt noch Handschaltungen in kleinen und mittleren Verteilerfahrzeugen und im Bauverkehr zum Einsatz, die Mehrheit der heute neu zugelassenen NFZ ist jedoch mit Automatikgetriebe ausgestattet. Im Fernverkehr wird auf bis zu 18 Gänge für ein jederzeit optimales Übersetzungsverhältnis in allen Fahrmodi und Gefällesituationen zurückgegriffen. In

¹⁹⁶ Vgl. *Hill et al.* (2011), S. 124 und Herstellerinformationen von Scania und Daimler.

¹⁹⁷ Vgl. *Bredel et al.* (2011), S. 313.

¹⁹⁸ Vgl. *Hill et al.* (2011), S. 124–125.

städtischen Anwendungsfällen ist oftmals ein 6-Gang-Getriebe ausreichend. Aufgrund der ausgereiften Getriebetechnik sind wesentliche Effizienzsteigerungen kaum möglich, sodass mechanische Verbesserungen durch Reibungsminimierung im Getriebe bestenfalls 1 % Kraftstoff einsparen würden. Ein weitaus größerer Hebel liegt in der Substitution manueller Schaltgetriebe durch Automatikgetriebe zur Optimierung der Schaltvorgänge.¹⁹⁹ Darüber hinaus bieten Automatikgetriebe die Grundvoraussetzung für den Einsatz vieler Fahrerassistenzsysteme für vorausschauende Geschwindigkeitsregelung zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs (siehe Kapitel 4.1.3.4).

Elektrifizierte und bedarfsabhängige Nebenaggregate

Standardmäßige Nebenaggregate des Verbrennungsmotors sind an den Motor angebaute Zusatzgeräte wie Wasser- und Ölpumpe, Klimakompressor, Drehstromgenerator, Servopumpe für die Lenkhilfe oder der Motorlüfter.²⁰⁰ Die Nebenaggregate sind zwar nur für einen geringen Anteil des Gesamtkraftstoffverbrauchs verantwortlich, dennoch kann ihr Energieverbrauch erheblich reduziert werden. Bisher werden die Nebenaggregate direkt über einen Keilriemen vom Motor angetrieben und laufen somit immer unter Volllast – auch wenn ihr Einsatz gerade nicht notwendig ist. Deshalb werden zunehmend Kupplungen in den Nebenaggregaten eingesetzt, um eine bedarfsabhängige Leistungsabnahme zu erreichen. Der nächste Schritt zur Effizienzsteigerung liegt in der vollständigen Elektrifizierung der Nebenaggregate, um auch die Reibungsverluste im Leerlauf zu reduzieren.²⁰¹ Dadurch wird ein Kraftstoffeinsparpotenzial aus der Optimierung der Nebenaggregate von bis zu 3 % erwartet.

4.1.3.3 Optimierungsmaßnahmen am Gesamtfahrzeug

Aerodynamik

In Langstrecken Anwendungen von NFZ geht ein signifikanter Anteil des Kraftstoffverbrauchs auf die Überwindung des Luftwiderstandes zurück. Diesem Faktor sind sich NFZ-Hersteller bewusst, sodass Aerodynamikverbesserung schon lange ein wesentliches Instrument zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs ist. Allerdings gibt es drei wesentliche Barrieren für weitere Einsparpotenziale. Die Verbesserung der Aerodynamik ist durch eine veränderte Konstruktion oder Anbringung von Spoilern mit erhöhten Kosten verbunden. Da der Einsatz eines NFZ-Modells in unterschiedlichen Anwendungsfällen mit verschiedenen hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten erfolgt, sind einige Maßnahmen nur als aufpreispflichtige Zusatzausstattung erhältlich und damit von der Auswahl der Kunden abhängig. Des Weiteren kommen im Fernverkehr, als Anwendungsfall mit dem höchsten Einsparpotenzial aerodynamischer Maßnahmen, meist Sattelzugmaschinen mit Trailer zum Einsatz.²⁰² Die aerodynamische Optimierung erfolgt jedoch für Zugmaschine und Trailer getrennt, sodass nicht das gesamte Potenzial ausgeschöpft werden kann. Zu-

¹⁹⁹ Vgl. Hill *et al.* (2011), S. 112-115;130-131.

²⁰⁰ Vgl. Appel *et al.* (2013), S. 467.

²⁰¹ Vgl. Hill *et al.* (2011), S. 121–123.

²⁰² Vgl. Hill *et al.* (2011), S. 133–139.

letzt liegt die größte Einschränkung des Einsatzes aerodynamischer Maßnahmen in den Abmessungsbeschränkungen für NFZ, da die Maximierung des Transportvolumens – auch im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch je Transporteinheit – Vorrang hat. Derzeit wird über Änderungen der europäischen Direktive (96/53/EC²⁰³) zu NFZ-Abmessungen beraten, um den Einsatz von Maßnahmen zur Verbesserung der Aerodynamik zu fördern, die überwiegend mit einer Längenänderung verbunden sind. Potenzial zur aerodynamischen Verbesserung besteht an zahlreichen Stellen eines Fahrzeuges. Abbildung 13 zeigt die Möglichkeiten zur aerodynamischen Verbesserung durch die Anbringung zusätzlicher Bauteile am Beispiel eines Sattelzugs für den Fernverkehr.

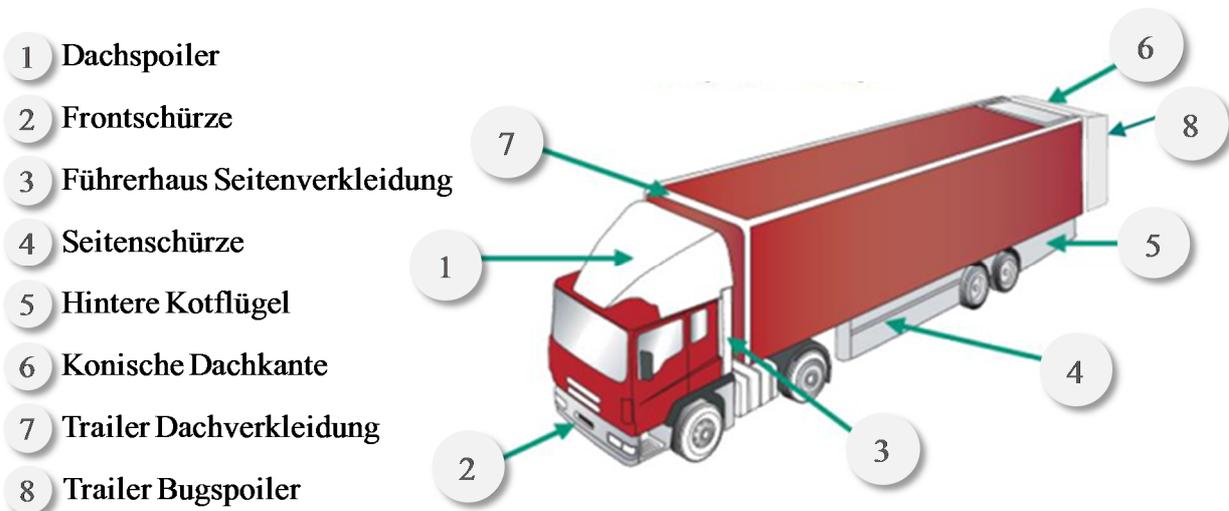


Abbildung 13: Verbesserung der Aerodynamik von LKW²⁰⁴

Über das tatsächliche Einsparpotenzial gibt es unterschiedliche Angaben, welche stark vom Einsatzprofil des Fahrzeugs und der Referenzbasis abhängen. Unter Einhaltung heutiger Abmessungsvorschriften wird eine Reduktion von 2 % bis 4 % erreichbar sein, das maximale Einsparpotenzial bei Ausnutzung aller Maßnahmen unter neuen regulatorischen Rahmenbedingungen wird für eine Sattelzugmaschine mit Trailer im klassischen Fernverkehrseinsatz bei bis zu 15 % liegen. Abbildung 14 zeigt die Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen auf Kraftstoffverbrauch, Länge und Transportvolumen.

²⁰³ Vgl. Kapitel 6.1.

²⁰⁴ Eigene Abbildung in Anlehnung an *Breemersch und Akkermans* (2014), S. 14.

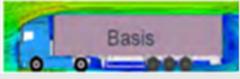
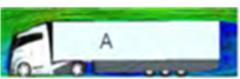
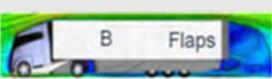
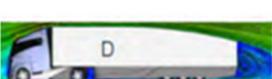
Evolutionsstufen	Längenänderung Front & Heck	# Europaletten [1m Höhe]	Kraftstoff- reduktion	
			Stadt	Fern
Basisfahrzeug 	Front: 0 m Heck: 0 m	68	Stadt	0%
			Regional	0%
			Fern	0%
Anpassung Sattelzugmaschine 	Front: + 0,8 m Heck: 0 m	68	Stadt	-1,5%
			Regional	-2%
			Fern	-5%
Spoiler am Trailer 	Front: + 0,8 m Heck: + 0,6 m	68	Stadt	-2%
			Regional	-3%
			Fern	-8%
Trailer + 1,2 m 	Front: + 0,8 m Heck: + 1,2 m	70	Stadt	-3%
			Regional	-4%
			Fern	-10%
"Boat tail" 	Front: + 0,8 m Heck: + 2,7 m	70	Stadt	-5%
			Regional	-6%
			Fern	-15%

Abbildung 14: Kraftstoffreduktionspotenzial aerodynamischer Verbesserungsmaßnahmen²⁰⁵

Leichtbau

Die verfügbare Nutzlast spielt für die meisten Anwendungsfälle eine bedeutende Rolle. NFZ können durch ein geringeres Gewicht entweder bei Gewichtstransporten mehr Güter transportieren oder bei Volumentransporten Kraftstoff einsparen.²⁰⁶ Ein geringeres Fahrzeuggewicht kann entweder durch Formleichtbau oder Stoffleichtbau erreicht werden. Formleichtbau beschreibt die Auslegung von Bauteilen auf die gerade erforderliche Stärke zur Erfüllung aller Funktionsanforderungen. Stoffleichtbau ist die Reduzierung der Fahrzeugmasse durch die Verwendung leichter Werkstoffe. Dabei wird insbesondere Stahl durch Aluminium oder Faserverbundwerkstoffe ersetzt. Die Gewichtsreduktion aus beiden Maßnahmen beträgt je nach Quelle zwischen 0,5 und 2 t. Das Kraftstoffreduktionspotenzial liegt pro eingesparter Tonne Gewicht abhängig vom NFZ-Segment und Anwendungsfall bei 1 bis 2 %.²⁰⁷

Reifen

Ein weiteres Kriterium für den Kraftstoffverbrauch ist der Rollwiderstand. Ein zu niedriger Reifendruck oder ungünstige Reifenprofile für die Transportaufgabe erhöhen den Rollwiderstand, sodass der Motor eine erhöhte Antriebsleistung aufbringen muss. Reifendruckkontrollsysteme überwachen den Luftdruck und signalisieren dem Fahrer einen zu niedrigen Stand. Zukünftig könnten darüber hinaus automatische Luftdruckmanagement-Systeme zum Einsatz kommen,

²⁰⁵ Eigene Abbildung in Anlehnung an *Ehniß* (2013), S. 26.

²⁰⁶ Vgl. *Appel et al.* (2013), S. 255.

²⁰⁷ Vgl. *Hill et al.* (2011), S. 140; *Breemersch und Akkermans* (2014), S. 14; *Law et al.* (2011), S. 5-1 - 5-12.

welche den Luftdruck in Abhängigkeit von Einsatz und Gewicht zu jedem Zeitpunkt optimal anpassen. Diese Maßnahme ist allerdings mit erheblichen Mehrkosten verbunden. Preiswerter ist der Einsatz rollwiderstandsoptimierter Reifen in mehreren Stufen. Moderne NFZ im Fernverkehrseinsatz sind aktuell schon überwiegend mit Material- und Aufbau-optimierten Reifen ausgestattet. Zukünftige Entwicklungen führen zu sogenannten *Super-Single-Reifen* (Überbreitreifen), welche anstatt der üblichen Zwillingsbereifung die gesamte Achslast tragen und damit den Rollwiderstandsbeiwert erheblich reduzieren. Allerdings sind diese gesetzlich nicht in allen europäischen Ländern freigegeben, da ein erhöhtes Beschädigungspotenzial für Straßen besteht. Moderne Leichtlaufreifen reduzieren den Kraftstoffverbrauch um bis zu 5 %, Super-Single-Reifen um weitere bis zu 5 %. Ein automatisches Luftdruckmanagement-System spart je nach Anwendungsfall und Referenzbasis bis zu 3 % Kraftstoff.²⁰⁸

4.1.3.4 Optimierungsmaßnahmen im Fahrbetrieb

Der Fahrer hat durch Gangwahl, Schaltvorgänge, Beschleunigung und Bremsen den größten singulären Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch seines NFZ. Daher gibt es zunehmend Fahrertrainings zur Schulung eines optimalen Fahrverhaltens zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs. Im Realbetrieb sind dadurch Einsparpotenziale von bis zu 10 % möglich, die insbesondere bei Anwendungen mit einer Vielzahl an Fahrereingriffen (Stadtverkehr) hoch sind.²⁰⁹ Darüber hinaus werden zunehmend Informationstechnologien eingesetzt, mit denen versucht wird, den Fahrer mit automatisierten Abläufen, Informationen und Anweisungen zu unterstützen. Neue Anforderungen werden durch die Integration neuer Antriebskonzepte aufkommen, da sich ein kraftstoffoptimales Fahrverhalten eines konventionellen Dieselmotors von dem von Hybrid- oder Elektrofahrzeugen unterscheidet.

Solche Fahrerassistenzsysteme reichen von einfachen Gangwechselanzeigen oder Fahrverhaltenassistenten bei manuellen Schaltgetrieben, über im Hintergrund ablaufende Assistenten zur Beschleunigungsbegrenzung und Segelfunktion des Fahrzeugs, bis zu halbautonomen Systemen wie beispielsweise *Predictive Powertrain Control (PPC)*. Derartige Programme beziehen Navigationsdaten, Topografie und Verkehrsdaten in die Wahl von Geschwindigkeit und Gang mit ein, um den Kraftstoffverbrauch im Hinblick auf den kommenden Fahrabschnitt zu minimieren. Der Fahrer lenkt in diesem Fall das Fahrzeug und greift nur in Notfallsituationen in den Fahrbetrieb ein. Diese Systeme setzen Automatikgetriebe, Telematik sowie umfangreiche Umfeldsensoren voraus und werden zunächst hauptsächlich im Fernverkehr eingesetzt, da ihre Anwendung im Stadtverkehr deutlich komplexer ist.²¹⁰ Zuletzt könnten zukünftig Maßnahmen zur weiteren Reduzierung des Luftwiderstandes zum Einsatz kommen. Beim sogenannten *Platooning* oder Kolonnenfahren, fahren die NFZ in möglichst geringen Abständen und durch IT-Systeme gesteuert hintereinander. Dadurch verringert sich der Kraftstoffverbrauch sowohl des ersten, als

²⁰⁸ Vgl. ebenda.

²⁰⁹ Vgl. Breemersch und Akkermans (2014), S. 19–20; Law et al. (2011), S. 5-1 - 5-12.

²¹⁰ Vgl. Hill et al. (2011), S. 141–145; Breemersch und Akkermans (2014), S. 13.

auch aller folgender Fahrzeuge Bezüglich des Einsparpotenzials existieren sehr unterschiedliche Angaben, die von 3 bis 25 % reichen.²¹¹

4.1.4 Verfügbarkeit und Reifegrad alternativer Antriebstechnologien

Das zweite wesentliche Element des technologischen Kontextes der Diffusion ist die Verfügbarkeit der technologischen Innovationen. Die Verfügbarkeit beschreibt die Anzahl, die Qualität und die Anwendbarkeit auf die eigenen Prozesse und Aufgaben der Innovationen am Markt. Um diesen Kriterien im Hinblick auf die Technologiediffusion zu analysieren, wird im Folgenden die Zahl (als Kriterium der Anzahl) der Prototypenanwendungen und Serienfahrzeuge (als Kriterium der Qualität) in den unterschiedlichen Anwendungsfällen (als Kriterium der Anwendbarkeit) untersucht. Darüber hinaus werden – soweit verfügbar – Erkenntnisse aus dem Betrieb von Prototypen und Serienfahrzeugen (als Kriterium der Qualität und Anwendbarkeit) diskutiert.

Die heutige Marktdurchdringung CO₂-sparender Antriebstechnologien wurde mittels der Neuzulassungsstatistik für das Jahr 2013 pro Anwendungsfall in Kapitel 2.1.2 untersucht und zeigt die Vorreiterrolle städtischer Anwendungen (Stadtbus, Abfallsammelerkehr und Verteilerverkehr). Dies ist auch auf die Verfügbarkeit von Fahrzeugmodellen am Markt zurückzuführen. Mit einer Marktanalyse werden daher die Entwicklungsaktivitäten und Serienfahrzeuge der traditionellen Hersteller sowie neuer Marktteilnehmer im Hinblick auf CO₂-sparende (Antriebs-)Technologien aufgezeigt. Hierzu wurde auf Herstellerinformationen, Branchenliteratur, Pressemitteilungen und sonstige Veröffentlichungen zurückgegriffen. Im Folgenden werden für die unterschiedlichen Anwendungsfälle Prototypen und Serienfahrzeuge mithilfe einer Literaturrecherche vorgestellt.²¹²

4.1.4.1 Güter- und Personenfernverkehr

Für den Güterfernverkehr gibt es zwei verfügbare Fahrzeuge mit alternativer Antriebstechnologie, welche die Anforderungen in diesem Anwendungsfall hinsichtlich Nutzlast und Reichweite (> 700 km) erfüllen: der IVECO Stralis LNG und Volvo FM Methan. Der Stralis wird bisher im Rahmen von Pilotanwendungen erprobt, die Serienreife soll allerdings bald bevorstehen.²¹³ Das Fahrzeug ist mit einem IVECO Cursor 8 Erdgasmotor mit 7,8 l Hubraum und 243 kW Leistung verfügbar und wird über einen LNG-Tank mit 250 kg Tankinhalt gespeist.²¹⁴ Der Volvo FM Methan ist in Serienreife verfügbar und mit einem 12,8 l Motor mit einem 338 kW Dual-Fuel-Erdgas-Dieselmotor ausgestattet, der über einen 125 kg (280 l) LNG-Tank und einen 150 bis 330 l Diesel Tank mit Kraftstoff versorgt wird. Im Anwendungsfall Reisebus gibt es bisher keine Aktivitäten von Herstellern oder Zulieferern. Alternative Antriebstechnologien werden erst nach

²¹¹ Vgl. *Breemersch und Akkermans* (2014), S. 28–29.

²¹² Ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

²¹³ Vgl. Herstellerinformationen.

²¹⁴ Vgl. Herstellerinformationen und *erdgas mobil* (2014), online.

Einführung dieser Technologien in anderen Anwendungsfällen (Stadtbus und Fernverkehr) auf Reisebusse übertragen und getestet.

Rein elektrisch betriebene Fernverkehrsfahrzeuge mit Oberleitungsspeisung werden im Rahmen von ersten Tests (vgl. 4.1.2.2) erprobt. Darüber hinaus gibt es sowohl von Zulieferern Forschungsaktivitäten²¹⁵ als auch Konzeptfahrzeuge vom Hersteller MAN²¹⁶ für Hybridfahrzeuge. Bis 2016 ist jedoch nicht mit dem Angebot von serienreifen Fahrzeugen zu rechnen.

Im Bereich der Abgaswärmenutzung wird der 15,6 l Motor OM 473 von Mercedes-Benz serienmäßig mit mechanischer Turbocompound-Technologie ausgestattet. Dieser Motor wird im Actros verbaut und somit bereits teilweise im Fernverkehr angewandt. Allerdings wird im Actros für den Fernverkehrseinsatz überwiegend auf den 10,7 l Motor OM 470 und 12,8 l Motor OM 471 zurückgegriffen. Die Abgaswärmenutzung über einen Rankine-Prozess wird derzeit intensiv von Zulieferern entwickelt und in den kommenden Jahren Serienreife erlangen.²¹⁷

4.1.4.2 Städtischer/Regionaler Güter- und Personenverkehr

Die höchste Verfügbarkeit alternativer Antriebstechnologien in NFZ ist in den Anwendungsfällen Stadtbus und Verteilerverkehr vorhanden. Tabelle 3 zeigt, dass bei Stadtbussen nahezu alle großen Hersteller sowohl einen CNG-Bus als auch Hybridbus in ihr Portfolio aufgenommen haben. Derzeit gibt es sowohl Busse mit parallelen Vollhybriden (Volvo, MAN) als auch mit seriellen Plug-In-Hybriden (Mercedes). In serienreifer Verfügbarkeit bietet Solaris den Urbino E als rein elektrischen Bus mit einer 130 kWh Lithium-Ionen Batterie an. Darüber hinaus testet Mercedes in Kooperation mit unterschiedlichen Verkehrsbetrieben erste Bus-Prototypen mit BSZ-Hybridantrieben.

Im Verteilerverkehr unterteilt sich die Verfügbarkeit von alternativen Antriebstechnologien bis dato stark nach MD- und HD-Fahrzeugen. Schwere Verteilerfahrzeuge werden überwiegend mit Gasantrieb angeboten, während mittelschwere Verteilerfahrzeuge vorwiegend als Hybridantrieb ausgelegt sind. Das Schweizer Start-up-Unternehmen E-Force hat ein rein elektrisches, schweres Verteilerfahrzeug auf Basis eines IVECO Stralis Chassis mit einer Reichweite von 200-300 km und einer 240 kWh Lithium-Ionen-Batterie entwickelt. Die Praxistauglichkeit wurde in einem Test mit einer Schweizer Supermarktkette gezeigt und weiterer Modelle werden nun auch in Deutschland in der Lebensmittellogistik eingesetzt.²¹⁸

Im Abfallsammelverkehr sind die Modelle Mercedes Econic, Volvo FE und Scania P als Erdgasbetriebene Müllsammelfahrzeuge in Serienreife verfügbar. Der höchste relative Marktanteil von Erdgas-betriebenen Abfallsammelfahrzeugen im Vergleich zu den anderen alternativen Antriebstechnologien in NFZ, belegt eine vergleichsweise hohe Akzeptanz. Derzeit entwickeln und testen

²¹⁵ Vgl. beispielsweise Flaig (2012), online; Zeitzen (2012), online.

²¹⁶ Vgl. MAN TGX auf der IAA 2014: Volkswagen AG (2014), online.

²¹⁷ Vgl. Robert Bosch GmbH (2014), online; Bredel et al. (2011).

²¹⁸ Vgl. Kranke (2014), online.

die NFZ-Hersteller vor allem elektrifizierte NFZ für diesen Anwendungsfall. Den höchsten Hybridisierungsgrad hat der MAN Metropolis als serieller Plug-In-Hybrid. Ein 3 l PKW-Verbrennungsmotor speist über einen Generator als *Range Extender* eine 105 kWh Lithium-Ionen-Batterie, die wiederum einen 200 kW Elektromotor mit Energie versorgt. Ausschließlich in diesem Anwendungsfall wird von MAN ein hydrostatisch regeneratives Bremssystem (hydraulischer Hybrid) erprobt.

Prototyp	Anwendungsfall	Serienfahrzeug	Anwendungsfall
Iveco Stralis LNG	Verteilerverkehr Fernverkehr	Volvo FM Methan	Verteilerverkehr (Fernverkehr)
E-Force	Verteilerverkehr	MB Atego Hybrid	Verteilerverkehr
Renault midlum electric	Verteilerverkehr	Fuso Canter Hybrid	Verteilerverkehr
Meyer & Meyer	Verteilerverkehr	DAF LF Hybrid	Verteilerverkehr
Terberg YT202-EV	Güternahverkehr	Scania P-Serie CNG	Verteilerverkehr
MAN Metropolis RE	Abfallsammel	Iveco Stralis CNG	Verteilerverkehr
MB Econic Hybrid	Abfallsammel	MB Econic NGT	Abfallsammel
Volvo FE Hybrid	Abfallsammel	Volvo FE CNG	Abfallsammel
MAN TGM HRB	Abfallsammel	Volvo 7900/7700 Hybrid	Stadtbus
MB Citaro Hybrid	Stadtbus	Volvo 7900 Gas	Stadtbus
MB Citaro Fuel Cell	Stadtbus	MB Citaro CNG	Stadtbus
		MAN Citywide CNG	Stadtbus
		MAN Lion Hybrid	Stadtbus
		Solaris Urbino CNG	Stadtbus
		Solaris Urbino E	Stadtbus
		Iveco Urbanway CNG	Stadtbus

Tabelle 3: Verfügbarkeit alternativer Antriebstechnologien²¹⁹

Abgaswärmenutzung spielt in diesen Anwendungsfällen bisher noch keine bedeutende Rolle. Da in schweren Verteilerverfahrzeugen prinzipiell die gleichen Motorenmodelle wie im Fern- und Bauverkehr eingesetzt werden, ist mit dem OM473 eine geringe Verfügbarkeit dieser Technologie für den Einsatz von Verteilerverfahrzeugen gegeben. Neben den Entwicklungstätigkeiten von traditionellen und neuen Herstellern gibt es auch typische *Lead User* Aktivitäten: Die Spedition *Meyer&Meyer* hat beispielsweise eigens einen MAN TGM auf ein reines Elektroverteilerfahrzeug umgerüstet.²²⁰ Die *Berliner Stadtreinigung* nutzt eine, in Eigeninitiative entwickelte, BSZ-betriebene Müllpresse im Abfallsammelverkehr.²²¹

²¹⁹ Eigene Abbildung.

²²⁰ Vgl. *Kranke* (2010), online.

²²¹ Vgl. *BSR* (2014), online.

4.1.4.3 Bauverkehr

Der OM 473 Motor von Mercedes ist überwiegend für den Schwerlast- und Bauverkehr konzipiert und setzt die Turbocompound-Technologie ein. Darüber hinaus gibt es keine speziellen Aktivitäten hinsichtlich CO₂-sparender Antriebstechnologien von Herstellern oder Zulieferern für den Bauverkehr. Prinzipiell sind über die Variation im Aufbau der NFZ, die Modelle, wie beispielsweise der Scania P CNG und Iveco Stralis CNG, für den Einsatz im Bauverkehr geeignet. Allerdings sind die Anforderungen im Bauverkehr an die Motorleistung deutlich höher als die Leistung der angebotenen Gasmotoren. Eine Alternative könnte der Volvo Methan FM sein, allerdings wird bisher kein Aufbau/Fahrgestell für diesen Anwendungsfall angeboten. Alternative Antriebstechnologien werden kontinuierlich durch Anpassung der Modelle auf den Bauverkehr übertragen.

4.1.4.4 Implikationen für die Technologiediffusion

Die praktische Anwendung und Erprobung alternativer Antriebstechnologien variiert in den unterschiedlichen Anwendungsfällen stark. NFZ-Hersteller sollten ihrerseits bestrebt sein Pilotanwendungen nach *Lead Usern*, dem zugesprochenen *relative advantage* und der Marktgröße der Anwendungsfälle auszuwählen. Abbildung 4 in Kapitel 2 zeigt, dass fast zwei Drittel der Neuzulassungen auf dem NFZ-Markt auf den Fern- und Verteilerverkehr entfallen, während Reisebusse und der Abfallsammelverkehr eher von untergeordneter Bedeutung sind. Neuzulassungen, Prototypen und Serienfahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien sind hingegen vornehmlich in Anwendungsfällen mit geringer Laufleistung und hohem Anteil an Fahrstrecken im urbanen Raum vorzufinden. Es zeigt sich ferner die Tendenz einer höheren Verfügbarkeit elektrifizierter NFZ in städtischen Anwendungsfällen, während im schweren regionalen Verteilerverkehr eher CNG- oder LNG-betriebene NFZ eingesetzt werden. Die Abgaswärmenutzung und rein elektrische Fahrzeuge sind bis auf wenige Nischenanwendungen noch kaum in Serienreife auf dem NFZ-Markt verfügbar. Die BSZ könnte in ferner Zukunft eine vielversprechende Antriebsalternative für NFZ sein. In den kommenden zwei Jahrzehnten wird diese aber aufgrund der gegenwärtig geringen Technologiereife und den Unsicherheiten in der Kraftstoffbereitstellung eine Nischenanwendung bleiben.

4.2 Anwendungsfallsspezifische Technikpakete

Ziel dieses Abschnittes ist es, die für das Simulationsmodell definierten Technikpakete vorzustellen. Alternative Antriebstechnologien stehen in Konkurrenz zu den beschriebenen CO₂-sparenden Technologien. Daher werden diese konkurrierenden Maßnahmen in unterschiedlichen Technikpaketen zusammengefasst, um deren Einfluss auf die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien zu berücksichtigen. Dazu wird im Folgenden die Methodik zur Definition der Technikpakete erläutert und exemplarisch anhand des Anwendungsfalls Fernverkehr vorgestellt.

4.2.1 Methodik

Kapitel 2.2 zeigte die vergleichsweise umfangreich vorhandene Literatur zur Funktionsweise und den Eigenschaften CO₂-sparender Technologien in NFZ. Daher bauen die Technikpakete auf den Erkenntnissen der bestehenden Studien auf. Entsprechend wurde die Methodik zur Erarbeitung der Pakete ausgewählt.

Die TIAX-Studie (2011) zeigt detailliert das Einsparpotenzial und die entgegenstehenden Kosten einer Vielzahl von technologischen Maßnahmen zur CO₂-Reduktion für das Referenzjahr 2010 anwendungsfallspezifisch auf. Eine technologische Spezifikation der CO₂-sparenden Antriebstechnologien ist hingegen nicht erfolgt.²²² Der anwendungsfallspezifische Aufbau der TIAX-Studie (2011) wurde weitestgehend übernommen, es erfolgte jedoch eine Anpassung der Referenzfahrzeuge auf die Modelle von Mercedes-Benz. Zum einen sind die Modelle der Marke Mercedes-Benz exakt entsprechend der betrachteten Anwendungsfälle positioniert. Zum anderen sind die Fahrzeuge, betrachtet man alle Anwendungsfälle gesamthaft, sowohl technologisch führend und erreichen den größten Marktanteil in Deutschland.

Auf Basis der Referenzfahrzeuge wurde die Auflistung der Technologien angepasst. Die Kosten- und Verbrauchsdaten aus der TIAX-Studie (2011) stammen aus dem Jahr 2010 und zeigen im Vergleich zu jüngeren Veröffentlichungen teilweise veraltete Annahmen. Diese wurden entsprechend aktualisiert, auch wenn sich die Veröffentlichungen zu technologischen Einsparpotenzialen und etwaigen Kostenangaben vor allem auf den Fernverkehr und teilweise Stadtbusse konzentrieren.²²³

Im zweiten Schritt erfolgte auf Basis der technologischen Eigenschaften und der zu erwartenden Amortisationsdauer²²⁴ in den Anwendungsfällen eine Vorauswahl der Maßnahmen. Des Weiteren wurde eine technische Spezifikation für die alternativen Antriebstechnologien entsprechend der Information in Kapitel 4.1.4. und den Technik-orientierten Studien aus Kapitel 2.2 erarbeitet sowie die Abschätzung der Kosten- und Verbrauchsdaten aktualisiert.

In der NFZ-Industrie sind Entwicklungszyklen von fünf bis sechs Jahren üblich, sodass die technologische Entwicklung bis 2020 mithilfe von Branchen- und Technologieexperten vergleichsweise gut abgeschätzt werden kann. Daher wurde in einem mehrstufigen Prozess auf persönliche Interviews mit elf Branchen- und Technologieexperten aus der Automobilindustrie zurückgegriffen. Zunächst erfolgten eine Abschätzung und Validierung des Einsparpotenzials, der Kosten sowie der erarbeiteten technischen Spezifikation der Technikpakete. Dabei wurde die bei vielen Maßnahmen prognostizierte hohe Kostendegression bis 2020 bestätigt. Insbesondere ist in den vergangenen Jahren ein Einbruch in den Kosten von Lithium-Ionen-Batterien erfolgt.

²²² Vgl. Kapitel 2.2 und *Law et al.* (2011), S. 4-1 - 5-12.

²²³ Im Wesentlichen flossen die Veröffentlichungen von *Schreier und Walter* (2013), *Schöffmann et al.* (2014), *Ehniß* (2013) und Publikationen in der NFZ-Fachzeitschrift *Lastauto Omnibus* (2012-2014) in die Anpassung des Fernverkehrs mit.

²²⁴ Ausschluss falls Amortisationsdauer größer Lebensdauer.

Bis 2020 wird ein Preis von maximal 200 €/kWh prognostiziert, sodass die Elektrifizierung des Antriebsstranges wesentlich preiswerter als in der TIAX-Studie angenommen wird. Gleichzeitig wurde das Einsparpotenzial der meisten Technologien marginal geringer eingestuft. Nichtsdestotrotz wurden die Dimensionen der Angaben weitestgehend bestätigt.

Im nächsten Schritt schätzen die Branchenexperten die Entwicklung der Serienumfänge der im Jahr 2020 angebotenen NFZ ab. Auf dieser Basis erfolgte schließlich die Definition von unterschiedlichen Technikpaketen. Dabei ist die Abschätzung des kumulativen Einsparpotenzials schwierig, da es zu einer teilweisen Kannibalisierung²²⁵ der Maßnahmen kommt und somit eine einfache Addition nicht angewendet werden kann. Dieser Effekt ist mithilfe von Expertenschätzungen berücksichtigt. Die Technikpakete umfassen zweistufig die drei Grundantriebsarten: konventioneller Dieselantrieb, Gasantrieb und Elektroantrieb. Darauf aufbauend können – falls technologisch möglich²²⁶ – die zusätzlichen Technikpakete miteinander kombiniert werden. Zusammenfassend kommen für jeden Anwendungsfall prinzipiell fünf Technikpakete in Frage. Diese umfassen ab dem Jahr 2020: Abgaswärmenutzung, elektrische Hybridisierung, hydraulische Hybridisierung, zusätzliche Optimierungsmaßnahmen am Motor und am Gesamtfahrzeug.

4.2.2 Technikpakete in den Anwendungsfällen

Mit Hilfe der technologischen Eigenschaften, der Literatur aus Kapitel 2.2 und den Expertengesprächen zur Plausibilisierung wurden die definierten Technikpakete für die Anwendungsfälle ausgewählt (vgl. Abbildung 15). Die Auswahl des Speicherkonzeptes der Erdgasfahrzeuge orientiert sich an der täglich geforderten Reichweite pro Tankfüllung in den Anwendungsfällen. Ist mit zwei CNG-Tankfüllungen die tägliche Fahrtstrecke nicht erreichbar, so wird nur LNG berücksichtigt. Ist umgekehrt die Reichweite mit einer CNG-Tankfüllung problemlos erreichbar, wird aufgrund der deutlich geringeren Kosten und der vorhandenen Infrastruktur nur CNG berücksichtigt.

Die Verwendung eines Elektroantriebs für den Fern- und Bauverkehr ist aufgrund der Energiedichte heutiger und zukünftiger Batteriegenerationen aufgrund zu hoher Transportvolumen- und Nutzlastverlusten nicht sinnvoll. Im Abfallsammelerkehr wird der Elektroantrieb um einen Range Extender (REX) ergänzt.

²²⁵ Kannibalisierung bedeutet, dass sich die Einsparpotenziale von Maßnahmen teilweise gegenseitig aufheben können. Zum einen bezieht sich das Einsparpotenzial der Maßnahmen immer auf den Referenzzustand, sodass bei einer Kombination aller Maßnahmen ein nahezu negativer Kraftstoffverbrauch resultieren würde. Zum anderen führt beispielsweise eine weitere Aufladung oder Ladeluftkühlung zu einer geringen Enthalpie im Abgas, was das Potenzial der Abgasrückgewinnung deutlich reduziert. Ebenso schließen sich Maßnahmen wie zum Beispiel die Turbocompound-Technologie und der Rankine-Prozess zur Abgaswärmerückgewinnung technologisch bedingt gegenseitig aus, da beide auf dieselbe Energiequelle zurückgreifen.

²²⁶ Manche Technikpaket-Kombinationen schließen sich technologisch bedingt aus. Beispielsweise kann ein Elektromotor nicht hybridisiert oder mit einer Abgaswärmerückgewinnung kombiniert werden.

Die elektrische Hybridisierung ist in prinzipiell allen Anwendungsfällen als paralleler Vollhybrid ökonomisch realisierbar. Der hydraulische Hybrid wird aufgrund der heutigen Verfügbarkeit, dem geringen Entwicklungspotenzial und der breiten Anwendbarkeit des elektrischen Hybrides nur im Abfallsammelverkehr berücksichtigt.

Die Abgaswärmenutzung amortisiert sich nur in Anwendungsfällen mit hohem Anteil an konstanten Fahrabschnitten mit hoher Geschwindigkeit und wird daher in den städtischen Anwendungsfällen nicht weiter berücksichtigt. Eine Optimierung des konventionellen Dieselmotors und des Gesamtfahrzeugs wird zukünftig hingegen in allen Anwendungsfällen eine Rolle spielen und wird daher auch vollständig berücksichtigt (vgl. Abbildung 15).

	 Fern- verkehr	 Verteiler- Regional	 Verteiler- Städtisch	 Bau- verkehr	 Abfall- sammelverkehr	 Stadtbus	 Reisebus
Konventioneller Dieselantrieb	X	X	X	X	X	X	X
Erdgasantrieb	<i>LNG</i>	<i>CNG</i> <i>LNG</i>	<i>CNG</i>	<i>CNG</i> <i>LNG</i>	<i>CNG</i> <i>LNG</i>	<i>CNG</i>	<i>LNG</i>
Elektroantrieb	-	X	X	-	<i>REX</i>	X	-
EL Hybrid	X	X	X	X	X	X	X
Hydr. Hybrid	-	-	-	-	X	-	-
Abgaswärmenutzung	X	X	-	X	-	-	X
Optimierter Dieselantrieb	X	X	X	X	X	X	X
Optimiertes Gesamtfahrzeug	X	X	X	X	X	X	X

Abbildung 15: Berücksichtigte Technikpakete pro Anwendungsfall²²⁷

Tabelle 4 zeigt am Beispiel des Fernverkehrs die Übersicht der Technikpakete. In der ersten der vier Ebenen wird das Referenzfahrzeug definiert, gefolgt von der Entwicklung des konventionellen Dieselantriebs bis 2020. In der dritten Ebene sind alternative Antriebstechnologien und in der vierten Ebene die CO₂-sparenden Zusatzpakete ab 2020 dargestellt. Für jedes Technikpaket sind die enthaltenen kraftstoffsparenden Maßnahmen bzw. wesentlichen technischen Spezifikationen sowie Kosten, Verbrauch und weitere Eigenschaften aufgeführt. Die Übersichten für die weiteren Anwendungsfälle sind im Anhang I zu finden.

²²⁷ Eigene Abbildung.

Fernverkehr						
Referenzfahrzeug 2014: Neuer Actros 330 kW, 12-Gang Automatikgetriebe, 12.8l Hubraum, Reihensechszylinder						
Actros OM 471 Spezifikation Motor: 4-Ventil-Technik, Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung, Common-Rail-Hochdruckeinspritzung X-Pulse (2100 bar), elektr. Wasserpumpe, bedarfsabhängiger Luftpresser, reibungsreduziertes Getriebe						
Actros Aufbau Spezifikation: Leichtlaufreifen, Dach- und Seitenspoiler, Fahrertraining						
Abgasnachbehandlung: EGR+DPF+SCR						
Konventioneller Antriebsstrang	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften	
D0 Standard	Referenzfahrzeug 2014	34,5 l	914	20.000		
D1 Best-in-class	D0 Standard+PPC+StreamSpace+bedarfsabhängige Nebenverbraucher+ohne EGR	32,0 l	848	24.000		
D2 Standard 2020	D1+Thermomanagement+Downspeeding+Downsizing+Aero-dynamische Optimierung+elektr. Nebenverbraucher+Leichtbau	28,0 l	742	32.500	-500 kg Leichtbau	
Alternative Kraftstoffe	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften	
LNG	250kW Erdgasmotor, 200kg LNG Tank, 3-Wege Kat+Aerodynamik+Leichtbau	26,0 kg	637	40.000	+250kg Gewicht, geringe Lärmemission	
Zusatzpakete 2020+	Spezifikation	Reduktionspotential	CO2 [g/km]	Zusatzkosten [€]	Weitere Eigenschaften	
Motor Optimierung	D2+neue Motorkonstruktion+micro Hybrid	-6,0%	- 45	3.500		
Gesamtfahrzeugopt.	D2+Super-Single Reifen+boat tail	-4,5%	- 33	6.500	+2,7m Länge	
WHR	D2+Abgaswärmenutzung (Rankine-Prozess mit Turbine)	-4,5%	- 33	3.500	+150kg Zusatzgewicht	
HEV	D2+ Parallel Hybrid, 120kW max, 15kWh Li-Ion Batterie	-6,0%	- 45	10.000	+350kg Gewicht	

Tabelle 4: Technikpakete Fernverkehr²²⁸²²⁸ Eigene Abbildung.

*“Television won't be able to hold on to any market it captures after the first six months.
People will soon get tired of staring at a plywood box every night.”*

Darryl Zanuck, Vorstand von 20th Century Fox, 1946

Kapitel 5

Organisationaler Kontext der Diffusion

Dieses Kapitel untersucht den organisationalen Kontext der Diffusion innovativer Antriebstechnologien in den NFZ-Markt. Dieser ist durch die Eigenschaften und das Verhalten der potentiell adoptierenden Organisation determiniert.²²⁹ Deshalb wird die Gesamtheit der organisationalen Adopter mit ihren unterschiedlichen Verhaltensweisen und Kaufkriterien für innovative Antriebstechnologien und andere CO₂-sparende Technologien in NFZ untersucht, um Rückschlüsse auf die zukünftige Marktdurchdringung dieser Innovation zu ziehen.

5.1 Stand der Forschung

Im Hinblick auf die Forschungsaktivitäten der Europäischen Kommission ist eine tiefere Analyse der Nachfrageseite des Transportsektors notwendig. Die Forschungsaktivitäten haben sich bisher ausschließlich auf die Angebotsseite ausgerichtet, obwohl der organisationale Kontext auf der Nachfrageseite die Diffusion innovativer Technologien zur Reduktion der Treibhausgase im Transportsektor im gleichen Maße beeinflusst. Eine aktuelle Studie erhob den gegenwärtigen Einsatz effizienzsteigernden Maßnahmen von Transportunternehmen und zeigte, dass sich die Nutzung dieser Maßnahmen deutlich in den unterschiedlichen Anwendungsfällen unterscheidet.²³⁰ Doch darüber hinaus ist der NFZ-Markt hinsichtlich Struktur, Anforderungen, Verhalten und Präferenzen der Nachfrageseite allgemein, aber auch im speziellen Bezug auf kraftstoffsparende Technologien, bislang kaum erforscht. Auf dem PKW-Markt wiederum haben zahlreiche Studien die Adoption umweltfreundlicher Fahrzeuge²³¹ sowie die damit zusammenhängenden Kundenpräferenzen in der Auswahlentscheidung für alternative Antriebe²³² untersucht. Auf dem Markt für schwere NFZ gibt es bislang – nach bestem Wissen des Autors – nur eine wissenschaftliche Studie, welche die Kundenpräferenzen für Brennstoffzellentechnologie in der Nische

²²⁹ Vgl. Abbildung 9 und Kapitel 3.2.2 TOE-Modell.

²³⁰ Vgl. *Liimatainen und Pöllänen* (2010); *Liimatainen et al.* (2012); *Liimatainen et al.* (2014) oder Kapitel 2.2.

²³¹ Vgl. beispielsweise *Lane und Potter* (2007); *Jansson et al.* (2010).

²³² Vgl. beispielsweise *Brownstone et al.* (2000); *Hackbarth und Madlener* (2013).

der Straßenkehrmaschinen analysiert.²³³ Die Studie nutzte eine Conjoint-Analyse und kam zu dem Ergebnis, dass es Unterschiede zwischen *Frühen Adoptern* und dem Massenmarkt ebenfalls in organisationalen Flotten geben könnte. Allerdings beruhen die Ergebnisse auf Antworten von operativen Entscheidern, daher besteht der Bedarf, den Kaufentscheidungsprozess auf diesem Markt weiter, insbesondere mit Fokus auf Top-Management Entscheidungsträger, zu untersuchen.²³⁴

Des Weiteren sind in den USA die Präferenzen für alternative Antriebstechnologien in großen Automobilflotten, worunter auch leichte NFZ fielen, mittels einer Conjoint-Analyse erhoben worden.²³⁵ Es wurde deutlich, dass sich die Präferenzstrukturen stark zwischen den einzelnen Marktsegmenten unterscheiden. Insbesondere die Fahrzeugreichweite, Kapitalkosten und die Tankstellenverfügbarkeit sind für private Flottenbetreiber wichtig. Öffentliche Flotten achten hingegen vor allem auf die Betriebskosten. In allen Marktsegmenten stehen die Erfüllung der Transportaufgabe und Wirtschaftlichkeit über den Umweltbelangen. Als weiterer Forschungsbedarf wurde die Determinierung der Nachfrage nach alternativen Antriebstechnologien von Flottenbetreiber identifiziert. Dafür müsste die Untersuchung der Nachfrageseite allerdings auf den gesamten Flottenmarkt ausgedehnt werden.²³⁶

Daher wird in diesem Kapitel zunächst das organisationale Adoptionsverhalten für CO₂-sparende Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt analysiert und die Präferenzstruktur für die Auswahlbereitschaft dieser innovativen Technologien erhoben. Aufgrund der bis heute sehr geringen Marktdurchdringung CO₂-sparender Antriebstechnologien, sind daher insbesondere Erkenntnisse von *Innovatoren* und *Frühen Adopter* im Markt zu erwarten. Da deren Bedürfnisse und Präferenzen nicht denen des breiten Massenmarktes entsprechen müssen, werden darüber hinaus mittels einer Conjoint-Analyse die Präferenzen für Antriebstechnologien allgemein erhoben. Die aus der Conjoint-Analyse gewonnenen Daten bilden auch die Voraussetzung für die Implementierung des diskreten Kaufentscheidungsmodells im späteren Simulationsmodell, um die zukünftige Nachfrage nach CO₂-sparender Antriebstechnologien in NFZ zu prognostizieren.

5.2 Organisationales Adoptionsverhalten auf dem NFZ-Markt²³⁷

Ziel dieses Abschnittes ist es, das organisationale Entscheidungsverhalten zur Adoption von Innovationen auf dem NFZ-Markt empirisch zu untersuchen. Daher soll in einer quantitativen Studie die Auswahlbereitschaft für alternative Antriebstechnologie erhoben werden, um Rück-

²³³ Vgl. *Walter et al.* (2012).

²³⁴ Vgl. *Walter et al.* (2012), S. 12012.

²³⁵ Vgl. *Golob et al.* (1997).

²³⁶ Vgl. *Golob et al.* (1997), S. 232.

²³⁷ Dieses Kapitel basiert überwiegend auf einem noch nicht veröffentlichten Zeitschriftenbeitrag mit Oliver Beuttenmüller und Orestis Terzidis im Rahmen dieser Forschungsarbeit: Vgl. *Seitz et al.* (2015).

schlüsse auf die unterschiedlichen organisationalen Adopterkategorien auf diesem Markt ziehen zu können. Dabei steht die Identifikation wesentlicher Treiber und Barrieren in den Adopterkategorien im Vordergrund. Die Auswahlbereitschaft wird dabei im Kontext des jeweiligen Anwendungsfalls der NFZ-Flottenbetreiber, anderer CO₂-sparender Technologien und des gesamten Kaufentscheidungsprozesses des *buying centers* analysiert.

Die Grundlagen zum organisationalen Adoptionsverhalten wurden in Kapitel 3.2 vorgestellt. Darüber hinaus werden die theoretischen Grundlagen organisationaler Beschaffungsprozesse und die damit verbundenen Beschaffungskriterien eingeführt, da das Verständnis organisationaler Kaufprozesse für die Untersuchung des Adoptionsverhaltens von Organisationen von essentieller Bedeutung ist. Schließlich werden das Variablenmodell und die relevanten Hypothesen für die empirische Untersuchung erarbeitet.

5.2.1 Organisationales Beschaffungsverhalten

Im Gegensatz zu Konsumgütermärkten sind Kauf- und Investitionsentscheidungen auf B2B-Märkten überwiegend das Ergebnis eines standardisierten, organisationalen Prozesses und weniger durch spontane Entscheidungen geprägt.²³⁸ Dabei lösen organisationale Beschaffungsprozesse ein erkanntes organisationales Problem durch ein interaktives, informations-gestütztes Verfahren unter Einbeziehung mehrerer Personen und Berücksichtigung von zuvor individuell bestimmten Kaufkriterien. Ferner unterscheiden sich organisationale Beschaffungsprozesse durch eine höhere Nachfragespezifität und tendenziell höhere Rationalität von individuellen Kaufentscheidungen im B2C-Bereich.²³⁹

Die Beschaffung von NFZ ist überwiegend ein typisches Produktgeschäft. Dieses ist durch standardisierte Angebotsprozesse für Produkte auf einem anonymen Markt charakterisiert, welche in großen Stückzahlen produziert und entwickelt werden, bevor die eigentliche Nachfrage der beschaffenden Organisation auftritt.²⁴⁰ Einerseits werden NFZ in Europa mit einer Vielzahl unterschiedlicher Optionen angeboten und daher kundenspezifisch angepasst. Andererseits charakterisiert eine kundenspezifische Anpassung ein Anlagengeschäft. Die zu konfigurierenden Optionen sind allerdings größtenteils vordefiniert. Ebenso wird ein Großteil der Komponenten in der Serienfertigung beim Hersteller ohne einen Kundenauftrag auf Lager gefertigt. Ausnahme bilden hierbei auf dem NFZ-Markt Sonder- und Spezialfahrzeuge. Allerdings sind diese mehr durch den Aufbau und weniger durch den Großteil der verbauten CO₂-sparenden Technologien im Grundfahrzeug spezifiziert.

In Produktgeschäften haben Kosten und Budgetrestriktionen im Vergleich zu anderen Geschäftstypen im B2B-Markt eine hohe Bedeutung. Des Weiteren ist es essentiell, dass das neu beschaff-

²³⁸ Vgl. *Backhaus* (2003), S. 67–72.

²³⁹ Vgl. *Bänsch* (2002), S. 182.

²⁴⁰ Vgl. *Backhaus* (2003), S. 323–329.

te Produkt zu den Aufgaben und Prozessen der Organisation passt, sodass sich eine Verbesserung der Leistung und Produktivität ohne großen Aufwand oder Umstellungskosten einstellt.²⁴¹

Die Prozessorientierung organisationaler Beschaffungsvorgänge führt außerdem zu einer höheren Rationalität. Dennoch gibt es wissenschaftliche Belege für den Einfluss von Emotionen auf das organisationale Beschaffungsverhalten. Berekoven et al. (2006) zeigen, „dass auch im gewerblichen Bereich stets Menschen die Entscheidungen fällen und damit auch persönliche Empfindungen im weiteren Sinne eine Rolle spielen können.“²⁴² Die persönlichen Präferenzen der Mitglieder des *buying centers* beeinflussen demnach die Kaufentscheidung. Eine weitere empirische Studie zu Emotionen im organisationalen Kaufverhalten kommt ebenso zu dem Ergebnis, dass organisationale Kaufentscheidungen nicht ausschließlich durch vollständig rationale und Kosten-Nutzen-orientierte Kriterien gefällt werden.²⁴³

Schließlich sind B2B-Märkte von der abgeleiteten Nachfrage von Konsumgütern auf B2C-Märkten abhängig. Endkunden-Präferenzen, welche durch die Wertschöpfungskette transportiert werden, beeinflussen somit B2B-Märkte und damit organisationale Beschaffungsentscheidungen. Daher ist es für Organisationen von Bedeutung, ein positives externes Image zu etablieren, um sich im Wettbewerb zu differenzieren. Folglich können Imagebetrachtungen auch die Kaufentscheidungen von Unternehmen beeinflussen.²⁴⁴

5.2.2 Variablen und Hypothesen

Für die Untersuchung des organisationalen Kontexts des Adoptionsverhaltens werden die Variablen des TOE-Modells überwiegend übernommen. Branche, Größe, Aufgabe einer Organisation sowie deren Beschaffungsprozess und die zugrunde liegende Zusammensetzung des *buying centers* werden genutzt, um Unterschiede in der Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Technologien in NFZ zu analysieren.

Darüber hinaus werden wesentliche organisationale Kriterien bei der Beschaffung und Auswahl von NFZ herangezogen, um aus diesen auf die wahrgenommenen Eigenschaften der Technologien (*relative advantage, compatibility, complexity, etc.*) zu schließen. Dadurch können die unterschiedlichen Präferenzstrukturen der Organisationen am Markt erhoben werden. Im nächsten Schritt wird dann der Einfluss der Präferenzstruktur für CO₂-sparende Antriebstechnologien auf die Auswahlbereitschaft dieser Technologien in NFZ gemessen.

Darauf aufbauend erfolgt entsprechend der Auswahlbereitschaft der Organisationen eine verhaltensorientierte Segmentierung – wie es auch bei den Adopterkategorien der Fall ist. Folglich kann untersucht werden, ob aus der deskriptiven Beschreibung der Organisationen, wie Größe,

²⁴¹ Vgl. Brassington und Pettitt (2006), S. 175–177; Ellis (2011), S. 33–40.

²⁴² Vgl. Berekoven et al. (2006), S. 306.

²⁴³ Vgl. Zehetner (2011), S. 223–225.

²⁴⁴ Vgl. Brassington und Pettitt (2006), S. 152–153; Ellis (2011), S. 41–42.

Branche, Struktur und Prozesse, auf das organisationale Beschaffungsverhalten und somit die Zugehörigkeit zu einer Adopterkategorie geschlossen werden kann. Dieses Vorgehen würde es erlauben, aus den vergleichsweise einfach bestimmbar deskriptiven Eigenschaften von Organisationen, *Frühe Adopter* und *Innovatoren* auf dem NFZ-Markt zu identifizieren. Ebenso könnte die Identifikation von *Lead Usern* unterstützt werden. Mittels der gemessenen Präferenzstruktur sowie den Eigenschaften der betrachteten Technologien, können somit schließlich Rückschlüsse auf die zukünftigen Beschaffungsentscheidungen und damit die zukünftige Diffusion CO₂-sparende Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt gezogen werden.

Im Folgenden werden daher die der empirischen Untersuchung zugrunde liegenden Hypothesen und Skalen vorgestellt sowie das daraus resultierende Variablenmodell abgeleitet. Abbildung 16 fasst dieses zusammen.

5.2.2.1 Abhängige Variable: Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien

Die abhängige Variable ist operationalisiert, als die bestehende Bereitschaft von Entscheidern innerhalb einer Organisation CO₂-sparende Antriebstechnologien bei der Investition in neue NFZ auszuwählen.

Das TOE-Modell wird im vorliegenden Fall auf Adoptionsentscheidungen für innovative Antriebstechnologien angewandt, welche durch den überwiegenden Teil der Organisationen noch nicht adoptiert wurden. Deshalb wird eine dichotome Messung²⁴⁵ der Auswahlbereitschaft als nicht sinnvoll erachtet. Erwägungen und Absichten eines Beschaffungsvorgangs werden demgemäß als latente Variable²⁴⁶ gemessen.²⁴⁷

Die Skala *Auswahlbereitschaft* umfasst das Interesse an innovativen Antriebstechnologien, die Haltung gegenüber der Nachhaltigkeit konventioneller Antriebe und die generellen Beschaffungserwägungen und -absichten. Diese Skala wird ferner nominal validiert, indem sowohl Informationen bisher getätigter Beschaffungsvorgänge als auch kurz- bis mittelfristige Erwägungen und Absichten erhoben werden.²⁴⁸

²⁴⁵ Eine dichotome Variable besitzt zwei Merkmalsausprägungen. Im vorliegenden Fall wäre also auf die Frage, ob eine Technologie schon adoptiert worden ist, die Antwortoptionen (1) ‚ja‘ und (2) ‚nein‘. Aufgrund der geringen Adoptionsrate im Markt würden nahezu alle Befragten mit ‚nein‘ antworten. Eine differenzierte Messung der Adoptionsneigung wäre somit nicht möglich.

²⁴⁶ Eine latente Variable wird nicht direkt gemessen, sie wird stattdessen mit Hilfe von mehreren Items (Indikatoren) erfasst.

²⁴⁷ Vgl. *Homburg und Dobratz* (1998), S. 450. Ebenso wurde in anderen empirischen Untersuchungen mit einer vergleichbaren Situation die Variablen latent gemessen: Vgl. beispielsweise *Patterson und Spreng* (1997); *Jarvenpaa et al.* (1999); *Grewal et al.* (1998).

²⁴⁸ Vgl. *Tornatzky und Fleischer* (1990), S. 152–163.

5.2.2.2 Unabhängige Variable: Bewusstsein und Berücksichtigung der Gesamtbetriebskosten (TCO²⁴⁹)

Die Rationalität in Beschaffungsprozessen ist ein bestimmendes Kriterium auf B2B-Märkten.²⁵⁰ Daher ist das Ergebnis einer beabsichtigten Kaufentscheidung durch ein organisationales *buying center* wesentlich durch die Bewertung der damit verbundenen Gesamtbetriebskosten beeinflusst. Der Zusammenhang zwischen den berechneten Gesamtbetriebskosten sowie der finalen Beschaffungsentscheidung ist sowohl für Industriegütermärkte im Allgemeinen²⁵¹, als auch für den NFZ-Markt im Besonderen empirisch belegt.²⁵² Ferner gibt es auch eine klare Abgrenzung zwischen dem Anschaffungspreis und den Gesamtbetriebskosten, obwohl letztere diese Anfangsinvestition als Abschreibung enthält. In einer weiteren Studie zu Kaufkriterien von NFZ-Betreibern, wurden Betriebskosten, Kraftstoffverbrauch und Zuverlässigkeit als die wichtigsten Faktoren gelistet.²⁵³ Dies unterstreicht empirisch die Wichtigkeit dieser Variable.

Bewusstsein und Berücksichtigung der Gesamtbetriebskosten beschreibt den Grad der Wichtigkeit und Betrachtung von TCO bei der Auswahl innovativer Antriebstechnologien. Diese Skala umfasst Items²⁵⁴, welche die Berücksichtigung von Amortisationsdauer, Betriebskosten und Kraftstoffkosten, als derzeit wichtigsten Kostentreiber der Gesamtbetriebskosten, messen. Zusätzlich wird zur Validierung der Skala die Zahlungsbereitschaft für eine kraftstoffsparende Technologie abgefragt und erhoben, ob eine Organisation derzeit eine TCO-Rechnung vor Investitionsentscheidungen in NFZ durchführt.

Im Hinblick auf die direkte Korrelation des Diesel-Kraftstoffverbrauchs mit den CO₂-Emissionen sowie dem erheblichen Anteil der Kraftstoffkosten an den Gesamtbetriebskosten, wird folgende Hypothese aufgestellt:

H₁: Es existiert ein positiver Zusammenhang zwischen dem *Bewusstsein und Berücksichtigung der Gesamtbetriebskosten* und der *Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien* bei der Investition von Organisationen in NFZ.

5.2.2.3 Unabhängige Variable: Anschaffungspreissensitivität

Obwohl die Anfangsinvestitionssumme die TCO über die Abschreibung beeinflusst, wird angenommen, dass diese einen separaten Einfluss auf die Auswahl von Antriebstechnologien hat. Zum Teil widerspricht dies der Rationalität in organisationalen Beschaffungsprozessen. Organi-

²⁴⁹ TCO ist die englische Abkürzung für „total cost of ownership“ und entspricht damit dem deutschen Begriff Gesamtbetriebskosten.

²⁵⁰ Vgl. *Bänsch* (2002), S. 182.

²⁵¹ Vgl. *TriComB2B* (2011), S. 6.

²⁵² Vgl. *Diez und Krauss* (2006), S. 28.

²⁵³ Vgl. *Gramm et al.* (2012), S. 7–8.

²⁵⁴ Ein Item ist eine Aussage oder Indikator innerhalb eines Messinstrumentes. Mehrere Items, welche dasselbe messen sollen, werden zu einer Skala zusammengefasst, die wiederum eine Variable misst.

sationen sollten keine Sensitivität gegenüber Anschaffungspreisen besitzen, solange die Investition die Gesamtbetriebskosten positiv beeinflusst. Jedoch ist der Einfluss der Höhe der Anfangsinvestitionssumme wissenschaftlich belegt.²⁵⁵ Ebenso wurde eine erhöhte Sensitivität gegenüber Anschaffungspreisen auch unter Betreibern von NFZ empirisch belegt. Aufgrund des steigenden Wettbewerbsdrucks im Transportsektor, welcher besonders kleine und mittlere Organisationen trifft, sind Anschaffungspreise von NFZ unter den drei wichtigsten Kriterien bei Neuinvestitionen.²⁵⁶

Da der Antrieb einen wesentlichen Anteil am Gesamtpreis von NFZ verursacht und alternative Antriebskonzepte derzeit teurer als konventionelle sind, wird folgende Hypothese aufgestellt:

H₂: Es existiert ein negativer Zusammenhang zwischen der *Anschaffungspreissensitivität* und der *Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien* bei der Investition von Organisationen in NFZ.

5.2.2.4 Unabhängige Variable: Erwartete Nützlichkeit

Die Nützlichkeit einer technologischen Innovation beschreibt im organisationalen Kontext das Potenzial der Innovation, die bestehenden Prozesse und den Geschäftsbetrieb zu verbessern.²⁵⁷ Die Operationalisierung als *erwartete Nützlichkeit* wird aufgrund der Betrachtung zukünftiger Antriebstechnologien, welche noch keine breite Adoption erfahren haben, angewandt. Daher können die meisten Organisationen heute nur gewisse Erwartungen an eine innovative Technologie formulieren. Die *erwartete Nützlichkeit* alternativer Antriebskonzepte für NFZ umfasst deren wahrscheinliche Auswirkungen auf die generellen Betriebsabläufe, Transportaufgabe und Produktivität. Die empirische Validität dieser Skala ist in den Studien von Venkatesh et al. (2003) und Davis (1989) gezeigt worden.²⁵⁸ Potentielle Prozessverbesserungen sind nach der *TriComB2B*-Studie ein wesentliches Entscheidungskriterium im organisationalen Beschaffungsprozess. Entscheidungsträger im B2B-Umfeld haben dabei der *erwarteten Nützlichkeit* sogar eine höhere Bedeutung zugeschrieben als dem Einfluss der Investition auf die Gesamtbetriebskosten.²⁵⁹

Die Nutzung unterschiedlicher Antriebstechnologien beeinflusst den Betrieb von NFZ. Alternative Antriebstechnologien unterscheiden sich nicht nur durch die Reduzierung der CO₂-Emissionen von konventionellen Antriebstechnologien, sondern auch durch die Motorleistung, Lärmemissionen oder beispielsweise Reichweite pro Tankfüllung. Daher wird folgende Hypothese aufgestellt:

²⁵⁵ Vgl. Sechtin (2012), S. 115; Bausback (2007), S. 304.

²⁵⁶ Vgl. Gramm et al. (2012), S. 7–8.

²⁵⁷ Vgl. Venkatesh et al. (2003), S. 425–478; Davis (1989), S. 320.

²⁵⁸ Vgl. Venkatesh et al. (2003); Davis (1989).

²⁵⁹ Vgl. TriComB2B (2011), S. 7.

H₃: Es existiert ein positiver Zusammenhang zwischen der *erwarteten Nützlichkeit* und der *Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien* bei der Investition von Organisationen in NFZ.

5.2.2.5 Unabhängige Variable: Erwartete Anwenderfreundlichkeit

Ein weiterer Einfluss auf NFZ-betreibende Organisationen aus der Nutzung innovativer Antriebstechnologien ist der Grad des Aufwandes, welcher mit der Nutzung dieser verbunden ist. Die Variable *erwartete Anwenderfreundlichkeit* misst daher „den Grad zu welchem eine Person der Auffassung ist, dass die Nutzung eines bestimmten Systems frei von Aufwand sein könnte.“²⁶⁰ Wie für die *erwartete Nützlichkeit* wird die Terminologie *erwartete Anwenderfreundlichkeit* der Tatsache gerecht, dass das zukünftige Adoptionsverhalten erforscht wird. Die Bedeutung dieser Variable ist auch im generellen Kaufverhalten verankert. Johnston und Lewin (1996) heben die, mit der Investition verbundenen, Risiken und Komplexität als entscheidende organisationale Kaufkriterien hervor, welche beide Indikatoren für die *erwartete Anwenderfreundlichkeit* sind.²⁶¹ Ebenso sind nach Ajzen (1991) die wahrgenommene Verhaltenskontrolle *perceived behavioral control*, also die erwartete Einfachheit oder Schwierigkeit in der Nutzung einer technologischen Innovation, ein Einflussfaktor auf die organisationale Adoption von Innovationen.²⁶²

Es wird angenommen, dass für NFZ-Betreiber alternative Antriebstechnologien zu wesentlichen Einschränkungen, hinsichtlich erhöhten Risikos im Transportbetrieb, erhöhter Komplexität und erhöhtem Aufwand führen können. Die derzeitige Tank- und Ladeinfrastruktur für Gasfahrzeuge und batterieelektrische Fahrzeuge ist weitestgehend unbefriedigend. Reparatur und Wartungsarbeiten nehmen für alternative Antriebe zu und sind beispielsweise durch die Hochvolttechnik mit erhöhtem Aufwand verbunden. Ebenso sind die Erfahrungen und das Wissen der Mitarbeiter mit diesen Technologien gering. Allerdings haben nicht alle Antriebstechnologien zwingend eine geringere Anwenderfreundlichkeit. Die Hybridisierung des Antriebs ist beispielsweise nicht zwingend an eine zusätzliche Ladeinfrastruktur gebunden.

Da Eigenschaften von Antriebstechnologien, welche den Geschäftsbetrieb einer Organisation erleichtern, die Adoption dieser erleichtern können, wird die folgende Hypothese aufgestellt:

H₄: Es existiert ein positiver Zusammenhang zwischen der *erwarteten Anwenderfreundlichkeit* und der *Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien* bei der Investition von Organisationen in NFZ.

²⁶⁰ Vgl. Davis (1989), S. 320. Das originale Zitat in englischer Sprache lautet: „the degree to which a person believes that using a particular system would be free of effort“.

²⁶¹ Vgl. Johnston und Lewin (1996), S. 2–3.

²⁶² Vgl. Ajzen (1991), S. 183–185.

5.2.2.6 Unabhängige Variable: Image-Faktoren Umwelt und Innovation

Der Wettbewerbsdruck im Transportsektor wird zunehmend stärker. Im Wettbewerb um Aufträge und Marktanteile müssen Organisationen versuchen Optionen und Maßnahmen zu identifizieren, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Dies kann entweder durch Kostenreduktion oder Wertsteigerung der eigenen Produkte und Services erfolgen. Die Bedeutung von TCO im Transportsektor wurde aufgezeigt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, durch eine Außendarstellung als innovative und umweltfreundliche Organisation zu einem präferierten Transportdienstleister zu werden. Dies wird in der Variable *Image-Faktoren Umwelt und Innovation* zusammengefasst. Image wird sowohl in Rogers (2003) Diffusionstheorie als zentrales Element herangezogen²⁶³ als auch durch Johnston und Lewin (1996) zur Erklärung des organisationalen Beschaffungsverhaltens im Allgemeinen genutzt.²⁶⁴ Innovationen werden nach Venkatesh et al. (2003) ferner auch deswegen adoptiert, um in einem sozialen System das eigene Image zu verbessern.²⁶⁵

Für die Bedeutung von Umweltschutz als Wettbewerbsfaktor gibt es empirische Belege. 85 % der deutschen Unternehmen im Logistik Umfeld geben an, Umweltschutzaktivitäten zur Steigerung des Unternehmensimage durchzuführen.²⁶⁶ Ebenso sehen sich international 80 % der Logistikunternehmen bis 2020 in ihrem Geschäft signifikant durch umweltbezogene Themen beeinflusst.²⁶⁷ Daher wird die folgende Hypothese aufgestellt:

- H₅: Es existiert ein positiver Zusammenhang zwischen den *Image-Faktoren Umwelt und Innovation* und der *Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien* bei der Investition von Organisationen in NFZ.

5.2.2.7 Unabhängige Variable: Umweltschutz und soziale Verantwortung

Im Gegensatz zum Image als extrinsische Motivation zur Nutzung CO₂-sparender Antriebstechnologien, beschreibt die Variable *Umweltschutz und soziale Verantwortung* (CSR²⁶⁸) die intrinsische oder transzendente motivierte moralische Verpflichtung, zum Umweltschutz beizutragen. Dies bedeutet, dass eine Organisation als Teil der Gesellschaft ihrer Verpflichtung zum Umweltschutz und Eindämmung des Klimawandels nachkommt.

Drumwright (1994) hat die Sozialverantwortung im organisationalen Einkauf aus nicht-ökonomischen Gründen empirisch bewiesen. Eine umweltfreundliche Haltung und die Verpflichtung, negative Einflüsse auf die Umwelt durch die Beschaffungsvorgänge der eigenen

²⁶³ Vgl. Rogers (2003), S. 407–416.

²⁶⁴ Vgl. Johnston und Lewin (1996), S. 2–3.

²⁶⁵ Vgl. Venkatesh et al. (2003), S. 452.

²⁶⁶ Vgl. Wittenbrink (2011), S. 160.

²⁶⁷ Vgl. Piecyk und McKinnon (2010), S. 41.

²⁶⁸ CSR steht für den englischen Begriff Corporate Social Responsibility und bedeutet Unternehmerische Sozialverantwortung.

Organisation zu reduzieren, sind insbesondere dann sehr hoch, wenn diese in den Idealen des Unternehmensgründers verankert sind.²⁶⁹ Organisationen bewerten moralische Aspekte für ein sozial verträgliches Verhalten höher als strategische oder ökonomische Aspekte.²⁷⁰ Für Fahrzeugflotten und insbesondere bei öffentlichen Betreibern von Fuhrparks gibt es zahlreiche Beispiele für Leitfäden oder Richtlinien zur Beschaffung umweltfreundlicher Fahrzeuge.²⁷¹

Klimaschutz wird durch die Reduktion von Treibhausgas-Emissionen als integraler Bestandteil von Umweltschutz und CSR betrachtet. Da Organisationen durch die Adoption und Nutzung CO₂-sparender Antriebstechnologien ihre Treibhausgas-Emissionen reduzieren können, wird die folgende Hypothese aufgestellt:

H₆: Es existiert ein positiver Zusammenhang zwischen *Umweltschutz und sozialer Verantwortung* und der *Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien* bei der Investition von Organisationen in NFZ.

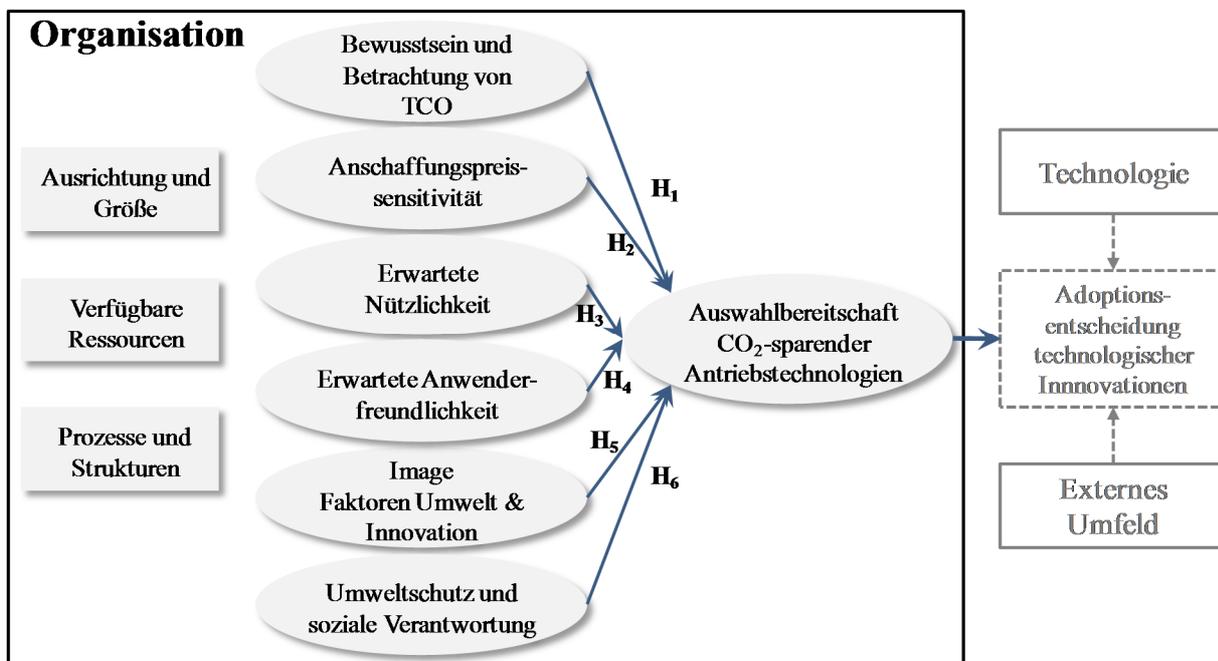


Abbildung 16: Hypothesenkonstrukt zur Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien²⁷²

5.2.3 Methodik und Datenerhebung

Der methodische Ansatz für die empirische Untersuchung wurde zweistufig gewählt. Zunächst wurden in einer explorativen Vorstudie die identifizierten Variablen bestätigt und validiert. Dazu

²⁶⁹ Vgl. Drumwright (1994).

²⁷⁰ Vgl. Ven van de, B. und Graafland (2006), S. 114–116.

²⁷¹ Vgl. beispielsweise Zimmer et al. (2007); Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (2010).

²⁷² Eigene Abbildung.

wurden Experteninterviews unter erfahrenen NFZ-Händlern durchgeführt. Im zweiten Schritt wurde mittels einer quantitativen Untersuchung die Präferenzstruktur von Organisationen zur Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien sowie dem zugrunde liegenden Beschaffungsprozess erhoben.

5.2.3.1 Explorative Vorstudie

Experteninterviews wurden als methodischer Ansatz zur Bestätigung der theoretisch abgeleiteten Variablen gewählt. Erfahrene NFZ-Verkäufer unterschiedlicher Marken wurden in Süddeutschland ausgewählt, um den Anforderungen der Studie gerecht zu werden. Aufgrund des explorativen Charakters der Vorstudie, erfolgte eine bewusste Auswahl von Experten. Die fünf Interviewpartner sind Händler der größten Marken auf dem NFZ-Markt und bringen mindesten fünf Jahre Erfahrung in ihrer Aufgabe mit. Ziel der Interviews war es, ein generelles Verständnis für den Beschaffungsprozess von NFZ, den dahinter liegenden Kaufentscheidungskriterien sowie die im Prozess involvierten Personen zu entwickeln. Dabei sollten die unabhängigen Variablen und deren Einfluss auf die Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien bestätigt werden. Die Interviewpartner wurden ohne Unterstützung aufgefordert, über den Beschaffungsprozess und die Präferenzstruktur bei der Investition in NFZ im Allgemeinen sowie bei der Auswahl von Antrieben im Besonderen zu berichten. So wurde vermieden, die Experten in Richtung der theoretisch abgeleiteten unabhängigen Variablen zu führen. Des Weiteren wurden die Interviewpartner nach Unterschieden im Beschaffungsprozess verschiedener Gruppen von Kunden befragt.

Aufgrund der explorativen Auslegung der Vorstudie in einem vergleichsweise wissenschaftlich wenig erforschten Thema, wurden die Interviews mittels eines halbstrukturierten Leitfadens und einer offenen Interviewstruktur geführt.²⁷³ Die Interviews wurden aufgenommen²⁷⁴ und anschließend transkribiert sowie anonymisiert. Für die Transkription wurde ein pragmatisch-selektiver Ansatz gewählt, indem die wichtigsten Inhalte abgeschrieben und zum Teil zusammengefasst wurden.²⁷⁵

Jeder NFZ-Händler erwähnte die *Anschaffungspreissensitivität* und die *erwartete Anwenderfreundlichkeit* als die entscheidenden Kaufkriterien. Erstere wurde darüber hinaus als unabhängig von potentiellen Gesamtbetriebskostenvorteilen bestätigt. Die *erwartete Anwenderfreundlichkeit* wurde hauptsächlich mit der fehlenden Tankstellen-Infrastruktur alternativer Antriebskonzepte, einer erhöhten Fehleranfälligkeit und höheren Risiken im Transportbetrieb in Verbindung gebracht. All diese Faktoren wurden demnach als Barrieren der Adoption CO₂-sparender Antriebstechnologien eingeordnet.

²⁷³ Vgl. Gläser und Laudel (2010), S. 41–42.

²⁷⁴ Zwei Interviewpartner willigten zu Aufnahme des Interviews nicht ein. Daher wurden durch einen zweiten Interviewer umfangreiche Notizen angefertigt und später gemeinsam ein Gedächtnisprotokoll erstellt. Vgl. Gläser und Laudel (2010), S. 155–158.

²⁷⁵ Vgl. Bogner et al. (2009).

Von vier Interviewpartnern wurde der Einfluss von *Bewusstsein und Berücksichtigung der Gesamtbetriebskosten* sowie *Image-Faktoren Umwelt und Innovation* unaufgefordert bestätigt. Ob diese beiden Eigenschaften eher bei größeren oder kleineren Organisationen wichtiger sind, konnte abschließend nicht beantwortet werden. Allerdings scheinen große Unternehmen tendenziell kostensensitiver zu agieren, da die Beschaffungsprozesse als rationaler beschrieben wurden und klare Budgetgrenzen für Investitionen vorgegeben sind. Vier Interviewpartner haben ferner potentielle Verbesserungen des organisationsexternen Images als einen wesentlichen Treiber für die derzeitige Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien genannt. Dies bestätigt die extrinsische Motivation als einen entscheidenden Treiber der Variable *Image Faktoren Umwelt und Innovation*.

Obwohl zwei von fünf Interviewpartnern die *erwartete Nützlichkeit* sowie *Umweltschutz und soziale Verantwortung* nicht unaufgefordert erwähnten, werden die beiden Variablen dennoch beibehalten, da auf Nachfrage deren Bedeutung unterstrichen wurde sowie deren Wichtigkeit von den anderen Händlern unaufgefordert deutlich hervorgehoben wurde. Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse zusammenfassend.

	Händler 1	Händler 2	Händler 3	Händler 4	Händler 5
H₁ : Bewusstsein und Berücksichtigung TCO	✓		✓	✓	✓
H₂ : Anschaffungspreissensitivität	✓	✓	✓	✓	✓
H₃ : Erwartete Nützlichkeit		✓	✓		✓
H₄ : Erwartete Anwenderfreundlichkeit	✓	✓	✓	✓	✓
H₅ : Image-Faktoren Umwelt und Innovation	✓	✓	✓	✓	
H₆ : Umweltschutz und soziale Verantwortung	✓			✓	✓

Abbildung 17: Zusammenfassung der Interviews mit Bestätigung der abhängigen Variablen²⁷⁶

Neben der Bestätigung der vordefinierten unabhängigen Variablen, haben die Interviewpartner die hohe Bedeutung der Fahrer und Händler auf die finale Kaufentscheidung herausgestellt. Ihr Einfluss wird daher in der Wichtigkeit im *buying center* abgefragt, da sie Teil der organisationsinternen Strukturen und Prozesse darstellen. Des Weiteren wurde einhellig angemerkt, dass die verschiedenen Beschaffungsmethoden Barzahlung, Finanzierung, Leasing und Miete einen signifikanten Einfluss auf die Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien habe. Diese sind ebenso Teil der organisationalen Prozesse und verfügbaren Ressourcen, sodass ein entsprechendes Konstrukt in der folgenden quantitativen Studie integriert wird.

²⁷⁶ Eigene Abbildung.

Schließlich wurde durch die Interviews deutlich, dass im NFZ-Markt eine geringe Kenntnis über CO₂-Emissionen vorherrscht. Selbst für einen der NFZ-Händler war die Korrelation von CO₂-Emissionen mit dem Diesel Kraftstoffverbrauch unbekannt, vielmehr ordnete dieser die CO₂-Emissionen fälschlicherweise den Schadstoff-Emissionen zu. Zwei andere Interviewpartner unterstrichen die Unkenntnis über CO₂-Emissionen unter den Betreibern von NFZ.

5.2.3.2 Quantitative Hauptstudie

Design des Messinstruments

Als Messinstrument für die quantitative Hauptstudie wurde ein strukturierter, webbasierter Fragebogen ausgewählt, um die Hypothesen H₁-H₆ zu überprüfen und die Präferenzen in der Auswahl CO₂-sparender Antriebstechnologien zu untersuchen. Neben den latenten Variablen als Kern der Umfrage sind ferner die folgenden Konstrukte von Interesse:

- Beschaffungsmethoden für NFZ
- Die Position und Rolle des Teilnehmers im *buying center*
- Die Zusammensetzung und Wichtigkeit der Rollen des *buying centers*
- Subjektive multi-Skalen Abfrage der Wichtigkeit von Entscheidungskriterien beider Investition in NFZ
- Die Anwendung und Nutzung schwerer NFZ in der Organisation
- Das derzeitige Wissen, die Kenntnis, Nutzung und Kaufintention in Bezug auf die ausgewählten alternativen Antriebstechnologien
- Unternehmensdaten

Der Fragebogen bestand aus sieben grundsätzlichen Teilen, von welchen jeder Teil bestimmte Fragen unterschiedlichen Typs umfasste. Zunächst wurde über eine Vorauswahl identifiziert, ob ein potentieller Teilnehmer Teil der Zielgruppe ist. Die Zielgruppe umfasst Mitglieder eines *buying centers* von Organisationen, welche entweder NFZ besitzen oder in den nächsten zwölf Monaten planen NFZ anzuschaffen. Der folgende Prozessteil zielte darauf ab, das zugrunde liegende *buying center* und die damit zusammenhängende Struktur der Einflussnahme zu untersuchen. Anschließend wurden die spezifischen Entscheidungskriterien für die Auswahl von Antriebstechnologien allgemein von den Teilnehmern entsprechend ihrer Wichtigkeit mit einer Likert-Skala²⁷⁷ bewertet. Um einen Einblick in die generelle Haltung und Anwendung im Hinblick auf die vielfältigen Kraftstoff- und CO₂-sparenden Maßnahmen zu erhalten, wurden die Teilnehmer befragt, welche dieser Maßnahmen bisher schon umgesetzt worden sind sowie welche Maßnahmen für weitere Einsparung in Erwägung gezogen werden. Da die Auswahl CO₂-

²⁷⁷ Die Likert-Skala ist in der empirischen Sozialforschung die gebräuchlichste Skalierungsmethode und wird vornehmlich zur Messung von Einstellungen verwendet. Sie setzt sich aus mehreren Items zusammen und hat den Vorteil einer Erhöhung der Reliabilität. Vgl. dazu *Schnell et al.* (2013), S. 176–179 und *Paier* (2010), S. 67–69.

sparender Antriebstechnologien eine dieser Maßnahmen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs ist, wird diese Liste als weiteres Kontrollinstrument zur Validierung der Antworten und Ergebnisse im Hauptteil zur Präferenzstruktur genutzt.

Der Hauptteil des Fragebogens beschäftigt sich mit der Analyse der Präferenzstruktur, welche die Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien in NFZ determiniert. Die sechs unabhängigen Variablen sowie die abhängige Variable wurden als latente Skalen, mit jeweils vier bis sechs Items auf einer 7-Punkte-Likert-Skala, operationalisiert. Die Teilnehmer wurden aufgefordert, ihren Grad der Zustimmung aus der Sicht ihrer jeweiligen Organisation für jede Aussage abzugeben. Die Aussagen wurden nacheinander in drei Listen in einer für alle Fragebögen festen, zufällig-generierten Reihenfolge den Teilnehmern präsentiert. Die Items wurden in beide Richtungen formuliert, sodass ein *response bias* ausgeschlossen werden kann.²⁷⁸

Aufbauend auf die Abfrage der Präferenzen in der Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien, wurde im Folgenden das aktuelle Auswahlverhalten, die Auswahlabsicht bei der nächsten Beschaffung und die generelle Erwägung der Auswahl von alternativen Antriebstechnologien erhoben. Abschließend wurden die Teilnehmer nach den Unternehmensdaten und weiteren Angaben zum Beschaffungsverhalten der Organisation befragt. Der finale Fragebogen ist im Anhang II 2) dargestellt.

Bevor der Fragebogen an die Zielgruppe versendet wurde, fand ein umfangreicher *Pretest* statt. NFZ-Markt Experten, Logistikdienstleister und ein großer deutscher Transport- und Logistikverband haben den Fragebogen auf die allgemeine Verständlichkeit, branchenübliches Vokabular sowie die Validierung des Inhalts hin getestet. Insgesamt wurden 24 Teilnehmer für den *Pretest* rekrutiert.

Stichprobe und Datenerhebung

Der Fragebogen wurde von 16 deutschen Transport- und Logistikverbänden an ihre Mitglieder verteilt. Des Weiteren wurde eine nicht-vollständige Liste von Gemeinden und angebundene Personentransportunternehmen erstellt und mithilfe eines Massenverteilers per E-Mail kontaktiert. Zwei Erinnerungsnachrichten wurden jeweils knapp zwei Wochen nach dem Erstkontakt bzw. nach der ersten Erinnerung versendet.

Daten zur adäquaten und vollständigen Beschreibung der Grundgesamtheit sind für den NFZ-Markt sehr begrenzt verfügbar. Die NFZ-Zulassungsstatistik des Kraftfahrzeugbundesamtes ist unvollständig, auch gibt es nur Schätzungen zur Verteilung der Anwendungsfälle auf neu zugelassene NFZ.²⁷⁹ Dennoch wurde auf Basis der Anwendungsfälle sowie der Größe der Unternehmen ein onlinebasiertes Quota-Verfahren zur Stichprobengenerierung angewendet.²⁸⁰ Entsprechend erfolgte die Auswahl der NFZ-Verbände zur Verteilung der Umfrage an ihre Mitglieder

²⁷⁸ Vgl. Bradburn et al. (2004); Thielsch (2012).

²⁷⁹ Vgl. Kapitel 2.

²⁸⁰ Vgl. Schnell et al. (2013), S. 292–296.

und die zusätzliche Zusammenstellung des E-Mailverteilers. Mithilfe der Onlinetools zur Durchführung der Studie wurde sichergestellt, dass nur eine Beantwortung pro Computer erfolgte.

Aufgrund des Auswahlverfahrens zur Erreichung der Stichprobe, ist es unklar wie viele potentielle Organisationen der Zielgruppe über den Fragebogen informiert wurden. Daher kann der Erfolg der Werbung, ausgedrückt durch die α -Rate, nicht bestimmt werden. Von den 383 potentiellen Teilnehmern in Deutschland, welche dem Hyperlink auf den Fragebogen gefolgt sind, haben 377 Teilnehmer den Fragebogen tatsächlich gestartet (β -Selektionsrate von 98,4 %). Von diesen 377 Teilnehmern haben schließlich 214 den Fragebogen vollständig beendet (γ -Rate von 56,8 %). Da nicht alle Teilnehmer, welche den Fragebogen ausgefüllt haben, Teil der Zielgruppe waren, basiert die folgende Analyse auf einer Stichprobe von 177 Teilnehmern aus Deutschland (γ -Rate von 46,9 %). Abbildung 18 gibt einen Überblick über die Stichprobe sowie die Verteilung der Rollen der Teilnehmer im jeweiligen *buying center*.

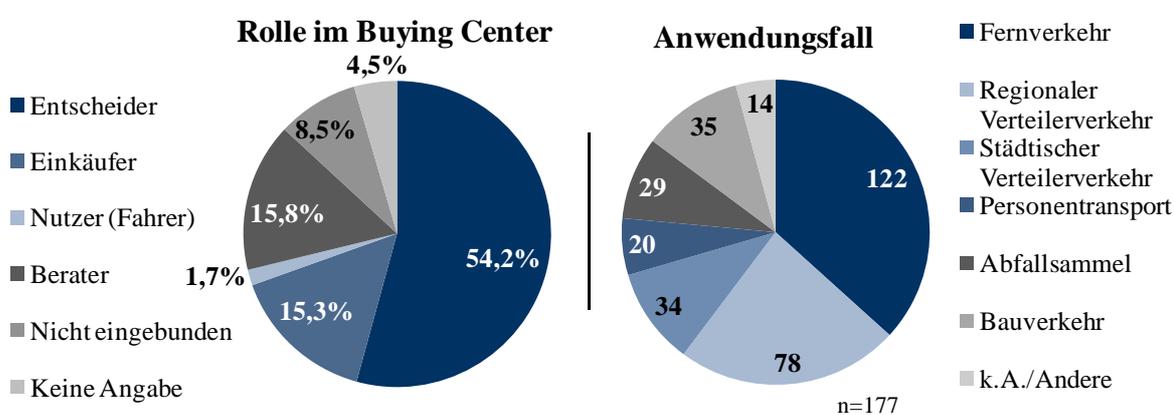


Abbildung 18: Beschreibung der Stichprobe²⁸¹

5.2.4 Statistische Analyse der Ergebnisse²⁸²

5.2.4.1 Validität und Reliabilität

Sowohl für die unabhängigen Variablen als auch für die abhängige Variable wurden Faktorenanalysen²⁸³ durchgeführt, um die Diskriminanzvalidität zu überprüfen. Ebenso wurde Cron-

²⁸¹ Eigene Abbildung.

²⁸² Alle in diesem Abschnitt vorgestellten Analysen und Berechnung wurden mit der Statistiksoftware IBM SPSS Statistics 21 durchgeführt.

²⁸³ Vgl. Schnell et al. (2013), S. 151–152. Faktorenanalysen sind statistische Verfahren zur Konstruktvalidierung. Nach Schnell et al. (2013), S. 151 wird dabei versucht, eine große Anzahl an Untersuchungsvariablen (Items) mit einer weit kleineren Anzahl von Faktoren (Variablen) zu erklären. „Bei der explorativen Faktorenanalyse wird versucht, sowohl die Anzahl der Faktoren einerseits als auch die Zusammenhänge zwischen den Faktoren („Faktorenkorrelationen“) und den Variablen andererseits (Faktorladungen) aus den Daten zu errechnen. Im Gegensatz dazu erlaubt eine konfirmatorische Faktorenanalyse einen statistischen Test, ob exakt spezifizierte Hypothesen über die zu erwartenden Ergebnisse durch die Daten

bach's α ²⁸⁴ berechnet, um die Reliabilität des Messinstruments nachzuweisen.²⁸⁵ Auf Basis dieser Ergebnisse wurden die Variablen – falls nötig – angepasst und neu interpretiert. Vor Durchführung der Analysen wurden 14 Items umgerechnet, um deren Messskala mit der des theoretischen Konstrukts zu verbinden.

Es wurden zunächst drei explorative Faktorenanalysen (EFA) durchgeführt, welche zur Eliminierung von acht Items führten, die entweder auf einen separaten Faktor luden, auf zwei unterschiedliche Faktoren luden oder eine zu geringe Faktorladung aufwiesen. Die erste EFA führte zur Eliminierung von fünf Items der unabhängigen Variablen, die zweite EFA führte zur Eliminierung von zwei Items. Schließlich führte die dritte EFA zu signifikanten einfachen Faktorladungen größer 0,5 und sechs Faktoren auf Basis des Kaiser-Kriteriums²⁸⁶. Jedoch hatte die folgende Reliabilitätsanalyse gezeigt, dass das Cronbach's α eines Faktors signifikant durch die Eliminierung eines weiteren Items verbessert werden konnte. Die finale EFA führte zu einem Kaiser-Meyer-Olkin-Maß (KMO) von 0,82, was einer „verdienstvollen“ Eignung des Datensatzes für eine Faktorenanalyse entspricht.²⁸⁷

Für die abhängige Variable *Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien* wurde eine konfirmatorische Faktorenanalyse (KFA) durchgeführt. Hierbei wurde ein Item aufgrund einer Faktorladung kleiner 0,5 eliminiert. Für die KFA wurde ein KMO von 0,791 berechnet, was einer „ziemlich guten“ Eignung des Datensatzes für eine Faktorenanalyse entspricht.²⁸⁸ Die vier verbliebenen Items der abhängigen Variable *Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien* erklären insgesamt 64,9 % der Varianz im Datensatz. Zur Überprüfung der Reliabilität wurde Cronbach's α berechnet. In Anlehnung an Nunnally und Bernstein (2008) führen ein Schwellenwert des Cronbach's α von größer 0,7 zu einer ausreichenden Reliabilität

gestützt werden. Konfirmatorische Faktorenanalysen erfordern die vorherige Festlegung [...] der Anzahl der Faktoren, die Beziehung zwischen den Faktoren und Beziehung zwischen Faktoren und Variablen.“

²⁸⁴ Vgl. Schnell et al. (2013), S. 142–143. Nach Schnell et al. (2013) wird Cronbach's α zur Reliabilitätschätzung der internen Konsistenz angewandt, um „anzugeben, in welchem Umfang alle Einzelindikatoren dasselbe Konstrukt messen.“ Durch Ausschluss von Items, welche nur sehr niedrig mit den übrigen Items korrelieren, steigt die Reliabilität an.

²⁸⁵ Im Anhang II 3) sind ausführliche Statistiken zur Reliabilität und Validität zu finden.

²⁸⁶ Vgl. Backhaus (2008), S. 353. Das Kaiser Kriterium ist ein Kriterium zur Bestimmung der Faktorenanzahl. Nach Backhaus et al. (2008) „ist die Zahl der zu extrahierenden Faktoren gleich der Zahl der Faktoren mit Eigenwerten größer eins. Die Eigenwerte werden berechnet als Summe der quadrierten Faktorladungen eines Faktors über alle Variablen.“

²⁸⁷ Vgl. Backhaus (2008), S. 336–337. Nach Backhaus et al. (2008) wird das Kaiser-Meyer-Olkin Kriterium „als das beste zur Verfügung stehende Verfahren zur Prüfung der Korrelationsmatrix angesehen, weshalb seine Anwendung vor der Durchführung einer Faktorenanalyse auf jeden Fall zu empfehlen ist“. Es beruht auf der sogenannten measure of sampling adequacy (MSA) Prüfgröße. „Das MSA Kriterium zeigt, in welchem Umfang die Ausgangsvariablen zusammengehören und dient somit als Indikator dafür, ob eine Faktorenanalyse sinnvoll erscheint oder nicht.“

²⁸⁸ Vgl. Backhaus (2008), S. 336–337.

der Skala.²⁸⁹ In diesem Fall wurde ein Cronbach's α von 0,819 errechnet, was dieses Kriterium deutlich erfüllt.

Für die unabhängigen Variablen wurden ebenso die Diskriminanzvalidität sowie die Reliabilität mit positivem Ausgang untersucht. Hervorzuheben ist dabei, dass drei Items, welche im theoretischen Modell der Variable *Image-Faktoren Umwelt und Innovation* zugeordnet waren, auf den Faktor *erwartete Nützlichkeit* luden. Diese Items waren – auch im Gegensatz zu den verbleibenden drei Items des Faktors *Image-Faktoren Umwelt und Innovation* – ausschließlich mit Bezug auf die Verbesserung der Wettbewerbsposition formuliert. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass alternative Antriebstechnologien als nützlich und hilfreich angesehen werden, die Attraktivität gegenüber potentiellen Kunden zu erhöhen und sich somit im Wettbewerb besser zu positionieren. Tabelle 10 im Anhang zeigt das Ergebnis der Faktorenanalyse zusammenfassend.²⁹⁰

Um zu überprüfen, ob die formulierten Hypothesen zu der erwarteten Beziehung zwischen den sechs unabhängigen und der abhängigen Variable zutreffen, wird eine multiple lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Für fünf der sechs Variablen wurde die Hypothese aufgestellt, dass diese einen positiven Einfluss auf die *Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien* haben. Einzig im Fall der *Anschaffungspreissensitivität* wurde ein negativer Einfluss auf die abhängige Variable angenommen.

Die unabhängige Variable *Umweltschutz und soziale Verantwortung* hat den stärksten positiven Einfluss auf die abhängige Variable *Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien* mit einem standardisierten β -Koeffizienten von 0,461, gefolgt von den unabhängigen Variablen *Erwartete Nützlichkeit* mit 0,434, *Erwartete Anwenderfreundlichkeit* mit 0,337, *Image-Faktoren Umwelt und Innovation* mit 0,192 und *Bewusstsein und Berücksichtigung der Gesamtbetriebskosten* mit 0,128.²⁹¹ *Anschaffungspreissensitivität* übt einen signifikant negativen Einfluss ($\text{Sig.} < 0,001$) von -0,204 auf die abhängige Variable aus. Aufgrund des signifikanten Einflusses ($\text{Sig.} < 0,05$) aller unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable werden alle Hypothesen H₁₋₆ akzeptiert (vgl. Tabelle 5). Dabei erklären die sechs unabhängigen Variablen 63 % der Varianz in der unabhängigen Variable, was durch das Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,63 ausgedrückt wird.

²⁸⁹ Vgl. Nunnally und Bernstein (2008).

²⁹⁰ Vgl. Anhang II 3).

²⁹¹ „Die Regressionskoeffizienten geben den marginalen Effekt der Änderungen einer unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable an.“ Vgl. Backhaus (2008), S. 65. Diese bedeutet im vorliegenden Fall, dass beispielsweise eine Verringerung der Gesamtbetriebskosten alternativer Antriebstechnologien um 100 zu einer erhöhten Auswahlbereitschaft dieser von 12,8 führen würde.

Modell	Unstandardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Konstant)	-0,003	0,060		-0,058	0,954
Bewusstsein und Berücksichtigung TCO	0,132	0,061	0,128	2.162	0,033
Anschaffungspreissensitivität	-0,204	0,058	-0,211	-3.528	0,001
Erwartete Nützlichkeit	0,426	0,058	0,434	7.329	0,000
Erwartete Anwenderfreundlichkeit	0,320	0,056	0,337	5.696	0,000
Image Faktoren Umwelt und Innovation	0,193	0,059	0,192	3.247	0,002
Umweltschutz und soziale Verantwortung	0,511	0,066	0,461	7.752	0,000

ANOVA Regression: F=30,116 Sig. = 0,000 R²= 0,63 n=117

Tabelle 5: Ergebnis der multiplen Regressionsanalyse²⁹²

5.2.4.2 Clusteranalyse

Ein Ziel dieser Untersuchung ist es, Rückschlüsse auf unterschiedliche Adopterkategorien des NFZ-Marktes zu ziehen. Daher wird mittels einer Clusteranalyse nach dem Ward-Verfahren²⁹³ eine verhaltensorientierte Kundensegmentierung durchgeführt. Die verhaltensorientierte Segmentierung erfolgt dabei auf Basis der Präferenzstruktur für CO₂-sparende Antriebstechnologien bei der Anschaffung neuer NFZ.

Zur Abgrenzung nach innen homogener und außen heterogener Kundengruppen wird eine hierarchische Clusteranalyse auf Basis der sechs extrahierten, unabhängigen Faktoren durchgeführt. Aufgrund des paarweisen Ausschlusses von Fällen für die EFA konnten in der Regression nur für 117 Fälle Faktorenwerte herangezogen werden. Daher würden 60 Fälle (33,9 %) nicht in der Clusteranalyse berücksichtigt werden. Deshalb wird die EFA nochmals durchgeführt und fehlende Werte pro Item mit dem jeweiligen Mittelwert ersetzt. Die Faktorenlösung ist mit der zuvor erhaltenen identisch. Die Faktorladungen weichen dabei nur marginal von der vorherigen ab (KMO von 0,828).

Um diesen Ansatz zu validieren, wurde erneut eine hierarchische Clusteranalyse nach dem Ward-Verfahren für beide Faktorenlösungen durchgeführt. Auf Basis der visualisierten Dendrogramme und der Veränderung der Koeffizienten in der Zuordnungsübersicht wurde für beide Faktorenlösungen sechs Cluster gewählt.²⁹⁴ Um zu überprüfen, ob es einen Zusammenhang zwischen den beiden Clusterlösungen gibt, wurden die Cluster als Variablen gespeichert und mittels

²⁹² Eigene Abbildung.

²⁹³ Vgl. Backhaus (2008), S. 420–424. Das Ward Verfahren ist nach Backhaus et al. (2008) ein agglomeratives Verfahren der Clusteranalyse. Das Ward Verfahren vereinigt „jeweils diejenigen Objekte (Gruppen), die die Streuung (Varianz) in einer Gruppe möglichst wenig erhöhen. Dadurch werden möglichst homogene Cluster gebildet“.

²⁹⁴ Vgl. Backhaus (2008), S. 430–432.

einer Kontingenztafel verglichen. Daraus ergab sich ein χ^2 ²⁹⁵ von 240,184 was auf einen Zusammenhang zwischen den beiden Clustern hinweist. Um die Stärke des Zusammenhangs zu messen, wurde Cramer's V ²⁹⁶ berechnet. Der Wert von 0,641 ist höchst signifikant und weist auf einen starken Zusammenhang der beiden Clusterlösungen hin.²⁹⁷ Daher wird die Clusterlösung mit den 177 Antworten anstatt der ursprünglichen mit 117 Antworten für die weitere Analyse genutzt.

Des Weiteren wurde im Hinblick auf die Kategorisierung von NFZ nach ihrem jeweiligen Anwendungsfall überprüft, ob es für die unterschiedlichen Cluster einen Zusammenhang zwischen dem Hauptanwendungsfall der einzelnen Organisationen sowie der Zugehörigkeit zu einem Cluster gibt. Dafür wurden Kreuztabellen zu den Anteilen der Anwendungsfälle in einem Cluster erstellt. Anschließend wurde Cramer's V berechnet. Der signifikante Wert von 0,245 zeigt allerdings nur einen schwachen Zusammenhang an.²⁹⁸ Daher ist der Hauptanwendungsfall einer Organisation nicht wesentlich für deren Präferenzstruktur für CO₂-sparende Technologien verantwortlich.

5.2.4.3 Limitationen der empirischen Studien

Die Forschungsergebnisse der qualitativen Vorstudie und der quantitativen Hauptstudie unterliegen gewissen Einschränkungen und werden daher erläutert.

Die Auswahl der Stichprobe für beide Studien erfolgte durch eine bewusste Auswahl der Teilnehmer und somit nicht auf Basis eines Zufallsverfahrens, womit interferenzstatistische Techniken nicht anwendbar sind.²⁹⁹

Die Vorstudie wurde aufgrund einer Sättigung an neuen Informationen eingestellt, jedoch könnten qualitative Interviews in einem breiteren Kontext noch weitere Aspekte aufzeigen. Auch hätte die Einbeziehung von Nischenanbietern gegebenenfalls zu zusätzlichen Informationen führen können.

Die Anwendung des Quota-Verfahrens in der quantitativen Hauptstudie kann zu Verzerrungen führen, in dem insbesondere Teilnehmer ausgewählt werden, welche sich kooperativ, verfügbar und gegenüber neuen Medien und Online-Fragebögen aufgeschlossen zeigen. Insbesondere kleine Unternehmen können dadurch in der Durchführung der Umfrage unterrepräsentiert sein.

²⁹⁵ Der Chi-Quadrat-Test (χ^2) wird in der Kontingenzanalyse dazu verwendet systemische Zusammenhänge zwischen nominal-skalierten Variablen aufzudecken – wie es bei der Clusterlösung der Fall ist. Allerdings liefert dieser keinen Hinweis zur Stärke des Zusammenhangs. Vgl. *Backhaus (2008)*, S. 298–299.

²⁹⁶ Cramer's V ist ein auf dem Chi-Quadrat-Test aufbauendes Maß für die Stärke des Zusammenhangs zwischen zwei Variablen. Vgl. *Backhaus (2008)*, S. 310.

²⁹⁷ Vgl. *Cleff (2012)*, S. 92. Werte im Intervall [0;0,1[zeigen keinen Zusammenhang an, im Intervall [0,1 ; 0,3[einen schwachen Zusammenhang, im Intervall [0,3 ; 0,6[einen mittleren Zusammenhang und im Intervall [0,6 ; 1] einen starken Zusammenhang.

²⁹⁸ Vgl. *Cleff (2012)*, S. 92.

²⁹⁹ Vgl. *Schnell et al. (2013)*, S. 290.

Daher wird für die Zukunft zunächst eine Vollerhebung unter allen NFZ-betreibenden Organisationen zu deren Größen, Transportaufgaben, Fuhrparks, NFZ-Neuzulassungen und weiterer deskriptiver Statistiken notwendig sein, um darauf aufbauend eine solche Studie vollständig repräsentativ und zufällig durchzuführen.

Da empirische Untersuchungen zum Adoptionsverhalten auf dem NFZ-Markt nicht vorhanden waren, mussten einige Items neu definiert werden. Aufgrund des schwierigen Feldzugangs wurde sich gegen eine Eichstichprobe entschieden. Zwar zeigten sich die Skalen zur Messung der Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt als robust, jedoch wird eine weitere empirische Unterstützung dieser Items empfohlen.

Schließlich führt die Ersetzung fehlender Werte durch Mittelwerte von Items für die EFA zur Durchführung der Clusteranalyse zu einer gewissen Verzerrung der Ergebnisse. Dadurch wird die Varianz im Datensatz unterschätzt und der Mittelwert überrepräsentiert. Weiterhin führt dies zu einer Unterbewertung von Kovarianzen und Korrelationen zwischen den Variablen.³⁰⁰

5.2.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse zeigen, dass der Faktor *Umweltschutz und soziale Verantwortung* zum derzeitigen Zeitpunkt und der aktuellen Marktreife der stärkste Treiber der Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien ist. Organisationen, welche Umweltfreundlichkeit als inhärenten Teil ihrer Philosophie betrachten und ein besonderes Interesse an alternativen Antriebstechnologien aufgrund deren Beitrag zum Klimaschutz haben, sind derzeit die am wahrscheinlichsten Käufer solcher Technologien. Die *Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien* steigt auch, wenn Organisationen überzeugt sind, dass diese Technologien den aktuellen Geschäftsbetrieb und die aktuellen Geschäftsprozesse verbessern, für ihre Kunden einen Mehrwert schaffen und somit zu höheren Umsätzen für die adoptierende Organisation führen. Weiterhin ist von Bedeutung, dass der Einsatz CO₂-sparender Antriebstechnologien nicht die Durchführung und Leistung von Transportaufgaben beeinträchtigen und nicht zu erhöhten Risiken, Ausfällen oder zusätzlichem Aufwand für die Organisation führen. Einen geringen aber dennoch signifikanten Einfluss auf die *Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien* geht von dem Grad aus, welche Bedeutung eine Organisation sowohl dem „grünen“ Image als auch der Ausrüstung ihrer NFZ mit aktuellster, innovativer Technik gegenüber ihren Kunden beimisst. Ebenso steigt die Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien, wenn der Kraftstoffverbrauch, die Bedeutung geringer Gesamtbetriebskosten und Erwartungen an Amortisationsdauer und sonstiger Kosten für eine Organisation wichtig sind.

Im Gegensatz dazu sinkt die *Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien* mit einer steigenden Präferenz von Organisationen für preiswerte NFZ im Allgemeinen und Antriebskon-

³⁰⁰ Vgl. Jamshidian (2004), S. 116–117; Enders (2010), S. 42–43.

zepte im Besonderen, sowie wenn in einer Organisation die Einstellung vorherrscht, dass CO₂-sparende Antriebstechnologien teuer und damit unattraktiv sind.

Die Ergebnisse widersprechen damit teilweise der bisher im Markt weit verbreiteten Annahme, dass hauptsächlich Kriterien hinsichtlich Kosten oder Zuverlässigkeit für die Auswahl von Antriebstechnologien entscheidend sind. Jedoch entspricht diese Beobachtung, dass nicht-ökonomische Kaufkriterien die Attraktivität innovativer Technologien erhöhen, den theoretischen Vorüberlegungen zur Technologiediffusion. *Frühe Adopter* oder *Lead User* sind kaum preissensitiv und beschäftigen sich darüber hinaus mit den zukünftigen Anforderungen in ihrem Markt Jahre vor dem breiten Massenmarkt. Gleichzeitig wurde dieses Phänomen auch für alternative Antriebe auf dem PKW-Markt³⁰¹ sowie einer vergleichbaren Studien in einem anderen B2B-Markt empirisch belegt.³⁰²

Daher wird im Folgenden mittels der verhaltensorientierten Segmentierung von NFZ-Käufern analysiert, ob es in diesen Clustern unterschiedliche Grade der Adoptionsneigung gibt, um somit verschiedene Adopterkategorien abzugrenzen. Darüber hinaus wird untersucht, ob die verhaltenshomogenen Cluster durch deskriptive Eigenschaften des organisationalen Kontextes der darin zugeordneten Organisationen beschrieben werden können. Zusammenfassend wird also analysiert, ob aus deskriptiven Eigenschaften von Organisationen auf deren Adoptionsverhalten zu schließen ist.

5.2.5.1 Kundengruppen des deutschen NFZ-Marktes

Die Clusteranalyse grenzte sechs Kundengruppen entsprechend ihrer jeweiligen Präferenzstruktur, welche die Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien determiniert, ab. Die Kundengruppen werden im Folgenden anhand dieser Präferenzstrukturen, den deskriptiven organisationalen Eigenschaften sowie den allgemeinen Kriterien im Beschaffungsprozess beschrieben (vgl. Abbildung 19):

Cluster 1 umfasst *Technische Zweifler* alternativer Antriebstechnologien. Organisationen in diesem Cluster sind überwiegend kleinere Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeitern. Mit den erwarteten Gesamtbetriebskosten über die Nutzungsdauer, dem Kraftstoffverbrauch und der Zuverlässigkeit sind von diesen Organisationen klassische Entscheidungskriterien im Beschaffungsprozess als wichtig angegeben worden. Folglich sind die Betrachtung und Berücksichtigung der Gesamtkosten ein Treiber für die Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien. Im Gegensatz dazu erwarten diese Organisationen durch die Adoption von alternativen Antrieben ein erhöhtes Risiko und eine gesteigerte Fehleranfälligkeit ihrer NFZ und sehen auch keine positiven Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit ihres Transportbetriebs. Daher beeinflussen die zu erwartende Anwenderfreundlichkeit und Nützlichkeit die Auswahlbereitschaft negativ.

³⁰¹ Vgl. beispielsweise Plötz *et al.* (2014).

³⁰² Vgl. Beatty *et al.* (2001).

Organisationen in Cluster 2 zeigen die geringste Anschaffungspreissensitivität über alle Gruppen hinweg. Darüber hinaus scheinen diese Organisationen sich dem derzeit noch negativen Einfluss CO₂-sparender Antriebstechnologien auf die Gesamtbetriebskosten bewusst zu sein. Deshalb sind die TCO eine wesentliche Barriere der Auswahlbereitschaft. Weiterhin wird die Rationalität dieser Kundengruppe dadurch unterstrichen, dass Image oder Umweltschutz und soziale Verantwortung keinerlei Einfluss auf ihre Präferenz für alternative Antriebstechnologien haben. Ebenso sehen diese Organisationen keine negativen Einflüsse durch die Nutzung dieser Technologien. Folglich zeigt diese *Pragmatische Mehrheit* derzeit nur ein moderates Interesse an alternativen Antrieben.

<p>Cluster 1 „Technische Zweifler“ Auswahlbereitschaft: leicht gering</p> <p>Treiber - TCO</p> <p>Barrieren - Nützlichkeit - Anwenderfreundlichkeit</p>	<p>Cluster 4 „Konservative Nachzügler“ Auswahlbereitschaft: gering</p> <p>Treiber - Anwenderfreundlichkeit</p> <p>Barrieren - CSR - Preissensitivität</p>
<p>Cluster 2 „Pragmatische Mehrheit“ Auswahlbereitschaft: durchschnittlich</p> <p>Treiber - Anwenderfreundlichkeit - Preissensitivität</p> <p>Barrieren - TCO</p>	<p>Cluster 5 „Vorsichtige Mitläufer“ Auswahlbereitschaft: durchschnittlich</p> <p>Treiber - CSR</p> <p>Barrieren - Nützlichkeit - Image</p>
<p>Cluster 3 „Grüne Innovatoren“ Auswahlbereitschaft: erhöht</p> <p>Treiber - Image - CSR</p> <p>Barrieren - Anwenderfreundlichkeit - TCO</p>	<p>Cluster 6 „Frühe Adopter“ Auswahlbereitschaft: hoch</p> <p>Treiber - CSR - Nützlichkeit</p> <p>Barrieren - Image</p>

Abbildung 19: Kundengruppen des deutschen NFZ-Marktes³⁰³

In Cluster 3 sind größere Organisationen zusammengefasst, welche den positiven Einfluss innovativer Antriebstechnologien auf ihr Image gegenüber potentiellen Kunden höher als alle anderen Kundengruppen einschätzen. Ferner führt die unternehmerische Sozialverantwortung für Umweltschutz in diesen Organisationen zu einer erhöhten Auswahlbereitschaft. Neben der hohen Auswahlbereitschaft zeigen diese *Grüne Innovatoren* die derzeit höchste Adoptionsrate aller Kundengruppen. Allerdings ist in diesem Cluster die erwartete Anwenderfreundlichkeit eine wesentliche Barriere für die weitere Adoption CO₂-sparender Antriebstechnologien. Neben der überdurchschnittlich hohen Anzahl an Mitarbeitern ist ein wesentliches deskriptives Merkmal zur Beschreibung dieser Gruppe der Anteil von 42,3 % an Organisationen, welche im öffentlichen Transportsektor im Abfallsammel- und öffentlichen Personennahverkehr tätig sind.

³⁰³ Eigene Abbildung. CSR steht für Umweltschutz und soziale Verantwortung.

Cluster 4 ist hauptsächlich durch kleine und mittlere Unternehmen gekennzeichnet, welche überwiegend im klassischen Güterverkehr tätig sind. Die Organisationen dieser Gruppe zeigen die geringste Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien in ihren NFZ. Dies hängt überwiegend mit der geringen Bedeutung von Umweltschutz und sozialer Verantwortung und der höchsten Anschaffungspreissensitivität zusammen. Neben aerodynamischer Optimierung des Fahrzeugs und der Nutzung von Leichtlaufreifen haben diese *Konservativen Nachzügler* auch kaum andere kraftstoffsparende Maßnahmen adoptiert. Ebenfalls zeigt diese Gruppe den geringsten Erfahrungs- und Wissensstand über alternative Antriebe auf.

Ein vergleichsweise hoher Anteil an Organisationen in Cluster 5 ist im Bau- und Entsorgungverkehr tätig. Obwohl die unternehmerische Sozialverantwortung ein Treiber für die Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Technologien ist, führen eine sehr geringe Erwartung an Prozessverbesserungen sowie die geringe Präferenz für Image-steigernde Maßnahmen zu einem geringen Interesse an CO₂-sparenden Antriebstechnologien. Daher sind auch die Auswahlbereitschaft sowie die Erfahrung und das Wissen dieser *Abwartenden Mitläufer* über diese Technologien sehr begrenzt.

In Cluster 6 zeigen die Organisationen die höchste Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien in NFZ. Das ist hauptsächlich durch eine weit überdurchschnittliche erwartete Nützlichkeit dieser Technologien und einen starken Einfluss von Umweltschutz und sozialer Verantwortung getrieben. Daher sind die Organisationen in diesem Cluster davon überzeugt, durch alternative Antriebe ihre Services und Umsätze zu steigern. Ebenso sehen diese *Frühen Adopter* Klimaschutz als wesentlichen Bestandteil ihrer Unternehmensphilosophie an. Dies geht mit der hohen Bedeutung von Umweltschutz und sozialer Verantwortung und der Berücksichtigung von Kundenwünschen im allgemeinen Beschaffungsprozess einher. Diese Kriterien wurden im Gegensatz zu den anderen Clustern weitaus höher gewichtet. Die Gruppe der *Frühen Adopter* ist überwiegend durch einen sehr hohen Anteil an Großunternehmen gekennzeichnet.

5.2.5.2 Kaufentscheidungsprozess für NFZ

Die Ergebnisse der Vorstudie haben einen Zusammenhang zwischen Beschaffungsverhalten und der Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien in NFZ angedeutet. Allerdings zeigen sowohl die *Konservativen Nachzügler* als auch die *Frühen Adopter* einen vergleichsweise höheren Trend zum Leasing von NFZ, was dieser These widerspricht. Ebenso kann auch darüber hinaus kein klarer Trend für die Präferenz einer Kundengruppe für eine Beschaffungsform erkannt werden. Über die gesamte Stichprobe zeigt sich eine leichte Präferenz für die Finanzierung von NFZ. Ebenso nutzen viele Organisationen nach wie vor die Barzahlung und das Leasing. Die Miete als Beschaffungsart von NFZ ist derzeit noch eine Nischenform (vgl. Abbildung 20).

Hingegen zeigt sich in der Umfrage, dass Organisationen zum Teil ihre Beschaffungsformen in der Anschaffung alternativer Antriebstechnologien ändern würden. Insbesondere die Barzahlung verliert dabei an Bedeutung. Diese bringt das höchste Risiko hinsichtlich Liquidität und Haftung mit sich. Im Gegensatz dazu präferieren Unternehmen Leasing und Miete als Beschaffungsform

für CO₂-sparende Antriebstechnologien. Knapp 60 % der Organisationen, welche ihre Beschaffungsform ändern, würden auf Miete oder Leasing wechseln.

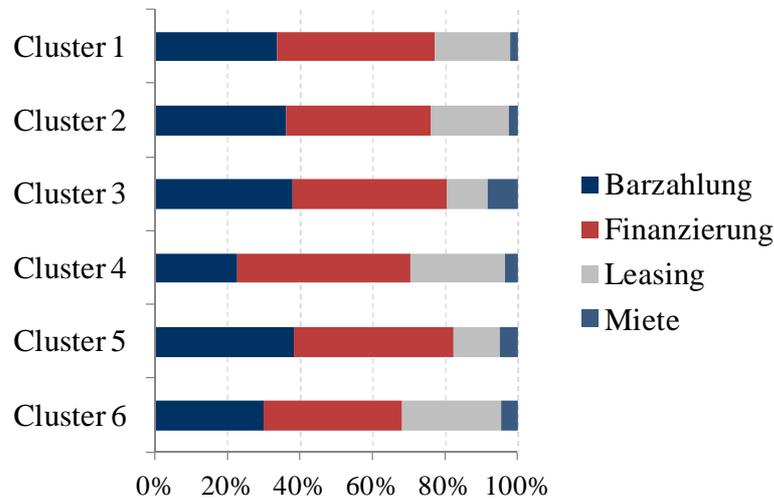


Abbildung 20: Beschaffungsformen pro Cluster³⁰⁴

Des Weiteren wurde der Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung des *buying centers* und der Kundengruppenzugehörigkeit überprüft. In allen Kundengruppen haben der Eigentümer bzw. das geschäftsführende Top-Management den höchsten Einfluss auf die finale Beschaffungsentscheidung. Interessanterweise sind ebenso einheitlich die Fahrer als die zweitwichtigsten Beteiligten am Beschaffungsprozess durch die Organisationen in allen Clustern genannt. Die Wichtigkeit der weiteren Beteiligten, Flottenmanager, Einkaufsleiter und Händler, variiert zwar in den Kundengruppen, jedoch konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Clustern identifiziert werden.

Ferner wurden auch die Prämissen für die Beschaffung von NFZ analysiert. Weder Nutzungsdauer, Amortisationsdauer noch die geplante jährliche Laufleistung variieren signifikant zwischen den einzelnen Kundengruppen. Hingegen konnten die Annahmen aus Kapitel 2 zur Laufleistung der unterschiedlichen Anwendungsfälle bestätigt werden – auch wenn es eine leichte Tendenz zu höheren jährlichen Laufleistungen gab. Des Weiteren zeigte sich deutlich, dass die Nutzungsdauer und Amortisationsdauer von NFZ sehr stark von dem Hauptanwendungsfall einer Organisation abhängig sind.

Fasst man die Erkenntnisse zu den Kundengruppen zusammen, so kann kein Unterschied zwischen der Ausrichtung (Transportaufgabe), den verfügbaren Ressourcen, Strukturen und Prozessen (*buying center*, Beschaffungsmethoden, Unternehmensform) und der Zugehörigkeit zu einem Cluster identifiziert werden. Deshalb sind aus diesen deskriptiven Kriterien auch keine Rückschlüsse auf das Adoptionsverhalten möglich. Jedoch zeigte sich, dass die Größe einer Organisation die Auswahlbereitschaft alternativer Antriebstechnologien beeinflusst. Kundengruppen, welche Organisationen umfassen, die eine größere Flotte als der Branchendurchschnitt betreiben

³⁰⁴ Eigene Abbildung.

und mehr Mitarbeiter beschäftigen, zeigen eine höhere Auswahlbereitschaft für alternative Antriebe. Daher beschreibt der organisationale Kontext nur sehr beschränkt die Organisationsinternen Präferenzstrukturen, welche die Adoption CO₂-sparender Antriebstechnologien determinieren.

5.2.5.3 Bewusstsein, Berücksichtigung und Adoption von CO₂-sparenden Technologien.

Derzeit sind alternative Antriebskonzepte in allen Kundengruppen die am wenigsten eingesetzte Maßnahme zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs (vgl. Abbildung 21). Einzig 30 % der *Grünen Innovatoren* haben alternative Antriebstechnologien in wesentlichen Anteilen adoptiert. Im Gegensatz dazu sind alternative Antriebe jedoch über alle Kundengruppen hinweg die Maßnahme, welche zukünftig für weitere Kraftstoffreduktionsschritte am meisten in Erwägung gezogen werden. Besonders die *Frühen Adopter* sowie die *Vorsichtigen Mitläufer* werden diese mehrheitlich für weitere Effizienzmaßnahmen berücksichtigen. Zusätzlich zu der heute schon hohen Adoptionsrate der *Grünen Innovatoren* zeigen diese nach den *Frühen Adoptern* und *Vorsichtigen Mitläufern* die dritthöchste Erwägung für alternative Antriebstechnologien zur weiteren Kraftstoffreduktion, was somit deren statistisch höchste Auswahlbereitschaft für CO₂-sparende Antriebstechnologien weiter unterstützt.

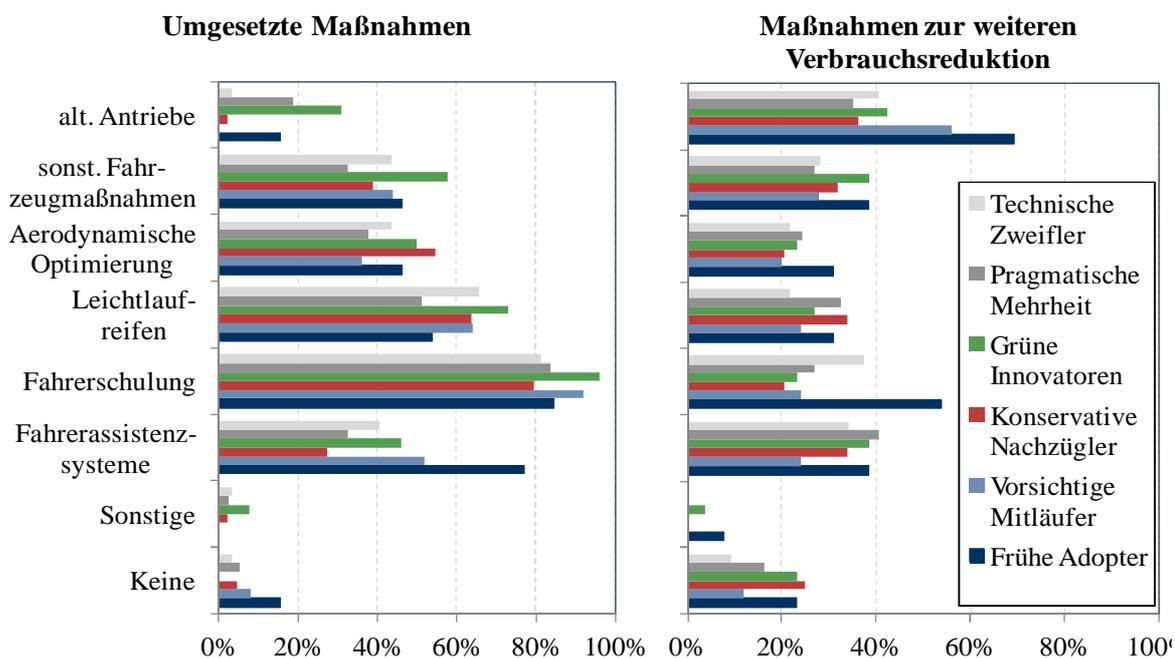


Abbildung 21: Heutige Adoption und zukünftige Berücksichtigung kraftstoffsparender Maßnahmen in NFZ³⁰⁵

Die derzeit höchste Marktdurchdringung kraftstoffsparender Maßnahmen haben Fahrertrainings und der Einsatz von Leichtlaufreifen erreicht. Beide Maßnahmen erfordern weder hohe Investitionen seitens der Organisationen noch den Einsatz unbekannter und damit vermeintlich risikobe-

³⁰⁵ Eigene Abbildung.

hafterer Technologien. Der Einfluss der Fahrer auf den Kraftstoffverbrauch der NFZ wurde ebenfalls während der Vorstudie durch alle NFZ-Händler hervorgehoben und ist in allen Anwendungsfällen ähnlich hoch. Insbesondere die aerodynamische Optimierung sowie Fahrerassistenzsysteme und sonstige Fahrzeugmaßnahmen führen hingegen technologisch bedingt zu unterschiedlich hohen Einsparpotenzialen. Folglich weisen diese Maßnahmen eine geringere Marktdurchdringung auf und sind durchschnittlich von der Hälfte aller Organisationen bisher umgesetzt worden.

Ein starkes Gefälle zwischen den Kundengruppen ist im Einsatz von Fahrerassistenzsystemen zu erkennen. Knapp 80 % der *Frühen Adopter* haben diese heute schon im Einsatz, während nur etwa 25 % der *Konservativen Nachzügler* diese einsetzen. Fahrerassistenzsysteme haben neben alternativen Antrieben den höchsten Einfluss auf den Einsatz der NFZ sowie die Bedienung durch die Fahrer und erfordern daher eine erhöhte Technologieaffinität der NFZ-betreibenden Organisationen. Dies ist ein weiterer empirischer Beleg dafür, dass sich die Organisationen am Markt in unterschiedlichen Phasen der Adoption CO₂-sparender Technologien befinden.

Zwei wesentliche Erkenntnisse zeigen sich aus der Analyse der bisherigen Adoption und zukünftigen Adoptionserwägung: Einerseits scheinen aus Sicht der Organisationen am Markt, CO₂-sparende Antriebstechnologien eine bedeutende Rolle zur weiteren Senkung des Kraftstoffverbrauchs von NFZ zu spielen. Andererseits gibt ein signifikanter Anteil von Organisationen an, keine der Maßnahmen zur weiteren Kraftstoffreduzierung zusätzlich einzusetzen. Dies ist entweder auf eine Sättigung durch die bereits adoptierten Maßnahmen, auf die Unkenntnis über Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung oder auf ein als zu gering wahrgenommenes Potenzial gegenüber den dafür notwendigen Aufwendungen zurückzuführen.

Ferner wurden in der Studie die Kenntnis und die Erfahrung im Betrieb von alternativen Antriebstechnologien erhoben. Es zeigt sich dabei, dass im Markt eine geringe Erfahrung mit diesen Technologien vorherrscht. *Grüne Innovatoren* haben zu knapp 27 % schon CNG-betriebene NFZ und Hybridfahrzeuge sowie zu 23 % rein elektrisch betriebene NFZ getestet. Ebenfalls haben bisher 23 % der *Frühen Adopter* Erfahrungen mit elektrischen NFZ gesammelt. Darüber hinaus ist der Anteil an Organisationen, welche bisher Erfahrungen mit den übrigen Antriebstechnologien gemacht haben, geringer als 10 %. Insbesondere hydraulische Hybridfahrzeuge und LNG-betriebene NFZ sind kaum getestet worden oder überhaupt der Mehrheit der Organisationen bekannt.

Auf Basis der bekannten oder getesteten Antriebstechnologien gibt es keine klare Tendenz, welche Technologien kurz- oder mittelfristig für den Einsatz in neuen NFZ ausgewählt werden. Jedoch zeigt sich, dass manche Antriebstechnologien durch vorhergegangene Tests stark für die nächsten NFZ-Anschaffungen in Erwägung gezogen werden. 68,8 % aller Organisationen, welche zuvor schon CNG-betriebene NFZ getestet haben, nutzen diese heute schon im regulären Geschäftsbetrieb. Ebenfalls scheinen Erfahrungen und Tests von elektrischen Hybridfahrzeugen zu einer erhöhten Adoptionsneigung zu führen. Insbesondere unter den *Frühen Adoptern* haben Organisationen, welche Hybridfahrzeuge oder rein elektrische NFZ getestet haben, diese Tech-

nologien bereits im regulären Betrieb im Einsatz. Der geringste Anteil in der Nutzung, Käuferwägung und -beabsichtigung für Elektro-NFZ geht von den *Technischen Zweiflern* und den *Konservativen Nachzüglern* aus.

Zwar konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Präferenzstruktur der Kundengruppen und dem durchgeführten Anwendungsfall gefunden werden. Jedoch zeigt sich, dass der Hauptanwendungsfall der NFZ-einsetzenden Organisationen wesentlich deren Kenntnis und Käuferwägung von CO₂-sparenden Antriebstechnologien beeinflusst (vgl. Abbildung 22).

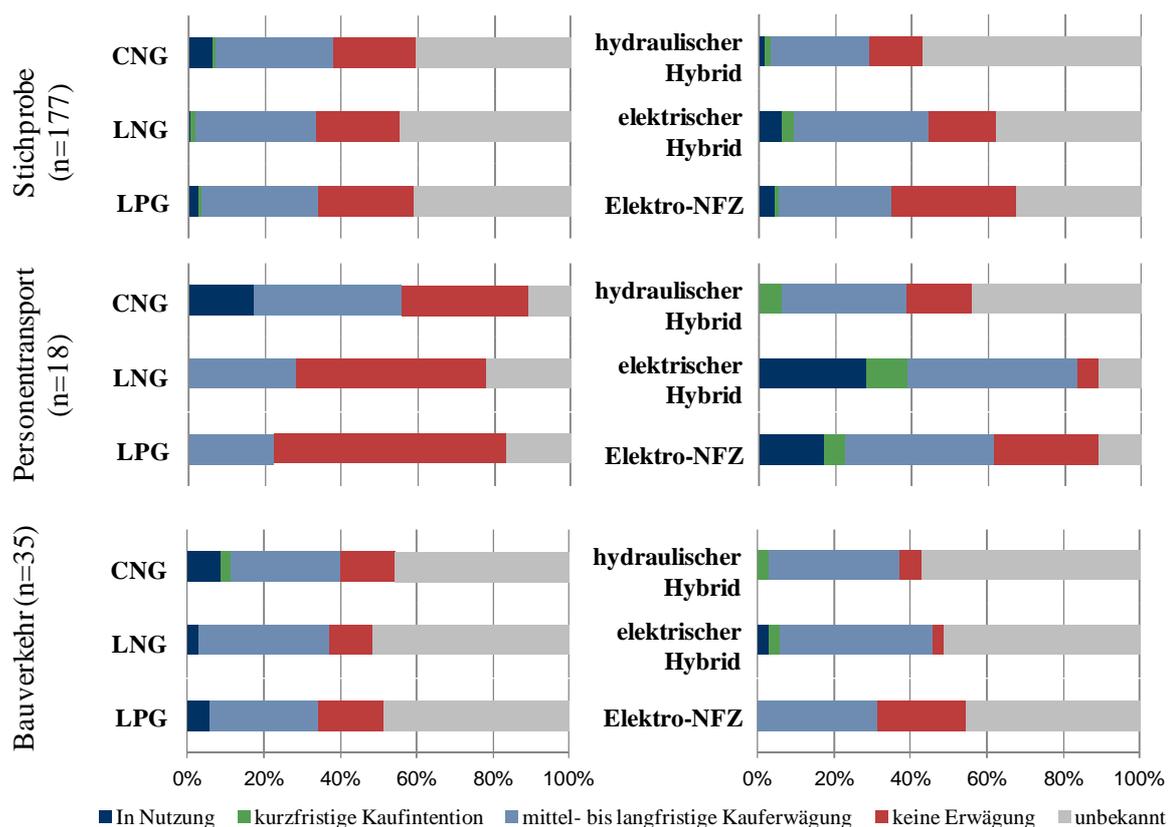


Abbildung 22: Nutzung, Kaufintention und Käuferwägung alternativer Antriebe in ausgewählten Anwendungsfällen³⁰⁶

Im Vergleich zum Durchschnitt der gesamten Stichprobe haben Unternehmen, welche hauptsächlich im öffentlichen Personenverkehr tätig sind, eine überdurchschnittliche Kenntnis über alternative Antriebstechnologien. Im Bauverkehr sind Kenntnis und Erwägung im Gegensatz dazu am geringsten ausgeprägt. Auffällig ist weiterhin, dass im Personenverkehr eine starke Ablehnung gegenüber Gas-betriebenen NFZ besteht, wohingegen die Elektrifizierung des Antriebsstrangs eine hohe Attraktivität besitzt. Ferner zeigt sich eine geringe Kenntnis über hydraulische Hybride sowie ausgeprägte Vorbehalte gegenüber rein elektrischen NFZ.

³⁰⁶ Eigene Abbildung. LPG steht für Liquefied Petroleum Gas, Autogas.

Der Anwendungsfall übt zwar keinen Einfluss auf das Adoptionsverhalten innovativer Antriebstechnologien aus, jedoch scheint der Betrieb im öffentlichen Personenverkehr zu einer erhöhten Auseinandersetzung und Erwägung alternativer Antriebstechnik zu führen. Dies lässt somit auf einen erhöhten Anteil an potentiellen *Lead Usern* auf diesem speziellen Teilmarkt schließen.

5.2.5.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass zum Zeitpunkt der aktuellen Marktreife von CO₂-sparenden Antriebstechnologien, NFZ mit diesen Technologien überwiegend aufgrund umwelt- und klimabedingter Gründe beschafft werden. Dabei spielen sowohl die unternehmerische Sozialverantwortung einerseits als auch das vorausschauende Handeln einiger weniger *Früher Adopter* andererseits eine Rolle. *Frühe Adopter* stellen sich auf bevorstehende Anforderungen im Markt ein, um zukünftige Wettbewerbsvorteile zu generieren. Zwar bieten CO₂-sparende Antriebstechnologien auch signifikante Betriebskostenvorteile, allerdings führen diese aufgrund hoher Anschaffungskosten noch zu selten zu Gesamtbetriebskostenvorteilen und üben damit einen untergeordnete Einfluss aus.

Diese Ergebnisse bestätigen sich durch eine verhaltensorientierte Kundengruppensegmentierung. Sechs Kundengruppen wurden auf Basis der Präferenzstruktur der jeweiligen Organisationen gebildet. Gleichzeitig konnte entsprechend der Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien sowie der derzeitigen Adoption anderer CO₂-sparender Technologien die Kundengruppen den verschiedenen Adopterkategorien zugeordnet werden. Dabei zeigt sich, dass ebenfalls auf dem NFZ-Markt, als B2B-Kontext, nicht-ökonomische Gründe für die frühe Adoptionsneigung von *Innovatoren* und *Frühen Adopter* entscheidend sind.

Des Weiteren konnten auf Basis der erhobenen deskriptiven Eigenschaften der Organisationen kaum Kriterien identifiziert werden, welche auf eine Zugehörigkeit zu einem Cluster respektive der Auswahlbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien schließen lassen. Ausnahme bildet die Größe einer Organisation. Es gibt eine klare Tendenz zu einer erhöhten Auswahlbereitschaft von Unternehmen, die über eine größere Flotte verfügen und mehr Mitarbeiter als der Industriedurchschnitt beschäftigen. Solche Organisationen führen eher Unternehmensleitlinien ein, in denen unternehmerische Sozialverantwortung und Umweltschutz verankert sind. Ebenso haben diese Organisationen eher die finanziellen Möglichkeiten, sich durch Investitionen auf zukünftige Anforderungen einzustellen. Des Weiteren kann auch der Grad an öffentlicher Wahrnehmung und Präsenz, wie beispielsweise im öffentlichen Bus- oder Abfallsammelverkehr, einen positiven Einfluss auf die Adoptionsbereitschaft CO₂-sparender Antriebstechnologien haben. Insbesondere in diesen Anwendungsfällen haben Organisationen eine hohe Kenntnis und Käuferwägung alternativer Antriebstechnik, was auf einen *Lead Markt* für diese Technologien schließen lässt. Zwar konnte kein signifikanter Zusammenhang gemessen werden, allerdings spricht der hohe Anteil dieser Anwendungsfälle in der Kategorie der *Grünen Innovatoren* für eine Tendenz zu einem vergleichsweise höheren Anteil an *Lead Usern* in dieser Branche.

5.3 Präferenzen von NFZ-Käufern in der Auswahlentscheidung für Antriebstechnologien

Die Durchführung einer Conjoint-Analyse erfolgt aus drei Gründen:

NFZ-betreibende Organisationen sind sehr unterschiedlichen Anforderungen und Rahmenbedingungen, in denen sie agieren, ausgesetzt. Deshalb wird angenommen, dass die Anwendungsvielfalt zu Unterschieden in der Bewertung des *relative advantage* CO₂-sparender Antriebstechnologien führt. Um den *relative advantage* CO₂-sparender Antriebstechnologien zu bestimmen, werden die zu Kapitel 4 komplementären anwendungsfallsspezifischen Präferenzen der Nachfrageseite erhoben (1).

Ferner wird zur Prognose der zukünftigen Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien ein System Dynamics Modell implementiert. Den Kern des Modells bildet ein diskretes Kaufentscheidungsmodell zur validen Berechnung der Kaufentscheidung von NFZ-Käufern. Diskrete Kaufentscheidungsmodelle sind auf dem PKW-Markt für vergleichbare Fragestellungen bewährt. Zwar unterscheiden sich die Kaufentscheidungen im B2B- und im B2C-Kontext, jedoch entsprechen Produktgeschäfte auf B2B-Märkten – zu denen der NFZ-Markt im Allgemeinen gezählt werden kann – am stärksten den Kaufprozessen auf B2C-Märkten.³⁰⁷ Aufgrund fehlender Modelle, welche die Entscheidungen eines Beschaffungsprozesses in einem *buying center* sowohl in einer repräsentativen, quantitativen Untersuchung als auch forschungsökonomisch messen können, wird die Kaufentscheidung des organisationalen *buying centers* mittels einer Conjoint-Analyse unter Top-Entscheidern approximiert (2). Die empirische Untersuchung in Kapitel 5.2 zeigt außerdem, dass der Beschaffungsprozess für NFZ maßgeblich durch die Top-Entscheider in Organisationen geprägt ist. Ebenso haben zwei wissenschaftliche, empirische Studien in vergleichbaren Kontexten die Conjoint-Analyse angewandt und akzeptable Ergebnisse erhalten.³⁰⁸ Darüber hinaus erwähnt die einschlägige Literatur, dass diese Methodik auf den LKW-Markt anwendbar ist.³⁰⁹

In den theoretischen Vorüberlegungen sind die Unterschiede von Anforderungen, Präferenzen und Wissensstand zwischen dem Massenmarkt und den *Frühen Adoptern* herausgearbeitet worden. Diese bestätigt die empirische Studie in Kapitel 5.2, sodass diese Ergebnisse insbesondere aus Sicht der *Innovatoren* und *Frühen Adoptern* zu interpretieren sind. Der breite Massenmarkt hat sich bis dato noch kaum mit alternativen Antriebstechnologien in NFZ beschäftigt. Daher werden mit der Conjoint-Analyse die Präferenzen für Antriebstechnologien im Allgemeinen erhoben. Dadurch sind verlässliche Erkenntnisse über die Präferenzen der Mainstream-Käufer im Beschaffungsverhalten für Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt möglich (3).

³⁰⁷ Vgl. Godefroid und Pförtsch (2008), S. 30.

³⁰⁸ Vgl. Golob et al. (1997); Walter et al. (2012).

³⁰⁹ Vgl. Backhaus (2003), S. 459–463.

Im Folgenden wird zunächst ein theoretischer Überblick über die Methode der Conjoint-Analyse gegeben und darauf aufbauend ein adäquates Untersuchungsdesign abgeleitet sowie die Durchführung und Auswertung der Conjoint-Analyse vorgestellt.

5.3.1 Theorie zur Conjoint-Analyse

5.3.1.1 Definition, Anwendung und Verfahren der Conjoint-Analyse

Die Conjoint-Analyse ist eine in Theorie und Praxis weit verbreitete Methode zur Beschreibung und Prognose von Auswahlentscheidungen. Backhaus definiert die Conjoint-Analyse folgendermaßen:

*„Insbesondere handelt es sich [bei Conjoint-Analysen] um dekompositionelle Verfahren, die dadurch gekennzeichnet sind, dass sie aus empirisch erhobenen Gesamturteilen (Präferenzen) von Produkten auf die Bedeutung einzelner Eigenschaften und Eigenschaftsausprägungen dieser Produkte für die Präferenzbildung schließen. Die Objekte werden also zunächst ganzheitlich beurteilt (CONsidered JOINTly) und sodann werden diese Gesamtbeurteilungen mittels analytischer Methoden in ihre Komponenten, sog. Teilnutzen, zerlegt.“*³¹⁰

Ein etabliertes Anwendungsfeld der Conjoint-Analyse ist die Analyse des Käuferverhaltens und Prognose von Kaufentscheidungen im B2C- und B2B-Umfeld.³¹¹ Mittels der Conjoint-Analyse werden Teilnutzenwerte für Produkteigenschaften ermittelt. Anschließend werden für verschiedene Produkte mit unterschiedlichen Eigenschaften die jeweiligen Teilnutzen zu einem Gesamtnutzen aggregiert, welcher letztlich die Kaufentscheidung determiniert. Die Conjoint-Analyse wird in der Marketingpraxis ebenso für die Preispolitik, Neuproduktgestaltung und Marktsegmentierung angewandt.³¹²

Mittlerweile existieren eine Reihe von unterschiedlichen Verfahrensvarianten der Conjoint-Analyse. Eine sehr ausführliche Beschreibung und Bewertung der unterschiedlichen Verfahrensvarianten ist beispielsweise in Hillig (2006) zu finden.³¹³

Für die weitere Untersuchung wird im Hinblick auf die Implementierung des diskreten Entscheidungsmodells zur Prognose der zukünftigen Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien die Choice-based-Conjoint-Analyse (CBCA) genutzt. Denn die CBCA geht ursprünglich auf die diskrete Entscheidungsmodellierung (*Discrete Choice Modelling*)³¹⁴ zurück und ist daher für die

³¹⁰ Vgl. Backhaus et al. (2013), S. 174.

³¹¹ Eine umfangreiche Übersicht über die Anwendung der Conjoint-Analyse in unterschiedlichen Märkten, Branchen und Regionen gibt Hofer (2003), S. 73–76.

³¹² Vgl. Hillig (2006), S. 6.

³¹³ Vgl. Hillig (2006). Auf einer tieferen Betrachtung der unterschiedlichen Verfahrensvarianten der Conjoint-Analyse wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da es über diesen hinausgeht.

³¹⁴ Vgl. Kapitel 3.3.4.

Anwendung in Prognosemodellen zur Technologiediffusion besonders geeignet.³¹⁵ Darüber hinaus ist die CBCA aus Sicht der Befragten in der Beantwortung einfacher und kommt ebenso einer realen Beschaffungsentscheidung näher als beispielsweise traditionelle Conjoint-Analysen.

5.3.1.2 Choice-based-Conjoint-Analyse (CBCA)

Im Gegensatz zur traditionellen Conjoint-Analyse bewerten die Befragten bei der CBCA nicht die einzelnen Merkmale sondern treffen Auswahlentscheidungen zwischen Alternativen eines sogenannten *choice sets*. Das *choice set* besteht aus unterschiedlichen hypothetischen Produkten, aus welchen der Befragte die für sich attraktivste Alternative auswählt. Dabei wird den Befragten ein nutzenmaximierendes Verhalten unterstellt.³¹⁶ Die hypothetischen Produkte, oder auch Stimuli genannt, werden durch die zuvor festgelegten Merkmale und deren Ausprägungen beschrieben. Auf Basis der Auswahlentscheidungen der Befragten erfolgt dann im nächsten Schritt eine Schätzung der Nutzenparameter mittels der Maximum-Likelihood Schätzung.

Bei diskreten Entscheidungsmodellen, und somit auch der CBCA, ist die Nutzenfunktion U_{ges} mit einer deterministischen U_{det} und stochastischen Nutzenkomponente U_{stoch} eines Produktes determiniert. Der deterministische und beobachtbare Gesamtnutzen U_{det} wird über eine Verknüpfungsfunktion f der Teilnutzenwerte eines Produktes berechnet. Überwiegend wird hierzu auf eine linear-additive, kompensatorische Verknüpfungsfunktion der Teilnutzenwerte zum Gesamtnutzen zurückgegriffen.³¹⁷ Der Teilnutzenwert ergibt sich wiederum aus der Multiplikation des Nutzenparameters β_i mit der Merkmalsausprägung x_n eines Produktes n .

$$U_{ges} = U_{det} + U_{stoch}$$

$$\text{mit } U_{det} = f(\beta_1 x_1, \dots, \beta_i x_n)$$

5.1

Die stochastische Komponente der Nutzenfunktion ist nicht beobachtbar und beschreibt daher „nicht-systematische Fehler im Beurteilungsprozess und nicht-systematische Faktoren, die nicht direkt durch die im Modell definierten Einflussfaktoren abgebildet werden.“³¹⁸ Da zumeist mehr als zwei unterschiedliche Alternativen bei einer Auswahlentscheidung gemeinsam betrachtet werden und „die stochastische Nutzenkomponente als Gumbel-verteilt angenommen wird, resultiert daraus für die Modellierung der Auswahlwahrscheinlichkeit für eine der Alternativen ein Multinomiales Logit-Modell (MNL-Modell).“³¹⁹ Das MNL-Modell ist in der Prognose der

³¹⁵ Vgl. Hillig (2006), S. 68–70.

³¹⁶ Vgl. Gensler (2006), S. 254.

³¹⁷ Vgl. dazu sowie zu ausführlichen Informationen unterschiedlicher Verknüpfungsfunktionen und Präferenzmodellen Gensler (2006), S. 254; Hillig (2006), S. 28–32; Hofer (2003), S. 81–83 und 113–116.

³¹⁸ Vgl. Hillig (2006), S. 69.

³¹⁹ Vgl. Gensler (2006), S. 255.

Technologiediffusion eines der gängigsten Modelle und wird daher auch in der vorliegenden Untersuchung verwendet.³²⁰

Eine wesentliche Einschränkung der CBCA ist nach Hillig (2006) jedoch, dass „bei der CBCA die Nutzenparameter nicht auf Individualebene, d. h. für einzelne Probanden, ermittelt werden, sondern lediglich für die Gesamtheit aller Befragten bzw. für einzelne zuvor definierte Gruppen, die bestimmten Größekriterien genügen.“³²¹ Dies ist aufgrund der Nutzung dichotomer Bewertungen notwendig, da diese im Vergleich zu den in traditionellen Conjoint-Analysen genutzten Rangreihenfolgen eine geringere Informationseffizienz besitzen. Deshalb sind bei der CBCA mehr Abfragen zu hypothetischen Produktalternativen aus dem *choice set* notwendig. Allerdings wird empfohlen, die *choice sets* mit maximal 30 Abfragen durchzuführen, üblich sind zwischen acht und 20 Abfragen. Um diese Anzahl einzuhalten, werden die auszuwählenden Alternativen über alle Befragungsteilnehmer aufgeteilt und anschließend mittels des MNL-Modells auf aggregierter Ebene bestimmt. Grundannahme dahinter ist, dass die Befragten über relativ ähnliche Präferenzen verfügen. Dies ist allerdings selten der Fall, da oftmals unterschiedliche Kundengruppen mit verschiedenen Bedürfnissen und Anforderungen am Markt existieren.³²²

Um der Einschränkung aggregierter Nutzenschätzungen entgegenzuwirken, können jedoch beispielsweise die Latent-Class-Analyse oder der Hierarchical-Bayes-Ansatz zur Schätzung der Teilnutzenwerte einer Conjoint-Analyse angewendet werden. Die Latent-Class-Analyse ermöglicht die Bestimmung segmentspezifischer Nutzenfunktionen, die Hierarchical-Bayes-Schätzung kann darüber hinaus individuelle Nutzenfunktionen ermitteln. Daher basieren die meisten Conjoint-Analysen in der Praxis mittlerweile auf dem Hierarchical-Bayes-Ansatz.³²³ Ein generischer Ansatz zur Durchführung einer Conjoint-Analyse umfasst im Wesentlichen sechs Schritte:³²⁴

- Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes
- Festlegung der Merkmale und Merkmalsausprägungen
- Erstellung des Erhebungsdesigns
- Durchführung der Interviews
- Schätzung und Aggregation der Nutzenwerte
- Analyse der Daten

Zur Erstellung, Durchführung und Auswertung der unterschiedlichen Conjoint-Analyse Verfahren existieren eine in Praxis und Theorie weit verbreitete Software von *Sawtooth Software*. Diese führt den Anwender über einfache Dialoge zur Erstellung des Erhebungsdesigns, Implementie-

³²⁰ Vgl. Kapitel 3.3.4.

³²¹ Vgl. Hillig (2006), S. 5.

³²² Vgl. Backhaus (2008), S. 552–554.

³²³ Vgl. Backhaus (2008), S. 554–555.

³²⁴ Vgl. in Anlehnung an Hensher et al. (2010); Hofer (2003), S. 77; Weiber und Mühlhaus (2009), S. 43–45.

zung der Versuchsplänen, Generierung der Umfrage-Oberflächen und Auswertung der erhobenen Daten.³²⁵

Auf Basis der theoretischen Vorüberlegungen wird anhand des vorgestellten Ansatzes unter Verwendung der *Sawtooth Software* die Conjoint-Analyse durchgeführt.

5.3.2 Methodik und Datenerhebung

5.3.2.1 Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes

Ziel der Conjoint-Analyse ist es, die Präferenzen für Eigenschaften von Antriebstechnologien bei der Investition in neue NFZ auf dem deutschen Markt zu untersuchen. Die Präferenzen für Produkteigenschaften und deren Ausprägungen dienen als Input für ein diskretes Kaufentscheidungsmodell. NFZ werden in sehr unterschiedlichen Anwendungsfällen eingesetzt, weshalb in der Conjoint-Analyse mit heterogenen Anforderungen an Produkteigenschaften der Befragten zu rechnen ist. Daher erfolgt die Auswertung der Präferenzen anwendungsfallspezifisch getrennt.

Die Zielgruppe der Befragung sind Personen, die über die Beschaffung von NFZ ab einem zulässigen Gesamtgewicht von 6 t bis 40 t in den Anwendungsfällen Fernverkehr, Verteilerverkehr, Bauverkehr, Abfallsammelverkehr, Stadtbuss und Reisebus entscheiden. Die Entscheider müssen in den letzten 24 Monaten mindestens ein entsprechendes Fahrzeug erworben haben oder eine Fahrzeugneuanschaffung planen. Unter Beschaffung werden hierbei die vier wesentlichen Anschaffungsformen Kauf, Finanzierung, Leasing oder Miete verstanden.

Aufgrund der Erfahrung aus der vorherigen quantitativen Studie ist die Akquise von Befragungsteilnehmern auf dem NFZ-Markt herausfordernd. Um eine möglichst große Stichprobe für die Anwendungsfälle realisieren zu können, werden Entscheider, welche für Fahrzeuganschaffungen in mehreren Bereichen zuständig sind, auch zu mehreren Anwendungsfällen befragt.

5.3.2.2 Festlegung der Merkmale und Merkmalsausprägungen

Der Auswahl der richtigen Merkmale sowie deren Ausprägungen kommt bei der Conjoint-Analyse eine sehr hohe Bedeutung zu. Daher gibt es eine Reihe an einzuhaltenden Anforderungen sowie Verfahren geeignete Merkmale zu identifizieren. Merkmale sollen insbesondere unabhängig, vollständig beschreibend, kompensatorisch, präferenzrelevant, realisierbar und begrenzt sein.³²⁶

Die Ermittlung relevanter Merkmale für die Conjoint-Analyse erfolgt überwiegend auf Basis der Erkenntnisse aus der quantitativen Studie zum organisationalen Adoptionsverhalten. Dies entspricht einem direkten Verfahren, zur Identifikation von Merkmalen. Die Merkmale wurden

³²⁵ Vgl. www.sawtoothsoftware.com sowie die Einschätzung von *Backhaus* (2003), S. 555.

³²⁶ Vgl. dazu sowie zu weiteren ausführliche Beschreibungen der Anforderungen *Weiber und Mühlhaus* (2009), S. 45–49.

anschließend auf Basis der genannten Anforderungen auf neun Merkmale reduziert. In einem Expertenworkshop sind die Merkmale schließlich weiter auf sechs Merkmale reduziert worden. Dabei wurde beachtet, dass jeweils ein Merkmal den unabhängigen Variablen aus der vorherigen Studie zuzuordnen ist.

Fraglich war dabei insbesondere das Merkmal *Tank-Infrastruktur*³²⁷. Einerseits geht von diesem Merkmal eine hohe Präferenzrelevanz aus³²⁸, andererseits konnte keine geeignete, aus Sicht der Befragten als realistisch einzuschätzende, Operationalisierung definiert werden. Ebenfalls ist das Merkmal *Tank-Infrastruktur* vom Merkmal *Antriebsform* abhängig. Um dennoch Informationen zu diesem Sachverhalt über die Conjoint-Analyse hinaus zu generieren, wird in der Studie eine zusätzliche Abfrage zur Anforderung an die Tank- und Ladeinfrastruktur seitens der befragten Organisationen gestellt.

Sowohl die *Tank-to-Wheel* CO₂-Emissionen als auch die Kraftstoffkosten in der Conjoint-Analyse zu berücksichtigen ist kritisch. Beide Merkmale sind auf Basis der fossilen Energieträger Diesel und Erdgas vom Kraftstoffverbrauch abhängig. Bei einem Elektrofahrzeug sind diese technologiebedingt unabhängig vom Energieverbrauch des Antriebs immer null. Allerdings kann einerseits auf die Betrachtung der Kraftstoffkosten nicht verzichtet werden, da diese eines der entscheidendsten Kriterien beim Kauf von NFZ im Allgemeinen und der Auswahl von Antriebs-technologien im Besonderen sind. Andererseits ist es durch die Fragestellung bedingt unumgänglich, die Relevanz von CO₂-Emissionen zu erheben. Daher werden beiden Faktoren – über deren teilweise systembedingte Abhängigkeit wissend – in der Conjoint-Analyse verwendet. Denn es zeigte sich sowohl in den Interviews der Vorstudie in Kapitel 5.2.1, als auch in den Interviews in Kapitel 6.3, dass der Zusammenhang zwischen Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen in großen Teilen der Branche nicht bekannt ist. Andere Conjoint-Analysen zu alternativen Antrieben auf dem PKW-Markt³²⁹ und in der Nische der Straßenkehrmaschinen³³⁰ haben ebenfalls beide Merkmale im Studiendesign berücksichtigt. Abbildung 23 zeigt die Auswahl der Merkmale zusammenfassend.

Für die Ausgestaltung der Merkmalsausprägungen wurde sich stark an den Erkenntnissen der Kapitel 2 und 4 orientiert. Entsprechend der Technikpakete aus Kapitel 4.2 wurden die zu betrachtenden Antriebsformen abgegrenzt. Um keine unplausiblen Merkmalsausprägungen zu verwenden, wurde im Anwendungsfall Fernverkehr auf elektrisch- und CNG-betriebene Antriebsformen verzichtet. Als Referenzpunkt (0 €) der Anschaffungskosten wurden die in Kapitel 2 definierten Anschaffungspreise gewählt. Anhand der Technikpakete wurden anschließend die Aufpreise pro Anwendungsfall und Technologie definiert. Ferner wird eine negative Abweichung von den Referenzkosten betrachtet, um Aussagen über die Anschaffungspreissensitivität hinsichtlich preiswerter Antriebe zu untersuchen.

³²⁷ Die Tank-Infrastruktur umfasst in diesem Kontext ebenfalls Ladesäulen für Elektro-NFZ.

³²⁸ Vgl. Kapitel 5.2.

³²⁹ Vgl. beispielsweise *Hackbarth und Madlener* (2013), S. 8 oder *Kreyenberg et al.* (2013), S. 44.

³³⁰ Vgl. *Walter et al.* (2012), S. 12009.

Relevante Merkmale	Präferenz-relevant	Ausschluss	Grund des Ausschlusses
Antriebsform	Ja	-	-
Anschaffungskosten	Ja	-	-
Kraftstoffkosten	Ja	-	-
TCO	Ja	Ja	Abhängigkeit Kraftstoff- & Anschaffungskosten
Reichweite	Ja	-	-
Leistung	Ja	-	-
Lautstärke	Teilweise	Ja	Begrenztheit, Differenziertheit
CO ₂ -Emissionen	Ja	-	-
Service-Infrastruktur	Ja	Ja	Abhängigkeit Antriebsform & Begrenztheit
Tankstellen-Infrastruktur	Ja	Ja	Abhängigkeit Antriebsform & Operationalisierung
Schadstoff-Emissionen	Teilweise	Ja	Begrenztheit, Beeinflussbarkeit (Fokus CO ₂)
Grünes & innovatives Image	Teilweise	Ja	Abhängigkeit Antriebsform & Operationalisierung
Qualität & Ausfallrisiko	Nein	Ja	Differenziertheit

Abbildung 23: Auswahl der Merkmale für die CBCA³³¹

Ebenfalls auf Basis der definierten Referenzfahrzeuge in den unterschiedlichen Anwendungsfällen wurde ein Referenzpunkt für die Kraftstoffkosten definiert. Diese orientieren sich an einem Dieselpreis von 1,17 € exkl. MwSt. Die minimalen Kraftstoffkosten je Anwendungsfall sind an den günstigsten Antriebsformen Elektroantrieb respektive Erdgasantrieb und effizientesten Motoren ausgerichtet. Das gleiche Vorgehen wurde für die CO₂-Emissionen gewählt.

Die Referenzpunkte für die Merkmale Leistung und Reichweite pro Tankfüllung sind ebenso anhand der Definition der Anwendungsfälle in Kapitel 2 festgelegt. Die maximale und minimale Merkmalsausprägung orientiert sich dabei an den am Markt verfügbaren Konfigurationsmöglichkeiten beim Neukauf von NFZ der gängigsten Hersteller.

Insgesamt wurde bei der Auswahl der Endpunkte für die Merkmalsausprägungen beachtet, dass diese keine Ausschlusskriterien und plausible – im Markt für diesen Anwendungsfall so konfigurierte – Merkmalsausprägungen darstellen. Bei der Definition der Ausprägungen wurde aufgrund der Kundenstruktur auf möglichst numerische Werte, konkrete Ausprägungen sowie möglichst knappe und objektive Beschreibungen geachtet. Aufgrund der höheren Anzahl von Organisationen, welche in den Anwendungsfällen Fern- und Verteilerverkehr NFZ einsetzen, ist von einer höheren zu erwartenden Anzahl an Teilnehmer aus diesen Sektoren ausgegangen worden. Deshalb wurden neben der inhaltlich vorgegebenen Anzahl an Ausprägungen des Merkmals *Antriebsform* für diese beiden Anwendungsfälle jeweils fünf Ausprägungen, für die restlichen Anwendungsfälle jeweils vier Ausprägungen in der Conjoint-Analyse berücksichtigt. Somit wurde sichergestellt, dass auch bei einer geringeren Rücklaufquote in allen Anwendungsfällen verlässliche Daten erhoben werden. Tabelle 6 fasst die Merkmalsausprägungen zusammen.

³³¹ Eigene Abbildung.

Merkmalsausprägungen	Fernverkehr 	Verteilerverkehr 	Bauverkehr 	Abfallsammelverkehr 	Stadtbus 	Reisebus 
Antriebsform	Diesel Hybrid LNG	Diesel Hybrid LNG CNG Elektrisch	Diesel Hybrid LNG CNG	Diesel Hybrid LNG CNG Elektrisch	Diesel Hybrid LNG CNG Elektrisch	Diesel Hybrid LNG
Kaufpreis Delta [€]	-10.000 bis 40.000	-7.500 bis 75.000	-10.000 bis 30.000	-7.500 bis 65.000	-7.500 bis 100.000	-10.000 bis 30.000
Kraftstoffkosten [€/km]	16,80 bis 58,50	8,40 bis 46,80	19,20 bis 81,90	30,00 bis 117,00	25,00 bis 93,60	15,00 bis 58,50
CO ₂ -Emission [g/100km]	500 bis 1.500	0 bis 1.050	500 bis 1.900	0 bis 2.600	0 bis 2.100	500 bis 1.300
Reichweite [km/Füllung]	350 bis 2.500	200 bis 1.100	250 bis 1.500	100 bis 500	120 bis 800	350 bis 2.000
Motorleistung [kW]	200 bis 550	110 bis 375	200 bis 420	140 bis 280	120 bis 280	210 bis 365

Tabelle 6: Merkmalsausprägungen für die Conjoint-Analyse³³²

5.3.2.3 Erstellung des Erhebungsdesigns

Das Erhebungsdesign basierte auf einer auswahlbasierten Conjoint-Analyse (CBCA). Dabei wird eine sogenannte Profilmethode angewendet, sodass hypothetische Produkte konzipiert werden, welche durch alle relevanten Eigenschaften beschrieben wurden.

Zur Erreichung einer repräsentativen und methodisch ausreichend großen Stichprobe für alle Anwendungsfälle wurde die Anzahl der zu führenden Interviews auf etwa 250-300 Interviews geschätzt. Die Nutzung eines webbasierten Fragebogens wurde aufgrund der Komplexität der Aufgaben in der CBCA und Repräsentativität ausgeschlossen, sodass persönlich unterstützte Interviews als Erhebungsmethode dienten. Um dennoch eine hinreichende Anzahl an Untersuchungsteilnehmern im Rahmen des Forschungsprojektes zu gewährleisten, unterstützte ein Marktforschungsunternehmen³³³ die Durchführung der Conjoint-Analyse.

Die Erstellung des Erhebungsdesign war im Wesentlichen durch das Spannungsfeld einer hohen Detaillierungstiefe der Ergebnisse auf Kundenebene sowie den schwierigen Feldzugang und einer geringen Anzahl an Unternehmen in Teilen der Zielgruppen geprägt. Aufgrund der heterogenen Gruppe an potentiellen Kunden wurde die Conjoint-Analyse an die unterschiedlichen Anwendungsfälle angepasst, um der Grundannahme vergleichsweise ähnlicher Präferenzen der

³³² Eigene Abbildung.

³³³ Seitens des Marktforschungsunternehmens Produkt & Markt erfolgt hierbei in engem Austausch die Implementierung des Fragebogens, die Rekrutierung und Schulung der Interviewer sowie statistische Datenanalyse. Vielen Dank dafür an Axel Schomborg, Julia Koch und Dr. Florian Jetzek. Ebenso an dieser Stelle nochmals einen großen Dank an Ellen Mailänder für die Projektunterstützung und an Michael Bitter für die Bereitstellung der notwendigen Forschungsgelder durch die Robert Bosch GmbH.

Befragungsteilnehmer für eine CBCA gerecht zu werden. Somit ergaben sich insgesamt sechs verschiedene Fälle und Erhebungsdesigns. Aufgrund der geringen zu erwartenden Anzahl an Befragungsteilnehmer musste die Anzahl der Auswahlentscheidungen in der Studie auf 30 – und somit über die sonst empfohlene Anzahl von 20 hinaus – erhöht werden. So wurde sichergestellt, dass Nutzenwerte für alle Merkmalsausprägungen geschätzt werden konnten. Gleichzeitig wurden den Befragten drei unterschiedliche Aufgabenstellungen á zehn Auswahlentscheidungen präsentiert, um durch Abwechslung in der Befragung die Aufmerksamkeit hoch zu halten (vgl. Abbildung 77 im Anhang III 2). Für die Befragung wurde für jede Zielgruppe und für jedes der drei Verfahren zunächst ein D-optimales Erhebungsdesign mittels des *Exchange Algorithmus* für *D-optimale Designs* bestimmt.³³⁴ Des Weiteren wurden unzulässige Kombinationsmöglichkeiten von Attributen für die Studie ausgeschlossen, um die Realitätsnähe und damit die Güte sowie Validität der Ergebnisse zu erhöhen. Die Aufgaben zu den Auswahlentscheidungen wurden unter Beachtung der Kriterien Orthogonalität³³⁵, *level balance*³³⁶ und minimaler Überschneidung³³⁷ mittels des *Exchange Algorithmus* berechnet, können aber nicht zwingend sichergestellt werden. Neben der Conjoint-Analyse der Präferenzen von NFZ-Käufern in der Auswahl von Antriebs-technologien wurde die Erwartung an das zukünftige Tankstellen- und Ladesäulennetz für alternative Antriebstechnologien untersucht. Des Weiteren wurden die Technologien hinsichtlich wahrgenommener Zuverlässigkeit, Wartungskosten und Reichweite bewertet.

Zusammenfassend war der Fragebogen aus sechs wesentlichen Teilen aufgebaut: Vorauswahl, Beschreibung des Unternehmensfuhrparks, Beschreibung des Beschaffungsprozess, die eigentliche Conjoint-Analyse, Bewertung der Antriebsformen und Erhebung zu den Anforderungen und Erwartungen an die Tank- und Lade-Infrastruktur alternativer Antriebstechnologien. Der finale Fragebogen ist im Anhang III 1) dargestellt.

5.3.2.4 Datenerhebung und Stichprobe

Die Datenerhebung erfolgte durch computergestützte, persönliche Interviews. Dabei suchte ein Interviewer den Befragten persönlich vor Ort auf und führte den Teilnehmer durch den Befragungsverlauf. Das persönliche Interview führt erfahrungsgemäß zu einer höheren Verbindlichkeit als computergestützte Telefoninterviews oder Fragebögen. Ebenso können die Aufmerksamkeit und die Motivation des Befragten durch den kontinuierlichen Dialog konstant gehalten werden, was im vorliegenden Fall von hoher Bedeutung war. In Summe wurden in Deutschland 261 Interviews geführt. 31 Interviewteilnehmer sind zu zwei unterschiedlichen Anwendungsfällen befragt worden. Abbildung 24 gibt ein Überblick über die Stichprobe der Conjoint-Analyse.

³³⁴ Vgl. *Fedorov (1972); Miller und Nguyen (1994)*.

³³⁵ Orthogonalität in einem Versuchsplan beschreibt die Nicht-Verletzung der proportionalen Häufigkeiten der Eigenschaftsausprägungen. Vgl. *Baier und Bruschi (2009)*, S. 76.

³³⁶ Level balance erfordert, dass unterschiedliche Ausprägungen in einem Versuchsplan möglichst gleich häufig vorkommen. Vgl. *Hillig (2006)*, S. 159.

³³⁷ Minimales Überschneiden (minimal overlap) bedeutet, dass Ausprägungen sich nur minimal im Auswahlset wiederholen. Vgl. *Hillig (2006)*, S. 159.

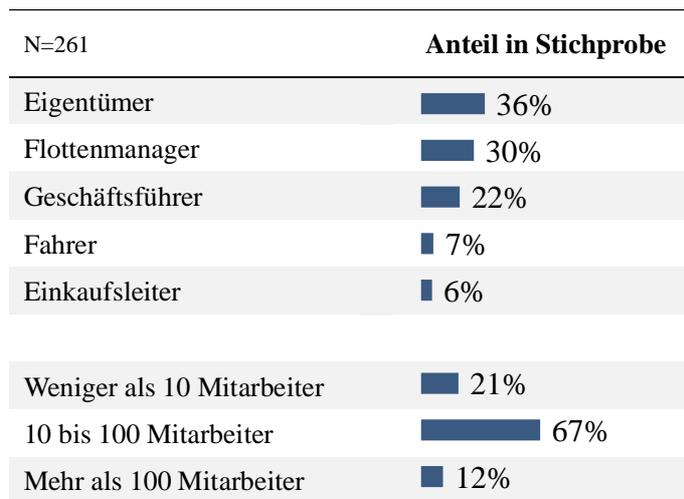


Abbildung 24: Stichprobe nach Rolle der Teilnehmer im *buying center* und Unternehmensgröße³³⁸

5.3.3 Ergebnisse

Zur Berechnung der Nutzenwerte der Conjoint-Analyse für die Befragungsteilnehmer und die unterschiedlichen Anwendungsfälle wurde die Hierarchical Bayes Schätzung angewandt. Somit konnten die Ergebnisse der drei verschiedenen Conjoint-Aufgaben aggregiert und für jeden der sechs Anwendungsfälle getrennt berechnet werden. Insgesamt wurden in den sechs Anwendungsfällen jeweils sechs Nutzenfunktionen zu Antriebsform, Delta Anschaffungspreis, Kraftstoffkosten, CO₂-Emissionen, Reichweite und Motorleistung ermittelt.

Die Nutzenfunktionen beschreiben, welchen Nutzen eine NFZ-betreibende Organisation durch die unterschiedlichen Ausprägungen eines Merkmals erhält. Je höher der Nutzenwert einer Merkmalsausprägung ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Organisation eine Antriebsform mit dieser Merkmalsausprägung auswählt (vgl. Abbildung 25).

Vergleicht man die Zahlungsbereitschaft der Kraftstoffeffizienz mit der Zahlungsbereitschaft für die Reduktion von 26,5 g CO₂ pro 100 km, dem äquivalent des durch die Verbrennung von einem Liter entstehenden CO₂-Emissionen, so zeigt sich ein Delta von etwa 1.300 €. Dies zeigt, dass trotz der linearen Zusammenhangs von Dieserverbrauch und CO₂-Emissionen, die Treibhausgasemissionen für NFZ-Käufer eine deutlich geringe Relevanz haben (vgl. Abbildung 26). Weiterhin gibt die Zahlungsbereitschaft für die Automobilindustrie eine Indikation, welches Verhältnis von Einsparpotenzial und zusätzlichen Anschaffungskosten von CO₂-sparenden Technologien ausgehen muss, damit NFZ-Käufer diese in Neuanschaffungen auswählen.

Des Weiteren lässt sich aus den Nutzenfunktionen der Merkmale auf deren relative Wichtigkeit in der Auswahlentscheidung schließen. Je wichtiger den Befragten ein Merkmal ist, desto stärker unterscheiden sich der minimale und der maximale Nutzenwert für die Ausprägungen eines

³³⁸ Eigene Abbildung.

Merkmals. Am Beispiel des deutschen Fernverkehrs (vgl. Abbildung 25) bedeutet dies, dass die Kraftstoffkosten (Δ Nutzen = 57) das wichtigste Kriterium sind, gefolgt von der Motorleistung (Δ Nutzen = 51). Den geringsten Einfluss auf die Kaufentscheidung haben demnach die Reichweite (Δ Nutzen = 32) und zuletzt die CO₂-Emissionen (Δ Nutzen = 20).

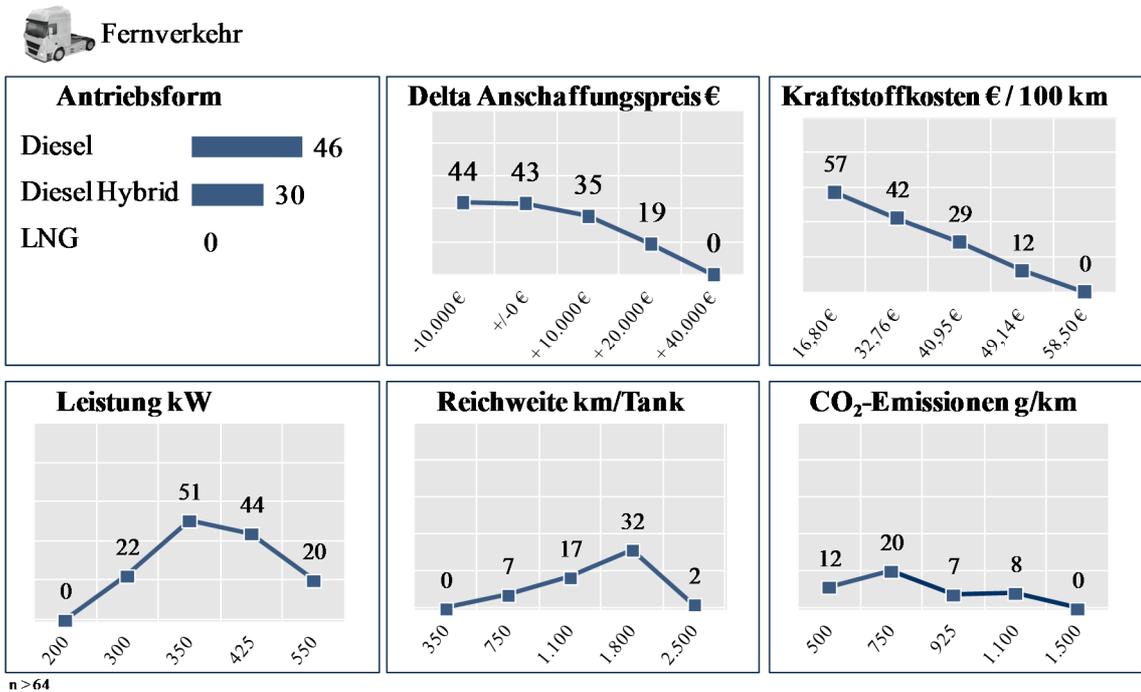


Abbildung 25: Nutzenfunktionen für Antriebsmerkmale des Anwendungsfalls Fernverkehr in Deutschland³³⁹

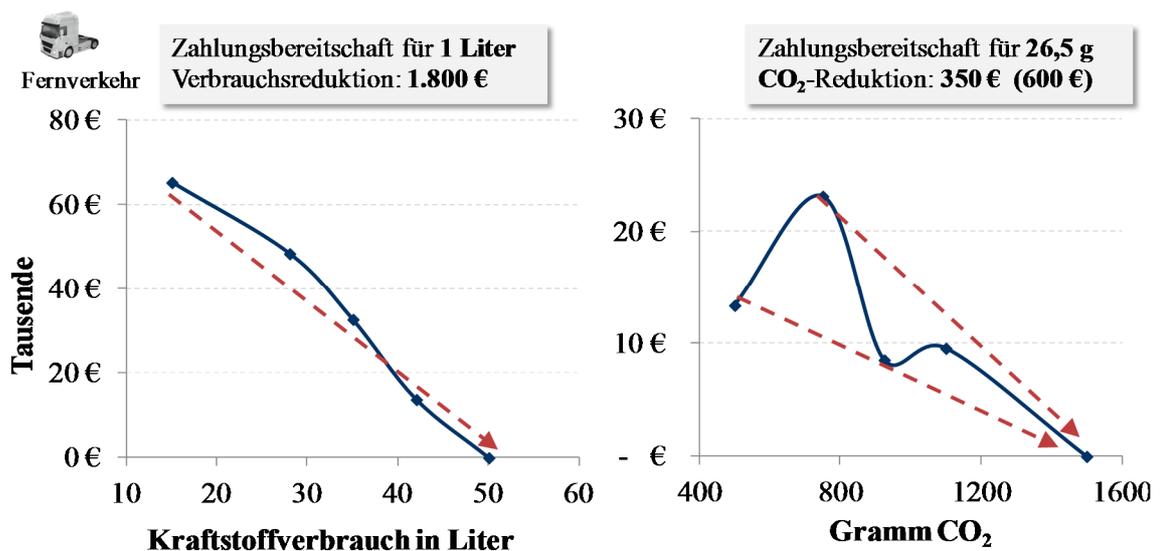


Abbildung 26: Vergleich der Zahlungsbereitschaft für Kraftstoffeinsparung und CO₂-Emissionen

³³⁹ Eigene Abbildung.

Auf Basis der Conjoint-Analyse sind in allen Anwendungsfällen die Kraftstoffkosten, der Anschaffungspreis und die Antriebsform die wichtigsten Faktoren in der Auswahlentscheidung. Für die Befragungsteilnehmer sind diese drei Kriterien nahezu gleich wichtig. Unabhängig vom Anwendungsfall stiftet der konventionelle Dieselantrieb den größten Nutzen aller Antriebsformen für die Befragungsteilnehmer. Von der positiven Assoziation und Bewertung des Dieselantriebs profitiert der Diesel-Hybridantrieb. Zwar weist dieser einen etwas geringeren Nutzen als der konventionelle Dieselantrieb für die Befragungsteilnehmer auf, ist aber dennoch weit besser bewertet als die übrigen Antriebsformen.

Reichweite und Motorleistung besitzen eine mittlere Wichtigkeit. In einigen Anwendungsfällen entspricht dabei das Maximum der Nutzenfunktion nicht der höchsten Merkmalsausprägung (vgl. beispielsweise Abbildung 25), sodass Organisationen klare Anforderungen an ihre Fahrzeuge zu haben scheinen. Eine höhere Reichweite wird so mit zusätzlichem Gewicht durch die Tankgröße assoziiert, eine höhere Motorleistung kann zu einem vermeintlichen Mehrverbrauch durch einen größeren Motor führen. Auffällig ist besonders die hohe Bedeutung der Reichweite pro Tankfüllung im Anwendungsfall Reisebus, in welchem die Anforderungen der Organisationen an die Reichweite sogar über die des Güterfernverkehrs hinausgehen. Über alle Anwendungsfälle hinweg haben CO₂-Emissionen eine sehr geringe Wichtigkeit (vgl. Abbildung 27). Darüber hinaus zeigen die Verläufe der Nutzenfunktion schwer zu erklärende Ausprägungen, da teilweise höhere CO₂-Emissionen nutzenstiftender sind als geringere.

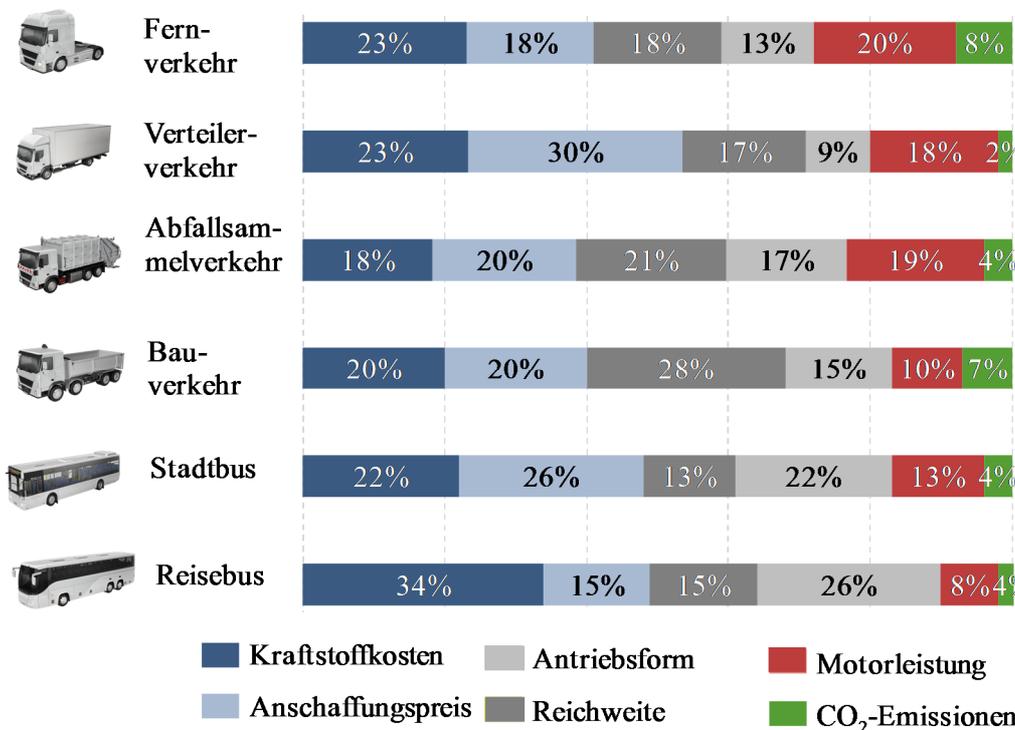


Abbildung 27: Vergleich der relativen Wichtigkeiten von Merkmalen in der Antriebswahl von NFZ³⁴⁰

³⁴⁰ Eigene Abbildung.

Zusätzlich zu den antriebspezifischen Auswahlkriterien, wurde die Wichtigkeit von Kaufkriterien bei der Beschaffung von NFZ allgemein abgefragt. Zentrale Kaufkriterien für NFZ sind über alle Anwendungsfälle hinweg, in unterschiedlicher Reihenfolge die Zuverlässigkeit / Robustheit der Fahrzeuge, der Anschaffungspreis, der Kraftstoffverbrauch sowie die Gesamtbetriebskosten (vgl. Abbildung 28). Ebenso sind den Befragungsteilnehmern Umweltfaktoren (Reduzierung der CO₂-Emissionen, Schadstoff-Emissionen, Umweltfreundlichkeit) wichtiger als motorspezifische Kriterien wie Motorleistung oder Hubraum.

Vergleicht man die Wichtigkeit der allgemeinen Kaufkriterien auf Ebene der Anwendungsfälle, so werden kaum wesentliche Unterschiede sichtbar. Den Befragungsteilnehmern aus Organisationen im Bau- und Abfallsammelverkehr ist die Anwenderfreundlichkeit der Fahrzeuge seitens der Fahrer vergleichsweise wichtiger als in anderen Transportaufgaben. Lärmemissionen hingegen sind besonders für Unternehmen im Personentransport von erhöhter Bedeutung.

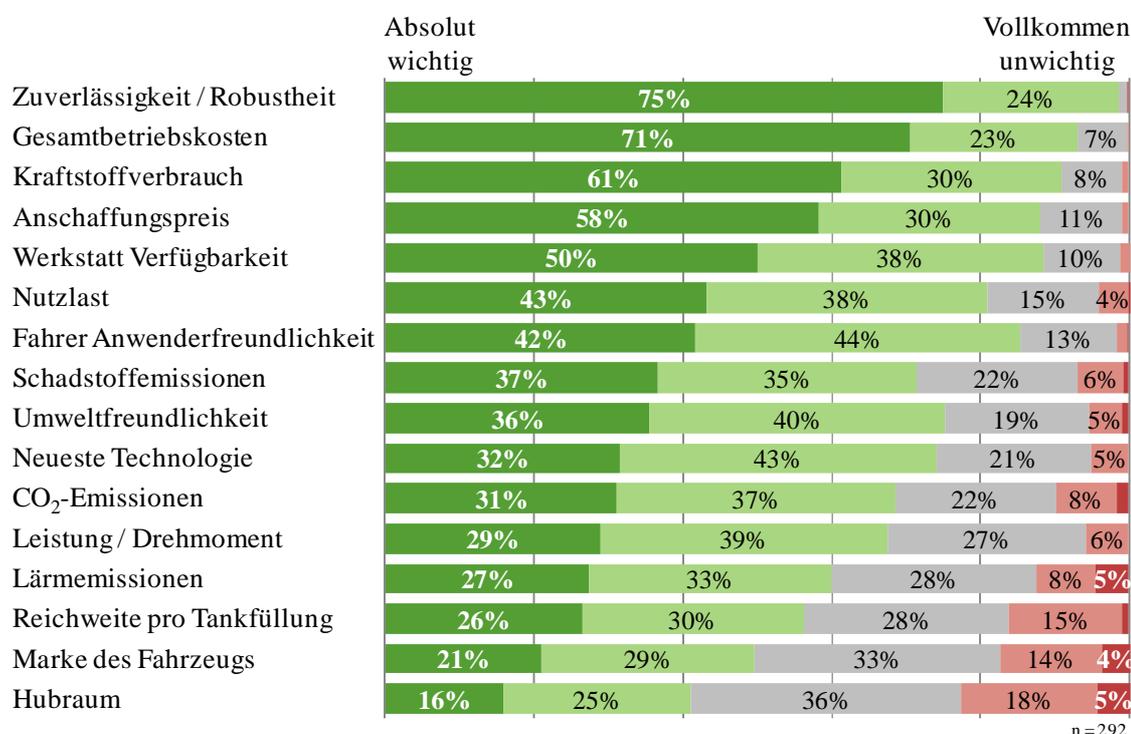


Abbildung 28: Wichtigkeit von Kaufkriterien für NFZ der deutschen Befragungsteilnehmer³⁴¹

Des Weiteren bewerteten die Teilnehmer die Antriebstechnologien hinsichtlich Reichweite, Zuverlässigkeit, Wartungsaufwand und Tank-/Lade-Infrastruktur. Dabei ergab sich ein vergleichsweise einheitliches Bild in den unterschiedlichen Anwendungsfällen. Erwartungsgemäß zeigen die Befragten eine extrem positive Haltung gegenüber dem konventionellen Dieselantrieb. Die Technik des Antriebs wird als sehr zuverlässig wahrgenommen und bietet eine mehr als ausreichende Reichweite in allen Anwendungen. Einzig die Wartungskosten werden teilweise kritischer bewertet – jedoch weitaus besser als die der anderen Antriebstechnologien.

³⁴¹ Eigene Abbildung.

Dem Diesel-Hybrid gegenüber sind die befragten Organisationen deutlich skeptischer, da bisher zu wenige Erfahrungen mit dieser Antriebstechnologie gesammelt wurden und kaum Vertrauen in diesen Antrieb besteht. Einerseits sei das bestehende Werkstattnetzwerk zu schlecht ausgebaut, andererseits bewerten die Teilnehmer überraschenderweise die Reichweite von Hybridfahrzeugen gegenüber dem konventionellen Dieselantrieb stark negativ, obwohl die Reichweite technologiebedingt nicht zwingend geringer sein muss. In vielen Fällen kann die Reichweite von Hybridfahrzeugen durch den geringeren Kraftstoffverbrauch sogar höher als die von vergleichbaren konventionellen Dieselfahrzeugen sein.

Eine sehr negative Haltung haben die Befragten gegenüber rein elektrischen NFZ, da das Werkstattnetzwerk und die Ladeinfrastruktur in viel zu geringem Maße ausgebaut seien und die Anforderungen an die Reichweite – sogar für die Stadtanwendungsfälle mit geringen Fahrtstrecken – nicht erfüllt würden. Zwischen den Antriebsformen CNG und LNG zu differenzieren scheint vielen Befragten schwer gefallen zu sein, sodass die beiden Antriebe sehr ähnlich bewertet wurden. Insgesamt herrscht gegenüber diesen beiden Antriebsformen eine ablehnende Haltung vor, da das Tankstellennetzwerk zu gering ausgebaut ist und keine Zuversicht besteht, dass die beiden Antriebe den Anforderungen in den Anwendungsfällen gerecht werden.

Schließlich wurden die Befragungsteilnehmer zu ihren Anforderungen und Bedürfnissen der Lade- und Tankinfrastruktur befragt, da dieses nicht in der Conjoint-Analyse berücksichtigt wurde. Je geringer die täglichen Fahrtstrecken der NFZ sind, desto geringer ist erwartungsgemäß der Bedarf an Lade- bzw. Tankstation über den eigenen Betriebshof hinaus. Während im Personen- und Güterfernverkehr nahezu keine Organisation ohne externe Infrastruktur auskommen würde, wäre für 84 % der Organisationen im Anwendungsfall Stadtbus eine LNG-Tankstelle auf dem eigenen Betriebshof für eine uneingeschränkte Erfüllung der Transportaufgabe ausreichend. Für CNG-betriebene (53 %) und rein elektrische Stadtbusse (28 %) ist der Anteil dennoch vergleichsweise hoch. Gleichzeitig besteht auch bei über 50 % der Befragten im Anwendungsfall Stadtbus die Bereitschaft, in solche betriebseigene Tankstellen für alternative Antriebstechnologien zu investieren. Für den Verteiler-, Bau- und Abfallsammelverkehr sind die Zustimmungswerte in überwiegend ähnlichen Dimensionen, dass eine betriebseigene Tankstelle zum uneingeschränkten Einsatz der NFZ ausreichend ist. Die höchste Zustimmung erhält der LNG-Antrieb (60 % bis 65 %), gefolgt von CNG- (~40 %) und Elektro-Antrieb (33 %) im Falle des Verteilerverkehrs. Die Zustimmung, in eine solche Tankstelle oder Ladesäule zu investieren, lag jedoch mit 25 % bis 35 % auf einem deutlich niedrigeren Niveau als im Anwendungsfall Stadtbus.

5.3.4 Zusammenfassung

Die Präferenzen für Antriebstechnologien der Organisationen im Transportsektor sind anwendungsfallübergreifend vergleichsweise homogen. Die in einem Anwendungsfall durchschnittlichen, relativen Wichtigkeiten der Kriterien in der Antriebswahl bewegen sich größtenteils in einem vergleichbaren Verhältnis. Die größten Unterschiede sind auf Anwendungsebene zwischen Reisebus und Güternahverkehr erkennbar. Dies unterstreicht allerdings den sehr hohen

Einfluss der anwendungsfallspezifischen Anforderungen auf die Präferenzstruktur und somit die Bewertung des *relative Advantage*, da sich die Merkmalsausprägungen zwischen den Anwendungsfällen stark unterscheiden haben.

Die Beschaffung von NFZ ist zwar auf Basis der Ergebnisse einerseits ein sehr rationaler Prozess, da Entscheider eine große Wichtigkeit auf Anschaffungs- und Kraftstoffkosten legen. Dies überträgt sich auch auf das Bedürfnis nach zuverlässigen und robusten Fahrzeugen. Im Fall von Fahrzeugausfällen können sowohl hohe Verluste aufgrund des Stillstandes der Fahrzeuge als auch durch Reparaturkosten entstehen.

Andererseits überraschen die deutliche Ablehnung alternativer Antriebstechnik sowie die geringe Kenntnis über CO₂-Emissionen. Im Umfeld höchster Professionalisierung der Einkaufsprozesse von *buying center* sollte das Wissen über Produktalternativen höher sein. Das Beispiel der Reichweitenbewertung des Diesel-Hybrids zeigt Unwissen und überhöhte Ablehnung alternativer Antriebe. Die ist kein Beleg für sehr rationale Entscheidungen auf Basis objektiver Bewertung der Produktalternativen.

Alternative Antriebstechnologien werden zwar als deutlich umweltfreundlicher wahrgenommen als der konventionelle Dieselantrieb (besonders gilt dies für elektrifizierte Antriebe), jedoch existiert eine extrem hohe Skepsis bezogen auf die Zuverlässigkeit dieser Technologien. Unter den deutschen Befragungsteilnehmern gibt es einige Organisationen, für welche CO₂-Reduktion und Umweltaspekte eine wesentliche Rolle spielen. Allerdings zeigen die Ergebnisse, dass Kostenüberlegungen meist überwiegen, da in der Branche kaum finanzieller Spielraum zur Umsetzung aufpreispflichtiger, umweltfreundlicher Maßnahmen vorhanden ist. Die Befragten geben an, dass die neuen Antriebsformen noch nicht ausreichend getestet sind und daher Probleme und höhere Wartungskosten verursachen würden. Deshalb werden die Umweltaspekte als wichtig angegeben, letztlich fällt die Kaufentscheidung jedoch auf den Dieselantrieb, da das Bedürfnis nach zuverlässiger Technik deutlich überwiegt.

In dieser frühen Marktphase ist der Massenmarkt also noch weit davon entfernt, alternative Antriebstechnologien für zukünftige Kaufentscheidungen in Erwägung zu ziehen. Nichtsdestotrotz geben einige wenige Organisationen an, alternative Antriebstechnik schon beschafft zu haben oder Pläne zu haben, diese anzuschaffen. Die größte Akzeptanz erfahren hierbei Diesel-Hybridfahrzeuge, während Erdgas-betriebene NFZ oder rein elektrische NFZ kaum berücksichtigt werden. Die geringste Skepsis gegenüber alternativen Antriebstechnologien ist dabei in den Personentransport-Anwendungsfällen Stadtbus und Reisebus vorhanden. Um die Akzeptanz alternativer Antriebstechnologien in NFZ-betreibenden Organisationen zu erhöhen, müssen insbesondere deren Zuverlässigkeit und Reichweite demonstriert werden sowie deren Beitrag zur Reduktion der Gesamtbetriebskosten über die Lebensdauer sicher gestellt werden.

Eine weitere wesentliche Barriere bildet der Mangel an komplementärer Infrastruktur zur Betankung, Wartung und Reparatur von Fahrzeugen. Viele Organisationen geben darüber hinaus an, eine eigene Werkstatt und eigene Tankanlagen auf dem Betriebshof zu betreiben. Für einen

Großteil der Organisationen mit städtischen Anwendungsfällen (Stadtbus, Verteilerverkehr, Abfallsammelverkehr) würden eine lokale oder eigene Tankstellen zum uneingeschränkten Betrieb von NFZ mit alternativen Kraftstoffen ausreichen. Gleichzeitig wären auch viele Organisationen bereit, eine solche aufzubauen. Hingegen ist die Bereitschaft, alternative Antriebstechnik ebenfalls in der eigenen Werkstatt zu bedienen – auch wenn durch die komplexe Technik (beispielsweise Hochvolttechnik oder Kryotanks) wiederum Vorbehalte und zusätzlicher Aufwand entstehen – in allen Anwendungsfällen ähnlich hoch. Dies unterstreicht die Dichte potentieller *Lead User* in den städtischen Anwendungsfällen.

Abschließend wird auf einige Einschränkungen der Studie hingewiesen. Die Auswahl der Befragungsteilnehmer erfolgte wiederum nicht zufällig. Auch hier würde eine repräsentative, zufällig ausgewählte Stichprobe zu verlässlicheren Erkenntnissen führen (vgl. Kapitel 5.2.4.3). Des Weiteren gibt es umfangreiche Literatur zum Effekt der verfügbaren Informationen auf die Gestaltung von Präferenzen. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass Befragungsteilnehmer auf hypothetische Märkte differenzierter reagieren als auf reale Märkte, da deutlich unterschiedliche Informationen vorliegen können. Zuletzt muss bei der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse beachtet werden, dass für einige individuelle Anwendungsfälle aufgrund der geringen Stichprobe die Ergebnisse nur für einen bestimmten Wertebereich aussagekräftig sind.

5.4 Implikationen für die Technologiediffusion

Dieses Kapitel untersuchte den organisationalen Kontext der Diffusion CO₂-sparender Technologien im NFZ-Markt. Hierzu wurden zwei empirische Studien durchgeführt, um sowohl das Adoptionsverhalten der betrachteten Organisationen als auch deren Kaufentscheidungskriterien für Antriebstechnologien zu untersuchen.

Die Ergebnisse der ersten Studie zeigen, dass auch auf dem NFZ-Markt als B2B-Kontext, nicht-ökonomische Gründe für die frühe Adoptionsneigung von *Innovatoren* und *Frühen Adoptern* entscheidend sind. Alternative Antriebstechnologien werden aufgrund umwelt- und klimabedingter Gründe angeschafft. Dies ist mit den Ergebnissen der Conjoint-Analyse kongruent. Denn diese zeigt, dass der Großteil der Organisationen alternativen Antriebstechnologien eine sehr geringe Attraktivität aufgrund mangelnder Zuverlässigkeit und fehlender komplementärer Infrastruktur zuspricht. Des Weiteren bestätigen sich dadurch die Annahmen, dass sich einerseits die Präferenzstruktur und Bedürfnisse von *Innovatoren* und *Frühen Adoptern* und andererseits dem Massenmarkt deutlich unterscheiden, da der Massenmarkt hauptsächlich nach entsprechend kostenorientierten Kriterien entscheidet. Daher besteht zwischen den Bedürfnissen und Anforderungen *früher Adopter* sowie dem breiten Massenmarkt ein sogenanntes *Chasma*. Dies bestätigt die durch die Ergebnisse der Studie von Walter et al. (2012) angedeuteten Vermutungen.³⁴² Dieses *Chasma* zu überwinden, wird eine der größten Herausforderungen zu einer erfolgreichen

³⁴² Vgl. Walter (2012), S. 12012.

Diffusion alternativer Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt darstellen. Daher sollten im späteren Simulationsmodell *Innovatoren* und *Frühe Adopter* auf der einen Seite und der Massenmarkt auf der anderen getrennt betrachtet werden.

Entsprechend der Technologiediffusionstheorie ist das Wissen über eine Produktalternative der erste wesentliche Schritt zur Adoption einer Innovation. Wesentliche Faktoren für die Adoptionsentscheidungen sind neben dem *relative advantage* ebenso die *observability* und *trialability*. Die erste Studie zum organisationalen Adoptionsverhalten zeigte die Bedeutung, welche die Erfahrung mit und das Wissen über alternative Antriebstechnologien auf die Adoptionsneigung von NFZ-Käufern hat. Darüber hinaus hat die Conjoint-Analyse bestätigt, wie gering derzeit die Kenntnis, praktische Erfahrung und Käuferwägung für alternative Antriebstechnologien ist. Daher wird im Simulationsmodell diese wesentliche Komponente für die Technologiediffusion berücksichtigt und die gewonnenen Daten implementiert.

Schließlich bestätigt sich in beiden Studien die hohe Dichte potentieller *Lead User* im städtischen Personennahverkehr, da in diesem Anwendungsfall ein vergleichsweise hoher Anteil an frühen Adoptern zu bestehen scheint. Darüber hinaus ist sowohl eine vergleichsweise höhere Bereitschaft in komplementäre Infrastruktur zu investieren vorhanden, als auch die Bedeutung von Kaufkriterien zur Emissionsminderung und das Wissen über alternative Antriebstechnologie wesentlich höher ausgeprägt als in anderen Anwendungsfällen.

Zusammenfassend erbrachten die beiden Studien wertvolle Erkenntnisse, durch die auf das Adoptionsverhalten und die Verteilung der Adopterkategorien von NFZ-Käufer geschlossen werden kann. Gleichzeitig sind durch die Conjoint-Analyse die grundlegenden Informationen zur Berechnung des *relative advantage* von innovativen Antriebstechnologien erhoben worden. Des Weiteren wurden durch die Studien die bisherige Erfahrung, das derzeitige Wissen und die aktuelle Käuferwägung hinsichtlich dieser Antriebstechnologien untersucht. Dies bildet eine verlässliche, empirische Basis des organisationalen Kontextes für die Prognose der zukünftigen Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion von NFZ.

„Die weltweite Nachfrage nach Kraftfahrzeugen wird eine Million nicht überschreiten
- allein schon aus Mangel an verfügbaren Chauffeuren.“

Gottlieb Daimler (1834-1900), Erfinder

Kapitel 6

Organisationsexterner Kontext der Diffusion

Ziel dieses Kapitels ist die Analyse des organisationsexternen Kontextes, welcher die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien im NFZ-Markt determiniert. Der organisationsexterne Kontext ist wesentlich durch die Industrie- und Marktstrukturen, das komplementäre Ökosystem sowie den gesetzlichen Rahmen beschrieben.³⁴³

Die grundlegenden Industrie- und Marktstrukturen wurden in der Beschreibung des Untersuchungsobjekts³⁴⁴ dargestellt. Zur Vervollständigung des organisationsexternen Kontextes erfolgen zunächst die Analyse von den weiteren Dimensionen des gesetzlichen Rahmens und des komplementären Ökosystems auf Basis von Primär- und Sekundärliteratur. Darauf aufbauend werden die theoretischen Erkenntnisse anhand einer qualitativen empirischen Studie überprüft und das Verständnis des organisationsexternen Kontextes erweitert. Diese Studie soll die Wechselwirkungen zwischen den Akteuren des NFZ-Marktes sowie deren Positionen, Entscheidungsverhalten und Einflussmöglichkeiten auf das Untersuchungsobjekt im Hinblick auf die Implementierung des systemdynamischen Simulationsmodells erheben. Hierfür werden zunächst durch eine Stakeholderanalyse die wesentlichen Akteure des Marktes theoretisch bestimmt. Anschließend wird ein Design zur Untersuchung dieser Akteure in einer empirischen Studie mittels des *Institutional Analysis and Development Framework* aufgebaut, um leitfadengestützte Interviews als Erhebungsinstrument für eine empirische Datenbasis des organisationsexternen Kontextes zur Simulationsmodellentwicklung einzusetzen.

6.1 Regulatorischer und politischer Rahmen des NFZ-Marktes

Die Auswirkungen des regulatorischen und politischen Rahmens des NFZ-Marktes auf die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien gliedern sich in drei Einflussebenen, welche im Folgenden vorgestellt werden.

³⁴³ Vgl. Abbildung 9: TOE Modell und Kapitel 3.2.2 TOE-Modell

³⁴⁴ Vgl. Kapitel 2.

6.1.1 Europäische Ebene

Auf europäischer Ebene determiniert die EU-Kommission mit den Generaldirektionen *Klimapolitik*, *Mobilität und Verkehr* sowie *Umwelt* den ordnungspolitischen Rahmen des NFZ-Marktes. Ziel des Generaldirektorats *Mobilität und Verkehr* ist es, eine effiziente, sichere, verlässliche und umweltfreundliche Mobilität sowie die Rahmenbedingungen für eine wettbewerbsfähige Industrie zur Schaffung von Wachstum und Arbeitsplätzen zu fördern. Das Generaldirektorat *Umwelt* hat sich zum Ziel gesetzt, ein nachhaltiges Transportsystem in Bezug auf CO₂-Emissionen, Luftverschmutzung und Lärmbelastung zu gestalten. Aufgabe des Generaldirektorats *Klimapolitik* ist es, das Ziel der CO₂-Minderung bis 2020 um 20 % und bis 2050 um 60 % gegenüber 1990 zu erreichen. Hierbei emittiert der Straßenverkehr etwa 20 % der europäischen Treibhausgase, wovon wiederum ein Viertel auf schwere NFZ zurückzuführen ist.³⁴⁵

Die EU-Kommission beschreibt das heutige straßengebundene Transportsystem als nicht nachhaltig, stark umweltbelastend und gesundheitsgefährdend. Daher ist es das übergeordnete Ziel, die Mobilität von ihren nachteiligen Nebenwirkungen zu entkoppeln, indem die Multimodalität gefördert wird und technologische Innovationen den Wandel hin zu einem energieeffizienten, nachhaltigen und minimal umweltverschmutzenden Transportsystem ebnen sollen.³⁴⁶ Die für NFZ und die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien wesentlichen Maßnahmen sind dabei:

- „Geeignete CO₂-Abgasnormen für die Fahrzeuge aller Verkehrsträger, ergänzt, falls erforderlich, durch Energieeffizienzanforderungen zur Erfassung sämtlicher Antriebsarten
- Geräuschemissionsnormen für Fahrzeuge
- Strategien für öffentliche Beschaffungen, damit neue Technologien rasche Verbreitung finden
- Bestimmungen über die Interoperabilität von Aufladeinfrastrukturen für umweltfreundliche Fahrzeuge
- Leitlinien und Standards für Betankungsinfrastruktur
- Strategie zur annähernd emissionsfreien Stadtlogistik bis 2030
- Anpassung der Vorschriften über Gewichte und Abmessungen an neue Gegebenheiten und Technologien“³⁴⁷
- Infrastrukturabgabe³⁴⁸

Euro-Abgasnorm

Seit 1992 gelten für NFZ umweltpolitische Richtlinien wie die Euro-Abgasnormen, welche die Abgasemissionen (Feinstaubpartikel, NO_x, CO und Kohlenwasserstoffverbindungen) durch zusätzliche Technologien in der Abgasnachbehandlung (Dieselpartikelfilter, EGR, SCR) und

³⁴⁵ Vgl. *Europäische Kommission* (2014c), online.

³⁴⁶ Vgl. ebenda.

³⁴⁷ Vgl. *Europäische Kommission* (2011c), S. 29–31.

³⁴⁸ Vgl. *Europäische Kommission* (2011b).

durch die Optimierung der Verbrennung im Motor schrittweise um bis zu 99 % reduziert haben.³⁴⁹ Seit der verbindlichen Einführung der vorerst letzten Euro-6 Abgasnorm zum 1. Januar 2014 werden die Abgasemissionsgrenzwerte durch die NFZ-Hersteller eingehalten. Eine weitere Verschärfung der Abgasvorschriften ist derzeit nicht absehbar.

Geräusch- und Lärmemissionen

Mit der EU-Richtlinie 2002/49/EG soll „ein gemeinsames Konzept festgelegt werden, um vorzugsweise schädliche Auswirkungen, einschließlich Belästigung durch Umgebungslärm zu verhindern, ihnen vorzubeugen oder sie zu mindern“.³⁵⁰ Gemäß dem Bericht der Europäischen Kommission an EU-Parlament und -Rat zur Durchführung der Richtlinie, wird ein Grenzwert für Lärmbelästigung von 40 dB nachts und 55 dB tagsüber angegeben. Entsprechend des Berichts soll auf Basis eines verbesserten Testverfahrens ein Verordnungsvorschlag zur Einführung strengerer Grenzwerte hinsichtlich des zulässigen Geräuschpegels und der Auspuffanlage von Kraftfahrzeugen vorgelegt werden.³⁵¹

Aufbau von Infrastruktur für alternative Kraftstoffe

Die EU-Richtlinie zum Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe *COM (2013) 17* hat zum Ziel, die Abhängigkeit des Verkehrssektors vom Erdöl und den Schadstoffausstoß von Straßenfahrzeugen zu reduzieren. Bis 2016 soll dazu eine Mindestinfrastruktur zur Betankung von NFZ in jedem EU-Mitgliedsstaat aufgebaut und eine allgemeine Strategie zur besseren Unterstützung und Vermarktung alternativer Kraftstoffe im Transportsektor entwickelt und definiert werden. Darüber hinaus werden für die EU einheitliche Technologiestandards in der Tank-Infrastruktur festgelegt, um die Verbraucherakzeptanz zu erhöhen. Der Bericht hebt außerdem die Bedeutung finanzieller Anreize für saubere und energieeffiziente Fahrzeuge hervor und stellt Maßnahmen zur Implementierung der Infrastruktur in Aussicht.³⁵² Die Zielvorgabe des Infrastrukturaufbaus ist für 2020 die Erreichung der Mindestanzahl an Ladestationen für batterieelektrische Fahrzeuge pro Mitgliedsstaat sowie ein Netz von Tankstellen für Wasserstoff in einer maximalen Entfernung von 300 km, für LNG in 400 km und CNG in 150 km. Eine exakte Definition der Abdeckung wurde nicht festgelegt.

CO₂-Gesetzgebung

Trotz Verbesserung in der Kraftstoffeffizienz sind laut EU-Kommission die CO₂-Emissionen von NFZ aufgrund des gestiegenen Transportaufkommens absolut um 36 % zwischen 1990 und 2010 gestiegen und würden ohne Maßnahmen seitens der Politik sich in 2030 und 2050 absolut immer noch auf einem ähnlichen Niveau wie heute bewegen. Im Gegensatz dazu ist das Ziel

³⁴⁹ Vgl. *Europäische Kommission (2005)*.

³⁵⁰ Vgl. *Europäische Kommission (2011a)*, S. 1.

³⁵¹ Vgl. *Europäische Kommission (2011a)*, S. 12.

³⁵² Vgl. *Europäische Kommission (2013)*.

jedoch, die Treibhausgas-Emissionen des Transportsektors bis 2050 um 60 % gegenüber 1990 zu reduzieren.³⁵³

Daher kündigt die EU-Kommission in ihrem *Weißbuch* eine Strategie zur zeitnahen Entwicklung eines computergestützten Simulationsmodell an (VECTO³⁵⁴), um die CO₂-Emissionen neu zugelassener NFZ zu messen, zu zertifizieren und zu überwachen. Mithilfe des Simulationsmodells soll in 2015 eine Gesetzesvorlage erarbeitet werden, welche die Zertifizierung und Überwachung neuer NFZ regeln soll. VECTO ist mittlerweile nahezu vollständig entwickelt, allerdings sind die für das Simulationsmodell benötigten Daten noch nicht vollständig experimentell bestimmt. Neben der Festlegung anwendungsfallspezifischer CO₂-Grenzwerte, könnten die Einführung des Straßengüterverkehrs in das „Emission Trading System“ der EU oder die Bestimmung von Leistungsobergrenzen alternative oder zusätzliche Maßnahmen darstellen.³⁵⁵

Derzeit ist die Bezugsgröße der CO₂-Grenzwerte noch nicht bestimmt. Daher ist noch offen, ob analog zu PKW und leichten NFZ die Einheit gCO₂/km, die für NFZ geeignetere Größe gCO₂/tkm oder sogar mehrere Größen verwendet werden. Ebenfalls ist die Art der Umsetzung noch nicht determiniert. In Frage kommen beispielsweise eine Neuzulassungszertifizierung analog zur Euro-Abgasnorm oder Flottengrenzen, wie sie auf dem PKW-Markt eingeführt wurden.

In anderen Ländern ist die legislative Umsetzung schon weiter fortgeschritten. In Japan gibt es seit 2002 Höchstwerte für den Kraftstoffverbrauch von NFZ. 2010 wurden solche Grenzwerte in der Neuzulassungszertifizierung in China und 2014 in den USA segmentspezifisch für NFZ eingeführt.

Green Public Procurement

Öffentliche Institutionen und Einrichtungen sind in Europa ein bedeutender Abnehmer von Gütern und Dienstleistungen. Die daraus resultierende Nachfragemacht kann für die Beschaffung umweltfreundlicher Güter und Dienstleistungen durch ein sogenanntes *Green Public Procurement* nicht nur einen Beitrag für die öffentliche Hand selbst leisten, sondern auch dazu beitragen, die kritische Masse in der Nachfrage nach nachhaltigen und umweltfreundlichen Ökoinnovationen für Güter und Dienstleistungen schneller zu erreichen. Daher sollen verlässliche und unter den Mitgliedsstaaten kompatible Kriterien definiert werden, welche helfen, den Markt für ökologische Innovationen zu stärken. Ein Beitrag könnten dabei Anreize zum Kauf von alternativen Antriebstechnologien durch öffentliche Träger und Transportunternehmen darstellen.³⁵⁶

³⁵³ Vgl. *Europäische Kommission* (2011c), S. 5.

³⁵⁴ VECTO steht für Vehicle Energy consumption Calculation Tool.

³⁵⁵ Vgl. *Europäische Kommission* (2014b), online und *Europäische Kommission* (2011c).

³⁵⁶ Vgl. *Europäische Kommission* (2014a), online.

Des Weiteren sind zentrale Regierungsbehörden und subzentrale öffentliche Auftraggeber zu einer europaweiten Ausschreibung und Veröffentlichung im Amtsblatt der EU ab einem bestimmten Auftragswert durch das europäische Vergaberecht (Richtlinie 2014/24/EU und 2014/25/EU) verpflichtet. Zentrale Regierungsbehörden müssen ab einer Auftragssumme von 134.000 € subzentrale öffentliche Auftraggeber ab einer Auftragssumme von 207.000 € und Aufträge im Bereich Wasser-, Energie- und Verkehrsversorgung ab 414.000 € europaweit ausschreiben. Daher können sich öffentliche oder kommunale Betreiber von NFZ schon durch eine Investition in nur ein NFZ für den aufwändigeren europaweiten Ausschreibungsprozess verpflichten.

Abmessungen

Die Richtlinie 96/53/EG des Europäischen Rates regelt die Höchstmaße und Gewichte von LKW und Bussen ab 3,5 t. Auf Vorlage der Europäischen Kommission hat das EU-Parlament einigen Veränderungen mit dem Ziel der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs zugestimmt. Vorbehaltlich der Ratifizierung dürfen demnach NFZ mit einem um 0,5 m verlängertem Heck zugelassen werden. Ebenso werden abgerundete Fahrerhäuser zur Reduktion des Luftwiderstands und Überschreitungen der Längenmaße zur Erhöhung der Verkehrssicherheit erlaubt. Außerdem werden bei NFZ mit alternativen Antriebstechnologien Gewichtserhöhungen von einer Tonne gegenüber konventionellen Dieselmotoren toleriert - das zusätzliche Gewicht darf jedoch die Nutzlast nicht erhöhen.³⁵⁷

Infrastrukturabgabe

In den Richtlinien 2011/76/EU, 1999/62/EC und 2006/38/EC hat das Europäische Parlament allgemeine Rahmenbedingungen zur Erhebung von distanz- oder zeitbasierten Infrastrukturabgaben für NFZ geregelt. Kern der Direktive ist die Übereinkunft der Mitgliedsstaaten, dass durch Maut und Vignetten die Kosten zum Bau, zum Betrieb und zur Entwicklung der Straßeninfrastruktur durch Umlage auf die Nutzer gedeckt werden sollen. Die Regularien sollen durch Vereinheitlichung zwischen den Mitgliedsstaaten zu einer Verbesserung des Straßentransports und zu einer fairen und effizienteren Verteilung der Kosten – entsprechend der tatsächlichen Straßennutzung – führen. Die Art und Höhe der Infrastrukturabgabe wird durch die Europäische Kommission nicht final geregelt und bleibt in der Hoheit der einzelnen Mitgliedsstaaten.

Förderung und Subvention

Schließlich hat auf europäischer Ebene die Politik, durch die Förderung von Forschungsprojekten und durch Subventionen für Fahrzeugkäufer, Einfluss auf die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien. Ein Beispiel hierfür ist die *European Green Vehicles Initiative*. Seit August 2009 werden rund 80 Pilotprojekte mit 500 Mio. € gefördert. Fokus liegt dabei insbesondere auf der Elektrifizierung des Antriebsstrangs, allerdings werden auch andere alternative Kraftstoffe

³⁵⁷ Vgl. vom EU-Parlament angenommene Texte vom 15.04.2014.

und Technologien wie beispielsweise die Abgaswärmenutzung gefördert. Weitere Maßnahmen sind in diesem Kontext sehr wahrscheinlich.

6.1.2 Nationale Ebene

Das deutsche Verkehrsministerium hat in der *Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS)* der Bundesregierung den Beitrag und die damit verbundenen Maßnahmen zur Umsetzung des Energiekonzeptes der Bundesregierung definiert. Ziel ist es, den Endenergieverbrauch des Verkehrssektors bis 2020 um 10 % und bis 2050 um 40 % gegenüber dem Verbrauchsniveau von 2005 zu reduzieren sowie die Energiebasis im Verkehr zu verbreitern.

Auf nationaler Ebene beeinflussen die deutsche Politik und die deutsche Gesetzgebung die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien durch die Energiesteuer, das Bundesfernstraßenmautgesetz und nationale Förderprogramme wesentlich.

In Bezug auf den Straßengüterverkehr hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)³⁵⁸ hierfür Handlungsfelder und Aufgaben in der MKS bestimmt. In einer Innovationsinitiative *Zukunft LKW* sollen alternative Kraftstoffe und innovative Antriebe gefördert werden. Eine konkrete Umsetzung ist bisher jedoch noch nicht erfolgt. Des Weiteren wurde eine aufkommensneutrale Mautspreizung zugunsten emissionsarmer, effizienter und klimaschonender LKW im Rahmen der MKS angekündigt und in einem ersten Schritt umgesetzt.³⁵⁹ Zukünftig ist die LKW-Maut für Fahrzeuge, welche die Euro-6 Abgasnorm erfüllen, aufgrund der Verursachung geringerer Luftverschmutzungskosten günstiger als für LKW, die nur älteren Abgasnormen (2,1 €Cent /km gegenüber Euro 5 und 3,2 €Cent/km gegenüber Euro 6) genügen. Zusätzlich wird die Maut von bisher 12 Tonnen auf 7,5 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht abgesenkt. Eine besondere Mautvergünstigung für Fahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien besteht nicht. Für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) durch Busse ist eine Fortsetzung der Markteinführungsförderung für Hybrid- und Plug-In-Hybridbusse sowie eine Überprüfung der Ausschreibungsmodalitäten vorgesehen.³⁶⁰

Um den Aufbau der komplementären Infrastruktur für alternative Antriebstechnologien zu unterstützen, fördert die Bundesregierung zukünftig zusätzlich die Biokraftstoffproduktion und den Aufbau von Infrastruktur für alternative Kraftstoffe, insbesondere im Hinblick auf CNG-, LNG-, Wasserstoff- und Stromtankstellen.³⁶¹ Die Anzahl an Erdgastankstellen (CNG) in Deutschland soll von knapp 900 auf 1.300 Tankstellen erweitert werden. Über den *Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität* fördert die Bundesregierung seit 2009 in acht Modellregionen die For-

³⁵⁸ Nach der Bundestagswahl 2013 wurde die Verantwortlichkeit der MKS auf das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur übertragen.

³⁵⁹ Vgl. *Deutscher Bundestag* (2014).

³⁶⁰ Vgl. *BMVBS* (2013), S. 46–47.

³⁶¹ Vgl. *BMVBS* (2013), S. 29–31.

schung und Entwicklung, Marktvorbereitung und -einführung batterieelektrisch-betriebener Fahrzeuge in Deutschland.³⁶²

Die Besteuerung von Kraftstoffen ist im Energiesteuergesetz geregelt. Benzin wird in Deutschland mit 65,45 €Cent/l, Diesel mit 47,04 €Cent/l und Erdgas mit 18,03 €Cent/kg besteuert. Der verringerte Energiesteuersatz von Erdgas, welcher pro kWh nur knapp 30 % der Energiesteuer von Diesel beträgt, läuft aktuell noch bis 2018, soll aber entsprechend dem Koalitionsvertrag aus dem Jahr 2013 darüber hinaus fortgeschrieben werden.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unterstützt Förderprojekte, die „die energie- und klimapolitischen Potenziale der Elektromobilität erschließen helfen und gleichzeitig zur Stärkung der Wettbewerbsposition deutscher Industriebranchen beitragen.“³⁶³ Hierbei werden unter anderem Feldversuche im Wirtschaftsverkehr und die Anschaffung von Hybridbussen durch Unternehmen im ÖPNV mit 35 % der Investitionsmehrkosten, Fahrer- und Werkstattschulungen sowie Werkstatteinrichtung und Spezialwerkzeuge gefördert.

6.1.3 Regionale und kommunale Ebene

Auf regionaler Ebene hat die Landespolitik der Bundesländer durch Förderprogramme und Initiativen Einfluss auf die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien. In Baden-Württemberg soll im *Cluster Elektromobilität Süd-West* beispielsweise gezielt Technologiekompetenz im Bereich Elektromobilität aufgebaut werden. Darüber hinaus werden eigenständige Förderprogramme für Elektro- und Hybridbusse im ÖPNV angeboten. Bei der Neuinvestition in Busse werden die Mehrkosten eines Elektro- oder Hybridbusses gegenüber einem konventionellen Linienbus mit 50 %, maximal jedoch mit 150.000 €pro Fahrzeug, gefördert.³⁶⁴ Des Weiteren haben Länder und Kommunen die Verantwortlichkeit für Kreis- und Landstraßen und können somit Einfluss auf Zugangsbeschränkungen für beispielsweise besonders umweltschädliche Fahrzeuge ausüben. Dies ist vor dem Hintergrund einer zunehmenden Klagewelle aufgrund einer großflächigen und umfangreichen Überschreitung der Lärmemissionen in Städten und auf Hauptverkehrsstraßen von hoher Bedeutung, da sich Städte und Kommunen zunehmend mit der Entwicklung hin zu emissionsfreien Innenstädten beschäftigen.³⁶⁵

Städte und Kommunen haben aus politischer und rechtlicher Sicht eine besondere Bedeutung bei der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien, da diese sowohl für legislative Entscheidungen in ihrem Verantwortungsbereich zuständig sind als auch selbst Mobilitätsanbieter und Flottenbetreiber sind. Kommunen und Städte sind Aufgabenträger für die Abfallwirtschaft sowie den

³⁶² Vgl. *Die Bundesregierung* (2009).

³⁶³ Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit* (2014), online.

³⁶⁴ Vgl. *Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden Württemberg* (2014), online.

³⁶⁵ Vgl. *Lindholm* (2013), S. 1–3.

ÖPNV und fungieren somit als kommunales Verkehrsunternehmen bzw. Auftraggeber für diese Dienstleistungen. Dies erklärt zum Teil die bisher identifizierte höhere Dichte an *Lead Usern* in stadtnahen Anwendungsfällen, da Kommunen die politische Macht haben, Veränderungen im kommunalen und im städtischen Verkehr zu bewirken, und gleichzeitig ein vorrangiger Betreiber bzw. Auftraggeber von NFZ sind.

6.2 Komplementäres Ökosystem

Das für die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien relevante komplementäre Ökosystem ist besonders durch eine anforderungsgerechte Infrastruktur zur Betankung³⁶⁶, Wartung und Reparatur der NFZ gekennzeichnet. Ob diese Aufgaben auf dem eigenen Betriebshof oder bei einem externen Dienstleister durchgeführt werden spielt für die Bedeutung des komplementären Ökosystems nur eine untergeordnete Rolle, da im Falle der betriebseigenen Abwicklung auch Zulieferer der notwendigen Anlagen, Werkzeuge und Wissen vorhanden sein müssen.

Die empirischen Erhebungen in Kapitel 5 haben gezeigt, dass ein Viertel der befragten Organisationen eine professionelle Werkstatt für komplexere Wartungs- und Reparaturmaßnahmen selbst betreibt. In den kommunalen Anwendungsfällen (Stadtbus und Abfallsammelverkehr) ist dieser Anteil deutlich höher. Daher wird im Folgenden zunächst die heute öffentlich verfügbare Infrastruktur analysiert und deren Ausbauziele und -projekte beleuchtet sowie – falls Informationen verfügbar sind – auf den Aufbau einer eigenen Infrastruktur auf dem Betriebsgelände durch NFZ-betreibende Organisationen und den damit verbundenen Aufwand eingegangen.

Die Infrastruktur zur Betankung von NFZ mit alternativen Kraftstoffen ist nur im geringen Maße ausgebaut, besonders im Vergleich zum hohen Standard des konventionellen Diesels mit über 14.000 Tankstellen deutschlandweit. Die Anforderungen an die Tankstellendichte im NFZ-Markt entsprechen jedoch denen des PKW-Marktes bei weitem nicht. Neben der Nutzung betriebseigener Tankstellen greifen vor allem Organisationen im Fernverkehr auf Verträge oder Tankkarten mit ausgewählten Tankstellenbetreibern zurück, um Großabnehmerpreise und damit eine Kraftstoffkostenminimierung zu erreichen. Tankstops werden so bewusst in die Routenplanung mit eingeschlossen. Dies reduziert die Anzahl an notwendigen Tankstellen, um den Anforderungen an eine uneingeschränkte Nutzung für die NFZ-betreibenden Organisationen zu gewährleisten.

CNG-Tankstellen

Das am weitesten fortgeschrittene Tankstellennetz weist CNG aufgrund der Entwicklung im PKW-Markt auf (vgl. Abbildung 29). In Deutschland gibt es knapp 920 CNG-Tankstellen, welche sich vergleichsweise flächendeckend und gleichmäßig in Deutschland verteilen. Auch in den

³⁶⁶ Im Weiteren wird unter der Betankung von Fahrzeugen das Befüllen bzw. Aufladen mit dem der Antriebstechnologie zugrunde liegendem Kraftstoff verstanden. Auch das elektrische Laden wird synonym als Betankung bezeichnet. Gleichmaßen steht der Begriff Tankstelle auch für elektrische Ladesäulen.

angrenzenden Nachbarstaaten sind Erdgas-Tankstellen vergleichsweise gut ausgebaut. So existieren in der Schweiz 139 CNG-Tankstellen, in Österreich 180, in den Niederlanden 141 und in Italien 1040. In Polen (86 CNG-Tankstellen) oder Spanien (69) besteht noch ein deutliches Ausbaupotenzial.³⁶⁷

Nur etwa ein Drittel der CNG-Tankstellen in Deutschland sind allerdings für die Betankung von LKW oder Bussen geeignet.³⁶⁸ Dies hat zwei Gründe: Zum einen stellen nicht alle Tankstellen einen ausreichenden Gasdruck zur Verfügung, sodass sich die Betankungszeit deutlich verlängert. Zum anderen sind die Tankstellen entweder aufgrund der zulässigen Einfahrtshöhe oder dem Anfahrtsweg für größere LKW und Busse nicht nutzbar.³⁶⁹ Ziel der EU ist es, ein europaweites CNG-Tankstellennetz aufzubauen, bei welchem die Tankstellen in einer maximalen Entfernung von 150 km voneinander entfernt liegen (vgl. Kapitel 6.1.1).

LNG Tankstellen

Der Bau von LNG Tankstellen hat erst in den vergangenen 2-3 Jahren begonnen. Derzeit existiert in Deutschland noch keine LNG Tankstelle. Hingegen sind in Spanien (17), Großbritannien (22), Niederlande (6) und Schweden (8) entlang den Hauptverkehrsstraßen schon einige stationäre LNG Tankstellen in Betrieb genommen worden. Des Weiteren gibt es auch mobile LNG Stationen welche zum Testbetrieb oder von Organisationen in Pilotprojekten auf dem Betriebs-hof genutzt werden.

Im Rahmen des EU-Projekts *LNG Blue Corridor* soll entlang der Haupttransportkorridore in der EU in einer maximalen Entfernung von 400 km ein Tankstellennetz (vgl. Kapitel 6.1.1) und eine Flotte von 100 LNG-betriebenen LKW in Europa aufgebaut werden, um die kritische Masse für eine Diffusion dieser Technologie zu mobilisieren. Damit sollen auch Erfahrungen im Betrieb und Unterhaltung der Fahrzeuge gesammelt werden.³⁷⁰ In Dortmund ist die erste öffentliche stationäre LNG Tankstelle in Deutschland geplant. Eine private LNG Tankstelle wird derzeit von einem Osnabrücker Logistikdienstleister errichtet.³⁷¹

Wasserstofftankstellen

In Deutschland gibt es derzeit 26 Wasserstofftankstellen, in Europa insgesamt 72. Da jedoch die wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenfahrzeuge fast ausschließlich im Rahmen von Feldversuchen und Pilotprojekten im Einsatz sind, ist für die Nutzung der Tankstellen eine Abstimmung mit den Betreibern notwendig.³⁷² Prinzipiell sind in Deutschland 15 der 26 Tankstellen öffentlich nutzbar. Zusätzlich sind derzeit zwölf weitere Tankstellen in Deutschland in Planung. In Europa

³⁶⁷ Vgl. Statistiken zu Europäischen Erdgas Tankstellen von NGVA Europe: www.ngvaeurope.eu

³⁶⁸ Vgl. *Zeitzen* (2012b) und Kapitel 6.3, I3.

³⁶⁹ Vgl. *Zeitzen* (2012b), S. 14.

³⁷⁰ Vgl. Homepage des Projektes: www.lngbc.eu

³⁷¹ Vgl. *Willenborg* (2014), online.

³⁷² Vgl. *Oberst* (2014), online.

sind insgesamt 44 weitere Wasserstofftankstellen projektiert. Bis 2015 soll die Anzahl der Wasserstofftankstellen in Deutschland auf weitere 50 erhöht werden. Ähnlich zu CNG-Tankstellen sind die wenigsten Wasserstofftankstellen für den Betrieb von LKW und Bussen geeignet, da sich noch kein Industriestandard für das Druckniveau bei einem Einsatz in PKW und NFZ etabliert hat.³⁷³ Bezüglich der Investitionskosten für eine Wasserstofftankstelle existieren unterschiedliche Angaben, welche zwischen 1 und 2 Mio. € variieren.³⁷⁴

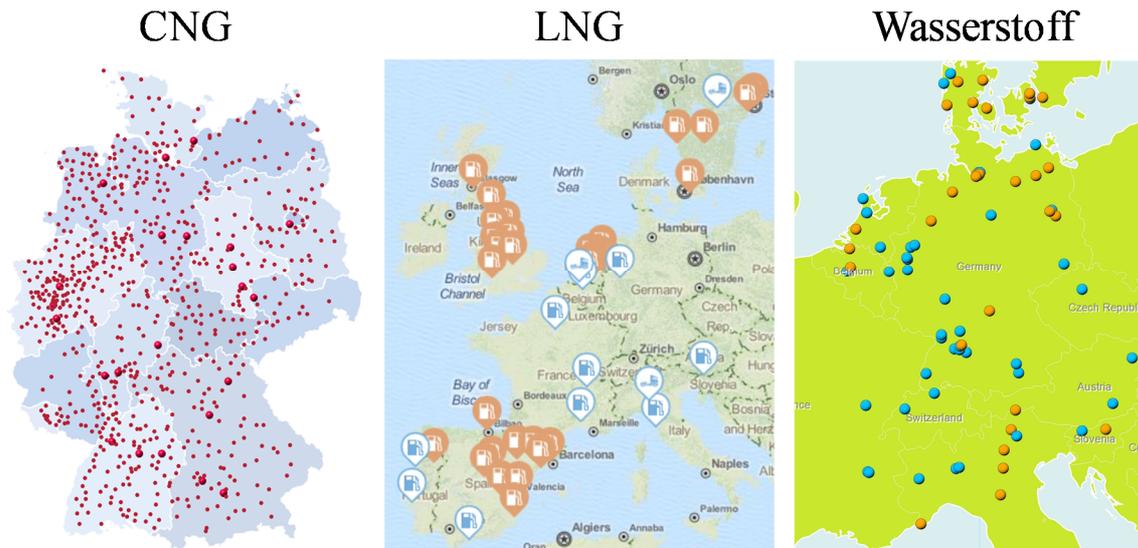


Abbildung 29: Dichte des Tankstellennetzes für alternative Kraftstoffe in Deutschland³⁷⁵

Ladesäulen für elektrische Energie

Die Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge erlangt durch die beginnende Marktdurchdringung batterieelektrischer PKW einen kontinuierlichen Ausbau. Allerdings kommen die wenigsten Ladesäulen für NFZ in Frage, da konventionelle PKW-Steckerladestationen entweder nicht nutzbar oder mit einer zu geringen Ladeleistung ausgestattet sind, um den Anforderungen an einen Betrieb durch NFZ zu entsprechen. Vielmehr wird derzeit davon ausgegangen, dass rein elektrische NFZ entweder mit ausschließlicher Nachtladung oder in Kombination mit Zwischenladen an fest definierten Orten betrieben werden. Dies können induktive Ladepunkte für Busse an Bushaltestellen oder Schnellladestationen an definierten Umschlagsplätzen von Gütern sein. Daher werden NFZ voraussichtlich kaum auf die bestehende Ladeinfrastruktur von PKW zurückgreifen können, sodass NFZ-betreibende Organisationen eigene Ladepunkte auf ihrem Be-

³⁷³ Vgl. Smolinka et al. (2013), S. 10-13;47.

³⁷⁴ Vgl. Krix (2014), online, Rees (2010), online und Südwest Presse (2011), online.

³⁷⁵ Die Abbildungen der Tankstellenverteilung entstammen mit freundlicher Genehmigung für CNG von Vest Marketing GmbH, Osnabrück (www.gas24.de), für LNG von LNG Blue Corridors (www.lngbc.eu) und für Wasserstoff von H2stations.org by LBST (www.tuev-sued.de).

triebshof aufbauen müssen. Die Kosten für eine öffentliche Ladestation liegen derzeit bei etwa bei 8.000 €(2020: 3.650 €) und für eine Schnellladestation bei 43.000 €(2020: 16.000 €).³⁷⁶

Reparatur und Wartung

Die Servicestruktur für alternative Antriebstechnologien der NFZ-Hersteller befindet sich derzeit erst im Aufbau. Mit dem zunehmenden Verkauf von Fahrzeugen wird das Servicenetz erweitert und etabliert – insbesondere in Ballungsräumen. Von einer flächendeckenden Abdeckung sind sowohl Markenwerkstätten als auch freie Werkstätten noch weit entfernt. Durch die Servicestruktur und die resultierende geringe Anzahl an Werkstätten sind Anfahrtswege notwendig und führen zu langen Reaktionszeiten im Reparaturfall. Diese können zum Teil mehrere Wochen betragen, da derzeit keine umfassende Lagerhaltung von wichtigen Ersatzteilen existiert. Im Vergleich dazu kann ein NFZ mit einem konventionellen Dieselmotor selbst bei umfangreichen Reparaturarbeiten schon innerhalb eines Tages wieder betriebsbereit sein. Gleiches gilt für den Aufbau von eigener Reparatur- und Wartungskapazität durch die NFZ-betreibenden Organisationen. Darüber hinaus erfordert der Umgang mit beispielsweise Hochvolttechnik und kryogenen Technologien erhöhte Sicherheitsvorschriften, wodurch in aufwändigere Werkstattausrüstung und zusätzliche Schulungen der Mitarbeiter investiert werden muss.

Fachpersonal

Zuletzt ist das komplementäre Ökosystem im TOE-Modell durch die Qualität und Quantität der zur Verfügung stehenden Arbeitskräfte auf dem Arbeitsmarkt determiniert. Neben qualifizierten Fachkräften zur Reparatur und Wartung betrifft dies auch LKW- und Busfahrer zur Fortbewegung von NFZ mit alternativen Antriebstechnologien. Die Umstellungen in der Art der Betankung und der Anpassung des Fahrstils ist durch Schulungen der bisherigen Angestellten zu erreichen, sodass durch ein begrenztes Angebot an zusätzlichem Fachpersonal die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien nicht begrenzt sein wird.

6.3 Qualitative empirische Studie

Ziel der qualitativen empirischen Studie ist es, die Interessen, das Entscheidungsverhalten und die Einflussmöglichkeiten der Akteure im organisationsexternen Kontext auf die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien und deren Wechselwirkungen untereinander zu untersuchen, um ein empirisches Fundament für das zu entwickelnde Simulationsmodells zu legen. Dafür werden zunächst die notwendigen theoretischen Grundlagen zum Aufbau des Interviewleitfadens und die Methoden zur Nutzung empirischer Daten in der Implementierung des auf der Methodik *System Dynamics* beruhenden Simulationsmodells vorgestellt. Anschließend wird das Vorgehen bei der Datenerhebung und bei der Auswertung der Ergebnisse erörtert.

³⁷⁶ Vgl. *Spath et al.* (2010), S. 75–77.

6.3.1 Theoretische und methodische Grundlagen

6.3.1.1 Analyse von Akteuren und deren Interaktionsstrukturen

Für die Analyse der Wechselwirkungen zwischen den essentiellen Akteuren mit Einfluss auf die Diffusion oder Interesse an der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien werden zwei Ansätze herangezogen: die Stakeholderanalyse und das *Institutional Analysis and Development Framework* (IAD).

Stakeholderanalyse

Die Stakeholderanalyse ist eine in der Praxis weit verbreitete Methode des strategischen Managements oder Projektmanagements. Sie wird angewandt, um Personen oder (institutionelle) Gruppen zu identifizieren, die ein wesentliches Interesse am Ergebnis oder Einfluss auf die Entwicklung eines Unternehmens, eines Projektes oder einer Institution haben. Darauf aufbauend wird die Bedeutung der unterschiedlichen Stakeholdergruppen bestimmt, um mit dem Ziel der Maximierung des Unternehmenserfolgs Strategien zur Befriedigung der Interessen einerseits und dem Aufbau von Beeinflussungskanälen der Stakeholder andererseits zu implementieren.³⁷⁷

Anwendung findet die Stakeholderanalyse ebenso in der Politik, um im Entscheidungsprozess für gesetzliche Maßnahmen alle damit betroffenen und interessierten Akteure zu identifizieren sowie deren Einstellung, Haltung und Auswirkungen zu berücksichtigen.³⁷⁸ Mithilfe von Stakeholderanalysen kann im Vorfeld von Projekten die für die strategischen oder gesetzgeberischen Entscheidungen notwendigen Informationen, vorhandene Ressource und wahrscheinliche Auswirkungen erarbeitet und abgeschätzt werden. Des Weiteren kann die Stakeholderanalyse in der Retrospektive zur Bewertung von Strategien, Projekten oder Gesetzen herangezogen werden.³⁷⁹

Zusammenfassend beantwortet eine Stakeholderanalyse für den Untersuchenden die folgenden Fragen³⁸⁰:

- Welche Personen, Gruppen, Institutionen oder Interessengemeinschaften sind potenzielle Stakeholder?
- Welchen Einfluss haben die einzelnen Stakeholder auf das Untersuchungsobjekt?
- Welche Macht können die Stakeholder auf das Untersuchungsobjekt ausüben?
- Welche Positionen nehmen die Stakeholder gegenüber dem Untersuchungsobjekt ein?
- Wie verhalten sich die Stakeholder über die Dauer und welche Aktionen sind zu erwarten?

In der Stakeholderanalyse wird zwar auf Vorgehensweisen wie die Wechselwirkungsanalyse zurückgegriffen³⁸¹, jedoch ist der Großteil der Methoden auf subjektive Bewertungen linearer

³⁷⁷ Vgl. *Hungenberg* (2014), S. 396–400.

³⁷⁸ Vgl. beispielsweise *Pfetzinger und Rohde* (2009), S. 207–211; *Varvasovszky* (2000).

³⁷⁹ Vgl. *Varvasovszky* (2000), S. 344.

³⁸⁰ Vgl. *Varvasovszky* (2000), S. 342–344; *Pfetzinger und Rohde* (2009), S. 207–211; *Hungenberg* (2014), S. 396–400.

Abhängigkeiten begrenzt, sodass die Berücksichtigung komplexer Rückkopplungen nur bedingt möglich ist. Daher wird zunehmend zur Analyse komplexer und dynamischer Beziehungen System Dynamics als Erweiterung der Stakeholderanalyse angewandt, um dieser Einschränkung entgegenzuwirken.³⁸²

IAD-Framework

Das IAD-Framework ist eine weitere Methode zur Analyse, Beschreibung und Vorhersage von institutionellen Strukturen zwischen Organisationen im Hinblick auf ein bestimmtes Untersuchungsobjekt, welches sich in einer sogenannten *action situation* befindet. Das Untersuchungsobjekt kann sowohl eine Unternehmensstrategie als auch – wie überwiegend umgesetzt – eine regulatorische Maßnahme respektive einen politischen Prozess darstellen. Die *action situation* ist als jegliches soziales Umfeld definiert, in dem Individuen und Organisationen interagieren, Güter und Services austauschen, Probleme lösen oder sich gegenseitig bekämpfen.³⁸³ Das IAD-Framework bietet dafür einen systematischen Ansatz, um Institutionen und deren Aktionen in einem kollektiven Handlungsrahmen zu bestimmen sowie die daraus resultierenden Ergebnisse zu analysieren. Damit ist das IAD der Stakeholderanalyse vergleichsweise ähnlich.³⁸⁴ Die Institutionen sind als Akteure innerhalb einer *action situation* durch vier Variablen beschrieben³⁸⁵:

- Die Ressourcen, die ein Akteur in die *action situation* einbringt
- Die Bewertung des Umfeldes und der *action situation* als solches durch den Akteur
- Die Art und Weise wie ein Akteur Information beschafft, verarbeitet, zurückhält und nutzt
- Die Entscheidungsprozesse der Akteure zur Auswahl ihrer Handlungen

Die interne Struktur einer *action situation* ist durch Positionen *positions* bestimmt, welche Akteure *actors* mit ihren unterschiedlichen Einflussmöglichkeiten *actions* auf die *action situation* einnehmen (vgl. Abbildung 30). In Abhängigkeit der Stärke des Einflusses und dem Interesse der Akteure an dieser führen die Positionen zusammen mit den erwarteten Vor- und Nachteilen der Einflussmöglichkeiten zu potentiellen Auswirkungen *outcomes* der *action situation*.

Das IAD-Framework bildet die Grundlage des Leitfadens zur Analyse der Situation des NFZ-Marktes in Bezug auf die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien. Die im IAD betrachteten Akteure werden zuvor durch eine Stakeholderanalyse identifiziert und beschrieben. Die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Akteuren abzubilden ist hingegen nicht Kern des IAD-Frameworks. Vielmehr wird die *action situation* als sequentielle Abfolge interorganisationaler Interaktionen oder als parallel stattfindende Kooperationen zwischen den Akteuren defi-

³⁸¹ Auf eine nähere Beschreibung der Stakeholderanalyse sowie des zugehörigen Vorgehens wird verzichtet, da dies über den Rahmen der Arbeit hinausgehen würde. Daher wird für weitere Informationen auf beispielsweise Varvasovszky (2000); Freeman (2010); Hungenberg (2014) verwiesen.

³⁸² Vgl. Elias (2012), S. 387–390.

³⁸³ Vgl. Ostrom (2011), S. 11.

³⁸⁴ Vgl. Ostrom (2007), S. 26–28.

³⁸⁵ Vgl. Ostrom (2011), S. 11.

niert.³⁸⁶ Daher wird das IAD um weitere Methoden zur Interaktionsanalyse ergänzt. Hierfür bietet die dem Simulationsmodell zugrunde liegende Methodik System Dynamics Werkzeuge zur Identifikation der Wechselwirkungen von Einflussfaktoren und Akteuren.

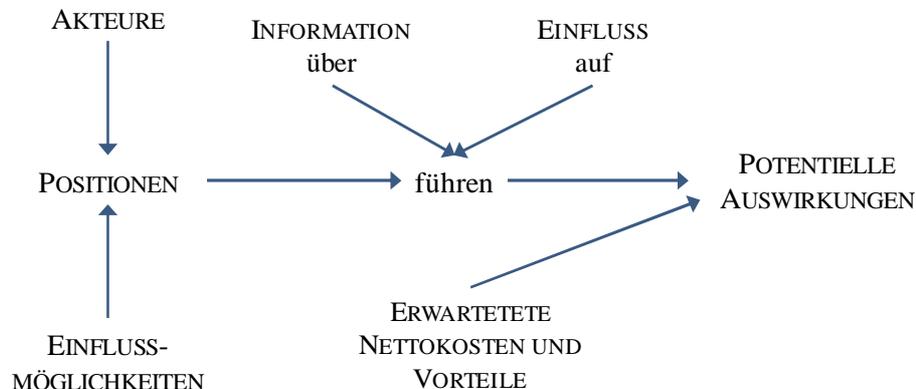


Abbildung 30: Interne Struktur der action situation des IAD-Frameworks³⁸⁷

6.3.1.2 Explikation von Expertenwissen zur Implementierung von System Dynamics Modellen

Die Problematik bei der Erstellung quantitativer Simulationsmodelle liegt darin, dass nie vollständige Informationen über ein System oder eine Problemstellung vorliegen. Selbst das vorhandene Wissen über die Zusammenhänge und das Funktionieren eines Systems liegt überwiegend als sogenanntes implizites Wissen in Form mentaler Modelle in den Köpfen von Systemexperten oder Prozessbeteiligten vor. Implizites Wissen beschreibt Gedankenkonstrukte und Annahmen über die Funktionsweise eines realen Systems. Durch die Explikation dieser mentalen Modelle wird eine offene Gegenüberstellung des impliziten, inneren Erfahrungs- und Systemwissens von Prozessbeteiligten oder Systemexperten erreicht. Somit kann dieses Wissen besser nutzbar gemacht werden.³⁸⁸ Dennoch liegt nur ein viel geringerer Bruchteil dieser Wissens- und Informationsmenge als niedergeschriebene Datenbasis vor. Nochmals geringer sind die verfügbaren Informationen in Form numerischer Daten zur Implementierung quantitativer Modelle.³⁸⁹

Daher ist es für System Dynamics Simulationsmodelle³⁹⁰ von entscheidender Bedeutung, insbesondere bei vergleichsweise unerforschten Fragestellungen, die beschränkte numerische Datenbasis soweit als möglich um das Wissen von Prozessbeteiligten oder Systemexperten zu erweitern. Es gibt zahlreiche Methoden um das implizite Wissen und die mentalen Modelle von Systemexperten zu externalisieren. Diese reichen von der Identifikation der wesentlichen Einflussfaktoren über qualitative Kausaldiagramme bis hin zur Erhebung quantitativer Parameter

³⁸⁶ Vgl. Dresel (2014), S. 216.

³⁸⁷ Eigene Abbildung in Anlehnung an Ostrom (2011), S. 10.

³⁸⁸ Vgl. Weikl (2010), S. 6.

³⁸⁹ Vgl. Forrester (1992).

³⁹⁰ Vgl. Kapitel 7.1 für eine ausführliche Beschreibung der Methodik System Dynamics.

eines Systems. Die Anwendung der Methoden und Ansätze hängt ebenso von dem, vor Untersuchungsbeginn vorhandenen, Systemwissen ab.

Die Stakeholderanalyse, als eine Methodik zur Identifikation der wesentlichen Akteure einer Problemstellung, wurde im vorherigen Abschnitt vorgestellt. Sie bildet meist die Grundlage der sogenannten Wechselwirkungsanalyse im Rahmen der Szenario-Technik. Dabei werden der wechselseitige aktive Einfluss und die passive Beeinflussung von Einflussfaktoren mithilfe einer Vernetzungsmatrix analysiert, um Schlüsselfaktoren sowie aktive und reaktive Faktoren zu identifizieren.³⁹¹ Dieser Ansatz ist auch in Kombination mit System Dynamics weit verbreitet³⁹², führt aber nicht über die Ebene der Einflussfaktorenidentifikation hinaus.

Auf Basis der *Grounded Theory* haben Kim und Andersen (2012) einen Kodierungsprozess zur Erstellung von System Dynamics Modellen aus dem Datenmaterial empirischer Interviews oder anderem zweckmäßigen Textmaterial entwickelt.³⁹³ Die Grounded Theory ist ein grundlegendes Konzept zur systematischen Auswertung qualitativer Daten mit dem primären Ziel, induktiv Theorien zu entwickeln.³⁹⁴ Mittels einer offenen Kodierung werden die Rohtranskripte nach übergeordneten Themen untersucht, um ein Problemverständnis zu erlangen und die Systemgrenzen zu definieren. Dazu wird eine Kodierungstabelle angewendet, um im zweiten Schritt Variablen und deren kausale Zusammenhänge zu identifizieren.

Anschließend werden die Daten der Kodierungstabelle in ein einfaches Pfeildiagramm übertragen und dieses schrittweise zu einem Kausaldiagramm generalisiert. Zuletzt können darüber hinaus die gesammelten Daten zu einer etwaigen Quantifizierung des Kausaldiagramms mit diesem verknüpft werden (vgl. Abbildung 31).

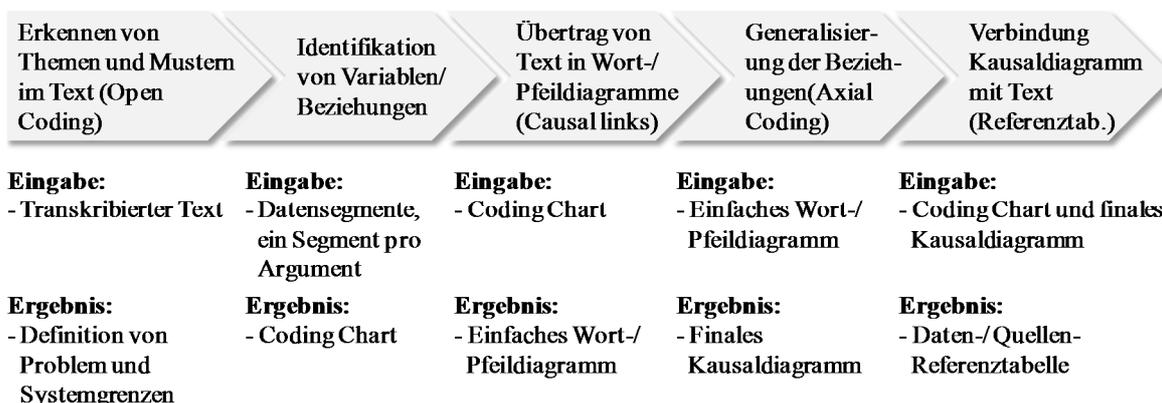


Abbildung 31: Vorgehen im Kodierungsprozess nach Kim und Andersen (2012)³⁹⁵

³⁹¹ Vgl. Weikl (2010), S. 37–40.

³⁹² Vgl. beispielsweise Weikl (2010); Seitz (2014); Janssen (2005).

³⁹³ Vgl. Kim und Andersen (2012).

³⁹⁴ Vgl. Glaser et al. (2008) oder Corbin und Strauss (2008) zu einer detaillierten Beschreibung der Grounded Theory.

³⁹⁵ Eigene Abbildung in Anlehnung an Kim und Andersen (2012), S. 316.

Diesem Ansatz ist der vierstufige Prozess (4-step process) von Vennix (2001) zum Aufbau von Kausaldiagrammen sehr ähnlich. Als Datenbasis kann jede Form von Textmaterial dienen, zum Beispiel in Form von Interviewtranskripten. In diesem Verfahren wird als Ausgangspunkt zunächst eine erste Variable festgelegt. Alle anderen Variablen, die einen Einfluss auf die Ausgangsvariable ausüben, werden mit der Wirkungsrichtung des Einflusses identifiziert und in einer Variablenliste gespeichert. In der Folge werden alle Variablen identifiziert, auf welche die Ausgangsvariablen aktiv Einfluss ausüben, und wiederum inklusive Polarität in die Variablenliste übertragen. Dieser Vorgang wiederholt sich für alle Variablen in der Variablenliste. Daran anschließend erfolgt ein iterativer Vergleich der Kausalitäten mit den Transkripten. Noch nicht identifizierte Variablen werden in die Variablenliste aufgenommen und der Prozess startet erneut, solange bis alle Variablen identifiziert worden sind. Abschließend wird durch die Variablenliste mit den Polaritäten der kausalen Zusammenhänge ein Kausaldiagramm zu den Wechselwirkungen entwickelt.³⁹⁶

Diskonformatorische Interviews haben das Falsifizieren der dynamischen Hypothese und der Modellstruktur von System Dynamics Modellen durch Interviewpartner zum Ziel. Dadurch kann die Validität der Modelle überprüft und somit verstärkt die Explikation mentaler Modelle von Experten provoziert werden. Zur Durchführung diskonformatorischer Interviews werden sieben Regeln durch Andersen (2012) definiert, die zu zielgerichteten Interviewleitfäden führen sollen.³⁹⁷ Das diskonformatorische Interview kommt vorwiegend zur Überprüfung und Weiterentwicklung bereits bestehender qualitativer oder quantitativer System Dynamics Modelle zum Einsatz und eignet sich weniger zur explorativen Erforschung neuer Zusammenhänge.

Eine weitere Methode zur Explikation mentaler Modelle von Systemexperten zur Definition systemischer Abhängigkeiten in einem besonders nichtlinearen funktionalem Zusammenhang beschreibt Sterman (2000) in einem dreistufigen Prozess: *Positionierung*, *Erklärung* und *Diskussion*. Zunächst wird die Fragestellung auf einen begrenzten Zusammenhang detailliert. Anschließend wird der, der Fragestellung zugrunde liegende, Prozess oder Regelkreis von unterschiedlichen Experten durch eine Prozessvisualisierung und mündliche Beschreibung von einem festen Startpunkt ausgehend erklärt. Anschließend werden die daraus resultierenden, eventuell unterschiedlichen, Graphen der Experten und die Gründe für die Abweichung diskutiert.³⁹⁸

Eine sehr anerkannte Methodik zur Auswertung von Interviewmaterial ist die *Qualitative Inhaltsanalyse* nach Mayring (2010). In einem iterativen Prozess werden entweder deduktive oder induktive Kategorien zur systematischen Kodierung des Interviewmaterials erarbeitet und iterativ ausgewertet. Nach einem finalen Materialdurchgang kann mit Hilfe der Kategorien auch eine

³⁹⁶ Vgl. Vennix (2001).

³⁹⁷ Vgl. Andersen et al. (2012).

³⁹⁸ Vgl. Sterman (2000), S. 585–587.

quantitative Analyse des Materials erfolgen.³⁹⁹ Nach Mayring (2010) wird die qualitative Inhaltsanalyse folgendermaßen definiert:

„Sie stellt eine Methode der Auswertung fixierter Kommunikation (z. B. Texte) dar, geht mittels eines Sets an Kategorien systematisch, regel- und theoriegeleitet vor und misst sich an Gütekriterien. Das qualitative Element besteht in der Kategorienentwicklung und der inhaltsanalytischen Systematisierung der Zuordnung von Kategorien zu Textbestandteilen – Schritte, die in quantitativer Inhaltsanalyse meist übergangen werden.“⁴⁰⁰

Dieses Vorgehen eignet sich allerdings nur sehr bedingt zu Erstellung von Kausaldiagrammen. Gleiches gilt für weitere, in Theorie und Praxis weit verbreitete, Methoden wie der Delphi-Methode und Fokusgruppeninterviews, deren Vorteile vorwiegend in der Abschätzung zukünftiger Trends, Entwicklungen und Ereignisse und weniger in der Entdeckung systemischer Zusammenhänge bestehen.

Jede dieser vorgestellten Methoden hat ihre Stärken in unterschiedlichen Phasen der Wissensgenerierung für System Dynamics Simulationsmodelle (von der Identifikation von Einflussfaktoren über die Entwicklung kausaler Zusammenhänge bis zur quantitativen Modellierung). Des Weiteren setzen die Methoden einen unterschiedlichen Stand des Systemverständnisses vom Untersuchungsobjekt voraus. Abbildung 32 fasst die vorgestellten Methoden entsprechend der vorangegangenen Erläuterungen in einer Darstellung zusammen und ordnet diese anhand der Phase in der Modellierung sowie des benötigten Systemverständnisses ein.

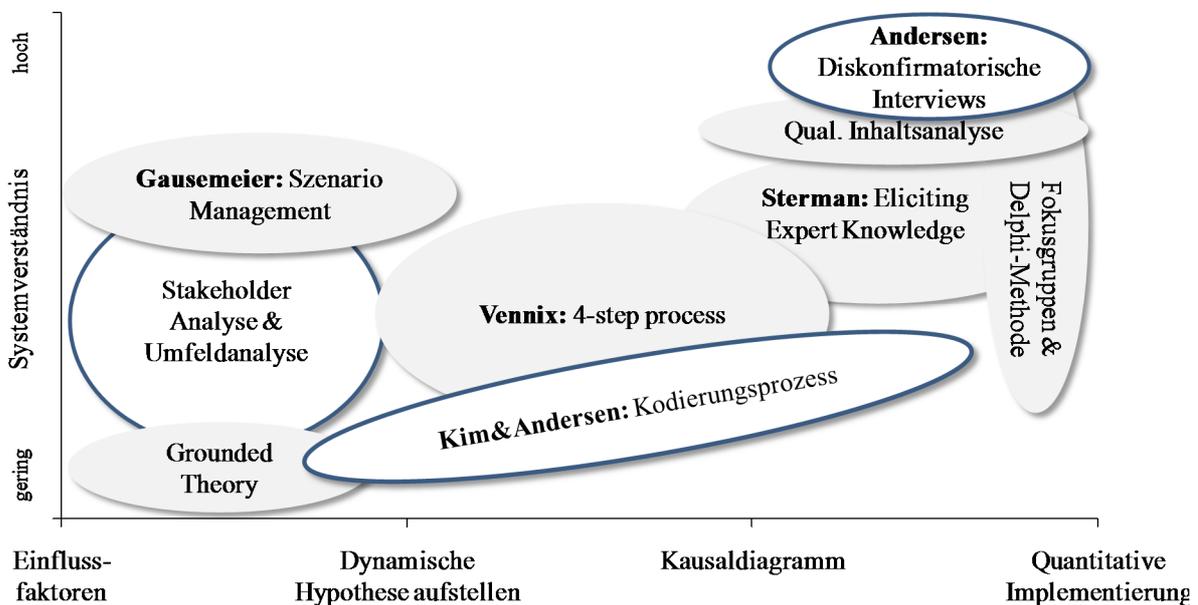


Abbildung 32: Methoden zur Generierung von Erkenntnissen für System Dynamics Modelle⁴⁰¹

³⁹⁹ Vgl. Mayring und Brunner (2009).

⁴⁰⁰ Vgl. Mayring und Brunner (2009), S. 673.

⁴⁰¹ Eigene Abbildung auf Basis der vorgestellten Methoden und Ansätze

Aufgrund fehlender empirischer Studien zu den Wirkzusammenhängen der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt ist das systemische Verständnis vergleichsweise gering. Ziel der Studie ist es die Akteure und deren Interdependenzen zu analysieren. Daher bieten sich für die Auswertung der Interviews im Hinblick auf das spätere Simulationsmodell besonders der Kodierungsprozess von Kim und Andersen (2012) und der vierstufige Prozess von Vennix (2001) an. Aufgrund der vergleichsweise standardisierten Auswertung und besser wahrgenommenen Handhabbarkeit durch die Kodierungstabelle, wurde der Prozess von Kim und Andersen (2012) als Methode zur Analyse der Wechselwirkung zwischen den Akteuren des NFZ-Marktes ausgewählt. Dieser geht eine Stakeholderanalyse voran, um Akteure für die Interviews zielgerichtet zu identifizieren. Darüber hinaus werden im späteren Modellierungsprozess diskonformatorische Interviews angewandt (vgl. Kapitel 7.3.1).

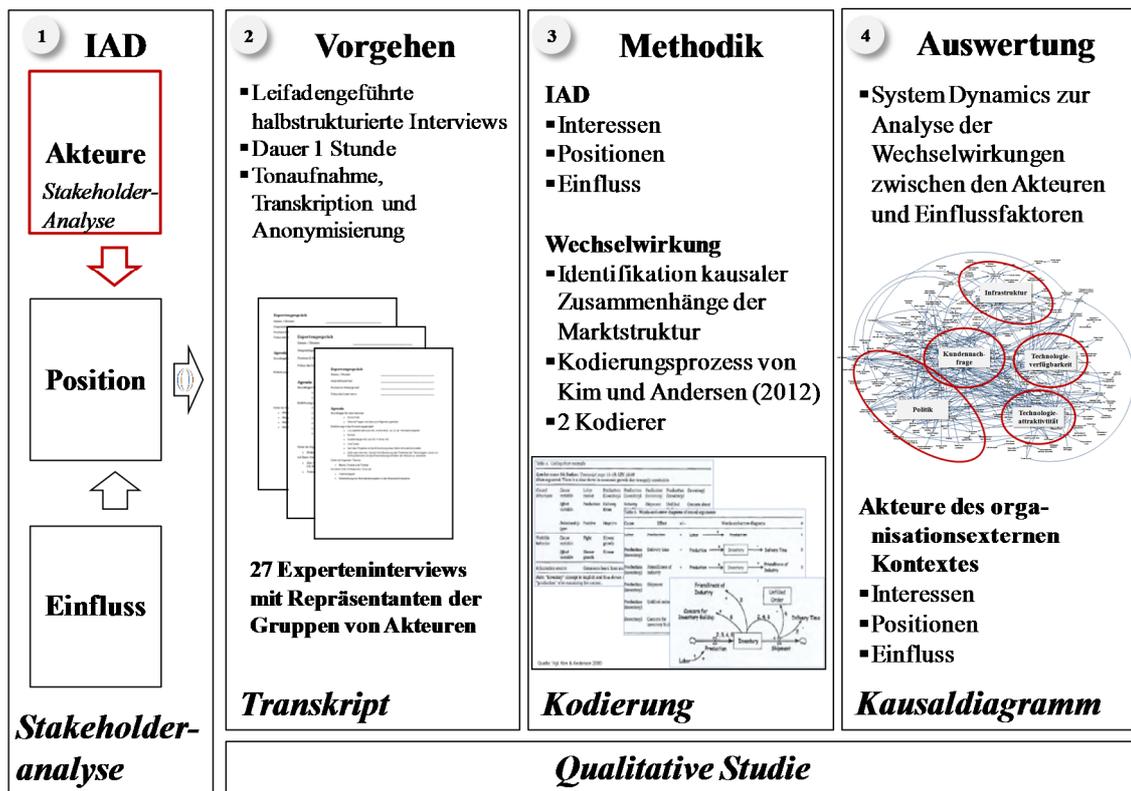
6.3.2 Methodik und Datenerhebung

Zur Durchführung der empirischen Studie wurde ein zweistufiges Vorgehen angewandt, um den Untersuchungsrahmen zweckmäßig einzugrenzen. Zunächst wurden mittels einer Stakeholderanalyse die wesentlichen Akteure der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien entsprechend ihres Einflusses und ihres Interesses identifiziert. Anhand dieser Akteure erfolgt die Auswahl der Interviewpartner für eine qualitative Untersuchung.

Dafür wird mit dem IAD-Framework ein Interviewleitfaden aufgebaut, um in Interviews die wechselseitigen Beziehungen zwischen den Akteuren sowie die zugrundeliegenden Interessen und Einflussmöglichkeiten empirisch zu untersuchen. Die Interviews werden zweistufig ausgewertet: Zum einen erfolgt einer Untersuchung der Akteure hinsichtlich der *action situation*. Zum anderen werden die gewonnenen Informationen aus den mentalen Modellen der befragten Experten mittels des Kodierungsprozesses von Kim und Andersen (2012) als empirische Basis des organisationsexternen Kontextes zur Implementierung des Kausaldiagramms und zur Bestimmung von Parametern für das systemdynamische Simulationsmodell ausgewertet. Abbildung 33 fasst das Vorgehen zusammen.

Zentrale Gütekriterien bei der Erhebung qualitativer empirischer Daten sind – unabhängig von der gewählten Methodik - die Reliabilität, Objektivität und Validität. Die Objektivität wird über die Interkoder-Reliabilität überprüft, indem mindestens zwei Inhaltsanalytiker ihre Kodierung auf Übereinstimmung vergleichen. Die Reliabilität wird durch die Überprüfung der Intrakoder-Reliabilität sichergestellt, indem der Inhaltsanalytiker nach Beendigung der Auswertung Passagen des Materials ein zweites Mal untersucht und die Kodierungen mit der ursprünglichen Fassung vergleicht. Die Validität wird vor allem, im Sinne von Konstruktvalidität, durch eine theoriegeleitete Entwicklung der Kategoriensysteme und der Kodierleitfäden bzw. die theoriegeleitete Bestimmung von inhaltsanalytischen Regeln gesichert.⁴⁰²

⁴⁰² Vgl. Mayring und Brunner (2009), S. 678.

Abbildung 33: Aufbau der qualitativen Studie⁴⁰³

6.3.2.1 Stakeholderanalyse

Um zunächst alle wesentlichen Gruppen, die an der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien im NFZ-Markt interessiert oder von ihr betroffen sind, zu identifizieren, wurde eine Stakeholderanalyse auf Basis von Primär- und Sekundärliteratur angewandt. Dafür wurde die bisherige Literatur zum NFZ-Markt mittels einschlägiger Fachliteratur zur Logistik erweitert, um alle potentiellen Stakeholder zu sammeln, anschließend zu selektieren und schrittweise zu Stakeholdergruppen zusammenzufassen. Eine Vorauswahl kann zwar zu Einschränkungen der Ergebnisse führen, diese werden aufgrund der umfangreichen Literatur jedoch als gering eingeschätzt. Zusätzlich wird in der empirischen Studie eine Kontrollfrage zu den Akteuren mit Interesse am oder Einfluss auf das Untersuchungsobjekt gestellt, um dieser Einschränkung entgegenzuwirken.

Tabelle 8 zeigt das Ergebnis der identifizierten Stakeholder, die in sechs übergeordnete Gruppen aggregiert wurden. Die dritte Spalte in der Tabelle gibt die zugehörige Quelle an, in welcher die Beschreibung des Stakeholders mit dessen Erwartungen, Interessen und Einfluss auf die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien im NFZ-Markt erfolgte. Entsprechend der Quellen wurden der Einfluss und das Interesse auf einer Skala von eins bis zehn für jeden der Stakeholder bewertet, wobei eine höhere Ausprägung einen höheren Einfluss respektive Interesse repräsentiert. Anhand dieser Bewertung wurden alle Akteure in einem Koordinatensystem eingetra-

⁴⁰³ Eigene Abbildung.

gen, um so Schlüsselakteure, Joker und Interessierte mit einem etwaigen Konfliktpotenzial abzugrenzen.⁴⁰⁴

Gruppe	Stakeholder	Quelle
Auto-mobil-industrie	NFZ-Hersteller	(Lindholm, 2013)
	Zulieferer	(Hawranek, 2004)
	Forschungsinstitute	(Lindholm, 2013)
Politik	Verkehrsministerium	(Clausen und Geiger, 2013; Dabidian und Langkau, 2013; Kummer und Grün, 2006)
	EU	(Clausen und Geiger, 2013; Dabidian und Langkau, 2013; Kummer und Grün, 2006)
	Gemeinden/ Städte	(Lindholm, 2013; Muñuzuri et al., 2005; van Binsbergen und Visser, 2001; Mariotti, 2015)
	Kartellamt	(Hawranek, 2004)
	Politiker	(Lindholm, 2013; Stathopoulos et al., 2012)
	Staat/ Regierung	(Lindholm, 2013; Mariotti, 2015; Fawcett et al., 1992)
	Verkehrsverwaltung	(Lindholm, 2013; Mariotti, 2015; Fawcett et al., 1992)
NFZ-Betreiber	Entsorgungslogistik	(Pfohl, 2004; Ihde, 2001)
	Fahrer	(Lindholm, 2013; Mariotti, 2015; Fawcett et al., 1992)
	KEP-Dienstleister	(Gleißner und Femerling, 2008)
	Logistikdienstleister	(Clausen und Geiger, 2013; Dabidian und Langkau, 2013)
	ÖPNV	(Lindholm, 2013; van Binsbergen und Visser, 2001)
	Spediteure	(Clausen und Geiger, 2013; Dabidian und Langkau, 2013; Lindholm, 2013; Gleißner und Femerling, 2008; Mariotti, 2015; van Binsbergen und Visser, 2001; Fawcett et al., 1992)
	Transport Bauwerke	(Lindholm, 2013)
Infra-struktur	Verlader	(Clausen und Geiger, 2013; Dabidian und Langkau, 2013)
	Straßenbetreiber	(Lindholm, 2013; Mariotti, 2015; Fawcett et al., 1992)
	Tankstellenbetreiber	(Mariotti, 2015)
	Werkstätten und Servicepartner	(Lindholm, 2013)
Gesellschaft	Aktionäre	(Hawranek, 2004)
	Besucher/ Touristen	(Lindholm, 2013; Mariotti, 2015; Fawcett et al., 1992; Russo und Comi, 2011)
	Einwohner	(Lindholm, 2013; Mariotti, 2015; Russo und Comi, 2011)
	Gesellschaft	(Clausen und Geiger, 2013; Dabidian und Langkau, 2013; van Binsbergen und Visser, 2001)
	Logistik-Kunden	(Clausen und Geiger, 2013; Dabidian und Langkau, 2013; Lindholm, 2013; Gleißner und Femerling, 2008; Mariotti, 2015; Russo und Comi, 2011; Kummer und Grün, 2006)
	Land- und Wertbesitzer	(Lindholm, 2013; Mariotti, 2015)
Weitere	Unternehmen & Händler	(Lindholm, 2013; Fawcett et al., 1992)
	Interessensverbände	(Clausen und Geiger, 2013; Dabidian und Langkau, 2013)

Tabelle 7: Stakeholdergruppen mit Interesse an der und Einfluss auf die Diffusion CO₂-sparender Antriebs-technologien⁴⁰⁵

⁴⁰⁴ Vgl. Anhang IV 1).

Das Ergebnis der Stakeholderanalyse zeigt, dass NFZ-betreibende Organisationen auf der Nachfrageseite und die Automobilindustrie auf der Angebotsseite erwartungsgemäß Schlüsselakteure sind. Ebenso hat die Politik einerseits einen hohen Einfluss auf die Diffusion und andererseits aufgrund der ehrgeizigen Klima- und Umweltziele ein überdurchschnittlich hohes Interesse an der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien. Von geringerer Bedeutung waren in der Gruppe Politik das Kartellamt und die Verkehrsverwaltung. Von der Infrastruktur und Tankstellenbetreiber geht ein hoher Einfluss bei einem vergleichsweise geringem Interesse und Konfliktpotenzial aus, sodass die Gruppe Infrastruktur ein typischer Joker in der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologie ist. Akteure im Umfeld der Logistik haben nur einen mittelbaren Einfluss auf das Untersuchungsobjekt, sind allerdings signifikant an der Marktentwicklung interessiert. Seitens der Gesellschaft sind Aktionäre, Land- und Wertbesitzer sowie Besucher- und Touristen nur von sehr geringer Bedeutung. Auch für die Gesellschaft und Einwohner von Städten allgemein, ist die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologie sowohl in globaler als auch lokaler Dimension von Bedeutung, jedoch ist dies weder signifikant noch mittelbar ausgeprägt.

6.3.2.2 Empirische Datenerhebung

Als methodischer Ansatz zur Erhebung der Interessen, Positionen, Einflussmöglichkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Akteuren sind qualitative Experteninterviews ausgewählt worden. Die Vorteile qualitativer Forschungsmethoden liegen in der Offenheit und Flexibilität des Forschungsprozesses, um neue sowie bislang unbekannte Sachverhalte und Phänomene zum Untersuchungsgegenstand explorativ zu entdecken und neue Modelle oder Theorien zu entwickeln.⁴⁰⁶ Somit weist die qualitative Forschung starke Tendenzen eines induktiven Forschungsvorgehens auf, baut aber durch den iterativen Forschungsprozess auf einer Abfolge induktiver-deduktiver Forschungsschritte auf.⁴⁰⁷ In der qualitativen Forschung steht daher die Erforschung von in der Realität existierenden Phänomenen und Interaktionen im Zentrum des Erkenntnisinteresses, um daraus Hypothesen und Theorien zu entwickeln.⁴⁰⁸

Aufgrund der explorativen Auslegung der qualitativen Studie in einem wissenschaftlich wenig erforschten jedoch theoriegeleiteten Thema wurden die Interviews mittels eines halbstrukturierter Leitfadens und einer offenen Interviewstruktur geführt. Ein wesentliches Ziel qualitativer Forschungsmethoden ist die Exploration, jedoch soll die Studie aufgrund der Vorarbeit und des bestehenden theoretischen Rahmens theoriegeleitet erfolgen. Daher wurde an dieser Schnittstelle zwischen Induktion und Deduktion ein problemzentriertes Interview angewandt, weshalb ein halb-strukturierter Leitfaden in der Erhebung ausgewählt wurde, um die Vergleichbarkeit und Verallgemeinerbarkeit der Interviews zu erleichtern.⁴⁰⁹ Des Weiteren eignen sich problem-

⁴⁰⁵ Eigene Abbildung.

⁴⁰⁶ Vgl. Reiger (2009), S. 152–153.

⁴⁰⁷ Vgl. Mruck und Mey (2009), S. 32–34.

⁴⁰⁸ Vgl. Auer-Srnka (2009), S. 162–168.

⁴⁰⁹ Vgl. Kurz et al. (2009), S. 465.

zentrierte Interviews auch in der allgemeinen qualitativen Marktforschung besonders für innovative Produkte und für die Erhebung von Akzeptanztreibern und -barrieren.⁴¹⁰

Die Interviewpartner müssen bei problemzentrierten Interviews nicht durch „eine Zufallsstichprobe gezogen werden, da es im Ergebnis nicht um repräsentative Aussagen sondern um die Erhebung typischer Strukturen und Gegebenheiten“ geht.⁴¹¹ Es wurde eine Auswahl nach dem Erkenntnisinteresse, das sogenannte *theoretical sampling*, angewandt. Die Literatur empfiehlt 20 bis 30 einstündige Interviews, um etwa 90-95 % des geforderten Erkenntnisinteresses zu erreichen.⁴¹² Daher wurden erfahrene Repräsentanten der jeweiligen Gruppen von Akteuren ausgewählt, um ein möglichst vielfältiges Bild aus den unterschiedlichen -Stakeholdergruppen zu erhalten. Bei der Auswahl der NFZ-betreibenden Organisationen wurde darauf geachtet, sowohl *Lead User* als auch typische Vertreter des Massenmarktes zu befragen. Im Sinne des Schneeballprinzips wurde es in der Studie zugelassen neben den ursprünglich 23 geplanten Interviews auf Anraten der Interviewpartner vier weitere Experten in die Auswahl mit aufzunehmen.

Die Kontaktaufnahme mit den Interviewpartnern erfolgte zunächst schriftlich mit einer Kurzvorstellung des Forschungsprojektes und den Rahmenbedingungen des Interviews.⁴¹³ Bei einer positiven Rückantwort erfolgte eine telefonische Terminabsprache für das Interview. Die Teilnahmebereitschaft der Interviewpartner war ausgesprochen hoch, sodass der Rekrutierungsprozess rasch abgeschlossen wurde. Von den ursprünglich 26 angeschriebenen Experten, lehnten drei die Interviewanfrage vollständig ab und drei verwiesen auf einen Kollegen bzw. Mitarbeiter, welche zur Teilnahme einwilligten. Die während der Studie zusätzlich akquirierten vier Teilnehmer willigten ebenso direkt zur Teilnahme ein. Tabelle 8 zeigt die finale Zusammensetzung der Interviewpartner und deren Zugehörigkeit zu den einzelnen Akteuren bzw. Stakeholdergruppen. Die Interviews H1 bis H5 entsprechen den fünf Händler-Interviews aus Kapitel 5.2.3.1.

Als Erhebungsinstrument diente ein halbstrukturierter Interviewleitfaden. Der Leitfaden ist entsprechend der Einflussfaktoren des IAD-Frameworks aufgebaut.⁴¹⁴ Für jede Gruppe von Akteuren wurde der Interviewleitfaden marginal angepasst, um eine individuelle Verankerung sicher zu stellen und den spezifischen Aspekten Rechnung zu tragen. Im Kern war der Fragebogen wie folgt implementiert:⁴¹⁵

- **Verankerung in der Situation des Befragten:** Offene Frage zum Einstieg in das Thema
- **Position und Information:**
 - Haltung gegenüber dem Untersuchungsobjekt
 - Wissensstand und Wahrnehmung zur *action situation*

⁴¹⁰ Vgl. Kurz et al. (2009), S. 466.

⁴¹¹ Vgl. Kurz et al. (2009), S. 468

⁴¹² Vgl. Griffin und Hauser (1993).

⁴¹³ Vgl. Teaser im Anhang IV 2).

⁴¹⁴ Vgl. Kapitel 6.3.1.1

⁴¹⁵ Der vollständige Fragebogen ist in Anhang IV 3) dargestellt.

- **Akteure, Aktionen und Einfluss:**
 - Relevante Akteure und Interaktion mit diesen
 - Mögliche Einflussmöglichkeiten auf das Untersuchungsobjekt
 - Durchsetzung der eigenen Interessen
- **Potentielle Auswirkungen** der *action situation*
- **Informationsverarbeitung und Entscheidungsverhalten** der Akteure
- **Angaben zur Person**

Stakeholder [Gruppe]	Stakeholder [Repräsentant]	Stakeholder [Position]	Interview [Inhalte]	Interview [Anzahl]	Interview [Kodierung]
NFZ- betreibende Organisation	ÖPNV	Fuhrparkleiter	Nutzungsverhalten, Beurteilung	7	E1
	ÖPNV	Fuhrparkleiter	Nutzungsverhalten, Beurteilung		E2
	ÖPNV	Fuhrparkleiter	Nutzungsverhalten, Beurteilung		E6
	Abfallentsorgung	Fuhrparkleiter	Nutzungsverhalten, Beurteilung		E3
	Abfallentsorgung	Fuhrparkleiter	Nutzungsverhalten, Beurteilung		E7
	Spedition	Geschäftsführer	Nutzungsverhalten, Beurteilung		E4
	Spedition	Fuhrparkleiter	Nutzungsverhalten, Beurteilung		E5
NFZ- Hersteller	OEM	Vertriebsleiter EU	OEM Strategie, Markt	3	O1
	OEM	Ingenieur Hybrid	OEM Strategie, Technologien		O2
	OEM	PL Gasantriebe	OEM Strategie, Technologien		O3
Zulieferer	Zulieferer	Senior Executive	Marktdynamik, Wechselwirkungen	5	Z1
	Zulieferer	PRM. Marketing	Marktdynamik, Technologie		Z2
	Zulieferer	GKAM	Marktdynamik, OEM Strategie		Z4
	Zulieferer	PRM Aftersales	Marktdynamik, Technologie		Z7
	Zulieferer	GKAM	Marktdynamik, OEM Strategie		Z9
Händler	NFZ-Händler	Verkaufsberater	OEM Strategie, Kaufentscheidung	5	H1
	NFZ-Händler	Verkaufsberater	OEM Strategie, Kaufentscheidung		H2
	NFZ-Händler	Verkaufsberater	OEM Strategie, Kaufentscheidung		H3
	NFZ-Händler	Verkaufsberater	OEM Strategie, Kaufentscheidung		H4
	NFZ-Händler	Verkaufsberater	OEM Strategie, Kaufentscheidung		H5
Politik	BMVI	Referatsleiter	Gesetze, Steuern, Förderung	4	P1
	BMVI	Referatsmitarbeiter	Gesetze, Steuern, Förderung		P3
	Landes MVI	Abteilungsleiter	Gesetze, Steuern, Förderung		P2
	Zulieferer	Politik & Lobbying	Gesetze, Steuern, Förderung		Z10
Forschung	Forschung	PL E-Bus	Fahrzeug-/ Antriebskonzepte	3	F1
	Forschung	Post-Doc	Verkehrslogistik		F2
	Forschung	Professor	Anlieferkonzepte		F3
Infrastruktur Energie- versorgung	Erdgasförderung	PRM	Parametrierung, Strategie, Preise	3	I1
	Energieversorgung	PL Infrastruktur	Parametrierung, Strategie, Preise		I2
	Interessenverband	PRM	Parametrierung, Strategie, Preise		I3
Weitere	Beratung	Berater	Markt, Trends und Treiber	2	B1
	Beratung	Partner	Markt, Trends und Treiber		B2

Tabelle 8: Interviewpartner für die qualitative Studie auf Basis der Stakeholderanalyse⁴¹⁶

⁴¹⁶ Eigene Abbildung. PRM steht für Produktmanager, PL für Projektleiter, GKAM für Global Key Account Manager, BMVI für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Landes MVI für Landesministerium für Verkehr und Infrastruktur.

Die jeweils rund einstündigen Interviews wurden aufgezeichnet⁴¹⁷ und anschließend wörtlich transkribiert sowie anonymisiert. Die Transkription der Audiodateien erfolgte wörtlich ohne Kommentierung in normales Schriftdeutsch, indem Dialekt und Grammatikfehler ausgebessert sowie Satzbau und Stil marginal korrigiert wurden. Die Anonymität der Interviewpartner ist durch die Nutzung von Platzhalter für Namen, Unternehmen und Orte sichergestellt, um Rückschlüsse auf den Befragten auszuschließen.

6.3.3 Ergebnisse

Die transkribierten Interviews dienten als empirische Grundlage für die Auswertung der Ergebnisse in einem zweiteiligen Verfahren. Zunächst wurden die Akteure des organisationsexternen Kontextes anhand deren Ziele, Position und Einflussmöglichkeiten definiert. Daran hat sich die Auswertung der Interviews zum Aufbau eines Verständnisses des logisch funktionalen Zusammenhangs der Diffusion CO₂-sparender Technologien auf dem NFZ-Markt angeschlossen. Hierzu wurde das Expertenwissen zur Implementierung von System Dynamics Modellen mithilfe eines Kodierungsprozesses externalisiert.

6.3.3.1 Action Situation im organisationsexterne Kontext

Die *action situation* des organisationsexternen Kontextes der Diffusion wird im Folgenden anhand der Ziele, Positionen und Einflussmöglichkeiten der Akteure auf dem Markt beschrieben. Abbildung 34 fasst die *action situation* grafisch zusammen.

NFZ-betreibende Organisationen

NFZ-Betreiber gehören als Nachfrageseite zu den zentralen Akteuren der Diffusion von CO₂-sparenden Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt und wurden im Rahmen des organisationalen Kontextes umfangreich untersucht (vgl. Kapitel 5).

NFZ-Hersteller

Die Hersteller von NFZ bestimmen die Angebotsseite im organisationsexternen Kontext. Deren Ziel liegt in der Maximierung des Gewinns aus der Entwicklung, der Produktion und dem Vertrieb von NFZ. Die Geschäftstätigkeit ist von einem hohen Wettbewerb zwischen den Herstellern geprägt, sodass sich derzeit eine eher abwartende Haltung unter intensiver Wettbewerbsbeobachtung zeigt. Ausnahme bildet hierbei die Elektrifizierung von Stadtbussen. Aus Sicht der NFZ-Hersteller gilt es, Fehlinvestitionen zu vermeiden, bevor sich eine erfolgsversprechende Marktentwicklung einstellt. Gleichzeitig muss aber der technologische Anschluss an die Wettbewerber gehalten werden. Der Druck zur CO₂-Reduktion hat noch nicht den Umfang erreicht, als das

⁴¹⁷ Vier Interviewpartner waren nicht mit der Tonaufnahme des Interviews einverstanden. Durch den Interviewenden und einen Assistenten wurde der Inhalt ausführlich und sinngemäß mitgeschrieben – soweit dies aufgrund der Gesprächsgeschwindigkeit möglich war – und ein Gesprächsprotokoll erstellt. Vgl. Gläser und Laudel (2010), S. 155–158.

umfangreiche finanzielle Mittel in die Entwicklung alternativer Antriebstechnologien investiert werden müssten, da die Priorität derzeit klar auf der Ausschöpfung konventioneller Optimierungsmaßnahmen an Verbrennungsmotor und Gesamtfahrzeug liegt.⁴¹⁸ Denn um die innovativen Technologien auf das geforderte Zuverlässigkeitsniveau zu heben sind R&D-Aufwendungen⁴¹⁹ in Milliardenhöhe notwendig.⁴²⁰

Die Zulieferindustrie hat einen höheren potentiellen Wertschöpfungsanteil an alternativen Antriebstechnologien als in der Optimierung des Gesamtfahrzeugs. Daher werden von den Zulieferern derzeit insbesondere Technologien in Motorperipherie wie Hybridisierung und Abgaswärmenutzung deutlich stärker entwickelt.⁴²¹

Neben den Entwicklungen im Bussegment sind Gasantriebe aus Sicht der Hersteller aufgrund der kurzfristig erreichbaren Gesamtbetriebskostenvorteile eine interessante Alternative für den Einsatz in den unterschiedlichen LKW-Anwendungen.⁴²² Die Positionen der Hersteller zur allgemeinen Bedeutung alternativer Antriebstechnologien unterscheiden sich kaum merklich voneinander. Derzeit nehmen überwiegend IVECO, Scania und Volvo eine Vorreiterrolle ein, wohingegen Mercedes, MAN und DAF vergleichsweise weniger öffentliche Aktivitäten vorantreiben oder Fahrzeugmodelle anbieten. Ähnlich zum PKW-Markt streben junge Marktteilnehmer ausschließlich auf eine reine Elektrifizierung von NFZ, da hier neue Kompetenzen im Vergleich zum konventionellen Verbrennungsmotor notwendig sind. Ebenso zeigt sich, dass eine Verlagerung der Geschäftsmodelle der Hersteller hin zu einer stärkeren Risikoentlastung der NFZ-betreibenden Organisationen durch Leasing- oder Mietmodelle für alternative Antriebstechnologien stattfinden könnte.

Die höchsten Barrieren für die Diffusion alternativer Antriebstechnologien gehen aus Sicht der Hersteller von der mangelnden Tank-Infrastruktur aus, welche vor allem die Anwendung im Fernverkehr maßgeblich einschränken würde.⁴²³ Einfluss auf die Diffusion alternativer Antriebe üben die Hersteller durch das Angebot von Fahrzeugmodellen, die Entwicklung von Technologien, Aufbau und Schulung herstellergebundener Werkstätten sowie Händlerschulungen aus. Damit haben die NFZ-Hersteller einen maßgeblichen Anteil an der Bereitstellung des komplementären Ökosystems durch den Aufbau eines dichten Werkstattnetzes, durch das Angebot von umfangreichen Service –und Wartungsverträgen zur Risikoreduktion der Ausfallwahrscheinlichkeit alternativer Antriebstechnologien und durch eine attraktive Vertriebs- und Angebotsstrategie. Des Weiteren sind die NFZ-Hersteller daran interessiert, sehr ambitionierte CO₂-Grenzwerte für NFZ zu verhindern, da nach der zeit- und kostenintensiven Erreichung der Euro-6 Abgasnorm in den kommenden Jahren nur begrenzte finanzielle Mittel für weitere Technologiesprünge

⁴¹⁸ Vgl. Z1, O1 entsprechend Tabelle 8.

⁴¹⁹ R&D steht für Research and Development, zu Deutsch Forschung und Entwicklung.

⁴²⁰ Vgl. Z1, Z9.

⁴²¹ Vgl. Z2, Z4, Z9.

⁴²² Vgl. O2, O3, Z4.

⁴²³ Vgl. O1, O2, O3.

vorhanden sein werden.⁴²⁴ Die ACEA hat die Haltung, dass keine weitere CO₂-Gesetzgebung notwendig ist, da der Markt rein TCO-getrieben sei. Dadurch würde sich eine Senkung des Kraftstoffverbrauchs und somit der CO₂-Emissionen von selbst ergeben.⁴²⁵ Diese Interessen versuchen die Hersteller mit Lobbyarbeit durch Politik- und Regierungsbeziehungen durchzusetzen.⁴²⁶

Kraftstoffversorgung

Das komplementäre Ökosystem wird maßgeblich durch die zur Verfügung stehende Infrastruktur zur Betankung der NFZ determiniert. Die Akteure in diesem Kontext gliedern sich in Tankstellen-Betreiber, Unternehmen zur Bereitstellung der Kraftstoffe (Mineralöl-, Gasförder- und Energieversorgungsunternehmen) sowie Projektierer und Erbauer von Tankstellen. Ein maßgebliches Interesse an der Diffusion alternativer Antriebstechnologien haben vorrangig Energieversorgungs- (EVU) und Gasförderunternehmen (GFU), indem sie durch alternative Energieträger zum Antrieb von NFZ neue Absatzkanäle für Strom und Gas erschließen können. Dementsprechend sind das Verständnis und die Haltung dieser Akteure stark von deren zu vermarktendem Energieträger abhängig. Ein radikaler Durchbruch alternativ angetriebener NFZ wird kurz- bis mittelfristig von diesen Akteuren jedoch nicht erwartet.

Mit welchen Geschäftsmodellen dieses Potenzial erschlossen werden soll, ist für die Akteure noch nicht eindeutig. Vom Aufbau einer eigenen Infrastruktur über eine Ausweitung der Betreibermodelle für bestehende Tankstellen bis hin zur Kooperation mit NFZ-betreibenden Organisationen werden derzeit alle Alternativen evaluiert.⁴²⁷ Darüber hinaus ist die Preisgestaltung für LNG und Strom noch sehr individuell und damit unterschiedlich: Die Preisgestaltung umfasst langfristige Fixpreise, eine Orientierung an den Spotmarktpreisen oder eine feste Kopplung am Dieselpreis. Da enorme Investitionssummen zum Aufbau der Tank-Infrastruktur notwendig sind, schrecken viele Betreiber von Tankstellen wie auch EVU und GFU von einem breiten Ausbau zurück, falls keine gesicherte Abnahmemenge an Kraftstoff vorhanden ist.⁴²⁸ Im Hinblick auf CNG steht die Ausweitung der NFZ-Tauglichkeit von Tankstellen im Vordergrund.⁴²⁹

Eine weitere wesentliche Barriere für einen rascheren Aufbau der Tank-Infrastruktur liegt in der derzeit von den Akteuren wahrgenommenen Investitionsunsicherheit.⁴³⁰ Weder sei die Kraftstoffbesteuerung langfristig geregelt, noch für alle alternativen Antriebsformen Industriestandards definiert. Dafür fordern die Akteure der Kraftstoffversorgung klare Rahmenbedingungen von der Politik. Darüber hinaus sind noch zentrale technologische Herausforderungen im Aufbau

⁴²⁴ Vgl. Z9, Z2, O1.

⁴²⁵ Vgl. Z10, Z1, O2.

⁴²⁶ Vgl. Z2, Z10, O1.

⁴²⁷ Vgl. I1, I2, I3.

⁴²⁸ Vgl. I1, I2.

⁴²⁹ Vgl. I2

⁴³⁰ Vgl. I1, I2, I3.

und Betrieb der Tankstellen, insbesondere bei CNG, LNG und Wasserstoff, zu meistern, um Wartung und Störungsanfälligkeit zu reduzieren.⁴³¹

Politik

Die Politik setzt auf europäischer, nationaler und lokaler Ebene den ordnungspolitischen Rahmen für die Diffusion CO₂-sparender Technologien auf dem NFZ-Markt unter Maximierung des gesellschaftlichen Nutzens. Der gesellschaftliche Nutzen wird seitens der Politik durch die Eindämmung der globalen CO₂-Emissionen, die Reduktion lokaler Emissionen von Schadstoffen und Lärm, der wirtschaftlichen Stärke, der technologischen Vorreiterrolle für alternative Antriebstechnologien auf europäischer und nationaler Ebene sowie ein zuverlässiges, bezahlbares und umweltverträgliches Transportwesen definiert.

Politische Entscheidungsträger sind sich über die zukünftige Entwicklung der Marktdurchdringung alternativer Antriebstechnologien höchst unsicher, was die Definition antriebstechnologiespezifischer Strategien zur Förderung der Diffusion behindert.⁴³² Insgesamt sind die Einführung von CO₂-Grenzwerten und die zunehmende Ausweitung von emissionsfreien Innenstädten, mit den daraus resultierenden Zufahrtsbeschränkungen, die wahrscheinlichsten und aus Sicht der Politik wirksamsten Maßnahmen. Die Umsetzung dieser Maßnahmen wird allerdings noch Jahre andauern, denn die Einführung der CO₂-Gesetzgebung wird beispielsweise aufgrund der Zeit für Messung und Auswertung der Erkenntnisse aus dem VECTO-Simulationsmodell und des politischen Prozesses zur Festlegung der Grenzwerte und zu deren Ratifizierung fünf bis acht Jahre andauern.⁴³³ Weitere Maßnahmen zur Ausübung von Einfluss sind die Kraftstoffbesteuerung, Festlegung von Mautsätzen, Subventionen für Pilotprojekte, Kaufprämien für umweltfreundliche NFZ, die Festlegung von Abmessungen der NFZ und einheitliche Technologiestandards.⁴³⁴

Weitere Akteure

Im organisationsexternen Kontext der Diffusion gibt es noch zahlreiche weitere Akteure mit mittelbarem oder vergleichsweise begrenztem Einfluss auf alternative Antriebstechnologien, welche daher nicht gesondert betrachtet werden. Darunter befindet sich unter anderem der Gebrauchtwagenmarkt mit den Anforderungen und Entscheidungskriterien von Kunden in der Zweit- und Drittlebensverwendung im außereuropäischen Ausland wie Asien und Afrika. Dies führt derzeit noch zu einem signifikant geringeren Wiederverkaufswert von NFZ mit alternativen Antriebstechnologien, da oftmals ein nachträglicher Umbau auf konventionelle Antriebstechnik erfolgt. Auch die Gesellschaft beeinflusst die Diffusion beispielsweise mit ihren Anforderungen und Bedürfnissen an das zukünftige Transportsystem, einer Zunahme der City Logistik durch den Onlineversandhandel, grüne Innenstädte, Veränderung von politischen Rahmenbedingungen

⁴³¹ Vgl. I1, I2.

⁴³² Vgl. P1.

⁴³³ Vgl. Z10.

⁴³⁴ Vgl. Kapitel 6.1.

und Anforderungen an Transportunternehmen. Ebenso haben Rohölförderländer durch ihre Produktionsmengen einen maßgeblichen Einfluss auf die Preisgestaltung von Mineralöl.

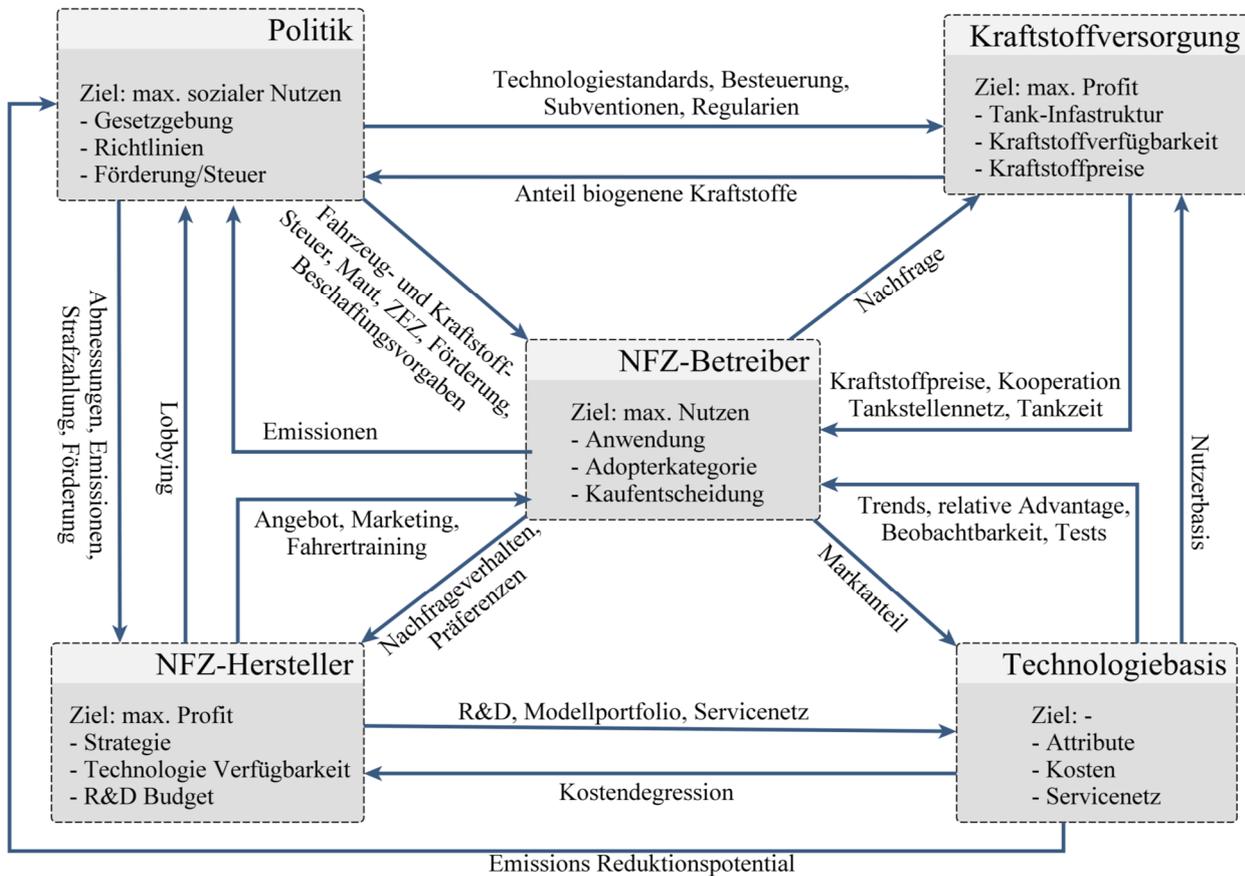


Abbildung 34: Action situation der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt⁴³⁵

Zusammenfassend zeigt sich aus den Interessen und Positionen der Akteure ein typisches Henne-Ei-Problem in der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien, da die Akteure sich gegenseitig den nötigen Proaktivismus zur Lösung des Problems zuschreiben. Die Kunden erwarten für den Kauf von NFZ mit alternativen Antriebstechnologien, dass die Antriebskonzepte technologisch höchst ausgereift sind, eine befriedigende Infrastruktur aufweisen und einen deutlichen Kostenvorteil gegenüber dem Dieselantrieb besitzen.⁴³⁶ Denn „der Hauptantrieb ist (für mich) die Wirtschaftlichkeit. Klar.“ weil „für alternative Antriebe hätten wir einen Schulungsaufwand in den Werkstätten sowie sonstigem Personal.“⁴³⁷ Weiterhin „muss die Politik verlässliche Rahmenbedingungen schaffen. Aber Sie denken eben immer nur vier Jahre.“⁴³⁸ Dies sei wichtig, da „die Umschulung der gesamten Mannschaft vier bis sechs Jahre dauert. Da kann ich nicht schnell

⁴³⁵ Eigene Abbildung.

⁴³⁶ Vgl. Kapitel 5.

⁴³⁷ Vgl. E7.

⁴³⁸ Vgl. E4.

wieder umschwenken.⁴³⁹ Und die „NFZ-Hersteller hätten die Möglichkeiten, die Entwicklung voranzutreiben.“⁴⁴⁰

Unternehmen sind erst bereit in wesentlichem Umfang in Ausbau und Produktion alternativer Antriebe und der zugehörigen Betankungseinrichtung zu investieren, sobald verlässliche politische Rahmenbedingungen geschaffen sind und „Flottenbetreiber bereit sind, ihren Fuhrpark auf alternative Kraftstoffe umzustellen, damit die Grundauslastung gewährleistet wird. Jedoch ist die Nachfrage sehr gering.“⁴⁴¹ Das Problem an der Politik sei, dass „den Behörden gar nicht klar ist, was LNG ist.“⁴⁴² „Des Weiteren wünsche [man sich] von der Politik technologieoffenheit.“⁴⁴³ Ebenso müssen zunächst „ausreichend wettbewerbsfähige NFZ seitens der Hersteller auf dem Markt angeboten sein, damit es eine konstante Nachfrage nach alternativen Antrieben gibt“⁴⁴⁴.

Die Politik ist zwar bereit die notwendigen Rahmenbedingungen für die Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien zu schaffen, möchte aber insbesondere „Unternehmen der Infrastruktur und der Automobilindustrie nicht aus der Pflicht entlassen die notwendigen Entwicklungen von Fahrzeugen und Tankstellen zu tätigen.“⁴⁴⁵ Des Weiteren sei ein Problem, dass „die Anwender von NFZ ihre kurzfristigen betriebswirtschaftlichen Zahlen im Blick haben.“⁴⁴⁶ Außerdem gibt es bei den Nutzern und Einkäufern „einfach Vorbehalte, die manchmal konkreter, manchmal unbestimmter gegenüber den Fahrzeugkonzepten sind.“⁴⁴⁷ Ebenso ist für die Politik „die Marktsituation schwer vorhersehbar [...und] es ist nicht absehbar, was langfristige dominiert.“⁴⁴⁸

Die NFZ-Hersteller geben an „als LKW-Hersteller sehr kundenorientiert zu sein.“⁴⁴⁹ Allerdings zieht das „Verkaufsargument CO₂-Einsparung 0, das einzige Argument das zieht ist Wirtschaftlichkeit, also monetäre Faktoren“⁴⁵⁰ obwohl es durchaus „Transporteure gibt, die etwas für ihr grünes Image machen.“⁴⁵¹ Daher besteht zwar das Interesse an alternativen Antriebstechnologien. „Einen großen Einfluss besitzt aber die Politik.“⁴⁵², denn „wenn hier jemand den größten

⁴³⁹ Vgl. E2.

⁴⁴⁰ Vgl. E5.

⁴⁴¹ Vgl. I2.

⁴⁴² Vgl. I1.

⁴⁴³ Vgl. I1.

⁴⁴⁴ Vgl. I3.

⁴⁴⁵ Vgl. P2.

⁴⁴⁶ Vgl. P2.

⁴⁴⁷ Vgl. P2.

⁴⁴⁸ Vgl. P1.

⁴⁴⁹ Vgl. O2

⁴⁵⁰ Vgl. Händler 2 aus der Vorstudie in Kapitel 5.2.3.1.

⁴⁵¹ Vgl. O2.

⁴⁵² Vgl. Z1.

Hebel hat, dann ist es die Politik.“⁴⁵³ Mit diesem hohen Einfluss könnte „man als Anreiz einen Gesetzgebungsschub oder irgendwas gebrauchen. Zum Beispiel eine Strafzahlung und dann geht es mit den ganzen alternativen Technologien weiter.“⁴⁵⁴ Denn „wenn die OEM mehr wollen, dann können sie auch. Es herrscht einfach zu wenig Druck. Da schaut man auch zum Wettbewerber: *Wer macht wie viel?*“⁴⁵⁵ „Die Industrie ist vor allem auf die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs aus.“⁴⁵⁶

Zusammenfassend zeigt sich in dieser – bewusst wenig differenzierten – Aufzählung von Zitaten nochmals, dass es unter den Akteuren des NFZ-Marktes in großen Teilen ein klassisches Henne-Ei-Problem gibt, welches die Diffusion CO₂-sparender Technologien stark hemmt. Da bisher keiner der Akteure in signifikantem Umfang ein proaktives Handeln – mit Ausnahme einiger *Lead User* und *Innovatoren* – zeigt, die Anzahl an *Lead User* und *Innovatoren* nicht zu erhöhen ist und das Interesse der Hersteller an CO₂-sparenden Antriebstechnologien nur bedingt hoch ist, liegt die Lösung des Henne-Ei-Problems im organisationsexternen Kontext der Diffusion. Durch den Aufbau des komplementären Ökosystems wird der Nutzen alternativer Antriebstechnologien deutlich steigen, allerdings ist das Ökosystem wiederum stark von der aktuellen Nutzerbasis abhängig. Auf dem PKW-Markt gibt es aktuell das Beispiel von Tesla Motors, welches in großem Maße das komplementäre Ökosystem proaktiv selbst entwickelt und die Unsicherheit der Kunden durch umfangreiche Garantien reduziert. Ein solcher Akteur ist auf dem Markt der NFZ-Hersteller derzeit nicht zu identifizieren. Daher hat vor allem der politisch-rechtliche Rahmen den Einfluss und die Möglichkeiten die Voraussetzungen für eine Auflösung des Henne-Ei-Problems zu schaffen.

6.3.3.2 Wechselwirkungen zwischen den Akteuren des NFZ-Marktes

Zur detaillierteren Analyse der Wechselwirkungen der Akteure wurden mithilfe der Kodierungstabelle die Transkripte schrittweise iterativ analysiert (vgl. Abbildung 31). Die grundlegende Thematik war durch die Zielstellung der Studie ausreichend definiert, sodass im ersten Prozessschritt eine Durchsicht der Interviews mittels einer offenen Kodierung und Memos zur Zusammenfassung zentraler Aussagen mit dem Ziel erfolgte, Einflussfaktoren (Kategorien) und Systemgrenzen zu determinieren. Im zweiten Prozessschritt wurden anhand der Kodierung und der Memos Textpassagen zur Wechselwirkung der Akteure identifiziert, welche bestenfalls mit Aussagen zum Verhalten von Akteuren und Einflussfaktoren verknüpft waren. In Anlehnung an die deduktive Kategorienbildung in der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2010) wurde in zwei iterativen Materialdurchgängen die Kodierung überarbeitet.⁴⁵⁷ Die finalen Textpassagen mit abhängiger und unabhängiger Variable wurden mit der Polarität des kausalen Zusammenhangs der beiden Variablen in die Kodierungstabelle übertragen.

⁴⁵³ Vgl. Z7.

⁴⁵⁴ Vgl. O2.

⁴⁵⁵ Vgl. Z1.

⁴⁵⁶ Vgl. O1.

⁴⁵⁷ Vgl. Mayring (2010).

Im dritten Prozessschritt wurden die Variablen in Pfeildiagramme überführt und schrittweise zu einem Kausaldiagramm zusammengefasst. Abbildung 35 zeigt, dass dieses noch sehr umfangreich und mit einer großen Anzahl exogener Einflussfaktoren implementiert wurde. Die übergeordneten Themen Infrastruktur, Kundennachfrage, Technologieverfügbarkeit und Technologieattraktivität sind stark voneinander abhängig, während Einflussfaktoren des Themenclusters Politik und Gesellschaft eine deutlich höhere Anzahl exogener Faktoren umfassen.

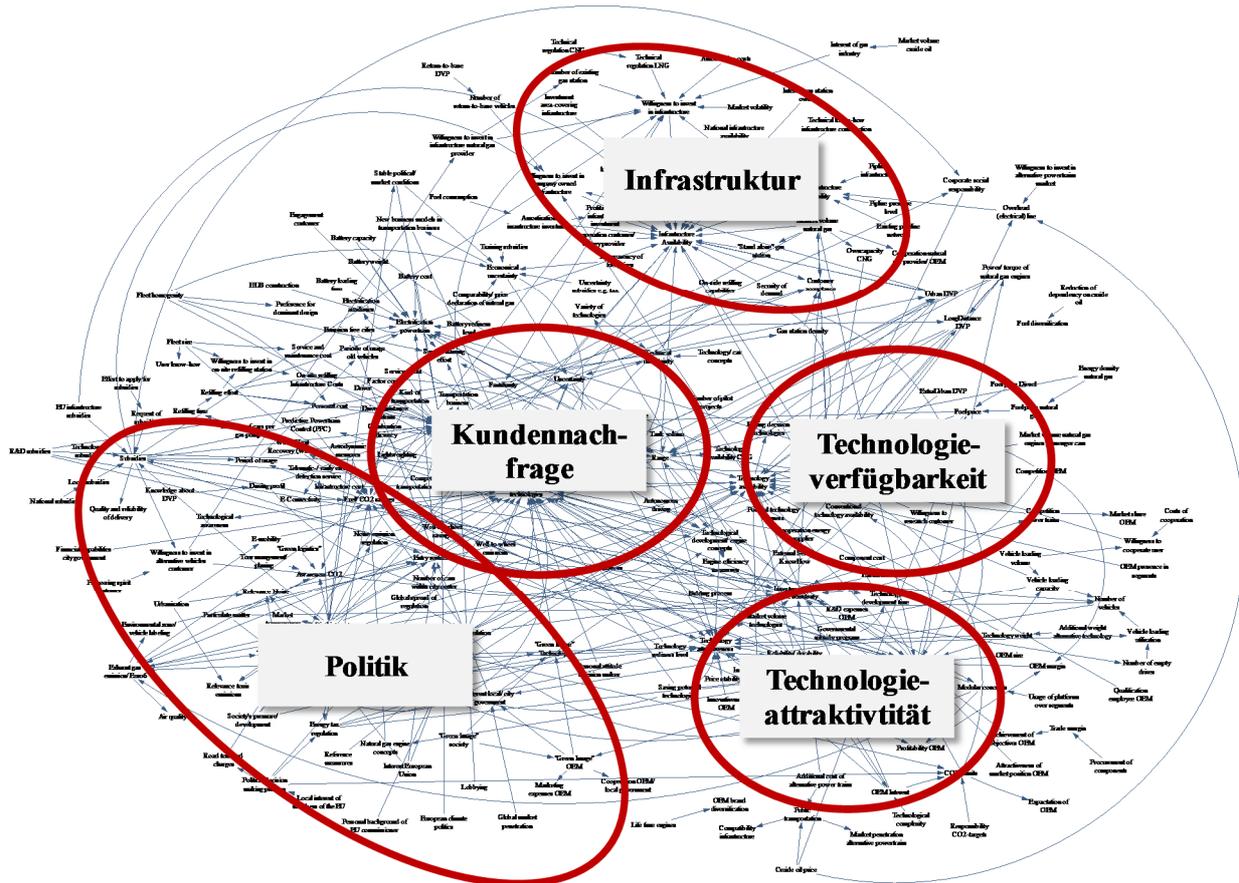


Abbildung 35: Kausaldiagramm auf Basis der Interviewergebnisse⁴⁵⁸

Das Kausaldiagramm wurde anschließend schrittweise generalisiert und auf die wesentlichen Themenaspekte aggregiert. So konnten sowohl die übergeordneten Wirkzusammenhänge der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien als auch spezifischer Teilbereiche mithilfe von Kausaldiagrammen dargestellt werden.

Abbildung 36 zeigt schematisch dargestellt die grundlegenden Zusammenhänge im Aufbau der Nachfrage nach alternativen Antrieben. Eine steigende Nachfrage führt durch ein gesteigertes Interesse der NFZ-Hersteller aufgrund von Gewinnerwartungen und Kundenorientierung sowohl zu einer Weiterentwicklung der Technologien hinsichtlich Zuverlässigkeit, Leistung und Kostendegression als auch zum Aufbau der komplementären Infrastruktur durch eine steigende

⁴⁵⁸ Eigene Abbildung.

Nutzerbasis. Diese positiven Zusammenhänge sind durch ein ‚+‘ gekennzeichnet, negative durch ein ‚-‘. Die Weiterentwicklung der Antriebstechnologien und der Aufbau des Ökosystems führen zu einem höheren Nutzen dieser Antriebskonzepte und verbessern so deren Marktstellung gegenüber dem konventionellen Dieselmotor. Durch die gestiegene Marktstellung kommt es zu einer steigenden Nachfrage nach diesen Technologien und schließt damit die positiven Regelkreise *R1* und *R2* in der Marktdurchdringung CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt. Daraus wird auch das typische Henne-Ei-Problem in der Diffusion alternativer Antriebstechnologien deutlich.

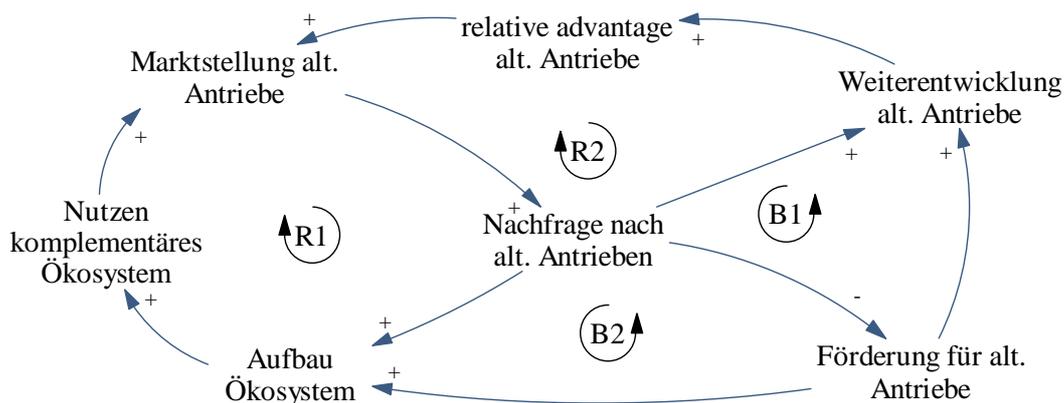


Abbildung 36: Grundlegende Wirkzusammenhänge der Attraktivitätssteigerung innovativer Antriebstechnologien⁴⁵⁹

Gleichzeitig führt die steigende Nachfrage und Nutzerbasis langfristig zu einem Abbau staatlicher Unterstützung für diese Antriebstechnologien in Form von Subventionen oder Fördermitteln für Infrastruktur- oder Entwicklungsprojekte. Dies stellt die negativen Regelkreise *B1* und *B2* dar.

Abbildung 37 zeigt mit einem Ausschnitt zum komplementären Ökosystem, dass der Nutzen alternativer Antriebstechnologien durch ein dichteres Service- und Tankstellennetz steigt. Dies ist nicht nur auf die wahrgenommene Verfügbarkeit von diesem Angebot zurückzuführen, sondern wird durch einige NFZ-betreibende Organisationen darüber hinaus in der Berechnung des Gesamtbetriebskostenvorteils (TCO-Vorteil) berücksichtigt. Ausgehend von einer steigenden Marktstellung alternativer Antriebe kommt es, wie oben beschrieben, zu einem Aufbau von Tankstellen und zum Aufbau von Servicepunkten zur Reparatur und Wartung von NFZ. Je dichter und professioneller das Servicenetz ausgebaut ist, desto geringer wird die Ausfallzeit von NFZ durch einen schnelleren und besseren Service sein. Dadurch steigt die Verfügbarkeit und damit die Einsatztage des Fahrzeugs, was durch geringere Kraftstoffkosten zu einem höheren TCO-Vorteil gegenüber dem konventionellen Dieselmotor führt und schließlich die Marktstellung alternativer Antriebstechnologien stärkt (positiver Regelkreis *R3*).

⁴⁵⁹ Eigene Abbildung.

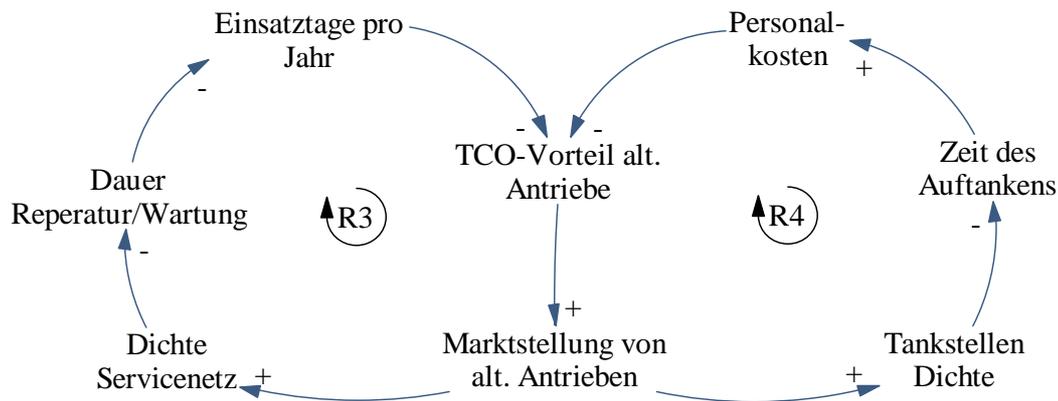


Abbildung 37: Positiver Regelkreis des Aufbaus der komplementären Infrastruktur⁴⁶⁰

Der Aufbau von Betankungsinfrastruktur einer alternativen Antriebstechnologie führt zu einer höheren Dichte des Tankstellennetzes und damit zu kürzeren Anfahrtswegen. Gleichzeitig kann durch die Weiterentwicklung der Betankungstechnologie die Netto-Tankzeit von alternativen Kraftstoffen reduziert werden. Daher sinkt der gesamte Zeitaufwand des Tankens und resultiert so entweder in einer höheren verfügbaren Transportzeit oder geringeren Personalkosten. Reduziert sich dieser Mehraufwand gegenüber dem Dieselmotor, steigt auch der TCO-Vorteil und führt schließlich wiederum zu einer Stärkung der Marktstellung alternativer Antriebstechnologien (positiver Regelkreis *R4*).

6.3.3.3 Fazit

Ziel dieses Kapitels war die Analyse des organisationsexternen Kontexts der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt. Hierfür wurden der politische und gesetzliche Rahmen sowie das komplementäre Ökosystem analysiert und die wesentlichen Akteure und deren Wechselwirkungen im organisationsexternen Umfeld untersucht. Gegenwärtig besteht ein klassisches Henne-Ei-Problem in der Diffusion alternativer Antriebstechnologien in den NFZ-Markt. Das größte Interesse an der Diffusion geht derzeit von der Politik aus – gleichzeitig besitzt diese durch regulatorische Maßnahmen die wirksamsten Hebel zur Lösung des Henne-Ei-Problems. Seitens der Politik wurde zwar auf europäischer Ebene eine CO₂-Gesetzgebung in die Ratifizierung geleitet, allerdings wird dieser Prozess noch Jahre andauern. Die CO₂-Gesetzgebung wird einen deutlichen Druck auf die NFZ-Hersteller ausüben CO₂-reduzierende Technologien verstärkt zu entwickeln und in ihrem Modellportfolio anzubieten. Ob dies allerdings zu einer Zunahme an alternativen Antriebstechnologien führt, hängt signifikant von der Ausgestaltung der Gesetzgebung ab, inwieweit diese den Einsatz solcher Technologien notwendig werden lässt. Darüber hinaus hat das deutsche Verkehrsministerium in der Mobilität- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung die Bedeutung des Dialoges unter den Akteuren zur Lösung des Henne-Ei-Problems erkannt. In einem partizipativen Verfahren soll ebenfalls eine Strategie zu einem zukünftigen CO₂-freien Transportsystem auf den Weg gebracht werden.

⁴⁶⁰ Eigene Abbildung.

Deshalb sind verlässliche Szenarien zum Antriebsmix der Zukunft in NFZ notwendig, um zielgerichtet politische Handlungsoptionen hinsichtlich der Erreichung der gesetzten Ziele zu evaluieren.

Darüber hinaus lieferte die Studie wertvolle Erkenntnisse für den Aufbau des Simulationsmodells, da durch die Interviews und den Kodierungsprozess die mentalen Modelle der Interviewpartner im Zusammenhangsmodell und im Kausaldiagramm externalisiert wurden. Des Weiteren wurden Daten zur Parametrisierung des quantitativen Simulationsmodells erhoben.

“A model which took account of all the variegation of reality would be of no more use than a map at the scale of one to one.”

Joan Robinson (1903-1983), Ökonomin

Kapitel 7

Systemdynamisches Prognosemodell

Ziel dieses Kapitels ist die Erstellung und Validierung eines systemdynamischen Simulationsmodells zur Prognose der zukünftigen Marktdurchdringung CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt.

Aus einer mathematischen Sichtweise heraus sind systemdynamische Simulationsmodelle ein System gekoppelter, nichtlinearer Differenzialgleichungen.⁴⁶¹ Daher besteht eine essentielle Herausforderung der Modellierung in der Entwicklung von Heuristiken durch die Formulierung mathematischer Gleichungen zur Abbildung der empirisch beobachtbaren Realität. Für den NFZ-Markt gibt es keine ausreichend gute mathematische Beschreibung der Zusammenhänge in der Diffusion von Antriebstechnologien, wie dies für viele andere komplexe Prozesse und Interaktionen auf Märkten der Fall ist. Im Modellierungsprozess wird aus diesem Grund auf eine qualitative Beschreibung des Systemverhaltens und der Inputparameter des Modells zurückgegriffen, die in der Folge anhand empirisch messbarer Daten kalibriert werden. Kalibrierung beschreibt die Ermittlung von Parametersätzen, welche zu einer möglichst niedrigen Abweichung zwischen simulierten und empirisch gemessenen Daten führen. System Dynamics Modelle zur Diffusion alternativer Antriebstechnologien auf dem PKW-Markt nutzen diese Methodik beispielsweise anhand der Marktaufteilung von Diesel- und Benzinantrieben, dem Aufbau der CNG-Tankstelleninfrastruktur oder zunehmender Modellverfügbarkeit. Für die aus den historischen Daten ermittelten Parametersätzen wird angenommen, dass diese auch in Zukunft Gültigkeit besitzen und somit als Fundament für die Prognose der zukünftigen Marktentwicklung dienen.

Im NFZ-Markt hingegen ist die Marktentwicklung für alternative Antriebe noch weit hinter dem PKW-Markt zurück⁴⁶², wodurch kaum geeignete Bezugsdaten für eine Kalibrierung des Simulationsmodells vorhanden sind. Eine Kalibrierung des Simulationsmodells auf einen Marktanteil des konventionellen Dieselmotors von 100 % oder eine vorhandene LNG-Tankstellenanzahl von 0, könnte zu fehlerhaften Parametersätzen führen. Um dieser Einschränkung entgegenzuwirken und eine erhöhte Güte des Simulationsmodells zu erreichen, ist das zentrale Konzept der Model-

⁴⁶¹ Vgl. *Sterman* (2000), S. 295–300.

⁴⁶² Vgl. Kapitel 2 und Kapitel 5.

lentwicklung, kalibrierte und validierte, funktional mathematische Zusammenhänge und Parametersätze des PKW-Marktes auf den NFZ Markt zu übertragen, zu adaptieren und anschließend mit Validitätstests zu verifizieren.

Zunächst erfolgt dazu in Ergänzung zu Kapitel 3 eine ausführliche Diskussion der zugrundeliegenden Simulationsmethodik System Dynamics und dem damit verbundenen Vorgehen zur Modellentwicklung. Daran knüpft eine Betrachtung etablierter Untersuchungen auf Basis validierter Simulationsmodelle für den PKW-Markt an, um Systemarchetypen zum funktionalen Zusammenhang von Technologiediffusions-Modellen auf Automobilmärkten zu erarbeiten. Diese Systemarchetypen dienen als Fundament der iterativen Entwicklung des System Dynamics Modells und werden in ihren logisch funktionalen Zusammenhängen durch die für den NFZ-Markt spezifischen Erkenntnisse der Kapitel 3 bis 5 angepasst, erweitert und in mathematischen Gleichungen spezifiziert. Schließlich erfolgt eine kritische Diskussion der Validität des Simulationsmodells anhand von direkten Strukturtests, verhaltensorientierten Strukturtests und Verhaltenstests.⁴⁶³

7.1 Modellierung mit System Dynamics

7.1.1 Grundlagen zu System Dynamics⁴⁶⁴

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Modellierungsmethodik System Dynamics ist ein quantitatives Prognoseverfahren, das Ende der 50er Jahre von J. Forrester am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt wurde. System Dynamics dient der Analyse komplexer und dynamischer Problemstellungen und deren Strukturen im sozio-ökonomischen Umfeld. Die Methodik verfolgt das Ziel, Systeme mit Hilfe qualitativer und quantitativer Modelle nicht nur zu beschreiben sondern auch zu verstehen, wie Rückkopplungsstrukturen das Systemverhalten determinieren.⁴⁶⁵

Mit qualitativem und quantitativem System Dynamics umfasst diese Methodik zwei unterschiedliche Modellierungsphasen, die zur Problemuntersuchung angewandt werden können.⁴⁶⁶ Dabei bildet die qualitative Methode mit Kausaldiagrammen die Grundlage für die quantitative Modellierung und erleichtert das Verständnis von Ursache und Wirkung eines Systems.⁴⁶⁷ Flussdiagramme zählen zum quantitativen System Dynamics und stellen die eigentliche Modellierungstechnik dar. Zum besseren Verständnis werden die folgenden Erklärungen mittels eines Beispiels zur Anzahl an Tankstellen in Abbildung 38 veranschaulicht. Die Existenz eines funktionalen

⁴⁶³ Vgl. *Barlas* (1996), S. 189–195.

⁴⁶⁴ Dieser Abschnitt zu den Grundlagen von System Dynamics entspricht überwiegend *Seitz* (2012), S. 15–17.

⁴⁶⁵ Vgl. *Kapmeier* (1999), S. 3.

⁴⁶⁶ Vgl. *Wolstenholme* (1990), S. 11.

⁴⁶⁷ Vgl. *Wolstenholme* (1990), S. 46.

Zusammenhangs zwischen zwei Modellvariablen wird durch einen Pfeil dargestellt, eine positive Korrelation beider Variablen ist durch ein ‚+‘ gekennzeichnet, eine negative Korrelation durch ein ‚-‘. Durch diese Beziehungen entstehen Regelkreise, welche entweder positiv (Reinforcing Loop), also verstärkend, oder negativ (Balancing Loop), also dämpfend, sein können.

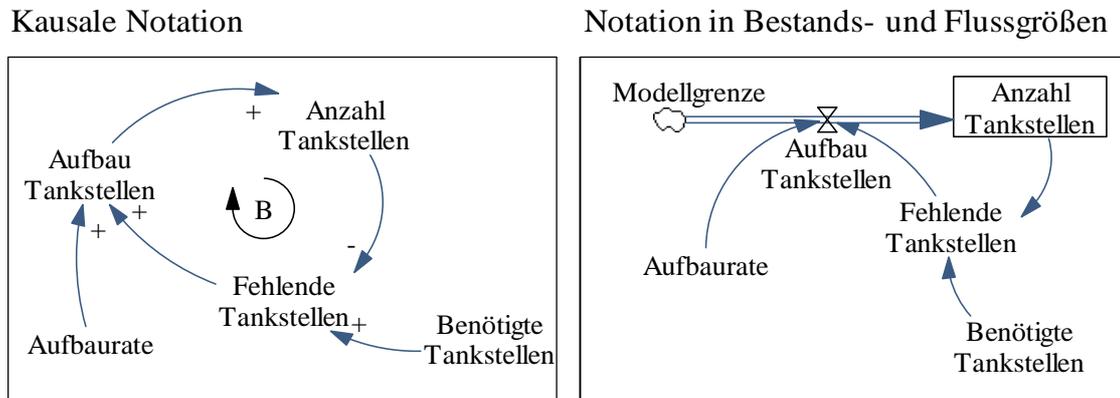


Abbildung 38: Darstellungsformen von System Dynamics Modellgrößen am Beispiel Anzahl Tankstellen⁴⁶⁸

Die in Kausaldiagrammen qualitativ dargestellten Systemelemente werden in der quantitativen Modellierung systemischer Zusammenhänge in Bestands-, Fluss- und Hilfsgrößen sowie Konstanten unterschieden.⁴⁶⁹ *Bestandsgrößen* (Anzahl Tankstellen) beschreiben den Systemzustand zu einem bestimmten Zeitpunkt und werden im Zeitverlauf auf- oder abgebaut. Im Gegensatz zu Fluß- oder Hilfsvariablen sind Bestandsgrößen auch bei Stillstand des Systems weiterhin wahrnehmbar. *Flussgrößen* (Aufbau Tankstellen) repräsentieren den gegenwärtigen Strom aus Zu- bzw. Abflüssen zwischen Bestandsgrößen in Form von Aktivitäten und Informationen. *Hilfsvariablen* (Fehlende Tankstellen) dienen der besseren Strukturierbarkeit von Modellen. Sie geben jene Schritte wieder, durch die Informationen über den aktuellen Systemzustand - die Bestandsgrößen - in Flussgrößen überführt werden. *Konstante Variablen* bleiben über die gesamte Modellierungsdauer bei einem konstanten Wert, wohingegen *Lookup-Variablen* über die Zeit veränderlich sind. Benötigte Tankstellen können sowohl als konstanter Wert als auch zeitlich variabler Wert gesehen werden. Zur besseren Übersichtlichkeit der Modellstruktur werden *Schattenvariablen* eingesetzt, die an einer anderen Stelle des Modells definiert sind. Sie sind durch Klammern gekennzeichnet: <Schattenvariable>. Flussgrößen werden durch „Ventile“, Systemgrenzen durch „Wolken“ und Bestandsgrößen durch „Boxen“ dargestellt. Pfeile visualisieren die kausale Abhängigkeit zwischen Variablen.⁴⁷⁰

Im Umgang mit komplexen Systemen muss akzeptiert werden, dass Wissen und kognitive Fähigkeiten eines Menschen nicht ausreichend entwickelt sind, um diese Systeme erfassen und verarbeiten zu können.⁴⁷¹ Durch die Berücksichtigung und Darstellung verzweigter Regelkreise

⁴⁶⁸ Eigene Abbildung. Das Kausaldiagramm links, das Flussdiagramm rechts dargestellt.

⁴⁶⁹ Vgl. Sterman (2000), S. 52.

⁴⁷⁰ Vgl. Weikl (2010), S. 18–20.

⁴⁷¹ Vgl. Dörner (2009), S. 19–20.

der Systemkomponenten in einem sich zeitlich verändernden Prozess, unterstützt System Dynamics das Systemverständnis und fördert die Unternehmen-Umwelt Beziehungen zu begreifen. Darüber hinaus hilft System Dynamics den Beteiligten im Unternehmen ihre mentalen Modelle, also ihr inneres Wissen und Prozessverständnis, zu externalisieren. Daraus werden Inkonsistenzen über das gemeinsame Verständnis der Dynamik sozialer Systeme deutlich. Die Methodik hilft ein gemeinsames Systemverständnis zu erlangen, aber auch Schwächen des eigenen mentalen Modells zu erkennen und führt damit zu einer formalisierten, kommunizierbaren Sichtweise.⁴⁷² Zuletzt ermöglicht System Dynamics durch eine Szenarientwicklung und –analyse die Identifizierung der wesentlichen Variablen des Systemverhaltens. Dadurch können strategische Handlungsempfehlungen abgeleitet und die Auswirkungen auf das Systemverhalten herausgearbeitet werden.

Zur Entwicklung von System Dynamics Modellen gibt es unterschiedliche Software Lösungen wie *Vensim*, *iThink*, *Powersim* oder *AnyLogic*, welche die Gleichungssysteme und implementierten Abhängigkeiten in graphischen Benutzeroberflächen darstellen und das Rechenmodell simulationsfähig machen. Eine analytische Lösung durch den Modellierer ist daher nicht notwendig. Des Weiteren bieten die Softwareprogramme umfangreiche Analyse- und Validierungsfunktionen für Modell und Ergebnisse.

7.1.2 Anwendung von System Dynamics auf Automobilmärkte⁴⁷³

Auf dem Automobilmarkt werden unter Anwendung von System Dynamics vielfältige Schwerpunktthemen im Umfeld alternativer Antriebstechnologien erforscht, welche sich in Bezug auf die analysierten Technologien (Brennstoffzelle, Elektro- und Hybridfahrzeuge, Gasmotoren), der in der Studie berücksichtigten Akteure (Käufer, Nutzer, Tankstellenbetreiber, Energieversorgungssystem, Hersteller, Politik, Händler), dem Untersuchungsrahmen (lokal, regional, national, supranational) und der untersuchten Zielgröße (Marktdurchdringung der Technologien, Gesamtabsatz von Fahrzeugen, Gesamtenergieverbrauch, Treibhausgas-Emissionen oder Herstellerstrategien) unterscheiden.⁴⁷⁴

Aufgrund der Zielstellung dieser Arbeit, liegt der Fokus im Folgenden ausschließlich auf den relevanten Forschungsarbeiten zur Diffusion alternativer Antriebstechnologien auf dem PKW-Markt unter Berücksichtigung des komplementären Ökosystems.⁴⁷⁵

Abgesehen von einigen Masterarbeiten am MIT mit einem stark explorativen Forschungsziel, entwickelte Struben (2006a) als einer der Ersten ein System Dynamics Modell zur Analyse der

⁴⁷² Vgl. *Kapmeier* (1999), S. 52.

⁴⁷³ Dieses Kapitel basiert überwiegend auf einem veröffentlichten Konferenzbeitrag auf der 32nd Conference of the System Dynamics Society 2014: *Seitz und Terzidis* (2014).

⁴⁷⁴ Vgl. *Shafiei et al.* (2013), S. 45–47.

⁴⁷⁵ Für weitere System Dynamics Simulationsmodelle auf dem Automobilmarkt wird auf die umfassende Literaturübersicht von *Shafiei et al.* (2013) hingewiesen.

Marktdiffusion alternativ angetriebener PKW. Die grundlegende Studie zur Diffusion von Brennstoffzellenfahrzeugen ist schrittweise ausgebaut und auf weitere Antriebskonzepte übertragen worden. Im System Dynamics Modell liegt der Schwerpunkt auf der räumlichen Verteilung der Nachfrage nach alternativen Kraftstoffen sowie der zugehörigen Tankinfrastruktur. Außerdem wurde der Kaufentscheidungsprozess der Fahrzeugkäufer, basierend auf einem MNL-Modell⁴⁷⁶, detailliert im Modell implementiert. Zusätzlich wurde das Konstrukt der Vertrautheit *familiarity* entwickelt, welches durch die sozialen Faktoren Medienpräsenz, Marketingeffektivität und Mund-zu-Mund Propaganda die Bildung eines *choice sets* determiniert.⁴⁷⁷

Auf dem europäischen Markt identifizierte Janssen (2005) die maßgeblichen Stakeholder für die Diffusion von Erdgasfahrzeugen in der Schweizer PKW-Flotte. Der Nachfragesektor, die Tankstellenbetreiber sowie die Schweizer Branche der Importeure, Autohändler und Fahrzeugwerkstätten wurden als endogene Akteure bestimmt, während die Regierung und Politik, die Erdgasindustrie sowie die ausländische Fahrzeugindustrie exogene Akteure im System Dynamics Modell repräsentieren. In seiner Untersuchung beschreibt Janssen (2005) die Effektivität politischer Handlungsoptionen auf die Diffusion von Erdgas- und Brennstoffzellenfahrzeuge. Die Implementierung, Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells ist hauptsächlich durch dynamische Testläufe der Modellbausteine erfolgt, welche überwiegend auf empirischen Beobachtungen beruhen.⁴⁷⁸

Bosshardt (2009) erweiterte die Arbeit von Janssen (2005) durch die Implementierung des Wettbewerbs der verschiedenen alternativen Antriebstechnologien untereinander sowie der Analyse mehrerer europäischer Fahrzeugmärkte. Hierfür berücksichtigte er Aspekte wie Kosten und Attraktivität der Antriebstechnologien, die Verfügbarkeit von Fahrzeugmodellen mit alternativen Antrieben, die Betankungsinfrastruktur und die Vertrautheit der Kunden. Das System Dynamics Modell wurde auf Fragestellungen zum Einfluss von Handlungsstrategien zur Unterstützung der Marktdurchdringung alternativer Antriebskonzepte angewandt. Die Validierung des Simulationsmodells wird anhand von grafischen Vergleichen des Modellverhaltens, Test von Modellbausteinen, Extremwerttests und Sensitivitätsanalysen erbracht.⁴⁷⁹

Keles et al. (2005) untersuchten die Marktdurchdringung von Brennstoffzellen-PKW in Deutschland hinsichtlich des Einflusses verschiedener Stakeholder. Dabei fokussierten sie im Simulationsmodell die Interaktionen von Fahrzeugkunden, Automobilherstellern, Tankstellenbesitzern und politischen Entscheidungsträgern und implementierten folglich vier Modellbausteine: Angebot und Nachfrage von Brennstoffzellenfahrzeugen, Tankstellennetz, Technologieattraktivität und die resultierende *Zahlungsbilanz* der Regierung. Das Tankstellennetz wurde in die Cluster *Städtische Tankstellen* und *Autobahntankstellen* aufgeteilt, wobei der Aufbau der Autobahntank-

⁴⁷⁶ Vgl. Kapitel 5.3.1.

⁴⁷⁷ Vgl. Struben (2004); Struben (2006b); Struben und Sterman (2008).

⁴⁷⁸ Vgl. Janssen (2005); Janssen et al. (2006).

⁴⁷⁹ Vgl. Bosshardt et al. (2007); Bosshardt (2009).

stellen von der Entwicklung in den Städten abhängig ist. Eine umfassende Validierung des System Dynamics Simulationsmodells erfolgte in der Publikation nicht.⁴⁸⁰

Überwiegend aufbauend auf den Arbeiten von Struben (2006a) und Janssen (2005) simulierte Weikl (2010) die zukünftigen Marktanteile von alternativen Antriebskonzepten auf dem deutschen PKW-Markt. Ein Schwerpunkt legt er dabei auf emotionale, auf das Antriebskonzept beziehende, Kaufkriterien im Entscheidungsprozess von Neufahrzeugkäufern. Zusätzlich modellierte Weikl (2010) die Aktionen der Automobilhersteller zur Verbesserung der Antriebstechnologien und Erhöhung der Fahrzeugverfügbarkeit mit alternativen Antrieben endogen. Die Validität des Simulationsmodells wird anhand von Struktur- und Verhaltenstests diskutiert.⁴⁸¹

Zuletzt hat Keith (2012) die Arbeit von Struben (2006a) ausgeweitet, indem er insbesondere das beschränkte Angebot von Fahrzeugmodellen berücksichtigte, welches sich negativ auf den Marktanteil von alternativen Antriebskonzepten auswirkt. Zusätzlich diskutierte er die Übergangsrolle von Hybridfahrzeugen auf die Diffusion von reinen Elektrofahrzeugen und die räumliche Diffusion von alternativen PKW-Antrieben.⁴⁸²

Zusammenfassend greifen existierende System Dynamics Simulationsmodelle zur Prognose und Analyse der zukünftigen Marktdurchdringung alternativer Antriebstechnologien auf vier essentielle Regelkreise zurück: *Infrastruktur*, *Vertrautheit* mit der Technologie, *Technologieattraktivität* (entsprechend des relativen Vorteils) und *Fahrzeugverfügbarkeit*. Außerdem werden als exogene Faktoren rechtlich-politische Maßnahmen, internationale Energieverfügbarkeit und -preise sowie gesellschaftliche Trends betrachtet. Dieser prinzipielle Aufbau mit vier endogenen Systemarchetypen der Diffusion alternativer Antriebstechnologien auf dem PKW-Markt, soll im Folgenden auch das Fundament für die Entwicklung des Simulationsmodells auf dem NFZ-Markt stellen.

7.1.3 System Dynamics Modellierungsprozess

„*All models are wrong.*“⁴⁸³ Alle Modelle sind falsch, denn sie bilden nur einen kleinen Ausschnitt der Realität approximiert ab. Diese Erkenntnis ist auch für die Entwicklung systemdynamischer Modelle von vorrangiger Bedeutung, um hilfreiche Erkenntnisse aus einem iterativen Prozess in der Modellierung und dem Realitätsabgleich zu erhalten. Statt einer ausschließlichen Fokussierung auf Replikation historischer Daten, sollte nach Sterman (2002) vielmehr die Frage nach der Angemessenheit der zugrunde liegenden Hypothesen, der Robustheit von Modellstruk-

⁴⁸⁰ Vgl. Keles et al. (2008).

⁴⁸¹ Vgl. Weikl (2010).

⁴⁸² Vgl. Keith (2012).

⁴⁸³ Vgl. Sterman (2002).

tur und -verhalten sowie die Sensitivität der Ergebnisse in Abhängigkeit der Annahmen von Modelgrenzen und Rückkopplungsschleifen Anwendung finden⁴⁸⁴:

*“Because all models are wrong, we reject the notion that models can be validated in the dictionary definition sense of ‘establishing truthfulness’, instead focusing on creating models that are useful, on the process of testing, on the ongoing comparison of the model against all data of all types [...]. We argue that focusing on the process of modeling rather than on the results of any particular model leads to better models, better policies, and a greater chance of implementation and system improvement.”*⁴⁸⁵

Die Entwicklung der Modellstruktur zur Beantwortung einer klar definierten Fragestellung mithilfe eines System Dynamics Modells, sollte in einen fünfphasigen, iterativen Modellierungsprozess, dargestellt in Abbildung 39, erfolgen. Die fünf Modellierungsschritte – Problembeschreibung, Erstellung der dynamischen Hypothese, formale Modellentwicklung, Validierung und Anwendung – erfolgen iterativ, sind jedoch nicht an eine feste Abfolge gebunden.⁴⁸⁶

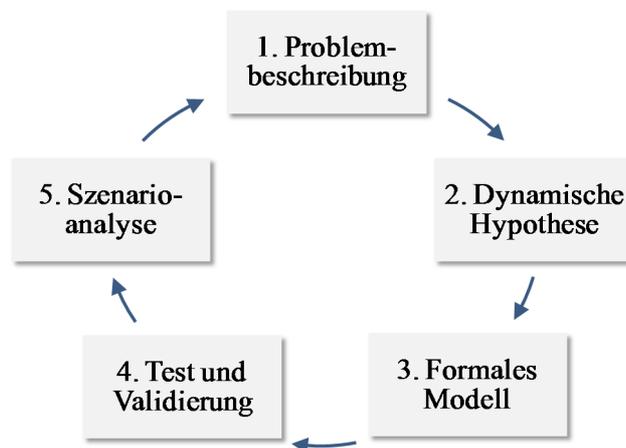


Abbildung 39: System Dynamics Modellierungsprozess⁴⁸⁷

Die erste Phase des Modellierungsprozesses dient der exakten Charakterisierung des Analyseproblems, welches mit dem System Dynamics Simulationsmodells gelöst werden soll sowie der Definition des Untersuchungsrahmens. Die Formulierung der dynamischen Hypothese dient der Beschreibung des betrachteten Systems, in dem das Analyseproblem eingebettet ist, um eine Arbeitstheorie zum Systemverhalten zu erarbeiten und die Systemgrenzen zu determinieren. Dafür wird ein konzeptionelles, rein qualitatives, Kausaldiagramm zur endogenen⁴⁸⁸ Erklärung des Systemverhaltens erstellt.

⁴⁸⁴ Vgl. Stermann (2002), S. 521.

⁴⁸⁵ Vgl. Stermann (2002), S. 521 in Anlehnung an Forrester (1985).

⁴⁸⁶ Vgl. Stermann (2000), S. 89–102.

⁴⁸⁷ Eigene Abbildung in Anlehnung an Stermann (2000), S. 87.

⁴⁸⁸ Endogene, oder abhängige, Größen eines Systems sind durch die Modellstruktur und den exogenen Größen determiniert. Exogene, oder unabhängige, Größen sind außerhalb des Systems determiniert und wirken auf das innere System ein.

In der Folge wird auf dieser Basis das formale, quantitative Simulationsmodell entwickelt, indem die funktionalen Wirkzusammenhänge des beobachteten Systemverhaltens als mathematische Gleichungen der Fluss- und Bestandsgrößen spezifiziert werden. Durch die Wahl kleiner diskreter Zeitintervalle für die Simulation, wird das dynamische Verhalten des realen Systems in lineare Abhängigkeiten approximiert.⁴⁸⁹

Die vierte Phase hat das Ziel, die Güte von System Dynamics Modellen zu sichern. Dabei steht nicht ausschließlich die Ergebnisgüte im Vordergrund, sondern bestimmend sind die Bewertungskriterien Strukturvalidität und Verhaltensvalidität. Die dafür angewendeten Tests umfassen direkte Strukturtests, strukturorientierte Verhaltenstests und Verhaltenstest. Direkte Strukturtests vergleichen die implementierte Systemstruktur anhand der mathematischen Gleichungen und logischen Zusammenhänge mit dem verfügbaren theoretischen und empirischen Wissen über das reale System. Strukturorientierte Verhaltenstests bewerten die Modellstruktur indirekt, indem das simulierte Modellverhalten des Gesamtmodells oder entkoppelter Teilmodelle mit der Realität abgeglichen werden, um Strukturbrüche oder falsche Parametrisierung auszuschließen. Auf Basis eines strukturvaliden Modells wird abschließend die transiente⁴⁹⁰ Verhaltensvalidität überprüft, indem grafisch und visuell das simulierte Modelverhalten mit den realen langfristigen Verhaltensmustern verglichen wird.⁴⁹¹

Der fünfte Schritt besteht in der Anwendung des Modells. Meist kommen dabei Szenarioanalysen zum Einsatz, um unter Unsicherheit die zukünftige Entwicklung des modellierten Systems zu analysieren oder robuste Handlungsstrategien zum zielgerichteten Eingriff auf das reale System zu entwerfen.

7.2 Entwicklung des Simulationsmodells

Entsprechend des iterativen Modellierungsprozesses nach Sterman (2000) erfolgte die Entwicklung des Simulationsmodells in einer iterativen Vorgehensweise. Ausgehend von einer detaillierten Problembeschreibung⁴⁹² ist zunächst ein vorläufiges Kausaldiagramm erstellt worden. Dafür wurde mittels einer Wechselwirkungsanalyse auf Basis von Primär- und Sekundärliteratur ein fundamentales Verständnis des logisch funktionalen Zusammenhangs der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt gelegt.⁴⁹³

⁴⁸⁹ Vgl. *Weikl* (2010), S. 21.

⁴⁹⁰ Transientes Verhalten beschreibt ein nicht-stationäres Verhalten, wie dies bei Diffusionsprozessen mit s-kurvenförmigen Verhaltensmustern der Fall ist. Bei stationären Verhaltensmustern sind für die Verhaltensvalidierung weitere statistische Tests wie Trendvergleiche, Eigenwerte oder Mittelwerte möglich. Vgl. *Barlas* (1996), S. 195–196.

⁴⁹¹ Vgl. *Barlas* (1996), S. 188–195.

⁴⁹² Vgl. Kapitel 1.

⁴⁹³ Vgl. *Seitz* (2014).

In fünf großen Iterationen erfolgte anschließend die Überführung des qualitativen System Dynamics Modells in ein mathematisches Rechenmodell: Die Identifikation der vier endogenen Systemarchetypen einer Diffusion alternativer Antriebstechnologien auf dem PKW-Markt wurden auf den NFZ-Markt übertragen sowie mit explorativen Expertengesprächen spezifiziert und erweitert (1). Diese zweite Version des Kausaldiagramms bildete die Grundlage für den Aufbau eines quantitativen System Dynamics Modells für den Anwendungsfall Fernverkehr mit der ausschließlichen Betrachtung der Antriebskonzepte konventioneller Dieselmotor, LNG-Antrieb und Hybridantrieb (2).⁴⁹⁴

Das bis zu diesem Iterationsschritt überwiegend auf theoretischen Erkenntnissen entwickelte Modell, ist anschließend mithilfe der empirischen qualitativen Studie sowie der quantitativen Untersuchung zum organisationalen Adoptionsverhalten hinsichtlich der logisch funktionalen Zusammenhänge erneut kritisch überarbeitet worden (3). In der Folge wurde das quantitative Rechenmodell analog der Technikpakete auf weitere Technologien übertragen (4) und zuletzt unter Einbezug der Erkenntnisse aus der Conjoint-Analyse auf alle betrachteten Anwendungsfälle ausgeweitet (5).

Im Folgenden wird das finale Gesamtmodell eingehend und vollständig vorgestellt. Diese Form des Modells beruht auf Vorformen als Ergebnis mehrerer Iterationen, die in zwei Publikationen im Rahmen dieser Forschungsarbeit dargestellt sind.⁴⁹⁵

7.2.1 Konzeptioneller Aufbau des Simulationsmodells

Mit dem quantitativen Simulationsmodell soll die zukünftige Marktdurchdringung CO₂-sparender Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt prognostiziert werden. Dabei stehen die Fragestellungen zum zukünftigen dominanten Design der Antriebsform im NFZ-Markt sowie das potentielle Reduktionspotenzial der CO₂-Emissionen im Transportsektor durch innovative Antriebstechnologien im Vordergrund. Die Marktdurchdringung dieser Technologien wird anhand des Marktanteils gemessen.

Die Analyse des organisationalen Kontextes hat die Unterschiede zwischen NFZ-betreibenden Organisationen im Allgemeinen aufgezeigt und im Speziellen die unterschiedlichen Anforderungen in der Nutzung verdeutlicht. Dies bestätigt die im Vorfeld definierte Annahme, die Marktdurchdringung innovativer Antriebstechnologien anwendungsfallspezifisch zu untersuchen. Deshalb werden entsprechend Kapitel 2.1.2 die fünf Anwendungsfälle des Güterverkehrs und zwei Anwendungsfälle im Personenverkehr im Simulationsmodell berücksichtigt: Fernverkehr, Regionaler Verteilerverkehr, Städtischer Verteilerverkehr, Bauverkehr, Abfallsammelverkehr, Reisebus und Stadtbuss. Als Referenzmarkt für die Analyse und die Entwicklung des Simulationsmodells wird der deutsche NFZ-Markt als volumenstärkster Markt in Europa gewählt.

⁴⁹⁴ Vgl. *Seitz und Terzidis* (2014).

⁴⁹⁵ Vgl. *Seitz* (2014); *Seitz und Terzidis* (2014).

Die technologische Basis für das Simulationsmodell bilden die in Kapitel 4 definierten Technikpakete. Die Verknüpfung der Anwendungsfälle und Technikpakete erfolgte durch eine Vorauswahl in der Analyse des technologischen Kontextes der Diffusion. Deshalb können im Simulationsmodell die NFZ-betreibenden Organisationen in den sieben Anwendungsfällen aus prinzipiell vier unterschiedlichen Grundmotorenkonzepten bei ihrer Investitionsentscheidung in neue NFZ auswählen: Konventioneller Dieselmotor [D], Erdgasmotor mit CNG Tank [CNG], Erdgasmotor mit LNG Tank [LNG] und Batteriebetriebener Elektromotor [BEV]. Jedes dieser Grundmotorenkonzepte ist, eine technologische und wirtschaftliche Sinnhaftigkeit vorausgesetzt⁴⁹⁶, mit zusätzlichen Technikpaketen zur Reduktion der CO₂-Emissionen kombinierbar. Diese sind die elektrische Hybridisierung [HEV], hydraulische Hybridisierung [HBR], Abgaswärmenutzung [WHR] und Gesamtfahrzeugmaßnahmen [EM]. Darüber hinaus ist die Kombination der Gesamtfahrzeugmaßnahmen mit den anderen Technikpaketen möglich, um dem Substitutionspotenzial CO₂-sparender Technologien am Gesamtfahrzeug im Hinblick auf alternative Antriebstechnologien zu berücksichtigen. Abbildung 40 fasst die im Simulationsmodell berücksichtigten Anwendungsfälle und Technologien zusammen. Somit stehen für eine Organisation bis zu 11 diskrete Produktalternativen⁴⁹⁷ von Antrieben mit CO₂-sparenden Technologien zu Auswahl. Diese Auswahl wurde jedoch zur Komplexitätsreduktion entsprechend Kapitel 4.2 eingegrenzt.

Anwendungsfälle	Grundmotorkonzept	Zusätzliche Technikpakete
Fernverkehr [LH]	Diesel [D]	Abgaswärmerückgewinnung [WHR]
Regionaler Verteilerverkehr [RD]	Erdgas [LNG]	Hybrid-Antrieb [HEV]
Städtischer Verteilerverkehr [UD]	Erdgas [CNG]	Hydraulik-Antrieb [HBR]
Baugewerbe [CO]	Elektro [BEV]	Effizienzmaßnahmen [EM] (z.B. Aerodynamik.)
Abfallentsorgungsverkehr [GA]		
Stadtbus [CI]		
Reisebus [CH]		

Abbildung 40: Im Simulationsmodell abgebildete Anwendungsfälle und (Antriebs-) Technologien⁴⁹⁸

⁴⁹⁶ Vgl. zur Auswahl und Erklärung der Sinnhaftigkeit Kapitel 4.2.2.

⁴⁹⁷ Damit sind neben den mit alternativen Kraftstoffen betriebenen Antrieben CNG, LNG und BEV jeweils acht Kombinationen mit einem Dieselmotor verfügbar (ohne zusätzliches Technikpaket, WHR, HEV, HBR, EM, WHR+EM, HEV+EM, HBR+EM). Eine Kombination von WHR oder HEV mit Gasmotoren wird in den kommenden zwei Jahrzehnten nicht angenommen.

⁴⁹⁸ Eigene Abbildung.

Die Anwendungsfälle und Technologien werden über sogenannte *subscripts* in der Modellierungssoftware *Vensim* abgebildet. Mit *subscripts* können für mehrere Instanzen einer Modellvariablen unterschiedliche Werte und mathematische Gleichungen unter Beibehaltung der kausalen Modellstruktur definiert werden.

Als zeitlicher Rahmen erfolgt die Prognose der Marktentwicklung bis 2035 und damit rund 20 Jahre in die Zukunft. Der Rahmen wurde in Anlehnung an Weikl (2010) und Bandivadekar et al. (2008a) gewählt⁴⁹⁹, da über diese Dauer hinaus die Annahmen zur Entwicklung der Fahrzeugtechnik mit hoher Unsicherheit verbunden sind, während in einem kürzen Zeitintervall kaum mehrwertschaffende Aussagen zur Diffusion durch die derzeit langen Entwicklungszyklen in der NFZ-Industrie getroffen werden können. Die Simulation startet im Jahr 2010, da eine weitere Ausdehnung der Vergangenheitssimulation aufgrund der zuvor noch nicht stattfindenden spezifischen Marktaktivitäten zu innovativen Antriebstechnologien keinen Mehrwert liefern würde.

Der konzeptionelle Aufbau des Simulationsmodells vereint die identifizierten endogenen Systemarchetypen *Technologieattraktivität*, *Infrastruktur*, *Vertrautheit* und *Fahrzeugverfügbarkeit* mit den maßgeblichen Akteuren des NFZ-Marktes. Kern des Diffusionsmodells bildet die Kaufentscheidung der NFZ-betreibenden Organisationen. NFZ-betreibende Organisationen sind durch die *Vertrautheit* und Investitionsentscheidung im Simulationsmodell verankert. NFZ-Hersteller determinieren die *Fahrzeugverfügbarkeit* und gestalten wesentlich die *Technologieattraktivität*. Unternehmen in der Kraftstoff- und Energieversorgung sind für den Aufbau der *Betankungsinfrastruktur* verantwortlich. Die Politik als Akteur hingegen wird entsprechend der vorangegangenen Arbeiten auf dem PKW-Markt durch exogene Einflussfaktoren berücksichtigt. Daher ergibt sich mit der Investitionsentscheidung und den vier Systemarchetypen ein fünfgliedriger konzeptioneller Aufbau des Simulationsmodells (vgl. Abbildung 41).

Dieser konzeptionelle Aufbau mit fünf Teilmodellen ist zur besseren Übersichtlichkeit in elf Modellansichten untergliedert, die miteinander über Schattenvariablen verknüpft sind. Anhand dieser Modellansichten, welche teilweise aggregiert und vereinfacht dargestellt sind, wird in den folgenden Unterkapiteln der schematische Aufbau des Gesamtmodells erläutert. Die vollständigen Detailansichten aller Teilmodelle befinden sich im Anhang V.⁵⁰⁰

⁴⁹⁹ Vgl. Bandivadekar (2008a); Weikl (2010).

⁵⁰⁰ Der Großteil der in diesem Kapitel schematisierten Teilmodelle sind aggregiert und vereinfacht dargestellt, um mit den Abbildungen zum logischen Zusammenhang und den mathematischen Gleichungen die formulierten Hypothesen verständlich und nachvollziehbar aufzuzeigen. Die umfassende Darstellung aller im Simulationsmodell berücksichtigten Strukturen und Variablen ist im Anhang V in englischer Sprache zu finden.

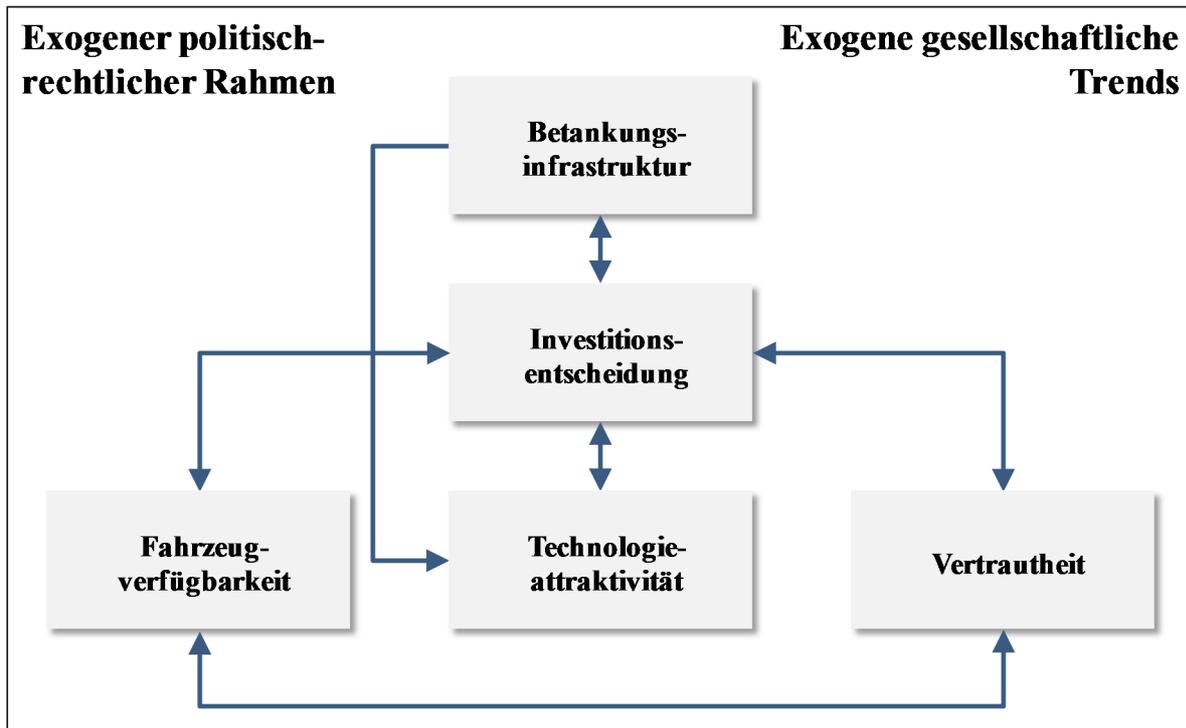


Abbildung 41: Konzeptioneller Aufbau des Gesamtmodells aus Teilmodellen⁵⁰¹

Entsprechend der Systemarchetypen mit den vier Hauptregelkreisen wird die dynamische Hypothese für das System Dynamics Simulationsmodell aufgestellt. Die dynamische Hypothese in Form eines Kausaldiagramms (vgl. Abbildung 42) definiert damit die grundlegenden Marktprozesse der Diffusion CO₂-sparender Technologien auf dem NFZ-Markt. Sie fasst somit die in dieser Forschungsarbeit gewonnenen Erkenntnisse der vorherigen Kapitel zusammen. Die Struktur des Kausaldiagramms ist dabei für alle betrachteten Anwendungsfälle und Technologien gleichermaßen gültig. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Technologien und verschiedenen Anwendungsfällen kommen also nicht durch die logisch funktionalen Zusammenhänge sondern durch eine angepasste Parametrisierung der Modellvariablen zustande. Daher repräsentiert das Kausaldiagramm eine generische Modellstruktur, welche auf andere Länder, Anwendungsfälle und Technologien durch Anpassung der Parametrisierung übertragbar ist.

Das Systemverhalten im Kausaldiagramm ist durch fünf positive (R) und zwei negative Regelkreise (B) determiniert. Ausgehend vom Marktanteil einer Technologie beschreibt der Regelkreis *RI* den Aufbau der Vertrautheit für Technologien durch die NFZ-betreibenden Organisationen. Mit steigendem Marktanteil nimmt die Mund-zu-Mund Propaganda, Beobachtbarkeit und Erprobbarkeit von innovativen Technologien zu. Dies erhöht die wahrgenommene Marktstellung der Innovationen, was wiederum zu einem steigenden Marktanteil führt.

⁵⁰¹ Eigene Abbildung.

Ökonomische Attraktivität		Nutzen Transportaufgabe		Technologie Image	
Betriebskosten	Anschaffungspreis	Anwenderfreundlichkeit	Nützlichkeit	grün	innovativ
<ul style="list-style-type: none"> • Kraftstoffkosten • Steuern • Wartung 	<ul style="list-style-type: none"> • Komponenten Kosten • Hersteller Marge 	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastruktur • Reichweite • Servicenetz • Zuverlässigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzlast • Volumen • Lärm • Drehmoment • Wettbewerbs Position 	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-Emissionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Marktdurchdringung • Nutzerbasis

Abbildung 43: Konzeptioneller Aufbau des Systemarchetyps der Technologie Attraktivität⁵⁰³

Der positive Regelkreis *R3* repräsentiert den Auf- oder Abbau eines breiten Modellportfolios mit den innovativen Technologien, welche für die Kunden in der Investitionsentscheidung für neue NFZ verfügbar sind. Mit zunehmendem Marktanteil einer Technologie steigt das Interesse der Hersteller in diese zu investieren, da sich größere Absatzchancen und somit Gewinnerzielungswahrscheinlichkeiten ergeben. Durch das erhöhte Angebot einer Technologie am Markt steigt wiederum die Kaufwahrscheinlichkeit durch Nutzer und somit der Marktanteil.

Die Entwicklung der Betankungsinfrastruktur hängt maßgeblich mit der derzeitigen Nutzerbasis der zugrunde liegenden Antriebstechnologien durch die externen indirekten Netzwerkeffekte zusammen und ist dadurch vom Marktanteil abhängig. Mit steigendem Marktanteil erhöhen sich die Gewinnaussichten aus dem Aufbau einer Tankstelle und führen zu einer besseren Marktstellung der Antriebstechnologie (*R4a*). Gleichzeitig tritt mit zunehmender Anzahl an Tankstellen eine Sättigung am Markt ein, sodass die Aufbaurrate dieser sinkt, was durch den negativen Regelkreis *B4b* beschrieben ist.

In den folgenden Unterkapiteln wird mittels des konzeptionellen Modellaufbaus die Operationalisierung des qualitativen Kausaldiagramms in eine quantitative Modellierung, anhand der detaillierten funktionalen Zusammenhänge und mathematischen Gleichungen, vorgestellt.

Das generische Gesamtsystem wird dabei anhand des Zustands von 12 Bestandsvariablen⁵⁰⁴ beschrieben, welche durch den Zu- und Abfluss der entsprechenden Flussvariablen (24) verändert werden. Die Flussvariablen sind durch weitere 17 zentrale endogene Variablen (Marktanteil, Image, Auswahlwahrscheinlichkeit etc.) determiniert, welche wiederum durch die Bestandsvariablen berechnet werden. Darüber hinaus sind zahlreiche Hilfsvariablen zur besseren Nachvollziehbarkeit implementiert. Das resultierende Gesamtsystem der abhängigen Variablen wird durch 15 exogene Parameter, Szenariovariablen sowie die exogenen Kosten- und Nutzendaten der Technologien bedingt.

⁵⁰³ Eigene Abbildung.

⁵⁰⁴ Zur besseren Übersichtlichkeit- und Nachvollziehbarkeit sind die Bestandsvariablen zu den technologie-spezifischen Kosten und dem Kraftstoffverbrauch sowie den Altersklassen des NFZ-Bestandes auf mehrerer Bestandsvariablen aufgeteilt worden. Somit ergeben sich in Summe 21 Bestandsvariablen.

Somit ergibt sich für den Systemzustand \vec{B} ein Gleichungssystem aus gekoppelten, nichtlinearen Differentialgleichungen 1. Ordnung. Durch die Modellierungssoftware *Vensim* wird die Systemmatrix aufgestellt, diagonalisiert (und damit die Differentialgleichung linearisiert) sowie gelöst. Eine Bestandsvariable B_i zum Zeitpunkt t ist durch einen Initialbestand $B_i(t_0)$ sowie die Integration der Flussgrößen (Zufluss Z_i und Abfluss A_i) über die Dauer eines Zeitschritts s definiert:

$$\begin{aligned}\vec{B} &= (B_1, \dots, B_i, \dots, B_{12}) \quad i = 1, \dots, 12 \\ B_i(t) &= B_i(t_0) + \int_{t_0}^t (Z_i(s) - A_i(s)) ds \quad \text{bzw.} \\ \frac{dB_i}{dt} &= (Z_i(t) - A_i(t))\end{aligned}$$

Die Flussgrößen und die endogenen Variablen \vec{V} sind vom Systemzustand, und damit wiederum von allen Bestandsvariablen, sowie den exogenen Parametern \vec{c} abhängig:

$$\begin{aligned}Z_i(t) &= f(\vec{B}(t), \vec{V}(t), \vec{c}) \\ A_i(t) &= g(\vec{B}(t), \vec{V}(t), c) \quad \text{und} \\ \vec{V}(t) &= h(\vec{B}(t), c) \quad \text{mit } \vec{V} = (V_1, \dots, V_j, \dots, V_{17}), \quad j = 1, \dots, 17\end{aligned}$$

Die wesentlichen funktionalen Abhängigkeiten und mathematischen Gleichungen des Gesamtsystems werden anhand dieser Erläuterungen im Folgenden vorgestellt.

7.2.2 Investitionsentscheidung

Die Auswahlentscheidung von NFZ-betreibenden Organisationen in CO₂-sparende Technologien bei der Investition in neue NFZ ist entsprechend eines diskreten Entscheidungsmodells implementiert. Das Multinomial Logit Modell (MNL) ist in der Prognose der Technologiediffusion eines der gängigsten Modelle und wird daher auch in der vorliegenden Untersuchung angewendet.⁵⁰⁵ Diskrete Entscheidungsmodelle sind in diesen Untersuchungen überwiegend zur Erklärung und Prognose von Kaufentscheidungen im B2C Kontext angewendet worden. Die Auswahlentscheidung einer Organisation wird daher von der individuellen Ebene auf die multipersonelle Ebene des *buying centers* erweitert, sodass die komplexen Entscheidungsprozesse innerhalb des Entscheidungsgremiums vernachlässigt werden und infolgedessen auf Organisationen anwendbar sind.⁵⁰⁶ Untersuchungen haben gezeigt, dass das organisationale Kaufverhalten stark mit den Präferenzen der Top-Entscheider und Einkäufer in der Organisation korreliert und somit anhand dieser abgeschätzt werden kann.⁵⁰⁷

Das organisationale Entscheidungsgremium trifft die Auswahlentscheidung über CO₂-sparende Technologien aus der Menge aller verfügbaren und in Erwägung gezogener Alternativen, dem

⁵⁰⁵ Vgl. Kapitel 3.3.4.

⁵⁰⁶ Vgl. *Ben-Akiva und Bierlaire* (1999), S. 6

⁵⁰⁷ Vgl. *Hansen* (2004).

sogenannten *choice set*.⁵⁰⁸ Das *choice set* ist also eine Teilmenge des universellen Auswahlsets, das aufgrund mangelnder *Fahrzeugverfügbarkeit* und *Vertrautheit* um nicht in Erwägung gezogene Alternativen reduziert wird. Die Bildung des *choice set* erfolgt sowohl endogen als auch exogen, da Alternativen, die technologisch nicht den Anforderungen entsprechen, im Rahmen der Definition der Technikpakete (vgl. Kapitel 4.2.2) von Beginn an ausgeschlossen wurden. Die Wahrscheinlichkeit $p_{CS}^{A,K}(T)$, dass eine Produktalternative T in das *choice set* CS durch eine Organisation K im Anwendungsfall A aufgenommen wird, ist daher durch folgenden mathematischen Zusammenhang der *Fahrzeugverfügbarkeit* $FV^{A,K}(T)$ und *Vertrautheit* $E^{A,K}(T)$ definiert:

$$p_{CS}^{A,K}(T) = FV^{A,K}(T) \times E^{A,K}(T) \tag{7.1}$$

Die Auswahlentscheidung eines organisationalen Entscheidungsgremiums wird anhand einer auf der Nutzentheorie basierenden Entscheidungsregel zur Bewertung der Produktalternative beschrieben. Dabei wird angenommen, dass das Entscheidungsgremium diejenige Produktalternative mit dem höchsten wahrgenommenen Wert, oder Nutzen, auswählt. Die im Simulationsmodell angenommene dekompositionelle Entscheidungsregel ist anhand des MNL Modells⁵⁰⁹ implementiert. Dabei wird der deterministische Gesamtnutzen einer Produktalternative $N^{A,K}(T)$ in mehrere Teilnutzenwerte für n Produktattribute $TN_n^{A,K}(T)$ herunter gebrochen. Die Teilnutzenwerte werden anhand einer linear-additiven, kompensatorischen Verknüpfungsfunktion und einem Gewichtungparameter $\beta^{A,K}$ zum Gesamtnutzen aggregiert:

$$N^{A,K}(T) = \sum_n \beta_n^{A,K} \times TN_n^{A,K}(T) \tag{7.2}$$

Entsprechend Kapitel 5 werden für die Teilnutzenwerte der Anschaffungspreis, die Kraftstoffkosten, die erwartete Nützlichkeit, die erwartete Anwenderfreundlichkeit und das Image eine Produktalternative gewählt. Hierbei unterscheiden sich die Organisationen in einem Anwendungsfall durch ihre Adoptionsneigung und werden daher in die Adopterkategorien *Frühe Adopter* und *Massenmarkt* unterteilt. Die Wahrscheinlichkeit $p^{A,K}(T)$, dass eine Organisation im Anwendungsfall A und aus der Adopterkategorie K eine Produktalternative T unter den unabhängigen Alternativen $m \in \text{choice set}$ auswählt, ergibt sich damit aus dem aggregierten deterministischen Gesamtnutzen $N^{A,K}(T)$, der stochastischen, nicht-beobachtbaren Nutzenkomponente ε und der Wahrscheinlichkeit der Aufnahme in das *choice set* $p_{CS}^{A,K}(T)$:

$$p^{A,K}(T) = \left(\frac{e^{N^{A,K}(T)}}{\sum_{m \in CS} (e^{N^{A,K}(m)})} \right) \times p_{CS}^{A,K}(T) \tag{7.3}$$

⁵⁰⁸ Vgl. *Ben-Akiva und Bierlaire* (1999), S. 6 und Kapitel 5.3.1.

⁵⁰⁹ Vgl. Kapitel 5.3.1.

$$\text{mit}^{510} U^{A,K}(T) = \varepsilon + N^{A,K}(T) = e^{N^{A,K}(T)}$$

7.4

Die Modellansicht zur Berechnung der Investitionsentscheidung sowie der daraus resultierenden Marktanteile ist entsprechend dem erläuterten Nutzenmodell aufgebaut. Die in anderen Modellansichten berechneten Teilnutzenwerte werden über Schattenvariablen in die Ansicht integriert und zu einem Gesamtnutzen aggregiert. Aus Gesamtnutzen und der Wahrscheinlichkeit der *choice set* Zugehörigkeit, ergibt sich die Auswahlwahrscheinlichkeit für alle betrachteten Produktalternativen in den unterschiedlichen Anwendungsfällen. Mittels der Verteilung ∂ der Adopterkategorien *Frühe Adopter* (*inno*=16 %) und *Massenmarkt* (*Main*=84 %) sowie der Auswahlwahrscheinlichkeit, wird der Marktanteil *MA* einer Produktalternative in einem Anwendungsfall berechnet:

$$MA(T) = \partial^{Inno} \frac{p^{A,inno}(T)}{\sum_{a \in A} [\sum_{m \in CS} (p^{a,inno}(m))]} + \partial^{Main} \frac{p^{A,Main}(T)}{\sum_{a \in A} [\sum_{m \in CS} (p^{a,Main}(m))]}$$

7.5

Die Marktanteile der einzelnen Produktalternativen lassen sich nun durch Aufsummierung der jeweiligen *subscripts* zur Berechnung des Marktanteils im spezifischen Anwendungsfall auswerten. Darüber hinaus wird der Marktanteil einer Technologie im Gesamtmarkt berechnet. Für einen Vergleich der Vorjahres Marktanteile mit den aktuellen Marktanteilen wird der *Marktanteil t-1* aus dem Vorjahr gespeichert. Abbildung 44 fasst diese Modellansicht schematisch zusammen.

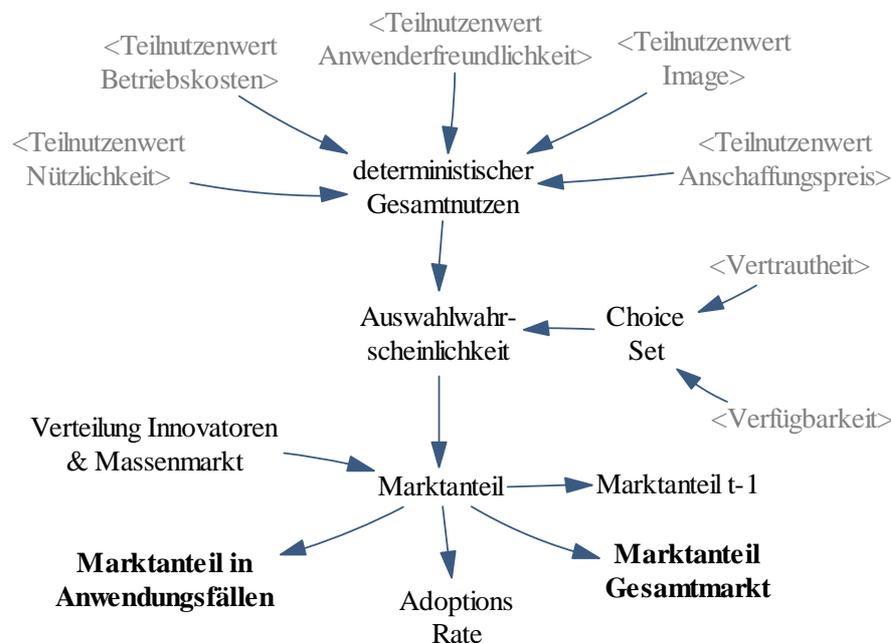


Abbildung 44: Berechnung des Marktanteils

⁵¹⁰ U ist der Gesamtnutzen aus stochastischer und deterministischer Nutzenkomponente.

Der Marktanteil einer Produktalternative bildet die Grundlage zur Bestimmung der aktuellen Nutzerbasis der betrachteten Technologien. Dazu werden die endogen bestimmten Marktanteile mit dem exogen vorgegebenen Gesamtabsatz an neu zugelassenen NFZ und der Verteilung der Anwendungsfälle multipliziert, um die Anzahl neu zugelassener NFZ mit einer Technologie zu errechnen. Die Neuzulassungen von LKW sind entsprechend der heutigen Prognose des in der Automobilindustrie anerkannten Informationsunternehmens IHS bis 2025 angenommen und werden von 2023 bis 2025 auf 2035 extrapoliert. Für Busse sind keine Prognosen erhältlich, weshalb die Neuzulassungen der Jahre 2010 bis 2013 entsprechend dem Trend der LKW Neuzulassungen approximiert werden. Die angenommene Entwicklung der Neuzulassungen von LKW und Bussen zeigt Abbildung 45.

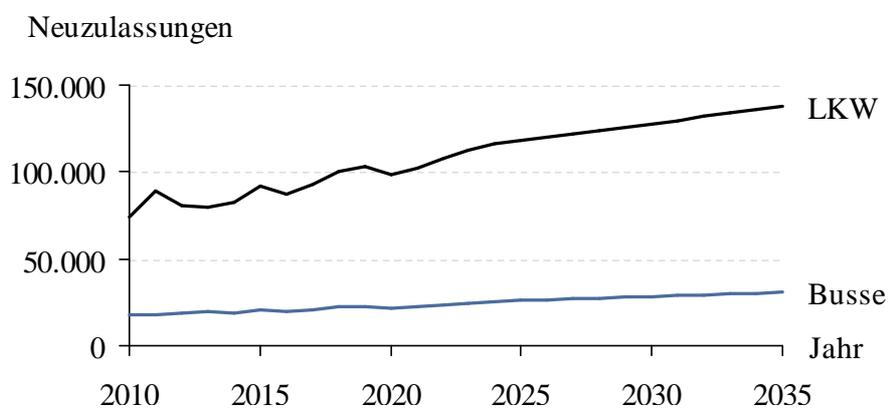


Abbildung 45: Prognostizierte Neuzulassungen von LKW und Bussen in Deutschland⁵¹¹

Des Gesamtbestand G der NFZ mit Antriebstechnologie und Technikpakete i im Alter von n Jahren zum aktuellen Zeitpunkt t ist in Anlehnung an Weikl (2010) implementiert.⁵¹² Dieser ergibt sich für jede Altersklasse aus dem Anfangsbestand G_{2010}^i im Jahr 2010, dem Zufluss an NFZ aus der nächst jüngeren Altersklasse respektive Neuzulassungen abzüglich der von der spezifischen Verschrottungsrate v abhängigen Abmeldungen und Verschiebungen in die nächst ältere Altersklasse.

$$G_n^i(t) = G_{2010}^i(t_0) + \int_{t_0}^t (G_{n-1}^i(t_0) - v_{n-1} \times G_{n-1}^i(t_0) - G_n^i(t_0))$$

7.6

Verschrottungen umfassen in diesem Kontext alle Gründe für die Abmeldungen von NFZ, wie beispielweise Totalschäden oder Export von NFZ. Der Export von Gebrauchtfahrzeugen spielt für den deutschen NFZ-Markt eine bedeutende Rolle. 39 % des gebrauchten NFZ-Bestandes wurde 2013 ins Ausland exportiert.⁵¹³ Nach der Erstverwendung entsprechend der durchschnitt-

⁵¹¹ Eigene Abbildung mit Daten von IHS Automotive für LKW 2010 bis 2025 und Busse von 2010 bis 2014.

⁵¹² Die Modellierung des NFZ-Bestandes ist im Simulationsmodell in enger Anlehnung an die Struktur und den mathematischen Zusammenhang von Weikl (2010), S. 77–78 erfolgt.

⁵¹³ Vgl. Schwenke (2013), S. 4, online.

lichen Nutzungsdauer in den Anwendungsfällen (vgl. Abbildung 4, S. 9) wird ein Großteil der NFZ nach Osteuropa (46 %) sowie Afrika und Asien (29 %) verkauft.⁵¹⁴ Der Import von gebrauchten NFZ in den deutschen Markt spielt eine zu vernachlässigende Rolle. In Anlehnung an Weikl (2010) und Bandivadekar (2008b) ist die Verschrottungsrate v aus der Nutzungsdauer λ und einer Konstanten θ determiniert, welche bestimmen, wann ein NFZ das System verlässt⁵¹⁵:

$$v_n = \frac{\theta}{(1 + e^{-\theta(n-\lambda)})}$$

7.7

Abbildung 46 zeigt schematisch die Umsetzung im Simulationsmodell:

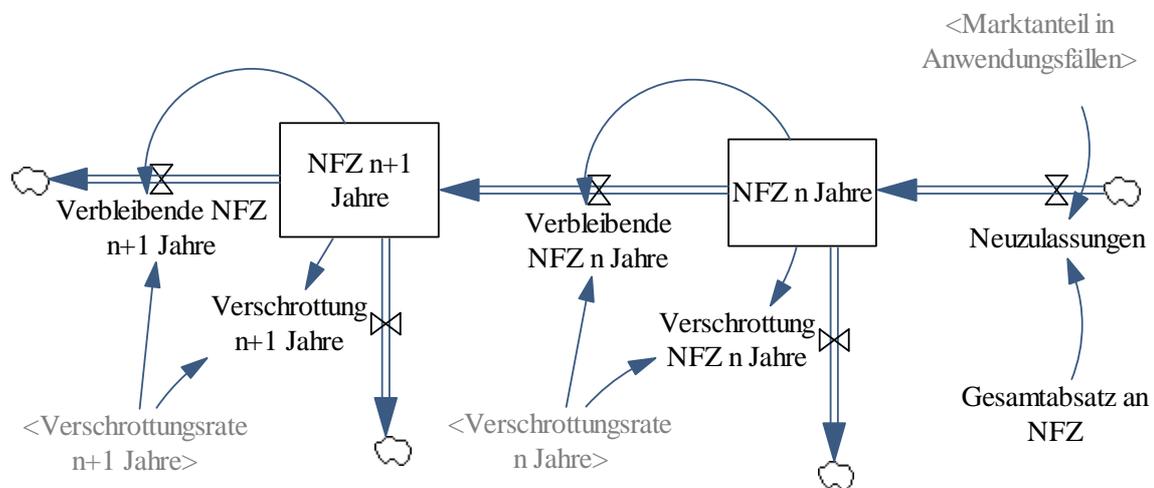


Abbildung 46: NFZ-Bestand und Nutzerbasis von Technologien

7.2.3 Kundenvertrautheit

Das *choice set* der Auswahlentscheidung von NFZ-betreibenden Organisationen für Produktalternativen ist maßgeblich durch die Vertrautheit der Entscheider mit den Technologien verbunden. Struben (2006b) definierte Vertrautheit als den kognitiven und emotionalen Prozess, durch welchen PKW-Fahrer ausreichende Informationen, Verständnis und emotionale Bindung zu einer Technologie aufbauen, um diese für Kaufentscheidungen in Erwägung zu ziehen.⁵¹⁶ Die Kundenvertrautheit spielt nicht nur im B2C Kontext, sondern auch für organisationale Beschaffungsvorgänge eine Rolle. NFZ Fahrer tauschen ihre Erfahrungen über Fahrzeuge und Technologien untereinander aus, Entscheidungsträger von NFZ-betreibenden Organisationen informieren sich auf Messen oder bei Händler über neueste Entwicklungen der NFZ-Technik und tragen

⁵¹⁴ Vgl. VDA (2013), S. 51–52.

⁵¹⁵ Vgl. Weikl (2010), S. 78; Bandivadekar (2008b), S. 45.

⁵¹⁶ Vgl. Struben (2006b), S. 18 definierte die Vertrautheit (familiarity) im Englischen als einen “cognitive and emotional process through which drivers gain enough information about, understanding of, and emotional attachment to a platform for it to enter their consideration set.”

somit Wissen über neue Antriebstechnologien in die Organisation. Weiterhin wurde durch die Interviews in Kapitel 6.3 und die quantitative Studie zum Adoptionsverhalten in Kapitel 5.2 deutlich, dass Tests und die Erprobbarkeit von alternativen Antriebstechnologien deren Adoption signifikant erhöht. Theoretische Erkenntnisse unterstützen ebenso die Bedeutung der Vertrautheit durch die Konstrukte der Erprobung (*trialability*) und der Beobachtbarkeit (*observability*) in der Technologie Diffusion.⁵¹⁷ Daher werden die sogenannte Mund-zu-Mund Propaganda (*word-of-mouth*) und Marketing für die Adoption alternativer Antriebstechnologien auf den B2B Kontext übertragen.

Hierbei wird die Modellimplementierung von Struben (2006a) für den PKW-Markt weitestgehend unverändert auf den NFZ-Markt übertragen.⁵¹⁸ Der auf dem *Bass Diffusion Modell* basierende Systemarchetyp wird allerdings durch die Betrachtung der zwei Adopterkategorien *Frühe Adopter* und *Massenmarkt* erweitert, um die Erkenntnisse der empirischen Untersuchungen zu berücksichtigen. Innovative Organisationen sind weniger risikoavers und informieren sich aktiv über neue Technologien, um ihren Geschäftsbetrieb zu verbessern. Folglich steigt die Vertrautheit dieser Gruppe von *Frühen Adoptern* schneller als die von eher konservativeren Organisationen des Massenmarktes an. Im Vergleich zum PKW-Markt sind die Kontaktrate und Sozialisierung zwischen den Marktteilnehmern allerdings geringer ausgeprägt als zwischen der hohen Anzahl an Autofahrern innerhalb einer Gesellschaft. Dieses Phänomen wurde durch eine angepasste Parametrisierung berücksichtigt.

Durch Kontakt mit Anwendern der Technologien oder Dritten sowie Marketingaktivitäten nehmen Organisationen neue Technologien wahr (Sozialisierung). In Abhängigkeit der Adopterkategorien führt diese zunehmende Wahrnehmung zu einer unterschiedlichen Akzeptanz der Organisationen für die Technologie. Die Akzeptanz determiniert wiederum den Aufbau der Vertrautheit. Mit zunehmender Dauer kann eine sinkende Wahrnehmung durch geringere Marketingaktivitäten und weniger Kontaktpunkte durch eine sinkende Nutzerbasis auch zu einem Abbau der Vertrautheit führen

Vereinfacht ist der mathematische Zusammenhang der Vertrautheit $E_t^{A,K}(T)$ zum Zeitpunkt t durch die Aufbaurrate $\Phi_t^{A,K}(T)$ und Abbaurate $\Omega_t^{A,K}(T)$ determiniert. Die Abbaurate ist analog Struben (2006a) implementiert, die Aufbaurrate durch die unabhängigen Faktoren Werbung W , Sozialisierung der Verwender S_V und Nicht-Verwender S_{nV} sowie einer Risikoaversionsfunktion g des Massenmarkts in Abhängigkeit des Marktanteils MA_t einer Produktalternative T gegeben:

$$E_t^{A,K}(T) = E_{t-1}^{A,K} + (1 - E_{t-1}^{A,K}(T)) \Phi_t^{A,K}(T) - E_{t-1}^{A,K}(T) \times \Omega_t^{A,K}$$

7.8

$$\text{mit } \Phi_t^{A,K}(T) = (W_t(T) + S_{t,nV}^A(T) + S_{t,V}^A(T) - g(MA_t(T)))$$

⁵¹⁷ Vgl. Rogers (2003), S. 221–222; Frambach und Schillewaert (2002), S. 167 und Kapitel 3.

⁵¹⁸ Vgl. Struben (2006a), S. 18–21 für ausführliche mathematische Gleichungen.

Abbildung 47 zeigt schematisch die Umsetzung im Modell

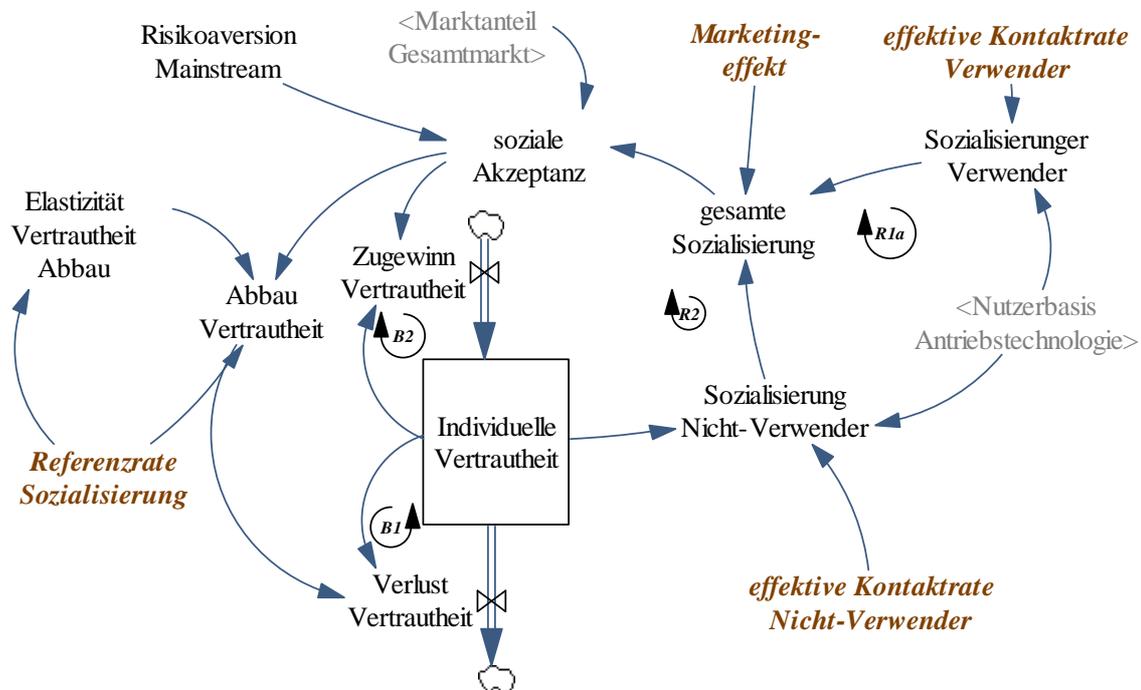


Abbildung 47: Implementierung der Kundenvertraulichkeit im Simulationsmodell

7.2.4 Verfügbarkeit der Technologien

Das organisationale Adoptionsverhalten ist über die generelle Verfügbarkeit und dem damit verbundenen Angebot einer Innovation am Markt determiniert. Auf den NFZ-Markt übertragen bedeutet dies, dass für eine Organisation nicht nur ein Fahrzeugmodell eines Herstellers in einer Leistungsklasse ausreichend ist. Das zu kaufende NFZ muss hinsichtlich Leistung, Drehmoment und Aufbauart dem Transportgewicht und Fahrstreckenprofil entsprechend ausgelegt werden. Des Weiteren spielt die Kompatibilität mit dem Fuhrpark eine wesentliche Rolle. NFZ-betreibende Organisationen folgen zum Teil bewusst einer Ein-Marken-Strategie, um den Schulungsaufwand und die Vorratshaltung von Ersatzteilen für die betriebseigene Werkstatt zu minimieren. Daher ist also eine breite Modellpalette in unterschiedlichen Motorleistungsklassen über alle Hersteller notwendig, damit eine alternative Antriebstechnologie ohne Einschränkungen durch alle NFZ-betreibenden Organisationen adoptiert werden kann.

Die Verbreitung einer innovativen Technologie im Modellportfolio der Hersteller ist direkt abhängig von deren Interesse und dem erwarteten Absatzpotenzial dieser Technologien. Die maßgeblichen Kriterien sind daher der aktuelle Marktanteil unter den Neuzulassungen sowie die Wahrscheinlichkeit der Kunden eine alternative Antriebstechnologie bei der Investitionsentscheidung in neue NFZ in Erwägung zu ziehen (Vertraulichkeit). Angesichts der bevorstehenden

CO₂-Gesetzgebung werden die NFZ-Hersteller bestrebt sein die Effizienz ihrer Fahrzeugflotte signifikant zu steigern und damit zunehmend Technologien mit hohem CO₂-Reduktionspotenzial in ihr Portfolio aufzunehmen, um den Anschluss gegenüber dem Wettbewerb nicht zu verlieren. Darüber hinaus führen ein langfristig steigender Rohölpreis und eine etwaige Marktdurchdringung alternativer Antriebskonzepte auf dem PKW-Markt zu einem steigenden Herstellerinteresse an alternativer Antriebstechnologie. Hemmnisse für die Verbreitung können eine schlechte aktuelle bis mittelfristige finanzielle oder gesamtwirtschaftliche Situation sein, da mutige Produktentscheidungen und hohe Entwicklungsbudgets vermieden werden.⁵¹⁹ Ebenso führen sinkende Marktanteile von Antriebstechnologien in einem Anwendungsfall zur Verringerung des Herstellerinteresses und damit der Verfügbarkeit. Daher wird bei einer abschwächenden Marktentwicklung das Interesse der Hersteller entsprechend einer exogen angegebenen Referenzrate sinken.

Mehrjährige Entwicklungszyklen und langfristige Fahrzeuggenerationen limitieren die Verbreitungsgeschwindigkeit alternativer Antriebstechnologien. Die exogenen Einflussfaktoren einer gesamtwirtschaftlichen Entwicklung und der Interdependenzen mit dem PKW-Markt werden aufgrund der hohen Unsicherheit und Volatilität nicht im Simulationsmodell berücksichtigt. Abbildung 48 zeigt die schematische Umsetzung der wesentlichen Zusammenhänge:⁵²⁰

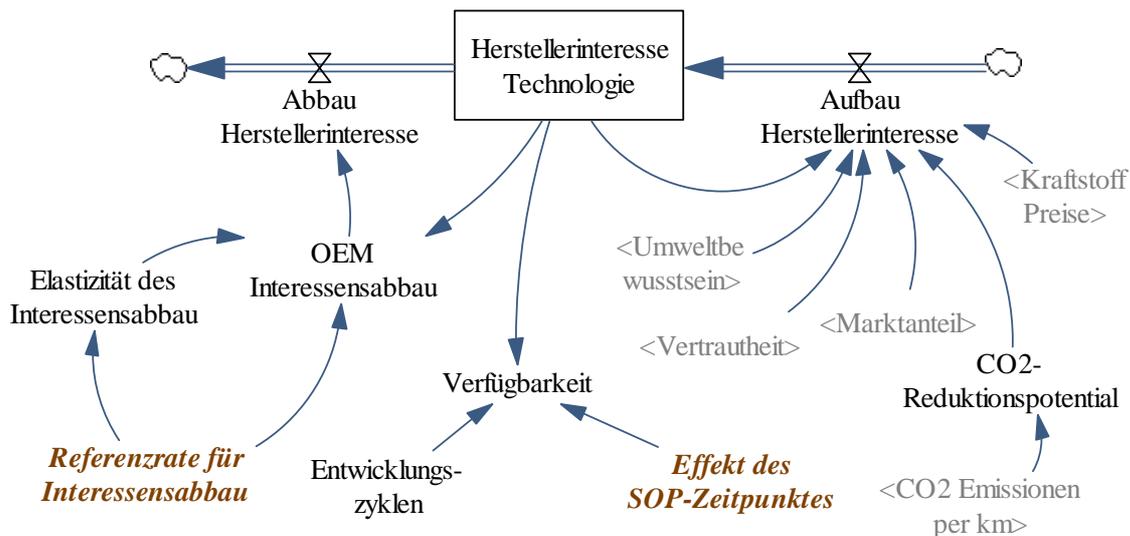


Abbildung 48: Herstellerinteresse und Verfügbarkeit alternativer Antriebstechnologien

Die Operationalisierung des Herstellerinteresses in einen mathematisch funktionalen Zusammenhang erfolgt anhand einer Bestandsvariablen in Anlehnung an Weikl (2010).⁵²¹ Der Aufbau des Interesses ist durch den aktuellen Trend der Marktanteilsentwicklung ΔMA^A , die Vertrautheit der Kunden E^A als Maß für zukünftige Erwägung und Intention der Kunden in diese zu investie-

⁵¹⁹ Vgl. Seitz (2012), S. 38.

⁵²⁰ Eine ausführliche Modellansicht findet sich in Abbildung 79 im Anhang V 2).

⁵²¹ Vgl. Weikl (2010), S. 80–81.

ren, die Veränderung der Kraftstoffpreise ΔKP , das CO₂-Reduktionspotenzial der Technologie und der exogenen Variable der Veränderung des Umweltbewusstseins ΔU in der Gesellschaft definiert. Es wird angenommen, dass diese Einflussfaktoren voneinander unabhängig sind. Die Ausnahme bildet das CO₂-Reduktionspotenzial δ_t^A , welches zwingend vorhanden sein muss, damit gegenwärtig und zukünftig eine Antriebstechnologie im Interesse der Hersteller steigt. Entsprechend beschreibt folgender mathematische Zusammenhang den Aufbau des Herstellerinteresses $\zeta_{t, auf}^A(T)$:

$$\zeta_{t, auf}^A(T) = (1 - O_t^A(T)) \times (E_t^A(T) + \Delta MA_t^A(T) + \Delta KP_t + \Delta U_t) \times \delta_t^A(T)$$

7.10

Ein erhöhtes Herstellerinteresse schlägt sich erst nach einigen Jahren aufgrund des Zeitverzugs durch Entwicklungszyklen und die Dauer der Modellgenerationen in einer erhöhten Verfügbarkeit FV jeder Technologie in einem Anwendungsfall nieder. Die Verfügbarkeit nimmt wie das Herstellerinteresse Werte im Intervall $[0,1]$ an. Als Entwicklungszyklus wurde eine Dauer von 5 Jahren angenommen und über einen *delay-fixed*⁵²² im Simulationsmodell implementiert.⁵²³

7.2.5 Betankungsinfrastruktur

Die Betankungsinfrastruktur für alternative Kraftstoffe wurde als Systemarchetyp basierend auf Janssen (2005)⁵²⁴ sowie Keles et al. (2008)⁵²⁵ vom PKW-Markt übernommen und auf den NFZ-Markt spezifisch adaptiert. Eine räumliche Disaggregation der Tankstellen entsprechend dem Modell von Struben (2006a)⁵²⁶ wurde nicht vorgenommen, da die Fahrtstrecken von NFZ von einer höheren Vorhersehbarkeit geprägt sind und NFZ-betreibende Organisationen Tankkarten ausgewählter Mineralölunternehmen nutzen oder Verträge mit einigen wenigen Tankstellenbetreibern abschließen. Eine zusätzliche Disaggregation hätte darüber hinaus detaillierte Kenntnisse der Transportströme erfordert. Der vereinfachte Ansatz einer exogenen Funktion der Tankstellendichte in Abhängigkeit des Marktanteils würde der hohen Bedeutung der Tankstellendichte nicht gerecht werden.⁵²⁷ Keles et al. (2008) unterteilten die Betankungsinfrastruktur in städtische Tankstellen und Autobahntankstellen. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Fahrprofile von NFZ in den Anwendungsfällen wird dieses Konzept hier ebenso berücksichtigt, denn während Fernverkehrsfahrzeuge und Reisebusse fast ausschließlich auf Tankstellen in Autobahnnähe angewiesen sind, tanken Stadtbusse, Abfallsammelfahrzeuge und städtische Verteilerfahrzeuge meist nur

⁵²² Delay-fixed ist eine dynamische Funktion der Modellierungssoftware Vensim. Eine ausführliche Beschreibung der Modellierungssoftware und ihrer umfangreichen Werkzeug ist im Online-Handbuch zu finden: <https://www.vensim.com/documentation/index.html>

⁵²³ Vgl. Weikl (2010), S. 81; Sterman (2000), S. 432–434.

⁵²⁴ Vgl. Janssen (2005).

⁵²⁵ Vgl. Keles et al. (2008).

⁵²⁶ Vgl. Struben (2006a).

⁵²⁷ Vgl. beispielsweise in Weikl (2010).

auf dem Betriebshof oder an städtischen Tankstellen. Der Bauverkehr und regionale Verteilerverfahrzeuge sind auf beide Tankstellen angewiesen und daher entsprechend der Verteilung des Fahrprofils, auch anteilig auf städtische und autobahnahe Tankstellen umgerechnet.

Vereinfachend wird darüber hinaus angenommen, dass alle betriebseigenen Tankstellen den städtischen Tankstellen zuzurechnen sind. Um eine höhere Auslastung und damit eine schnellere Amortisation der Tankstelleninvestitionskosten zu erreichen, werden NFZ-betreibende Organisationen ihre Gastankstellen zur öffentlichen Nutzung durch betriebsfremde NFZ freigegeben. Für frühe Adopter in kommunalen Anwendungsfällen ist dies heute schon der Fall.

Das grundlegende Konzept eines *Bass Diffusion Modells* für die Tankstelleninfrastruktur ist sowohl für städtische wie autobahnahe Tankstellen, als auch die verschiedenen Energieträger analog aufgebaut. Die Menge potentieller Adopter alternativer Tankstellen hängt von der Anzahl ökonomisch motivierter sowie proaktiver Tankstellen- und Fuhrparkmanager ab. Der Anteil proaktiver Manager ist entsprechend der empirischen Erkenntnisse für städtische Tankstellen aufgrund einer höheren Dichte an *Lead User* größer, da diese vermehrt und proaktiv in betriebs-eigene Tankstellen investieren. Die Anzahl ökonomisch motivierter Manager ist durch die erwartete Profitabilität $PR_t^R(T)$ einer Tankstelle determiniert, welche sich aus dem Erlös aus Kraftstoffverkauf abzüglich der Abschreibung der Tankstellentechnologie (Investitionskosten I und Kapitalkosten k über die Amortisationsdauer d) und den fixen Betriebskosten berechnet.⁵²⁸

$$PR_t^R(T) = \frac{ER_t^R(T) - k \times I(T) \times \left(0,5 + \frac{1}{d}\right) - \frac{I(T)}{d}}{I(T) \times \left(0,5 + \frac{1}{d}\right)}$$

7.11

Die Erlöse aus dem Kraftstoffverkauf pro Tankstelle $ER_t^R(T)$ einer Technologiebasis T (CNG, LNG, BEV) der regionalen Zugehörigkeit R (Autobahn vs. Stadt) werden durch die derzeitige Nutzerbasis B_t^n und deren Kraftstoffverbrauch FC_t^A , den erbauten Tankstellen $B_t^n(T)$ sowie der Gewinnspanne pro abgesetzter Einheit Kraftstoff ξ zum Zeitpunkt t , dividiert durch die Anzahl an Tankstellen FS_t für Technologie T , berechnet.

$$ER_t^R(T) = \frac{\sum_{i=1}^n (B_t^n(T)) \times FC_t^A(T) \times \xi(T)}{FS_t(T)}$$

7.12

Der Zusammenhang von Profitabilität und potentieller Adopter ist durch die Wahrscheinlichkeit, dass Tankstellen- oder Fuhrparkmanager Betankungsinfrastruktur für alternative Kraftstoffe adoptieren, in Anlehnung an die von Janssen (2005) determinierte Funktion, implementiert (vgl. Abbildung 49).⁵²⁹

⁵²⁸ Vgl. Janssen (2005).

⁵²⁹ Vgl. Janssen (2005), S. 286.

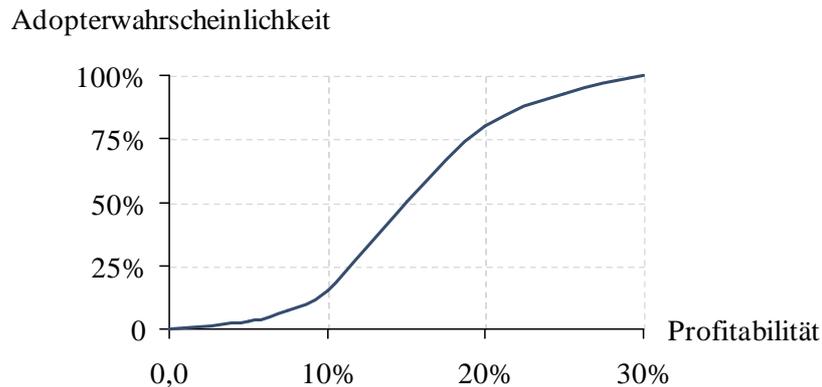


Abbildung 49: Funktion zum Zusammenhang von Profitabilität und potentieller Adopter

Die potentiellen, motivierten Adopter einer alternativen Tankstelle werden durch Mund-zu-Mund Propaganda und Marketing nun auf diese aufmerksam und determinieren damit die Adoptionsrate. Die Bestandsvariable zum Tankstellenbestand für alternative Kraftstoffe in Deutschland ergibt sich aus dem Bau und Abbau von Tankstellen. Der Abbau von Tankstellen erfolgt entweder nach Ablauf der Nutzungsdauer oder bei zu geringer Profitabilität der Tankstellen im Markt. Mittels der erwarteten Tankstellenanzahl im Vergleich zu konventionellen Tankstellen in Deutschland ergibt sich mit einer Nutzenfunktion⁵³⁰ für die Betankungsinfrastruktur der Teilnutzenwert der Tankstellendichte. Abbildung 50 verdeutlicht das Teilmodell schematisch.

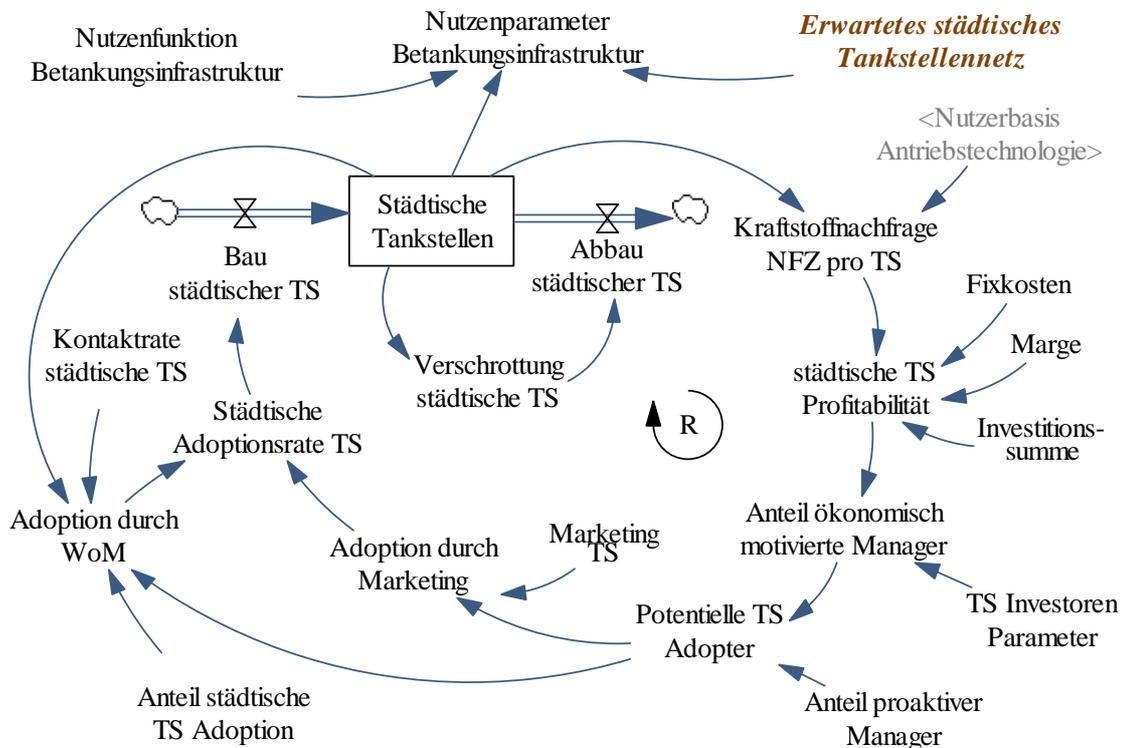


Abbildung 50: Darstellung des Teilmodells Betankungsinfrastruktur am Beispiel städtische Tankstellen

⁵³⁰ Vgl. Abbildung 78 im Anhang V 1).

7.2.6 Attraktivität der Technologien

7.2.6.1 Ökonomische Attraktivität

Die ökonomische Attraktivität einer Technologie ist durch den Anschaffungspreis und die Kraftstoffkosten determiniert.⁵³¹ Der Anschaffungspreis einer Produktalternative setzt sich aus den Komponentenkosten des Grundmotors, etwaiger zusätzlicher Technikpakete, dem technologieabhängigen Preiszuschlag der Hersteller und Strafzahlungen bei Überschreitung von etwaiger CO₂-Grenzwerte zusammen. Die Komponentenkosten von Grundmotor und Technikpaketen errechnen sich entsprechend des Lernratenkonzeptes endogen, ausgehend von den Referenzkosten aus den Technikpaketen für das Jahr 2020.

Das Grundkonzept der Lernrate beschreibt das Phänomen, dass sich mit steigender Serienreife und damit steigenden Produktionszahlen je Zeiteinheit die spezifischen Produktionskosten einer Technologie verringern.⁵³² Dies ist auf Skaleneffekte (*economies of scale*), beispielsweise beim günstigeren Rohmaterial- und Vorprodukteinkauf durch große Mengen, auf Verbesserungen der Produktionsverfahren (*learning by doing*), beispielsweise durch optimierte Massenfertigungsprozesse, sowie auf Entwicklungen der technischen Produkteigenschaften (*learning by searching*), beispielsweise durch geringeren Rohmaterialeinsatz je produzierter Einheit, zurückzuführen.⁵³³ Dem Konzept der Lernkurve folgend, sinken die Produktionskosten eines industriell gefertigten Gutes bei jeder kumulierten Verdopplung der Produktionsmenge um einen konstanten Prozentsatz, der Lernrate.⁵³⁴ Dieser Zusammenhang wird nach Nemet (2006) wie folgt beschrieben:⁵³⁵

$$K_2 = K_1 \times \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^{-b} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} M_x = \text{kumulierte Produktionsmenge } x \\ K_x = \text{Produktionskosten bei } M_x \\ b = \text{Steigungsparameter der Lernkurve} \end{array} \quad \mathbf{7.13}$$

$$\text{und } r = 2^{-b} \quad \text{mit} \quad r = \text{Lernrate} \quad \mathbf{7.14}$$

Daher ergibt sich die Kostendegression κ_t der Komponentenkosten in Abhängigkeit des Marktanteils zum Zeitpunkt t wie folgt:

⁵³¹ Vgl. Kapitel 5.

⁵³² Vgl. Mock (2010), S. 20.

⁵³³ Vgl. Twiss (1993), S. 285ff.

⁵³⁴ Dieser Abschnitt entspricht teilweise Seitz (2012), S. 19.

⁵³⁵ Vgl. Nemet (2006), S. 3219.

$$\kappa_t(T) = \left(\frac{MA_t(T)}{MA_{t-1}(T)} \right)^{\frac{\ln(r)}{\ln(2)}}$$

7.15

Überschreitet eine Produktalternative oder die gesamte Flotte etwaige CO₂-Grenzwerte, könnten auf NFZ-Hersteller Strafzahlungen analog zum PKW-Markt zukommen. Diese Strafzahlungen werden NFZ-Hersteller über Preisaufschläge an die Kunden weitergeben, welche CO₂-intensive Technologien nachfragen. Aufgrund der Unsicherheit der zukünftigen gesetzgeberischen Implementierung der CO₂-Grenzwerte, wird dies im Basisszenario nicht betrachtet. Um diesen Einfluss jedoch in der Sensitivitäts- und Szenarioanalyse zu berücksichtigen, wird einer Variable zur Berechnung der Strafzahlung in Abhängigkeit von CO₂-Emissionen einer Produktalternative im Vergleich zum Flottendurchschnitt im Modell implementiert.⁵³⁶ Dabei werden die Strafzahlungen und die Höhe der Grenzwerte exogen angenommen.⁵³⁷

Der Preisaufschlag der Hersteller auf die Komponentenkosten für die Entwicklung, Herstellung und den Vertrieb eines Antriebsstranges wird im Wesentlichen von der Stückzahl und der Marktreife bestimmt. Hersteller sind gewillt, bei entsprechendem Interesse an einem Antrieb, neue Antriebskonzepte zur schnelleren Kostendegression früher mit hohen Stückzahlen zu produzieren. Daher wird davon ausgegangen, dass innovative Technologien zunächst einen geringeren Gewinn als konventionelle erzielen können, sodass die relative Marge alternativer Antriebe trotz geringerer Stückzahlen zunächst nicht höher ist. Allerdings werden die gewinnorientierten NFZ-Hersteller nach einer bestimmten Dauer der Subvention die Marge anpassen, um mit dem Preisaufschlag Kosten zu decken und einen zu anderen Technologien vergleichbaren Gewinn zu erzielen. Abbildung 51 zeigt die schematische Umsetzung im Simulationsmodell:

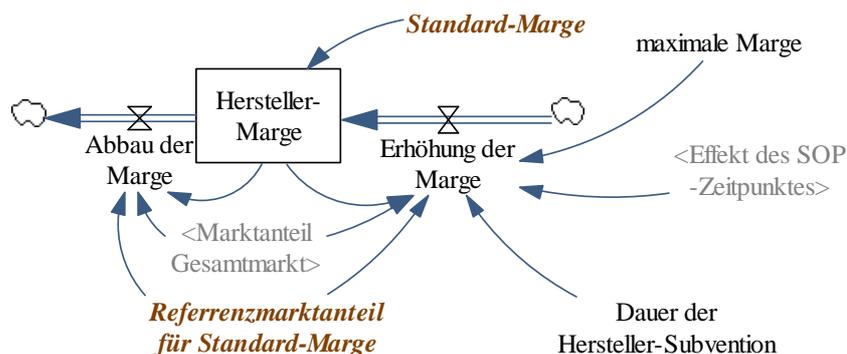


Abbildung 51: Berechnung der Hersteller Marge zur Deckung von Entwicklungskosten und Erzielung von Gewinnen

Ausgehend von einem internen Standardpreisaufschlag Ψ_{std}^A von 100 %, welcher auf maximal 200 % ansteigen kann (Ψ_{max}^A), erfolgt ein kontinuierlicher Aufbau und Abbau der technologie-

⁵³⁶ Eine ausführlich Darstellung des logischen Zusammenhangs und der Umsetzung im Simulationsmodell, zeigt Abbildung 83 im Anhang V 2).

⁵³⁷ Vgl. Anhang V 1).

Die zu erwartenden Kraftstoffkosten von CO₂-sparenden Antriebstechnologien basieren auf den Technikpaketen mit dem Referenzjahr 2020 und davon ausgehenden Expertenschätzungen für die zukünftige Entwicklung. Allerdings hängt die Erreichung des potentiell minimalen Kraftstoffverbrauchs einer Produktalternative wesentlich von den Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen ab, die wiederum durch das Herstellerinteresse determiniert sind. Diese Rückkopplung wurde in Anlehnung an Weikl implementiert.⁵³⁹ Die Kraftstoffpreise an den Tankstellen bzw. Ladesäulen wird inkl. Vertriebsmarge und exkl. Mehrwertsteuer exogen angenommen:

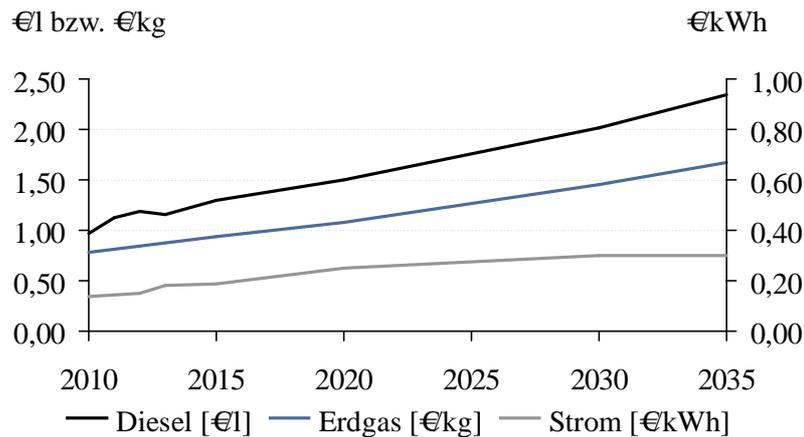


Abbildung 53: Exogen angenommene Kraftstoffpreise

Abbildung 54 zeigt die Berechnung des Teilnutzenwertes Betriebskosten schematisch.

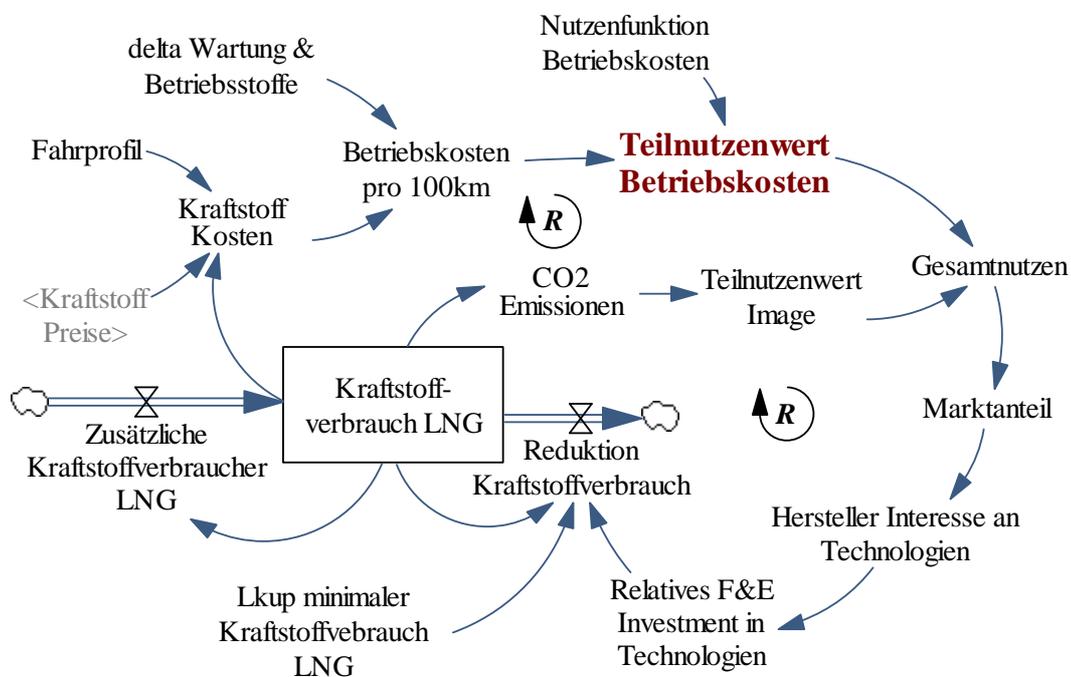


Abbildung 54: Berechnung des Teilnutzenwertes Betriebskosten

⁵³⁹ Vgl. Weikl (2010), S. 81–82.

7.2.6.2 Nutzen für Transportaufgabe

Die Anwenderfreundlichkeit und Nützlichkeit bestimmen den Nutzen in der Erfüllung der Transportaufgabe, den eine Organisation durch den Einsatz einer Technologie hat.

Die Nützlichkeit alternativer Antriebe ist anfänglich aufgrund von sinkender Nutzlast durch Zusatzgewicht⁵⁴⁰ (1) und beanspruchtem Bauraum (2) geringer. Des Weiteren determinieren die von der Technologie abhängigen Unterschiede in Motorleistung/Drehmoment zum konventionellen Dieselmotor (3), Lärmmissionen (5) und der Wettbewerbsvorteil durch Vermarktung eines grünen Antriebsstrangs (6) die Nützlichkeit der Produktalternativen. Die Motorleistung und Lärmmissionen einer Produktalternative sind als exogen und konstant angenommen.⁵⁴¹ Das Mehrgewicht und der zusätzliche Bauraum werden sich aufgrund von zunehmender Optimierung des Packaging und Produktionserfahrung abhängig von der Marktanteilsentwicklung reduzieren. Dieser funktionale Zusammenhang ist durch eine s-förmige Verbesserung der Eigenschaft in Anlehnung an Sterman (2000) implementiert.⁵⁴² Zum Zeitpunkt der Markteinführung ist aufgrund des geringen Marktanteils das Herstellerinteresse für eine Antriebstechnologie weniger stark ausgeprägt und die Felderfahrungen mit der Technik geringer. Mit zunehmender Marktdurchdringung steigt die technologische Verbesserungsrate einer neuen Technologie an. Die Verbesserungsrate erfährt mit zunehmendem Marktanteil eine asymptotische Sättigung, da das Verbesserungspotenzial limitiert ist. Die Verbesserungsrate γ^H einer technologischen Eigenschaft H zum Zeitpunkt t ist in Abhängigkeit des Marktanteils MA_t , wie folgt definiert:

$$\gamma_t^H(T) = (1 - H_t(T)) \times MA_t(T) \tag{7.18}$$

Zentrales Kriterium der Berechnung des Teilnutzenwertes Nützlichkeit bildet die empirisch erhobene Nutzenfunktion zur Motorleistung. Entsprechend der Bedeutung der anderen Faktoren (vgl. Abbildung 28, S. 107) wird dieser Nutzenwert unter Annahme eines kompensatorischen Zusammenhangs der Kriterien H_n mittels einer linearen Verknüpfungsfunktion und der exogen bestimmten Kriterienrelevanz ϑ ⁵⁴³ zum Teilnutzenwert Nützlichkeit $TN_{Nützlichkeit}$ einer Produktalternative pro Anwendungsfall und Adopterkategorie aggregiert:

$$TN_{Nützlichkeit}^{A,K}(T) = \sum_n \vartheta_n^{A,K} \times H_n^{A,K} \tag{7.19}$$

Abbildung 55 zeigt schematisch die Umsetzung dieses Teilmodells in System Dynamics:

⁵⁴⁰ Im Fall der Ratifizierung des Änderungsvorschlags zu den Abmessungsbegrenzungen von NFZ wird dieser Nachteil vollumfänglich aufgehoben. Der Effekt wird in der späteren Szenarioanalyse berücksichtigt.

⁵⁴¹ Vgl. Anhang V 1).

⁵⁴² Vgl. Sterman (2000), S. 371-373;285-289.

⁵⁴³ Vgl. Anhang V 1).

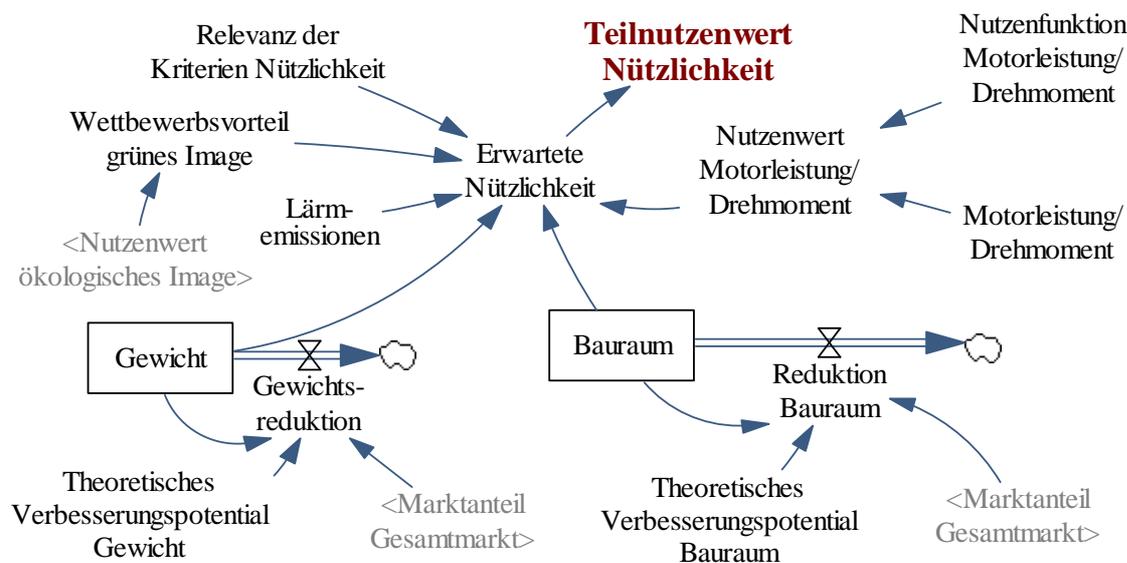


Abbildung 55: Berechnung des Teilnutzenwertes Nützlichkeit

Die Berechnung des Teilnutzenwertes Anwenderfreundlichkeit (vgl. Abbildung 56) ist analog der Nützlichkeit aufgebaut. Den Kern der Nützlichkeit bildet die Reichweite, welche sich durch den Kraftstoffverbrauch und das exogen angenommene Tankvolumen in einem Anwendungsfall determiniert. Basierend auf der Nutzenfunktion aus der Conjoint-Analyse für die Reichweite, wird für jede Produktalternative ein Nutzenwert berechnet. Dieser wird entsprechend Formel 7.19 mit dem Nutzenwert Betankungsinfrastruktur sowie den Parametern Zuverlässigkeit und Servicenetz angepasst.

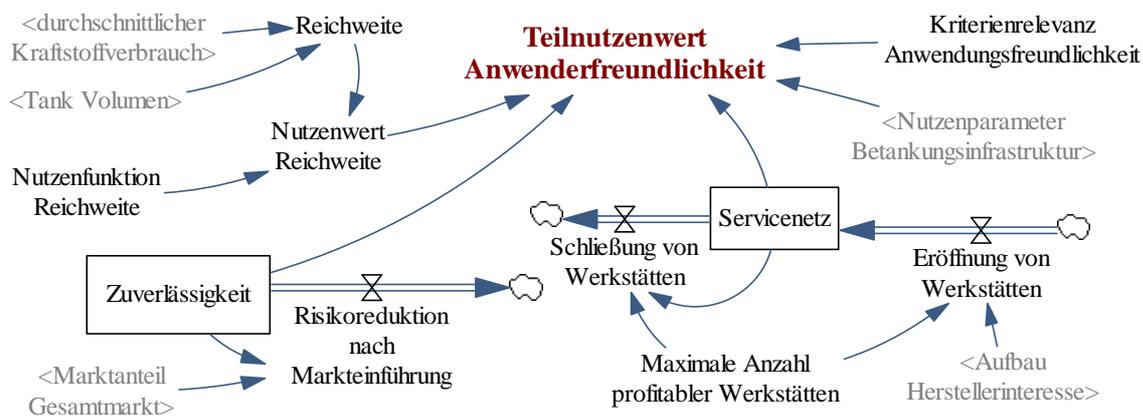


Abbildung 56: Berechnung des Teilnutzenwertes Anwenderfreundlichkeit

Die wahrgenommene Zuverlässigkeit einer innovativen Technologie ist mathematisch entsprechend der Formel 7.18 zu den technologischen Eigenschaften der Nützlichkeit endogen implementiert und verbessert sich somit mit steigendem Marktanteil. Das Servicenetz wird vereinfachend nur durch das Hersteller Interesse O_t ohne ein *Bass Diffusion Modell* approximiert, da auch für den Aufbau betriebseigener Werkstätten Werkzeuge, Diagnosegeräte und Reparaturan-

leitungen der Hersteller benötigt werden. Der mathematische Zusammenhang des Servicenetz-Aufbaus $\phi_t(T)$ zum Zeitpunkt t ist wie folgt umgesetzt:

$$\phi_{t,auf}(T) = (SN_{max} - SN_t(T)) \times O_t(T) \quad 7.20$$

7.2.6.3 Image

Der Teilnutzenwert Image berechnet sich aus zwei wesentlichen Komponenten: ökologisches und innovatives Image. Das ökologische Image ist überwiegend durch die CO₂-Emissionen einer Antriebstechnologie bzw. dem CO₂-Reduktionspotenzial eines zusätzlichen Technikpaketes determiniert. Darüber hinaus spielen zunehmend – und durch verändernde gesetzliche Rahmenbedingungen gegebenenfalls verpflichtend – Schadstoff-Emissionen für NFZ-betreibende Organisationen sowie deren Kunden eine Rolle. Mittels der CO₂-Emissionen C_t aus den Technikpaketen und der Nutzenfunktion $f_{CO_2}^A$ aus der Conjoint-Analyse wird das ökologische Image $TN_{\text{ökolImage}}^A$ um den Faktor der Schadstoff-Emissionen ω verringert:

$$TN_{t,\text{ökolImage}}^A(T) = \omega_t^A(T) \times f_{CO_2}^A(C_t^A(T)) \quad 7.21$$

Das innovative Image beschreibt das Bedürfnis *Früher Adopter* neue, innovative Antriebstechnologien einzusetzen sowie das Bedürfnis des Massenmarktes verbreitete und marktkonforme Antriebstechnologien zu nutzen. Die Operationalisierung erfolgt anhand der Nutzerbasis NB_t von NFZ mit diesen Technologien in Abhängigkeit der Adopterkategorie-spezifischen Nutzenfunktionen g_{Inno} .⁵⁴⁴

$$TN_{t,\text{innoImage}}^A(T) = g_{Inno}^K \left(\frac{NB_t(T)}{\sum_{m \in CS} (NB_t(T))} \right) \quad 7.22$$

Die Relevanz dieser beiden Komponenten variiert mit der gesamtwirtschaftlichen Lage BIP_t und dem steigenden Umweltbewusstsein U_t in der Gesellschaft. In Zeiten wirtschaftlicher Prosperität besteht für Gesellschaft und Unternehmen ein größerer Spielraum zur Umsetzung von Maßnahmen zum Schutz von Klima und Umwelt. In Zeiten der wirtschaftlichen Rezession oder Stagnation nimmt der Kostendruck zu, sodass die Rückbesinnung auf verbreitete Technik an Relevanz gewinnt:

$$TN_{t,\text{inno}}^A(T) = \delta_t(BIP_t, U_t) \times TN_{t,\text{innoImage}}^A + (1 - \delta_t(BIP_t, U_t)) \times TN_{t,\text{ökolImage}}^A(T) \quad 7.23$$

Abbildung 57 zeigt schematisch die Umsetzung im Simulationsmodell:

⁵⁴⁴ Vgl. Weikl (2010), S. 99.

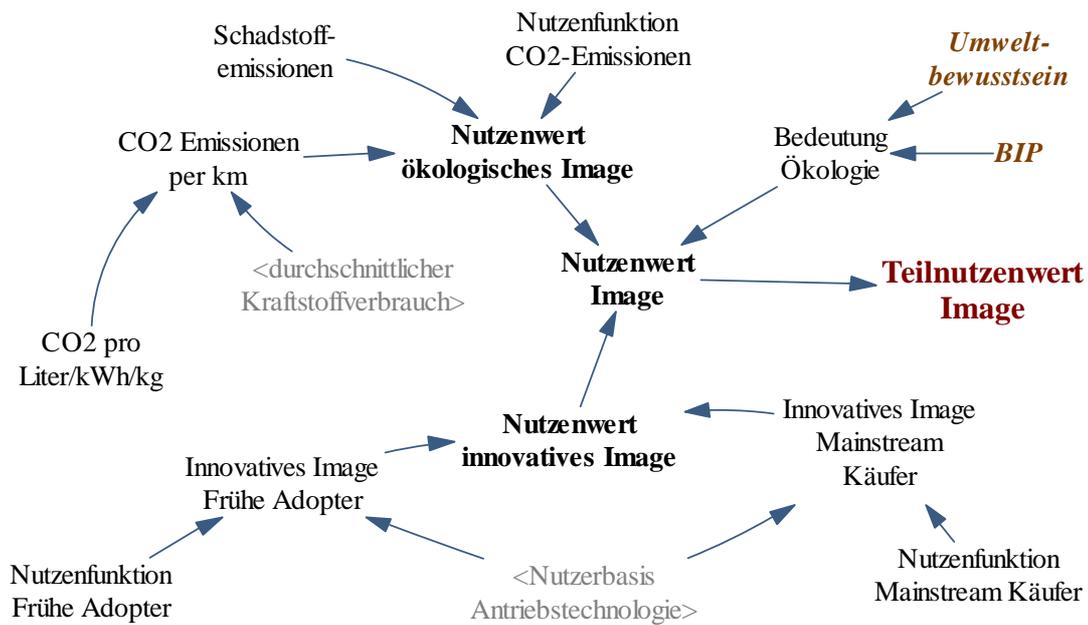


Abbildung 57: Berechnung des Teilnutzenwertes Image

7.3 Validierung des Simulationsmodells

7.3.1 Strukturvalidität

Die Strukturvalidität eines System Dynamics Simulationsmodells wird anhand der empirischen und theoretischen Konformität von Struktur und Parametern, dimensionalem Konsistenztest und Extremwerttests beurteilt.⁵⁴⁵ Die Strukturkonformität erfordert die Überprüfung aller logischen Variablenverknüpfungen des Modells mit den entsprechenden Zusammenhängen des realen Systems. Die Parameterkonformität beurteilt die Existenz eines jeden im Simulationsmodell implementierten Parameters sowie dessen numerischen Wertes in der Realität.

Die objektive Beurteilung der Konformität ist aufgrund mangelnder, vom Modellierer unabhängiger, Methoden problematisch, da eine Vielzahl von Parameter-Struktur Kombinationen durch die subjektive Einschätzung der im Modellierungsprozess Beteiligten entwickelt wurde. Daher basierte die Entwicklung des vorliegenden Modells auf vier Säulen der Erkenntnisgenerierung, um den Grad der Subjektivität zu minimieren: In einem ersten Schritt bildeten die theoretischen Grundlagen der Innovationsdiffusion, des organisationalen Adoptionsverhaltens und des TOE-Modells den methodischen Rahmen der Wissensgenerierung und Modellimplementierung. Zweitens wurden validierte System Dynamics Modelle auf Basis anerkannter wissenschaftlicher Veröffentlichungen für den PKW-Markt als elementare Systemarchetypen zur Operationalisierung der Diffusion alternativer Antriebstechnologien für den NFZ-Markt herangezogen. Drittens sind in umfangreichem Maße empirische Daten auf Basis anerkannter Methoden erhoben wor-

⁵⁴⁵ Vgl. Barlas (1996), S. 188–202.

den, welche direkt in die Modellentwicklung einfließen. Als vierte Säule wurden Literaturrecherchen zu Primärstudien herangezogen, falls durch die empirische Datenerhebung benötigten Erkenntnisse oder numerische Parameterwerte nicht zur Verfügung standen.

Daher ist im Sinne der **Strukturkonformität** festzuhalten, dass die Modellstruktur sowohl aus Sicht der theoretischen (Technologiediffusion, organisationales Adoptionsverhalten, diskrete Entscheidungsmodelle, validierte System Dynamics Systemarcheytphen, Konzept der Lernrate, etc.) und empirischen Konformität (Studie zum organisationalen Adoptionsverhalten, Conjoint-Analyse, qualitative Studie zu Wechselwirkungen und Interaktionen der Akteure, *diskonformativische Interviews*⁵⁴⁶ während der Iterationsschritte (3) bis (5)) in hohem Maße den wesentlichen Rückkopplungsstrukturen und Prozessen des realen Systems entspricht, wenngleich eine Vielzahl weiterer Regelkreise aus Komplexitätsgründen bewusst als exogen betrachtet wurden.

Die **Parameterkonformität** wird im Vergleich zur Strukturkonformität kritischer betrachtet. Die numerischen Parameterwerte basieren auf verlässlichen wissenschaftlichen Studien, welche größtenteils durch qualitative Interviews überprüft wurden (Technikpakete, Betankungsinfrastruktur, etc.), oder im Fall der Kaufentscheidung durch eine quantitative Studie selbst gemessen wurden. Allerdings mussten zum Teil – teilweise auch durch die Experten im Rahmen der Interviews – möglichst nachvollziehbare und plausible Annahmen getroffen werden (z. B. Einfluss Herstellerinteresse, Vertrautheit). Lag eine zu hohe Unsicherheit über den numerischen Wert und Einfluss auf das Modellverhalten eines Parameters vor, so wurde dieser in der späteren Szenarioanalyse separat berücksichtigt. Nichtsdestotrotz wird die Parameterkonformität im Hinblick auf das Ziel der Arbeit, die grundlegenden Prozesse der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien zu untersuchen und eine erste Erkenntnis über die zukünftige Marktdurchdringung abzuschätzen, als äußerst zufriedenstellend beurteilt.

Der Test zur **dimensionalen Konsistenz** prüft die formulierten mathematischen Modellgleichungen nach Einheitenfehlern und zueinander passender Dimensionen der Teilmodelle. Die Software *Vensim* bietet hierfür die Analysefunktion *Units Check*, welche den Test der dimensionalen Konsistenz durchführt. Das Ergebnis zeigt eine im Simulationsmodell über alle Variablen bestehende Dimensionsgültigkeit.

Als viertes Kriterium der Strukturvalidität werden verhaltensorientierte Strukturprüfungen mithilfe von **Extremwerttests** durchgeführt. Dabei wird untersucht, wie das Simulationsmodell mit den mathematischen Gleichungen auf extreme Parametrisierung reagiert, um sowohl Struktur als auch Verhalten hinsichtlich sinnvoller Ergebnisse zu beurteilen. Anhand des Basisszenario⁵⁴⁷ und den bisherigen empirischen Erkenntnissen zu angenommenen signifikanten Modellvariablen werden beispielhaft drei extreme Ausprägungen der Parametrisierung von Dieselmotorkosten,

⁵⁴⁶ Vgl. Kapitel 6.3.1.2 mit drei unterschiedlichen Marktexperten eines Unternehmens der Automobilindustrie.

⁵⁴⁷ Vgl. zu detaillierten Annahmen Kapitel 8.2.

Betankungsinfrastruktur und Modellverfügbarkeit simuliert und das Ergebnis im Folgenden anhand der Gesamtmarktentwicklung im Hinblick auf die Strukturvalidität diskutiert.

Für den ersten Extremwerttest wurde ab dem Jahr 2020 ein Anstieg des Anschaffungspreises von Dieselmotoren um 50.000 € unter konstanten Rahmenbedingungen gewählt. Abbildung 58 zeigt mit der Ausstattungsquote neu zugelassener NFZ⁵⁴⁸, dass trotz dieses signifikanten Preisanstiegs kaum Kunden unmittelbar nach Auftreten der Zusatzkosten auf andere Grundmotoren umsteigen, da kaum Modelle verfügbar sind sowie die Betankungsinfrastruktur und Reichweite die Durchführung der Transportaufgabe mit alternativen Kraftstoffen nicht ermöglichen.

Marktanteil [%]

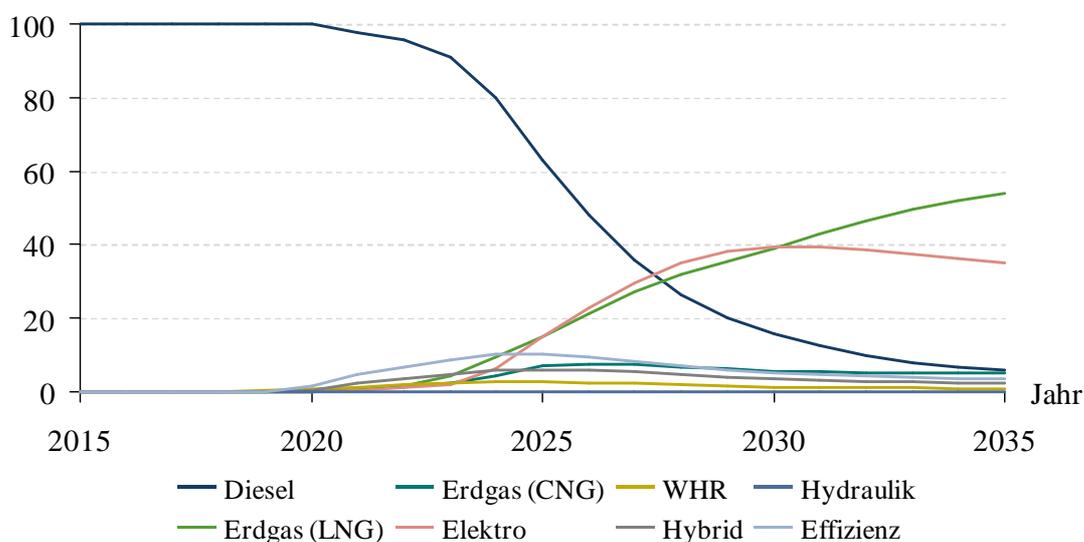


Abbildung 58: Extremwerttest bei einem Anschaffungspreis-Plus von 50 T€ für den Dieselmotor ab 2020⁵⁴⁹

Mit zunehmender Dauer tritt eine rasche Diffusion von LNG- und Elektro-NFZ ein. CNG-Fahrzeuge können hingegen kaum merklich an Marktanteilen gewinnen, da LNG den Wettbewerb um das dominante Tankkonzept für Gas-betriebene NFZ aufgrund seiner Langstreckentauglichkeit gewinnt. Im Jahr 2035 spielt der Dieselmotor unter den NFZ-Neuzulassungen keine Rolle mehr, Elektro-NFZ verlieren aufgrund des dominierenden LNG-Antriebs ab 2030 ebenso Marktanteile.

Der zweite Extremwerttest geht von einem vollständigen Umbau aller öffentlichen Straßen im urbanen Raum mit induktiven Ladespulen aus.⁵⁵⁰ Dadurch sind Elektro-NFZ keinen Einschränk-

⁵⁴⁸ Dabei ist zu beachten, dass durch den konzeptionellen Modellaufbau mit der Implementierung der Technikpakete anhand von Grundmotoren und zusätzlichen Technikpaketen, die Summe der Marktanteile bzw. Ausstattungsquoten den Wert von 100% übersteigt.

⁵⁴⁹ Eigene Abbildung auf Basis der Ergebnisse des Simulationsmodells. Dies gilt für die folgenden Abbildungen gleichermaßen.

⁵⁵⁰ Eine Anpassung der Technikpakete aufgrund von sich verändernden Marktbedingungen, zum Beispiel durch eine Reduktion der Batteriekapazität aufgrund der durchgängigen, dynamischen Stromversorgung im Fahrbetrieb, ist dabei nicht vorgenommen worden.

kungen mehr durch ein zu dünn ausgebautes oder ungeeignetes Ladesäulennetz ausgesetzt. Ebenso besitzen Elektro-NFZ prinzipiell eine unendliche Reichweite ohne Tank/Ladestopp im urbanen Raum. Abbildung 59 zeigt, dass trotz der wesentlichen Vorteile die Diffusion dieser alternativen Antriebstechnologie in den ersten Jahren nur mäßig stark ansteigt.

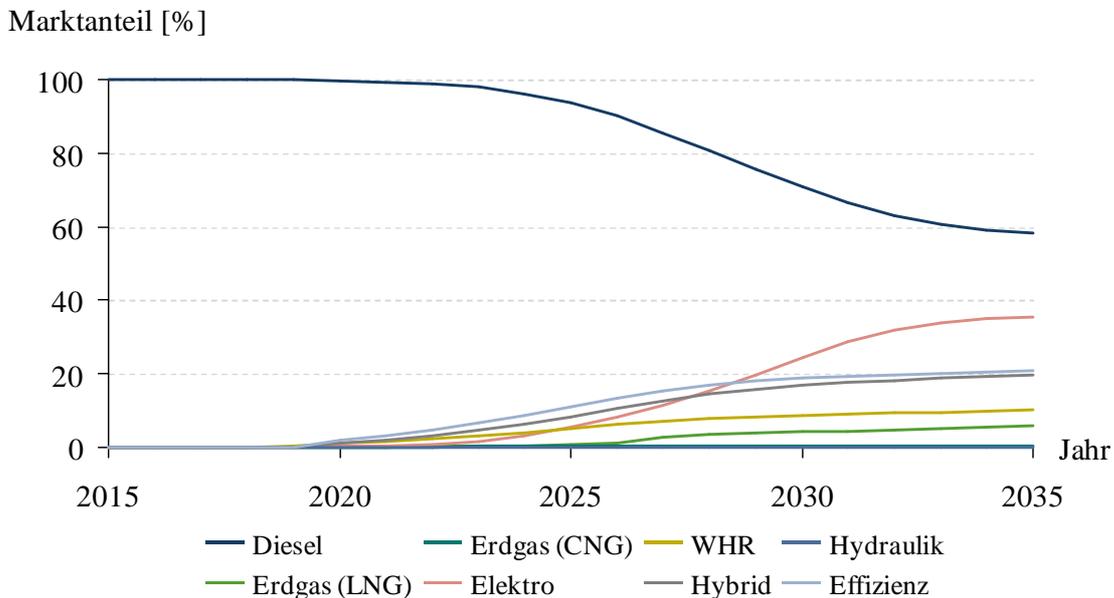


Abbildung 59: Extremwerttest einer Ausstattungsquote von 100 % aller öffentlichen Straßen im urbanen Raum mit induktivem Laden

Dies hängt einerseits mit der mangelnden Vertrautheit und geringen Modellverfügbarkeit zusammen, sodass nur wenige Organisationen diese Alternative in ihr *choice set* aufnehmen. Darüber hinaus bleiben die hohen Anschaffungskosten zunächst bestehen, auch wenn mit der zunehmenden Marktdurchdringung eine signifikante Kostendegression einsetzt. Der Marktanteil von elektrischen Antrieben unter den neu zugelassenen NFZ erfährt bei rund 40 % eine Sättigung, da die Mehrheit der Anwendungsfälle überwiegend auf Landstraßen und Autobahnen fährt, sodass der Vorteil der städtischen Infrastruktur nur für die Anwendungsfälle Stadtbuss, Städtischer Verteiler, Abfallsammelfahrzeug und zum Teil regionaler Verteilerverkehr zum Tragen kommt. Im Vergleich zum vorherigen Extremwerttest hindert die starke Marktdurchdringung die Diffusion Erdgas-betriebener NFZ, da sich im urbanen Raum das Elektro-NFZ als dominantes Design etabliert.

Als drittes Beispiel der durchgeführten Extremwerttests wird die Auswirkung einer von heute ausgehenden 100 % Modellverfügbarkeit von LNG-betriebenen NFZ im Portfolio der Hersteller untersucht. Abbildung 60 zeigt, dass trotz der Modelverfügbarkeit sich die meisten Kunden gegen den LNG-Antrieb entscheiden. Die hohe Verfügbarkeit sorgt allerdings für eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass Organisationen diese Antriebstechnologie in ihr *choice set* aufnehmen, gleichzeitig steigt auch die Vertrautheit der Kunden. Nichtsdestotrotz hat der Dieselmotor insbesondere mit den zusätzlichen Technikpaketen WHR, HEV und sonstigen Effizienzmaßnahmen eine hohe Attraktivität für die Kunden. Zwar hat die frühe und signifikante Marktdurchdringung

des LNG-Antriebs die Diffusion von Elektro-NFZ gehemmt und deutlich verzögert. Allerdings führt der prinzipielle Vorteil der Elektrifizierung im urbanen Raum zu einem leichten Rückgang des LNG-Marktanteils ab 2035.

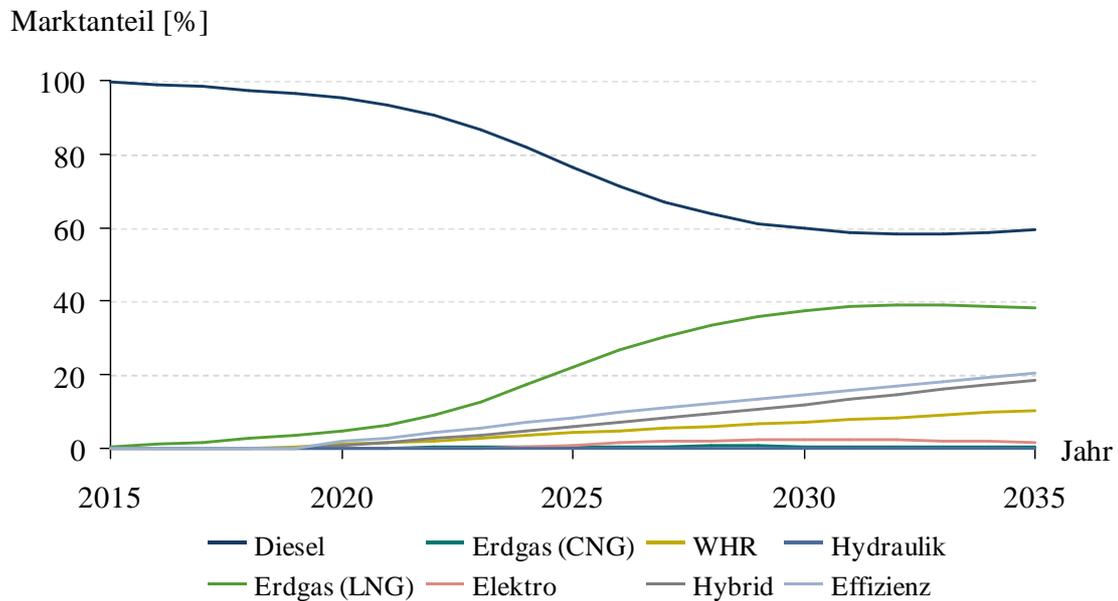


Abbildung 60: Extremwerttest einer 100 % Modellverfügbarkeit von LNG-NFZ ab 2015

Zusammenfassend treten durch die Extremwerttests im Modellverhalten keine disruptiven Sprünge auf. Damit sind die grundlegenden Diffusionsprozesse korrekt abgebildet, denn der *relative advantage* ist nur eine Komponente des organisationalen Adoptionsverhaltens. Darüber hinaus wird durch die Pfadabhängigkeit die Diffusion alternativer Antriebstechnologien verzögert. Auch in der Realität sind die NFZ-betreibenden Organisationen auf einen funktionierenden Geschäftsbetrieb im Transport von Personen und Güter angewiesen, sodass ein sprunghafter Wechsel auf grundlegend neue Konzepte durch das fehlende komplementäre Ökosystem und der mangelnden Verfügbarkeit dieser Fahrzeuge, welche ebenso erst durch die Entwicklungszyklen der OEM aufgebaut werden müssen, nicht eintreten würde. Daher zeigen diese Extremwerttests nachvollziehbare Ergebnisse, sodass das Simulationsmodell im Hinblick auf Struktur- und Parameterkonformität eine valide Basis für weitere Untersuchungen bildet.

7.3.2 Verhaltensvalidität

Zur Überprüfung der Verhaltensvalidität werden Verfahren wie die Reproduktion der Vergangenheit, modifizierte Verhaltensvorhersagen oder Sensitivitätsanalyse herangezogen. Die Schwierigkeit der Kalibrierung und Validierung des Modellverhaltens an historische Daten wurden eingangs des Kapitels erörtert. Des Weiteren wurde im Rahmen der Modellentwicklung die Anwendung einer modifizierten Verhaltensvorhersage anhand der Diffusion der Diesel-Common-Rail-Systeme oder ABS-Systeme in NFZ in Erwägung gezogen. Aufgrund des großen Zeitsprungs in die Vergangenheit, sind kaum verlässliche Daten verfügbar, um einen Mehrwert

der Parameterschätzung durch die Kalibrierung anhand des modifizierten Modells ohne ein Betrachtung alternativer Kraftstoffe zu erhalten. Ebenso zeigte die *Bass Diffusions* Studie von Brauer (2011), dass für NFZ die Schätzung von Diffusionsparameter anhand vergangener und sich deutlich unterscheidender Produkte nur sehr bedingt Erkenntnisse generiert.⁵⁵¹ Daher liegt der Fokus der Verhaltensvalidierung auf univariaten Sensitivitätsanalysen.

Bei einer Sensitivitätsanalyse wird die Robustheit eines Simulationsmodells gegenüber Unsicherheit in den Annahmen geprüft. Dabei ist es das Ziel herauszufinden, inwiefern sich das Modellverhalten unter einer plausiblen Variation der Modellparameter verändert. Die Sensitivitätsanalyse kann nach Sterman (2000) in numerische Sensitivität, Verhaltenssensitivität und Sensitivität gegenüber Handlungsstrategien aufgeteilt werden.⁵⁵² Aufgrund der vergleichsweise höheren Konfidenz der Modellstruktur steht daher die Evaluation der numerischen Sensitivität im Vordergrund. Des Weiteren erlaubt die Sensitivitätsanalyse die Identifikation der wesentlichen Einflussparameter auf das numerische Modellverhalten, um so in der folgenden Szenarioanalyse auf diese zurückgreifen zu können. Die Sensitivität von Einflussfaktoren wird durch eine Veränderung der beeinflussenden Inputparameter initiiert und anhand Variation eines Zielfunktionswertes gemessen.

Die Durchführung der Sensitivitätsanalyse erfolgte zweistufig, indem exogene Parameter mit einer hohen angenommenen Verhaltensunsicherheit auf deren numerische Sensitivität untersucht werden. Hierbei wird exemplarisch die Sensitivität unterschiedlicher Eingabeparameter auf die alternativen Antriebstechnologien LNG und BEV vorgestellt. Abbildung 61 zeigt, dass eine Reduktion der Kraftstoffkosten LNG-betriebener NFZ den höchsten signifikanten Einfluss auf die Marktdurchdringung von LNG hat. Eine Reduktion der Kraftstoffkosten um 10 % erhöht den LNG-Marktanteil im Vergleich zum Basisszenario relativ um 42 % (beispielsweise von 10 % absolut auf 14,2 % absolut). Darüber hinaus üben die Reichweite und ein erhöhtes Drehmoment des LNG-Motors einen deutlich überproportionalen Einfluss aus. Die Verringerung des Batteriepreises beeinflusst den LNG Marktanteil hingegen nur unwesentlich. Die Rangfolge und Wirkung der Sensitivitäten sind alle zu den empirischen Erkenntnissen schlüssig.

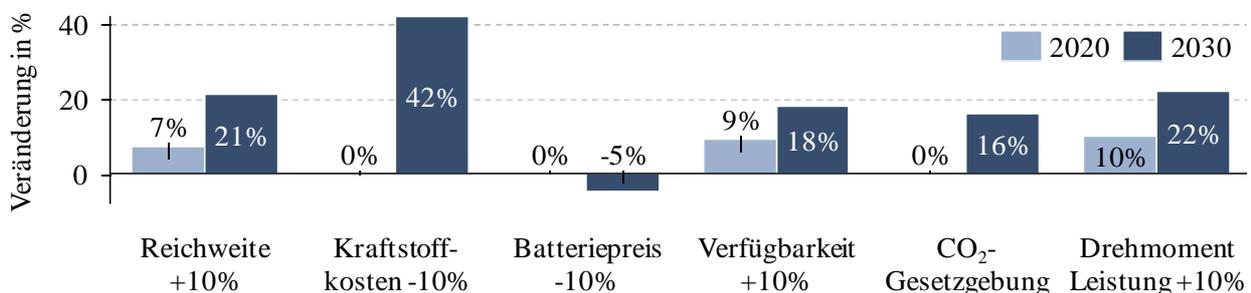


Abbildung 61: Sensitivitätsanalyse des LNG-Gesamtmarktanteils für die Jahre 2020 und 2030 in relativer Veränderung zum Basisszenario

⁵⁵¹ Vgl. Kapitel 2.2.

⁵⁵² Vgl. Sterman (2000), S. 883–887.

Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse des BEV-Marktanteils unterscheidet sich insbesondere durch den starken Einfluss des Batteriepreises, des Drehmoments und der Kraftstoffkosten vom LNG. Dies hängt mit dem unmittelbaren Einfluss der Batteriekosten auf die BEV Attraktivität, dem systembedingten höheren Drehmoment des Elektromotors sowie der ohnehin deutlich niedrigeren Kraftstoffkosten von Elektro-NFZ zusammen, sodass weitere Verbesserungen zu einem geringeren Anstieg des Marktanteils führen. Abbildung 62 zeigt ebenso empirisch nachvollziehbare Verhaltensmuster.

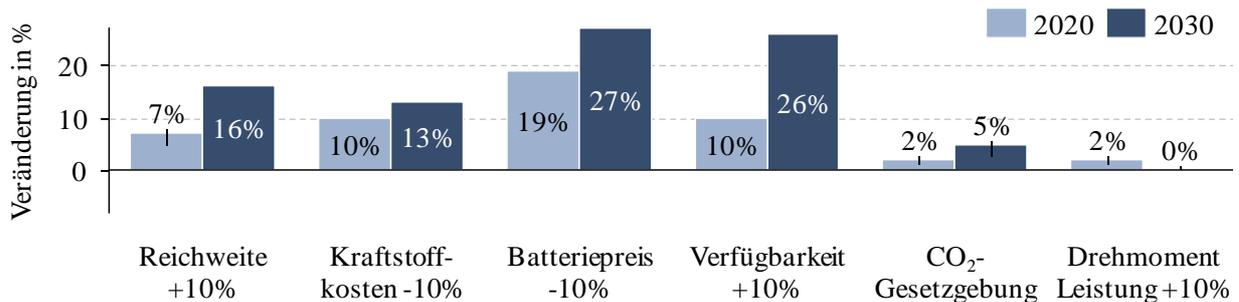


Abbildung 62: Sensitivitätsanalyse des BEV-Gesamtmarktanteils für die Jahre 2020 und 2030 in relativer Veränderung zum Basisszenario

Des Weiteren können mit der Sensitivitätsanalyse Konfidenzintervalle einer Zielgröße in Abhängigkeit der Eingabeparameterunsicherheit berechnet werden. Damit lassen sich ferner etwaige Strukturbrüche im Systemverhalten identifizieren und beurteilen. Abbildung 63 zeigt die Konfidenzintervalle des Marktanteils von Abgaswärmenutzung im Fernverkehr in Abhängigkeit der CO₂-Grenzwerte im Intervall [-10 %; +10 %] des Basisszenarios.

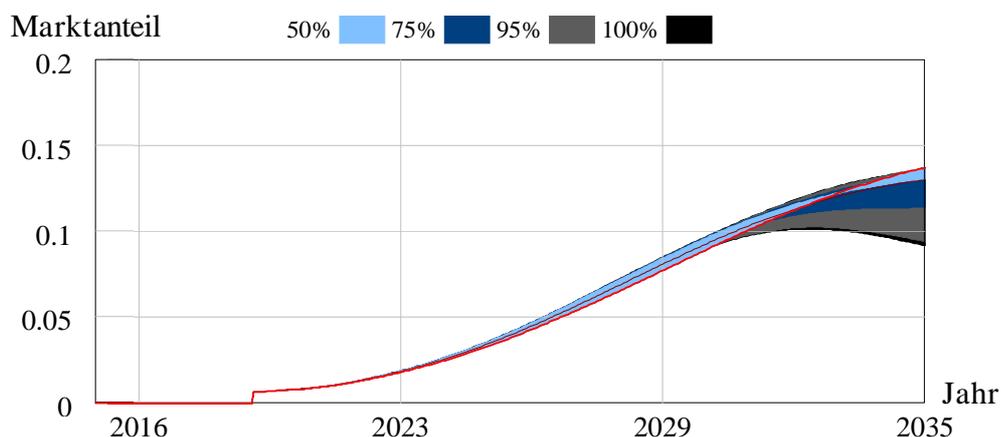


Abbildung 63: Konfidenzintervall des Marktanteils der Abgaswärmenutzung im Fernverkehr in Abhängigkeit der Höhe der CO₂-Grenzwerte

Dabei zeigt sich, dass höhere Grenzwerte mittelfristig den Marktanteil positiv beeinflussen, da durch das CO₂-Reduktionspotenzial von WHR die Nachfrage dieser Technologie zur Einhaltung der Grenzwerte steigt. Zwischen 2030 und 2033 kommt es zu einem Strukturbruch, da zunehmend alternative Antriebstechnologien wie LNG in den Markt diffundieren und auf TtW-Basis

geringere CO₂-Emissionen als ein Dieselmotor mit Abgaswärmenutzung aufweisen. Daher wirkt sich die Einführung von CO₂-Grenzwerten langfristig negativ auf die Marktdurchdringung der Abgaswärmenutzung aus.

Anhand einer vereinfachten Modellstruktur wurde darüber hinaus für den Fernverkehr und unter ausschließlicher Betrachtung der Antriebskonzepte LNG und HEV die Sensitivität des Simulationsmodells von der erwarteten LNG Tankstellendichte untersucht. Wie in Kapitel 5.3 diskutiert, besteht über die notwendige und erwartete Tankstellendichte von Organisationen für einen uneingeschränkten Betrieb ihrer NFZ eine hohe Unsicherheit. Dafür wurde das Teilmodell weiter auf die ausschließliche Betrachtung von Autobahntankstellen reduziert, welche für Organisationen im Anwendungsfall Fernverkehr nahezu vollständig für einen uneingeschränkten Betrieb ausreichend sind. Dazu wurde eine Variable *erwartete Tankstellendichte* eingeführt, welche den Prozentsatz der mit LNG Tankstellen ausgestatteten Autobahntankstellen angibt. Mittels einer Monte Carlo Simulation mit den Parametersätzen des Basisszenarios wurde die Variable *erwartete Tankstellendichte* mit einer Normalverteilung mit $\mu=10\%$ und $\sigma=5\%$ in 200 Simulationsläufen variiert.⁵⁵³ Die abgetragenen Einzelsimulationen für den Marktanteil von LNG im Anwendungsfall Fernverkehr isoliert (vgl. Abbildung 64 links) zeigen, dass dieser Parameter die Diffusion signifikant beeinflusst. Die Marktanteile von LNG im 2035 wurden darüber hinaus in Abhängigkeit des Parameters *erwartete Tankstellendichte* abgetragen. Je höher die von den Organisationen erwartete Tankstellendichte ist, desto geringer ist der Marktanteil von LNG, da mehr Tankstellen für einen gleichbleibenden Nutzen installiert werden müssen. Das Ergebnis zeigt, dass bei einer erwarteten Tankstellendichte von etwa 20 % oder mehr (entspricht etwa 70 Tankstellen) der heutigen Autobahntankstellen in Deutschland (~350) die Diffusion im Anwendungsfall Fernverkehr scheitern würde.

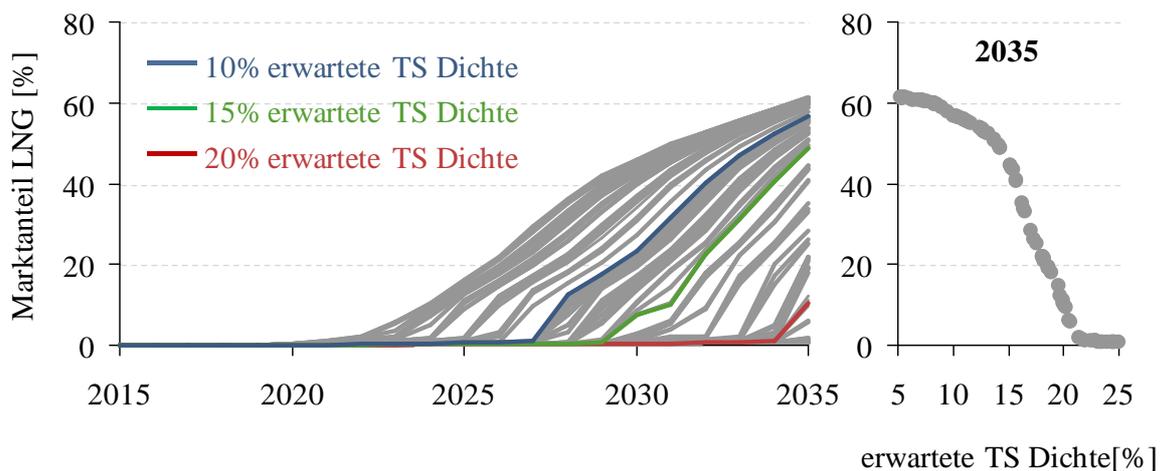


Abbildung 64: Monte Carlo Simulation des LNG Marktanteils im Fernverkehr (links) und Ergebnisplot im Jahr 2035 (rechts) in Abhängigkeit der erwarteten Tankstellendichte⁵⁵⁴

⁵⁵³ Vgl. Seitz und Terzidis (2014), S. 13.

⁵⁵⁴ Eigene Abbildung in Seitz und Terzidis (2014), S. 13.

Für weitere Analysen zum Verhalten dieses System Dynamics Modells und der damit verbundenen Validität von Struktur, Parametern und Ergebnissen wird auf Seitz und Terzidis (2014) zu einem Teilmodell aus dem iterativen Modellierungsprozess verwiesen.⁵⁵⁵

Zusammenfassend wird die Validität des Simulationsmodells als sehr zufriedenstellen bewertet. Die Tests zu Parameter- und Strukturkonformität zeigen ein äußerst valides Ergebnis. Zwar konnten nicht alle Verhaltenstests durchgeführt werden, die grundsätzlichen Verhaltensmuster entsprechen jedoch deutlich dem realen System. Daher erfüllt das Simulationsmodell den Zweck, erste Abschätzungen zur zukünftigen Marktdurchdringung alternativer Antriebstechnologien auf Basis eines quantitativen Rechenmodells zu erstellen.

⁵⁵⁵ Vgl. *Seitz und Terzidis* (2014), S. 10–14.

“I think there is a world market for maybe five computers.“

Thomas J. Watson, Vorstandsvorsitzender von IBM, 1943

Kapitel 8

Szenarioanalyse

Dieses Kapitel diskutiert mithilfe des Simulationsmodells die zukünftige Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion auf dem NFZ-Markt anhand von vier Zukunftsszenarien. Damit werden die drei leitenden Fragestellungen zu den *Lead Usern* alternativer Antriebe, dem zukünftigen *dominanten Design* von Antriebstechnologien und dem potentiellen *CO₂-Reduktionspotenzial* durch technische Maßnahmen auf dem NFZ-Markt abschließend beantwortet. Hierzu wird zunächst ein kurzer Überblick zur Szenariotechnik gegeben. Anschließend werden ausgehend von einem Basisszenario vier konsistente Zukunftsbilder beschrieben, mit dem System Dynamics Modell simuliert und abschließend zur Beantwortung der drei Fragestellungen analysiert.

8.1 Szenariotechnik⁵⁵⁶

Ein Szenario ist die Beschreibung einer komplexen, zukünftigen Situation, deren Eintreten nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden kann und die Darstellung einer möglichen Entwicklung dorthin.⁵⁵⁷ Die Szenariotechnik gilt in der Politik, den Wirtschaftswissenschaften und der unternehmerischen Praxis als anerkannte Methode im Umgang mit alternativen Zukunftsentwicklungen. Aus Sicht einer Unternehmung ist es das Ziel der Szenarioerstellung, unternehmerische Chancen und Risiken durch die gedankliche Entwicklung unterschiedlicher plausibler Zukunftsbilder zu identifizieren.⁵⁵⁸ In der Wissenschaft werden mit Szenarien überwiegend die Auswirkungen von unsicheren Einflussfaktoren auf ein Untersuchungsobjekt analysiert.⁵⁵⁹

Die Szenariotechnik ist eine Planungs- und Analysetechnik mit deren Hilfe mögliche Zukunftsbilder methodisch entwickelt werden und aus denen der Untersuchende Rückschlüsse für zukünftige Handlungsstrategien ableiten kann. Dabei sollen Wirkungszusammenhänge, Abhängigkeiten und eventuelle Störereignisse sichtbar werden. Zweck ist es also nicht, die Zukunft oder Ereignisse auf dem Weg dorthin exakt vorherzusagen, sondern alternative Annahmen über die

⁵⁵⁶ Dieser Abschnitt entspricht teilweise Ausschnitten aus *Seitz* (2012), S. 17–18.

⁵⁵⁷ Vgl. *Hungenberg* (2014), S. 181–182.

⁵⁵⁸ Vgl. *Gausemeier et al.* (1996), S. 90.

⁵⁵⁹ Vgl. *Swart et al.* (2004).

Entwicklung des Untersuchungsobjektes aufzuzeigen.⁵⁶⁰ Prinzipiell kann zwischen zwei grundsätzlichen Arten der Szenariotechnik unterschieden werden. Explorative Szenarien projizieren, ausgehend von einer definierten und konkreten Ist-Situation, auf unterschiedliche mögliche Zukunftsbilder. Antizipative Verfahren gehen von einem gewünschten Zukunftsbild aus und analysieren mehrere Entwicklungspfade von unterschiedlichen Ist-Situationen hin zu diesem Ziel. Aufgrund der Zielstellung der Arbeit wird ein explorativer Ansatz der Szenarioanalyse angewendet, da von der gegenwärtigen und empirisch konkret erhobenen Situation auf dem NFZ-Markt potentielle Zukunftsbilder entwickelt werden (vgl. Abbildung 65).

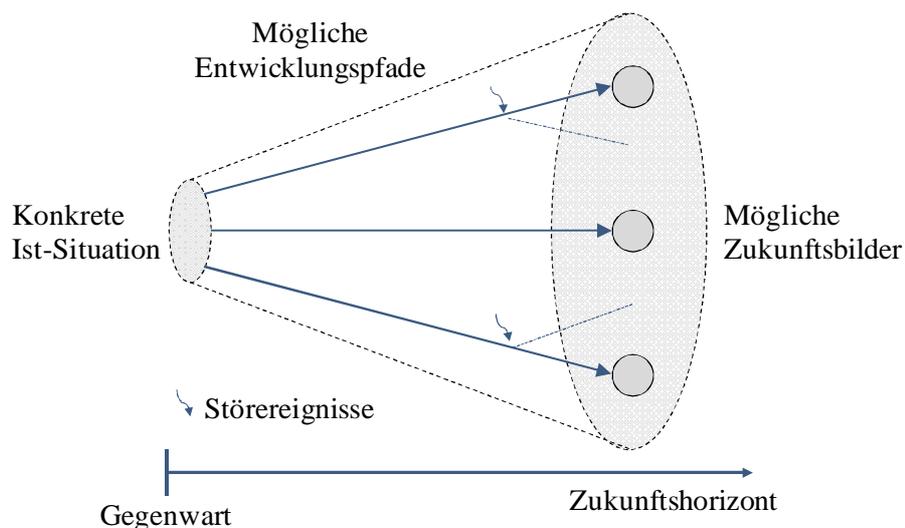


Abbildung 65: Explorative Szenariotechnik⁵⁶¹

Das Simulationsmodell unterstützt den Prozess der Szenarioerstellung indem es hilft, das Zusammenspiel zahlreicher Parameterkonstellationen und deren Konsequenzen für das Untersuchungsobjekt zu beurteilen. Nicht alle Zusammenhänge der Realität können aufgrund definierter Systemgrenzen durch die gewählten Modellparameter und funktionalen Abhängigkeiten abgebildet werden. Ebenso erscheinen zwar Zusammenhänge zwischen Größen während der Modellierung existent, gleichzeitig sind sie aber mit hoher Unsicherheit behaftet.⁵⁶² Da diese Abhängigkeiten aber trotz ihrer Unsicherheit berücksichtigt werden müssen, wird auf die Szenariotechnik zurückgegriffen.⁵⁶³

Abbildung 66 zeigt schematisch das Vorgehen in der Szenariotechnik.

⁵⁶⁰ Vgl. Mietzner (2009), S. 110–115.

⁵⁶¹ Eigene Abbildung in Anlehnung an Hungenberg (2014), S. 183; Gausemeier et al. (1996), S. 114.

⁵⁶² Vgl. Liebert (2001), S. 162.

⁵⁶³ Vgl. Porter (1999), S. 561.

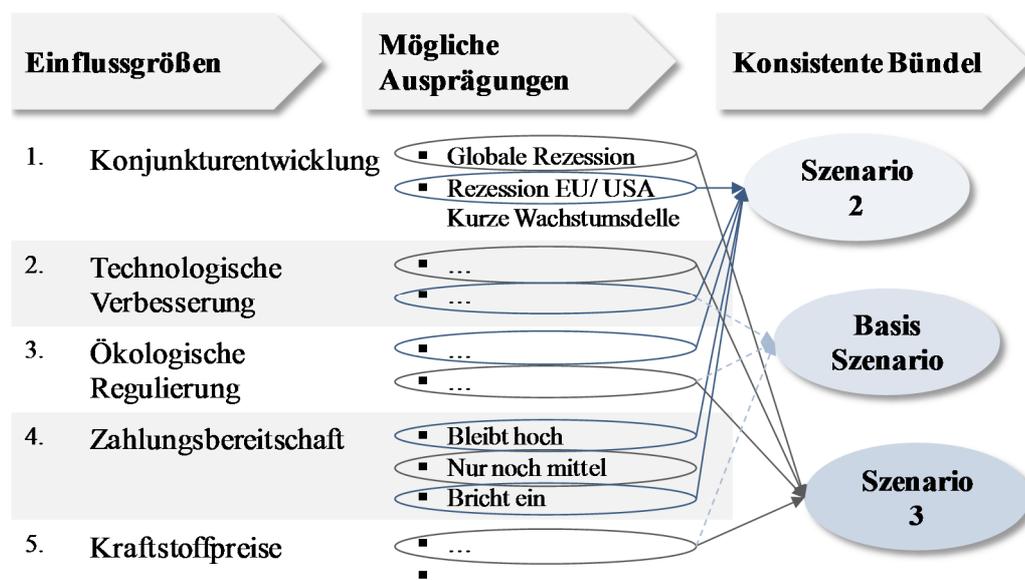


Abbildung 66: Beispielhaftes Vorgehen in der Szenariotechnik⁵⁶⁴

Für die Festlegung unterschiedlicher Szenarien werden Schlüsselfaktoren bestimmt, aus denen schlüssige Zukunftsbilder geformt werden. Schlüsselfaktoren sind solche Einflussgrößen, welche für die Prognose zukünftiger Entwicklungen als wesentlich betrachtet werden. Der Fokus liegt hierzu auf Faktoren mit wesentlichem Einfluss auf die Entwicklung des Untersuchungsobjektes, welche gleichzeitig eine hohe Unsicherheit ihrer gegenwärtigen und zukünftigen Ausprägung aufweisen. Darauf aufbauend werden zu jedem identifizierten Schlüsselfaktor Annahmen zu dessen Ausprägungen getroffen.⁵⁶⁵ Ein verbreiteter Ansatz stellt die Wahl einer optimistischen, einer dem aktuellen Trend entsprechend moderaten sowie einer pessimistischen Ausprägung dar. Dabei ist wichtig die Alternativen mit einem ausreichend differenzierenden Charakter auszuwählen und gleichzeitig die Plausibilität der Ausprägungen nicht zu vernachlässigen.⁵⁶⁶ Um valide Szenarien zu entwickeln, müssen sich die einzelnen Ausprägungen der Schlüsselfaktoren als Basis der Szenarien konsistent zueinander verhalten. Die Konsistenzanalyse stellt dies durch eine paarweise Überprüfung der Zukunftsprojektionen auf ihre Konsistenz sicher.⁵⁶⁷

Die erarbeiteten Szenarien werden anschließend zur Entwicklung alternativer Handlungsstrategien herangezogen und deren Auswirkungen auf das Untersuchungsobjekt beurteilt.⁵⁶⁸ In diesem Kontext wird das System Dynamics Simulationsmodell verwendet. Auf eine ausführlichere Darstellung der Szenariotechnik wird an dieser Stelle verzichtet.⁵⁶⁹

⁵⁶⁴ Eigene Abbildung in Anlehnung an *Hungenberg* (2014), S. 184.

⁵⁶⁵ Vgl. *Hungenberg* (2014), S. 183–185.

⁵⁶⁶ Vgl. *Gausemeier et al.* (1998), S. 121–122.

⁵⁶⁷ Vgl. zur Konsistenzanalyse beispielsweise *Kiesel* (2001), S. 58–60.

⁵⁶⁸ Vgl. *Hungenberg* (2014), S. 185.

⁵⁶⁹ Vgl. hierzu detaillierter *Gausemeier et al.* (1998); *Fink und Siebe* (2006); *Kiesel* (2001); *Hungenberg* (2014); *Mietzner* (2009).

8.2 Beschreibung und Analyse der Szenarien

Anhand der empirischen Untersuchungen wurden eine Reihe von exogenen Einflussfaktoren auf die Diffusion alternativer Antriebstechnologien identifiziert. Die Sensitivitätsanalyse⁵⁷⁰ lieferte hierzu Hinweise auf die Ergebnisrelevanz der betrachteten Einflussfaktoren. Eine Veränderung der Kraftstoffkosten wird durch die Parameter ‚Preis fossiler Kraftstoffe‘ und ‚Energiesteuer‘ betrachtet. Die höchste Parameterunsicherheit in den Anschaffungskosten liegt in den zukünftigen ‚Batteriekosten‘ für Hybrid- und Elektro-NFZ. Die strategischen Entscheidungsprozesse von NFZ-Herstellern sind äußerst schwierig zu approximieren, sodass die Unsicherheit der Modellverfügbarkeit durch Variation einer Szenariovariablen zur ‚Aufbaurrate des Herstellerinteresses‘ berücksichtigt wird. Die Politik als exogener Akteur hat neben der Energiesteuer ebenso durch die Subventionierung des Infrastruktur-Aufbaus und die Einführung einer grenzwertbasierten CO₂-Regulierung einen wesentlichen, aktiven Einfluss auf die Diffusion alternativer Antriebstechnologien.

Basierend auf einem Basisszenario werden anhand der Einflussfaktoren vier Szenarien zur zukünftigen Entwicklung des NFZ-Marktes beschrieben. Die Konsistenz der Szenarienbündel wurde durch die Plausibilisierung der Annahmen mit drei Marktexperten eines deutschen Automobilzulieferers sichergestellt. Tabelle 9 beschreibt die Szenarien, welche im Folgenden ausführlicher erläutert werden. Die Pfeile geben die Veränderung der Ausprägung der Einflussfaktoren im Vergleich zum Basisszenario an.

	CO ₂ Politik	Biogas	Elektrische Mobilität	Rezession
Preis fossile Kraftstoffe	→	↘	↗	↘
Energiesteuer Erdgas	↗	↗	→	→
Batteriekosten	↘	→	↘	↗
Herstellerinteresse Aufbau	→	↗	↗	↘
Infrastruktur Förderung	→	↗	↗	↘
CO ₂ Regulierung	Ja	Ja	Nein	Nein

Tabelle 9: Vergleich der Szenarien

⁵⁷⁰ Vgl. Kapitel 7.3.2.

8.2.1 Basisszenario

Beschreibung

Das Basisszenario dient als Ausgangspunkt der Szenarioanalyse und beschreibt ein sogenanntes *non-intervention*⁵⁷¹ Zukunftsbild. Dabei wird die derzeitige Situation mit den bestehenden Regelungen ohne Eingriffe der Akteure und anhand der wahrscheinlichsten Fortschreibung von Trends in die Zukunft projiziert. Im Basisszenario wird von einer moderat-positiven Entwicklung der europäischen und globalen Wirtschaft ausgegangen, sodass keine maßgeblichen Auswirkungen auf den Transportsektor und das Auswahlverhalten NFZ-betreibender Organisationen erwartet wird. Weiterhin werden die fossilen Kraftstoffpreise aufgrund der zunehmenden Nachfrage in den Entwicklungs- und Schwellenländern kontinuierlich ansteigen. Neue Fördertechniken und der Einsatz energiesparender Technologien können diesen Trend nur minimal abfedern, wodurch sich der Rohölpreis auf etwa 215 \$/bbl verdoppeln wird.⁵⁷² Der Dieselpreis steigt daher bis 2035 auf etwa 2,30 €pro Liter (exkl. MwSt.) an.⁵⁷³

Der Umwelt- und Klimaschutz wird im Transportsektor in den kommenden Jahren weiterhin an Bedeutung gewinnen, um die Emissionsbelastung durch den Straßengüterverkehr zu minimieren und den geforderten Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgase zu leisten. Im Basisszenario wird aufgrund der Unsicherheit über die zukünftige gesetzgeberische Ausgestaltung der CO₂-Grenzwerte keine CO₂-basierte Regulierung betrachtet. Das Ziel des Ausbaus der alternativen Tankinfrastruktur bis 2020 wird hingegen durch staatliche Interventionen erreicht, eine Anpassung der Energiesteuer erfolgt nicht.

Entsprechend der weltweiten konjunkturellen Lage wird die technische Entwicklung von PKW und NFZ kontinuierlich voranschreiten, sodass keine disruptiven Technologiesprünge oder Kostendegressionen angenommen werden. Das Herstellerinteresse an alternativen Antrieben nimmt mit wachsendem Marktanteil, steigendem Umweltbewusstsein und steigender Käuferwägung der Kunden konstant zu. Während die Lernrate der konventionellen Antriebstechnik aufgrund der technologischen Reife bei etwa 1 % liegt, bewegt sich die Lernrate für alternative Antriebstechnologien zwischen 8 % und 12 %.⁵⁷⁴ Eine ausführliche Auflistung der Modellparametrisierung erfolgt im Anhang.⁵⁷⁵

Analyse

Abbildung 67 zeigt die Prognose der Gesamtmarktentwicklung des deutschen NFZ-Marktes im Basisszenario bis 2035 anhand der Marktanteile der betrachteten Technologien. Aufgrund der

⁵⁷¹ *Non-intervention* (engl.) bedeutet Nichteinmischung.

⁵⁷² Vgl. *International Energy Agency* (2012), S. 26.

⁵⁷³ Vgl. Abbildung 53: Exogen angenommene Kraftstoffpreise.

⁵⁷⁴ Vgl. Anhang V 1), basierend auf Berechnungen historischer Kostenentwicklungen von technischen Komponenten.

⁵⁷⁵ Vgl. Anhang V 1) und Technikpakete im Anhang I .

Kombination von Grundmotoren und mehreren zusätzlichen Technikpaketen ist die Summe der Marktanteile größer 100 %.

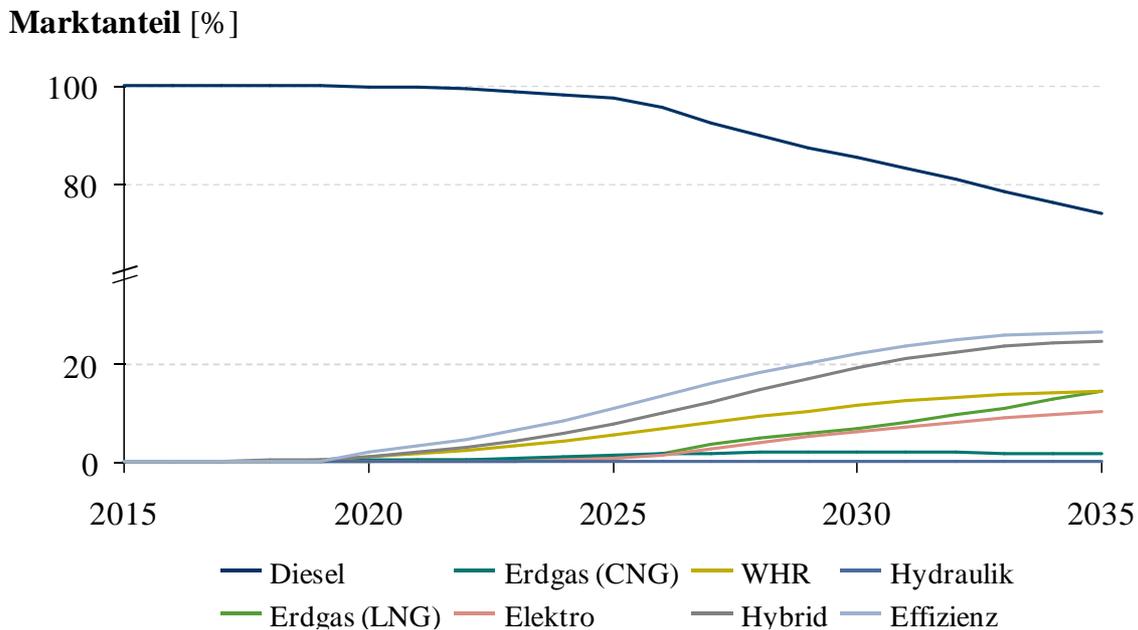


Abbildung 67: Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion im Basisszenario

Das Ergebnis zeigt die weiterhin bestehende Dominanz des Dieselmotors als grundlegende Antriebstechnologie. Dieser ist allerdings überwiegend mit zusätzlichen Technikpaketen kombiniert (Effizienzmaßnahmen, Hybridisierung und Abgaswärmenutzung). LNG erreicht bis 2035 einen Marktanteil von knapp 15 %, das elektrische Grundmotorkonzept knapp über 10 %. CNG-betriebene Motoren haben in den frühen Jahren der Diffusion (2018-2025) eine höhere Marktdurchdringung als LNG-betriebene NFZ. Allerdings dominiert das Konzept der Flüssiggasspeicherung aufgrund des Reichweiten-Vorteils und dem zunehmenden Infrastrukturausbau in den Folgejahren deutlich und die Diffusion CNG-betriebener NFZ scheitert.

Die höchste Marktdurchdringung der zusätzlichen Technikpakete erreichen konventionelle Effizienzmaßnahmen, aufgrund der vergleichsweise geringen Anforderungen an das komplementäre Ökosystem und die hohe Vertrautheit der Kunden. Fasst man Hybrid-NFZ und rein batterieelektrische NFZ zusammen, sind bis 2035 etwa 35 % aller NFZ in Deutschland elektrifiziert. WHR erreicht mit knapp 15 % eine mäßige Marktdurchdringung, da sich im urbanen Raum die Investition in Abgaswärmenutzung nicht amortisiert. Der hydraulische Hybrid spielt 2035 unter den Neuzulassungen keine Rolle (0 %). Insgesamt reduzieren sich die CO₂-Emissionen der neu zugelassenen NFZ-Flotte im Jahr 2035 durch technische Maßnahmen um 25 % gegenüber 2014 (ohne Berücksichtigung biogener Kraftstoffe oder CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung).

Analysiert man die unterschiedlichen Anwendungsfälle isoliert, zeigt sich ein dreiteiliges Bild (vgl. Abbildung 68): In den **städtischen Anwendungsfällen** (städtischer Verteiler-, Abfallsammelverkehr und Stadtbus) wird der Dieselmotor als dominierendes Antriebskonzept von der

Elektrifizierung abgelöst und fungiert zunehmend nur noch als Hilfsantrieb für serielle Hybride. Dabei ebnet die Vollhybridisierung, insbesondere von der frühen Diffusion in Stadtbussen getrieben, zunächst die Diffusion und wird anschließend durch rein elektrische, leichte NFZ im Verteilerverkehr sowie Range Extender im Abfallsammelerkehr aufgrund der hohen Gesamtbetriebskostenvorteile überholt. 2020 werden knapp 7 % der neu zugelassenen Stadtbusse in Deutschland mit hybriden Antriebssträngen ausgerüstet sein. Die hohe Endkundennähe und der unmittelbare Einfluss auf städtische Bewohner sind ein wesentlicher Treiber elektrifizierte NFZ aufgrund des leiseren und partiell emissionsfreien Betriebs. Dadurch bildet sich im urbanen Raum früh ein komplementäres Ökosystem für elektrische Antriebstränge aus. Ebenso setzt eine starke Kostendegression der Anschaffungskosten ein. Kurz- bis mittelfristig werden CNG-betriebene NFZ einen hohen Marktanteil im urbanen Raum erreichen (bis 10 %), die zunehmende Elektrifizierung und die geringe Relevanz des Antriebs in außerstädtischen Anwendungsfällen sorgen für ein abnehmendes Herstellerinteresse und höhere Margen aufgrund geringerer Verkaufszahlen, sodass die Diffusion scheitert. Gleiches gilt für den hydraulischen Hybrid in Abfallsammelfahrzeugen.

Im **Fernverkehr (inkl. Reisebusse)** hat die Dominanz des Dieselantriebs in Kombination mit konventionellen Effizienzmaßnahmen weiterhin Bestand. Die Abgaswärmenutzung ist dabei die alternative Antriebstechnologie mit der höchsten Marktdurchdringung. Von der zunehmenden Elektrifizierung im urbanen Raum profitieren Fernverkehrs-NFZ durch ein hohes Herstellerinteresse und Skaleneffekte in den Komponenten-kosten, sodass der Marktanteil von Hybrid-NFZ auf 20 % bis 2035 ansteigt. Aufgrund der Pfadabhängigkeit beginnt trotz signifikanter Gesamtbetriebskostenvorteile erst ab 2025 ein positiver Regelkreis im Aufbau des komplementären Ökosystems, dem Anstieg der Kundenvertrautheit und der Marktanteilszunahme von LNG-Antrieben.

Der **außerstädtisch-regionale Verkehr** (Regionaler Verteiler- und Bauverkehr) nimmt eine Zwischenposition ein. Aufgrund geringerer Reichweitenanforderungen als im Fernverkehr haben Erdgas-betriebene NFZ in diesem Anwendungsfall ein sehr viel höheres Marktpotenzial. Nutzlastanforderungen und höhere tägliche Fahrtstrecken verhindern allerdings eine Diffusion elektrischer NFZ. Daneben führt die Abgaswärmenutzung aufgrund des Fahrprofils zu wesentlichen Verbrauchseinsparungen und erreicht jeweils etwa 15 % Marktanteil. Deutliche Unterschiede sind in der Elektrifizierung zu erkennen. Im regionalen Verteilerverkehr sind 30 % der NFZ zumindest teilweise elektrisch betrieben. Im Bauverkehr erreicht die Hybridisierung nur eine geringe Marktdurchdringung von knapp 5 %. Dies ist auf das geringe Einsparpotenzial zurückzuführen, welches sich aufgrund des hohen Vollastbetriebsanteils des Dieselmotors – und damit vergleichsweise geringer Möglichkeiten zur Energieregeneration – einstellt.

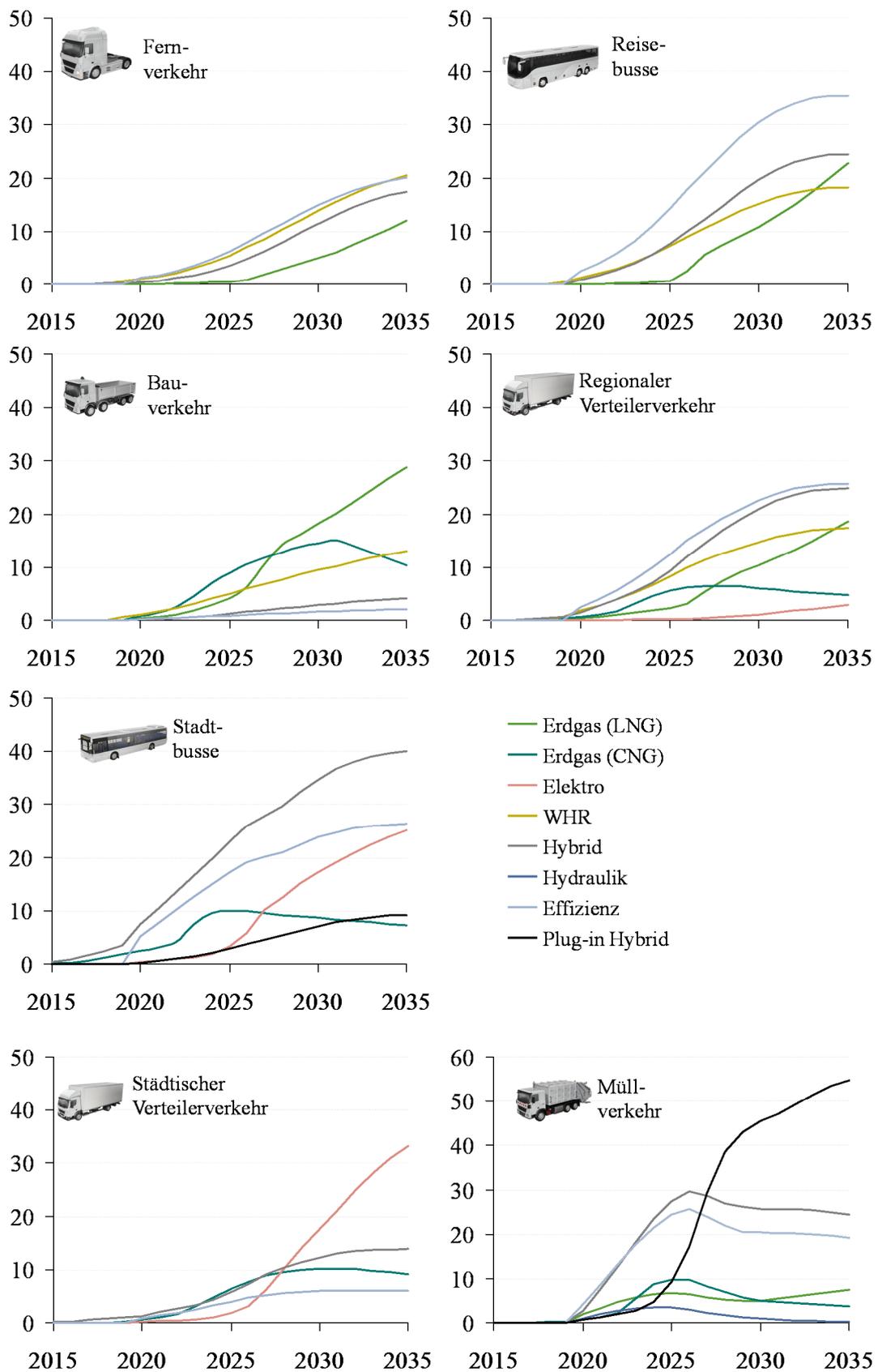


Abbildung 68: Anwendungsfallsspezifische Diffusion im Basisszenario (ohne Diesel)

8.2.2 CO₂-Politik

Beschreibung

Das Szenario *CO₂-Politik* geht von einer strikten Fokussierung der Legislative auf die Minimierung der CO₂-Reduktion zur Eindämmung der Erderwärmung aus. Eine zentrale Maßnahme ist dabei die Einführung von CO₂-Grenzwerten für neu zugelassen NFZ. Im Szenario wird eine CO₂-Regulierung analog dem Markt für PKW und leichte NFZ angenommen: Werden die Grenzwerte von der NFZ-Flotte nicht eingehalten, werden Strafzahlungen durch die Hersteller fällig. Hierbei wird angenommen, dass die Hersteller die Strafzahlungen über die Anschaffungskosten an die Kunden weitergeben, welche NFZ mit erhöhten CO₂-Emissionen größer dem Grenzwert nachfragen. Im Szenario wird eine Strafzahlung von 500 € pro überschrittenem Gramm CO₂ und Fahrzeug angenommen.⁵⁷⁶ Entsprechend der aktuellen legislativen Aktivitäten mit VECTO werden die Grenzwerte anwendungsfallsspezifisch definiert und sind für 2025 mit 5 % und 2030 mit 10 % unter dem Referenzverbrauch eines konventionellen Diesel-NFZ definiert.

Durch den Gesetzgeber erfolgt eine CO₂-abhängige Energiesteuer, sodass die Energiesteuerermäßigung von Erdgas aufgehoben wird und ab 2025 schrittweise um 0,25 € auf nahezu das Niveau von Diesel ansteigt. Darüber hinaus wird die Förderung von elektrischen Antrieben ausgebaut, sodass durch erhöhte Forschungsgelder die Lernrate auf 15 % ansteigt und NFZ-Schnellladesäulen mit 15.000 € subventioniert werden.

Analyse

Abbildung 69 zeigt, dass durch die Anpassung der Energiesteuer die Diffusion von LNG- und CNG-betriebenen NFZ scheitert. Die stufenweise Einführung der Strafzahlungen ab 2020 führt zwar zunächst zu einer höheren Attraktivität von Erdgas-NFZ gegenüber des konventionellen Dieselantriebs, allerdings besteht durch die Anpassung der Energiesteuer der signifikante Kraftstoffkostenvorteil nicht mehr. Daher wird der Nachteil höherer Anschaffungskosten und eines geringeren Nutzens in der Transportaufgabe gegenüber dem Dieselantrieb nicht mehr ausgeglichen. Der positive Regelkreis bleibt nun ebenfalls für LNG-Antriebe aus, wodurch der Tankstellenaufbau stockt, der Marktanteil gering bleibt und schließlich durch eine kontinuierliche Erhöhung der Herstellermarge der Anschaffungspreis ansteigt.

Begünstigt durch einen starken positiven Regelkreis gewinnen rein elektrische NFZ in den urbanen Anwendungsfällen deutlich an Marktanteil. Im Gegensatz zum Basisszenario ist die Marktanteilsentwicklung des rein elektrischen Antriebskonzeptes im Jahr 2035 durch ein exponentielles statt eines logarithmischen Wachstums gekennzeichnet. Im Fern- und Regionalverkehr besteht weiterhin der Bedarf an technischen Maßnahmen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs, sodass statt Gasantrieben verstärkt Dieselmotoren mit zusätzlichen Technologien zur CO₂-

⁵⁷⁶ Aufgrund des höheren Basisverbrauchs erfolgt eine in etwa proportionale Anpassung an die Strafzahlungen auf dem PKW-Markt.

Reduktion von NFZ-betreibenden Organisationen ausgewählt werden. Insbesondere durch die Wechselwirkungen mit rein elektrischen Fahrzeugen erreichen hybridelektrische NFZ den höchsten Marktanteil.

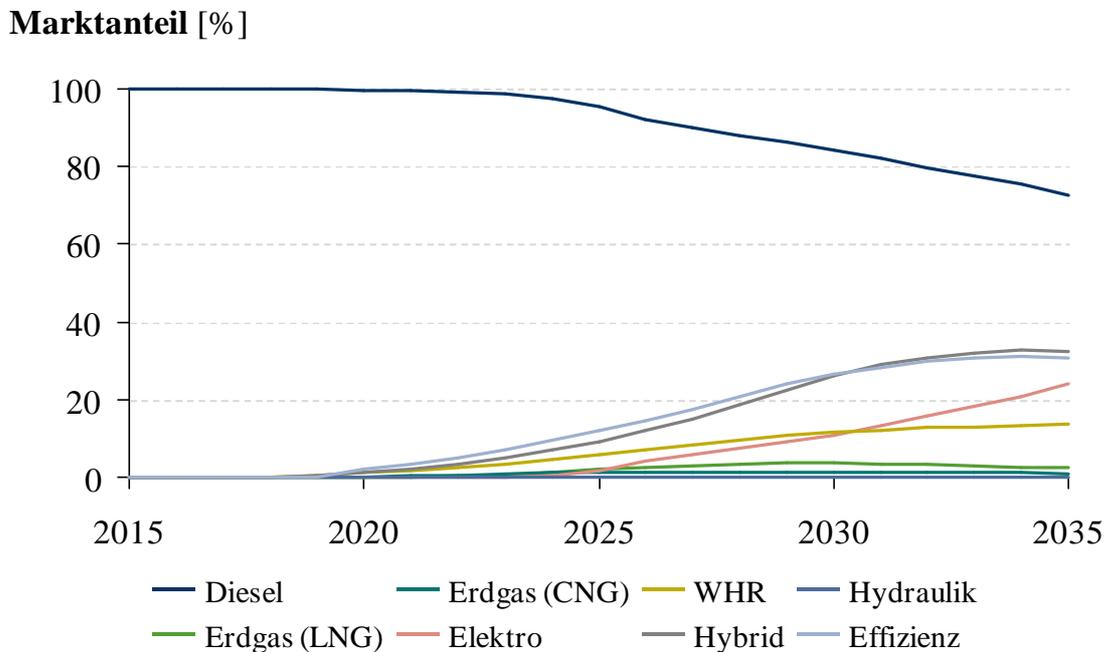


Abbildung 69: Marktentwicklung im Szenario *CO₂-Politik*⁵⁷⁷

Durch die Maßnahmen der Politik werden die CO₂-Emissionen der neu zugelassenen NFZ-Flotte im Jahr 2035 gegenüber dem Basisszenario um 11 % gesenkt. Das Reduktionspotenzial gegenüber 2014 beträgt somit insgesamt knapp 33 %. Gewichtet man die CO₂-Emissionen der neu zugelassenen NFZ-Flotte nach der jährlichen Laufleistung der Anwendungsfälle, beträgt das Reduktionspotenzial nur 25 % gegenüber 2014. Dies ist auf die Substitution von LNG-Antrieben durch Dieselmotoren im Fernverkehr, dem Anwendungsfall mit höchstem Marktanteil und höchsten Laufleistungen, zurückzuführen.

8.2.3 Biogas

Beschreibung

Im Simulationsmodell werden biogene Kraftstoffe nicht explizit betrachtet. Daher untersucht das Szenario den Effekt eines radikalen Wandels hin zur breiten Erzeugung und Nutzung von erneuerbaren Biokraftstoffen am Beispiel von Biogas. Bis 2035 wird der Anteil von Biogas und EE-

⁵⁷⁷ Für die vier weiteren Zukunftsszenarien wird auf eine grafische Darstellung der Ergebnisse auf die unterschiedlichen Anwendungsfälle verzichtet. Die wesentlichen Erkenntnisse und signifikante Unterschiede zum Basisszenario werden in der Analyse diskutiert.

Gas⁵⁷⁸ aus Methanisierung zum Antrieb von CNG- und LNG⁵⁷⁹-NFZ auf 65 % ansteigen (vgl. Abbildung 70).

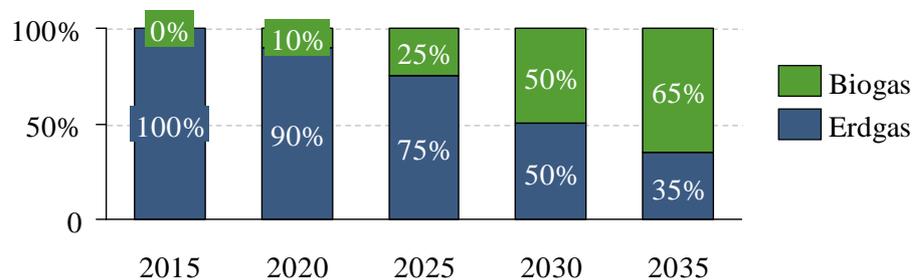


Abbildung 70: Anteil an Biogas am Gasverbrauch von LNG- und CNG-NFZ im Szenario *Biogas*

Die umfangreiche Nutzung von Biogas hat zur Folge, dass sich die Entwicklung des Gaspreises von anderen fossilen Energieträgern weiter entkoppelt. Dieser Effekt wird allerdings von der Aufhebung der Energiesteuerermäßigung ausgeglichen, da der Staat mit dem Ziel konstanter Steuereinnahmen die Energiesteuer auf alternative Kraftstoffe ausweitet, um der Reduktion der Mineralölsteuereinnahmen entgegenzuwirken. Gleichzeitig ist sich die Politik dem Potenzial aus der Nutzung von Biogas bewusst und fördert den Ausbau von NFZ-tauglichen Gastankstellen mit 200.000 € pro Anlage über das bestehende Ausbauziel hinaus. Hersteller von NFZ begegnen dem Trend mit einem überproportionalen Aufbau eines umfangreichen Modellportfolios gasbetriebener NFZ.

Analyse

In diesem Szenario erfolgt ab 2025 eine starke Marktdurchdringung von LNG-betriebenen NFZ mit einem Marktanteil von knapp 40 % (vgl. Abbildung 71). Zuvor sind trotz staatlicher Subventionen für den Infrastrukturaufbau und Herstelleraktivitäten weiterhin Diesel-basierte NFZ aufgrund der Pfadabhängigkeit das präferierte Antriebskonzept. In den folgenden zehn Jahren steigt der LNG-Marktanteil kontinuierlich um 30 % an. Ein disruptiver Marktumbruch tritt jedoch nicht ein, da die Vertrautheit der Kunden nur allmählich zunimmt – obwohl der LNG-Antrieb durch Skaleneffekte bis 2035 nahezu die Anschaffungskosten eines konventionellen Dieselmotors erreicht. Im volumenstarken Fernverkehr bleiben die Technologie-bedingten Nachteile in Reichweite und Drehmoment des Gasmotors bestehen und sorgen für eine weiterhin leicht geringere Anwenderfreundlichkeit und Nützlichkeit im Vergleich zum Dieselmotor.

⁵⁷⁸ EE-Gas bezeichnet Erneuerbare Energien Gas und beschreibt die synthetische Herstellung von Methan gas und Elektrolyse von Wasserstoff durch Strom, welcher aus regenerativen Quellen erzeugt wurde. Dieses EE-Gas kann in das konventionelle Gasnetz eingespeist werden. Vgl. dazu *Unger und Hurtado (2014)*.

⁵⁷⁹ Die Bezeichnung von LNG, als verflüssigtes Erdgas, und CNG, als komprimiertes Erdgas, unter Beimischung von Biogas so nicht mehr korrekt. Allerdings ist hierunter weniger die Klassifizierung des Kraftstoffs, als vielmehr das zugrunde liegende Motorenkonzept mit Energiespeicher verstanden und bezieht die Nutzung regenerativer gasförmiger Kraftstoffe mit ein.

Marktanteil [%]

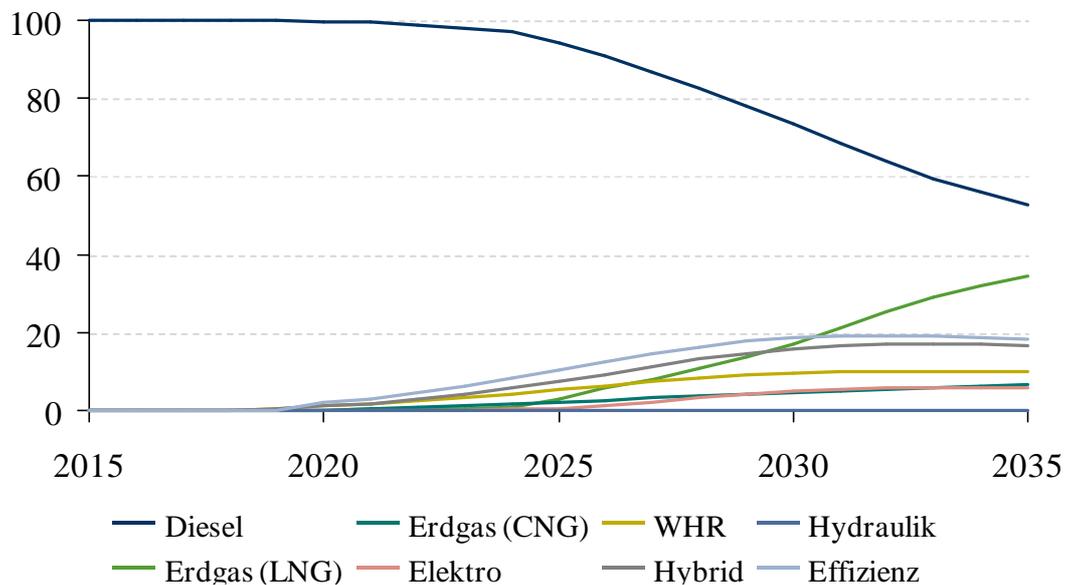


Abbildung 71: Marktentwicklung im Szenario *Biogas*

Im Gegensatz zu den bisherigen Szenarien überholt der Marktanteil des CNG-Antriebes den Elektroantrieb in den urbanen Anwendungsfällen und diffundiert in den Markt. Die Marktdurchdringung der zusätzlichen Technikpakete Hybridisierung, Effizienzmaßnahmen und WHR gerät durch die Substitution des LNG-Antriebes ins Stocken, da im Modell die Kombination von Gasmotoren mit anderen Technikpaketen ausgeschlossen wurde.⁵⁸⁰ Eine solche Kombination ist jedoch prinzipiell denkbar und könnte zu einer weiteren Zunahme des Marktanteils dieser Technologien führen. Die Substitution von Diesel durch Biogas führt zu einer deutlichen Verbesserung der WtW CO₂-Bilanz neu zugelassener NFZ. Bezieht man diesen Effekt mit in die Reduktionsbilanz ein, so sinken die CO₂-Emissionen gegenüber dem Basisszenario im Jahr 2035 um etwa 20 %. Dies entspricht einer CO₂-Verminderung der neu zugelassenen NFZ-Flotte um 40 % pro km im Vergleich zum Jahr 2014.

8.2.4 Elektrische Mobilität

Beschreibung

Das Szenario *Elektrische Mobilität* beschreibt den Wandel des NFZ-Marktes hin zur elektrischen Mobilität. Entsprechend den derzeitigen Entwicklungen auf dem PKW-Markt fokussieren sich die Interessen der Hersteller zunehmend auf Elektroantriebe, da Länder, Städte und Gemeinden bestrebt sind, die Verkehrsbelastungen in urbanen Gegenden zu minimieren. Der Aufbau städtischer Ladesäulen für elektrische NFZ wird daher mit 20.000 € gefördert. Durch einen steigenden

⁵⁸⁰ Der Ausschluss dieser Kombination erfolgte aus Gründen der Komplexitätsreduktion des Simulationsmodells und der heutigen technischen Unsicherheit über die Auslegung und Effizienzpotenziale (vgl. Kapitel 4).

Rohölpreis (240 \$/bbl) auf dem Energiemarkt tritt ein globaler Wandel auf dem PKW-Markt hin zur elektrischen Mobilität ein, da durch neue Technologien und umfangreiche Entwicklungstätigkeiten die Batteriekosten schneller als bisher angenommen sinken. Die Interdependenzen mit dem PKW-Markt sorgen für erhöhte Skaleneffekte und eine deutliche Kostendegression von Batterien und Elektromotoren bis 2020 sowie darüber hinaus. Der Batteriepreis sinkt bis 2020 auf 170 €/kWh, die Lernrate liegt bei 15 %.

Analyse

Abbildung 72 zeigt in diesem Extremszenario eine außerordentlich hohe Marktdurchdringung elektrischer NFZ. In den urbanen Anwendungsfällen ist der Elektroantrieb das dominierende Antriebskonzept mit einem Marktanteil von über 80 %.⁵⁸¹ Ab dem Jahr 2030 setzt ein starker Regelkreis in der Kostendegression ein, sodass Stadtbusse und städtische Verteilerfahrzeuge mit batterieelektrischen Antrieben günstiger sind als die konventionellen Dieselmotoren mit Abgasnachbehandlung und aufwendigem Getriebe. Allerdings ist der Elektroantrieb im Fernverkehr aufgrund der begrenzten Reichweite mit der in den Technikpaketen definierten Spezifikationen nicht einsatzfähig, sodass eine Sättigung nahe des maximalen Marktpotenzials von rein elektrischen NFZ einsetzt.

Marktanteil [%]

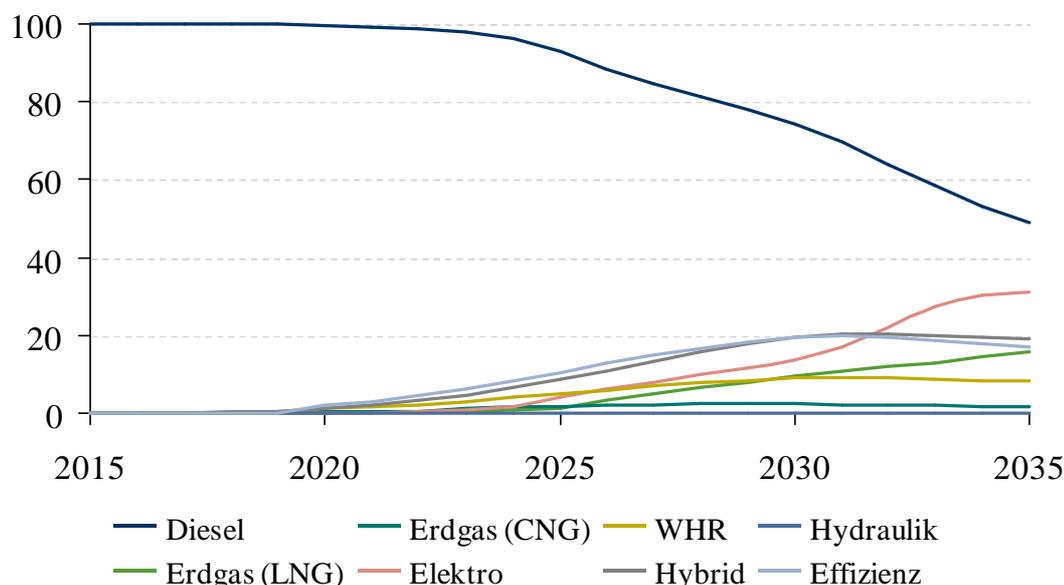


Abbildung 72: Marktentwicklung im Szenario *Elektrische Mobilität*

Der hohe Rohölpreis führt im Fernverkehr zu einem kontinuierlichen Marktanteilswachstum von LNG-Antrieben. Ein exponentielles Wachstum durch einen starken positiven Regelkreis ist nicht zu verzeichnen, da der hohe Elektrifizierungsgrad in urbanen Anwendungsfällen eine Ausweitung der Skaleneffekte verhindert.

⁵⁸¹ Im Abfallsammelverkehr als Range Extender.

Ebenfalls führt der hohe Marktanteil des reinen Elektromotors zu einer Verdrängung zusätzlicher Technikpakete. Bis 2030 verzeichnen Hybridfahrzeuge und Effizienzmaßnahmen einen Anstieg des Marktanteils auf über 20 %. Anschließend stagnieren beide Technologien auf diesem Niveau, da durch die Diffusion von Elektro-NFZ und LNG-Antrieben Dieselmotor-basierte NFZ verdrängt werden. Zusammenfassend stellt sich gegenüber dem Basisszenario eine CO₂-Reduktion der durchschnittlichen NFZ-Flotte pro km von 25 %, dies entspricht einer gesamthafte Reduktion von deutlich über 40 % zum Jahr 2014.

8.2.5 Rezession

Beschreibung

Dieses Szenario beschreibt eine wirtschaftliche Stagnation in Europa und der Welt. Durch die geringere Industrieproduktion sinkt die Nachfrage nach Rohöl, was den Preisanstieg bis 2035 reduziert. Des Weiteren hat die geringere Industrieproduktion Auswirkungen auf den Transportsektor und den Absatz von NFZ für die Hersteller. Die finanzielle Situation der Unternehmen in der Automobilindustrie verschlechtert sich, wodurch geringere Forschungs- und Entwicklungsbudgets verfügbar sind. Folglich werden Batteriepreise langsamer als angenommen sinken und 220 €/kWh im Jahr 2020 betragen. Dadurch besteht allerdings ein höheres Kostendegressionspotenzial, sodass eine Lernrate für die Elektrifizierung von NFZ von 15 % gewählt wird. Die schlechtere finanzielle Situation der Hersteller führt auch zu einem geringeren Aufbau des Interesses an alternativen Antriebstechnologien. Dementsprechend steigt die Modellverfügbarkeit geringer an, da eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeugmodelle ein erhöhten wirtschaftlichen Aufwand sowie Risiko bedeuten. Zuletzt hat die allgemein schlechte Lage im Transportsektor auch Auswirkungen auf die Tankstellenbetreiber. Die Zahl proaktiver Manager, welche Tankstellen zum Laden und Betanken von NFZ mit alternativen Kraftstoffen betreiben, sinkt dadurch um 20 %.

Analyse

Abbildung 73 zeigt, dass die Diffusion alternativer Antriebstechnologien kaum merklich stattfindet. Der Marktanteil von Dieselmotoren erreicht asymptotisch eine minimale Grenze von 90 %. Einzig der LNG-Antrieb steigt auf einen Marktanteil von knapp über 5 %. Die Diffusion von Elektro-NFZ scheitert, da keine wesentliche Kostendegression einsetzt und sich das komplementäre Ökosystem nicht entwickelt. Diese Phänomene führen zu einer hohen Marktdurchdringung von Effizienzmaßnahmen im Gesamtmarkt sowie der Abgaswärmenutzung im Langstreckenverkehr. Die Hybridisierung wird dagegen im urbanen Raum die dominierende alternative Antriebstechnologie.

Dementsprechend sind die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der neu zugelassenen NFZ-Flotte 10 % höher als im angenommenen Basisszenario. Folglich reduzieren sich die Emissionen gegenüber 2014 nur um 18 %. Dies ist im Wesentlichen auf die Effizienzsteigerung des konventio-

nellen Diesels und die Hybridisierung zurückzuführen. Alternative Kraftstoffe können dazu nur in sehr begrenztem Maße beitragen.

Marktanteil [%]

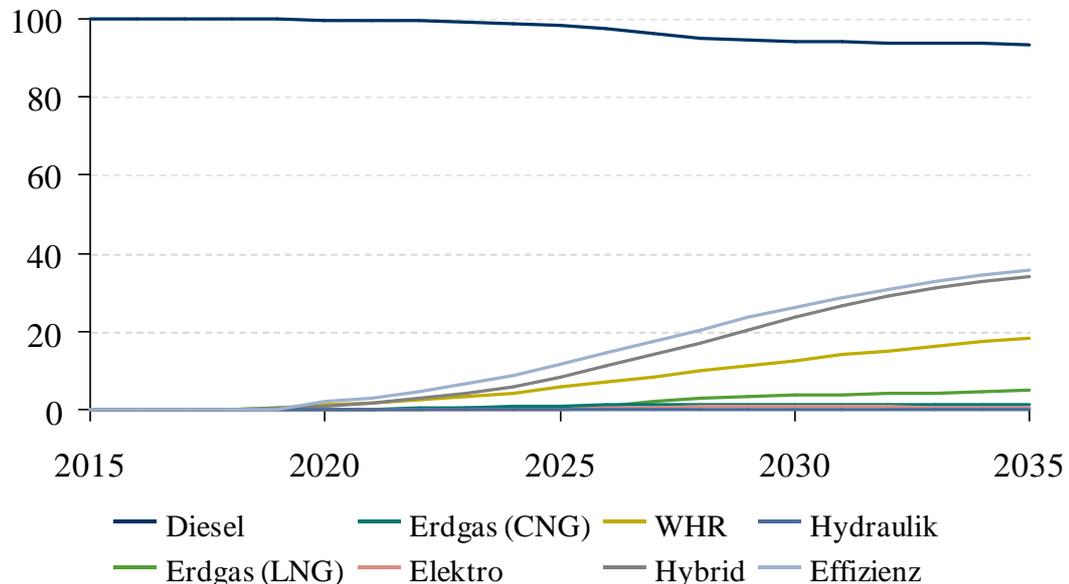


Abbildung 73: Marktentwicklung im Szenario *Rezession*

8.3 Abschließende Diskussion der Forschungsfragen

Ziel dieses Abschnittes ist es, die zu Beginn dieser Arbeit formulierten drei Fragestellungen im Hinblick auf die wesentlichen Aspekte der unterschiedlichen Akteure zu beantworten. Dazu werden neben den Erkenntnissen aus der Szenarioanalyse die erreichten Ergebnisse der Unterziele 1-3 in der Analyse des organisationalen, organisationsexternen und technologischen Kontextes der Diffusion CO₂-sparender Antriebstechnologien herangezogen.

8.3.1 CO₂-Reduktionspotenzial

Welches zukünftige CO₂-Reduktionspotenzial ist durch technische Maßnahmen im straßengebundenen Güter- und öffentlichen Personenverkehr realisierbar?

Die Untersuchung des technologischen Kontextes hat gezeigt, dass in den städtischen Anwendungsfällen durch den Einsatz von rein elektrischen NFZ ein vollständiges CO₂-Vermeidungspotenzial auf TtW-Basis besteht. Ebenso sind durch die Hybridisierung enorme Effizienzsteigerungen erreichbar (bis zu 60 % bei seriellen Hybriden). Allerdings sind sowohl die Reichweite als auch der Marktanteil dieser Anwendungsfälle geringer als im Fern- und Regionalverkehr. Dort ist durch den Einsatz von Hybridisierung und Effizienzmaßnahmen maximal ein Einsparpotenzial von 28 % zu erreichen. Der Einsatz von LNG-betriebenen Motoren kann

die CO₂-Emissionen gegenüber 2014 bis 2035 um maximal 31 % vermindern (vgl. Kapitel 4.2.2). Daher wird auf absoluter Basis das Emissionsniveau nur teilweise reduziert werden können. Ferner kann der Einsatz rein elektrischer NFZ lediglich zu einer Verschiebung der CO₂-Emissionen von der Straße (TtW-Betrachtung) in die Energieerzeugung (WtW-Betrachtung) führen.

Auf Basis des Unterziels 1 lässt sich anhand der Technikpakete (vgl. Kapitel 4.2.2) die Mindestreduktion der CO₂-Emissionen berechnen. Sollte es zu keiner Diffusion von CO₂-sparenden Technologien kommen, so wird allein bis 2035 durch die technische Weiterentwicklung des konventionellen Dieselmotors und Optimierung des Gesamtfahrzeugs (Technikpaket D0 zu D2) eine Verminderung von 14 % des Kraftstoffverbrauchs der neu zugelassenen NFZ-Flotte gegenüber 2014 eintreten. Abbildung 74 vergleicht das Reduktionspotenzial bis 2035 in den unterschiedlichen Szenarien. Es zeigt, dass selbst im pessimistischen Szenario *Rezession* die CO₂-Emissionen auf einer TtW-Basis um 18 % gegenüber 2014 reduziert werden können.

Basis-szenario	CO₂-Politik	Biogas	Elektrische Mobilität	Rezession	Ohne Diffusion
25%	33%	40%	43%	18%	14%

Abbildung 74: Vergleich der CO₂-Reduktion der neu zugelassenen NFZ Flotte im Jahr 2035 gegenüber 2014 in den Szenarien und ohne Diffusion einer CO₂-sparenden Technologie

Um die Einordnung des Reduktionspotenzials durch rein technische Weiterentwicklung und die Diffusion CO₂-sparender Technologien in den Szenarien zu vereinfachen, wurde mit dem Simulationsmodell eine Monte Carlo Simulation durchgeführt. Dabei wurden die beschreibenden Parameter der Szenarien in den vorgestellten maximalen Wertebereichen multivariat entsprechend einer Gleichverteilung verändert. Auf Basis von 500 Simulationsläufen wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit für das CO₂-Reduktionspotenzial in Abhängigkeit der Parameterkombinationen berechnet. Aufgrund der Annahme einer Gleichverteilung und Vernachlässigung bedingter Wahrscheinlichkeiten ist die Aussagekraft von Abbildung 75 eingeschränkt. Sie zeigt jedoch, dass anhand der gewählten Parameterkombinationen das CO₂-Reduktionspotenzial der durchschnittlichen Flotten-Emissionen neu zugelassener NFZ durch die Diffusion CO₂-sparender Technologien maximal 45 % betragen wird. Aufgrund des höheren Elektrifizierungsanteils im Stadtverkehr mit geringer Laufleistung werden die absoluten Emissionen sich in geringerem Umfang reduzieren. Zusätzliches Potenzial zur Reduktion auf einer WtW Basis besteht im Einsatz regenerativer Kraftstoffe (vgl. Szenario *Biogas*).

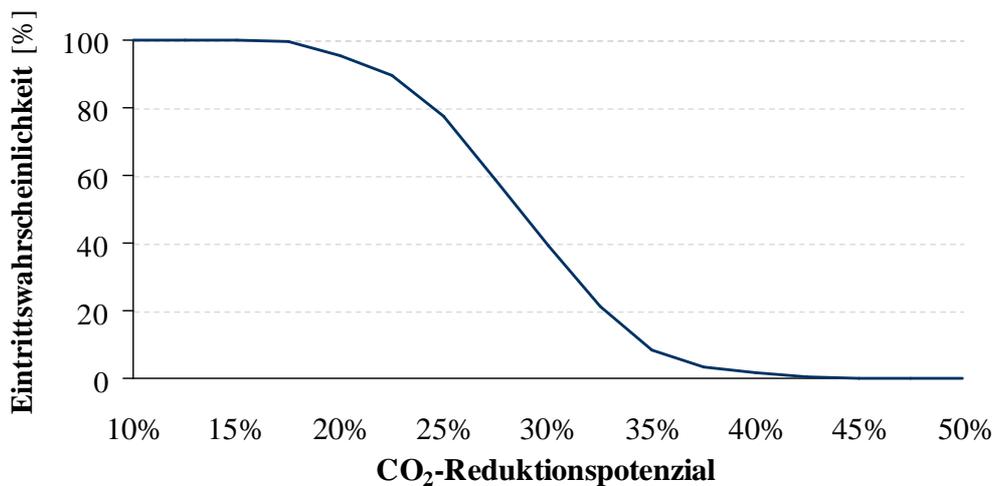


Abbildung 75: Eintrittswahrscheinlichkeit der CO₂-Reduktion im Jahr 2035 gegenüber 2014 in Abhängigkeit einer gleichverteilten multivariaten Veränderung der Szenarioparameter

8.3.2 Dominantes Design

Welche Technologien zur CO₂-Reduktion werden sich als dominantes Design auf dem NFZ-Markt etablieren?

Bis 2035 bleibt der Dieselmotor das dominante Design der Antriebstechnologie für NFZ. Zwar wird der konventionelle Dieselmotor ohne Hybridisierung, Abgaswärmenutzung oder umfangreiche Effizienzmaßnahmen nahezu gänzlich vom Markt verdrängt, als prinzipielle Antriebsform ist er in den kommenden 20 Jahren jedoch nicht zu ersetzen. Wesentliches Kriterium ist dabei die Pfadabhängigkeit im Allgemeinen, sowie im Speziellen der Reichweitenvorteil im Fernverkehr. Darüber hinaus erreichte der elektrische Hybridantrieb in allen betrachteten Szenarien einen Marktanteil von mindestens 20 %. Neben konventionellen Effizienzmaßnahmen wird sich WHR im Fernverkehrseinsatz ebenso etablieren, der Marktanteil wird bis 2035 allerdings nicht über 20 % im NFZ-Markt ansteigen.

Die Diffusion des hydraulischen Hybrids und CNG-betriebener NFZ wird hingegen scheitern, auch wenn CNG sich in den Jahren 2017 bis 2030 zweitweise als Brückentechnologie zu LNG etablieren könnte. Der Marktanteil wird die Grenze von 10 % im NFZ-Markt nicht überschreiten.

Des Weiteren zeigte die Szenarioanalyse, dass der ausbleibende positive Regelkreis im Aufbau des komplementären Ökosystems und die Bildung von Kundenvertrautheit die Etablierung von LNG und Elektrofahrzeugen verhindern kann. Aus heutiger Sicht wird die reine Elektrifizierung von NFZ bis 2035 daher nicht mit vollständiger Sicherheit eintreten. Im Hinblick auf die von den Akteuren des NFZ-Marktes gegenwärtig wahrgenommene Situation, herrscht noch eine sehr hohe Unsicherheit über die Marktentwicklung. Diese Unsicherheit kann entweder in der Bildung eines dominanten Designs zum Antrieb von NFZ mit alternativen (biogenen) Flüssigkraftstoffen oder elektrischer Energie resultieren. Allerdings besteht vielmehr eine hohe Wahrscheinlichkeit,

dass sich im urbanen Raum und in der Fernverkehrsanwendung unterschiedliche dominante Designs etablieren könnten.

Anhand der Monte Carlo Simulation aus der Untersuchung des CO₂-Reduktionspotenzials wurden weitere Indikatoren zum zukünftigen dominanten Design untersucht. Hierfür wird die Häufigkeit berechnet, mit welcher LNG, CNG und BEV, das alternative Antriebskonzept in NFZ mit der höchsten Marktdurchdringung sind. Die Auswertung zeigt, dass in keiner Parameterkombination der Marktanteil einer alternativen Antriebstechnologie die Marktdurchdringung des Dieselmotors übersteigt. Folglich wird statt des Dieselmotors, der elektrische Hybrid als zusätzliches Antriebskonzept betrachtet. Abbildung 76 unterstreicht das Marktpotenzial hybridelektrischer NFZ bis 2035, da in 65 % der Parameterkombinationen der Hybridantrieb das alternative Antriebskonzept mit der höchsten Marktdurchdringung ist.

LNG	CNG	BEV	Hybrid
18%	0%	17%	65%

Abbildung 76: Vergleich der Häufigkeit, mit welcher CO₂-sparende Antriebstechnologien die Alternative mit der höchsten Marktdurchdringung sind

Zusammenfassend besteht also durch die Hybridisierung ein hohes Potenzial, dass sich die Elektrifizierung von NFZ im urbanen Raum zu einem dominanten Antriebsdesign entwickelt. Ob sich hingegen LNG, beispielsweise auf Basis von Biogas, im Fernverkehr etabliert ist mit höherer Unsicherheit verbunden. Eine weitere Alternative könnte hierbei in ferner Zukunft Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge (vgl. 4.1.2.2) im Fernverkehrseinsatz darstellen.

8.3.3 Frühe Adopter und Lead User

Welche früh adoptierenden Lead User werden die Diffusion CO₂-sparender Technologien treiben?

Die Untersuchung des organisationalen Kontextes im Rahmen des Unterziels 2 zeigte, dass gängige und vergleichsweise einfach messbare Kriterien nicht für die deskriptive Beschreibung von *Innovatoren* und *Frühen Adopter* auf dem NFZ-Markt herangezogen werden können. Einzig die zunehmende Organisationsgröße übt einen signifikanten Einfluss aus. Die Tendenz eines höheren Anteils von NFZ-betreibenden Organisationen unter den *Frühen Adoptern* konnte aufgrund einer zu geringen Signifikanz nicht statistisch gestützt werden. Andererseits zeigen die derzeitigen Neuzulassungen von NFZ mit alternativen Antriebstechnologien (vgl. Kapitel 2.1.2) und die gegenwärtige Nutzung von diesen (vgl. Kapitel 5.2.5.3) eine deutliche Vorreiterrolle kommunaler Anwendungsfälle in der Adoption innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion. Dies hängt unter anderem mit der höheren Verfügbarkeit dieser Technologien im Modellportfolio der Hersteller zusammen (vgl. Kapitel 4.1.4). Daher setzen sich Mitglieder eines *buying centers* in Organisationen im städtisch-kommunalen Rahmen mit alternativen Antriebs-

technologien verstärkt auseinander (vgl. u. a. Kapitel 5.2.5.2 und Interviews Kapitel 6), da die Mund-zu-Mund Propaganda durch Händler, Kollegen oder Fachzeitschriften deutlich höher ist.

Aufgrund des hohen Einsparpotenzials (CO₂-, Lärm und Schadstoff-Emissionen, vgl. Kapitel 4) und der geringeren Anforderung an Reichweite (vgl. Kapitel 2.1.2) ist der *relative advantage* für innovative Antriebstechnologien in den städtischen Anwendungsfällen deutlich stärker ausgeprägt als in den übrigen Transportbereichen. Deshalb sind statt *Früher Adopter* vielmehr *Lead User* für die höhere Adoption alternativ angetriebener NFZ in städtischen Anwendungsfällen verantwortlich.

Diese These wird durch die Ergebnisse der Szenarioanalyse bestätigt. Kommunale Unternehmen sind klare *Lead User* für die Elektrifizierung (Hybrid und rein elektrisch) von NFZ im Speziellen als auch für alternative Antriebe im Allgemeinen. Im Basisszenario fallen knapp 50 % der Neuzulassungen von NFZ mit alternativen Antrieben auf kommunale Unternehmen, obwohl diese nur etwa 14 % des Gesamtmarktes ausmachen. Hierbei nehmen Stadtbusse eine besondere Führungsrolle ein, da 8 % der neu zugelassenen Stadtbusse 2020 elektrifiziert sein werden. Weitere 20 % trägt der städtische Verteilerverkehr zum Gesamtabsatz alternativer Antriebskonzepte in 2020 bei. Dieser Anwendungsfall ist nach 2025 auch der treibende Anwendungsfall in der Diffusion rein elektrischer NFZ aufgrund des hohen Kosteneinsparpotenzials sowie des leisen und lokal emissionsfreien Betriebs.

Lead User für LNG-betriebene NFZ sind im außerstädtischen, regionalen Verkehr zu finden und damit weniger kommunalen Unternehmen zuzuordnen. Neben Organisationen im regionalen Verteilerverkehr sind Reisebusunternehmen potentielle *Lead User* für den LNG-Antrieb. Die Endkundennähe erfordert den Komfort eines leisen lauffähigen Antriebes und macht die Vermarktung eines grünen Images interessant. Bei langen Fernreisen ins europäische Ausland stellt die fehlende Infrastruktur allerdings ein Nachteil dar, sodass hier vermehrt Busse für inländische Städtereisen oder Überlandfahrten im ÖPNV als treibende Anwendung für die Diffusion LNG-betriebener NFZ in Frage kommen könnten.

“If a trend becomes obvious – you are too late“

Elon Musk, Gründer von PayPal und Tesla, 2013

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

Kapitel 9 fasst die Erkenntnisse dieser Arbeit anhand der zugrundeliegenden Forschungsfrage und der konzeptionellen Unterziele zusammen. Des Weiteren werden die Limitationen dieser Arbeit aufgezeigt und dadurch der weitere Forschungsbedarf im Umfeld der Technologiediffusion auf dem NFZ-Markt abgeleitet. Schließlich werden die Implikationen der Ergebnisse für die praktische Anwendung in Wirtschaft und Politik aufgezeigt.

9.1 Zusammenfassung

Die dieser Forschungsarbeit zugrunde liegende Forschungsfrage hatte zum Ziel, die Einflussgrößen und Wirkzusammenhänge, welche die gegenwärtige und zukünftige Marktdurchdringung innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion in NFZ-Markt determinieren, zu identifizieren. Zur systematischen Beantwortung dieser Frage wurden fünf konzeptionelle Unterziele formuliert. Die Ergebnisse der Unterziele werden im Folgenden diskutiert:

Unterziel 1 diente der Erarbeitung von Technikpaketen zur CO₂-Reduktion von NFZ. Es zeigte sich, dass eine große Vielfalt an Technologien gegenwärtig von der Automobilindustrie in Erwägung gezogen wird, um den Kraftstoffverbrauch von NFZ zu minimieren. Ein Großteil dieser Technologien ist untereinander kompatibel und führt zu unterschiedlich hohen relativen Vorteilen in den sieben betrachteten Anwendungsfällen. Daher wird sich die Komplexität im Angebotssportfolio und den Entwicklungsvorhaben der Automobilindustrie in den kommenden Jahrzehnten erhöhen. Um die Komplexität auf ein, für das Simulationsmodell, beherrschbares Niveau zu reduzieren, wurden deshalb die vielversprechendsten Kombinationen für die kommenden zwei Jahrzehnte durch Technikpakete definiert. Die Technikpakete zeigen, dass sich ausschließlich durch die Weiterentwicklung des Dieselmotors, eine Reduktion der CO₂-Emissionen der durchschnittlichen neu zugelassenen NFZ-Flotte von 14 % einstellen wird. Eine hohe Verfügbarkeit alternativer Antriebstechnologien besteht gegenwärtig insbesondere in den Anwendungsfällen Stadtbus und Abfallsammelverkehr.

Unterziel 2 hatte die Untersuchung des organisationalen Adoptions- und Kaufverhaltens von NFZ-betreibenden Organisationen zum Ziel. Dafür wurden zwei empirische, quantitative Studien

auf dem deutschen NFZ-Markt durchgeführt. Die Untersuchung des Adoptionsverhaltens für CO₂-sparende Antriebstechnologien bewies die Existenz organisationaler *Früher Adopter* und *Innovatoren* auf dem NFZ-Markt für innovative Antriebstechnologien. Für die Kundengruppen sind weniger kostenorientierte Kriterien, sondern vorrangig umwelt- und klimabedingte Gründe für die Adoption innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion von NFZ ausschlaggebend. Die Treiber sind dabei die *unternehmerische Sozialverantwortung* und die *erwartete Nützlichkeit* sich durch alternative Antriebe ein Wettbewerbsvorteil zu erarbeiten. Insbesondere *Lead User* aus dem ÖPNV haben schon heute die zukünftigen Anforderungen eines grünen Images und eines emissionsfreien NFZ-Betriebs in Städten erkannt. Analysiert man hingegen den Massenmarkt, so unterstreicht die Conjoint-Analyse die weiterhin vorrangige Bedeutung von Anschaffungspreis, Kraftstoffkosten und Zuverlässigkeit für die Auswahl von NFZ-Antrieben. CO₂-Emissionen spielen dagegen kaum eine Rolle. Ebenso ist die Kenntnis und Erfahrung mit alternativen Antriebstechnologien derzeit sehr gering. Dieses *Chasma* zu überwinden, wird eine der größten Herausforderungen zu einer erfolgreichen Diffusion alternativer Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt darstellen.

Unterziel 3 hatte zum Ziel, die Wechselwirkungen der Akteure im organisationsexternen Kontext der Diffusion innovativer Antriebstechnologien zu untersuchen. Eine Marktanalyse wurde genutzt, um den regulatorischen Rahmen und das komplementäre Ökosystem dieser Diffusion zu erheben. Das Ergebnis zeigt, dass gegenwärtig der regulatorische Rahmen weder ausreichend Druck auf die übrigen Akteure ausübt, noch verlässliche Rahmenbedingungen für die Marktentwicklung alternativer Antriebe bietet. Das komplementäre Ökosystem für innovative Antriebstechnologien ist gegenwärtig ebenso nahezu nicht existent. Diese Einschätzungen bestätigen sich in einer empirischen qualitativen Studie aus 32 Interviews mit Akteuren und Experten des NFZ-Marktes. Gegenwärtig besteht ein klassisches Henne-Ei-Problem in der Diffusion alternativer Antriebstechnologien in den NFZ-Markt. Das größte Interesse an der Diffusion geht derzeit von der Politik aus – gleichzeitig besitzt diese durch regulatorische Maßnahmen die wirksamsten Hebel zur Lösung des Henne-Ei-Problems.

Unterziel 4 diente der Entwicklung eines systemdynamischen Simulationsmodells zur Prognose der Diffusion innovativer Antriebstechnologien in den NFZ-Markt. Basierend auf den bedeutendsten Simulationsmodellen für den PKW-Markt, wurden die vier grundlegenden Systemarchetypen der Technologiediffusion auf Automobilmärkten identifiziert: *Komplementäre Infrastruktur*, *Vertrautheit*, *Technologieattraktivität* und *Fahrzeugverfügbarkeit*. Diese Systemarchetypen wurden anhand von, in dieser Arbeit umfangreich erhobenen, empirischen Daten auf den NFZ-Markt übertragen. Die derzeit geringe Marktentwicklung alternativer Antriebe verhinderte eine Kalibrierung anhand historischer Daten, jedoch wurde die Validierung des Simulationsmodells erfolgreich erbracht. Daher besteht eine verlässliche Basis für quantifizierte Aussagen zur zukünftigen Marktdurchdringung alternativer Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt.

Unterziel 5 führte mittels des Simulationsmodells und der Szenariotechnik zur Untersuchung der zukünftigen Marktdurchdringung innovativer Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt. An-

hand eines Basisszenarios und vier weiterer Zukunftsszenarien wurde deutlich, dass die Pfadabhängigkeit des Dieselmotors und die externen indirekten Netzwerkeffekte zum Aufbau eines komplementären Ökosystems einen wesentlichen Einfluss auf die Diffusion innovativer Antriebstechnologien haben. Daher zeigt sich für die zusätzlichen Technikpakete in der Dieselmotor-Peripherie (Hybridisierung, Abgaswärmenutzung, Effizienzmaßnahmen) ein stabiles, von exogenen Einflussfaktoren nur begrenzt abhängiges, Marktpotenzial. Für zusätzliche Technikpakete hat das komplementäre Ökosystem und die Pfadabhängigkeit des Dieselmotors eine geringere Bedeutung als für alternative Antriebe. Während CNG-betriebene NFZ und der hydraulische Hybrid in der Diffusion scheitern werden, wird eine erfolgreiche Diffusion rein elektrischer und LNG-betriebener NFZ erst nach 2025 einsetzen. Hohe Kosten und wiederum die Pfadabhängigkeit verhindern eine frühere Marktdurchdringung. Folglich ist eine Abkehr von Diesel als grundlegender Kraftstoff auf dem NFZ-Markt bis 2030 nicht zu erwarten. Im Basisszenario ist für 2035 ein Marktanteil des Dieselmotors von 75 % und von 15 % für den LNG-Antrieb prognostiziert. Etwa 35 % der NFZ werden bis 2035 elektrifiziert sein (Hybridisierung und rein elektrische Antriebe). Die Abgaswärmenutzung wird im Gesamtmarkt einen Marktanteil von 15 % erreichen, welcher im Fernverkehr auf etwa 25 % ansteigt.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen der Anwendungsfälle zeigt sich über alle Szenarien hinweg ein dreiteiliges Bild. In städtischen Anwendungsfällen (Stadtbus, Abfallsammelverkehr, städtischer Verteilerverkehr) wird die Elektrifizierung eine dominante Marktstellung bis 2035 erreichen. Im regional-außerstädtischen Verkehr (Regionaler Verteilerverkehr, Bauverkehr) besteht ein hohes Potenzial für LNG-Antriebe – falls die Energiesteuerermäßigung für Erdgas nicht aufgehoben wird. Im Fernverkehr wird der Dieselantrieb in Kombination mit Abgaswärmenutzung, Hybridisierung und Effizienzmaßnahmen seine Vormachtstellung bewahren.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass in den nächsten 20 Jahren die Ablösung des Dieselmotors als dominante Antriebstechnologie im NFZ-Markt sehr unwahrscheinlich ist. Vielmehr wird es zu einer stetigen Elektrifizierung der Antriebsstränge von NFZ kommen. Diese Elektrifizierung ist wesentlich durch städtische Anwendungsfälle getrieben. Die neuen Anforderungen eines lokal emissionsfreien Betriebs in den Städten und die zukünftigen Gesamtbetriebskostenvorteile gegenüber dem konventionellen Dieselantrieb machen elektrifizierte Antriebskonzepte für NFZ-betreibende Organisationen attraktiv. Die Diffusion ist dabei durch eine überdurchschnittlich hohe Anzahl an *Lead Usern* unter kommunalen, NFZ-betreibenden Organisationen geprägt.

Zuletzt zeigen die Ergebnisse, dass trotz der signifikanten Marktdurchdringung CO₂-sparender Technologien und innovativer Antriebstechnologien, weitere politische Maßnahmen notwendig sind, um das CO₂-Reduktionsziel von 60 % bis 2050 gegenüber 1990 zu erreichen. Denn im Schnitt werden sich die CO₂-Emissionen der neu zugelassenen NFZ-Flotte bis 2035 nur um 30 % reduzieren. Aufgrund des Bestands älterer NFZ, dem steigendem Transportbedarf und dem geringen Einsparpotenzial im Fernverkehr, als Anwendungsfall mit 35 % Marktanteil, wird sich die Reduktion absolut auf einem weitaus geringerem Niveau bewegen.

9.2 Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Die vorliegende Forschungsarbeit ist mit einigen Limitationen verbunden, die zum Teil schon in den Unterkapiteln aufgezeigt wurden (vgl. Kapitel 5.2.4.3, Kapitel 5.3.3 und Kapitel 7.3).

Die Strichprobengenerierung der beiden quantitativen, empirischen Studien erfolgte anhand eines bewussten Quota-Verfahrens und nicht vollständig zufallsgeneriert. Dies beeinflusst die Ergebnisse durch eine eingeschränkte Repräsentativität und eine Tendenz zu kooperierenden und der Thematik zugewandten Befragungsteilnehmer. Des Weiteren wurde im Simulationsmodell die Kaufentscheidung von Organisationen vereinfacht betrachtet, indem diese durch die empirische Befragung von Top-Entscheidungsträgern approximiert wurde. Eine Analyse und Abbildung der disaggregierten Entscheidungsprozesse eines *buying centers* würde zu einer höheren Validität des Simulationsmodells führen.

Ferner ist eine grundlegende Vereinfachung in der exogenen Vorauswahl der betrachteten Technik-Kombinationen erfolgt. Die freie Kombination aller technisch möglichen Kombinationen würde die zukünftige Marktsituation weitaus realistischer darstellen und führt somit zu einer Unterschätzung des zukünftigen Marktanteils zusätzlicher Technikpakete. Daher sollten zusätzliche Kombinationen und Antriebe in folgenden Untersuchungen berücksichtigt werden. Insbesondere wird dabei auf die Kombination von Hybridisierung, Abgaswärmenutzung und Gasmotoren verwiesen. Darüber hinaus könnten Wasserstoff-betriebene Brennstoffzellen-NFZ in ferner Zukunft ein vielversprechendes Marktpotenzial im Regional- und Fernverkehr erreichen.

Es zeigt sich, dass Einflussfaktoren, die voraussichtlich vorrangig durch den PKW-Markt determiniert sind, wie beispielsweise der Batteriepreis, einen starken Einfluss auf den Marktanteil von NFZ-Antriebstechnologien haben können. Gleichzeitig wurde durch diese Arbeit die Studien zur Technologiediffusion auf dem Markt für PKW und leichte NFZ um den Markt für schwere NFZ erweitert. Daher können die Erkenntnisse der Märkte nun kombiniert werden, um ein ganzheitliches Bild des Transportsektors zu erarbeiten und die Wechselwirkungen in der Kostendegression und dem Aufbau des komplementären Ökosystems marktübergreifend zu analysieren.

Das Simulationsmodell zeigt eine hohe Sensitivität auf den Systemarchetyp der Tankstelleninfrastruktur, insbesondere durch die Unsicherheit in der Parametrisierung (z. B. *erwartete Tankstellendichte*, *potentielle Tankstellen Adopter*). In den nächsten Jahren wird durch die zunehmende Entwicklung des Marktes für alternative Antriebstechnologien in NFZ, vermehrt empirisch-messbare Daten zur Marktdurchdringung, Technologieverfügbarkeit und dem Aufbau des Ökosystems (Tanken, Reparatur und Wartung) zur Verfügung stehen. Diese können für eine Kalibrierung des vorgestellten Simulationsmodells genutzt werden, um die Parametersätze anhand empirischer Daten zu kalibrieren und zu verifizieren. Damit kann die Validität des Simulationsmodells maßgeblich gesteigert werden.

Schließlich ist diese Arbeit auf den deutschen NFZ-Markt begrenzt. Dieser stellt zwar den größten Absatzmarkt in Europa dar, eine europäische Betrachtung ist aufgrund des einheitlichen

Gesetzesrahmens allerdings zu empfehlen. Des Weiteren wurden in vielen anderen Weltregionen (USA, China, Japan) mit hoher Bedeutung für den globalen NFZ-Markt schon CO₂-Regulierungen eingeführt. Die Effekte dieser Regulierung auf die Marktdurchdringung CO₂-sparender Technologien könnten interessante Erkenntnisse für die zukünftige Marktentwicklung in Europa liefern. Darüber hinaus werden zukünftig die globalen Plattformstrategien der NFZ-Hersteller für erhöhte Interdependenzen zwischen den weltweiten NFZ-Märkten sorgen, sodass eine Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Weltmärkten interessant erscheint.

9.3 Praktische Implikationen

Diese Arbeit führt über die Wissenschaft hinaus zu Erkenntnissen für Entscheidungsträger in der Wirtschaft und der Politik. Daher werden die Implikationen der Forschungsergebnisse für diese Akteure im Folgenden aufgezeigt.

Entscheidungsträger in der Wirtschaft

Die Elektrifizierung von NFZ-Antriebssträngen wird zunächst durch Stadtbusse und anschließend durch leichte städtische Verteilerfahrzeuge vorangetrieben. Hersteller wie Zulieferer sollten sich an diesen Anwendungsfällen orientieren und mit den dortigen *Lead Usern* zusammenarbeiten. Die technologischen Standards der Elektrifizierung von NFZ werden sich auf diesem *Lead Markt* etablieren. Anschließend können die gewonnenen Erkenntnisse und damit verbundenen Komponenten schrittweise auf weitere Anwendungsfälle übertragen werden.

Des Weiteren bestehen darin interessante unternehmerische Chancen für etablierte wie neue Marktteilnehmer. Aufgrund des vergleichsweise einfachen Systemaufbaus der reinen Elektrifizierung sind die Markteintrittshürden für neue Akteure auf dem NFZ-Markt derzeit gering. *Lead User* verlangen nach disruptiven Lösungen durch innovative Fahrzeug-Antriebs-Kombinationen, um ihre zukünftigen Anforderungen zu erfüllen. Die großen und etablierten Akteure des NFZ-Marktes vermeiden derzeit diese Marktlücke zu bedienen, da es sich bisher um eine Nischenanwendung handelt. Ebenso sind der Aufbau der LNG-Tankinfrastruktur und die Entwicklung kryogener Tanks für NFZ nicht durch das gegenwärtige Kompetenzprofil der klassischen Automobilindustrie und Tankstellenbetreiber abgedeckt.

Mittelfristig wird der Wertschöpfungsanteil der Zulieferindustrie pro NFZ durch eine Vielzahl an zusätzlichen Technologien in der Motorperipherie (Verbrennungsmotor, Hybrid, WHR) ansteigen. Gleichzeitig besteht eine Herausforderung für Hersteller in der zunehmenden Komplexität des Antriebstechnologieportfolios. Ergänzend zu den zusätzlichen CO₂-sparenden Technologien, werden prinzipiell drei verschiedene Antriebskonzepte mittelfristig von Bedeutung sein: Diesel-, Erdgas- und Elektromotoren. Hierbei ist es essentiell durch intelligente Plattformstrategien und globale Skaleneffekte kosteneffiziente Antriebslösungen für den Massenmarkt zu entwerfen.

Zuletzt zeigte die Untersuchung des organisationalen Kontextes, wie innovative Antriebstechnologien erfolgreich positioniert werden können, um diese als attraktive Produkte im Markt zu

etablieren. Für *Frühe Adopter* steht gegenwärtig der Beitrag zur Reduzierung negativer Umwelteinflüsse im Vordergrund. Der Massenmarkt wird zur Überwindung des *Chasma* mit zuverlässigen und wirtschaftlichen Lösungen angesprochen werden müssen.

Entscheidungsträger in der Politik

Die Politik nimmt eine wesentliche Einflussposition in der Lösung des *Henne-Ei-Problems* der Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion ein. Die deutsche Bundesregierung hat durch die MKS einen ersten wesentlichen Schritt unternommen. Auf europäischer Ebene sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Maßnahmen angekündigt worden. Eine zielorientierte Strategie mit klarem Fokus auf einige wenige – aber wirksame – Maßnahmen könnte verlässliche Rahmenbedingungen (Energiesteuer, konsistente Förderung) schaffen und Industriestandards (Tankinfrastruktur, technologische Grundkonzepte) setzen. Hierdurch kann die Europäische Kommission in erhöhtem Maße zum Aufbau des komplementären Ökosystems alternativer Antriebstechnologien beitragen. Des Weiteren hat sie in der Einführung von CO₂-Grenzwerten einen gewichtigen Hebel die Attraktivität innovativer Antriebstechnologien zu erhöhen. Auf Ebene der Länder und Kommunen kann die Sonderstellung, in der Position als Betreiber von NFZ und der Entscheidungsmacht über regionale Verkehrswege, den städtischen Verkehr als *Lead Markt* für alternative Antriebe stärken. Dabei wird eine kontinuierliche Unterstützung (Subventionierung und Bereitstellung des Ökosystems) der elektrischen Mobilität mit der Sicherstellung eines bezahlbaren und zuverlässigen Transportsystems in Einklang zu bringen sein.

9.4 Schluss

Einige Zitate zu Beginn der jeweiligen Kapitel verdeutlichen in eindrucklicher Weise, wie falsch selbst erfolgreiche, gut-vernetzte und einflussreiche Personen mit ihren Diffusionsprognosen liegen können. Daher kann auch diese Arbeit keine Blaupause für eine erfolgreiche und schnelle Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion darstellen. Sie stellt vielmehr einen umfassenden und wertvollen Beitrag zur Erfassung der gegenwärtigen Situation alternativer Antriebstechnologien auf dem NFZ-Markt im Allgemeinen und der Nachfrageseite im Speziellen dar. Entscheidungsträger in Wirtschaft und Politik können sich dadurch ihrem Beitrag zur Lösung des Henne-Ei-Problems in der Diffusion CO₂-sparender Technologien bewusst werden. Die auf Basis der systemischen Abhängigkeiten prognostizierte Marktdurchdringung zeigt hierfür erste Lösungsansätze auf – allerdings sind in dieser frühen Marktphase die externen Unsicherheiten signifikant. Deshalb ist es von entscheidender Bedeutung, dass diese Arbeit, und insbesondere das Simulationsmodell, mit zunehmender Marktentwicklung kritisch hinterfragt, getestet und weiterentwickelt wird, um zielgerichtete Handlungsstrategien für einen Wandel hin zu einem emissionsfreien Transportsektor zu entwickeln.

Anhang

Anhang I Technikpakete.....	216
Anhang II Quantitative Studie Adoptionsverhalten.....	219
1) Fragebogen Qualitative Vorstudie.....	219
2) Fragebogen Quantitative Hauptstudie.....	221
3) Statistiken zur Reliabilität und Validität.....	237
4) Explorative Faktorenanalyse.....	240
5) Multiple lineare Regressionsanalyse.....	244
6) Clusteranalyse.....	246
7) Zusammenhang zwischen den Clusterlösungen.....	250
Anhang III Conjoint-Analyse.....	252
1) Fragebogen.....	252
2) Beschreibung der Stichprobe nach Anwendungsfall.....	262
3) Präsentation der drei Erhebungsdesigns	261
Anhang IV Akteure und deren Wechselwirkung.....	263
1) Ergebnis Stakeholderanalyse.....	263
2) Teaser der qualitativen Studie.....	264
3) Fragebogen Qualitative Studie.....	265
Anhang V Simulationsmodell.....	270
1) Inputparameter.....	270
2) Ergänzende Modellansichten.....	273

Anhang I Technikpakete

Regionaler Verteilerverkehr					
Referenzfahrzeug 2014: Mercedes Benz Antos 1835 L 260kW AT-8 7.71 R6					
OM 470 Spezifikation Motor: Common Rail Hochdruckeinspritzung ohne X-Pulse, Turboaufladung, 2 oben liegende Nockenwellen, MB Powershift 3					
Antos Aufbau Spezifikation: Route Management & Driver training					
Abgasnachbehandlung: Euro 6: SCR, AGR DPF					
Konventioneller Antriebsstrang	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
D0 Standard	Reference	28,0 l	742	13.000	
D1 Best-in-class	D0+PPC+Roof&Side deflectors+Contr. Aux+LRT	25,0 l	663	16.000	
D2 Standard 2020	D1+Thermo+DownSp.+DownSi+SWT+Contr. Aux.II+Lightweight	23,0 l	610	18.500	
Alternative Kraftstoffe	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
EV	300 kW E-engine, 2x120 kWh	90,0 kWh	-	81.500	250km Range, 10t GVW, 6h charging time
LNG	126kg LNG tank, 3-Wege Kat+Aero+Lightweight	22,0 kg	539	27.500	add. Weight, lower noise
CNG	7,8l displacement, 85kg CNG tank, 3-Wege Kat+Aero+Leightweight	22,0 kg	539	23.000	add. Weight, lower noise
Zusatzpakete 2020+	Spezifikation	Reduktionspotential	CO2 [g/km]	Zusatzkosten [€]	Weitere Eigenschaften
Motor Optimierung	D2+Engine2.0+S&S	-8,0% %	- 49	18.500	
Gesamtfahrzeugopt.	D2+NextGenTires+Aero+AeroBox	-7,5% %	- 46	22.500	
WHR	D2+Electrical Waste Heat Recovery (Turbine)	-2,5% %	- 15	3.500	+150 kg
HEV	D2+ Parallel HEV 120kW peak, 9kWh Li-Ion	-15,0% %	- 91	10.000	+350kg

Städtischer Verteilerverkehr					
Referenzfahrzeug 2014: Mercedes Benz Atego 1224 L 175kW AT-6 5.11R4					
MBT OM 936 Spezifikation Motor: Common Rail Hochdruckeinspritzung ohne X-Pulse, Turboaufladung, 2 oben liegende Nockenwellen, MB PowerShift 3					
Atego Aufbau Spezifikation: ClassisSpace Cab, body: box or platform w/ tarpaulin					
Abgasnachbehandlung: Euro 6: SCR, AGR DPF					
Konventioneller Antriebsstrang	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
D0 Standard	Reference	18,0 l	477	11.500	
D1 Best-in-class	D0+PPC+Roof&Side deflectors+Contr. Aux.+S&S+LRT	16,2 l	428	15.000	
D2 Standard 2020	D1+Thermo+DownSp.+DownSi+Lightweight	15,5 l	413	15.500	
Alternative Kraftstoffe	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
EV	120kW E-engine, 120kW Li-Ion (54 kWh utilizable), max v 68km/h	36,0 kWh	-	42.998	12h charging time, 150 km range, +700kg
CNG	85 kg tank, 6l displacement, 3-Wege KAT+Aero+Lightweight+SWT	19,0 kg	501	20.876	add. Weight, lower noise
Zusatzpakete 2020+	Spezifikation	Reduktionspotential	CO2 [g/km]	Zusatzkosten [€]	Weitere Eigenschaften
Motor Optimierung	D2+Engine2.0	-7,0% l	- 29	4.000	
Gesamtfahrzeugopt.	D2+NextGenTires+Aero+AeroBox+SWT	-3,0% l	- 12	3.631	
HEV	D2+44kW peak E-engine, 1,9kWh Li-Ion	-20,0% %	- 83	7.209	+350kg

Bauverkehr					
Referenzfahrzeug 2014: Mercedes Benz Arocs 330 kW AMT-12 12.81 R6					
OM 471 Spezifikation Motor:					
Actros Spezifikation Motor:					
4-Ventil-Technik, Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung, Common-Rail-Hochdruckeinspritzung X-Pulse (2100 bar), elektr. Wasserpumpe, bedarfsabhängiger Luftpresser, reibungsreduziertes Getriebe					
Arocs Aufbau Spezifikation: 3-Wege Kipper					
Abgasnachbehandlung: EGR+DPF+SCR					
Konventioneller Antriebsstrang	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
D0 Standard	Reference	42,0 l	1.113	16.000	
D1 Best-in-class	D0+PPC+StreamSpace+Contr. Aux.+Non-EGR	40,5 l	1.074	18.000	
D2 Standard 2020	D1+Thermo+DownSp.+DownSi.+SWT+Aero+Contr. Aux.II+Lightweight	38,5 l	1.015	19.000	
Alternative Kraftstoffe	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
LNG	126kg LNG tank, 3-Wege Kat+Aero+Lightweight	34,0 kg	835	27.000	add. Weight, lower noise
CNG	7,8l displacement, 85kg CNG tank, 3-Wege Kat+Aero+Leightweight	34,0 kg	835	22.000	add. Weight, lower noise
Zusatzpakete 2020+	Spezifikation	Reduktionspotential	CO2 [g/km]	Zusatzkosten [€]	Weitere Eigenschaften
Motor Optimierung	D2+Engine2.0+S&S	-7,0% l	- 71	22.000	
Gesamtfahrzeugopt.	-				
WHR	D2+Electrical Waste Heat Recovery (Turbine)	-2,5% %	- 24	3.500	+ 150 kg
HEV	D2+ Parallel HEV 120kW peak, 9kWh Li-Ion	-6,0% %	- 61	10.000	+350kg

Abfallsammelverkehr					
Referenzfahrzeug 2014: Mercedes-Benz Eonic 1830 LL 220kW AT-6 7.71 / R6 (OM 936)					
OM 936 Spezifikation Motor:					
2500bar Common Rail Direkteinspritzung, verstellbare Auslassnockenwelle, 2-stufige Turboaufladung					
Eonic Aufbau Spezifikation: Low-Entry Cab, rear loading hydraulic refuse compactor					
Abgasnachbehandlung: EGR+DPF+SCR					
Konventioneller Antriebsstrang	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
D0 Standard	Reference	80,0 l	2.120	16.500	
D1 Best-in-class	D0+PPC+S&S+Space+Contr. Aux.+LRT	75,0 l	1.950	19.500	
D2 Standard 2020	D1+Thermo+DownSp.+DownSi.+Contr. Aux.II+Lightweight+Shift-logic	70,0 l	1.833	25.000	
Alternative Kraftstoffe	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
EV	REX: V6 TDI w/ 3l displacement+280kW peak E-engine+105kW Li-Ion	27,7 l	733	48.000	v max 86 km/h, +950kg, Ladedauer 7h
LNG	162 kg tank, 7l displacement, 3-Wege KAT+Aero+Lightweight+Shift-logic	63,0 kg	1.544	30.000	add. Weight, lower noise
CNG	7,8l displacement, 85kg CNG tank, 3-Wege Kat+Aero+Leightweight	63,0 kg	1.544	29.000	add. Weight, lower noise
Zusatzpakete 2020+	Spezifikation	Reduktionspotential	CO2 [g/km]	Zusatzkosten [€]	Weitere Eigenschaften
Motor Optimierung	D2+Engine2.0+8AT	-9,0% l	- 165	29.500	
Gesamtfahrzeugopt.	D2+Elect. Compactor	-15,0% l	- 275	25.500	
HBR	D2+Parallel hydraulic Hybrid	-15,0% %	- 275	23.000	
HEV	D2+120kW E-Engine, 5kWh Li-Ion	-20,0% %	- 367	10.000	

Stadtbus					
Referenzfahrzeug 2014: Mercedes Benz Citaro, Euro 6 220 kW / 260kW AT4 (Voith) / AT6 (ZF EcoLife) 7.7l, R6 (OM 936)					
OM 936 Spezifikation Motor: 2500bar Common Rail Direkteinspritzung, verstellbare Auslassnockenwelle, 2-stufige Turboaufladung					
Citaro Aufbau Spezifikation: 12m Linienbus					
Abgasnachbehandlung: EGR+DPF+SCR					
Konventioneller Antriebsstrang	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
D0 Standard	Reference	50,0 l	1.325	16.000	
D1 Best-in-class	D0+Contr. Aux.	49,5 l	1.318	16.500	
D2 Standard 2020	D1+Thermo+DownSp.+DownSi.+S&S+Contr. Aux.II+Lightweight	48,0 l	1.272	17.500	
Alternative Kraftstoffe	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
EV	160 kW, 210 kWh Li-Ion	85,0 kWh	-	50.000	
PHEV	seriell Hybrid 240kW E-engine, V6 engine on car basis, 240 kW Li-Ion	30,5 l	808	52.500	
CNG	228 kW, 188 kg tank size, 12l displacement, 3-Wege-KAT	42,0 kg	1.113	27.000	add. Weight, lower noise
Zusatzpakete 2020+	Spezifikation	Reduktionspotential	CO2 [g/km]	Zusatzkosten [€]	Weitere Eigenschaften
Motor Optimierung	D2+Engine2.0+SWT	-7,0% l	- 89	12.500	
Gesamtfahrzeugopt.	D2+NextGenTires+Aero	-5,0% l	- 64	3.000	
HEV	D2+120kW peak E-Engine, 5kWh Li-Ion	-18,8% %	- 240	10.000	+350kg

Reisebus					
Referenzfahrzeug 2014: Mercedes Benz Tourismo, Euro 6 265kW AT8 (MB PowerShift) 10.7l, R6					
OM 470 Spezifikation Motor: BlueEfficiency Power, BlueTec® SCR-Dieselechnologie, Common Rail - Kraftstoff-Einspritzsystem bzw. X-PULSE von Mercedes-Benz mit vollelektronischer Steuerung und Druckverstärkung					
Tourismo Aufbau Spezifikation: 12,14m Reisebus					
Abgasnachbehandlung: EGR+DPF+SCR					
Konventioneller Antriebsstrang	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
D0 Standard	Reference	32,0 l	848	14.000	
D1 Best-in-class	D0+PPC+StreamSpace+Contr. Aux.+Non-EGR	30,0 l	793	16.000	
D2 Standard 2020	D1+Thermo+DownSp.+DownSi.+SWT+Aero+Contr. Aux.II+Lightweight	28,5 l	749	17.000	
Alternative Kraftstoffe	Spezifikation	Verbrauch pro 100km	CO2 [g/km]	Kosten 2020 [€]	Weitere Eigenschaften
LNG	250kW NG engine, 200kg LNG tank 3-Wege Kat+Aero+Lightweight	28,0 kg	686	26.500	add. Weight, lower noise
Zusatzpakete 2020+	Spezifikation	Reduktionspotential	CO2 [g/km]	Zusatzkosten [€]	Weitere Eigenschaften
Motor Optimierung	D2+Engine2.0+S&S	-5,0% l	- 37	4.500	
Gesamtfahrzeugopt.	D2+NextGenTires+AeroLegislation	-6,0% l	- 45	3.500	
WHR	D2+Electrical Waste Heat Recovery (Turbine)	-2,5% %	- 19	3.500	+150 kg
HEV	D2+ 9kWh Li-Ion	-6,0% %	- 45	10.000	+350kg

Anhang II Quantitative Studie Adoptionsverhalten

1) Fragebogen Qualitative Vorstudie

Kundengruppen

- Welche verschiedenen Kunden kaufen bei Ihnen NFZ?
 - Wie lassen sich diese ggf. in Kundengruppen zusammenfassen?
- Welche unterschiedlichen NFZ-Typen werden an welche Kunden verkauft?
- Unternehmensgröße der verschiedenen Kunden
- Kauf- bzw. Finanzierungsmodalitäten der versch. Kunden
- Durchschnittliche Nutzungsdauer versch. NFZ-Typen von versch. Kundengruppen

Kaufentscheidungsprozess

- Wie läuft ein Nutzfahrzeugkauf typischerweise ab?
- Wie stellt sich typischerweise der Kaufentscheidungsprozess beim NFZ-Kauf dar (Anforderungen der Kunden an Aspekte wie Anschaffungspreis, TCO, Wiederverkaufswert, Leistung; technisches Vorwissen der Kunden; Einfluss der Fahrer; Unterschiede versch. Kundengruppen, z. B. zw. gewerblich und staatlich/kommunal)?
- Welche Rolle spielt das Internet (Stichwort: Fahrzeugkonfigurator) beim Kaufentscheidungsprozess?
- Wie unterscheidet sich das Kaufverhalten von großen im Vergleich zu mittleren/kleinen Unternehmen?
- Welchen Einfluss hat der Händler auf die Kaufentscheidung (z. B. Vorlage einer TCO-Rechnung, ganzheitliches Fuhrparkmanagement, Händlertreue)?
- Wie stark muss sich ein Händler gegenüber Konkurrenten profilieren (Ausschreibungen, Rabatte)?

Auswahlkriterien Antriebsstrang / CO₂-Einsparung

- Haben Sie als Händler sich bereits mit dem Thema „CO₂-sparende Technologien“ beschäftigt (Einschätzung der aktuellen Relevanz des Themas im NFZ-Markt)?
- Gibt es kundenseitig ein generelles Bewusstsein für CO₂-Einsparung? Wenn ja, was sind die wichtigsten Treiber (Kunden, Kosten, Gesetz, Image, CSR, Innovativität)?
- Welche Kriterien würden Ihrer Einschätzung nach die Auswahl eines alternativen Antriebs beim Nutzfahrzeugkauf maßgeblich beeinflussen? (offen)
- Rückfragen/Ergänzung: TCO samt Kraftstoffverbrauch und weiteren Betriebskosten, Anschaffungskosten, Leistung/Drehmoment (rational od. emotional), CO₂-/Emissions-Einsparung (Treiber: Kunden, Kosten, Gesetz, Image, CSR, Innovativität), gegebene Infrastruktur, Geräuschemissionen

- Werden Fahrzeugs- oder Motormaßnahmen zur CO₂-Reduktion bevorzugt?
- Welche Effizienzpakete werden hierbei bevorzugt (herstellerabhängig)?
- Wie unterscheiden sich verschiedene Kundengruppen hinsichtlich möglicher Auswahlkriterien und Bewusstsein für CO₂-Einsparung?

Barrieren für CO₂-sparende Technologien

Was sind mögliche Gründe für die Ablehnung von technologischen Neuerungen/innovativen Technologien? (offen)

Rückfragen/Ergänzung: weitere unbekannte Technologie (keine Kenntnis, allgemeine Skepsis od. Risikofaktor), Verfügbarkeit, erhöhte Serviceintervalle/-aufwendungen, erhöhte Servicekomplexität, Wiederverkaufswert/-möglichkeit, Akzeptanz integrierter Truck/Trailer-Konzepte

Gebrauchtwagenmarkt

- Welche Bedeutung hat der NFZ-Gebrauchtwagenmarkt für versch. Kundengruppen?
- Welche Auswahlkriterien beeinflussen maßgeblich den Kauf eines gebrauchten NFZ?
- Welche Erfahrungen haben Sie mit innovativen Technologien beim Wiederverkauf von NFZ (speziell im Hinblick auf alternative Antriebe; was sind „Ladenhüter“)?

Persönliche Daten Interviewpartner

- Name
- Unternehmen
 - Branche
 - Mitarbeiter
 - Fuhrpark (Größe und Zusammensetzung) bzw. Handelsvolumen p.a.
 - Position
- Aufgaben

2) Fragebogen Quantitative Hauptstudie

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge



rück

Willkommen zur wissenschaftlichen Studie der Robert Bosch GmbH in Kooperation mit dem Karlsruher Institut für Technologie und der Hochschule Osnabrück zum Thema „Kundenanforderungen Nutzfahrzeuge“!

Wir freuen uns, dass Sie an der Befragung teilnehmen. Die Bearbeitung wird ca. 12-15 Minuten in Anspruch nehmen. Wir bitten Sie, möglichst alle Fragen vollständig zu beantworten, da nur so wertvolle und aussagekräftige Forschungsergebnisse gewonnen werden können. Zur Navigation verwenden Sie bitte die Schaltflächen "Weiter" und "Zurück" im Bereich links unten jeder Seite des Fragebogens.

Als Dankeschön verlosen wir unter allen Teilnehmern, welche den Fragebogen vollständig ausfüllen,

[einen von 5 Amazon-Gutscheinen im Wert von je 30€!](#)

Anmerkungen:

Da sich die Befragung sowohl an unternehmerische als auch staatliche bzw. kommunale Käufer von Nutzfahrzeugen richtet, wird der allgemein gültige Begriff „Organisation“ synonym sowohl für „Unternehmen“ als auch „Kommune/staatlich organisierter Betrieb/Gesellschaft“ verwendet.

Ihre Angaben lassen keinerlei Rückschlüsse auf Ihre Person oder Ihre Organisation zu. Persönliche Angaben, welche Sie zur Teilnahme an einer unserer Verlosungen machen, werden selbstverständlich vertraulich behandelt und ausschließlich zum Zwecke der Verlosung verarbeitet.

Befragung starten

Q1:

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Besitzen Sie bzw. Ihre Organisation ein oder mehrere (mittel-)schwere straßentaugliche Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht > 6 Tonnen?

- Ja
 Nein

0%

Zurück Weiter

Wenn Antwort Q1 “Ja”:

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Waren Sie persönlich direkt oder indirekt an der Beschaffung eines oder mehrerer dieser Nutzfahrzeuge beteiligt?

Ja
 Nein

5%

Zurück Weiter

Wenn Antwort Q1 “Nein”:

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Beabsichtigen Sie bzw. Ihre Organisation innerhalb der nächsten 12 Monate (mittel-)schwere straßentaugliche Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht > 6 Tonnen zu beschaffen?

Ja
 Nein

11%

Zurück Weiter

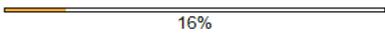
Wenn Antwort Q1 und die folgende Frage “Nein” → Ende des Fragebogens

Wenn Antwort Q1 "Ja" oder "Nein" und wenn die Antwort der folgenden Frage "Ja":

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Welche Bezeichnung trifft am besten auf Ihre Rolle beim Beschaffungsprozess dieses oder dieser Nutzfahrzeuge zu?

- Einkäufer
- Berater
- Anwender (Fahrer)
- Entscheider
- Andere, und zwar:
- Keine Angabe.



Jeder verbleibende Teilnehmer und wenn Antwort Q1 "Ja" und die Antwort der folgenden Frage "Nein" direkt Sprung zu:

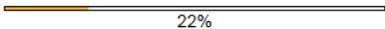
Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Bitte ordnen Sie die in Ihrer Organisation an der Beschaffung von Nutzfahrzeugen beteiligten Personen bzw. Positionen nach deren Einfluss auf die finale Kaufentscheidung. Bitte beginnen Sie von oben mit der Ihrer Meinung nach einflussreichsten Person / Position. Ziehen Sie hierzu die jeweilige Person / Position durch Klicken und Halten der linken Maustaste an die zutreffende Stelle.

Bitte ordnen Sie ausschließlich die in Ihrer Organisation tatsächlich am Beschaffungsprozess beteiligten Personen / Positionen. Alle übrigen können ungeordnet auf der linken Seite belassen werden.

Unternehmer bzw. Geschäftsleitung	
Einkaufsleitung	
Nutzfahrzeughändler	
Fahrer	
(externe) Berater	
Flottenmanager	
Andere	

Falls Sie "Andere" angegeben haben, beschreiben Sie diese bitte:



Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Geht der Anschaffung von Nutzfahrzeugen in Ihrer Organisation in der Regel eine Berechnung der Gesamtbetriebskosten über die Nutzungsdauer voraus?

- Ja
- Nein
- Keine Angabe

27%

Zurück Weiter

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Werden für die Fahrzeuge Ihrer Nutzfahrzeugflotte Full-Service-Verträge abgeschlossen?

Erklärung: Unter Full-Service-Verträgen sind hier ausschließlich solche Verträge zur Erhöhung der Planungs- und Verfügbarkeitssicherheit gemeint, durch welche bei Zahlung einer monatlichen Pauschale sämtliche Service- und Wartungskosten abgedeckt sind.

- Ja, immer.
- Mehrheitlich ja.
- Mehrheitlich nein.
- Nein, nie.
- Von Fall zu Fall verschieden.
- Keine Angabe

Wie werden in Ihrer Organisation die Fahrzeuge Ihrer Nutzfahrzeugflotte angeschafft? Bitte wählen Sie zutreffendes und schätzen Sie die prozentuale Verteilung in Ihrer Organisation.

Die Summe aller Prozentangaben muss 100% ergeben.

- Barkauf: etwa %
- Finanzierung: etwa %
- Leasing: etwa %
- Miete: etwa %

Würde sich an der Art der Anschaffung bei Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben etwas ändern?

Unter alternativen Antrieben werden im Folgenden Konzepte zum Antrieb von (mittel-)schweren Nutzfahrzeugen verstanden, welche sich hinsichtlich Energieart oder Konstruktionsweise von konventionellen Diesel-Verbrennungsmotoren unterscheiden. Insbesondere gehören Gasmotoren, Hybridantriebe und rein elektrische Antriebe zu den alternativen Antrieben.

- Ja
- Nein

33%

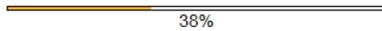
Zurück Weiter

Wenn die letzte Antwort der vorherigen Frage "Ja":

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Wie würden in Ihrer Organisation Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben bevorzugt angeschafft werden?

- Barkauf
- Finanzierung
- Leasing
- Miete
- Keine Angabe



Zurück Weiter

Ansonsten direkt zu:

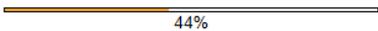
Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Bei der Anschaffung von Nutzfahrzeugen:

Wie wichtig sind in Ihrer Organisation folgende Punkte bei der Entscheidung für einen Antrieb? Bitte unterscheiden Sie den Grad der Wichtigkeit auf einer Skala von "Überhaupt nicht wichtig" bis "Sehr wichtig".

	Überhaupt nicht wichtig	Unwichtig	Eher unwichtig	Teils/teils	Eher wichtig	Wichtig	Sehr wichtig	Keine Angabe
Performance (Leistung / Drehmoment)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Geplante Transportaufgaben	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Eigene Präferenzen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Reichweite pro Tankfüllung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gesellschaftliche Verantwortung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wünsche der Fahrer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einfache Nutzung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kraftstoffverbrauch	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gesamtbetriebskosten über die Nutzungsdauer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Meinung und Beratung des Händlers	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Servicenet	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Eigener Innovationsanspruch	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Präferenzen unserer Kunden	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Umweltpolitische Unternehmensrichtlinien	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zuverlässigkeit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Anschaffungspreis	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Welche weiteren Aspekte werden hierbei in Ihrer Organisation als wichtig erachtet?



Zurück Weiter

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Im Folgenden finden Sie jeweils eine Auflistung verschiedener Maßnahmen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei Nutzfahrzeugen.

Welche davon...

... hat Ihre Organisation bereits vorgenommen bei einem oder mehreren ihrer Nutzfahrzeuge?

- Anschaffung von Nutzfahrzeugen mit alternativem Antrieb (Gasmotor, Hybrid oder rein elektrisch betrieben)
- Fahrzeugmaßnahmen (z.B. Elektrifizierung von Nebenaggregaten, Leichtbauteile, aerodynamische Seitenverkleidung, Spoiler,...)
- Aerodynamisch optimierte Fahrerkabine
- Verwendung rollwiderstandsoptimierter Reifen
- Fahrerschulung
- Fahrerassistenzsysteme zur Verbrauchsreduktion (z.B. Predictive Powertrain Control - PPC von Daimler oder I-Shift von Volvo)
- Weitere, und zwar:
- Keine der oben genannten

... würde Ihre Organisation darüber hinaus zur weiteren Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs vornehmen?

- Anschaffung von Nutzfahrzeugen mit alternativem Antrieb (Gasmotor, Hybrid oder rein elektrisch betrieben)
- Fahrzeugmaßnahmen (z.B. Elektrifizierung von Nebenaggregaten, Leichtbauteile, aerodynamische Seitenverkleidung, Spoiler, ...)
- Aerodynamisch optimierte Fahrerkabine
- Verwendung rollwiderstandsoptimierter Reifen
- Fahrerschulung
- Fahrerassistenzsysteme zur Verbrauchsreduktion (z.B. Predictive Powertrain Control - PPC von Daimler oder I-Shift von Volvo)
- Weitere, und zwar:
- Keine der oben genannten

50%

Zurück Weiter

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

1 / 3

Bitte geben Sie auf den folgenden drei Seiten an, inwiefern Sie der jeweiligen Aussage aus Sicht Ihrer Organisation zustimmen oder nicht. Unterscheiden Sie hierbei den Grad Ihrer Zustimmung auf einer Skala von "Stimme überhaupt nicht zu" bis "Stimme voll und ganz zu".

Die Aussagen sind bewusst ähnlich formuliert. Bitte geben Sie dennoch für alle Aussagen jeweils an, inwieweit Sie zustimmen.

Unter alternativen Antrieben werden im Folgenden Konzepte zum Antrieb von (mittel-)schweren Nutzfahrzeugen verstanden, welche sich hinsichtlich Energieart oder Konstruktionsweise von konventionellen Diesel-Verbrennungsmotoren unterscheiden. Insbesondere gehören Gasmotoren, Hybridantriebe und rein elektrische Antriebe zu den alternativen Antrieben.

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Weder noch	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Keine Angabe
Die erwartete Amortisationsdauer ist ausschlaggebend für die Auswahl eines alternativen Antriebs.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Störungsanfälligkeit unserer Nutzfahrzeuge wird durch die Nutzung alternativer Antriebe erhöht.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Hohe Anschaffungspreise machen alternative Antriebe unattraktiv.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Unsere Organisation kann ihre Leistungen durch die Nutzung alternativer Antriebe verbessern.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Unsere Organisation ist bereit, für alternative Antriebe einen höheren Anschaffungspreis zu zahlen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch technische Innovationen bei unseren Nutzfahrzeugen können wir unser Image gegenüber dem Wettbewerb stärken.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Nutzung alternativer Antriebe verbessert den Geschäftsbetrieb.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die Nutzung alternativer Antriebe entsteht für unsere Organisation Mehrarbeit.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Der Preis entscheidet, welcher Antrieb gewählt wird.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Nutzung alternativer Antriebe steigert unsere Produktivität.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Durch die Nutzung alternativer Antriebstechnologien können wir unser Image gegenüber dem Wettbewerb stärken.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

55%

Zurück Weiter

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

2 / 3

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Weder noch	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Keine Angabe
Klimafreundlichkeit ist ein fester Bestandteil der Philosophie unserer Organisation.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ein preisgünstigerer Antrieb ist grundsätzlich zu bevorzugen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Klimafreundliche Antriebstechnologien in unseren Nutzfahrzeugen machen unsere Organisation für potentielle Kunden attraktiver.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Nutzung alternativer Antriebe stellt ein Risiko für unsere Organisation dar.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Alternative Antriebe sind für unsere Organisation interessant.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Für unsere Kunden ist es irrelevant, ob unsere Nutzfahrzeuge immer auf dem neuesten Stand der Technik sind.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mehrkosten eines alternativen Antriebs gegenüber einem konventionellen Antrieb müssen sich selbst tragen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konventionelle (Diesel-)Antriebstechnologien sind für unsere Organisation zukunftsfähig.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Nutzung alternativer Antriebe bringt unabsehbare Schwierigkeiten mit sich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Gesamtbetriebskosten sind für die Auswahl eines alternativen Antriebs von geringer Bedeutung.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Innovative, emissionsarme Antriebstechnologien sind aus Klimaschutzgründen von besonderem Interesse für unsere Organisation.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Anschaffung innovativer Antriebstechnologien wird für unsere Organisation in den kommenden 10 Jahren notwendig sein.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

61%

Zurück Weiter

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

3 / 3

	Stimme überhaupt nicht zu	Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Weder noch	Stimme eher zu	Stimme zu	Stimme voll und ganz zu	Keine Angabe
Es ist Teil unserer Verantwortung als Organisation, klimafreundliche Technologien zu verwenden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ein „grünes Image“ unserer Organisation ist unseren Kunden unwichtig.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bei Entscheidungen, die wir als Organisation treffen, sind Umweltaspekte irrelevant.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Nutzung alternativer Antriebe bringt Nachteile bei der Erfüllung unserer Transportaufgaben mit sich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Alternative Antriebe sind einen höheren Preis wert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Gesamtkostenbilanz eines alternativen Antriebs muss positiv sein.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Nutzung alternativer Antriebe ist einfach.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Solange es geht wird unsere Organisation weiterhin Nutzfahrzeuge mit konventionellen Dieselantrieben anschaffen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Nutzung alternativer Antriebe beeinträchtigt die Erfüllung unserer Transportaufgaben.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Verbrauchswerte sind entscheidend für die Auswahl eines alternativen Antriebs.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Es gibt eine hohe Bereitschaft in unserer Organisation, Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben anzuschaffen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Unseren Kunden ist wichtig, dass unsere Leistungen möglichst CO2-neutral erbracht werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Zurück Weiter

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Im Folgenden finden Sie eine Auflistung verschiedener Antriebsarten für Nutzfahrzeuge.

Welche davon...

	... hat Ihre Organisation bereits getestet an einem Nutzfahrzeug?	... sind Ihnen in ihrer grundlegenden Funktionsweise bekannt?	... sind Ihnen unbekannt?
Dieselmotor	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gasmotor (CNG*)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gasmotor (LNG**)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gasmotor (LPG***)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
hydraulischer Hybrid	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
elektrischer Hybrid	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
batteriebetriebener Elektromotor	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Weitere, und zwar: <input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

* CNG = komprimiertes Erdgas (Compressed Natural Gas)

** LNG = verflüssigtes Erdgas (Liquified Natural Gas)

*** LPG = verflüssigtes Petroleumgas (Liquified Petroleum Gas)

72%

Zurück Weiter

Im Folgenden erscheinen nur diese Antriebsarten, welche in der vorherigen Frage mit *“bereits getestet“* oder *“grundlegende Funktionsweise bekannt“* markiert wurden:

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Welche der Ihnen bekannten Antriebsarten für Nutzfahrzeuge ...

	... verwendet Ihre Organisation bereits in ihrer Nutzfahrzeugflotte?	... plant Ihre Organisation bei der nächsten Anschaffung von Nutzfahrzeugen auszuwählen?	... kommen für Ihre Organisation in den nächsten 10 Jahren grundsätzlich in Frage?	... kommen für Ihre Organisation nicht in Frage?
Dieselmotor	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gasmotor (CNG)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gasmotor (LNG)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gasmotor (LPG)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
hydraulischer Hybrid	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
elektrischer Hybrid	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
batteriebetriebener Elektromotor	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

77%

Zurück Weiter

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Zum Abschluss der Befragung benötigen wir noch einige Informationen zu Ihrer Organisation sowie Ihrer Position in dieser.

Wie viele (mittel-)schwere Nutzfahrzeuge zählen derzeit ungefähr zum Fuhrpark Ihrer Organisation?

- zulässiges Gesamtgewicht 6 bis 16 Tonnen: ca. Fahrzeuge
- zulässiges Gesamtgewicht zw. 16 und 40 Tonnen: ca. Fahrzeuge
- Sonderfahrzeuge: ca. Fahrzeuge

Falls Sie "Sonderfahrzeuge" angegeben haben, beschreiben Sie diese bitte:

Welche Art von Transportaufgaben führt Ihre Organisation mit ihren Nutzfahrzeugen aus?

(Mehrfachantworten möglich)

- Gütertransport - Fernverkehr
- Gütertransport - Verteilerverkehr regional
- Gütertransport - Verteilerverkehr städtisch
- Personentransport - Fernverkehr
- Personentransport - Nahverkehr
- Entsorgungsdienstleistungen
- Bauverkehr
- Weitere, und zwar:

83%

Zurück Weiter

Im Folgenden erscheint die erste Frage nur, wenn mehrere Transportaufgaben ausgewählt wurden:

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

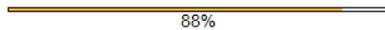
Welche der von Ihnen ausgewählten Transportaufgaben ist die Haupttransportaufgabe Ihrer Organisation?

- Gütertransport - Fernverkehr
- Gütertransport - Verteilerverkehr regional
- Gütertransport - Verteilerverkehr städtisch

Nehmen Sie an, Ihre Organisation könnte durch die Nutzung einer neuen Antriebstechnologie den Kraftstoffverbrauch der für ihre Haupttransportaufgabe eingesetzten Nutzfahrzeuge um 5% senken.

Wie viel wäre Ihre Organisation bereit, für diese neue Antriebstechnologie mehr zu bezahlen? Geben Sie bitte den Aufpreis in € an.

€ / Fahrzeug (ohne Trennzeichen)



Die folgenden Informationen wurden für alle Transportaufgaben, welche angegeben wurden, abgefragt:

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

Bitte geben Sie für die verschiedenen Transportaufgaben Ihrer Organisation die **durchschnittliche Nutzungsdauer**, die **durchschnittliche kostenrechnerische Abschreibungsdauer** sowie die **durchschnittliche jährliche Laufleistung** der jeweils dafür eingesetzten Nutzfahrzeuge an.

Bitte machen Sie die Angaben für Fahrzeuge, welche Sie nicht bereits gebraucht erworben haben.

Nutzfahrzeuge für Tätigkeiten im Gütertransport - Fernverkehr:

durchschnittliche Nutzungsdauer
in Jahren  0

durchschnittliche Amortisationsdauer
in Jahren  0

durchschnittliche Laufleistung
pro Jahr in tausend km  0

Nutzfahrzeuge für Tätigkeiten im Gütertransport - Verteilerverkehr regional:

durchschnittliche Nutzungsdauer
in Jahren  0

durchschnittliche Amortisationsdauer
in Jahren  0

durchschnittliche Laufleistung
pro Jahr in tausend km  0

Nutzfahrzeuge für Tätigkeiten im Gütertransport - Verteilerverkehr städtisch:

durchschnittliche Nutzungsdauer
in Jahren  0

durchschnittliche Amortisationsdauer
in Jahren  0

durchschnittliche Laufleistung
pro Jahr in tausend km  0

 94%

Zurück Weiter

Kundenbefragung Nutzfahrzeuge

In welchem Land liegt der Hauptsitz Ihrer Organisation?

Bitte auswählen

Welche Rechtsform hat Ihre Organisation?

Bei Unternehmenssitz außerhalb Deutschlands wählen Sie bitte die Art der Rechtsform, welche am besten entspricht.

- Einzelunternehmen
- Personengesellschaft (z.B. OHG, KG, GbR, ...)
- Kapitalgesellschaft (z.B. GmbH, GmbH & Co. KG, ...)
- Aktiengesellschaft
- Gesellschaft des öffentlichen Rechts
- Andere, und zwar:
- Keine Angabe

Wie viele Mitarbeiter beschäftigt Ihre Organisation derzeit?

- 1-10
- 11-50
- 51-250
- 251-500
- >500
- Keine Angabe

Bitte nennen Sie uns zum Abschluss Ihre persönliche Stellenbeschreibung:

Kommentar zum Fragebogen:

Gibt es etwas, das Sie uns noch gerne mitteilen möchten?

100%

3) Statistiken zur Reliabilität und Validität

Faktor	Umfrage Items	Standardisierte Faktorladung	Cronbach's α
Auswahlbereitschaft			0,819
	Alternative Antriebe sind für unsere Organisation interessant.	0,859	
	Die Anschaffung innovativer Antriebstechnologien wird für unsere Organisation in den kommenden 10 Jahren notwendig sein.	0,852	
	Solange es geht wird unsere Organisation weiterhin Nutzfahrzeuge mit konventionellen Dieselantrieben anschaffen.	0,803	
	Es gibt eine hohe Bereitschaft in unserer Organisation, Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben anzuschaffen.	0,698	
Bewusstsein und Berücksichtigung Gesamtbetriebskosten			0,732
	Verbrauchswerte sind entscheidend für die Auswahl eines alternativen Antriebs.	0,769	
	Die Gesamtkostenbilanz eines alternativen Antriebs muss positiv sein.	0,718	
	Die erwartete Amortisationsdauer ist ausschlaggebend für die Auswahl eines alternativen Antriebs.	0,696	
	Mehrkosten eines alternativen Antriebs gegenüber einem konventionellen Antrieb müssen sich selbst tragen.	0,528	
Anschaffungspreissensitivität			0,703
	Der Preis ist entscheidend, welcher Antrieb gewählt wird.	0,854	
	Ein preisgünstigerer Antrieb ist grundsätzlich zu bevorzugen.	0,652	
	Hohe Anschaffungspreise machen alternative Antriebe unattraktiv.	0,605	
Erwartete Nützlichkeit			0,866
	Die Nutzung alternativer Antriebe steigert unsere Produktivität.	0,857	
	Die Nutzung alternativer Antriebe verbessert den Geschäftsbetrieb.	0,770	
	Unsere Organisation kann ihre Leistungen durch die Nutzung alternativer Antriebe verbessern.	0,696	
	Durch die Nutzung alternativer Antriebstechnologien können wir unser Image gegenüber dem Wettbewerb stärken.	0,690	
	Klimafreundliche Antriebstechnologien in unseren Nutzfahrzeugen machen unsere Organisation für potentielle Kunden attraktiver.	0,671	
Erwartete Anwenderfreundlichkeit			0,855
	Die Nutzung alternativer Antriebe beeinträchtigt die Erfüllung unserer Transportaufgaben.	0,794	
	Die Nutzung alternativer Antriebe bringt Nachteile bei der Erfüllung unserer Transportaufgaben mit sich.	0,771	
	Die Nutzung alternativer Antriebe bringt unabhsehbare Schwierigkeiten mit sich.	0,720	
	Die Störungsanfälligkeit unserer Nutzfahrzeuge wird durch die Nutzung alternativer Antriebe erhöht.	0,696	
	Durch die Nutzung alternativer Antriebe entsteht für unsere Organisation Mehrarbeit.	0,692	
Image-Faktoren Umwelt und Innovation			0,702
	Für unsere Kunden ist es irrelevant, ob unsere Nutzfahrzeuge immer auf dem neusten Stand der Technik sind.	0,711	
	Bei Entscheidungen, die wir als Organisation treffen, sind Umweltaspekte irrelevant.	0,643	
	Ein "grünes Image" unserer Organisation ist unseren Kunden unwichtig.	0,634	
Umweltschutz und soziale Verantwortung			0,891
	Klimafreundlichkeit ist ein fester Bestandteil der Philosophie unserer Organisation.	0,858	
	Es ist Teil unserer Verantwortung als Organisation, klimafreundliche Technologien zu verwenden.	0,816	
	Innovative, emissionsarme Antriebstechnologien sind aus Klimaschutzgründen von besonderem Interesse für unsere Organisation.	0,814	

Tabelle 10: Ergebnis der Faktorenanalyse

Reliability Statistics – Willingness to select CO₂-saving power train technologies

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of Items
,819	,818	4

Item-Total Statistics

	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item-Total Correlation	Squared Multiple Correlation	Cronbach's Alpha if Item Deleted
WILLINGNESS3	12,3986	14,663	,709	,513	,740
WILLINGNESS2	12,1959	15,043	,623	,420	,781
WILLINGNESS5	13,7838	16,960	,519	,284	,825
WILLINGNESS1	12,8243	14,119	,718	,525	,734

Reliability Statistics – TCO awareness and consideration

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of Items
,732	,733	4

Item-Total Statistics

	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item-Total Correlation	Squared Multiple Correlation	Cronbach's Alpha if Item Deleted
TCO1	17,2581	6,855	,522	,280	,672
TCO2	17,2258	6,981	,481	,264	,696
TCO5	17,2645	6,897	,574	,343	,644
TCO3	17,4258	6,779	,516	,300	,675

Reliability Statistics – Purchasing price sensitivity

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of Items
,702	,703	3

Item-Total Statistics

	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item- Total Correlation	Squared Multiple Correlation	Cronbach's Alpha if Item Deleted
PURCHASE5	11,3926	4,265	,496	,338	,651
PURCHASE4	10,9693	4,055	,678	,459	,397
PURCHASE3	10,5706	5,703	,410	,238	,732

Reliability Statistics – Expected usefulness

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of Items
,865	,866	6

Item-Total Statistics

	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item- Total Correlation	Squared Multiple Correlation	Cronbach's Alpha if Item Deleted
USEFUL3	19,4899	37,927	,534	,424	,864
IMAGE6	18,7181	33,231	,702	,614	,835
USEFUL2	19,9799	36,831	,686	,580	,839
USEFUL1	19,7987	36,662	,652	,495	,844
IMAGE3	18,7450	33,556	,719	,638	,831
IMAGE2	18,6711	35,492	,681	,532	,838

Reliability Statistics – Expected ease of use

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of Items
,855	,855	6

Item-Total Statistics

	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item- Total Correlation	Squared Multiple Correlation	Cronbach's Alpha if Item Deleted
EOU5	18,1290	35,934	,637	,418	,832
EOU2	17,8629	38,363	,461	,241	,864
EOU4	17,2097	37,175	,578	,343	,843
EOU3	17,6935	35,125	,663	,456	,828
USEFUL5	17,6048	33,363	,750	,706	,810
USEFUL4	17,5887	33,041	,779	,715	,805

Reliability Statistics – Image factors environment and innovation

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of Items
,699	,702	3

Item-Total Statistics

	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item-Total Correlation	Squared Multiple Correlation	Cronbach's Alpha if Item Deleted
IMAGE5	8,4819	8,627	,439	,193	,708
IMAGE4	8,5241	7,924	,568	,346	,539
CSR1	7,6807	8,691	,548	,329	,571

Reliability Statistics – Environmental attitude and CSR

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of Items
,888	,891	3

Item-Total Statistics

	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item-Total Correlation	Squared Multiple Correlation	Cronbach's Alpha if Item Deleted
CSR3	9,7911	7,695	,815	,664	,814
CSR4	10,1899	6,906	,775	,607	,855
CSR2	9,6266	8,095	,767	,597	,855

Korrelationsmatrizen:

	Mean	Std. Deviation	N
WILLINGNESS3	4,6689	1,54914	148
WILLINGNESS2	4,8716	1,61742	148
WILLINGNESS5	3,2838	1,48021	148
WILLINGNESS1	4,2432	1,61886	148

	USEFUL3	IMAGE6	USEFUL2	USEFUL1	IMAGE3	IMAGE2
USEFUL3	1,000	,354	,637	,488	,366	,350
IMAGE6	,354	1,000	,435	,561	,721	,630
USEFUL2	,637	,435	1,000	,609	,525	,494
USEFUL1	,488	,561	,609	1,000	,453	,464
IMAGE3	,366	,721	,525	,453	1,000	,689
IMAGE2	,350	,630	,494	,464	,689	1,000

	EOU5	EOU2	EOU4	EOU3	USEFUL5	USEFUL4
EOU5	2,260	,887	,942	1,286	1,327	1,301
EOU2	,887	2,426	,802	,878	,830	1,051
EOU4	,942	,802	2,154	1,004	1,247	1,182
EOU3	1,286	,878	1,004	2,398	1,432	1,481
USEFUL5	1,327	,830	1,247	1,432	2,532	2,058
USEFUL4	1,301	1,051	1,182	1,481	2,058	2,495

	CSR3	CSR4	CSR2
CSR3	1,000	,754	,746
CSR4	,754	1,000	,694
CSR2	,746	,694	1,000

	TCO1	TCO2	TCO5	TCO3
TCO1	1,000	,379	,388	,450
TCO2	,379	1,000	,466	,300
TCO5	,388	,466	1,000	,462
TCO3	,450	,300	,462	1,000

	IMAGE5	IMAGE4	CSR1
IMAGE5	1,000	,400	,371
IMAGE4	,400	1,000	,549
CSR1	,371	,549	1,000

	PURCHASE5	PURCHASE4	PURCHASE3
PURCHASE5	1,000	,580	,255
PURCHASE4	,580	1,000	,487
PURCHASE3	,255	,487	1,000

4) Explorative Faktorenanalyse

KMO and Bartlett's Test

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		,820
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	1727,005
	df	300
	Sig.	,000

Total Variance Explained

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared			Rotation Sums of Squared		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Loadings			Loadings		
				Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	6,601	26,403	26,403	6,601	26,403	26,403	3,820	15,280	15,280
2	3,574	14,298	40,701	3,574	14,298	40,701	3,473	13,892	29,172
3	2,464	9,858	50,559	2,464	9,858	50,559	2,819	11,278	40,450
4	1,811	7,244	57,803	1,811	7,244	57,803	2,405	9,618	50,069
5	1,331	5,325	63,127	1,331	5,325	63,127	2,208	8,833	58,901
6	1,110	4,440	67,567	1,110	4,440	67,567	2,166	8,666	67,567
7	,964	3,854	71,422						
8	,750	3,000	74,422						
9	,729	2,918	77,339						
10	,647	2,590	79,929						
11	,583	2,331	82,260						
12	,566	2,263	84,523						
13	,492	1,970	86,493						
14	,469	1,874	88,367						
15	,418	1,672	90,040						
16	,375	1,499	91,539						
17	,345	1,380	92,918						
18	,333	1,330	94,249						
19	,284	1,138	95,387						
20	,272	1,090	96,476						
21	,228	,914	97,390						
22	,190	,760	98,150						
23	,172	,689	98,839						
24	,160	,638	99,477						
25	,131	,523	100,000						

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotated Component Matrix^a

	Component					
	1	2	3	4	5	6
USEFUL2	,857	-,008	,048	,108	-,034	,005
USEFUL1	,770	,055	,219	,010	-,057	-,117
USEFUL3	,696	,042	,101	,335	-,112	-,253
IMAGE3	,690	,141	,265	-,052	,356	,002
IMAGE2	,671	,108	,291	-,187	,342	,088
IMAGE6	,655	,134	,350	,004	,206	-,041
USEFUL4	,201	,794	,091	,085	,306	,054
USEFUL5	,340	,771	-,073	,083	,268	-,037
EOU3	,023	,720	,058	-,219	,264	-,091
EOU5	,152	,696	,176	-,315	,024	-,066
EOU2	-,208	,692	,101	,033	-,327	-,119
EOU4	-,086	,634	-,199	,198	,186	-,355
CSR2	,199	-,047	,858	,005	,097	-,070
CSR3	,312	,037	,816	,062	,182	-,075
CSR4	,323	,124	,814	-,016	,154	,055
TCO3	,115	-,055	,097	,769	,182	,083
TCO5	,030	-,065	-,013	,718	-,053	,191
TCO1	,083	,057	,000	,696	-,080	,142
TCO2	-,260	-,156	-,050	,528	-,127	,480
IMAGE5	,132	,257	,014	-,144	,711	-,105
CSR1	,019	,194	,361	,107	,643	-,251
IMAGE4	,072	,100	,401	,080	,634	-,140
PURCHASE4	-,006	-,042	-,019	,264	-,082	,854
PURCHASE5	,000	-,035	-,118	,191	-,268	,652
PURCHASE3	-,265	-,373	,014	,151	,043	,605

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

a. Rotation converged in 8 iterations.

5) Multiple lineare Regressionsanalyse

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,794 ^a	,630	,609	,62983714

a. Predictors: (Constant), Environmental attitude and CSR, Image factors environment and innovation, Expected ease of use, Expected usefulness, TCO awareness and consideration, Purchasing price sensitivity

b. Dependent Variable: Willingness to select CO2-saving power train technologies

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	71,682	6	11,947	30,116	,000 ^b
	Residual	42,050	106	,397		
	Total	113,732	112			

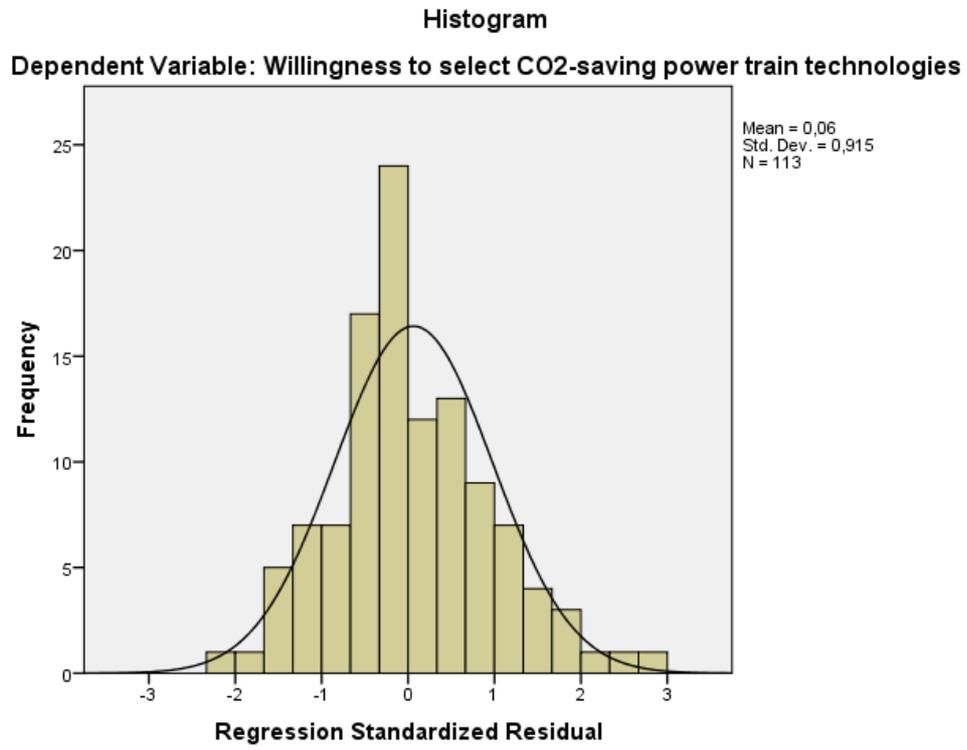
a. Dependent Variable: Willingness to select CO2-saving power train technologies

b. Predictors: (Constant), Environmental attitude and CSR, Image factors environment and innovation, Expected ease of use, Expected usefulness, TCO awareness and consideration, Purchasing price sensitivity

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,003	,060		-,058	,954
	TCO awareness and consideration	,132	,061	,128	2,162	,033
	Purchasing price sensitivity	-,204	,058	-,211	-3,528	,001
	Expected usefulness	,426	,058	,434	7,329	,000
	Expected ease of use	,320	,056	,337	5,696	,000
	Image factors environment and innovation	,193	,059	,192	3,247	,002
	Environmental attitude and CSR	,511	,066	,461	7,752	,000

a. Dependent Variable: Willingness to select CO2-saving power train technologies



6) Clusteranalyse

KMO and Bartlett's Test

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		,828
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	1557,246
	df	300
	Sig.	,000

Total Variance Explained

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	6,362	25,449	25,449	6,362	25,449	25,449	3,726	14,905	14,905
2	3,444	13,777	39,225	3,444	13,777	39,225	3,352	13,407	28,312
3	2,398	9,591	48,817	2,398	9,591	48,817	2,760	11,042	39,354
4	1,805	7,222	56,038	1,805	7,222	56,038	2,322	9,290	48,644
5	1,292	5,169	61,207	1,292	5,169	61,207	2,175	8,700	57,343
6	1,118	4,473	65,680	1,118	4,473	65,680	2,084	8,337	65,680
7	,974	3,897	69,577						
8	,766	3,063	72,640						
9	,738	2,953	75,593						
10	,663	2,653	78,246						
11	,630	2,522	80,768						
12	,582	2,327	83,095						
13	,513	2,052	85,147						
14	,484	1,936	87,083						
15	,448	1,793	88,877						
16	,406	1,623	90,500						
17	,374	1,497	91,996						
18	,361	1,445	93,441						
19	,323	1,290	94,731						
20	,302	1,208	95,940						
21	,264	1,056	96,996						
22	,214	,858	97,853						
23	,206	,822	98,675						
24	,181	,722	99,398						
25	,151	,602	100,000						

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotated Component Matrix^a

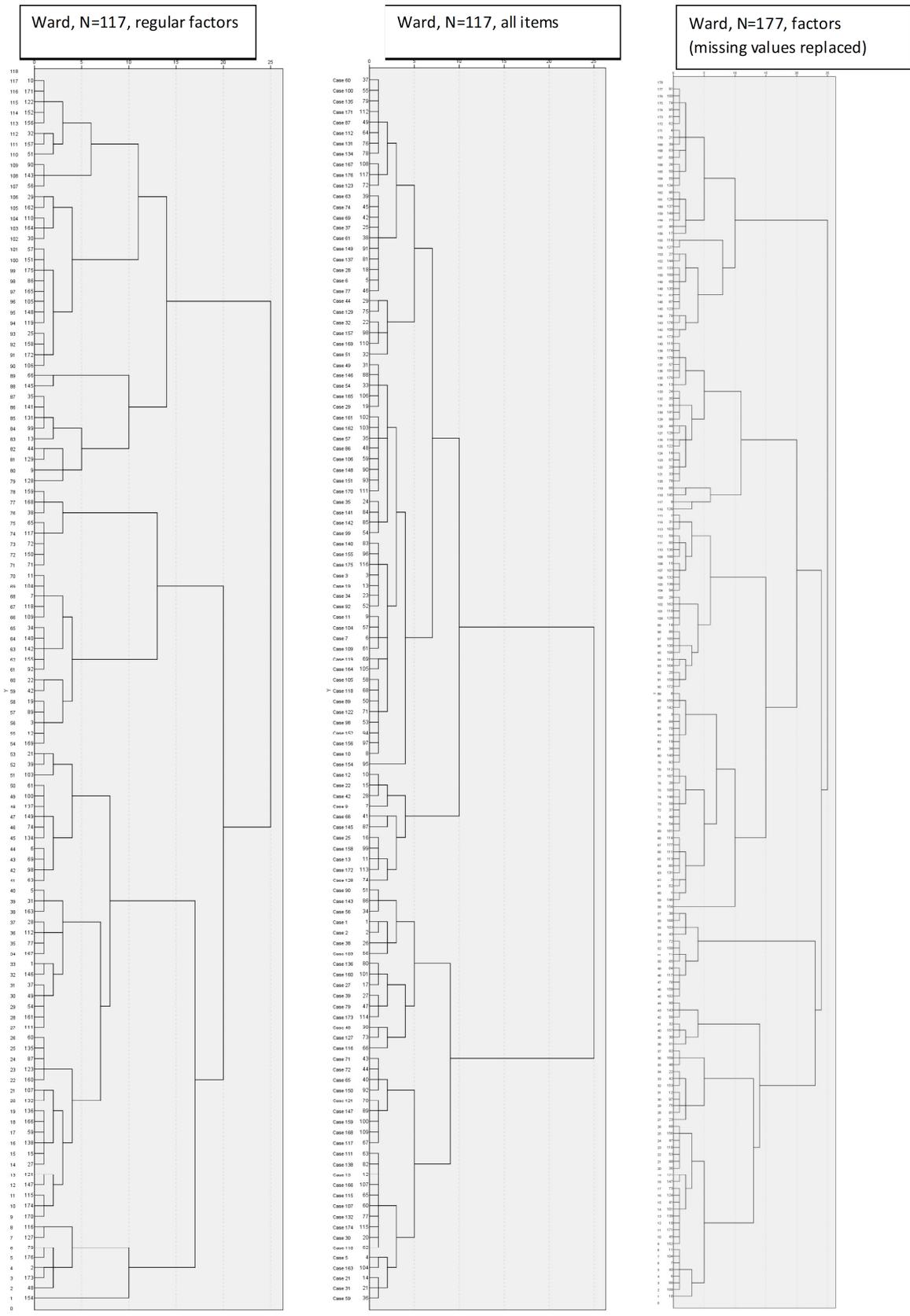
	Component					
	1	2	3	4	5	6
USEFUL2	,845	-,004	,042	,109	-,048	-,007
USEFUL1	,767	,054	,207	,008	-,061	-,114
IMAGE3	,691	,136	,245	-,051	,368	,010
USEFUL3	,681	,044	,119	,329	-,139	-,264
IMAGE2	,672	,102	,266	-,182	,354	,092
IMAGE6	,662	,126	,321	,000	,231	-,029
USEFUL4	,189	,794	,088	,091	,288	,047
USEFUL5	,308	,772	-,061	,095	,246	-,050
EOU3	,023	,706	,051	-,214	,257	-,083
EOU5	,145	,673	,157	-,311	,019	-,043
EOU2	-,203	,670	,103	,020	-,320	-,111
EOU4	-,092	,616	-,186	,202	,171	-,366
CSR2	,194	-,042	,857	,001	,087	-,066
CSR3	,303	,040	,819	,057	,170	-,072
CSR4	,311	,119	,810	-,019	,156	,059
TCO3	,100	-,045	,101	,738	,174	,081
TCO5	,029	-,062	-,014	,709	-,055	,185
TCO1	,081	,052	-,006	,677	-,073	,136
TCO2	-,250	-,158	-,057	,530	-,127	,470
IMAGE5	,132	,251	,009	-,138	,711	-,104
IMAGE4	,068	,099	,403	,083	,628	-,143
CSR1	,012	,191	,367	,113	,627	-,259
PURCHASE4	-,004	-,037	-,025	,272	-,072	,831
PURCHASE5	-,006	-,027	-,106	,194	-,282	,638
PURCHASE3	-,252	-,368	,016	,153	,037	,584

Extraction Method: Principal Component Analysis.

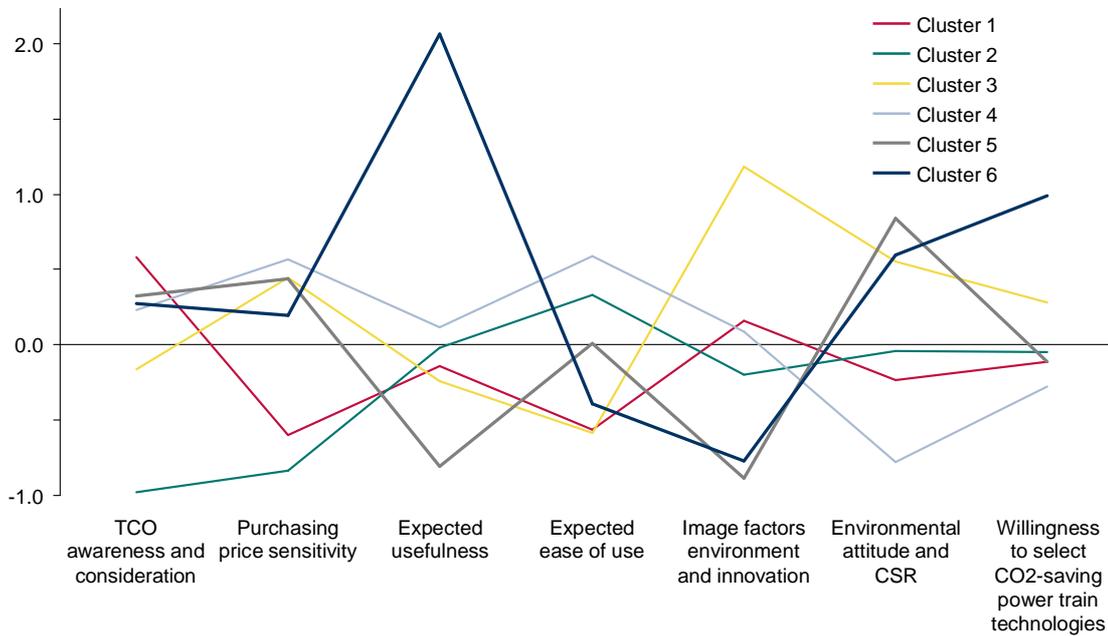
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

a. Rotation converged in 8 iterations.

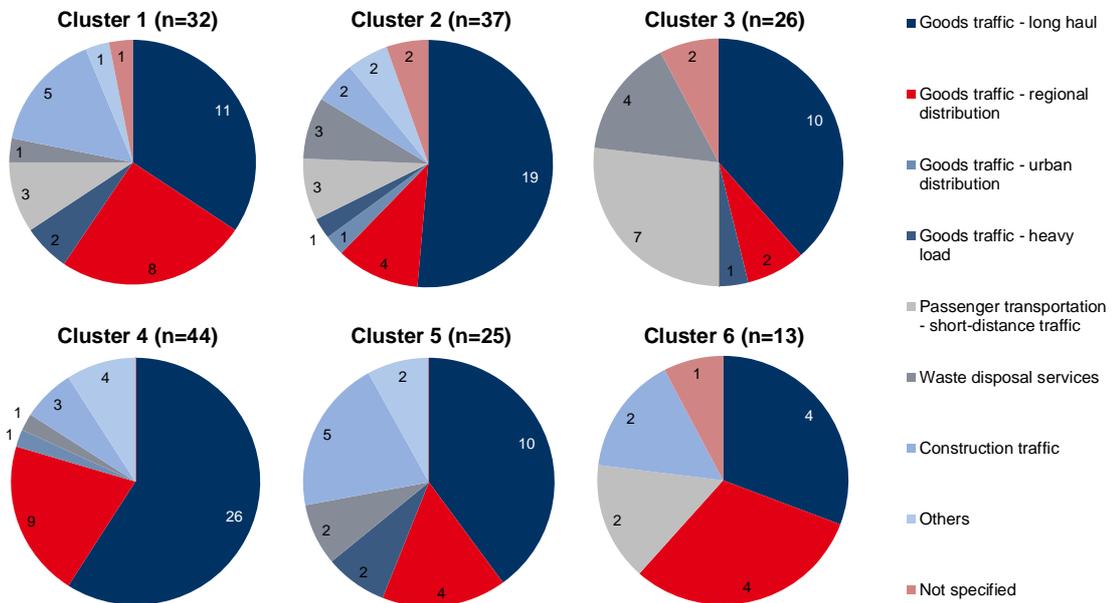
Dendrogramm der Clusterlösungen:



Ausprägungen der Faktoren nach Cluster:



Zusammensetzung der Cluster nach Anwendungsfall:



7) Zusammenhang zwischen den Clusterlösungen

Cluster solution n=117 * Cluster solution n=177 Crosstabulation

			Cluster solution n=177						Total
			1	2	3	4	5	6	
Cluster solution n=117	1	Count	14	0	0	8	0	0	22
		Expected Count	4,3	4,1	3,9	4,7	3,2	1,7	22,0
		% of Total	12,0%	0,0%	0,0%	6,8%	0,0%	0,0%	18,8%
	2	Count	2	5	0	2	0	0	9
		Expected Count	1,8	1,7	1,6	1,9	1,3	,7	9,0
		% of Total	1,7%	4,3%	0,0%	1,7%	0,0%	0,0%	7,7%
	3	Count	5	0	16	3	6	0	30
		Expected Count	5,9	5,6	5,4	6,4	4,4	2,3	30,0
		% of Total	4,3%	0,0%	13,7%	2,6%	5,1%	0,0%	25,6%
	4	Count	1	17	5	2	2	1	28
		Expected Count	5,5	5,3	5,0	6,0	4,1	2,2	28,0
		% of Total	0,9%	14,5%	4,3%	1,7%	1,7%	0,9%	23,9%
	5	Count	1	0	0	10	9	0	20
		Expected Count	3,9	3,8	3,6	4,3	2,9	1,5	20,0
		% of Total	0,9%	0,0%	0,0%	8,5%	7,7%	0,0%	17,1%
	6	Count	0	0	0	0	0	8	8
		Expected Count	1,6	1,5	1,4	1,7	1,2	,6	8,0
		% of Total	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,8%	6,8%
Total	Count	23	22	21	25	17	9	117	
	Expected Count	23,0	22,0	21,0	25,0	17,0	9,0	117,0	
	% of Total	19,7%	18,8%	17,9%	21,4%	14,5%	7,7%	100,0%	

Chi-Square Tests

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	240,184 ^a	25	,000
Likelihood Ratio	188,641	25	,000
Linear-by-Linear Association	37,010	1	,000
N of Valid Cases	117		

a. 28 cells (77,8%) have expected count less than 5. The minimum expected count is 0,62.

Symmetric Measures

		Value	Approx. Sig.
Nominal by Nominal	Phi	1,433	,000
	Cramer's V	,641	,000
	Contingency Coefficient	,820	,000
N of Valid Cases		117	

Anhang III Conjoint-Analyse

1) Fragebogen

Screening

- **Verfügt Ihr Unternehmen über Firmenfahrzeuge, also Fahrzeuge, die auf Ihr Unternehmen zugelassen sind und gewerblich genutzt werden?**

Ja 1

Nein 2 → Interview beenden

- **Gehören dazu auch Nutzfahrzeuge mit einem zulässigem Gesamtgewicht ab 6 Tonnen? Mit Nutzfahrzeugen sind hier Fahrzeuge mit Straßenverkehrszulassung zum Transport von Gütern oder Personen, also LKWs, Sattelzugmaschinen und Busse gemeint, aber keine Schienenfahrzeuge, Baumaschinen sowie landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge. Auch Auflieger und Anhänger ohne Zugmaschine sind ausgenommen.**

ja 1

nein 2 → Interview beenden

- **Sind Sie persönlich direkt am Beschaffungsprozess für Nutzfahrzeuge in Ihrem Unternehmen beteiligt, d.h. haben Sie Einfluss auf die Auswahl der Nutzfahrzeuge?**

ja 1

nein 2 → Interview beenden

- **Haben Sie bzw. Ihr Unternehmen innerhalb der letzten 24 Monate schwere Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht ab 6 Tonnen erworben, d.h. gekauft, geleast oder per Langzeitmiete angeschafft?**

ja, nämlich | | Nutzfahrzeuge

nein

- **Und handelte es sich dabei um Neufahrzeuge oder Gebrauchtfahrzeuge?**

Anzahl Neufahrzeuge _ _ Nutzfahrzeuge

Anzahl Gebrauchtfahrzeuge _ _ Nutzfahrzeuge

- **Und für welchen Zweck werden die Nutzfahrzeuge, die Sie in den letzten 24 Monaten angeschafft haben, schwerpunktmäßig eingesetzt?**

1) Fernverkehr (national und international) _ _ Nutzfahrzeuge

2) Nahverkehr (Verteilerverkehr) _ _ Nutzfahrzeuge

3) Müllabfuhr, Entsorgung _ _ Nutzfahrzeuge

4) Baustellenverkehr _ _ Nutzfahrzeuge

5) Städtischer Personennahverkehr / Stadtbus _ _ Nutzfahrzeuge

6) Personen Fernverkehr / Reisebus _ _ Nutzfahrzeuge

7) Sonstige: _____ _ _ Nutzfahrzeuge

- **Und planen Sie bzw. Ihr Unternehmen, innerhalb der nächsten 24 Monate schwere Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht ab 6 Tonnen anzuschaffen?**

ja, nämlich I__I__I Nutzfahrzeuge

nein 995 → Frage Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

- **Und für welchen Zweck wollen Sie die Nutzfahrzeuge in den kommenden 24 Monaten am ehesten anschaffen?**

1) Fernverkehr I__I__I Nutzfahrzeuge

2) Nahverkehr (Verteilerverkehr) I__I__I Nutzfahrzeuge

3) Müllabfuhr, Entsorgung I__I__I Nutzfahrzeuge

4) Baustellenverkehr I__I__I Nutzfahrzeuge

5) Städtischer Personennahverkehr / Stadtbus I__I__I Nutzfahrzeuge

6) Personen Fernverkehr / Reisebus I__I__I Nutzfahrzeuge

7) Sonstige: _____ I__I__I Nutzfahrzeuge

Beschreibung des Unternehmensfuhrparks

- **Wie viele Nutzfahrzeuge ab 6t hat Ihr Unternehmen insgesamt?**

gesamt I__I__I Nfz

- **Und wie verteilen sich die Fahrzeuge über die folgenden Gewichtsklassen?**

6 bis unter 12 t I__I__I Nutzfahrzeuge

12 bis unter 18 t I__I__I Nutzfahrzeuge

18 bis unter 26 t I__I__I Nutzfahrzeuge

26 bis unter 40 t I__I__I Nutzfahrzeuge

40 t I__I__I Nutzfahrzeuge

über 40 t I__I__I Nutzfahrzeuge

- **Sie haben gesagt, Sie haben (auch) Fahrzeuge zwischen 12 und unter 18 Tonnen. Wie viele dieser Fahrzeuge sind unter 16 t und wie viele 16 t und mehr?**

unter 16 Tonnen I__I__I Nutzfahrzeuge

ab 16 Tonnen I__I__I Nutzfahrzeuge

- **In welchen Bereichen werden die Fahrzeuge ab 6 Tonnen (schwerpunktmäßig) eingesetzt?**

1) Fernverkehr I__I__I Nutzfahrzeuge

2) Nahverkehr (Verteilerverkehr) I__I__I Nutzfahrzeuge

3) Müllabfuhr, Entsorgung I__I__I Nutzfahrzeuge

4) Baustellenverkehr I__I__I Nutzfahrzeuge

5) Städtischer Personennahverkehr / Stadtbus I__I__I Nutzfahrzeuge

6) Personen Fernverkehr / Reisebus I__I__I Nutzfahrzeuge

7) Sonstige: _____ I__I__I Nutzfahrzeuge

• **Verfügt Ihr Unternehmen über eine betriebseigene Werkstatt, in der die Nutzfahrzeuge ab 6 Tonnen gewartet/repariert werden?**

- ja, aber nur für einfachere Wartungs-/Reparaturmaßnahmen (z.B. Filterwechsel, Ölwechsel, Bremsbeläge oder Reifen wechseln) 1
- ja, auch für komplexere Wartungs-/Reparaturmaßnahmen (z.B. Diesel-Komponentenprüfung, Arbeiten am Getriebe / Antriebsstrang) 2
- nein, keine betriebseigene Werkstatt 3

Umgang mit dem Kraftstoffverbrauch

• **Welche Maßnahmen haben Sie zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs für diese Fahrzeuge bereits umgesetzt? Ich zeige Ihnen dazu einmal einige Antwortmöglichkeiten.**

- Aerodynamische Optimierung von Fahrzeugen 1
- Fahrzeugmaßnahmen (bedarfsgesteuerte Nebenaggregate, Leichtbau etc.) 2
- Verwendung rollwiderstandsoptimierter Reifen 3
- Fahrerschulung 4
- Fahrerassistenzsystem zur Verbrauchsreduktion (z.B. Predictive Powertrain Control, I-Shift, E-horizon etc.) 5
- Beschaffung bzw. Nachrüstung von Nutzfahrzeugen mit Erdgasantrieb mit Druckspeicherung (CNG mono fuel) 6
- Beschaffung bzw. Nachrüstung von Nutzfahrzeugen mit Erdgasantrieb mit Flüssigspeicherung (LNG monofuel) 7
- Beschaffung bzw. Nachrüstung von Nutzfahrzeugen mit Autogasantrieb (LPG dual fuel) 8
- Beschaffung von Nutzfahrzeugen mit Hybrid- Antrieb 9
- Beschaffung von Nutzfahrzeugen mit reinem Elektroantrieb 10
- Sonstiges _____ |__|__|
- Keine 95

Beschaffungsprozesse

- Denken Sie einmal speziell an das letzte Fahrzeug, das Sie als Neufahrzeug für den / die ... angeschafft, d.h. erworben, geleast oder per Langzeitmiete erhalten haben / Denken Sie einmal speziell an die nächste Fahrzeuganschaffung (ob Kauf, Leasing oder Langzeitmiete) für den / die ..., wie wichtig waren / sind die folgenden Kriterien?
Bitte geben Sie Ihre Antwort anhand von einer Skala von 1 bis 5, wobei 1 bedeutet „absolut notwendig“, 2 bedeutet „sehr wichtig“, 3 bedeutet „wichtig“, 4 bedeutet „eher unwichtig“ und 5 bedeutet „völlig unwichtig“.

	absolut notwendig	sehr wichtig	wichtig	eher unwichtig	völlig unwichtig
Performance (Leistung/Drehmoment)	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Lärmemission	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Nutzlast	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Reichweite pro Tankfüllung	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Einfache Bedienbarkeit für den Fahrer (z.B. hinsichtlich Anzeigen, Fahrverhalten etc.)	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Kraftstoffverbrauch	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
CO ₂ -Emissionen, also Kohlenstoffdioxid	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Gesamtbetriebskosten über die Nutzungsdauer	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Service- und Werkstattverfügbarkeit	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Neuester Stand der Technik	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Umweltfreundlichkeit / grünes Image	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Zuverlässigkeit bzw. Robustheit des Fahrzeugs	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Anschaffungspreis	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Hubraum	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Fahrzeugmarke / Fahrzeughersteller	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Schadstoffemissionen, z.B. Stickoxid und Partikel	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5

Detailevaluation der Anwendungsfälle

- **Im Folgenden möchte ich mich gerne mit Ihnen über das Fahrzeug unterhalten, was Sie zuletzt als Neufahrzeug für den ... angeschafft haben / welches Sie als nächstes als Neufahrzeug für den ... anschaffen werden. In welche Gewichtsklasse fällt dieses Fahrzeug / wird dieses Fahrzeug fallen?**

- | | |
|--------------------|----------------------------|
| 6 bis unter 7,5 t | <input type="checkbox"/> 1 |
| 7,5 bis unter 12 t | <input type="checkbox"/> 2 |
| 12 bis unter 16 t | <input type="checkbox"/> 3 |
| 16 bis unter 18 t | <input type="checkbox"/> 4 |
| 18 bis unter 26 t | <input type="checkbox"/> 5 |
| 26 bis unter 40 t | <input type="checkbox"/> 6 |
| 40 t | <input type="checkbox"/> 7 |
| über 40 t | <input type="checkbox"/> 8 |

- **Und haben Sie / planen Sie dieses Fahrzeug ...?**

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| bar gekauft / bar zu kaufen | <input type="checkbox"/> 1 |
| finanziert / zu finanzieren | <input type="checkbox"/> 2 |
| geleast / zu leasen | <input type="checkbox"/> 3 |
| gemietet / zu mieten | <input type="checkbox"/> 4 |
| (weiß ich (noch) nicht) | <input type="checkbox"/> 98 |

- **Im Folgenden interessiert mich, wie Sie das Fahrzeug hinsichtlich betriebswirtschaftlicher Faktoren nutzen / nutzen werden.**

Wie viele Jahre werden Sie das Fahrzeug ca. nutzen?

Nutzungsdauer I I I Jahre
 (weiß ich (noch) nicht) 98

In welcher Zeitspanne planen Sie, das Fahrzeug abzuschreiben, d.h. zu amortisieren?

Amortisationsdauer I I I Jahre
 (weiß ich (noch) nicht) 98

Wie stellt sich die jährliche Fahrleistung dar?

jährliche Fahrleistung I I I I . I I I km
 (weiß ich (noch) nicht) 98

An wie vielen Tagen pro Jahr ist das Fahrzeug ca. im Einsatz?

Einsatztage pro Jahr I I I I Tage
 (weiß ich (noch) nicht) 98

Zu welchen Anteilen wird das Fahrzeug jeweils im Fernverkehr, im Regionalverkehr (d.h. Verkehr zwischen benachbarten Städten) und im städtischen Verkehr (d.h. Verkehr innerhalb einer Stadt) eingesetzt?

Fernverkehr I I I I
 Regionalverkehr I I I I
 Städtischer Verkehr I I I I
 Gesamt 100%

Und wie viel hat das Fahrzeug insgesamt gekostet / In welcher Preisspanne planen Sie, ein Fahrzeug anzuschaffen (Nettopreis, Verhandelter Preis, nicht Listenpreis)?

tatsächlicher Kaufpreis I I I I . I I I €
 mögliche Preisspanne _____

Conjoint

Im Folgenden werden wir Ihnen einige unterschiedliche Fahrzeuge präsentieren, die sich hinsichtlich verschiedener Eigenschaften unterscheiden.

Ein Unterscheidungsmerkmal ist die Antriebsart.

Bitte gehen Sie im Folgenden davon aus, Sie wollen ein Fahrzeug wie eben beschrieben anschaffen und diese verschiedenen Antriebstechniken sind für das Fahrzeug serienreif am Markt verfügbar – auch wenn dies ggf. heutzutage noch nicht der Fall ist.

Sie sehen verschiedene Fahrzeuge, die anhand der Kriterien

Antriebsform

Kraftstoffkosten Deutschland: €/100km

CO2 Emissionen [g/100km]

Reichweite km/Tankfüllung

Leistung kW

Delta Anschaffungspreis €

beschrieben sind.

Der Delta-Anschaffungspreis bedeutet, um wie viel der Preis für das Fahrzeug in der jeweiligen Konfiguration vom „normalen Preis“, d.h. verhandelten Nettopreis, abweicht. Ein negativer Betrag bedeutet, das Fahrzeug wäre günstiger, ein positiver Betrag, das Fahrzeug wäre teurer.

Der Gesamtpreis wäre im letzteren Fall also der „normale Preis“ + dem Delta.

Präsentation der Auswahlentscheidungen der Conjoint Studie siehe Abbildung 77 in Anhang III 2)

Image von alternativen Antriebskonzepten

- Inwiefern stimmen Sie folgenden Aussagen auf ... als Antriebsform zu?
Bitte geben Sie Ihre Antwort auf einer Skala von 1 bis 5, wobei 1 bedeutet „stimme voll und ganz zu“ und 5 bedeutet „stimme überhaupt nicht zu“. Mit den Werten dazwischen können Sie Ihre Antwort entsprechend abstimmen.

		stimme voll und ganz zu					stimme überhaupt nicht zu				
<p>... bietet eine ausreichende Reichweite.</p> <p>... bietet geringe Unterhaltskosten.</p> <p>... ist eine verlässliche Technik.</p>	Diesel	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Elektro	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Hybrid	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	CNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	LNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Diesel	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Elektro	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Hybrid	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	CNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	LNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Diesel	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Elektro	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Hybrid	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	CNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	LNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
<p>... hat eine ausreichende Service- und Werkstattverfügbarkeit.</p> <p>Ich kann mir gut vorstellen, Fahrzeuge mit ... auch bei uns in der betriebseigenen Werkstatt zu warten. [EDV: nur, falls auch komplexere Wartungsarbeiten in der BEW durchgeführt werden F15 =2]</p>	Diesel	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Elektro	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Hybrid	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	CNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	LNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Diesel	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Elektro	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Hybrid	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	CNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	LNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
<p>... hat ein ausreichendes Tankstellennetz innerhalb von Deutschland]</p> <p>... hat ein ausreichendes Tankstellennetz außerhalb von Deutschland</p>	Elektro	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	CNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	LNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	Elektro	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	CNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					
	LNG	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5					

Tankstellennetz

- Eine Überlegung, wenn man sich mit alternativen Antriebsarten beschäftigt, kann ja auch das Tankstellennetz sein, d.h. wo und wie viele Tankstellen man vorfindet. Stellen Sie sich einmal vor, Sie haben ein Fahrzeug mit ... Dabei beträgt die Reichweite ca. ... km. Würde es Ihnen ausreichen, wenn Sie eine Transportmöglichkeit an Ihrem Heimatstandort hätten oder bräuchten Sie auch eine Tankmöglichkeit unterwegs? Und können Sie sich vorstellen, eine Tankstelle auf Ihrem Betriebsgelände zu installieren?

	nur am Heimatstandort	auch unterwegs	ja	nein	bereits vorhanden
CNG [Reichweite 350 km]	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
LNG [Reichweite 750 km]	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
Elektro [Reichweite 300 km]	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5

Statistik

- Zum Abschluss habe ich nur noch einige wenige Fragen für unsere Statistik. Welche Funktion haben Sie in Ihrem Unternehmen inne?

- Geschäftsführer 1
- Inhaber 2
- Leiter der Einkaufsabteilung 3
- Einkäufer 4
- Fuhrparkleiter 5
- späterer Anwender / Fahrer 6
- Sonstige _____ | | |

- Wie viele Mitarbeiter hat Ihr Unternehmen?

Mitarbeiter | | | | | | |

- Würden Sie mir noch Ihr Alter nennen?

| | | Jahre

- Geschlecht (nicht vorlesen!)

- männlich 1
- weiblich 2

2) Präsentation der drei Erhebungsdesigns

	Fahrzeug A	Fahrzeug B
Antriebsform	Diesel-Hybrid Antrieb	Erdgasantrieb mit Flüssigspeicherung (LNG)
Delta Anschaffungspreis	+40.000 €	-10.000 €
Kraftstoffkosten Deutschland	32,76 €/100km	16,80 €/100km
CO2 Emissionen	925 g/km	750 g/km
Reichweite	1.100 km/Tankfüllung	2.500 km/Tankfüllung
Leistung	350 kW	425 kW
	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

	Fahrzeug A	Fahrzeug B	Fahrzeug C
Antriebsform	Diesel-Hybrid Antrieb	Dieselantrieb	Erdgasantrieb mit Flüssigspeicherung (LNG)
Delta Anschaffungspreis	+10.000 €	0 €	+20.000 €
Kraftstoffkosten Deutschland	49,14 €/100km	40,95 €/100km	32,76 €/100km
CO2 Emissionen	750 g/km	1.100 g/km	925 g/km
Reichweite	1.800 km/Tankfüllung	350 km/Tankfüllung	2.500 km/Tankfüllung
Leistung	550 kW	425 kW	300 kW
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

	Fahrzeug 'links'	Fahrzeug 'rechts'
Delta Anschaffungspreis	+40.000 €	-10.000 €
Kraftstoffkosten Deutschland	49,14 €/100km	40,95 €/100km
Reichweite	1.100 km/Tankfüllung	750 km/Tankfüllung
Leistung	350 kW	200 kW
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

bevorzuge das linke Fahrzeug	<input type="radio"/>					
beide gleich	<input type="radio"/>					
bevorzuge das rechte Fahrzeug	<input type="radio"/>					

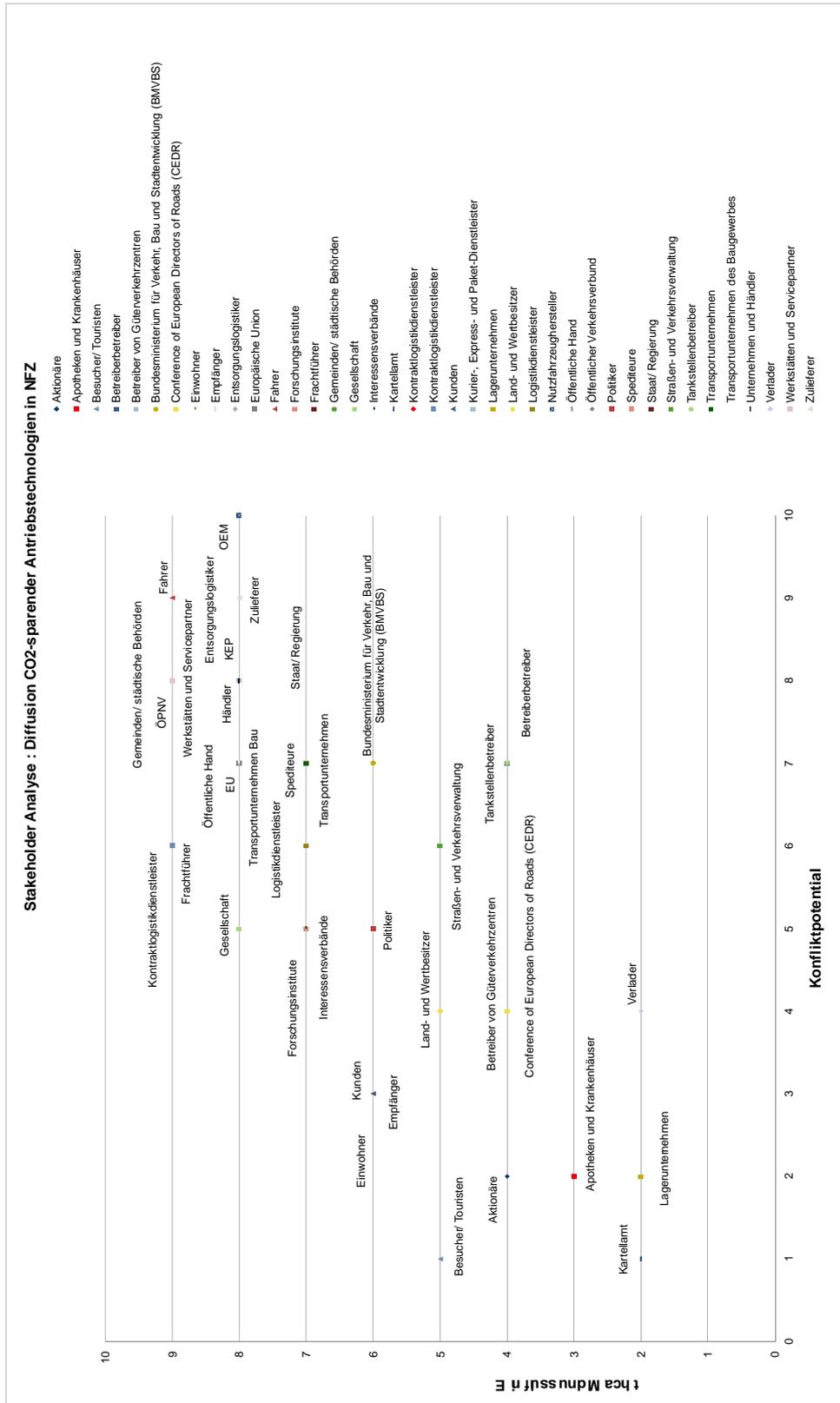
Abbildung 77: Präsentation der drei unterschiedlichen Designs der Auswahlentscheidungen

3) Beschreibung der Stichprobe nach Anwendungsfall

	 Fernverkehr	 Verteilerverkehr	 Bauverkehr	 Abfallsammelverkehr	 Stadtbus	 Reisebus
	n = 65	n = 79	n = 59	n = 25	n = 32	n = 32
vergangene Anschaffung	n = 58	n = 68	n = 42	n = 23	n = 28	n = 30
geplante Anschaffung	n = 7	n = 11	n = 17	n = 2	n = 4	n = 2

Anhang IV Akteure und deren Wechselwirkung

1) Ergebnis Stakeholderanalyse



2) Teaser der qualitativen Studie

Die erfolgreiche Marktdurchdringung CO₂-sparender Technologien in Nutzfahrzeugen hängt vom komplexen Marktumfeld ab



Ausgangssituation

- Durch zunehmenden Kostendruck und die anstehende CO₂-Gesetzgebung **steigt der Druck zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs** bei Betreibern von LKW- und Bus-Flotten
- Die **Vielfalt an Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion nimmt zu** (Motoreffizienz, alternative Kraftstoffe, Elektrifizierung, Fahrzeugmaßnahmen)
- Neben der Transportaufgabe beeinflussen der **gesetzliche Rahmen, die Infrastruktur und die Angebotsvielfalt** die Auswahlentscheidung möglicher Technologien
- Daher sind zukünftige CO₂-Emissionen und Absatzpotenziale **schwer zu prognostizieren**
- Dies erzeugt eine **hohe Unsicherheit** unter den Akteuren des Nutzfahrzeugmarktes (Kunden, OEM, Politik, Infrastruktur) hinsichtlich der Auswirkungen ihrer Handlungsoptionen

Zielsetzung der Studie

Forschungsfrage:

- Analyse der zukünftigen Marktdurchdringung CO₂-sparender Technologien in schweren Nutzfahrzeugen

Dabei untersuchen wir folgende Themen:

- **Marktentwicklungen und Trends** in der Nutzfahrzeug-Industrie
- **Erfolgsfaktoren** für die Diffusion der unterschiedlichen Technologien zur CO₂-Reduktion
- Wechselwirkungen in der Marktentwicklung alternativer Antriebstechnik („**Chicken-Egg Problem**“)
- **Entscheidungsverhalten** der Akteure auf dem Nutzfahrzeugmarkt

2 12.11.2014
Institut für Entrepreneurship, Technologie-Management & Innovation (EnTechnon)

Die Studie untersucht die Akteure des Nutzfahrzeugmarktes sowie deren Wechselwirkungen untereinander



Studien – Design

Vorgehen

- Dauer: **1h Interview**, persönlich oder per Telefon
- Zeitraum der Befragung: **Anfang April bis Mitte Mai 2014**
- Anonymität: Wir erwarten nicht, dass Sie vertrauliche Informationen mit uns teilen – Darüber hinaus **werden Ihre Aussagen selbstverständlich anonymisiert**

Agenda

- 10 min Einführung in das Forschungsprojekt
- 45 min Diskussion der zentralen Fragen des halbstrukturierten Leitfadens
- 5 min Zusammenfassung und Ausblick

Teilnehmer

- Hersteller von Nutzfahrzeugen (OEM) und Zulieferindustrie
- Politische Entscheidungsträger und Branchenverbände
- Forschungsprojekte und Akteure der Infrastruktur (Tankstellen, Service, ...)

Ihr Nutzen

- **Gerne stellen wir Ihnen unsere Ergebnisse der Studie im 4. Quartal 2014 zur Verfügung**
 - Marktentwicklung und Trends CO₂-sparender Technologien 2025/2030
 - Zusammenfassende Beschreibung der Haupteinflussfaktoren: OEM, Politik, Infrastruktur, Kunden

3 12.11.2014
Institut für Entrepreneurship, Technologie-Management & Innovation (EnTechnon)

264

3) Fragebogen Qualitative Studie

Die Fragebögen der qualitativen Studie zu den Wechselwirkungen der Akteure sind wie in Kapitel 6.3.2.2 besprochen auf die jeweiligen Akteure angepasst worden. Der folgende Aufbau des Leitfadens gab dem Rahmen für die Akteur-spezifischen Leitfäden:

Hintergrund des Interviewpartners

Verankerung in der Situation des Befragten: Offene Frage zur Ermunterung und Einstieg in das Thema

Trends und Treiber des Untersuchungsobjektes

Was sehen Sie derzeit als die wichtigsten Trends und Treiber des NFZ-Marktes im Allgemeinen und Antriebskonzepte für NFZ im Besonderen?

- Treiber: Kunden, Kosten, Gesetz, Image, CSR, Innovativität), gegebene Infrastruktur, Geräuschemissionen
- Was fördert die Marktdurchdringung CO₂-sparender Technologien in NFZ?
- Welche Barrieren hemmen die Marktdurchdringung CO₂-sparender Technologien

Position gegenüber und Information über dem Untersuchungsobjekt

- Wie ist Ihre Vision eines neuen NFZ für das Jahr 2030?
- Wie ist ihre Meinung bzgl. der Thematik der CO₂-Reduktion von schweren NFZ?

Akteure Allgemein und Einfluss

Welche Akteure oder Interessensgruppen auf dem NFZ-Markt haben einen Einfluss auf die Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion von schweren NFZ?

- Neben Endkunden, OEMs, Zulieferer, Politik (bzw. Gesetzgebung) und der Kraftstoffversorgung, sehen Sie noch weitere Akteure signifikanten Einfluss auf die Marktdurchdringung alternativer Antriebskonzepte?
 - Welcher dieser Akteure hat den größten Hebel?
 - Welche Möglichkeiten haben {Aufzählung der genannten Akteure} die Marktdurchdringung zu beeinflussen, was könnten ihre Motive dafür sein?
 - Wie groß schätzen Sie die Bereitschaft {Aufeinanderfolgende Aufzählung der genannten Akteure} in alternative Antriebstechnologien zu investieren?
 - Sind die {Aufeinanderfolgende Aufzählung der genannten Akteure} Ihrer Meinung nach auf einem guten Weg sich für einen Wandel hin zu alternativen Technologien zu rüsten? Sind die Weichen richtig gestellt oder bedarf es Nachbesserungen?
 - Sind Sie der Meinung, dass allen Akteuren am Markt die Bedeutung der CO₂-Reduzierung bewusst ist? Sehen Sie die Akteure entsprechen gut informiert? Falls nicht, welche Maßnahmen planen Sie?

- Welche Möglichkeiten haben {Akteure der Fokusgruppe des Interviewten} die {Aufeinanderfolgende Aufzählung der genannten Akteure} zu beeinflussen, was sind ihre Motive dafür?
- Welche Rolle spielt Europa in der Entwicklung alternativer Antriebskonzepte? Könnten Impulse für Europa auch aus anderen Regionen, bspw. USA oder China kommen?

Potentielle Auswirkungen

- Welche technologischen Maßnahmen zur CO₂-Reduktion von NFZ haben Ihrer Meinung nach; derzeit das größte Marktpotenzial und aus welchen Gründen?
 - Hybrid
 - Abgaswärmenutzung
 - Erdgas
 - Elektromotor
 - Brennstoffzelle
 - Gesamtfahrzeugoptimierung
- Welche Technologien werden hingegen den Markt nicht erfolgreich durchdringen?
- Welches Verbesserungspotenzial sehen Sie noch im konventionellen Dieselmotor?
- Welches Potenzial schreiben Sie alternativen Kraftstoffen in Zukunft zu?

Informationsverarbeitung und Entscheidungsverhalten

- Welche Modelle/Methoden werden bei Ihnen eingesetzt, um die Auswirkungen und Erfolg von Maßnahmen zu beurteilen
- Welche Akteure beeinflussen die Entscheidung in Ihren Gremien insbesondere?

Fokus Politik

- Wie würden Sie die Aufgabe der Politik als Akteur auf dem NFZ-Markt beschreiben?
- Was könnten aus Ihrer Perspektive wirksame Maßnahmen seitens der Politik sein, um die Einführung alternativer Antriebskonzepte zu fördern?
 - Förderstrategien (Technologie- oder Infrastrukturgetrieben):Gibt es staatliche Vergünstigungen wie beispielsweise Steuernachlässe auf alternative Antriebe?
 - Besteuerungsstrategie
 - Festlegung von Grenzwerten
 - Bestehen bestimmte gesetzliche Anforderungen hinsichtlich eines alternativen Antriebes?
- Die EU Kommission erarbeitet derzeit eine CO₂-Gesetzgebung auch für schwere NFZ. Welche Strategien könnten die OEM zur Erreichung der Grenzwerte verfolgen?
 - Wann sehen Sie diese Gesetzgebung kommen?

- Welche Schwerpunkte sehen Sie derzeit bei den OEMs bezüglich CO₂-sparender Technologien?
- Betrachten Sie das zur Verfügung stehende Regelwerk der Politik als ausreichend an oder müssen Anpassungen vorgenommen werden, um eine erfolgreiche Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion von NFZ zu erreichen?

Fokus Automobilindustrie

- Was sind Kriterien oder Treiber, dass zum OEM Antriebstechnologien weiterentwickeln oder neue Konzepte entwickeln?
 - Welche haben einen besonders starken Einfluss?
 - Wird sich das zukünftig verändern?
- Die EU Kommission erarbeitet derzeit eine CO₂-Gesetzgebung auch für schwere NFZ. Welche Strategien könnten die OEM zur Erreichung der Grenzwerte verfolgen?
- Welche Schwerpunkte sehen Sie derzeit bei OEM bzgl. CO₂-sparender Technologien?
- Wie nehmen Sie die Art und Weise wie Entscheidungen über Priorisieren, den Start oder Einstellung von Entwicklungsvorhaben in Automobilindustrie getroffen werden wahr? Was sind die wesentlichen Kriterien für die Entscheidung, welche Ziele stehen dabei im Vordergrund?
- Hat der Einsatz von Fahrzeugmaßnahmen (Leichtbau, Aerodynamik, ...) Einfluss auf die Attraktivität und Entwicklung von neuen Antriebstechnologien (Hybridisierung, WHR, ...) bei den OEMs?
- Wie würden Sie als OEM das anwendungsfallspezifische Modellportfolio auslegen?
- Welche Rolle spielt die Integration der neuen Technologien die bestehenden Plattformkonzepte der OEM?

Fokus Logistiksystem

- Wie zeichnet sich die Distributionslogistik/Logistik für Sie im Allgemeinen und im Besonderen im innerstädtischen Umfeld aus?
- Wie beeinflussen die aktuellen Megatrends wie Globalisierung, Urbanisierung, verkürzte Lebenszyklen, wachsende Umweltsensibilität, Struktur- und Prozessorientierung, usw. die Logistik?
- Welche wesentlichen Veränderungen kommen auf die Logistik im Allgemeinen und im Besonderen auf den städtischen Bereich zu?
- Wie sehen Sie die heutige Marktaufteilung an NFZ im innerstädtischen Umfeld?

- Wie wird sich die Marktaufteilung schwerer NZF verändern, wenn beispielsweise mehr HUBs die Logistiknetze prägen?
- Welche Fahrzeugklassen werden in der Distributionslogistik vorwiegend verwendet? Verändert das Verhältnis von Verteiler- und Fernverkehrs-LKW?

Fokus Endkunde

- Welches sind aus Ihrer Sicht die wesentlichen Kaufentscheidungskriterien bei der Beschaffung neuer NFZ?
 - Rückfragen/Ergänzung: TCO samt Kraftstoffverbrauch und weiteren Betriebskosten, Anschaffungskosten, Leistung/ Drehmoment (rational od. emotional), CO₂-Emissions-Einsparung
- Gibt es ein Bewusstsein für CO₂-Einsparung? Wenn ja, was sind die wichtigsten Treiber (Kunden, Kosten, Gesetze, Image, CSR, Innovativität, usw.)
- Wie läuft der Kaufentscheidungsprozess beispielsweise bei NFZ typischerweise ab? (Entscheidungsträger, eingebundene Akteure, usw.)
- Planen Sie derzeit die Umrüstung oder die Nutzung bestimmter Fahrzeuge auf einen alternativen Antrieb? Wenn ja, welche und warum?
- Welche Vorteile bzw. Einsparpotenziale (Kosten und CO₂) ergeben sich für Sie durch den Betrieb beispielsweise von Gasfahrzeugen oder Hybriden?
- Werden bei Ihnen einzelne Fahrzeug- oder Motormaßnahmen zur CO₂-Reduktion bevorzugt?
- Welche Entfernung legen NZF zwischen den einzelnen Be- und Entladungspunkten zurück? (spezifisch je Segment)
- Wie häufig legen NZF die zuvor beschriebene Entfernung zwischen Be- und Entladungspunkten täglich zurück? (spezifisch je Segment)
- Wie stellen Sie/Endkunden den Service (Reparatur und Wartung) ihrer NFZ sicher?

Fokusgruppe Infrastruktur

- Woher beziehen Anbieter von Logistikdienstleistern in der Regel ihren Kraftstoff? Sind das betriebseigene Tankstellen oder öffentliche Tankstellen?
- Wie bewerten Sie CNG und LNG und worin sehen Sie die größten Unterschiede der beiden Technologien?
- Wie bewerten Sie die derzeitige Tankstellen Verfügbarkeit (mit LKW Eignung!) von CNG in Europa?
- Welche Tankstellendichte muss für CNG/ LNG für eine zufriedenstellende Abdeckung erreicht werden? Bewertung LNG Blue Corridor?

- Wie würden Sie die Strategie ihrer Organisation die Infrastruktur und den Einsatz von CNG/ LNG in schweren NFZ zu fördern beschreiben?
- Welche Auswirkung würde eine disruptive Marktdurchdringung von Gas-LKW (>10%) auf Verfügbarkeit, Liefersicherheit und Preis von Gas in Europa haben?
- Was halten Sie davon, Biogas, Power-to-Gas (Ch4 & H2), etc in das bestehende Gasnetz zur Nutzung in NFZ zu integrieren?
- Können Sie bitte auf das Thema Preisunterschiede und –zusammensetzung von CNG/ LNG eingehen, sowie Ihre Preiserwartungen an CNG/ LNG darstellen?
- Können Sie uns beim Verständnis für die wesentlichen Kenngrößen von CNG/ LNG weiterhelfen? Dabei denken wir u. a. an die Investitionssumme pro Tankstelle je Kapazität (z. B. Betankung oder Speichervolumen), Fahrzeuge pro Tankstelle, Fahrzeuge pro Tag, Marge pro kg, ...).

Rahmendaten Person

- Persönliche Daten Interviewpartner
 - Name
 - Position
 - Erfahrungen NFZ-Markt bzw. Logistik)
- Organisation
 - Aufgabe
 - Projekte
 - Anzahl Mitarbeiter

Anhang V Simulationsmodell

1) Inputparameter

Die Kriterienrelevanz wurde auf Basis der Wichtigkeiten der Bedeutung im Kaufentscheidungsprozess NFZ-betreibender Organisationen festgelegt (vgl. Kapitel 5)

Kriterienrelevanz *erwartete Nützlichkeit*

	Lärm- emission	Nutzlast	Bauraum	Motor- leistung	Image
Fernverkehr	0,5	1	1	1	1
Regionaler Verteiler	1	1	1	1	1
Städtischer Verteiler	2	1	1	1	2
Bauverkehr	1	1	1	1	1
Abfallsammelerkehr	2	1	1	1	2
Stadtbus	3	1	1	1	3
Reisebus	1	1	1	1	1

Kriterienrelevanz *erwartete Anwenderfreundlichkeit*

	Reichweite	Tankstellen Dichte	Zuver- lässigkeit	Service- netz
Fernverkehr	4	3	2	1
Regionaler Verteiler	3	2	1	1
Städtischer Verteiler	2	1	1	1
Bauverkehr	2	2	1	1
Abfallsammelerkehr	1	1	1	1
Stadtbus	2	1	1	1
Reisebus	4	3	1	1

Parametrisierung Basisszenario

Akteur	Parameter	Einheit	Diesel	Erdgas	Elektro (REX)	Technikpakete	Quelle/ Kommentar
Infrastruktur	Erwartete Tankstellendichte	Dmml	-	10%	10%	-	Annahme auf Basis von Experteninterviews
	Marge pro kg[kWh]	€	-	0,05 €	0,03 €	-	Eigene Berechnung, Experteninterviews,
	Investitionskosten	€	-	500.000 €	41.930 €	-	Experteninterviews, Spath et al. (2010)
	TS Kontaktrate	Dmml	-	15	15	-	Janssen (2005), S. 271ff.
	TS Adoptionsrate	%	-	20%	20%	-	Janssen (2005), S. 271ff.
	TS Nutzungsdauer	Jahre	-	15	15	-	Janssen (2005), S. 271ff.
Hersteller	Tankstellen Fixkosten	€/Jahr	-	43.000 €	479 €	-	Janssen (2005), S. 271ff. 50 TCHF (2004) --> 33T€ (2004) --> 43TEUR (2014). Spath et al. (2010)
	Tankstellen Bauzeit	Jahre	-	1	1	-	Janssen (2005), S. 271ff. Experteninterviews
	Markteingeffektivität	%	-	20%	20%	-	Janssen (2005), S. 271ff.
	Standard Marge	Dmml	1	1	1	1	Experteninterviews
Technik	Entwicklungszyklen	Jahre	5	5	5	5	Experteninterviews, Eigene Recherche
	CO ₂ -Emissionen	gCO ₂ /lkg	2650	2480	-	-	Eigene Berechnung
	Servicenetz	0;1	1	0	0	0	Eigene Herleitung
	Lernrate	Dmml	1%	8%	12%	10%	Eigene Berechnung
	Kapitalkostensatz	%		3%			Experteninterviews, Janssen (2005), S. 71ff.
Kunde	Verwender Kontaktrate	%		10% / 5%			Eigene Annahme, Weniger B2B als private
	Risikoaversion Massenmarkt	%		10% - 0%			In Anlehnung an Rogers (2003)
	Markteingeffektivität	%		20%			Janssen (2005), S. 271ff.
	Gewichtungsparameter β	Dmml		1			Entspricht damit der Conjoint-Analyse

Tabelle 11: Parametrisierung Basisszenario

Funktionaler Zusammenhang zwischen Tankstellendichte und Nutzenparameter Tankstelleninfrastruktur

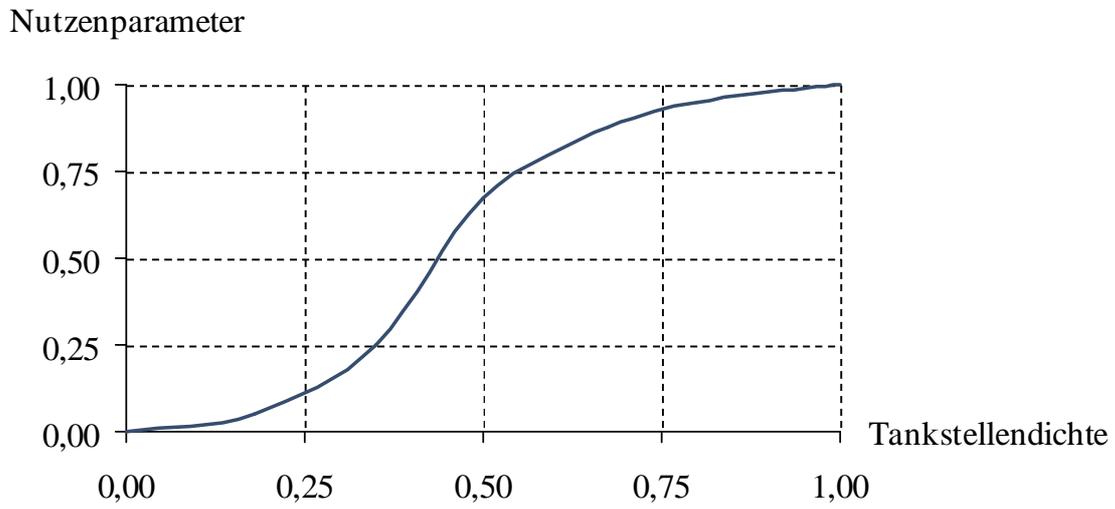


Abbildung 78: Funktionaler Zusammenhang zwischen Tankstellendichte und Nutzenparameter Tankstelleninfrastruktur⁵⁸²

⁵⁸² In Anlehnung an Weigl (2010), S. 95.

2) Ergänzende Modellansichten

Das Simulationsmodell wurde in englischer Sprache entwickelt. Daher sind die ergänzenden Ansichten in der Modellierungssprache dargestellt und nicht übersetzt. Die ergänzenden Modellansichten dienen zur Vervollständigung der in Kapitel 7.2 dargestellten Modellbausteine, da diese z.T. nur schematisch abgebildet sind. Ferner werden systemische Zusammenhänge einiger Modellbausteine ergänzt und eingeordnet.

Herstellerinteressen und Modellverfügbarkeit

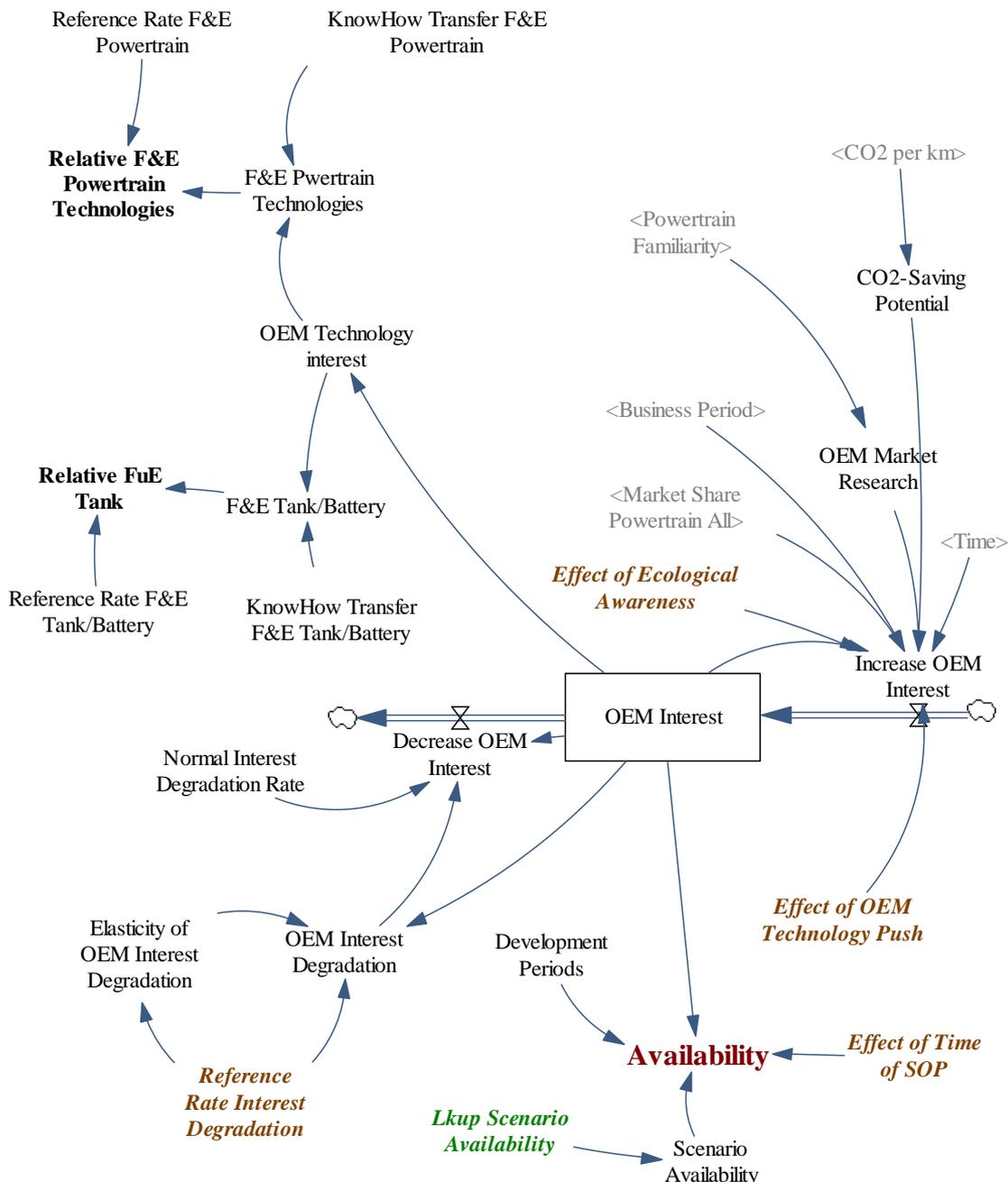


Abbildung 79: Ergänzende Modellansicht zur Berechnung der Modellverfügbarkeit

Anschaffungspreis Technologien

Der Teilnutzenwert Anschaffungspreis (utility price) errechnet sich aus den Komponentenkosten der Technologien sowie der technologiespezifischen Herstellermarge (vgl. Abbildung 51). Die Komponentenkosten ergeben sich analog der Berechnung der LNG-Komponentenkosten für LNG (vgl. Abbildung 52) durch einen initialen Anfangswert im Jahr 2010 sowie der im Modell endogen berechneten Kostendegression auf Basis einer exogen angenommenen Lernrate (vgl. Anhang V 1) Inputparameter):

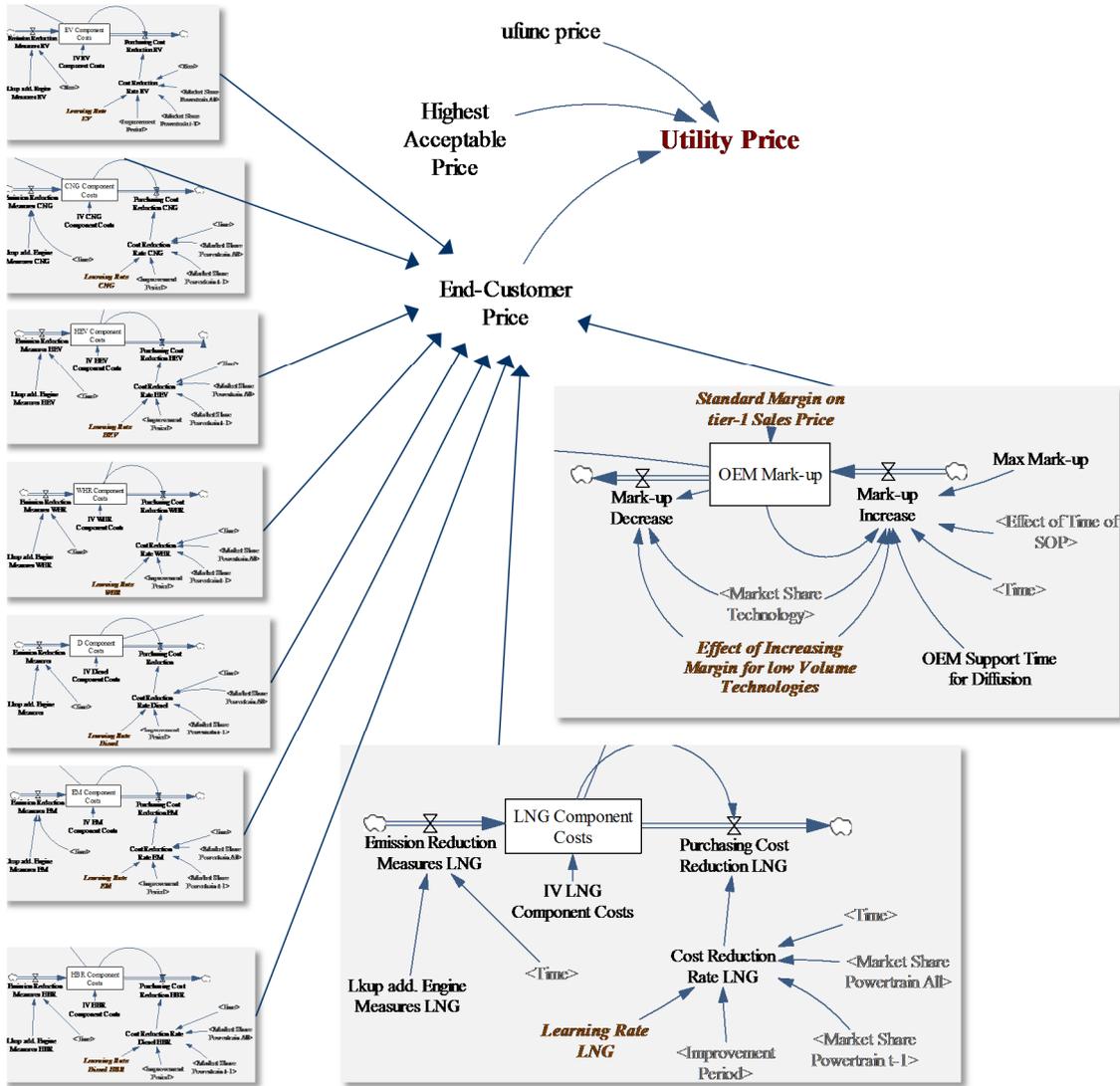


Abbildung 80: Ergänzende Modellansicht Anschaffungspreis

Gesamthafte Betankungsinfrastruktur

Die Modellansichten des logisch-mathematischen Zusammenhangs des Auf- und Abbaus der Betankungsinfrastruktur sind sowohl für städtische Tankstellen als auch Autobahntankstellen identisch implementiert. Einzig die Anwendungsfälle, welche für den Kraftstoffumsatz an den Tankstellen verantwortlich sind, werden entsprechend ihres Fahrprofils städtischen und/oder autobahnnahen Tankstellen zugeordnet (vgl. 7.2.5). Entsprechend der Tankstellenanzahl alternativer Kraftstoffe ergibt sich in Abhängigkeit der erwarteten Tankstellendichte im Vergleich zum konventionellen Dieselantrieb *Required Stations* und der Nutzenfunktion *ufunc Infrastructure* der Nutzenwert der Betankungsinfrastruktur für alternative Antriebstechnologien *Utility Infrastructure*:

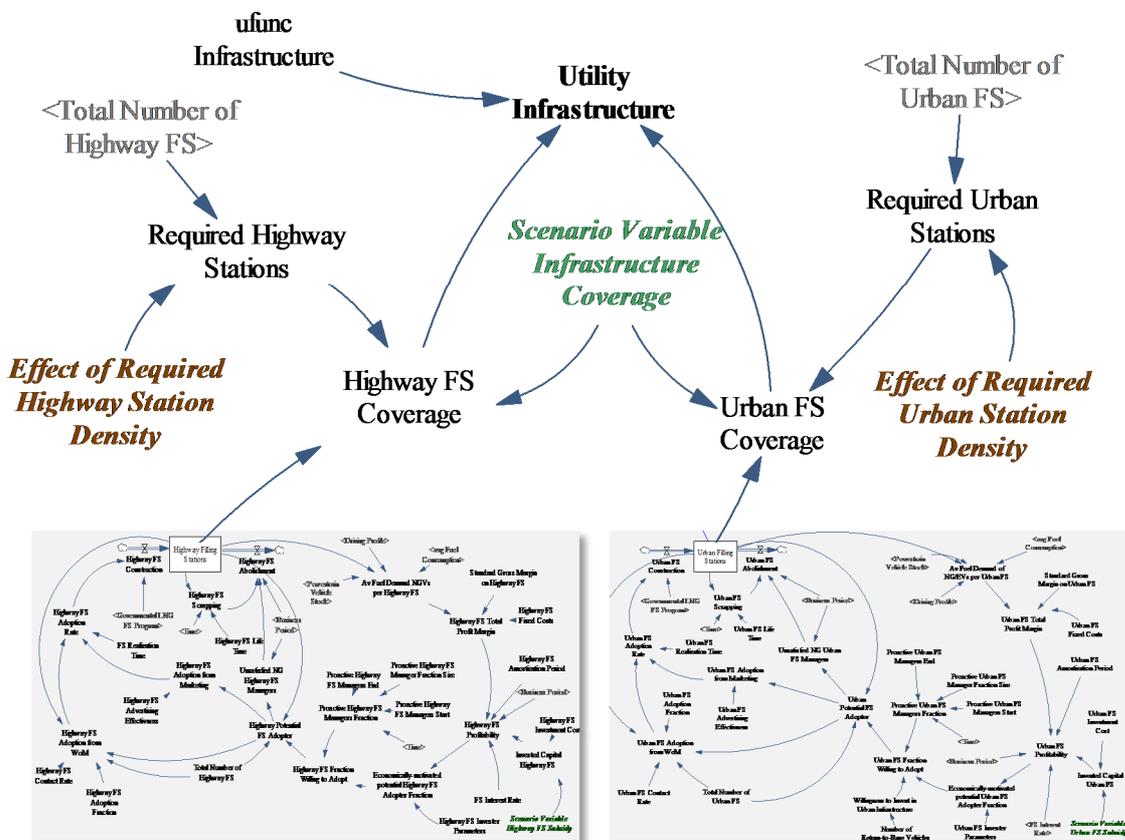


Abbildung 82: Ergänzende Modellansicht zur der gesamthafte Berechnung des Nutzenwertes Betankungsinfrastruktur

CO₂-Regulation

Für die CO₂-Regulierung wurde eine Strafzahlung *CO₂ penalty* entsprechend der Regulierung auf dem PKW-Markt gewählt. Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen in einem Anwendungsfall *CO₂ use case average* werden mit den exogen vorgegebenen CO₂-Grenzwerten verglichen. Ergibt sich ein Überschreiten der durchschnittlichen CO₂-Emissionen werden diejenigen Technikpakete identifiziert, die den Grenzwert überschreiten *Identification of TPs which are exceeding CO₂ targets*. Anhand ihres Beitrags zur Überschreitung *weighted proportion of penalty payment* und den insgesamt fälligen Strafzahlungen *penalty whole fleet* wird die Strafzahlung der individuellen Technikpakete pro Anwendungsfall berechnet. Eine Ausgleichszahlung gegenüber Technikpaketen, die den Grenzwert unterschreiten, erfolgt nicht.⁵⁸³

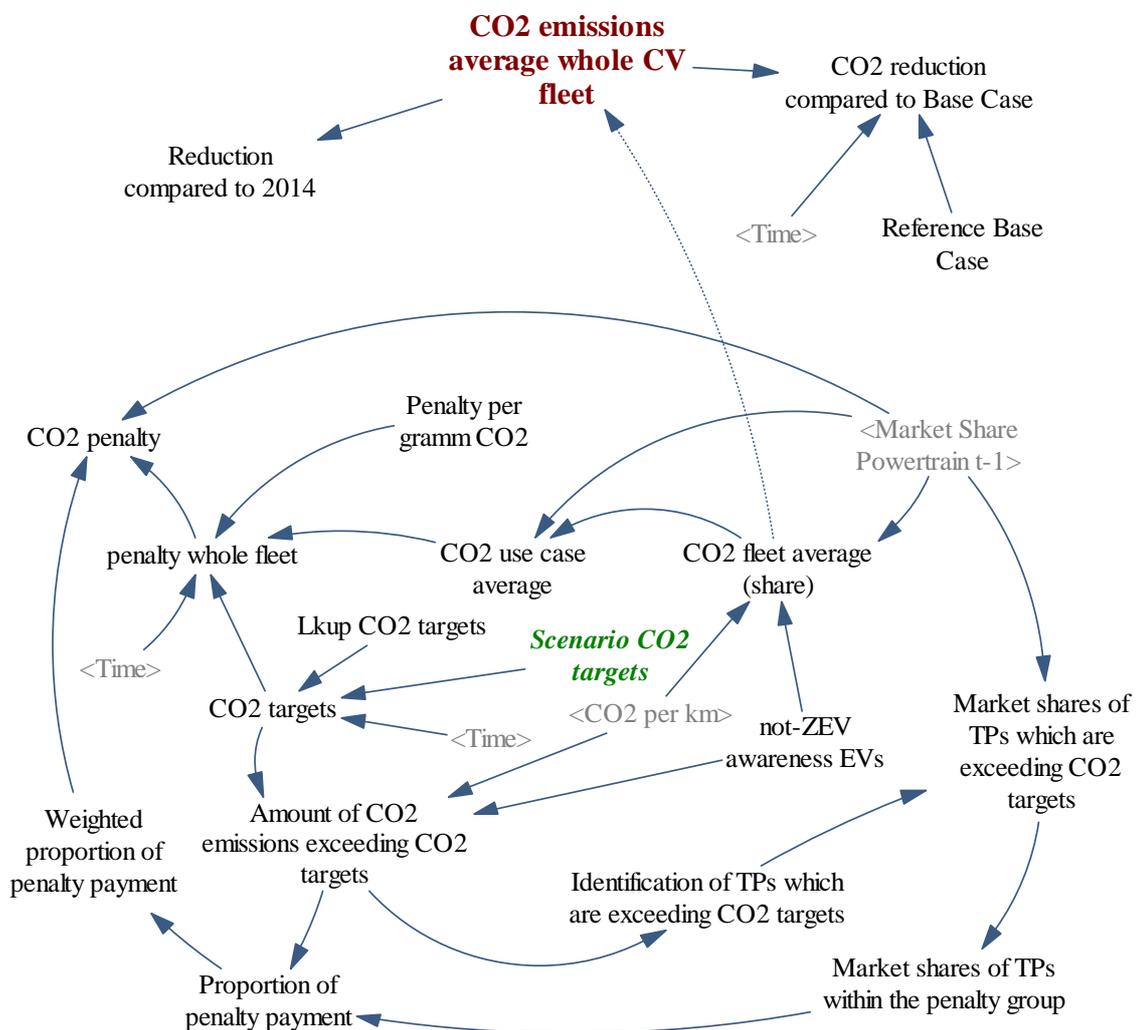


Abbildung 83: Ergänzende Modellansicht zur Berechnung der Strafzahlung aus Überschreitung der CO₂-Grenzwerte

⁵⁸³ Vgl. Seitz (2012), S. 65–66.

Literaturverzeichnis

Aarnink, Sanne et al. (2012): *Market Barriers to Increased Efficiency in the European On-road Freight Sector*. Hg. v. CE Delft. *The International Council on Clean Transportation*. Delft.

Abernathy, William J. (1978): *The productivity dilemma. Roadblock to innovation in the automobile industry*. Baltimore: Hopkins Univ. Press.

ACEA (2010): *Commercial vehicles and CO₂*. ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. Brussels.

Ajzen, Icek (1991): *The theory of planned behavior*. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 50 (2), S. 179–211.

Al-Alawi, Baha M.; Bradley, Thomas H. (2013): *Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling Studies*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21 (0), S. 190–203.

Andersen, Deborah Lines et al. (2012): *The disconfirmatory interview as a strategy for the assessment of system dynamics models*. In: *Syst. Dyn. Rev.* 28 (3), S. 255–275.

Anderson, Philip; Tushman, Michael L. (1990): *Technological Discontinuities and Dominant Designs: A Cyclical Model of Technological Change*. In: *Administrative Science Quarterly* 35 (4), S. 604–633.

Appel, Wolfgang et al. (2013): *Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen Systeme Komponenten*. 7. überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Auer-Srnka, Katharina (2009): *Hypothesen und Vorwissen in der qualitativen Marktforschung*. In: Renate Buber und Hartmut H. Holzmüller (Hg.): *Qualitative Marktforschung. Konzepte – Methoden – Analysen*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Gabler, S. 159–172.

Axelrod, Robert (2001): *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton: Princeton University Press.

Backhaus, Klaus (2003): *Industriegütermarketing*. 7., erw. und überarb. Aufl. München: Vahlen.

Backhaus, Klaus (2008): *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung; [Extras im Web]*. 12., vollst. überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Backhaus, Klaus et al. (2013): *Fortgeschrittene multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. 2., überarb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.

- Baier, Daniel; Bruschi, Michael (2009):** *Konstruktion von Erhebungsdesigns bei der Conjointanalyse*. In: Daniel Baier und Michael Bruschi (Hg.): *Conjointanalyse*: Springer Berlin Heidelberg, S. 73-82.
- Baker, Jeff (2012):** *The Technology–Organization–Environment Framework*. In: Yogesh K. Dwivedi, Michael R. Wade und Scott L. Schneberger (Hg.): *Information Systems Theory*. New York, NY: Springer New York, S. 231–245.
- Balderjahn, Ingo; Peyer, Mathias (2012):** *Soziales Konsumbewusstsein: Skalenentwicklung und -validierung*. In: Hans Corsten und Stefan Roth (Hg.): *Nachhaltigkeit*: Gabler Verlag, S. 93-112.
- Ballis, A.; Golias, J. (2002):** *Comparative evaluation of existing and innovative rail-road freight transport terminals*. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 36 (7), S. 593–611.
- Bandivadekar, Anup (2008a):** *On the road in 2035. Reducing transportation's petroleum consumption and GHG emissions*. 1st ed. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology.
- Bandivadekar, Anup P. (2008b):** *Evaluating the Impact of Advanced Vehicle and Fuel Technologies in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet*. PhD Thesis. MIT, Boston.
- Bänsch, Axel (2002):** *Käuferverhalten*. 9., durchges. und erg. Aufl. München: Oldenbourg.
- Barlas, Yaman (1996):** *Formal aspects of model validity and validation in system dynamics*. In: *Syst. Dyn. Rev.* 12 (3), S. 183–210.
- Basalla, George (1990):** *The evolution of technology*. Reprinted. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bausback, Nadine (2007):** *Positionierung von Business-to-Business-Marken. Konzeption und empirische Analyse zur Rolle von Rationalität und Emotionalität*. Wiesbaden: DUV.
- Beatty, Robert C. et al. (2001):** *Factors influencing corporate web site adoption: a time-based assessment*. In: *Information & Management* 38 (6), S. 337–354.
- Becker, Dieter (2011):** *Competing in the Global Truck Industry. Emerging Markets Spotlight*. Unter Mitarbeit von Willi Diez. KPMG International.
- Ben-Akiva, Moshe; Bierlaire, Michel (1999):** *Discrete Choice Methods and their Applications to Short Term Travel Decisions*. In: Randolph W. Hall (Hg.): *Handbook of Transportation Science*: Springer US, S. 5-33.
- Berekoven, Ludwig et al. (2006):** *Marktforschung. Methodische Grundlagen und praktische Anwendung*. 11., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Gabler.
- Bierlaire, Michel (1998):** *Discrete choice models*. In: M. Labbe, G. Laporte, K. Tanczos und P. Toint (Hg.): *Operations Research and Decision Aid Methodologies in Traffic and Transportation Management*: Springer Verlag, S. 203–227.

- BMVBS (2013):** *Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Energie auf neuen Wegen.* Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Berlin.
- Bogner, Alexander; Littig, Beate; Menz, Wolfgang; Kittel, Bernhard (Hg.) (2009):** *Interviewing experts.* Houndmills: Palgrave Macmillan (Research methods series).
- Bonabeau, E. (2002):** *Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems.* In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99 (Supplement 3), S. 7280–7287.
- Bosshardt, Mathias Markus et al. (2007):** *Developing a diffusion model of competing alternative drive-train technologies (cadt-model).* In: International Conference (Hg.): *Proceedings of the 25th International Conference of the System Dynamics Society and 50th Anniversary Celebration.* July 29-August 2, 2007, Boston. New York N.Y: System Dynamics Society.
- Bosshardt, Mathias Markus (2009):** *Fleet dynamics. Identifying the main micro processes of technological change within the European passenger car fleet.* Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 17984, 2099. Zürich: ETH.
- Bradburn, Norman M. et al. (2004):** *Asking Questions. The Definitive Guide to Questionnaire Design - For Market Research, Political Polls, and Social and Health Questionnaires.* Hoboken: John Wiley & Sons Inc.
- Brassington, Frances; Pettitt, Stephen (2006):** *Principles of marketing.* 4. ed. Harlow: Financial Times/Prentice Hall.
- Brauer, Jesper (2011):** *When will hybrid technologies dominate the heavy-duty vehicle market? Forecasting Using Innovation Diffusion Models.* Master of Science Thesis. KTH, Stockholm.
- Bräuninger, Michael et al. (2007):** *Biokraftstoffe und Nachhaltigkeit: Ziele, Probleme, Instrumente, Lösungen.* HWWI Policy Report.
- Bredel, Eberhard et al. (2011):** *Abwärmenutzung im Antrieb von heute und morgen.* In: *MTZ Motortech Z* 72 (4), S. 308–313.
- Breemersch, Tim; Akkermans, Lars (2014):** *GHG reduction measures for the Road Freight Transport sector. An integrated approach to reducing CO2 emissions from Heavy Goods Vehicles in Europe.* Hg. v. Transport & Mobility Leuven. Leuven.
- Brownstone, David et al. (2000):** *Joint mixed logit models of stated and revealed preferences for alternative-fuel vehicles.* In: *Transportation Research Part B: Methodological* 34 (5), S. 315–338.
- BSR (2014), online:** *Abfallsammelfahrzeug mit Brennstoffzelle.* Hg. v. Berliner Stadtreinigung. Online verfügbar unter <http://www.bsr.de/14056.html>, zuletzt geprüft am 06.11.2014.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2014), online:** *Die Förderprogramme des BMUB im Bereich der Elektromobilität.* Online verfügbar unter <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/foerderprogramm>, zuletzt geprüft am 05.12.2014.

- Clausen, Uwe; Geiger, Christiane (Hg.) (2013):** *Verkehrs- und Transportlogistik*. 2. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (SpringerLink: Bücher).
- Cleff, Thomas (2012):** *Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse. Eine computergestützte Einführung mit Excel PASW (SPSS) und STATA*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Cole, Tim (1999):** *Mercedes-Benz-Lastwagen*. Augsburg: Bechtermünz.
- Corbin, Juliet M.; Strauss, Anselm L. (2008):** *Basics of qualitative research. Techniques and procedures for developing grounded theory*. 3. ed. Los Angeles: Sage Publ.
- Corsten, Hans; Roth, Stefan (2012):** *Nachhaltigkeit als integriertes Konzept*. In: Hans Corsten und Stefan Roth (Hg.): *Nachhaltigkeit*: Gabler Verlag, S. 1-13.
- Dabidian, Peiman; Langkau, Sven (2013):** *Straßengüterverkehr*. In: Uwe Clausen und Christiane Geiger (Hg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*. 2. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 137–160.
- Daimler AG (2000), online:** *Der Lastwagen revolutioniert den Transport*. Online verfügbar unter <http://media.daimler.com/dcmmedia/0-921-657478-49-786904-1-0-0-865349-0-1-11702-614318-0-1-0-0-0-0-0.html?TS=1417952342591>, zuletzt geprüft am 07.12.2014.
- David, D. et al. (2010):** *Factors Influencing the Adoption of Technologies in Developing Countries: An Empirical Study*. In: *Journal of Academy of Business and Economics* 10 (4).
- Davies, Peter J.; Görtz, Günther (2000):** *Lastwagen der Welt. Das Lexikon der Marken und Modelle*. [Stuttgart]: Motorbuch-Verl.
- Davis, Fred D. (1989):** *Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology*. In: *MIS Quarterly* 13 (3), S. 319–340.
- Davis, Fred D. (1993):** *User acceptance of information technology: system characteristics, user perceptions and behavioral impacts*. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 38 (3), S. 475–487.
- den Boer, Eelco et al. (2013):** *Zero emissions trucks. An overview of state-of-the-art technologies and their potential*. Hg. v. CE Delft. *The International Council for Clean Transportation (ICCT)*. Delft.
- Deutscher Bundestag (2014):** *Entwurf eines Zweiten Gesetzes zur Änderung des Bundesfernstraßenmautgesetzes* 18. Wahlperiode (0722-8333). Online verfügbar unter <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/024/1802444.pdf>.
- Die Bundesregierung (2009):** *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung*.
- Dietsche, Karl-Heinz (Hg.) (2007):** *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. [Kfz-Fachwissen kompakt]*. Robert Bosch GmbH. 26., überarb. und erg. Aufl. Wiesbaden: Vieweg (Studium und Praxis).

- Diez, Willi; Krauss, Hans Dieter (2006):** *Die europäische Nutzfahrzeugindustrie im Zeichen der Industrialisierung.* Institut für Automobilwirtschaft; KPMG International.
- Dörner, Dietrich (2009):** *Die Logik des Misslingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen.* 8. Aufl. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- Dresel, Dieter (2014):** *Ursachen und Erfolgswirkung der Interaktionsstrukturen in Unternehmenskooperationen. Eine Untersuchung am Beispiel internationaler Forschungs- und Entwicklungskooperationen.* Univ., Diss.--Bamberg, 2014. Bamberg: Univ. of Bamberg Press.
- Dressler, Norbert et al. (2012):** *Truck Transportation 2030. Impacting the commercial vehicle industry.* Roland Berger Strategy Consultants.
- Drumwright, Minette E. (1994):** *Socially Responsible Organizational Buying: Environmental Concern as a Noneconomic Buying Criterion.* In: *Journal of Marketing* 58 (3), S. 1.
- Duleep, Gopalakrishnan et al. (2011):** *Impacts of Electric Vehicles. Assessment of electric vehicle and battery technology. Deliverable 2.* Hg. v. CE Delft. CE Delft. Delft.
- Edwards, R. et al. (2011):** *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power trains in the European context. Report version 3c and Appendix 1, July 2011.* Luxembourg: Publications Office.
- E-FORCE ONE AG (2014), online:** *E-FORCE – Der bessere Lastwagen. Leistungsdaten.* Hg. v. E-FORCE ONE AG. Online verfügbar unter <http://eforce.ch/eforce/leistungsdaten/>, zuletzt geprüft am 01.11.2014.
- Ehniß, Roland (2013):** *Innovationen im Nutzfahrzeug. Visionen, Chancen und Herausforderungen.* Technologieführer der Automobilindustrie stellen sich vor. Universität Stuttgart. Stuttgart, 2013.
- Elias, Arun Abraham (2012):** *A system dynamics model for stakeholder analysis in environmental conflicts.* In: *Journal of Environmental Planning and Management* 55 (3), S. 387–406.
- Ellis, Nick (2011):** *Business-to-business marketing. Relationships networks & strategies.* Oxford: Oxford Univ. Press.
- Enders, Craig K. (2010):** *Applied missing data analysis.* New York: Guilford Press.
- Eppstein, Margaret J. et al. (2011):** *An agent-based model to study market penetration of plug-in hybrid electric vehicles.* In: *Energy Policy* 39 (6), S. 3789–3802.
- erdgas mobil (2014), online:** *IVECO Stralis LNG.* Hg. v. erdgas mobil. Online verfügbar unter <http://www.erdgas-mobil.de/flottenkunden/vielseitig/iveco-stralis-lng/>, zuletzt geprüft am 07.11.2014.
- Europäische Kommission (2005):** *Richtlinie über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus Selbstzündungsmotoren zum Antrieb.* 2005/55/EC.

Europäische Kommission (2010): *EU energy trends to 2030. Update 2009.* Luxembourg.

Europäische Kommission (2011a): *Bericht über die Durchführung der Richtlinie über Umgebungslärm.* Hg. v. Europäische Kommission. Europäische Kommission. Brüssel.

Europäische Kommission (2011b): *Richtlinie über die Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch schwere Nutzfahrzeuge.* 2011/76/EU.

Europäische Kommission (2011c): *White Paper. Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system.* Europäische Kommission. Brussels.

Europäische Kommission (2012): *EU transport in figures.* Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Europäische Kommission (2013): *Saubere Energie für den Verkehr: Eine europäische Strategie für alternative Kraftstoffe.* Hg. v. Europäische Kommission. Europäische Kommission. Brüssel.

Europäische Kommission (2014a), online: *Green Public Procurement.* Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/environment/gpp/index_en.htm, zuletzt geprüft am 22.11.2014.

Europäische Kommission (2014b), online: *Reducing emissions from transport.* Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/index_en.htm, zuletzt geprüft am 22.11.2014.

Europäische Kommission (2014c), online: *Road transport: Reducing CO2 emissions from vehicles.* Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/index_en.htm, zuletzt geprüft am 22.11.2014.

Europäische Kommission (2014): *Strategy for reducing Heavy-Duty Vehicles' fuel consumption and CO2 emissions.* Europäische Kommission. Brussels.

European Environment Agency (2013): *Monitoring CO2 emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2012.* Copenhagen.

Eurostat (2014): *Passenger transport statistics. Data from October 2014.* Hg. v. European Commission. European Commission.

Fawcett, P. et al. (1992): *Logistics management.* London: Financial Times; Pitman.

Fedorov, V. V. (1972): *Theory Of Optimal Experiments.* Oxford: Elsevier Science.

FHWA (2012): *Freight Facts and Figures 2012.* Hg. v. U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration. Washington.

Fink, Alexander; Siebe, Andreas (2006): *Handbuch Zukunftsmanagement. Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung.* Frankfurt: Campus-Verl.

- Flaig, Florian (2012), online:** *Neue Nutzfahrzeugtechnologien von Bosch. Hybridantriebe für Nutzfahrzeuge. Umweltfreundlich und geringere Betriebskosten.* Hg. v. Robert Bosch GmbH. Stuttgart. Online verfügbar unter <http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=5767>, zuletzt geprüft am 07.11.2014.
- Forrester, Jay W. (1985):** “The” model versus a modeling “process”. In: *Syst. Dyn. Rev.* 1 (1), S. 133–134.
- Forrester, Jay W. (1992):** *Policies, decisions and information sources for modeling.* In: *European Journal of Operational Research* 59 (1), S. 42–63.
- Frambach, Ruud T.; Schillewaert, Niels (2002):** *Organizational innovation adoption: a multi-level framework of determinants and opportunities for future research.* In: *Marketing Theory in the Next Millennium* 55 (2), S. 163–176.
- Freeman, R. Edward (2010):** *Strategic management. A stakeholder approach.* Reissue. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Fritz, Alexander et al. (2013):** *Daten zur Automobilwirtschaft. Ausgabe 2013.* Hg. v. VDA. Berlin.
- Garcia, Rosanna (2005):** *Uses of Agent-Based Modeling in Innovation/New Product Development Research.* In: *J Product Innovation Man* 22 (5), S. 380–398.
- Gausemeier, Juergen et al. (1998):** *Scenario Management.* In: *Technological Forecasting and Social Change* 59 (2), S. 111–130.
- Gausemeier, Jürgen et al. (1996):** *Szenario-Management. Planen und Führen mit Szenarien.* 2., bearb. Aufl. München: Hanser.
- Geitmann, Sven (2008):** *Alternative Kraftstoffe. Womit fahre ich am besten? ; Erdgas & Flüssiggas, Biodiesel & Pflanzenöl, Ethanol & Wasserstoff ; Sachbuch ; mit 34 Tab.* Oberkrämer: Hydrogeit-Verl.
- Gensler, Sonja (2006):** *Ermittlung von Präferenzen für Produkteigenschaften mit Hilfe der Choice-Based Conjoint Analyse, Teil I.* In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 35 (5), S. 254.
- Glaser, Barney G. et al. (2008):** *Grounded theory. Strategien qualitativer Forschung.* 1. Nachdr. der 2., korrigierten Aufl. Bern: Huber.
- Gläser, Jochen; Laudel, Grit (2010):** *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse. Als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen.* 4. Aufl. Wiesbaden: VS Verl. für Sozialwiss.
- Gleißner, Harald; Femerling, J. Christian (2008):** *Logistik. Grundlagen — Übungen — Fallbeispiele.* Wiesbaden: Gabler.
- Godefroid, Peter; Pförtsch, Waldemar A. (2008):** *Business-to-Business-Marketing.* 4., überarb. u. erw. Aufl. Ludwigshafen am Rhein: Kiehl.

- Golob, Thomas F. et al. (1997):** *Commercial fleet demand for alternative-fuel vehicles in California*. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 31 (3), S. 219–233.
- Gramm, Jörg et al. (2012):** *Winning in Europe. Truck strategies for the next decade: lessons from our customer loyalty study*. Hg. v. Bain & Company. Bain & Company. München.
- Grewal, Dhruv et al. (1998):** *The Effects of Price-Comparison Advertising on Buyers' Perceptions of Acquisition Value, Transaction Value, and Behavioral Intentions*. In: *Journal of Marketing* 62 (2), S. 46–59.
- Griffin, Abbie; Hauser, John R. (1993):** *The Voice of the Customer*. In: *Marketing Science* 12 (1), S. 1–27.
- Hackbarth, André; Madlener, Reinhard (2013):** *Consumer preferences for alternative fuel vehicles: A discrete choice analysis*. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 25, S. 5–17.
- Hansen, David E. (2004):** *Assessing Industrial Buyer Preferences: Using the Swait-Louviere Test to Test the Key Informant Assumption*. In: *Market Lett* 15 (4), S. 223-236.
- Hawranek, Florian (2004):** *Schnittstellenmanagement bei M & A-Transaktionen*. Zugl.: Jena, Univ., Diss., 2003.
- Hekkert, Marko; den Hoed, Robert van (2004):** *Competing Technologies and the Struggle towards a New Dominant Design*. In: *Greener Management International* 2004 (47), S. 28–43.
- Hensher, David A. et al. (2010):** *Applied choice analysis. A primer*. Transferred to digital printing. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Heuser, Peter et al. (2014):** *Gas für Nutzfahrzeugmotoren – Potenzial zur Reduktion der CO₂-Emissionen*. In: Johannes Liebl (Hg.): *Internationaler Motorenkongress 2014*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 381–401.
- Hill, Nikolas et al. (2011):** *Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles. Lot 1: Strategy. Final Report to the European Commission - DG Climate Action*. AEA.
- Hillig, Thomas (2006):** *Verfahrensvarianten der Conjoint-Analyse zur Prognose von Kaufentscheidungen. Eine Monte-Carlo-Simulation*. Wiesbaden: DUV.
- Hippel, Eric von (1986):** *Lead users: a source of novel product concepts*. In: *Management Science* 32 (7), S. 791–805.
- Hofer, Markus B. (2003):** *Marktsimulation und Absatzprognose in der Automobilindustrie*. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2002.
- Homburg, C.; Dobratz, A. (1998):** *Iterative Modellselektion in der Kausalanalyse*. In: Lutz Hildebrandt (Hg.): *Die Kausalanalyse. Ein Instrument der empirischen betriebswirtschaftlichen Forschung*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Hungenberg, Harald (2014): *Strategisches Management in Unternehmen. Ziele - Prozesse - Verfahren*. 8. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Gabler.

Huss, Wolfgang; Schenk, Wolf (1982): *Omnibusgeschichte*. München: Huss.

Ihde, Gösta B. (2001): *Transport, Verkehr, Logistik. Gesamtwirtschaftliche Aspekte und einzelwirtschaftliche Handhabung*. 3., völlig überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen.

International Energy Agency (2012): *World energy outlook 2012*. Paris: OECD/IEA.

Jamshidian, Mortaza (2004): *Previous Entry Next Entry Strategies for Analysis of Incomplete Data*. In: Melissa Hardy und Alan Bryman (Hg.): *Handbook of Data Analysis*. 1 Oliver's Yard, 55 City Road, London England EC1Y 1SP United Kingdom: SAGE Publications, Ltd, S. 113–130.

Janssen, Arthur (2005): *Modeling the Market Penetration of Passenger Cars with New Drive-train Technologies*. Dissertation. ETH, Zürich.

Janssen, Arthur et al. (2006): *Model aided policy development for the market penetration of natural gas vehicles in Switzerland*. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 40 (4), S. 316–333.

Jansson, Johan et al. (2010): *Green consumer behavior: determinants of curtailment and eco-innovation adoption*. In: *Journal of Consumer Marketing* 27 (4), S. 358–370.

Jarvenpaa, Sirkka L. et al. (1999): *Consumer Trust in an Internet Store: A Cross-Cultural Validation*. In: *Journal of Computer-Mediated Communication* 5 (2), S. 0.

Johnston, Wesley J.; Lewin, Jeffrey E. (1996): *Organizational buying behavior: Toward an integrative framework*. In: *Journal of Business Research* 35 (1), S. 1–15.

Kapmeier, Florian (1999): *Vom systemischen Denken zur Methode System Dynamics*. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart.

Keith, David Ross (2012): *Essays on the Dynamics of Alternative Fuel Vehicle Adoption. Insights from the Market for Hybrid-Electric Vehicles in the United States*. PhD Thesis. MIT, Boston.

Keles, Dogan et al. (2008): *Market penetration of fuel cell vehicles – Analysis based on agent behaviour*. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (16), S. 4444–4455.

Kelp, Romed; Stolz, Lars (2011): *European Truck Customer 2010. Customer expectations in the commercial vehicle industry*. Oliver Wyman.

Kieckhäfer, Karsten et al. (2012): *Model-based decision support for future OEM power-train portfolios. academic solutions for practical requirements*. In: Elke Husemann und David Lane (Hg.): *Proceedings of the 30th international conference of the System Dynamics Society*. July 22 - 26, 2011, St. Gallen, Switzerland. Albany, NY: System Dynamics Society.

- Kiesel, Jochen (2001):** *Szenario-Management als Instrument zur Geschäftsfeldplanung*. Marburg: Tectum-Verl.
- Kim, Hyunjung; Andersen, David F. (2012):** *Building confidence in causal maps generated from purposive text data: mapping transcripts of the Federal Reserve*. In: *Syst. Dyn. Rev.* 28 (4), S. 311–328.
- Kliffken, Markus G. et al. (2009):** *Kosten bremsen und Umwelt schonen mit hydraulischem Hybridantrieb*. In: *ATZ Offhighway* 2 (1), S. 36–46.
- Klink, Görtz et al. (2010):** *Nutzfahrzeuge werden grün*. A.T. Kearney GmbH. Düsseldorf.
- König, Johann-Günther (2010):** *Die Geschichte des Automobils*. Stuttgart: Reclam.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2012):** *Fahrzeugzulassungen. Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kfz-Anhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten)*. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2014):** *Methodische Erläuterungen zu Statistiken über Fahrzeugzulassungen*. Flensburg.
- Kranke, Andre (2010), online:** *Meyer & Meyer lässt zwei Elektro-LKW bauen*. Hg. v. Verkehrsrundschau. Online verfügbar unter <http://www.verkehrsrundschau.de/meyer-meyer-laesst-zwei-elektro-lkw-bauen-987973.html>, zuletzt geprüft am 06.11.2014.
- Kranke, Andre (2014), online:** *Elektro-LKW mit Kühlung versorgen Filialen von Lidl und Rewe*. Hg. v. Verkehrsrundschau. Online verfügbar unter <http://www.verkehrsrundschau.de/elektro-lkw-mit-kuehlung-versorgen-filialen-von-lidl-und-rewe-1552397.html>, zuletzt geprüft am 07.11.2014.
- Kreyenberg, Danny et al. (2013):** *Bewertung des Kundennutzens von Elektrofahrzeugen*. In: *ATZ Automobiltech* Z 115 (1), S. 42-47.
- Krix, Pia (2014), online:** *Koalition für Wasserstoff. Daimler und Linde erweitern das Tankstellennetz*. Hg. v. Automobilwoche. Online verfügbar unter <http://www.automobilwoche.de/article/20141008/NACHRICHTEN/141009924/1276/koalition-fur-wasserstoff-daimler-und-linde-erweitern-das-tankstellennetz#.VGli72-wXVq>, zuletzt geprüft am 07.11.2014.
- Kummer, Sebastian; Grün, Oskar (2006):** *Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik*. München: Pearson Studium.
- Kurz, Andrea et al. (2009):** *Das problemzentrierte Interview*. In: Renate Buber und Hartmut H. Holzmüller (Hg.): *Qualitative Marktforschung. Konzepte – Methoden – Analysen*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Gabler, S. 465–476.
- Lane, Ben; Potter, Stephen (2007):** *The adoption of cleaner vehicles in the UK: exploring the consumer attitude–action gap*. In: *Journal of Cleaner Production* 15 (11-12), S. 1085–1092.

- Law, Karen et al. (2011):** *European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles*. TIAx. Cupertino.
- Lenz, Barbara et al. (2010):** *Shell Lkw-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030*. Hg. v. Shell Deutschland Oil GmbH. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Shell Deutschland, Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut (HWWI). Hamburg/Berlin.
- Léonardi, Jacques; Baumgartner, Michael (2004):** *CO₂ efficiency in road freight transportation: Status quo, measures and potential*. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 9 (6), S. 451–464.
- Liebert, Michael (2001):** *Methodische Entscheidungsunterstützung in der strategischen Marketingplanung. Ein systemdynamischer Ansatz am Beispiel der Automobilindustrie*. Zugl.: Eichstätt, Kath. Univ., Diss., 2001. Lohmar, Köln: Eul.
- Liimatainen, Heikki et al. (2012):** *Energy efficiency practices among road freight hauliers*. In: *Energy Policy* 50 (0), S. 833–842.
- Liimatainen, Heikki et al. (2013):** *Energy efficiency of road freight hauliers—A Nordic comparison*. In: *Energy Policy*.
- Liimatainen, Heikki et al. (2014):** *Decarbonizing road freight in the future — Detailed scenarios of the carbon emissions of Finnish road freight transport in 2030 using a Delphi method approach*. In: *Technological Forecasting and Social Change* 81, S. 177–191.
- Liimatainen, Heikki; Pöllänen, Markus (2010):** *Trends of energy efficiency in Finnish road freight transport 1995–2009 and forecast to 2016*. In: *Special Section: Carbon Reduction at Community Scale* 38 (12), S. 7676–7686.
- Lindholm, Maria (2013):** *Urban freight transport from a local authority perspective – a literature review*. In: *European Transport \ Trasporti Europei* (54).
- Luz, Raphael et al. (2014):** *Development and validation of a methodology for monitoring and certification of greenhouse gas emissions from heavy duty vehicles through vehicle simulation*. Hg. v. TU Graz. TU Graz; TÜV Nord; TNO. Graz.
- Mariotti, Ilaria (2015):** *Transport and Logistics in a Globalizing World. A Focus on Italy*. Cham, s.l.: Springer International Publishing.
- Martini, Florian (2012), online:** *Das Beste aus zwei Welten. Das Energie Puzzle. Elektro-LKW*. Hg. v. Siemens AG. Online verfügbar unter http://www.siemens.com/innovation/apps/pof_microsite/_pof-fall-2012/_html_de/elektro-lkw.html, zuletzt geprüft am 01.11.2014.
- Mayring, Philipp (2010):** *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. 11., aktual. und überarb. Aufl. Weinheim, Basel: Beltz.

- Mayring, Philipp; Brunner, Eva (2009):** *Qualitative Inhaltsanalyse*. In: Renate Buber und Hartmut H. Holzmüller (Hg.): *Qualitative Marktforschung. Konzepte – Methoden – Analysen*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Gabler, S. 669–680.
- Midler, Christophe; Beaume, Romain (2010):** *Project-based learning patterns for dominant design renewal: The case of Electric Vehicle*. In: *International Journal of Project Management* 28 (2), S. 142–150.
- Mietzner, Dana (2009):** *Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen. Methodenevaluation und neue Ansätze*. Wiesbaden: Gabler.
- Miller, Alan J.; Nguyen, Nam-Ky (1994):** *Algorithm AS 295: A Fedorov exchange algorithm for D-optimal design*. In: *Applied Statistics*, S. 669–677.
- Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden Württemberg (2014), online:** *Landeszuschuss für umweltfreundliche Elektro- und Hybridbusse*. Online verfügbar unter <http://mvi.baden-wuerttemberg.de/de/ministerium/presse/pressemitteilung/pid/landeszuschuss-fuer-umweltfreundliche-elektro-und-hybridbusse-1/>, zuletzt geprüft am 11.12.2014.
- Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (2010):** *Criteria for the Sustainable Public Procurement of Heavy-Duty Motor Vehicles*. Hg. v. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. The Hague.
- Mock, Peter (2010):** *Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO2-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Mohr, Jakki J. et al. (2010):** *Marketing of high-technology products and innovations*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Moore, Geoffrey A. (2006):** *Crossing the chasm. Marketing and selling disruptive products to mainstream customers*. rev. ed., first Collins business essentials ed. New York: HarperCollins Publ.
- Morrison, Pamela D. et al. (2004):** *The nature of lead users and measurement of leading edge status*. In: *Research Policy* 33 (2), S. 351–362.
- Mruck, Katja; Mey, Günter (2009):** *Der Beitrag qualitativer Methodologie und Methodik zur Marktforschung*. In: Renate Buber und Hartmut H. Holzmüller (Hg.): *Qualitative Marktforschung. Konzepte – Methoden – Analysen*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Gabler, S. 37–60.
- Mueller, Michel G.; Haan, Peter de (2009):** *How much do incentives affect car purchase? Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars—Part I: Model structure, simulation of bounded rationality, and model validation*. In: *Energy Policy* 37 (3), S. 1072–1082.
- Müller, Jan Dietrich (Hg.) (2010):** *Delivering tomorrow*. 1. Aufl. Bonn: Dt. Post, Konzernzentrale.

- Muñuzuri, Jesús et al. (2005):** *Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement.* In: *Cities* 22 (1), S. 15–28.
- Naunin, Dietrich (2007):** *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. Technik Strukturen und Entwicklungen.* 4. Aufl. Renningen: expert-Verl.
- Nemet, Gregory F. (2006):** *Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics.* In: *Energy Policy* 34 (17), S. 3218–3232.
- Noland, R. B.; Wadud, Z. (2009):** *Review of Oil Demand Restraint Policies for Heavy-goods Vehicles.* In: *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy* 4 (1), S. 84–99.
- Nunnally, Jum C.; Bernstein, Ira H. (2008):** *Psychometric theory.* 3. ed., [Nachdr.]. New York, NY: McGraw-Hill.
- Oberst, Thomas (2014), online:** *Weltweit 17 neue Wasserstoff-Tankstellen im Jahr 2014.* Hg. v. TÜV Süd. Online verfügbar unter <http://tuev-sued-konzern/presse/pressearchiv/weltweit-17-neue-wasserstoff-tankstellen-im-jahr-2014>, zuletzt geprüft am 19.07.2015.
- Oliveira, T.; Martins, M, F. (2011):** *Literature Review of Information Technology Adoption Models at Firm Level.* In: *The Electronic Journal Information Systems Evaluation* 14 (1), S. 110–121.
- Ostrom, Elinor (2007):** *Institutional Rational Choice: An Assessment of the Institutional Analysis and Development Framework.* In: Paul A. Sabatier (Hg.): *Theories of the policy process.* Boulder, Colo.: Westview Press, S. 21–64.
- Ostrom, Elinor (2011):** *Background on the Institutional Analysis and Development Framework.* In: *Policy Studies Journal* 39 (1), S. 7–27.
- Paier, Dietmar (2010):** *Quantitative Sozialforschung. Eine Einführung.* 1. Aufl. Wien: facultas.
- Park, Sang Yong et al. (2011):** *Development of a market penetration forecasting model for Hydrogen Fuel Cell Vehicles considering infrastructure and cost reduction effects.* In: *Energy Policy* 39 (6), S. 3307–3315.
- Patterson, Paul G.; Spreng, Richard A. (1997):** *Modelling the relationship between perceived value, satisfaction and repurchase intentions in a business-to-business, services context: an empirical examination.* In: *International Journal of Service Industry Management* 8 (5), S. 414–434.
- Pfetzling, Karl; Rohde, Adolf (2009):** *Ganzheitliches Projektmanagement.* 3., bearb. Aufl. Gießen: Götz Schmidt.
- Pfohl, Hans-Christian (2004):** *Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen.* 7., korr. und aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Piecyk, Maja I.; McKinnon, Alan C. (2010):** *Forecasting the carbon footprint of road freight transport in 2020.* In: *Integrating the Global Supply Chain* 128 (1), S. 31–42.

- Plötz, Patrick et al. (2014):** *Who will buy electric vehicles? Identifying early adopters in Germany.* In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 67, S. 96–109.
- Porter, Michael E. (1999):** *Wettbewerbsvorteile. Spitzenleistungen erreichen und behaupten.* 5., durchges. u. erw. Aufl. Frankfurt: Campus-Verl.
- Rees, Jürgen (2010), online:** *Wasserstoffautos. Brennstoffzelle reloaded.* Hg. v. Wirtschaftswoche. Online verfügbar unter <http://www.wiwo.de/technologie/auto/wasserstoffautos-brennstoffzelle-reloaded-seite-all/5666152-all.html>, zuletzt geprüft am 07.12.2014.
- Reiger, Horst (2009):** *Symbolischer Interaktionismus.* In: Renate Buber und Hartmut H. Holzmüller (Hg.): *Qualitative Marktforschung. Konzepte – Methoden – Analysen.* 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Gabler, S. 139–157.
- Robert Bosch GmbH (2014), online:** *Waste-Heat-Recovery-System (WHR-System) für Nutzfahrzeuge.* Hg. v. Robert Bosch GmbH. Stuttgart. Online verfügbar unter http://www.bosch-mobility-solutions.de/media/ubk_europe/db_application/downloads/pdf/antrieb/de_5/DS_Sheet_WHR-System_fuer_Nutzfahrzeuge_20120712.pdf, zuletzt geprüft am 06.11.2014.
- Rogers, Everett M. (2003):** *Diffusion of innovations.* 5. Aufl. New York, NY: Free Press.
- Runia, Peter (2007):** *Marketing. Eine prozess- und praxisorientierte Einführung.* 2., überarb. und erw. Aufl. München, Wien: Oldenbourg.
- Russo, Francesco; Comi, Antonio (2011):** *Measures for Sustainable Freight Transportation at Urban Scale: Expected Goals and Tested Results in Europe.* In: *J. Urban Plann. Dev.* 137 (2), S. 142–152.
- Santa-Eulalia, Luis Antonio et al. (2011):** *A Simulation-Based Innovation Forecasting Approach Combining the Bass Diffusion Model, the Discrete Choice Model and System Dynamics.* In: IARIA (Hg.): *The Third International Conference on Advances in System Simulation.* Barcelona.
- Schewe, Gerhard; Liesenkötter, Bernd (2014):** *Der Schumpeter'sche Unternehmer gefangen in Pfadabhängigkeiten: Eine Analyse der E-Mobility.* In: Carsten Schultz und Katharina Hölzle (Hg.): *Motoren der Innovation.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 23–37.
- Schneider, Maik et al. (2003):** *Innovation Process 'Fuel Cell Vehicle': What Strategy Promises To Be Most Successful?* 9th International Conference. *The Society of Computational Economics Computing in Economics and Finance.* Seattle, 2003. Online verfügbar unter <http://depts.washington.edu/sce2003/Papers/166.pdf>.
- Schnell, Rainer et al. (2013):** *Methoden der empirischen Sozialforschung.* 10., überarb. Aufl. München: Oldenbourg.
- Schöffmann, Wolfgang et al. (2014):** *Kraftstoffeffizienz als Herausforderung zukünftiger Nutzfahrzeugantriebe.* In: Johannes Liebl (Hg.): *Internationaler Motorenkongress 2014.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 639–655.

- Scholze-Stubenrecht, Werner** (Hg.) (2013): *Duden - die deutsche Rechtschreibung. [das umfassende Standardwerk] auf der Grundlage der aktuellen amtlichen Rechtschreibregeln. Bibliographisches Institut. 26., völlig neu bearb. und erw. Aufl.* Berlin: Dudenverl (Der Duden).
- Schreier, Heimo; Walter, Lukas** (2013): *Future Commercial Vehicle Powertrains: Contributions to Sustainable Transportation*. In: Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress: Springer Berlin Heidelberg, S. 987-997.
- Schwenke, Philip** (2013), online: *AutoScout24 Trucks-Konjunkturbarometer. 1. Halbjahr 2013*. Unter Mitarbeit von puls. Hg. v. AutoScout24. Online verfügbar unter http://ww2.autoscout24.de/au-press-old/2013_as24_studie_konjunkturbarometer-trucks.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2014.
- Schwoon, Malte** (2006): *Simulating the adoption of fuel cell vehicles*. In: *J Evol Econ* 16 (4), S. 435–472.
- Sechtin, Robert** (2012): *Emotional differentiation for influencing purchase decisions in industrial markets*. Universität Stuttgart, Holzgartenstr. 16, 70174 Stuttgart.
- Seitz, Claudio** (2012): *Konventionelle und Alternative Antriebe auf dem zukünftigen PKW-Markt. Fahrzeugmarktprognose für Deutschland mit System Dynamics. Diplomarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe*.
- Seitz, Claudio** (2014): *Conceptual Causal Framework for the Diffusion of Emerging CO2-saving Technologies in Heavy Commercial Vehicles. Open Access at KIT*. Hg. v. KIT. Karlsruhe.
- Seitz, Claudio et al.** (2015): *Organizational Adoption Behavior of CO2-saving Power Train Technologies: An Empirical Study on the German Heavy-Duty Vehicles Market*. In: *Transportation Research Part A* 80, S. 247-262.
- Seitz, Claudio; Terzidis, Orestis** (2014): *Market Penetration of Alternative Powertrain Concepts in Heavy Commercial Vehicles: A System Dynamics Approach*. In: *Proceedings of the 2014 International Conference of the System Dynamics Society* 32.
- Shafiei, Ehsan et al.** (2013): *Integrated Agent-based and System Dynamics Modelling for Simulation of Sustainable Mobility*. In: *Transport Reviews* 33 (1), S. 44–70.
- Shepherd, Simon et al.** (2012): *Factors affecting future demand for electric vehicles: A model based study*. In: *Transport Policy* 20, S. 62–74.
- Smolinka, Tom et al.** (2013): *Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität. Entwicklungstand und Forschungsbedarf*. Hg. v. e-mobil BW GmbH. Stuttgart.
- Souren, Rainer** (2012): *Ökologisch und ökonomisch nachhaltige Gestaltung logistischer Systeme*. In: Hans Corsten und Stefan Roth (Hg.): *Nachhaltigkeit*: Gabler Verlag, S. 133-151.
- Spath, Dieter et al.** (2010): *Systemanalyse BWe mobil*. Hg. v. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg. Stuttgart.

- Stan, Cornel (2012):** *Alternative Antriebe für Automobile. Hybridsysteme Brennstoffzellen alternative Energieträger*. 3. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Stathopoulos, Amanda et al. (2012):** *Stakeholder reactions to urban freight policy innovation*. In: *Journal of Transport Geography* 22, S. 34–45.
- Sterman, John D. (2000):** *Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: Irwin/McGraw-Hill.
- Sterman, John D. (2002):** *All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist*. In: *Syst. Dyn. Rev.* 18 (4), S. 501–531.
- Storey, Jonathan (2007):** *The World's Truck Manufacturers - 11th Edition*. 11. Aufl. Automotive World Ltd.
- Struben, Jeroen (2004):** *Technology transitions: identifying challenges for hydrogen vehicles. DRAFT*. In: Michael Kennedy, Graham W. Winch, Robin S. Langer, Jennifer I. Rowe und Joan M. Yanni (Hg.): *Proceedings of the 22nd International Conference of System Dynamics*. Oxford.
- Struben, Jeroen (2006a):** *Essays on transition challenges for alternative propulsion vehicles and transportation systems. Dissertation. MIT, Boston*.
- Struben, Jeroen (2006b):** *Identifying Challenges for Sustained Adoption of Alternative Fuel Vehicles and Infrastructure*. In: *SSRN Journal*.
- Struben, Jeroen; Sterman, John D. (2008):** *Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems*. In: *Environ. Plann. B* 35 (6), S. 1070–1097.
- Südwest Presse (2011), online:** *Daimler baut früher Autos mit Brennstoffzellen*. Hg. v. Südwest Presse. Online verfügbar unter <http://www.swp.de/ulm/nachrichten/wirtschaft/Daimler-baut-frueher-Autos-mit-Brennstoffzellen;art4325,988215>, zuletzt geprüft am 07.12.2014.
- Swart, R.J et al. (2004):** *The problem of the future: sustainability science and scenario analysis*. In: *Global Environmental Change* 14 (2), S. 137–146.
- Thielsch, Meinald T. (2012):** *Praxis der Wirtschaftspsychologie. Themen und Fallbeispiele für Studium und Anwendung*. Münster: Monsenstein und Vannerdat.
- Tidd, Joseph; Bessant, John R. (2009):** *Managing innovation. Integrating technological market and organizational change*. 4. ed. Hoboken, NJ: Wiley.
- Tornatzky, Louis G.; Fleischer, Mitchell (1990):** *The processes of technological innovation*. 4. Aufl. Lexington, Mass: Lexington Books.
- Train, Kenneth E. (2003):** *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- TriComB2B (2011):** *The Considered Purchase Decision. What Matters, What Doesn't And What It Means For B2B Marketing and Sales*. Hg. v. TriComB2B und University of Dayton. Dayton.

- Twiss, Brian C. (1993):** *Managing technological innovation*. 4. ed., repr. London: Pitman.
- Tzeng, Gwo-Hshiung et al. (2005):** *Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation*. In: *Energy Policy* 33 (11), S. 1373–1383.
- Unger, Jochem; Hurtado, Antonio (2014):** *Speicherung und Verteilung*. In: *Alternative Energietechnik*: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 209-218.
- Utterback, James M. (1996):** *Mastering the dynamics of innovation*. Boston, Mass.: Harvard Business School.
- van Binsbergen, Arjan; Visser, Johannes (2001):** *Innovation steps towards efficient goods distribution systems for urban areas. Efficiency improvement of goods distribution in urban areas*. Univ., Diss.--Delft, 2001. Delft: DUP Science.
- van Vliet, Oscar et al. (2010):** *Multi-agent simulation of adoption of alternative fuels*. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 15 (6), S. 326–342.
- Varvasovszky, Z. (2000):** *A stakeholder analysis*. In: *Health Policy and Planning* 15 (3), S. 338–345.
- VDA (2013):** *Daten zur Automobilwirtschaft. Ausgabe 2013*. Hg. v. VDA. Berlin.
- VDA (2014):** *Global Truck Industry. Perspectives towards 2030*. Unter Mitarbeit von AT Kearney. Hg. v. VDA Abteilung Nutzfahrzeuge, Anhänger, Aufbauten, Busse.
- Ven van de, B.; Graafland, J. J. (2006):** *Strategic and moral motivation for corporate social responsibility*.
- Venkatesh, Viswanath et al. (2003):** *User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View*. In: *MIS Quarterly* 27 (3), S. 425–478.
- Venkatesh, Viswanath; Bala, Hillol (2008):** *Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions*. In: *Decision Sciences* 39 (2), S. 273–315.
- Venkatesh, Viswanath; Davis, Fred D. (2000):** *A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies*. In: *Management Science* 46 (2), S. 186–204.
- Vennix, Jac A. M. (2001):** *Group model building. Facilitating team learning using system dynamics*. Reprinted. Chichester: Wiley.
- Volkswagen AG (2014), online:** *Fernverkehr der Zukunft: IAA-Premiere des Concept MAN TGX Hybrid*. Hg. v. Volkswagen AG. Wolfsburg. Online verfügbar unter http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/news/2014/09/tgx.html, zuletzt geprüft am 07.11.2014.
- Wallentowitz, Henning; Freialdenhoven, Arndt (2011):** *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Technologien Märkte und Implikationen*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

- Walter, Stephan et al. (2012):** *Assessing customer preferences for hydrogen-powered street sweepers: A choice experiment*. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (16), S. 12003–12014.
- Wansart, Joerg; Schnieder, Eckehard:** *Modeling market development of electric vehicles*. In: 2010 4th Annual IEEE Systems Conference. San Diego, CA, S. 371–376.
- Weiber, Rolf; Mühlhaus, Daniel (2009):** *Auswahl von Eigenschaften und Ausprägungen bei der Conjointanalyse*. In: Daniel Baier und Michael Brusch (Hg.): *Conjointanalyse*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 43–58.
- Weikl, Robert (2010):** *Simulationen zur Abschätzung der Marktanteilsentwicklung unterschiedlicher Antriebsvarianten am deutschen Fahrzeugmarkt*. Techn. Univ, Chemnitz, Chemnitz.
- Willenborg, Kerstin (2014), online:** *Hellmann Worldwide Logistics plant mit alternativen Kraftstoffen – LNG und Diesel aus nachwachsenden Rohstoffen*. Hg. v. Hellmann Logistik. Hellmann Logistik. Online verfügbar unter http://www.hellmann.de/de/germany/news/#Hellmann_Worldwide_Logistics_plant_mit_alternativen_Kraftstoffen, zuletzt geprüft am 11.12.2014.
- Wissenschaftlicher Rat der Dudenredaktion (Hg.):** *Duden - Die deutsche Rechtschreibung*.
- Wittenbrink, Paul (2011):** *Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr. Grundlagen - Optimierungspotenziale - Green Logistics*. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- Wolstenholme, Eric F. (1990):** *System enquiry. A system dynamics approach*. Unter Mitarbeit von Jay W. Forrester. Chichester: Wiley.
- Zehetner, Andreas (2011):** *Emotions in organisational buying behaviour. A qualitative empirical investigation in Austria*.
- Zeitzen, Frank (2012a):** *Gestern und Heute. Wirtschaftlichkeit: So haben sich Verbrauch, Fahrleistungen, Nutzlast und Wartungsintervalle in den vergangenen 30 Jahren verändert - eine Auswertung der lastauto-omnibus-Tests*. In: *lastauto omnibus* (6), S. 26–30.
- Zeitzen, Frank (2012b):** *Saubere Rechnung. Fahrbericht Iveco Stralis 440S33 CNG*. In: *lastauto omnibus* 89, 2012 (05), S. 14–17.
- Zeitzen, Frank (2012), online:** *ZF Friedrichshafen: Hybridlösung für schwere Lkw*. Hg. v. eurotransport. Stuttgart. Online verfügbar unter <http://www.eurotransport.de/news/zf-friedrichshafen-hybridloesung-fuer-schwere-lkw-629341.html>, zuletzt geprüft am 07.11.2014.
- Zhang, Ting et al. (2011):** *A Study of the Diffusion of Alternative Fuel Vehicles: An Agent-Based Modeling Approach*. In: *Journal of Product Innovation Management* 28 (2), S. 152–168.
- Zhu, Kevin; Kraemer, Kenneth L. (2005):** *Post-Adoption Variations in Usage and Value of E-Business by Organizations: Cross-Country Evidence from the Retail Industry*. In: *Information Systems Research* 16 (1), S. 61–84.

Zimmer, Wiebke et al. (2007): *Sauber Fuhrpark. Leitfaden für die Beschaffung unter Kriterien der Energieeffizienz und des Klimaschutzes.* Hg. v. Berliner Energieagentur GmbH. Berlin.