Förderprojekt eMERGE II

Kundenbedarfsanalyse zur Entwicklung von Fahrzeug-, Verkehrs- und Geschäftsmodellanforderungen – Flottentest in den Modellregionen Berlin-Potsdam, Stuttgart, Rhein-Ruhr und Rhein-Main

Abschlussbericht

Projektzeitraum
1. Januar 2015 bis 30. September 2017

Konsortialführer
Daimler AG

Abgabe
20.12.2017

Projektpartner
DAIMLER, FKFS, marketing+ UNIVERSITÄT SIEGEN, Technische Universität Berlin, Lehrstuhl für Controlling, RWTH AACHEN UNIVERSITY

Förderung und Koordination

Gefördert durch:
Modellregionen Elektromobilität
Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

koordiniert durch:
NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
ptj Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

Konsortium (Unterschriftenblatt)

Die Unterzeichner legen hiermit den Schlussbericht zum Förderprojekt eMERGE II: Kundenbedarfsanalyse zur Entwicklung von Fahrzeug-, Verkehrs- und Geschäftsmodellanforderungen – Flottentest in den Modellregionen Berlin-Potsdam, Stuttgart, Rhein-Ruhr und Rhein-Main und Berlin vor.

Konsortialführer

i. V. 5.12.2017

Christian Scheidler
Daimler AG

Partner

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
FKFS

Prof.-Dr.-Peter Letmathe
RWTH Aachen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
FAKULTÄT IV - Elektrotechnik und Informatik
Institut für Telekommunikationssysteme
Open Distributed Systems (ODS)
PROF. DR. MANFRED HAUSWIRTH
Einsteinufer 25, 10587 Berlin, Germany
Sekr. HFT 3, Tel.: +49 30 314 75320

Prof. Dr. Hanna Schramm-Klein
Universität Siegen

Projektsteckbrief

Projektname	eMERGE II – Kundenbedarfsanalyse zur Entwicklung von Fahrzeug-, Verkehrs- und Geschäftsmodellanforderungen – Flottentest in den Modellregionen Berlin-Potsdam, Stuttgart, Rhein-Ruhr und Rhein-Main
Projektlogo	
Projektinhalt	Flottentest mit BEV und PHEV Fahrzeugen mit der Erfassung realer Kundendaten zur Evaluierung und Weiterentwicklung von Nutzungs-, Lade- und Vermarktungsmodellen im Bereich der Elektromobilität. Entwicklung fahrzeugseitiger Innovationen und Schaffung von Akzeptanz für Geschäftsmodelle.
Fördermittelgeber	Bundesministerium für Verkehr, und digitale Infrastruktur (BMVI)
Projektträger	Projektträger Jülich (PTJ)
Fördervolumen	2,8 Mio. € / 1,9 Mio. €
Zeitraum	01.01.2015 – 30.09.2017 Verlängerung um 6 Monate
Fahrzeug im Projekt	122 Fahrzeug mit verbautem Datenlogger: BEV: 102 Mercedes-Benz B250e PHEV: 18 Mercedes-Benz C350e 1 Mercedes-Benz E350e
Regionen	Initial Rhein-Ruhr, Rhein-Main, Berlin, Stuttgart; ausgedehnt Deutschlandweit
Datenlogger	Fleabox 3 von CarMediaLab
Anreiz für Kundenteilnahme	120€ (PHEV) bzw. 150€ (BEV) mtl. Aufwandentschädigung

Tabelle 1: Projektsteckbrief des Projekts eMERGE II

Inhaltsverzeichnis

Konsortium (Unterschriftenblatt) II
Projektsteckbrief III
Inhaltsverzeichnis IV
Abbildungsverzeichnis VIII
Tabellenverzeichnis XI
Abkürzungsverzeichnis XII

1. Das Projekt eMERGE II 13
1.1. Aufgabenstellung und Zielsetzung 13
1.2. Projektstruktur 15
1.2.1. Übersicht der Arbeitspakete 15
1.2.2. Zeitplan und Meilensteine 20
1.3. Projektpartner und Themenschwerpunkte 21

2. AP200 - Fahrzeugseitige Anforderungen 26
2.1. AP 210: Spezifikation und Absicherung xEV 26
2.1.1. Ziel des Arbeitspakets 26
2.1.2. Aktivitäten, Verlauf und Ergebnisse 26
2.1.3. Literatur 34
2.2. AP 220: Ermittlung von Kundenlastkollektiven 37
2.2.1. Ziele des Arbeitspakets 37
2.2.2. Verlauf und Umsetzungen 37
2.2.3. Ergebnisse 39
2.2.4. Zusammenfassende Bewertung 42
2.3. AP 230: Modellierung des Antriebsstrangs 43
2.3.1. Aufgabenbeschreibung 43
2.3.2. Aufbau der Simulationsumgebung 43
2.3.3. Parametrierung der Simulationsmodelle 45
2.3.4. Antriebsstrang-Management des Plug-In Hybrid 48
2.3.5. Zusammenfassung und Ergebnis 49
2.4. AP 240: Analyse des Nutzungsverhaltens 50
2.4.1. Aufgabenbeschreibung: 50
2.4.2. Durchführung und Ergebnisse der Kundenbefragung 50
2.4.3. Identifikation von Nutzergruppen 53
2.4.4. Ergebnisse der Nutzungsdaten für die Nutzergruppen 54
2.4.5. Identifikation der Nutzungsszenarien für die Nutzergruppen 56
2.4.6. Zusammenfassung und Ergebnis 57
2.5. AP 250: Genaue Untersuchung der Lastkollektive 58
2.5.1. Aufgabenbeschreibung: 58
2.5.2. Auswahl und Implementierung von Alterungs- und Zuverlässigkeitsmodellen 58
2.5.3. Simulation der Belastungen der Antriebskomponenten 59
2.5.4. Zusammenfassung und Ergebnis 60

2.6. AP 260: Wirkungsgradoptimierung des Gesamtsystems 61
2.6.1. Aufgabenbeschreibung: 61
2.6.2. Anwendung eines multikriteriellen Optimierers 61
2.6.3. Ermittlung der Randbedingungen – speziell für den Plug-In Hybrid 63
2.6.4. Verknüpfung der Arbeitspakete 260 & 270 64

2.7. AP 270: Erweiterung des Auslegeverfahrens um Komponentenbelastung 65
2.7.1. Aufgabenbeschreibung 65
2.7.2. Optimierung der Antriebsstränge 65
2.7.3. Auswertung der Komponentenbelastung 67
2.7.4. Zusammenfassung und Ergebnis 67
2.7.5. Veröffentlichungen 67
2.7.6. Literatur AP230-270 69

2.8. AP 280: Requirements- und Test-Traceability xEV 70
2.8.1. Ziel des Arbeitspakets 70
2.8.2. Aktivitäten, Verlauf und Ergebnisse 70
2.8.3. Literatur 79

3. AP 300: Nutzerverhalten 81

3.1. AP 310: Aufbereitung aktueller Erkenntnisse zum Nutzerverhalten 81
3.1.1. Ziel des Arbeitspakets 81
3.1.2. Bisherige Studien zur Akzeptanz von Elektrofahrzeugen 81
3.1.3. Studien zu spezifischen Fahrzeugeigenschaften 83

3.2. AP 320: Längsschnittanalyse des Nutzerverhaltens 85
3.2.1. Ziel des Arbeitspakets 85
3.2.2. Einflussfaktoren auf die Einstellung und Kaufintention 85
3.2.3. Einflussfaktoren auf die Wiederkaufsintention 88

3.3. AP 330: Erarbeitung von Nutzerprofilen 90
3.3.1. Bisherige Studien 90
3.3.2. Beschreibung der Flottenteilnehmer 90

3.4. AP 340: Validierung von Kundenpräferenzen 92
3.4.1. Ziel des Arbeitspaketes 92
3.4.2. Aufbau der Studie 92

3.5. AP 350: Preiswahrnehmung und Kaufentscheidungsprozesse 99
3.5.1. Ziel des Arbeitspaketes 99
3.5.2. Ermittlung der Wirkungsweisen von kostenbezogenen Anreizen 99

3.6. Literatur 102

4. AP 400: Verkehr, Energie und Infrastruktur 104

4.1. AP 410: Anforderungsanalyse und Modellerweiterung 104

4.2. AP 420: Erweiterung der Simulationsumgebung 106

4.3. AP 430: Entwicklung von Anwendungen zur Optimierung der Elektromobilität 109
4.3.1. Radarbasierte Rekuperation 110
4.3.2. Kommunikationsbasierte Rekuperation 110

4.4. AP 440: Simulative Untersuchungen und Auswertung der Ergebnisse 111

4.4.1. Simulation für ein großflächiges Stadtszenario 111
4.4.2. Datenauswertung der Simulation für ein großflächiges Stadtszenario 112
4.4.3. Submikroskopische Simulation der Rekuperations-Strategien 114
4.4.4. Auswertung der Submikroskopische Simulationen 117
4.4.5. Hochrechnung der submikroskopischen Ergebnisse auf Stadtverkehr 120
4.4.6. Zusammenfassung und Fazit AP 410 bis AP 440 121

4.5. AP 450: Einordnung heterogener Ladeinfrastrukturen 123
4.5.1. Ziel des Arbeitspakets 123
4.5.2. Vorgehen 123
4.5.3. Ergebnisse 124

4.6. AP 460: Übergreifende Modelle für das integrierte Angebot heterogener Ladeinfrastrukturen 130
4.6.1. Ziel des Arbeitspakets 130
4.6.2. Vorgehen 130
4.6.3. Ergebnisse 131

4.7. AP 470: Erweiterung der Betrachtung um zusätzliche technische Optionen und Nutzerprofile 135
4.7.1. Ziel des Arbeitspakets 135
4.7.2. Vorgehen 135
4.7.3. Ergebnisse 135

4.8. Veröffentlichungen und Vorträge 137

4.9. Literatur 138

5. AP 500: Geschäftsmodellierung 139

5.1. AP 510: Total Cost of Ownership (Ausgangssituation) 139
5.1.1. Auswahl der Fahrzeuge 139
5.1.2. Entwicklung des TCO-Modells 140
5.1.3. Durchführung der TCO Berechnungen 140
5.1.3.1. Daten 141
5.1.3.2. Gesamtkosten 143
5.1.3.3. Kostenrisiken 144

5.2. AP 520: Geschäftsmodellierung unter Berücksichtigung der Daten der B-Klasse ED ... 146
5.2.1. Entwicklung anbieterseitiger Geschäftsmodelle 146
5.2.2. Beurteilung der Geschäftsmodelle aus TCO-Sicht 148

5.3. AP 530: Standardisierung und Komplexitätsverringerung 150
5.3.1. Analyse von Standardisierungs- & Komplexitätsreduktionsmöglichkeiten 150
5.3.2. Zentrale Maßnahmen zur Standardisierung und Komplexitätsreduktion 151

5.4. AP 540: Anbieterseitige Kooperationsmodelle 154
5.4.1. Akteursbezogene Anforderungen zur Implementierung von Standards 154
5.4.2. Entwicklung eines Kooperationsmodells 155
5.4.3. Beurteilung des Kooperationsmodells aus Kundensicht 156
5.4.4. Ermittlung der TCO-Auswirkungen 157

5.5. AP 550: Pricingmodelle aus verhaltenswissenschaftlicher Sicht 158
5.5.1. Experimentelle Studie für Pricingmodelle 158
5.5.2. Ermittlung der TCO-Auswirkungen 160

5.6. AP 560: Total Cost of Ownership (optimiert) 161
5.6.1. Vergleich der TCO-Ergebnisse 161
5.6.2. Empfehlungen für die Implementierung von Maßnahmebündeln 162

5.7. Literaturverzeichnis 167

6. AP 600: Flottentest 172

6.1. AP 610: Aufbau und Verkauf B-Klasse ED und PHEV von Mercedes-Benz 172
6.1.1. Ziel des Arbeitspakets 172
6.1.2. Aktivitäten, Verlauf und Ergebnisse 172

6.2. AP 620: Datenerfassung in Kundenfahrzeugen 177
6.2.1. Ziel des Arbeitspakets 177
6.2.2. Aktivitäten, Verlauf 177
6.2.3. Ergebnisse 182

7. AP100: Projektmanagement 184

7.1. Aufgaben 184

7.2. Technische und vertriebliche Umfragen 185

7.3. eMERGE II Kommunikation 186

8. Wesentliche Ergebnisse 189

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip von eMERGE II 13
Abbildung 2: Struktur der Arbeitspakete 15
Abbildung 3: Vorgehensweise AP230-260 16
Abbildung 4: Meilensteinplan eMERGE II von 01.01.2015-30.09.2017 20
Abbildung 5: B250e und smart fortwo electric drive beim Ladevorgang 21
Abbildung 6: eMERGE II Teilnehmer vor dem FKFS in Stuttgart 22
Abbildung 7: Mercedes-Benz B250e im Projekt eMERGE II 23
Abbildung 8: Spezifikationsdokument und Testspezifikation in Doors 27
Abbildung 9: Aktivitätsdiagram zur Beschreibung von Systemverhalten 28
Abbildung 10: Zusammenhänge der textuellen und modellbasierten Spezifikation 29
Abbildung 11: Antworten zu Frage 2 32
Abbildung 12: Antworten zu Frage 1 32
Abbildung 13: Antworten zu Frage 3 33
Abbildung 14: Ziele AP 220 37
Abbildung 15: Beispiel einer Klassierung 37
Abbildung 16: Prinzip der Messdatenübertragung 38
Abbildung 17: Benutzeroberfläche R-Studio 39
Abbildung 18: Verweildauern - Fahrprogramme C-Klasse 40
Abbildung 19: Verweildauerklassierung B-Klasse 40
Abbildung 20: Verweildauer SOC-Stand B- und C-Klasse 41
Abbildung 21: Max. SOC-Stand C-Klasse pro Zündungswechsel 41
Abbildung 22: Max. SOC-Stand B-Klasse pro Zündungswechsel 41
Abbildung 23: Regelungsstruktur der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung [1] 43
Abbildung 24: Mögliche Antriebsstrangkonfigurationen [1] 44
Abbildung 25: Kommunikationsstruktur zwischen Steuergeräte- und Komponentenebene [1] 45
Abbildung 26: Messschrieb einiger exemplarischer Größen aus den Referenzmessfahrten 46
Abbildung 27: Vergleich der Simulation und Messung beim C350e 47
Abbildung 28: Vergleich der Simulation und Messung beim B250e 47
Abbildung 29: Eingabemöglichkeiten zur Parametrierung der Betriebsstrategie [3] 48
Abbildung 30: Fragebogen für die Kundenbefragung 50
Abbildung 31: Ergebnisse der Kundenbefragung zum Schwerpunkt Anwender 51
Abbildung 32: Ergebnisse der Kundenbefragung zum Schwerpunkt Ladeverhalten 52
Abbildung 33: Ergebnisse der Kundenbefragung zur Fahrstrecke 52
Abbildung 34: Ergebnisse der Kundenbefragung zur Straßennutzung 53
Abbildung 35: Fahrstrecken der einzelnen Nutzergruppen 55
Abbildung 36: Geschwindigkeiten der einzelnen Nutzergruppen 55
Abbildung 37: Geschwindigkeits-Zeit-Profile der vier Nutzergruppen 56
Abbildung 38: Lastkollektive für den C350e und dem Nutzungsszenario Arbeitsplatzfahrer 60
Abbildung 39: Optimierungsmethode 61
Abbildung 40: Beispieloptimierung über 6 Generationen [14] 62
Abbildung 41: Ergebnisse der Validierung des implementierten MO-CMA-ES 63
Abbildung 42: Ergebnisse für den C350e Plug-In Hybrid 66
Abbildung 43: Ergebnisse für den B250e 66
Abbildung 44: Aktivitätsdiagramm aus Abbildung 2 ohne redundante Elemente 72
Abbildung 45: Aktuell verwendete textuelle Ansicht (Original) 72
Abbildung 46: Gruppierungsansicht 73
Abbildung 47: Normalformansicht 74

Abbildung 48: Baumansicht 75
Abbildung 49: Exakt äquivalente Ansicht 75
Abbildung 50: Schematische Funktionsweise des Prototyps 77
Abbildung 51: Grafische Oberfläche der Implementierung des Prototyps 78
Abbildung 52: Nutzenwerte der Fahrzeugmarke 94
Abbildung 53: Nutzenwerte der Fahrzeugklasse 95
Abbildung 54: Nutzenwerte des Antriebskonzepts 95
Abbildung 55: Nutzenwerte der maximalen Systemleistung 96
Abbildung 56: Nutzenwerte des Preises 96
Abbildung 57: Nutzenwerte der Kraftstoffkosten 97
Abbildung 58:Nutzenwerte der Reichweite 97
Abbildung 59: Nutzenwerte der Ladezeit 98
Abbildung 60: Relative Wichtigkeiten der Fahrzeugattribute 98
Abbildung 61: Simulationskonzept für die in AP 440 durchzuführenden Untersuchungen 105
Abbildung 62: Simulationsframework VSimRTI 106
Abbildung 63: Ambassador-Konzept von VSimRTI 107
Abbildung 64: Visualisierung einer Fahrzeug-Simulation in PHABMACS 108
Abbildung 65: Visualisierungs- und Auswertetool ITEF 108
Abbildung 66: Strategien zum regenerativen Bremsen 109
Abbildung 67: Schaubild zur Darstellung der radarbasierten Rekuperation 110
Abbildung 68: Schaubild zur Darstellung der kommunikationsbasierten Rekuperation 110
Abbildung 69: Verkehrsnetz Luxemburg für die großflächige Verkehrssimulation 111
Abbildung 70: Histogramm der gefahrenen Strecken im Luxemburg-Szenario 112
Abbildung 71: Gesuchtes Fahrprofil für ein Bremsmanöver bei 50 km/h 113
Abbildung 72: Szenario Hauptstraße 114
Abbildung 73: Szenario Nebenstraße 115
Abbildung 74: Szenario Stadtautobahn 115
Abbildung 75: Vergleich der Verbesserung bei beiden Rekuperations-Strategien bei 30 km/h 118
Abbildung 76: Vergleich der Verbesserung bei beiden Rekuperations-Strategien bei 50 km/h 118
Abbildung 77: Vergleich der Verbesserung bei beiden Rekuperations-Strategien bei 80 km/h 118
Abbildung 78: Minimale Geschwindigkeit des letzten Fahrzeugs während des Manövers (50 km/h) 120
Abbildung 79: Vorgehen Arbeitspakete 450 bis 470 123
Abbildung 80: Verteilung der täglichen Fahrleistung 124
Abbildung 81: Parkorte in Abhängigkeit des Agglomerationsgrads 125
Abbildung 82: Parkorte und Parkdauer 126
Abbildung 83: Drei idealtypische Ladebedarfe 127
Abbildung 84: Bestandteile Untersuchungsmodell 130
Abbildung 85: Überblick über die verwendeten ökonomischen Theorien 131
Abbildung 86: Verortung der Ladeinfrastruktur für die regelmäßige Ladung 133
Abbildung 87: Vorgehen Arbeitspaket 470 135
Abbildung 88: TCO-Modell 140
Abbildung 89: AP510 ohne Subvention 2016 143
Abbildung 90: AP510 mit Subvention 2016 144
Abbildung 91: AP510 Kostenrisiken 2016 145
Abbildung 92: AP510 Kostenrisiken 2021 145
Abbildung 93: AP520 „Volumen-Flatrate-Paket“ 149
Abbildung 94: AP520 „Flexibles Mobilitätspaket“ 150
Abbildung 95: AP530 ohne Subvention 2016 153
Abbildung 96: AP530 mit Subvention 2016 153

Abbildung 97: Aufbau und Funktionsweise des Kooperationsmodells 155
Abbildung 98: AP540 ohne Subvention 2016 157
Abbildung 99: AP540 mit Subvention 2016 157
Abbildung 100: AP550 ohne Subvention 2016 160
Abbildung 101: AP550 mit Subvention 2016 161
Abbildung 102: Mercedes-Benz B-Klasse B250e 172
Abbildung 103: Mercedes-Benz C-Klasse C350e 173
Abbildung 104: Mercedes-Benz E-Klasse E350e 173
Abbildung 105: Auszug aus der Einbauanleitung für den B250e 178
Abbildung 106: Deckblatt des Informationsleitfadens in eMERGE II 179
Abbildung 107: Fahrten und Kilometerleistung in eMERGE II 182
Abbildung 108: Ladevorgänge und -menge in eMERGE II 183
Abbildung 109: eMERGE II Teilnehmer zu Besuch bei der Daimler AG in Möhringen 185
Abbildung 110: eMERGE II Kommunikationsevent bei der Daimler AG 186
Abbildung 111: eMERGE II Kommunikationsevent beim FKFS 187
Abbildung 112: eMERGE II Abschlussveranstaltung im Erich-Klausener-Saal des BMVI 188

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektsteckbrief des Projekts eMERGE II III
Tabelle 2: Beeinträchtigungen und deren Beschreibung 30
Tabelle 3: Beeinträchtigungen sortiert nach Vorkommen in den Fahrzeugfunktionen 31
Tabelle 4: Übersicht über die Betriebszustände [3] 48
Tabelle 5: Definierte Nutzergruppen 53
Tabelle 6: Identifikationskriterien der Nutzergruppen 54
Tabelle 7: Ergebnis der Nutzerzuordnung anhand der geloggten Nutzerdaten 54
Tabelle 8: Simulationsparameter der vier Nutzergruppen für den B250e 57
Tabelle 9: Simulationsparameter der vier Nutzergruppen für den C350e 57
Tabelle 10: Überrollungs- und Wechsellastschädigung [2] 58
Tabelle 11: Vergleich von Alterungsmodellen für Batterien 59
Tabelle 12: Ergebnisse Energieverbrauch und Belastung für Antriebsstränge C350e und B250e 60
Tabelle 13: Ergebnisse der Validierung des implementierten MO-CMA-ES [1] 63
Tabelle 14: Reihenfolge der Ansichten für jeden Teilnehmer in absteigender Folge 76
Tabelle 15: Ergebnisse der 1. Studie (Einstellung) 87
Tabelle 16: Ergebnisse der 1. Studie (Kaufintention) 87
Tabelle 17: Ergebnisse der 2. Studie (Einstellung) 88
Tabelle 18: Ergebnisse der 2. Studie (Wiederkaufsintention) 89
Tabelle 19: Verwendete Merkmale der Conjoint Analyse 92
Tabelle 20: Fragebogen-Szenario der Conjoint Analyse 94
Tabelle 21: Übersicht von Vergünstigungen für E-Fahrzeuge 100
Tabelle 22: Eigenschaften für Conjoint Analyse zu Vergünstigungen 100
Tabelle 23: Auswertung der Fahrprofile nach Geschwindigkeit 113
Tabelle 24: Energieverbrauch der Fahrzeuge in der Simulation 114
Tabelle 25: Durchschn. Energieverbräuche der Fahrzeugkolonne und Reichweitenverbesserung 119
Tabelle 26: Einsparungspotential des Gesamtverkehrs bei Einsatz der Rekuperations-Strategien 121
Tabelle 27: Ausgewählte Fahrzeugmodelle nach Größenklasse 139
Tabelle 28: Übersicht Energiekosten 142
Tabelle 29: Übersicht Energieverbrauch pro Monat 147
Tabelle 30: Übersicht Mobilitätsgutschrift 148
Tabelle 31: Zahlungsmöglichkeiten an einer Ladesäule 151
Tabelle 32: Preisunterschiede bei verschiedenen Bezahloptionen 152
Tabelle 33: Übersicht Maßnahmebündel 163
Tabelle 34: Übersicht der TCO Wirtschaftlichkeit ohne Subvention 164
Tabelle 35: Übersicht der TCO Wirtschaftlichkeit mit Subvention 165
Tabelle 36: Technische Daten der eMERGE II Fahrzeuge 174

Abkürzungsverzeichnis

AC	*Alternating Current*
AP	*Arbeitspaket*
B250e	*Mercedes-Benz B-Klasse B250e*
BEF	*Break-Even-Fahrleistung*
BEV	*Battery Electric Vehicle*
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
C350e	*Mercedes-Benz C-Klasse C350e*
CMMI	*Capability Maturity Model Integration*
DC	*Direct Current*
DoD	*Depth of Discharge*
E350e	*Mercedes-Benz E-Klasse E350e*
ETSI	*European Telecommunications Standards Institute*
FKFS	*Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart*
GSM	*Global System for Mobile Communications*
HCU	*Hybrid Control Unit*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
ITEF	*Integrated Test And Evaluation Framework*
ITS-G5	WLAN-*Technologie für Fahrzeugkommunikation*
LTE	*Long Term Evolution (Mobilfunkstandard)*
MBVD	*Mercedes-Benz Vertrieb Deutschland*
MCU	*Motor Control Unit*
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	*Plug-In Hybrid Electric Vehicle*
PTJ	*Projektträger Jülich*
ReADi	*Remote Automotive Diagnostics*
RTI	*Runtime Infrastructure*
SOC	*State of Charge*
SoH	*State of Health*
SPICE	*Software Process Improvement and Capability Determination*
SUMO	*Simulation of Urban MObility*
TCU	*Transmission Control Unit*
UHT	*ultra high temperature*
UML	*Unified Modeling Language*
VBS	*Visual Basic Script*
VSimRTI	Vehicle-2-X Simulation Runtime Infrastructure
xEV	*Electric Vehicles*
XML	*Extensible Markup Language*

Kurze Darstellung

1. Das Projekt eMERGE II

1.1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das Förderprojekt „eMERGE II“ verfolgt das Ziel anhand realer Kundendaten, Nutzungs-, Lade- und Vermarktungsmodelle im Bereich der Elektromobilität zu evaluieren und weiterzuentwickeln. Dadurch sollen fahrzeugseitige Innovationen entwickelt und Akzeptanz für Geschäftsmodelle geschaffen werden, so dass sich Elektrofahrzeuge langfristig am Markt etablieren können.

Von eMERGE zu eMERGE II

Aufbauend auf Ergebnissen aus vorherigen Elektromobilitätsprojekten in den Programmen der Modellregionen 1.0 sind im Förderprojekt *„eMERGE: Wege zur Integration von Energie-, Fahrzeug- und Verkehrsanforderungen – Flottentest in den Modellregionen Berlin und Ruhrgebiet“* Interdependenzen, Fremdwirkungen und Abhängigkeiten aus den Domänen Verkehr, Energie, Fahrzeug und Nutzer ganzheitlich untersucht worden. „eMERGE II“ ist die Weiterentwicklung dieses Vorgängerprojektes. Im Projekt eMERGE II sollen die Ergebnisse aus eMERGE verifiziert und ausgebaut werden.

eMERGE verfolgte das Ziel das System „Elektromobilität“ als Ganzes zu betrachten und weiterzuentwickeln. Dabei wurden in einem Flottentest Kleinfahrzeuge vom Typ smart fortwo electric drive in zwei Modellregionen untersucht. Dieser ganzheitliche Ansatz soll im Nachfolgeprojekt übernommen werden. Die im Flottenversuch des eMERGE-Projektes erlangten Ergebnisse werden weiter vertieft und sind im Nachfolgeprojekt auf höhere Penetrationsraten von Elektrofahrzeugen zu übertragen. Die Erkenntnisse aus eMERGE sind in eMERGE II mit stärkeren Fokus auf Fahrzeug-, Verkehrs-, Energie- und Infrastrukturanforderungen sowie Nutzungs- und Geschäftsmodellen weiter zu entwickeln.

Der wesentliche Mehrwert von eMERGE II gegenüber eMERGE und den Flottenversuchen in den Programmen der Modellregionen 1.0 ist die detailliertere Betrachtung spezifischer Fragestellungen mittels der gewonnenen Ergebnisse aus vorhergehenden Projekten. Dies ermöglicht die Modellierung von Geschäftsmodellansätzen und die Prüfung des Nutzerverhaltens auf Robustheit (siehe Abbildung 1). Dieses Vorgehen kann Hinweise darauf geben, welche Stellhebel genutzt werden können, um die Elektromobilität weiter in Richtung einer breiten erfolgreichen Markteinführung zu entwickeln.

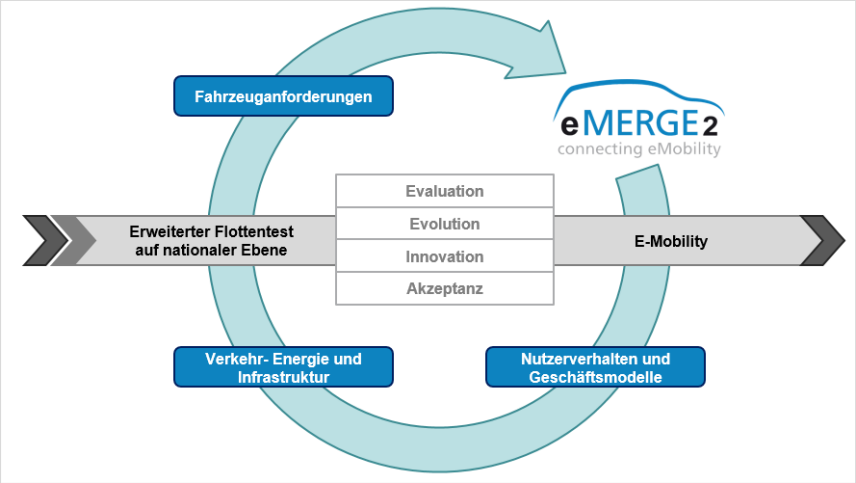


Abbildung 1: Prinzip von eMERGE II

Dies führt zu den **Zielen** von eMERGE II, die im Folgenden genannt werden sollen:

- *Evaluation:* Die im Flottenversuch von eMERGE erlangten Ergebnisse sollen weiter vertieft werden. In eMERGE II sind diese Ergebnisse auf höhere Penetrationsraten von Elektrofahrzeugen am Markt zu übertragen. Hierfür werden neue Fahrzeugkategorien sowie neue Modellregionen in die Auswertung miteinbezogen.

- *Evolution:* In eMERGE II werden durch vollelektrisch betriebene Kompakt-Vans (B-Klasse B250e) und Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV: C350e und E350e) von Mercedes-Benz neue Fahrzeugkonzepte analysiert und das Nutzungs- und Ladeverhalten der Kunden mit den Ergebnissen aus dem Flottenversuch von eMERGE verglichen.
- Ausgehend von einem anderen Fahrzeugtypus und einer unterschiedlichen technischen Ausstattung lassen sich mit der B-Klasse B250e andere Nutzungsmotive bei den Projektteilnehmern vermuten als beim smart fortwo electric drive, der in eMERGE untersucht wurde. Beispielsweise kommen andere Kaufentscheidungsprozesse zum Tragen, da evtl. die Familie des Kunden im Rahmen der Gruppenentscheidung eine wichtige Rolle einnimmt.
- Durch die Integration von PHEV in das Untersuchungsmodell kann das Nutzungsverhalten einer weiteren Kundengruppe grundsätzlich dem Verhalten von Kunden mit rein-elektrischen Fahrzeugen gegenüber gestellt werden. Aufgrund der Möglichkeit, das Fahrzeug mit zwei Energiequellen zu betreiben (zum einen durch Strom, zum andern mit Kraftstoff), hat der reale Kundenbetrieb großen Einfluss auf den tatsächlichen Verbrauch und Fahrkomfort, womit es sich fundamental vom Nutzungsverhalten eines reinen Elektrofahrzeugs unterscheidet. Deshalb müssen Antriebsstränge der zweiten Generation von PHEV gezielt mithilfe von Nutzerstudien auf Anwenderbedürfnisse zugeschnitten und ausgelegt werden. In diesem Verbundvorhaben sollen hierfür erstmalig Messdaten in großem Umfang aus einer Feldstudie mit PHEV im realen Kundenbetrieb gewonnen werden.
  Der Untersuchungskontext der Ladeinfrastruktur wird zudem um zusätzliche technische Optionen und Nutzerprofile (u.a. PHEV, Carsharing-Fahrzeuge, Taxi-Unternehmen etc.) ergänzt. Dies stellt eine deutliche Erweiterung und Weiterentwicklung zum Ansatz des Vorgängerprojektes eMERGE dar, in dem vor allem halböffentliche Bereiche für das integrierte Angebot heterogener Ladeinfrastrukturen betrachtet wurden. Aus den Analysen sollen kurz- und langfristige Handlungsoptionen und – soweit möglich – Handlungsempfehlungen für die öffentliche Hand abgeleitet werden. Mit Hilfe von Simulationen sollen die Auswirkungen höherer Penetrationsraten von Elektrofahrzeugen auf die Domänen Verkehr, Fahrzeug, Energie und Nutzer untersucht werden.

- *Innovation:* Aufbauend auf einem vorläufigen Ergebnis von eMERGE, dass Kunden mit Elektrofahrzeugen hauptsächlich Kurzstrecken fahren (<10 km), sollen die Auswirkungen dieses Nutzerverhaltens auf die Antriebsstränge von Elektrofahrzeugen geprüft werden. Daher werden in eMERGE II die Kundenlastkollektive im realen Fahrbetrieb zur bedarfsgerechten Entwicklung und Erprobung von Aggregaten ermittelt.

- *Akzeptanz:* Mittels der im Projekt ermittelten Daten erfolgt eine Analyse von Elektrofahrzeugen und den dazugehörigen Geschäftsmodellen hinsichtlich der Kundenakzeptanz. Der Untersuchung kommt insbesondere zugute, dass mit den elektrifizierten B-Klassen und den beteiligten PHEV andere (umfänglichere) Mobilitätsbedürfnisse angenommen werden können, wie sie in Abgrenzung zu eMERGE mit den beteiligten smarts ed nicht voll umfänglich abgebildet werden konnten.

1.2. Projektstruktur

1.2.1. Übersicht der Arbeitspakete

Im Projekt eMERGE II wurden sechs Arbeitspakete bearbeitet. In der nachfolgenden Darstellung der Arbeitspaketstruktur stellen die vier Säulen mit den Arbeitspaketen 200 bis 500 die Basis für die Untersuchungen dar. Zur realitätsnahen Evaluierung werden im Rahmen des Flottentests im AP 600 relevante Erkenntnisse gewonnen.

Die Daten, die im Flottentest in den Fahrzeugen gesammelt wurden, wurden allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt und flossen so direkt in AP 220-270 und AP 410-440 ein. Des weiteren gingen die APs 300 und 500 auf die Teilnehmer zu, um sie im Rahmen ihrere Untersuchungen zu befragen und diese Ergebnisse direkt als Basis für die Bearbeitung der jeweiligen Arbeitspaktet zu nutzen.

Als Querschnittsfunktion dient das AP 100 mit den Aufgaben des Projektmanagements.

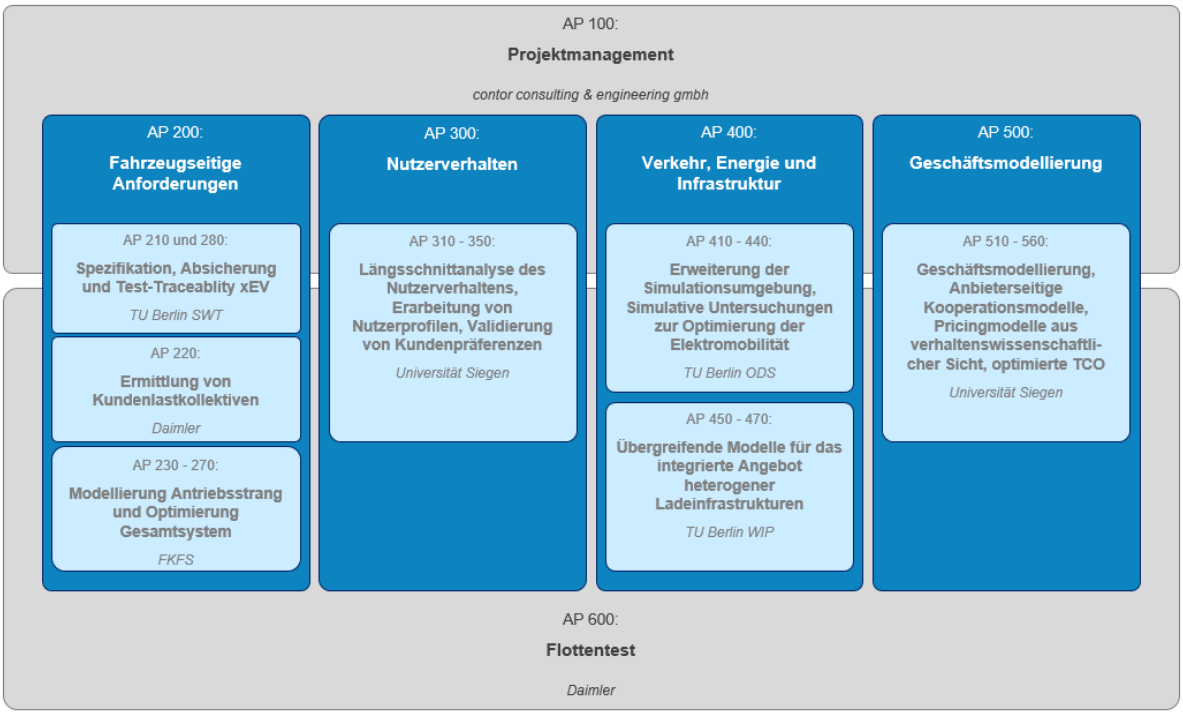


Abbildung 2: Struktur der Arbeitspakete

Nachfolgend wird jeweils ein kurzer Einblick in die Arbeitspakete 200 bis 600 gegeben:

AP 400: Fahrzeugseitige Anforderungen

AP 210 - Spezifikation und Absicherung xEV

Der Anteil der Software in modernen Fahrzeugen nimmt mehr und mehr zu. Um weiterhin zu gewährleisten, dass Funktionen, die durch Software realisiert werden, zuverlässig im Fahrzeug implementiert werden, muss diesem Bereich besondere Beachtung geschenkt werden. Der Trend zunehmender Komplexität der Software wird durch den Einsatz von Elektroantrieben weiter verstärkt. Die

Spezifikation von Fahrzeugfunktionen stellt als Basis der Entwicklung der Software einen wichtigen Schritt dar. Dies gilt ebenso für die Absicherung (Test) der Funktionen. Im Rahmen des Projektes hat die TU Berlin Fachgebiet Softwaretechnik daher die bestehende Spezifikations- und Absicherungslandschaft bei Daimler untersucht. Im Projektverlauf konnten diverse Herausforderungen und Potentiale identifiziert werden. Diese Erkenntnisse sind die Grundlage für die Weiterentwicklung des eingesetzten Vorgehens und stehen im direkten Zusammenhang zu AP 280.

AP 220: Ermittlung von Kundenlastkollektiven

Daimler wird in diesem Arbeitspaket die bedarfsgerechte Entwicklung und Erprobung von Aggregaten sowie die Optimierung der Auslegungs- und Prüfkollektive auf Basis der mittels Datenlogger ermittelten Felddaten durchführen. Dazu werden Auslegungs- und Prüfkollektive auf Basis der ermittelten Felddaten analysiert und optimiert.

AP 230-260: Modellierung Antriebstrang und Optimierung Gesamtsystem

Das FKFS wird auf der Basis der Nutzungsdaten und einer Kundenbefragung ein Auslegungsverfahren speziell für Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeuge entwerfen, das eine optimale technische Dimensionierung der Komponenten des Elektro- bzw. Hybridantriebs für gegebene Einsatzszenarien ermöglicht. Die entwickelten methodischen Ansätze und Simulationsmodelle werden im Rahmen von Beiträgen in Fachzeitschriften und Tagungen veröffentlicht. Die Erkenntnisse fließen zudem in die Ausbildung von Studenten der mit dem FKFS kooperierenden Universität Stuttgart im Rahmen von Bachelor- und Masterarbeiten ein.

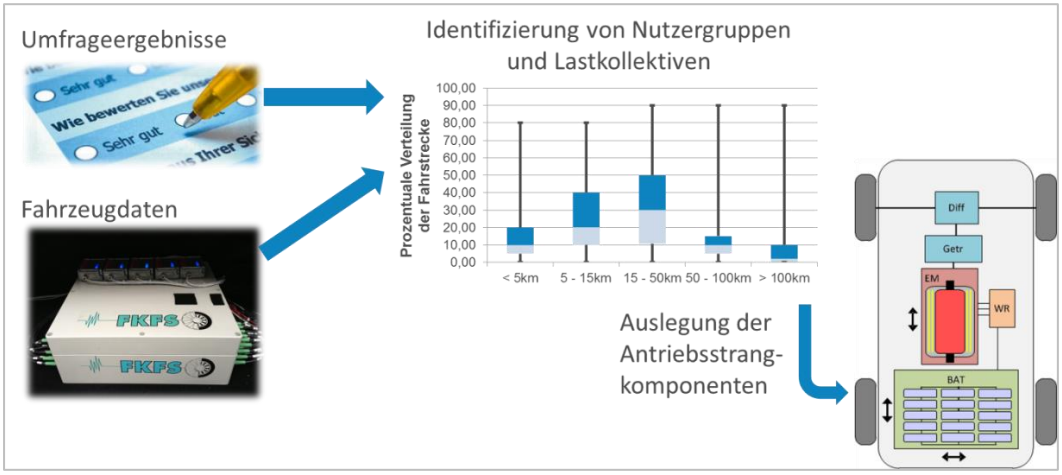


Abbildung 3: Vorgehensweise AP230-260

AP 280 - Requirements- und Test-Traceability xEV

Das AP 280 hat das Ziel auf Basis der Erkenntnisse von AP 210 den angewendeten Spezifikationsprozess zur Beschreibung von Fahrzeugfunktionen von xEV zu verbessern. Um diese Verbesserung zu ermöglichen ist eine automatisierte Unterstützung erstellt worden, welche an den eingesetzten Prozess angepasst ist und aktuelle Herausforderungen adressiert. Dabei stand eine Verbesserung der Nachvollziehbarkeit im Fokus, welche sonst einen erheblichen manuellen Aufwand bedeutet. Durch eine im Daimler Umfeld durchgeführte Feldstudie konnte die Verbesserung des Vorgehens nachgewiesen werden.

AP 300: Nutzerverhalten

In einer Vielzahl an Studien zeigte sich immer wieder die Bedeutung der Analyse des Nutzerverhaltens für den Markterfolg von technologischen Innovationen. Den Grundstein von diesem Arbeitspaket bildeten daher die Ergebnisse bzw. resultierenden Erkenntnisse aus vergangenen Studien. So bestand in AP 310 die Aufgabe darin, den aktuellen Forschungsstand zum Thema Elektromobilität aufzubereiten und entsprechend den Mehrwert der eigenen Studien herauszuarbeiten.

Die Kernpunkte dieses Arbeitspaketes AP 320 bezogen sich zum einen auf die Beschreibung des Nutzerverhaltens von aktiven Elektrofahrzeug- und Plug-In-Hybridhaltern, zum anderen richteten sich Teilaspekte dieser Forschungsgebiete auch auf eine gesamtgesellschaftliche Beschreibung der Akzeptanz und Nutzungsintention von Elektrofahrzeugen. Grundsätzlich unterlag die Forschung stets der Prämisse, dass ein Markterfolg von Produktinnovationen nicht allein durch den Produktverkauf determiniert wird, sondern primär durch die tatsächliche Nutzung der Produkte durch die Nachfrager bestimmt wird.

In AP 330 wurden theoriegeleitet Nutzersegmente definiert, die sich hinsichtlich der Gründe und Motivationen für oder gegen eine Nutzung von Elektrofahrzeugen trennscharf beschreiben ließen. Hierbei standen insbesondere verhaltensrelevante Konstrukte im Fokus, wie zum Beispiel das Vorwissen über Elektromobilität, die allgemeine Technologieaffinität sowie das individuelle Umweltverhalten. Diese Analyse diente dazu, Empfehlungen für die zielgruppen-spezifische Anpassung von Kommunikationsmaßnahmen abzuleiten.

Weiterhin wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern in AP 340 eine Conjoint-Studie zur Bestimmung der Fahrzeugpräferenzen erarbeitet. Hierbei sollte insbesondere ermittelt werden, welche Nutzenbeiträge bestimmte Fahrzeugeigenschaften für den Konsumenten liefern. Innerhalb des Conjoint-Designs wurden den Befragten komplette Fahrzeugtypen mit unterschiedlichen Merkmalen präsentiert. Die Befragten sollten schließlich angeben, welches Fahrzeug aus einem präsentierten Auswahl-Set ihren Bedürfnissen am ehesten gerecht werden würde. Rückwirkend lässt sich auf diese Weise ableiten, wann und in welchem Ausmaß Probanden bereit sind, Kompromisse einzugehen, also zum Beispiel eine geringere Reichweite in Kauf zu nehmen, wenn dafür der Wagen verhältnismäßig günstig in der Anschaffung ist. Diese Ergebnisse ermöglichen es, Automobilherstellern die potentielle Nachfrage eines Neuwagens bereits im Vorfeld besser abzuschätzen. Gleichzeitig geben sie aber auch Stromlieferanten wertvolle Informationen bezüglich der noch tolerierbaren Ladezeit bei Elektrofahrzeugen.

Abschließend folgte in AP 350 ebenfalls mit Hilfe der Conjoint-Methode eine Analyse der Wirkungsmechanismen von kostenbezogenen Anreizen. Ziel war es hier Handlungsempfehlungen auszusprechen, in welchem Verhältnis politische Maßnahmen (z.B. Subventionen oder steuerliche Befreiungen) beim potentiellen Kunden wirken bzw. wahrgenommen werden und mit welchem Instrument eine Kundennachfrage am besten erhöht werden kann.

AP 400: Verkehr, Energie und Infrastruktur

AP 410-440: Verkehr und Energie

Ziel der TU Berlin, Fachgebiet Open Distributed Systems, ist es, durch eine ganzheitliche Untersuchung die Auswirkungen höherer Penetrationsraten von Elektrofahrzeugen auf die Domänen Verkehr, Fahrzeug, Energie und Nutzer zu analysieren und daraus Lösungsvorschläge zu erarbeiten, wie z.B. Komfort für den einzelnen Nutzer und Effizienz des Gesamtsystems erhöht werden können. Es

soll untersucht werden, wie neuartige Anwendungen und Systeme aus dem Bereich „Intelligent Vernetzte Mobilität“ gezielt eingesetzt werden können, um die Leistungsfähigkeit des „Gesamtsystems Elektromobilität“ zu erhöhen und für Fahrzeugnutzer komfortabler zu machen. Insbesondere soll untersucht werden, wie der erweiterte Informationsaustausch, der durch vernetze Mobilität ermöglicht wird, möglichst gewinnbringend im Sinne der Elektromobilität eingesetzt werden kann. Hierzu sollen existierende Lösungen aus dem Bereich „Intelligent Vernetzte Mobilität“ an die speziellen Bedürfnisse der Elektromobilität angepasst und entsprechend erweitert werden (AP 430).

Als zentrales Tool der simulativen Untersuchungen wird die Simulationsumgebung VSimRTI eingesetzt. In eMERGE wurde VSimRTI um Komponenten zur Simulation von Elektrofahrzeugen und Ladeinfrastruktur erweitert und erfolgreich zur ganzheitlichen Evaluierung eingesetzt. Um auch die zusätzlichen Bedürfnisse von eMERGE II zu erfüllen (AP 410), wird VSimRTI entsprechend erweitert (AP 420). Weiterhin sollen in enger Abstimmung mit den anderen Arbeitspaketen Simulationsszena-rien für die weiteren Untersuchungen definiert und entwickelt werden (AP 440).

AP 450-470: Ladeinfrastruktur

Ziel der TU Berlin, Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik, ist die Identifikation und Untersuchung übergreifender Modelle für das integrierte Angebot heterogener Ladeinfrastrukturen (Verortung, Ladeverfahren) unter Berücksichtigung von realitätsnahem Nutzerverhalten gewesen. In einem ersten Schritt ist dabei die Einordnung in einen ökonomischen Untersuchungsansatz erfolgt, der insbesondere die unterschiedlichen Eigenschaften von öffentlicher, halböffentlicher und privater Ladeinfrastruktur und aller gängigen Ladetechnologien (AC 1, AC 3, DC) abbildet.

Voraussetzung hierfür ist die Zusammenstellung von Erkenntnissen über das technische System und das Nutzerverhalten, sowohl auf Grundlage von Erkenntnissen aus dem Flottentest (Daimler, Uni Siegen, TU Berlin – FG Open Distributed Systems) als auch der relevanten Literatur gewesen. Im Zentrum stand die Erarbeitung einer Systematik für Koordinationsfragen sowie Angebots- und Regulierungsdimensionen im Kontext komplementärer Ladeinfrastrukturen und Ladetechnologien, aus der kurz- und langfristige (Unterscheidung Forschungsphase, Implementierungsphase, Angebotsphase sowie sequenzielle Maßnahmen für verschiedene Ladeinfrastrukturen) Handlungsoptionen und -empfehlungen für die öffentliche Hand abgeleitet werden sollten. Praktisch sind Fragen beispielsweise der technischen und institutionellen Standardisierung, Vorgaben zu Zugang und Vertrieb, Bereitstellung im Wettbewerb versus zentrale Vorgaben integriert untersucht worden. Diese Analysen sind zudem abschließend noch um zusätzliche technische Optionen und Nutzerprofile (u.a. Plug-In-Hybride, Carsharing-Fahrzeuge, Taxi-Unternehmen und ggfs. weitere) ergänzt worden.

AP 500: Geschäftsmodellierung

In eMERGE II werden Geschäftsmodelle rund um das Fahrzeug (Kosten- und Pricingkomponenten) und Fahrnutzungsprofil (Parken, Reichweiten, Tankverhalten, Beladung) aus der Total Cost of Ownership (TCO) Perspektive untersucht. Die TCO betrachtet alle anfallenden Kosten aus Kundensicht über die Nutzungsdauer eines Fahrzeugs. Dabei stehen drei Aspekte im Vordergrund:

Gesamtkosten. Hier werden die Gesamtkosten über die gesamte Nutzungsdauer eines Fahrzeugs ermittelt. Dazu zählen die Anschaffungskosten, Steuern, Versicherung, Betankung, Instandhaltung und Reparatur (inklusive Ersatzteile) und der Wiederverkaufswert. Die Gesamtkosten werden nicht nur je Fahrzeugeinheit, sondern auch je km ermittelt. Dabei erfolgt jeweils die Gegenüberstellung der

elektrisch betriebenen Fahrzeuge mit konventionell angetriebenen Referenzfahrzeugen der gleichen Fahrzeugklasse.

Verteilung der Kosten über die Nutzungsdauer. Im Vergleich zu Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren verschieben sich die Zahlungsströme während der Nutzungsdauer des Fahrzeugs. Einerseits treten zum Anschaffungszeitpunkt und ggf. beim Batterieersatzzeitpunkt hohe Zahlungen an, während die laufenden Auszahlungen während der Nutzungsdauer vergleichsweise niedrig ausfallen. Aus verhaltenswissenschaftlicher Sicht ergibt sich dadurch das Problem, dass die Nutzer zwar nach Kauf des Fahrzeugs die laufenden Kosteneinsparungen durch niedrigere Betankungskosten und andere Vergünstigungen wahrnehmen würden, aber das Fahrzeug aufgrund der hohen Anschaffungskosten in der Regel gar nicht erst erwerben. Die zeitliche Verteilung der Zahlungsströme über die Nutzungsdauer von Elektrofahrzeugen stellt damit eine wichtige Komponente für die Marktakzeptanz und damit auch für anbieterseitige Geschäftsmodelle inklusive der dafür relevanten Pricingmodelle dar.

Kostenrisiken. Wie bei allen Anschaffungen mit einer langen Nutzungsdauer bestehen beim Betrieb und Verkauf des Produkts erhebliche Kostenrisiken. Bezogen auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge sind hier insbesondere die Lebensdauer der Batterie (Ersatzteilkosten), der Wiederverkaufswert des Fahrzeugs, die Kosten der Betankung aufgrund eines dünnen und wenig standardisierten Tankstellennetzes sowie Warte- und Ausfallzeiten aufgrund der Nicht-Verfügbarkeit des Fahrzeugs (z.B. während Betankungsvorgängen) zu nennen. Grundsätzlich lässt sich die Attraktivität von elektrisch betriebenen Fahrzeugen steigern, wenn ein größerer Teil der Risiken anbieterseitig übernommen wird oder mindestens kompensatorische Leistungen angeboten werden.

In Summe kann daher festgehalten werden, dass die wahrgenommenen TCO weit über das Gesamtkostenkalkül hinausgehen. Deshalb bilden die Gesamtkosten inkl. der Kostenverteilung und Kostenrisiken bei der Gestaltung der Geschäfts-/Kooperations-/Pricingmodelle die Basis. Durch Standardisierung (z.B. der Fahrzeugbetankung) und die Verringerung der Nutzungskomplexität können die wahrgenommenen TCO erheblich gesenkt und das Gesamtangebot deutlich attraktiver gemacht werden. Ferner können die Gesamtkosten durch sinnvolle Kooperationsbeziehungen gesenkt werden und somit für alle beteiligten Akteure ein positives Chancen-Risiko entstehen. Zudem kann die wahrgenommene TCO aus verhaltenswissenschaftlicher Sicht durch potenzielle staatliche Maßnahmen z.B. regulatorische Eingriffe beeinflusst werden. Insgesamt trägt das Teilprojekt der RWTH Aachen dazu bei, die Attraktivität der Geschäftsmodelle sowohl aus Anbieter- als auch aus Nachfragersicht zu steigern.

AP 600: Flottentest

Die Basis für das Projekt eMERGE II stellt der Flottentest mit Mercedes-Benz B250e (Batteriefahrzeug) und Mercedes-Benz C350e bzw. E350e (Plug-In Hybride) dar. Dazu wurden Mercedes-Benz Autohäuser in ganz Deutschland über verschiedene Kommunikationskanäle über das Projekt informiert. Flankierend wurden Leitfäden und Schulungsunterlagen hinsichtlich Projektteilnahme erstellt, mit Hilfe dessen Kunden in den Autohäusern gezielt auf die Möglichkeit der Partizipation am Projekt angesprochen wurden.

Die Fahrzeuge dieser Kunden wurden mit Datenloggern ausgerüstet, um Fahr- und Ladedaten systematisch zu erfassen. Dazu wurden Einbauanleitungen für die am Projekt beteiligten Fahrzeugtypen erstellt und allen Händlern zur Verfügung gestellt, deren Kunden mit ihrem Fahrzeug teilnahmen. Parallel dazu wurde die IT-seitige Infrastruktur bei Daimler aufgesetzt, um die Daten zeitnah zu erfassen und auszuwerten.

1.2.2. Zeitplan und Meilensteine

Als die Hälfte der ursprünglichen Projektlaufzeit im Jahr 2016 vorbei war, stellte das Konsortium fest, dass eine größtenteils kostenneutrale Projektverlängerung für die Erreichung aller anvisierten Ziele vonnöten sein würde. Gründe dafür waren die Verzögerungen zu Beginn des Projekts, die zum einen aus dem späten Eingang der Zuwendungsbescheide resultierte. Da die Partner das Projekt erst dann mit vollem Ressourceneinsatz starten können, wenn der jeweilige Bescheid vorliegt, verzögerten sich der Beginn der Arbeiten. Zum anderen nahm die Kundenakquise und der damit verbundene Prozess der Teilnahmevereinbarungen sowie der Ausstattung der Fahrzeuge mit Datenloggern deutlich mehr Zeit als geplant in Anspruch, wodurch die Partner die Arbeitspakete, in denen sie auf Logdaten angewiesen waren, verschieben mussten.

Dementsprechend reichten die Partner im Herbst 2016 die Anträge zur Verängerung des Projekts um 6 Monate ein. Zwei der Partner (FKFS und RWTH Aachen) beantragten in geringem Maße Zusatzbudgets, bei allen anderen Partnern war die Verlängerung kostenneutral. Nach Genehmigung der Verlängerung war der Endzeitpunkt des Projekts nunmehr der 30.09.2017 (vormals 31.03.2017). Die RWTH Aachen und das FKFS verlängerten aufgrund der Aufstockung bis zum 31. Oktober).

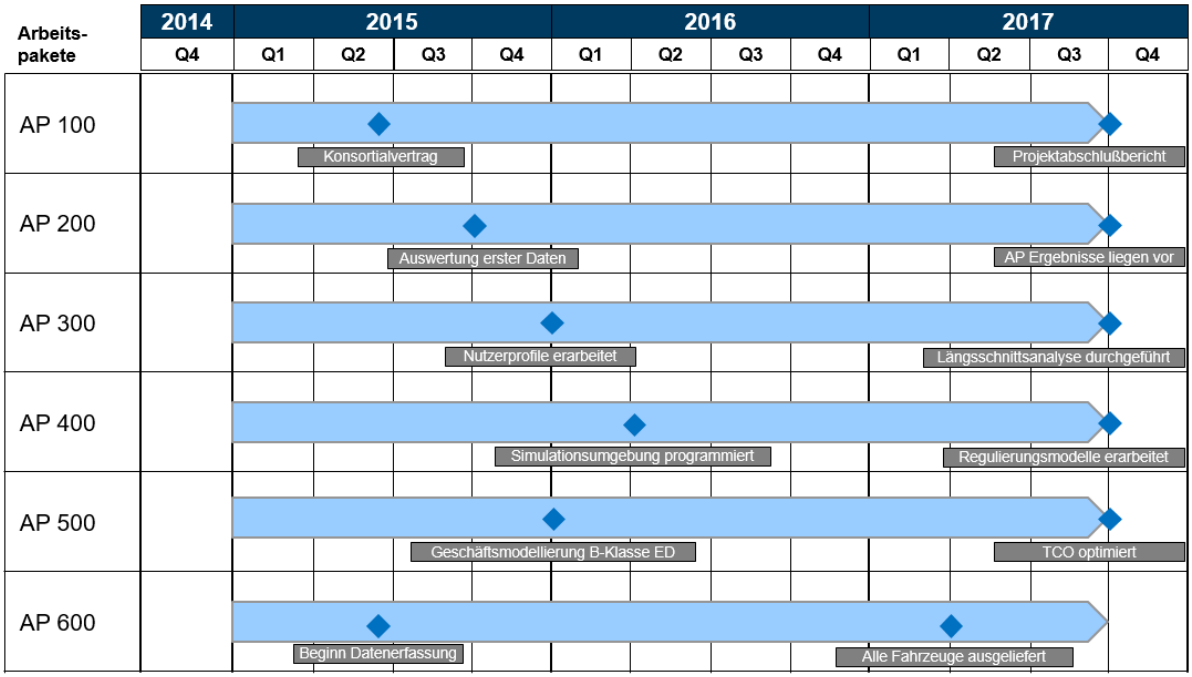


Abbildung 4: Meilensteinplan eMERGE II von 01.01.2015-30.09.2017

Durch die Verängerung konnte die Kundenakquise bis ins Quartal 1 des Jahres 2017 fortgeführt werden und 6 Monate länger Daten gesammelt werden. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Verzögerungen zu Beginn des Projekts durch die Verlängerung sowie eine intensivere Bearbeitung durch die Partner aufgefangen werden konnten und so keinen Einfluss auf die Ergebnisse hatten.

1.3. Projektpartner und Themenschwerpunkte

Daimler

Als Pionier des Automobilbaus gestaltet die Daimler AG auch weiterhin die Mobilität der Zukunft. Dazu spielt die Produktmarke EQ eine wichtige Rolle, in der Mercedes-Benz alle Aktivitäten rund um die Elektromobilität zusammenfasst. Bis 2025 will Mercedes-Benz Cars mehr als zehn Elektro-Pkw auf den Markt bringen: in allen Segmenten von smart bis zum großen SUV. Damit ist EQ ist ein elementarer Bestandteil der Unternehmensstrategie für die Mobilität der Zukunft, die unter dem Begriff CASE zusammengefasst wird. Die vier Buchstaben stehen für die strategischen Säulen Vernetzung, autonomes Fahren, flexible Nutzung und elektrische Antriebe, die das Unternehmen konsequent vorantreibt und intelligent verbindet.

Bei der Elektrifizierung des Antriebsstrangs folgt Mercedes Benz einem ganzheitlichen Ansatz und entwickelt neben der Marke EQ mit einer Fahrzeugfamilie auch ein ganzheitliches Ökosystem, das neben dem reinen Fahrzeug ein umfassendes Angebot rund um die Elektromobilität enthält. Dieses reicht von intelligenten Services über Energiespeicher für private und gewerbliche Kunden sowie Ladetechnologien wie dem induktiven Laden bis hin zum nachhaltigen Recycling.

Mit dem Elektro-Smart seit 2007, der A-Klasse E-CELL und der B-Klasse B250e wurde der Grundstein für den Start einer Elektro-Offensive gelegt, mit der die Daimler AG alle Fahrzeugsegmente von der Kompakt- bis zur Luxusklasse abdecken wird. Mit diesen Fahrzeugen engagierte sich Daimler in verschiedenen Förder- und Demonstrationsprojekten u.a. auch beim Vorgängerprojekt zu eMERGE II.

Abbildung 5: B250e und smart fortwo electric drive beim Ladevorgang

Für das Projekt eMERGE II, in dessen Verlauf fast 400.000 Kilometer durch die Kunden gefahren wurden, stellte Daimler 122 B-Klasse B250e sowie Plug-In Hybride der C-Klasse C350e und E-Klasse E350e zum Kundeneinsatz zur Verfügung. Die dabei gesammelten Daten wurden systematisch hinsichtlich

ihrer Belastung analysiert und dienten dann der Optimierung der Auslegung von Fahrzeugkomponenten in elektrifizierten Antriebssträngen. Darüber hinaus stellte Daimler den Partnern umfangreiche Fahr- und Ladedaten für die Evaluierung des Feldtests bereit. Besonders interessant war die parallele Erfassung von Daten in reinen Batteriefahrzeugen sowie Plug-In Hybrid Fahrzeugen. Dadurch konnten die Fahr- und Ladedaten dergestalt analysiert werden, dass die Unterschiede der beiden Fahrzeugkonzepte herausgearbeitet wurden.

FKFS

Das FKFS (Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart), gegründet 1930 an der ehemaligen TH Stuttgart, ist eine unabhängige Forschungseinrichtung in der Rechtsform einer Stiftung des bürgerlichen Rechts. Das FKFS führt Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Automobiltechnik sowohl in Kooperation mit Industrieunternehmen als auch im Rahmen öffentlich finanzierter Vorhaben durch. Am FKFS werden in Kooperation mit der Universität Stuttgart Studierende und Doktoranden ausgebildet. Ferner veranstaltet das FKFS wissenschaftliche Fachtagungen zur Kraftfahrzeugtechnik und veröffentlicht regelmäßig wissenschaftliche Ergebnisse bei Fachtagungen und in Zeitschriften.

Abbildung 6: eMERGE II Teilnehmer vor dem FKFS in Stuttgart

Im Rahmen des Projekts eMERGE II hat das FKFS auf der Basis der Nutzungsdaten ein Auslegungsverfahren für Elektro- und Plug-In Hybridfahrzeuge entworfen, das eine optimale technische Dimensionierung der Komponenten des Elektro- bzw. Hybridantriebs für gegebene Einsatzszenarien ermöglicht, z.B. für den Arbeitsplatz- und Kurzstreckenfahrer. Bei der Antriebsstrangauslegung wurden hierbei folgende Arbeitsziele umgesetzt:

- Ermittlung antriebsrelevanter Nutzungsszenarien im Nutzungsverhalten während des Realbetriebs
- Modellbildung eines Plug-In-Hybrid-Antriebstrangs inklusive Antriebsaggregate, Getriebe, Leistungselektronik und Batterie und Aufbau einer Simulationsumgebung zur Berechnung der Belastungen im elektrischen und mechanischen Gesamtsystem
- Bestimmung der repräsentativen Lastkollektive im elektrischen Antriebsstrang
- Entwicklung eines Auslegeverfahrens unter Berücksichtigung der Komponentenbelastung für die ermittelten Anwendungsfälle und Nutzungsszenarien

RWTH Aachen University – Lehrstuhl für Controlling

Die *RWTH Aachen University* ist als eine von elf Exzellenzuniversitäten auf die Erforschung von Zukunftsthemen ausgerichtet. Der *Lehrstuhl für Controlling* ist in zahlreichen Drittmittelprojekten eingebettet, die von dynamischen Veränderungen von Produktionssystemen bis zur Energiewende reichen. Ein Schwerpunkt des Lehrstuhls bildet die Entwicklung und Vernetzung von Geschäftsmodellen entlang durchgängiger Wertschöpfungsketten, insbesondere in der Automobilindustrie.

Im Projekt eMERGE II wurden Geschäftsmodelle rund um das Fahrzeug (Kosten- und Pricingkomponenten) und Fahrnutzungsprofil (Parken, Reichweiten, Tankverhalten, Beladung) aus der Total Cost of Ownership (TCO) Perspektive entwickelt. Dabei sind in der „Total Cost of Ownership" alle anfallenden Kosten aus Kundensicht über die Nutzungsdauer eines Fahrzeugs einbezogen worden.

Das Arbeitspaket „Geschäftsmodellierung" lieferte wichtige allgemeine Erkenntnisse, die kontextspezifisch für verschiedene technische Lösungen, Tarifsysteme und Marktentwicklungen (z.B. Energie- und Benzinpreise) betrachtet werden. Somit werden nicht nur für das Forschungsvorhaben wichtige Inputs geliefert, sondern auch vielversprechende Geschäftsmodelle für Investoren, Anbieter und Nutzer der Elektromobilität auf allgemeiner und generalisierbarer Weise aufgezeigt.

Abbildung 7: Mercedes-Benz B250e im Projekt eMERGE II

- Ermittlung der Total Cost of Ownership unter Einbezug der Verteilung der Zahlungsströme und der Kostenrisiken für BEVs sowie HEVs und Vergleich mit konventionell angetriebenen Referenzmodellen (Benziner/Diesel) der jeweils gleichen Fahrzeugklasse.
- Ermittlung der differenzierten anbieterseitigen Geschäftsmodelle unter Berücksichtigung der Daten der B-Klasse ED.
- Entwicklung von Standardisierungsvorschlägen und Möglichkeiten der Komplexitätsverringerung, welche die TCO positiv beeinflussen.
- Herausarbeitung von Kooperationserfordernissen aus TCO- und Anbietersicht.
- Konzeption von Pricingmodellen, die eine positive Auswirkung auf die TCO haben.

TU Berlin – Fachgebiet Softwaretechnik (SWT)

Die TU Berlin – Fachgebiet Softwaretechnik (SWT) ist auf die Konzeptionierung, Entwicklung und Umsetzung von Methoden und Werkzeugen im Forschungsfeld der angewandten Softwaretechnik spezialisiert. Dies beinhaltet konzeptionelle Erweiterungen zu gängigen Entwicklungswerkzeugen. Mit

den Ergebnissen dieser Forschung konnten bereits mehrfach Effektivitäts- und Effizienzsteigerungen durch Automatisierung in Entwicklungsprozessen erreicht werden.

Es besteht bei diesen Themen eine enge Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut Informatik (FZI) sowie mit Daimler RD E/E. Gemeinsam wird nach konkreten Herausforderungen im industriellen Umfeld gesucht, die durch Automatisierung verbessert werden können. Gefundene Herausforderungen werden dann generalisiert und ein allgemeines Lösungskonzept mit einem Toolprototypen wird erstellt.

Im Projekt eMERGE II analysierte SWT die bei Daimler eingesetzte Spezifikationslandschaft zur Erhebung von Anforderungen an Systeme von Elektrofahrzeugen. Ziel war eine auf Basis der Analyse den Spezifikations- und Absicherungsprozess bei der Entwicklung von BEV und PHEV weiterzuentwickeln.

TU Berlin – Fachgebiet Open Distributed Systems (ODS)

Das Fachgebiet Open Distributed Systems (ODS) an der Technischen Universität Berlin erforscht und entwickelt Protokolle, Architekturen, Plattformen und Werkzeuge rund um Mehrwertdienste in Kommunikationsnetzen. Die Bereiche Web-centric Communication und Automotive Communication bilden hierbei den Kern der Aktivitäten. Im Auftrag von Industrie, Stadt, Bundesministerien und Europäischer Union werden Studien erarbeitet, Technologien entwickelt, Prototypen realisiert und Feldtests durchgeführt.

Das Fachgebiet ODS pflegt enge Beziehungen zum Fraunhofer-Institut für offene Kommunikationssysteme FOKUS, welches aktiv in der Spezifizierung, Erforschung und Standardisierung von fahrzeugübergreifender Kommunikation tätig ist. Sowohl das fahrzeugeigene Funktions- und Kommunikationsnetz, als auch die Einbettung des individuellen Fahrzeugs in fahrzeugübergreifende Netze sind die Bausteine heutiger und zukünftiger Innovationen und Eckpfeiler der Forschungsaktivitäten von ODS. Dabei wird bei ODS ein integrierter Ansatz verfolgt, der von einer realistischen Simulation von Anwendungen und Systemen über die Integration von Produkten in Forschungsfahrzeugen bis hin zur Erprobung kooperativer Fahrmanöver im Model Car Testbed reicht.

Auf Grundlage dieser Infrastruktur und der langjährigen Expertise ist es dem Fachgebiet ODS möglich, innovative Dienste zu entwickeln und sie im Hinblick auf eine erlebbare Mensch-Maschine Schnittstelle als auch auf die Wirkung bezüglich der Verkehrssicherheit und -effizienz umfassend zu evaluieren. Ausgangspunkt dafür sind immer interoperable und standardkonforme Systeme bei maximaler technischer Flexibilität und Skalierbarkeit. Das Fachgebiet ODS entwickelt personalisierte Assistenzsysteme für Elektrofahrzeuge und entwickelt Steuerkonzepte für Elektro- und Hybridfahrzeuge.

TU Berlin – Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP)

Am Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik der TU Berlin werden einerseits wirtschaftspolitische Themen in Infrastruktursektoren und andererseits Fragen des (Infrastruktur-)Managements durch die öffentliche Verwaltung betrachtet. Im Vordergrund stehen die Infrastruktursektoren Verkehr und Energie. Außerdem werden Fragen der Wasser-, Abfall- und Entsorgungswirtschaft, der Telekommunikation und der Telematik sowie des öffentlichen Beschaffungswesens (auch jenseits der bereits genannten Sektoren) untersucht. Bei den Analysen wird insbesondere auf die Erkenntnisse der Institutionenökonomik sowie außerdem der Industrieökonomik und der Wohlfahrtsökonomik zurückgegriffen. Auf dieser Basis werden in insbesondere betrachtet:

- Fragen der Planung und Bereitstellung, Finanzierung und Bepreisung sowie Organisation und Regulierung von Infrastrukturen,
- Fragen zur Rahmensetzung, Regulierung und Wettbewerbspolitik sowie zu Unternehmensstrategien im Bereich der Suprastruktur (z.B. bei Verkehrsangeboten oder Kraftwerksinvestitionen und -betrieb),
- sowie Fragen zur vertikalen und horizontalen Koordination und (Des-)Integration (einschließlich Fragen der Koordination im staatlichen Mehrebenensystem) bei der Bereitstellung und Leistungserstellung in Infrastruktursektoren.

Themenschwerpunkt im Projekt eMERGE II ist Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge gewesen, für die übergreifende Modelle für das integrierte Angebot heterogener Ladeinfrastrukturen (Verortung, Ladeverfahren) unter Berücksichtigung von realitätsnahem Nutzerverhalten untersucht worden sind. Im Zentrum stand die Erarbeitung einer Systematik für Koordinationsfragen sowie Angebots- und Regulierungsdimensionen im Kontext komplementärer Ladeinfrastrukturen und Ladetechnologien, aus der kurz- und langfristige (Unterscheidung Forschungsphase, Implementierungsphase, Angebotsphase sowie sequenzielle Maßnahmen für verschiedene Ladeinfrastrukturen) Handlungsoptionen und -empfehlungen für die öffentliche Hand abgeleitet werden sollen.

Universität Siegen

Die Universität Siegen ist eine junge moderne Hochschule im Zentrum des Dreiländerecks Nordrhein-Westfalen, Hessen und Rheinland-Pfalz. Unter dem Motto „Zukunft menschlich gestalten“ verfügt die Universität im Bereich der Forschung über ein breites Spektrum von Aktivitäten, die sowohl grundlagen- als auch anwendungsorientierte Forschung umfassen. Besonders ist hierbei die Förderung der transdisziplinären Forschung innerhalb der Universität und der Kooperationen mit anderen Hochschulen und Forschungszentren.

Die Forschung des Lehrstuhls für Marketing an der Universität Siegen ist stark praxisorientiert ausgerichtet und durchgehend empirisch angelegt und stellt die Ableitung von Managementimplikationen und damit die praktische Umsetzbarkeit in den Vordergrund. Seit Mai 2009 wird der Lehrstuhl von Prof. Dr. Hanna Schramm-Klein geleitet.

Im Rahmen von eMERGE II untersuchte der Lehrstuhl das Nutzerverhalten von aktiven Fahrern der B-Klasse B250e bzw. der C-Klasse C350e. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen psychologische Aspekte, die eine Nutzung dieser Fahrzeuge fördern. Darüber hinaus wurden Kundengruppen definiert und Anreizsysteme zur Steigerung der Nachfrage dieser Fahrzeuge analysiert.

Eingehende Darstellung

2. AP200 - Fahrzeugseitige Anforderungen

2.1. AP 210: Spezifikation und Absicherung xEV

2.1.1. Ziel des Arbeitspakets

Ziel ist die Weiterentwicklung der bei Daimler eingesetzten Spezifikations- und Absicherungsmethoden in der Entwicklung von Systemen für Elektrofahrzeuge (xEV).

2.1.2. Aktivitäten, Verlauf und Ergebnisse

Im Mittelpunkt des Arbeitspakets stand zunächst die Betrachtung der aktuell eingesetzten Werkzeuge und Methoden zur Spezifikation und Absicherung der Elektrofahrzeuge bei Daimler. Darauf aufbauend wurde eine Untersuchung mit einer Befragung von Beteiligten durchgeführt. Dies diente als Grundlage, um in Hinblick auf AP 280 einen Überblick über Möglichkeiten zur Verbesserung der Methoden und über Potentiale zur Automatisierung zu erhalten.

Das aktuell bei Daimler eingesetzte Werkzeug zur Spezifikation und Absicherung ist IBM Rational DOORS® (im Folgenden Doors genannt). Dabei handelt es sich um eine Software für das Anforderungsmanagement [DOORS]. Die Software ermöglicht die Verwaltung von Elementen der Spezifikation und Absicherung in textueller Form. Im Rahmen der Softwareentwicklung werden jegliche Erzeugnisse die während der Entwicklung anfallen als Entwicklungsartefakt bezeichnet. Entwicklungsartefakte bei der Spezifikation und Absicherung sind unter anderem Anforderungen und Testfälle.

Anforderungen sind Elemente, die festlegen was ein Produkt oder eine Dienstleistung erfüllen muss. Testfälle dienen dazu das entwickelte Produkt beziehungsweise die implementierte Software auf Einhaltung der Anforderungen zu überprüfen.

Sowohl die Aufzeichnung von Anforderungen als auch von Testfällen findet in Doors statt. Bei dieser Aufzeichnung handelt es sich um natürlich sprachlichen Text, das heißt der Text entspricht der von Menschen genutzten Sprache. Zur besseren Strukturierung und Anpassbarkeit an Prozesse während der Systementwicklung werden *Templates* (Vorlagen) eingesetzt. Neben textuellen Einträgen ist auch das Einbinden und Darstellen von Bildern möglich. Alle weiteren Elemente können lediglich verlinkt werden.

Die Templates geben eine Struktur für Spezifikations- und Absicherungsdokumente vor. Neben der Anwendbarkeit bei darauffolgenden Prozessen dient dies sowohl der Steigerung der Qualität der Dokumente als auch der Möglichkeit zur Automatisierung anhand der vorliegenden Anforderungen und Testfälle. Neben Strukturen wie Kapiteln und Überkapiteln bietet Doors die Möglichkeit der Attribuierung einzelner Elemente. Dies wird zur Unterscheidung von Erläuterungen und eigentlichen Anforderungen genutzt. Bei Daimler wird dies auch zum Variantenmanagement genutzt. Beispielsweise werden Anforderungen, die nur für bestimmte Baureihen relevant sind mit einem Eintrag in einem entsprechenden Attribut markiert.

Testfälle werden ebenfalls in textueller Form in eigenständigen Dokumenten (Testspezifikation) aufgezeichnet. Spezifikationsdokumente enthalten bis zu mehreren tausenden Einträgen. Beispielsweise besteht allein das Ladesystem aus einer zweistelligen Anzahl an Fahrzeugfunktionen, die jeweils von mehreren hundert Anforderungen beschrieben werden. Jede dieser Anforderungen muss durch mindestens einen Testfall abgesichert werden. Um Testfälle den richtigen Anforderungen zuzuordnen, werden Testfälle und Anforderungen miteinander verlinkt. Eine Automatisierung dessen bietet die Möglichkeit Ressourcen zu sparen und Fehler bei der Verlinkung zu vermeiden. Abgeschlossene Vorhaben bei Daimler haben sich bereits diesem Thema gewidmet [NKH14].

ID	Ebene	Anforderungstext	Type
1	1	**1 Spezifikation**	Überschrift
11	2	**1.1 Fahrzeugfunktionen**	Überschrift
2	3	**1.1.1 Funktion A**	Überschrift
4	4	Anforderung A.1	Anforderung
5	4	Anforderung A.2	Anforderung
8	5	Anfoderung A.2.1	Anforderung
9	5	Anforderung A.2.2	Anforderung
7	4	Anforderung A.3	Anforderung
3	3	**1.1.2 Funktion B**	Überschrift
13	3	Anforderung B.1	Anforderung
14	3	Anforderung B.2	Anforderung
12	2	**1.2 Ansprechpartner**	Überschrift
17	3	Frau Mann	Information
18	3	Herr Muster	Information

ID	Ebene	Testbeschreibung	Type
1	1	**1 Testspezifikation**	Überschrift
2	2	**1.1 Tests Funktion A**	Überschrift
4	3	Tests Anforderung A.1	Test
5	4	Test 1	Test
8	5	Testschritt 1	Test
9	5	Testschritt 2	Test
10	5	Testschritt 3	Test
17	5	Testparameter:	Test
18	6	Parameter 1	Test
19	6	Parameter 2	Test
6	4	Test 2	Test
7	4	Test 3	Test
11	3	Test Anforderung A.2	Test
12	4	...	
13	3	Test Anforderung A.3	Test
14	4	...	
3	2	**1.2 Tests Funktion B**	Überschrift
15	3	Test Anforderung B.1	Test
21	4	...	
16	3	Test Anforderung B.2	Test
22	4	...	

Abbildung 8: Spezifikationsdokument und Testspezifikation in Doors

In Abbildung 8 sind alle diese Funktionen beispielhaft dargestellt. Zu sehen ist ein Spezifikationsdokument und die dazugehörige Testspezifikation. Beide Dokumente werden durch verschiedene Ebenen strukturiert und einzelne Elemente dadurch detailliert. Die Links zwischen den Elementen sind am Elementtext durch Pfeile dargestellt (Orange: eingehend, Rot: ausgehend). Die Verknüpfungen können dabei verschiedene Typen aufweisen. Zudem kann ein Element mehrfach eingehende und ausgehende Verknüpfungen besitzen.

Neben der Möglichkeit Anforderungen textuell zu beschreiben, wird bei der Spezifikation von Systemen von Elektrofahrzeugen auch von der Option Gebrauch gemacht grafische Modelle zu verwenden. Bei dem Ladesystem wird jede Fahrzeugfunktion zusätzlich durch ein UML ([UML]) Aktivitätsdiagramm beschrieben. Als Modellierungswerkzeug wird bei Daimler *Enterprise Architect* ([EA]) verwendet. Vorteile der grafischen Beschreibung liegen in der Verbesserung der Wiederverwendbarkeit und analytischen Einsatzmöglichkeiten [AD97], [VEH14]. Dies kommt vor allem während früheren Entwicklungsphasen wie der Spezifikation zum Tragen. Damit einhergehend ist es möglich frühzeitig auftretende Unstimmigkeiten, Unvollständigkeit und Fehler aufzudecken [AB05].

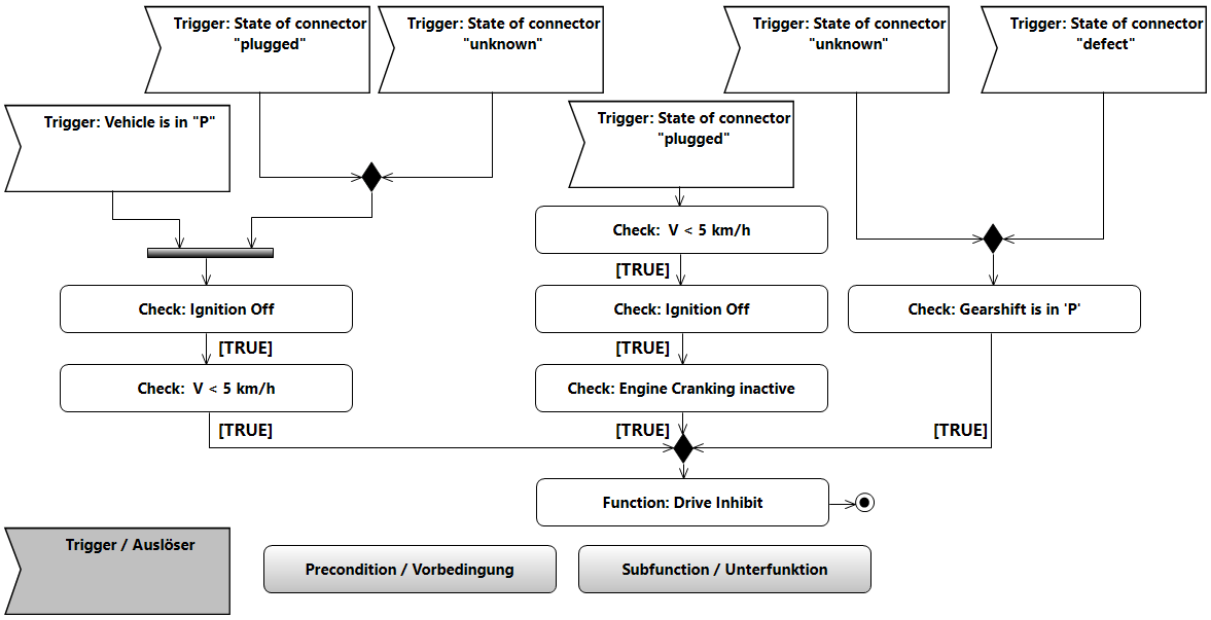


Abbildung 9: Aktivitätsdiagram zur Beschreibung von Systemverhalten

In Abbildung 9 dargestellt ist ein vereinfachtes Beispiel eines UML Aktivitätsdiagramms wie es in der Spezifikation des Ladesystems vorkommt. Das Aktivitätsdiagramm beschreibt den Ablauf der Funktion *Drive Inhibit* (Wegfahrsperre bei angeschlossenem Ladekabel). Dabei werden durch unterschiedliche Auslöser (Trigger) die Abläufe aktiviert. Nach dem Auslösen einer Fahrzeugfunktion kann die Überprüfung von Vorbedingungen (Preconditions / Checks) stattfinden. Diese Art der Beschreibung von funktionellen Abläufen ist im Bereich der Formulierung von textuellen Anforderungen ein übliches Vorgehen [DF04]. Ebenso ist die Ausführung von detaillierteren Unterfunktionen (Subfunction) möglich. All diese Elemente können miteinander verknüpft werden. Das in dem grafischen Modell beschriebene Verhalten der Fahrzeugfunktion kann somit ebenfalls zur Spezifikation des Systems genutzt werden. Vorteil ist die übersichtlichere Darstellung im Vergleich zur textuellen Betrachtung [KM99]. Neben den Bildinformationen können jedoch keine weiteren Daten des grafischen Modells genutzt werden, was die Nutzung der grafischen Modelle einschränkt. Die Nutzung von grafischer Modellierung ist notwendig, um der steigenden Komplexität von Software in Hybrid- und Elektrofahrzeugen gerecht zu werden [BROY06].

Daimler wendet einen Ansatz an, der die Verwendung von textueller Spezifikation mit der grafischen Modellierung kombiniert. Diese Kombination wird für den Spezifikationsprozess als nützlich angesehen [AB05], [STP12]. Neben den Vorteilen der grafischen Modellierung ist eine textuelle Beschreibung jedoch zwingend notwendig. Gründe dafür liegen in der rechtlichen Verbindlichkeit [STP12], [MMJ05] und in der Tatsache, dass nicht alle Beteiligten in der Lage sind grafische Modelle zu verstehen [AEQ98].

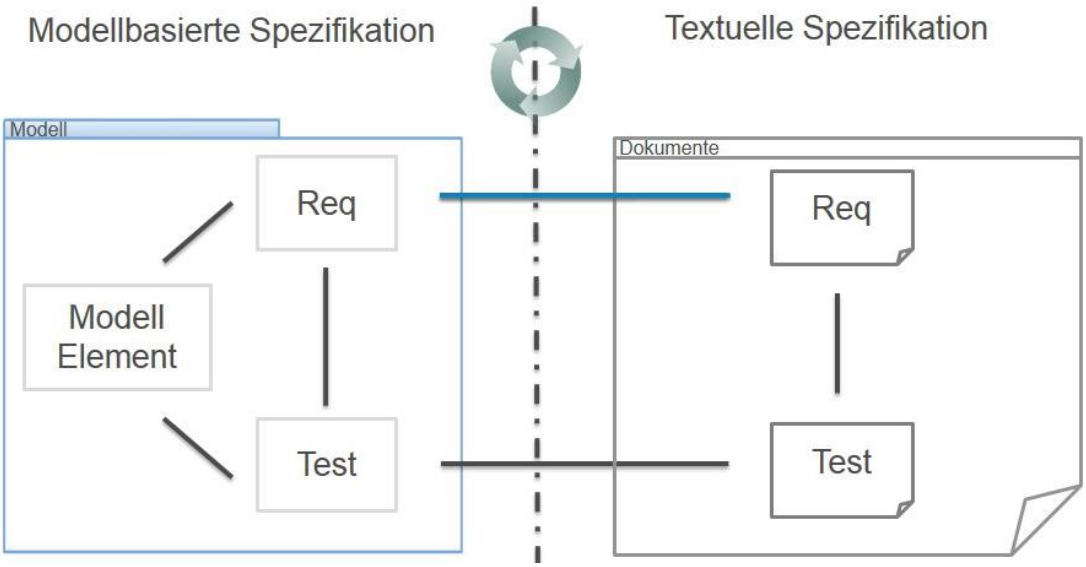


Abbildung 10: Zusammenhänge der textuellen und modellbasierten Spezifikation

In Abbildung 10 dargestellt sind die Bestandteile, die im Rahmen der modellbasierten und textuellen Spezifikation entstehen, dargestellt. Im Fokus des Spezifikationsprozesses stehen die Anforderungen (Req). Anforderungen können sowohl in einem grafischen Modell als in einem Spezifikationsdokument vorhanden sein. Der Zusammenhang zwischen Modellelementen und Anforderungen kann hierbei verschiedene Formen annehmen. Ein Modellelement kann einer Anforderung entsprechen. Jedoch kann ein Modellelement auch mehrere Anforderungen ausdrücken. Durch die Verbindung mehrerer Modellelemente ist es auch möglich, dass mehrere Modellelemente eine Anforderung ausdrücken. Aufgrund iterativer Entwicklungsprozesse findet dabei ein kontinuierlicher Austausch von Informationen zwischen der modellbasierten Spezifikation und der textuellen Spezifikation statt.

Über die Realisierung der Kombination von grafischen Modellen und textuellen Beschreibungen wurde eine Untersuchung durchgeführt [BVR17]. Ziel dieser Untersuchung war herauszufinden, ob dieser Ansatz neben seinen Vorteilen zu Problemen führt und welche Lösungsmöglichkeiten sich für die potentiellen Beeinträchtigungen bieten. Auf Basis dieser Untersuchung sollen Verbesserungen abgeleitet werden, um den Spezifikationsprozess weiter zu entwickeln.

Als erster Schritt wurden bestehende Fahrzeugfunktionen des Lastenheftes Ladesystems im Hinblick auf Qualitätskriterien untersucht, die durch relevante Normen der Automobilindustrie wie IEEE Std 830-1998 [IEEE830], CMMI-Dev [CMMI] und Automotive SPICE [ASPICE] vorgegeben werden.

Als Ergebnis dieses Schrittes sind neun Kategorien entstanden, welche Typen von verschiedenen auftretenden Beeinträchtigungen dieses Spezifikationsansatzes darstellen. Die Namen der Kategorien sowie deren Beschreibungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Beeinträchtigungen und deren Beschreibung

Name der Kategorie	**Beschreibung**
Fehlende Nachvollziehbarkeit	Es ist keine Information vorhanden, um ein Modellelement zu seinem korrespondierenden Textobjekt zuzuordnen.
Fehlendes Modellelement / Textobjekt	Im Aktivitätsdiagramm oder im Lastenheft sind Entitäten, welche im jeweils anderen nicht vorhanden sind.
Falscher aussagenlogischer Zusammenhang	Der aussagenlogische Zusammenhang im Aktivitätsdiagramm weicht von dem im Lastenheft ab oder die logischen Verbindungen sind nicht eindeutig.
Textuelle Unterschiede	Modellelemente und ihre korrespondierenden Textobjekte weichen textuell voneinander ab.
Redundantes Elemente	Im Aktivitätsdiagramm sind mehrere Modellelemente enthalten, die den gleichen Text und Typ haben.
Nicht Atomare Modellelemente / Textobjekte	Ein Modellelement oder Textobjekt, welches mehrere Aussagen enthält.
Falsche Platzierung	Die Platzierung eines Modellelementes im Aktivitätsdiagramm stimmt nicht mit der Platzierung im Lastenheft überein.
Unnötige Wiederholung	Im Lastenheft sind mehrere Textobjekte, welche von einem Modellelement im Aktivitätsdiagramm abgeleitet sind.
Falscher Typ	Der Typ eines Modellelementes stimmt nicht mit dem Typ seines korrespondierenden Textobjektes überein.

Auf Basis dieser Kategorien wurde im zweiten Schritt der Untersuchung ermittelt wie oft einzelne Instanzen dieser Kategorien im Lastenheft tatsächlich auftreten. Hierzu wurden alle Fahrzeugfunktionen (36) des Ladesystems untersucht. Um die Anzahl von Fehlern zu verringern, wurde diese Arbeit von zwei Personen unabhängig durchgeführt. Die Ergebnisse wurden anschließend verglichen. Die resultierenden Zahlen sind in Tabelle 3Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Beeinträchtigungen sortiert nach Vorkommen in den Fahrzeugfunktionen

Name der Kategorie	**Ergebnis**	**Anzahl und Verhältnis der betroffene Funktionen**	**Durchschnittliche Anzahl je Funktion**
Fehlende Nachvollziehbarkeit	Alle	36 (100 %)	-
Fehlendes Modellelement / Textobjekt	126	28 (78 %)	3,5
Falscher aussagenlogischer Zusammenhang	29	22 (61 %)	0,8
Textuelle Unterschiede	43	20 (56 %)	1,2
Redundantes Element	24	15 (42 %)	0,66
Nicht Atomare Modellelemente / Textobjekte	18	14 (39 %)	0,5
Falsche Platzierung	18	10 (28 %)	0,5
Unnötige Wiederholung	15	9 (25 %)	0,42
Falscher Typ	10	8 (22 %)	0,28

Aus den Ergebnissen ergibt sich, dass keinerlei Verbindung zwischen den Modellelementen und Textobjekten vorhanden ist. Grund hierfür ist die manuelle Übertragung der Informationen aus dem Aktivitätsdiagramm in das Lastenheft, da notwendige Information im Modellierungswerkzeug nur schwer zugänglich sind. Danach tritt die Kategorie *Fehlendes Modellelement / Textobjekt* mit 126 Vorkommen am Häufigsten auf. Alle weiteren Kategorien waren mindestens in fast einem Viertel aller Funktionen zu finden.

Im dritten Schritt der Untersuchung ging es darum herauszufinden, welche Auswirkungen die Beeinträchtigungen haben. Aus diesem Grund wurden sieben beteiligte Experten befragt, welche die Spezifikationsdokumente des Ladesystems nutzen. Den Teilnehmern der Umfrage wurden zu jeder Kategorie zwei Exemplare aus dem Lastenheft präsentiert. Zu jedem Exemplar wurden drei Fragen gestellt:

- Frage 1: Waren Sie sich der Existenz bewusst?
- Frage 2: Halten sie dieses Beispiel für eine Beeinträchtigung?
- Frage 3: Wann würden Sie diese Beeinträchtigung beheben?

Die letzte Frage zielt auf die Schwere der Beeinträchtigung ab und bot folgende Antwortmöglichkeiten: Sofort, bald, langfristig, nie. Die Ergebnisse der Befragung sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

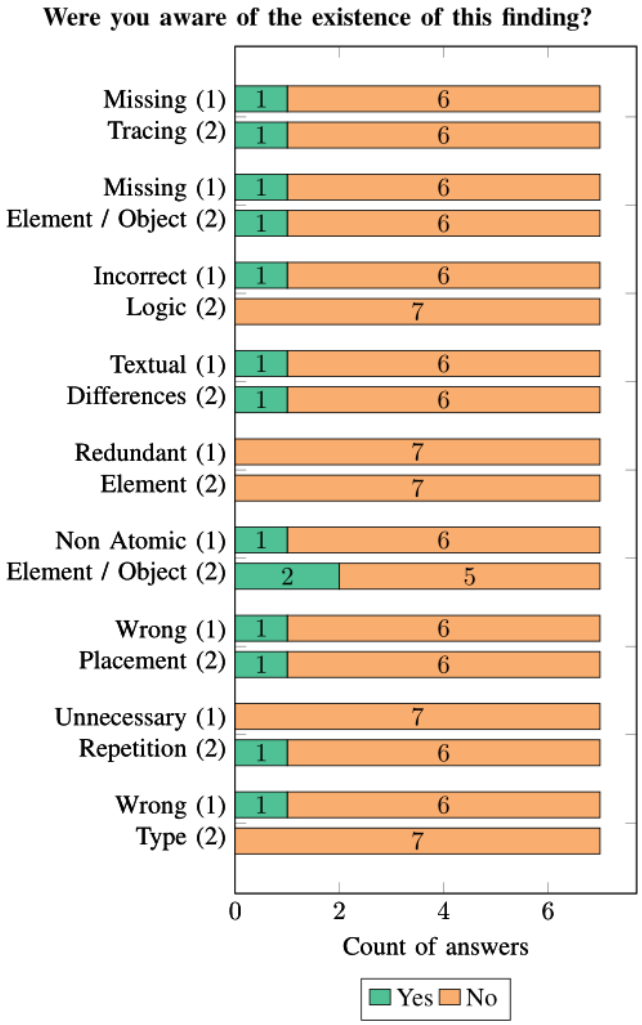


Abbildung 12: Antworten zu Frage 1

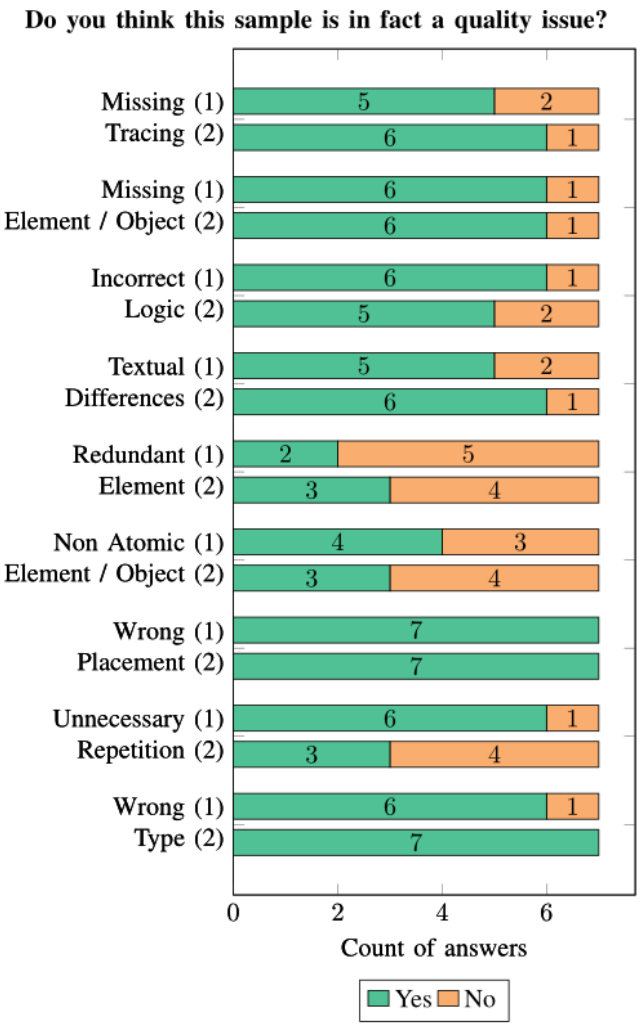


Abbildung 11: Antworten zu Frage 2

In Abbildung 12**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die neun Kategorien mit jeweils zwei Beispielen dargestellt. Jeder Balken repräsentiert die Antworten der Teilnehmer. Die Beispiele waren größtenteils den Teilnehmern unbekannt. Fünf der Beispiele waren keinem der Teilnehmer bekannt. Nur ein Beispiel der Kategorie *Nicht Atomare Modellelemente / Textobjekte* war zwei Teilnehmern bekannt. In den Beispielen, in denen mindestens eine Person angegeben hat, sich des Vorkommnis bewusst zu sein, handelt es sich immer um dieselbe Person.

Das Diagramm in Abbildung 11 ist vom Aufbau her identisch mit Abbildung 12. Von den 18 Beispielen wurden 14 von einer Mehrheit der Beteiligten als Beeinträchtigungen der Qualität der Spezifikation bewertet. Bei drei Beispielen stellten alle Beteiligten fest, dass es sich um eine Beeinträchtigung des Spezifikationsdokumentes handelt. Dabei handelt es sich um die beiden Beispiele der Kategorie *Falsche Platzierung* und *Falscher Typ*. Diese beiden Kategorien und die Kategorie *Fehlendes Modellelement / Textobjekt* erreicht die höchste Übereinstimmung. Die Kategorien mit der geringsten Übereinstimmung sind *Redundantes Element, Nicht Atomare Modellelemente / Textobjekte* und *Unnötige Wiederholung*. Jedoch besteht bei den beiden letzteren Kategorien immer noch ein Einverständnis von mindestens der Hälfte der Befragten. Während in den meisten Kategorien beide Beispiele ähnliche Übereinstimmung erreichten, ist bei der Kategorie *Unnötige Wiederholung* die größte Abweichung zu beobachten.

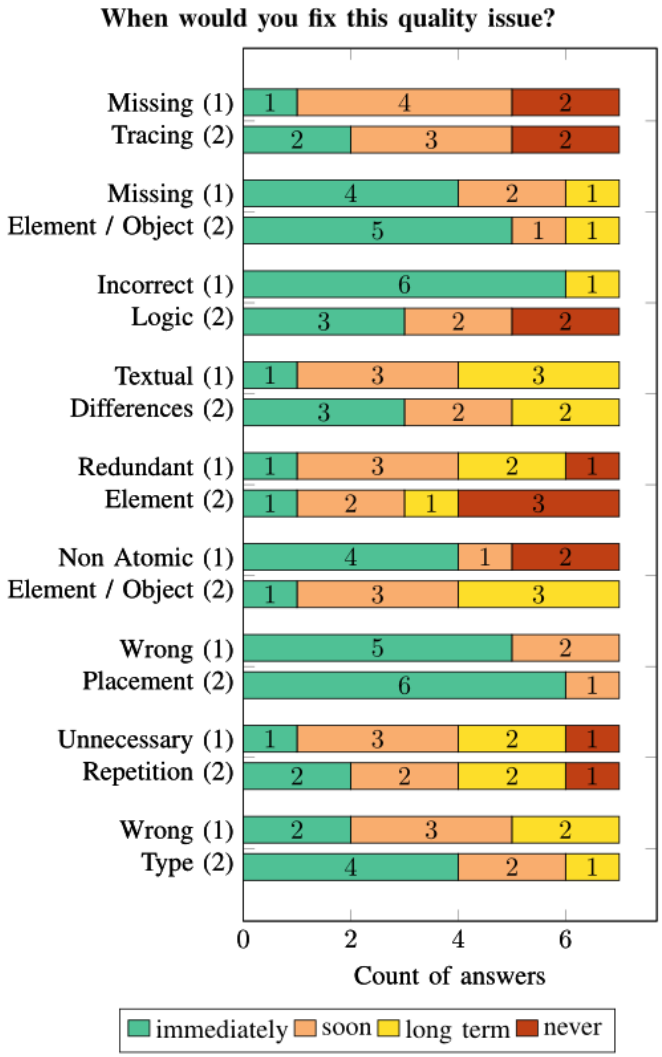


Abbildung 13: Antworten zu Frage 3

Das Diagramm in Abbildung 13 stellt die Antworten zu Frage 3 dar. Der Aufbau ist identisch mit dem Aufbau der beiden vorherigen Diagramme. Die Kategorie deren Beispiele am schwerwiegendsten aufgefasst werden ist *Falsche Platzierung*. Die Kategorie mit der geringsten Schwere ist *Redundantes Element*. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Antworten zu der Kategorie aus Frage 2. Einige der Beispiele wurden recht unterschiedlich eingeschätzt. Dies betrifft *Nicht Atomare Modellelemente / Textobjekte* und *Falscher aussagenlogischer Zusammenhang*. Bei beiden Kategorien gibt es zwischen den Beispielen erhebliche Unterschiede in der Wahrnehmung der Schwere.

Insgesamt betrachtet fällt auf, dass für alle Beispiele die Beteiligten mehrheitlich mit Ausnahme eines Beispiels mindestens die Antwortmöglichkeit *bald* verwendet haben. Auch wenn sich die Dringlichkeit der Behebung zwischen den Kategorien teils erheblich unterscheidet, kann aus diesen Ergebnissen gefolgert werden, dass die Behebung dieser Beeinträchtigungen sich positiv auf die Qualität des Lastenheftes auswirkt.

Diesen Beeinträchtigungen kann begegnet werden, indem die Tätigkeit des Übertragens vom grafischen Modell zum Lastenheft verbessert wird. In der Literatur wurden dramatische Verbesserungen

in der Anzahl der Mängel festgestellt, wenn es frühzeitig Rückmeldung gibt, Überprüfungen durchgeführt werden und Beratung bereitgestellt wird [JT13]. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Nutzung von Projectional Editors. Diese Werkzeuge verändern automatisiert verschiedene Projektionen des unterliegenden Models, in diesem Fall das Aktivitätsdiagramm und dessen textuelle Repräsentation im Lastenheft. Problematisch an diesem Ansatz ist, dass dieser erheblichen Aufwand und sehr erfahrene Anwender bedarf, um diesen Ansatz erfolgreich einzusetzen [BVJ16].

Als Resultat lässt sich feststellen, dass zur Behebung der Beeinträchtigungen ein automatisierter Ansatz am erfolgversprechendsten scheint. Zur Generierung von Texten für Lastenhefte aus grafischen Modellen existieren bereits eine Reihe von Ansätzen [NT09].

Für den Anwendungsfall bei Daimler sind zunächst die Diagramme relevant, welche Teil der UML sind. Es existieren Ansätze, welche *Statecharts* und *Block Diagramme* nutzen [CRM12]. Abseits dessen existieren Arbeiten, welche *Use Case Diagramme* [BB03] als auch *Klassendiagramme* [MAA08] adressieren. Lediglich eine Arbeit beschäftigt sich mit *Aktivitätsdiagrammen* [DD08], jedoch nur mit solchen aus UML-1. Des Weiteren wird die Erzeugung von Struktur für Lastenhefte außer Acht gelassen. Weiterhin adressiert keine der Arbeiten die Synchronisation von grafischen Modellen und textuellen Bestandteilen. Eine prototypische Implementierung, welche außerdem das automatisierte Erstellen von Trace Links unterstützt ist Teil des AP 280.

2.1.3. Literatur

[DOORS] IBM Rational DOORS ®. "*A requirements management tool for systems and advanced IT applications.*" (2011).

[NKH14] Thomas Noack, Thomas Karbe and Steffen Helke. "*Reuse-Based Test Traceability: Automatic Linking of Test Cases and Requirements*." International Journal on Advances in Software (Vol. 7 No. 3 & 4). (2014).

[UML] Grady Booch, James Rumbaugh and Ivar Jacobson. "*Unified Modeling Language (UML).*" World Wide Web: http://www.omg.org/spec/UML/

[EA] SparxSystems, Enterprise Architect. World Wide Web: http://www.sparxsystems.com/

[DF04] D. Firesmith, "*Generating complete, unambiguous, and verifiable requirements from stories, scenarios, and use cases*." Journal of Object Technology, vol. 3, no. 10, 2004.

[AD97] L. Apfelbaum and J. Doyle, "*Model Based Testing*," in Software Quality Week Conference, 1997.

[VEH14] A. Vogelsang, S. Eder, G. Hackenberg, M. Junker, and S. Teufl, "*Supporting concurrent development of requirements and architecture: A model-based approach,*" in Proceedings of the 2nd International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development (MODELSWARD'14), 2014.

[AB05] Davis, Alan. "*Just enough requirements management: where software development meets marketing*". New York, NY, USA: Dorset House Publishing Co., Inc., 2005.

[KM99] Claire Knight and Malcolm Munro. "*Comprehension with [in] virtual environment visualisations.*", Proceedings. In IEEE 7h International Workshop on Program Comprehension. (1999).

[BROY06] Manfred Broy. "*Challenges in automotive software engineering*." Proceedings of the 28th international conference on Software engineering. ACM. (2006).

[STP12] Sikora, Ernst, Bastian Tenbergen, and Klaus Pohl. "Industry needs and research directions in requirements engineering for embedded systems." Requirements Engineering 17.1 (2012): 57-78.

[MMJ05] N. A. Maiden, S. Manning, S. Jones, and J. Greenwood, "*Generating requirements from systems models using patterns: a case study*," Requirements Engineering, vol. 10, no. 4, 2005.

[AEQ98] J. Arlow, W. Emmerich, and J. Quinn, "*Literate Modelling — Capturing Business Knowledge with the UML*," in International Conference on the Unified Modeling Language. Springer, 1998.

[BVR17] M. Beckmann, A. Vogelsang and C. Reuter. „*A Case Study on a Specifications Approach using Activity Diagrams in Requirements Documents*“, in 25th IEEE International Conference on Requirements Engineering, 2017.

[IEEE830] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., "*IEEE, Std 830-1998, Guide for Software Requirements Specifications*," IEEE Software Eng. Stds. Collection, 1999.

[CMMI] CMMI Product Team, "*CMMI for Development, Version 1.3*," Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, Tech. Rep., 2010.

[ASPICE] VDA QMC Working Group 13 / Automotive SIG, "*Automotive SPICE Process Assessment / Reference Model*," 2015.

[JT13] J. Terzakis, "*The Impact of Requirements on Software Quality across Three Product Generations*," in 21st IEEE International Requirements Engineering Conference (RE). IEEE, 2013.

[BVJ16] T. Berger, M. Völter, H. P. Jensen, T. Dangprasert, and J. Siegmund, "*Efficiency of projectional editing: A controlled experiment,*" in 24th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE), 2016.

[NT09] J. Nicolás and A. Toval, "*On the generation of requirements specifications from software engineering models: A systematic literature review*," Information and Software Technology, vol. 51, no. 9, 2009

[CRM12] C. L. Robinson-Mallett, "*An approach on integrating models and textual specifications,*" in 2nd International Model-Driven RequirementsEngineering Workshop (MoDRE). IEEE, 2012.

[BB03] B. Berenbach, "*The Automated Extraction of Requirements from UML Models,*" in 11th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE). IEEE, 2003.

[MAA08] F. Meziane, N. Athanasakis, and S. Ananiadou, "*Generating natural language specifications from uml class diagrams*," Requirements Engi-neering, vol. 13, no. 1, 2008.

[DD08] D. Drusinsky, "*From UML activity diagrams to specification require-ments,*" in IEEE International Conference on System of Systems Engineering (SoSE), 2008.

2.2. AP 220: Ermittlung von Kundenlastkollektiven

2.2.1. Ziele des Arbeitspakets

Ziel des Arbeitspakets war es, Kenntnisse der realen Kundenlastkollektive zur bedarfsgerechten Entwicklung und Erprobung von Antriebssträngen zu erhalten (siehe Abbildung 14Abbildung 14). Basierend auf diesen Erkenntnissen war eine Optimierung der Auslegungs- und Prüfkollektive zu definieren. Die Gewinnung einer verbesserten statistischen Aussage über die Fahrweise der Kunden auf Basis der Felddaten war ein weiterer Punkt des Arbeitspakets.

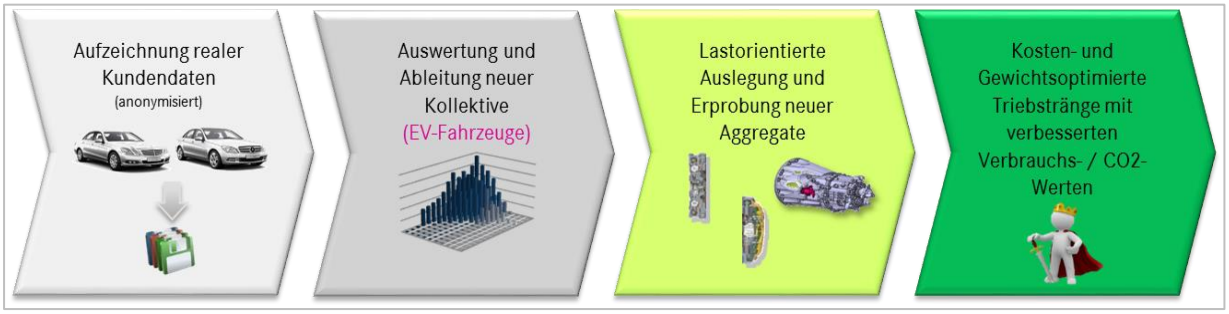


Abbildung 14: Ziele AP 220

2.2.2. Verlauf und Umsetzungen

Für die Aufzeichnung der Kundendaten mit einem Datenlogger wurde im Vorfeld die Soft- und Hardwareseitige Umsetzung definiert. In einem ersten Schritt wurden die Klassierungen und Einzelwerte festgelegt, welche aufgezeichnet werden sollten.

Dies beinhaltete die gewünschten Einzelwerte und bei Klassierungen die erforderliche Klassenbreite (Min- und Maximalgrenzen), die Abtastrate (ms) sowie den Namen der Klassierung. Des Weiteren musste der jeweilige CAN definiert werden, auf welchem das gewünschte Signal ausgelesen werden konnte. Dies ist Beispielhaft in Abbildung 15 dargestellt.

Name des Kollektivs	Abtastrate (ms)	Algorithmus	Signal / Name / Einheit
Energiedurchsatz positiv	100	Einfache Summenklassierung	PNHV_SupBat_Curr / Stromstaerke HV-Batterie / A PNHV_SupBat_Volt / Spannung HV-Batterie / V

Abbildung 15: Beispiel einer Klassierung

Damit die Datenlogger ohne Probleme in den über Deutschland verteilten Werkstätten eingebaut werden konnten, musste eine detaillierte Einbauanleitung geschrieben und verifiziert werden. Dazu wurde in einer ausgewählten Mercedes-Benz Niederlassung ein Probeeinbau durchgeführt. Während des Einbaus wurden alle nötigen Schritte schriftlich festgehalten, zu einer Anleitung zusammengefasst und durch einen weiteren Einbau überprüft.

Die Softwareseitige Inbetriebnahme sowie die Registrierung der Datenlogger erfolgte automatisch auf einem Server der Daimler AG (ReADi-System). Nach der Systemregistrierung zeichnete der Datenlogger bei jedem Zündungswechsel die Messwerte auf und speicherte diese in einer Datei.

Anschließend wurde ein Fahrzeug mit eingebautem Logger über einen Betrachtungszeitraum von zwei Wochen bewegt. Danach wurden die gesammelten Daten ausgewertet und analysiert. Aufgrund der Messergebnisse konnte die korrekte Funktionsweise der Datenerfassung bestätigt werden.

Pro Zündungswechsel wurde eine Ergebnisdatei im XML-Format generiert. Zur Sicherstellung einer effektiven Datenübertragung aus den einzelnen Datenloggern in den Fahrzeugen, wurden die erzeugten Dateien per GSM Netz automatisch auf den Server übertragen. Die Übertragung startete automatisch nachdem das Fahrzeug abgestellt wurde.

In Abbildung 16 ist der Weg der Messdaten zum Netzlaufwerk der Daimler AG beschrieben. Der Zugangsserver speicherte die gesendeten Daten eines Fahrzeuges in das Daimlerinterne System.

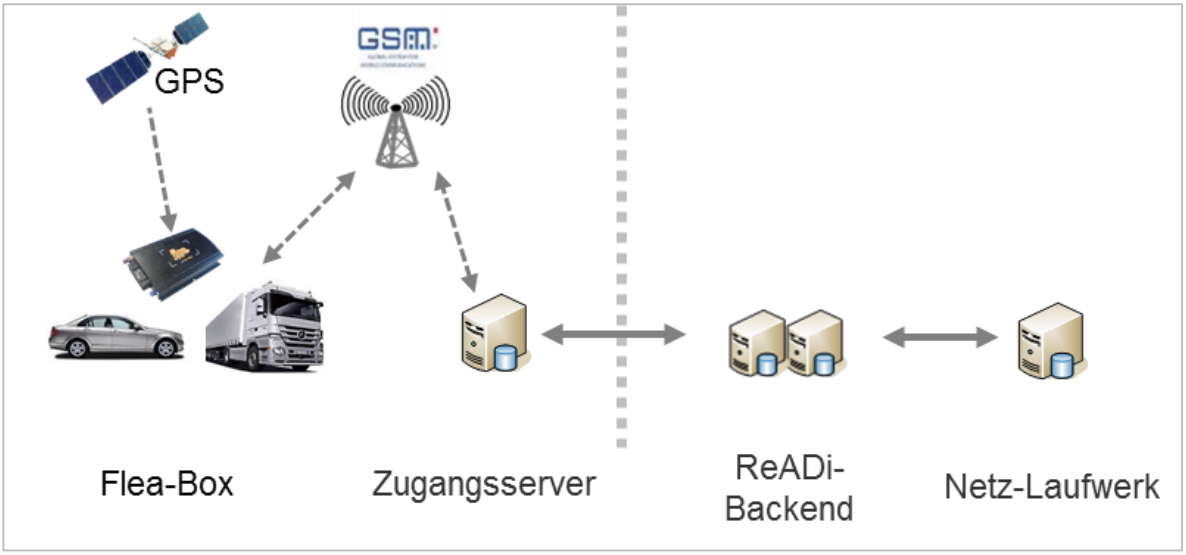


Abbildung 16: Prinzip der Messdatenübertragung

Für die Auswertung der enormen Datenmengen war eine automatisierte und kontinuierliche Datenakkumulation in standardisierter Form erforderlich. Ein Tool zur Zusammenführung der Daten wurde in der Programmiersprache „R“ definiert und entwickelt. Dieses Tool fasste die XML-Dateien von den Einzelfahrten eines Fahrzeuges zusammen und konvertierte diese Daten anschließend in eine Excel Datei. Diese Excel Datei ermöglichte eine vereinfachte Weiterverarbeitung.

Durch den Einsatz dieses Tools wurde die Möglichkeit geschaffen, erste kleinere Auswertungen zu erstellen und zu analysieren. Die Benutzeroberfläche des entwickelten Tools ist in Abbildung 17 beispielhaft dargestellt.

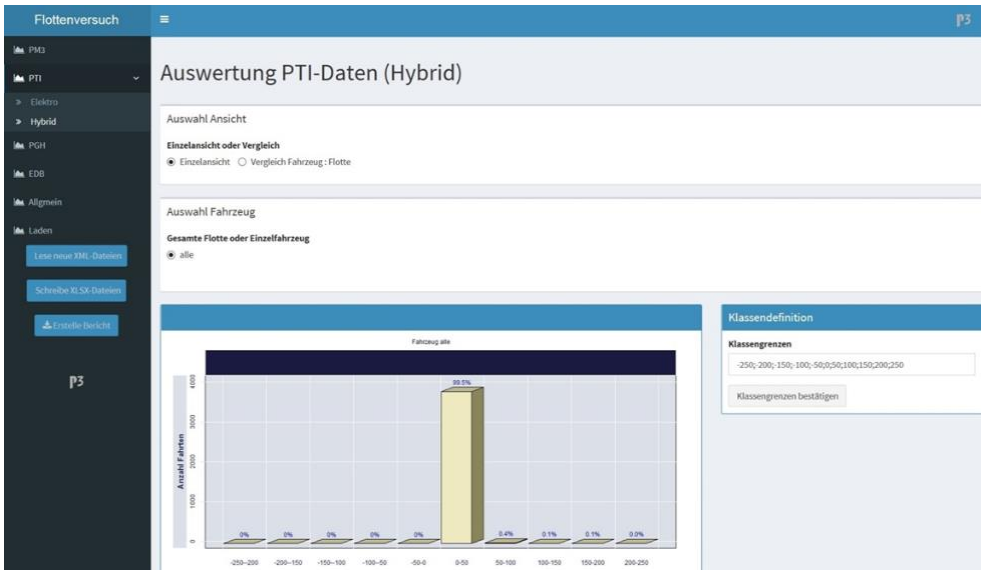


Abbildung 17: Benutzeroberfläche R-Studio

Zur Ableitung von Optimierungspotentialen anhand der Messergebnisse, musste ein Vergleich der erfassten Daten mit den bereits vorliegenden Daten erfolgen. Mit Hilfe einer Messsoftware wurden die Excel Dateien von allen Fahrzeugen analysiert. Zur weiteren automatisierten Auswertung der Daten wurden für diese Messsoftware mehrere Skripte (VBS basiert) entwickelt.

2.2.3. Ergebnisse

Die Erfassung sämtlicher Triebstrangbelastungen im realen Fahrbetrieb während des Flottentests lieferte hinsichtlich den Kundenlastkollektiven neue Erkenntnisse zu den tatsächlichen Anforderungen für Aggregate und Bauteile von elektrifizierten Fahrzeugen. Auf Basis der ermittelten Felddaten konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Optimierung der Auslegungs- und Prüfkollektive bezüglich der Fahrprogramme
- Besseres Verständnis über das Fahrverhalten der Kunden

Beispielhaft konnten mit der Aufzeichnung der Verweildauern der einzelnen Fahrprogramme Erkenntnisse über das Fahrverhalten der Kunden gewonnen werden. Des Weiteren konnte auf Grundlage dieser Erkenntnisse eine Optimierung der Erprobungsrichtlinie durchgeführt werden. Abbildung 18 zeigt die Verweildauern in den verschiedenen Fahrprogrammen der Mercedes-Benz C-Klasse aus allen Kundendaten.

Wie in Abbildung 18 zu sehen erkennen ist, haben die Fahrprogramme C und D nur einen geringen Anteil an den Verweildauern, diese wurden von den Kunden nicht nennenswert genutzt. Daraus konnten sehr wertvolle Erkenntnisse zur Komponentenauslegung und Prüfstanderprobung abgeleitet werden.

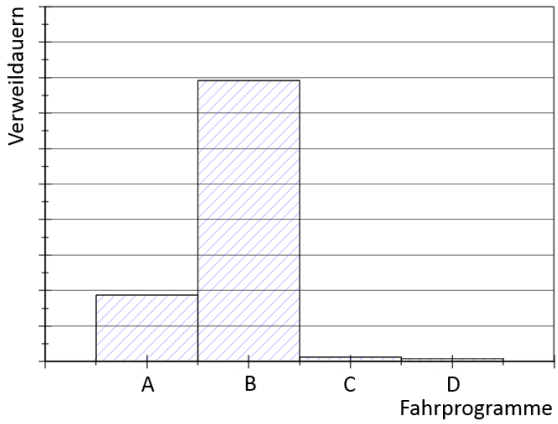


Abbildung 18: Verweildauern - Fahrprogramme C-Klasse

In Abbildung 19 sind Verweildauerschaubilder (Drehmoment über Drehzahl) von den sportlichsten B-Klasse Kunden und den Durchschnitts B-Klasse Kunden dargestellt. Die Ergebnisse der Drehmoment-Drehzahl Verweildauerschaubilder des sportlichsten und des Durchschnittsfahrers lieferten weitere wichtige Erkenntnisse für die Optimierung und Erprobung der lastführenden Bauteile im Triebstrang.

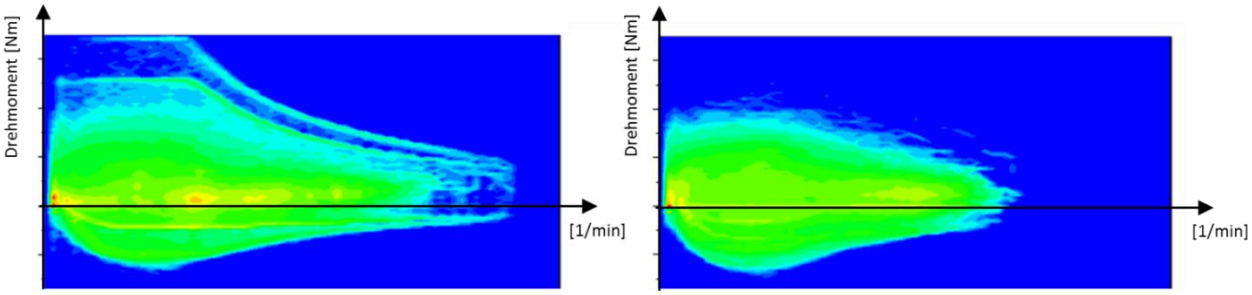


Abbildung 19: Verweildauerklassierung B-Klasse

Das linke Drehmoment-Drehzahl Verweildauerschaubild in Abbildung 19 zeigt den sportlichsten B-Klasse Kunden, das rechte Schaubild den Durchschnitts B-Klasse Kunden. Durch eine ausgeprägte Vollastkennlinie des sportlichsten Kunden wurde dessen Triebstrangbelastende Fahrweise bestätigt.

Eine Analyse des Batterieladezustands (State of Charge = SOC) der beiden Fahrzeugtypen ergab, dass C-Klasse Kunden mit einer höheren Gesamtverweildauer bei einem niedrigen Ladezustand der Batterie unterwegs waren. B-Klasse Kunden hingegen fuhren mit sehr hohen Verweildaueranteilen bei über der Hälfte des SOC-Standes mit Ihrem Fahrzeug. Die Kurvenverläufe der Batterieladezustände sind in Abbildung 20 wiedergegeben.

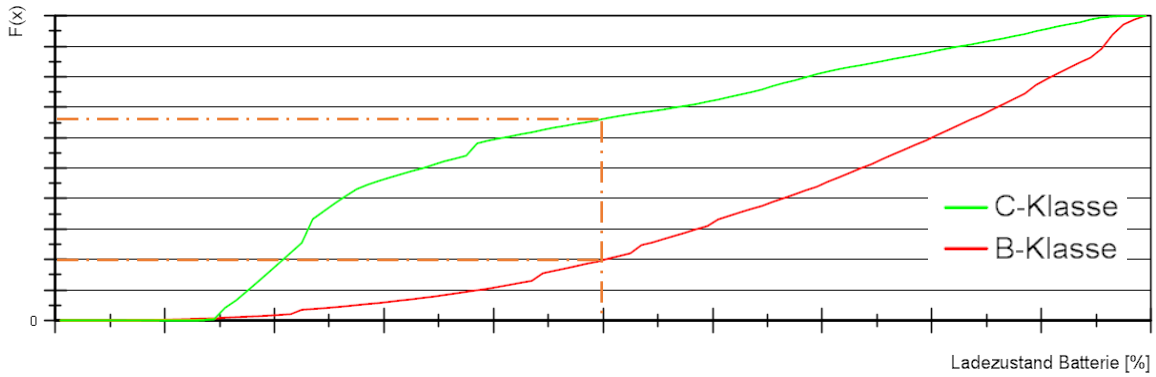


Abbildung 20: Verweildauer SOC-Stand B- und C-Klasse

Eine weitere Auswertung des maximalen Ladezustands der Batterie pro Zündungswechsel zeigt unterschiedliche Ladezustände bei Fahrtbeginn. In Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die Ladezustände der Batterie während eines Zündungswechsels dargestellt. Die Untersuchung dieser SOC-Stände zeigte, dass die C-Klasse Kunden vermehrt mit einer leeren Batterie (geringer SOC-Stand) ihre Fahrt begonnen haben. Die Kunden der B-Klasse hingegen starteten ihre Fahrt vermehrt mit vollem Ladezustand der Batterie (hoher SOC-Stand).

Eine mögliche Erklärung ist, dass die „Reichenweitenangst“ die B-Klasse Kunden dazu anhält, die Batterie stets zu laden bzw. den Ladestand hoch zu halten da ihr Fahrzeug bei leerer Batterie stehen bleibt. Die C-Klasse kann jedoch auch mit leerer Batterie weiter bewegt werden.

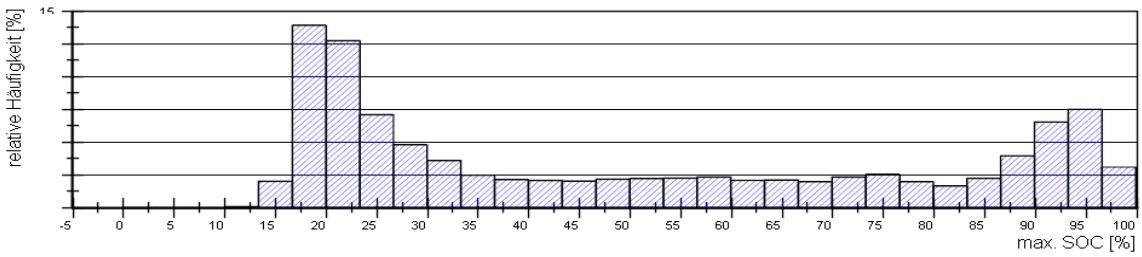


Abbildung 21: Max. SOC-Stand C-Klasse pro Zündungswechsel

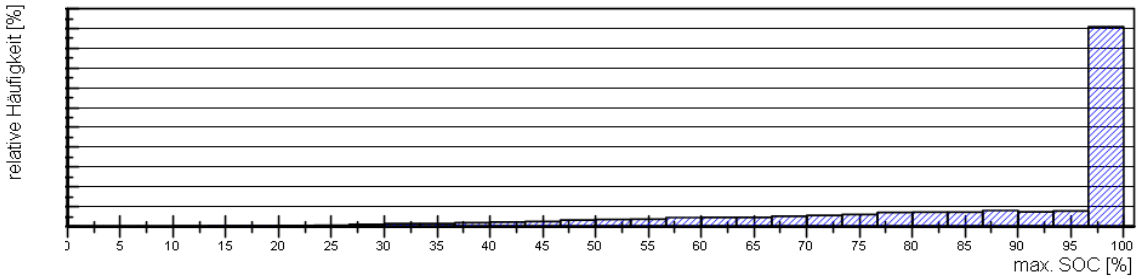


Abbildung 22: Max. SOC-Stand B-Klasse pro Zündungswechsel

2.2.4. Zusammenfassende Bewertung

Die in diesem Arbeitspaket erzielten Ergebnisse sind von grundlegender Bedeutung für die weitere bedarfsgerechte Auslegung elektrifizierter Antriebsstränge. Anhand der Erkenntnisse aus den Kundendaten konnte die Erforschung der tatsächlich zu erwartenden Beanspruchung des Antriebsstrangs weiterentwickelt werden.

Die Auswirkung dieser Beanspruchung auf die Zuverlässigkeit des Triebstrangs und das energetische Verhalten im Endkundenbetrieb in ausgewählten Einsatzszenarien kann nun besser eingeschätzt werden. Durch die Analyse des realen Kundenverhaltens konnte der Einfluss auf die Prüfstanderprobung definiert und angepasst werden.

Aus den Kundendaten konnte beispielsweise ermittelt werden, dass die Kunden sich bei der Nutzung der Fahrprogramme auf ein bis maximal zwei Fahrprogramme beschränken. Weitere Fahrprogramme werden nicht nennenswert genutzt.

Die Analyse der Verweildauern von Drehmoment-Drehzahl ergaben große Unterschiede zwischen dem Fahrverhalten einzelner Fahrertypen und der daraus resultierenden Belastung auf den Triebstrang.

Die Auswertung der Batterieladezustände zeigt auf, dass reine Elektrofahrzeuge auf Kurzstrecken bewegt werden und meistens bei Fahrtbeginn voll aufgeladen sind, wohingegen Hybridfahrzeuge auch auf Langstecken bewegt werden und häufig bei Fahrtbeginn einen niedrigen SOC-Stand aufweisen.

2.3. AP 230: Modellierung des Antriebsstrangs

2.3.1. Aufgabenbeschreibung

- Modellierung des Antriebsstrangs auf Basis der Originalfahrzeuge. Dabei werden die physikalischen Zusammenhänge aller relevanten Komponenten abgebildet. Diese werden so ausgelegt, dass Skalierungen für die Antriebsstrangauslegung durchgeführt werden können.
- Parametrierung des Modells anhand der in AP 1 untersuchten Felddaten und aus ausgewählten Fahrversuchen. Größen, die beim Feldversuch nicht aufgezeichnet werden konnten, können so simuliert werden.
- Erarbeitung eines effizienten Antriebsstrang-Managements für den Plug-In Hybrid, das die Antriebe als regelbasierte Betriebsstrategie aufgrund allgemeingültiger Entscheidungsvorschriften koordiniert.

2.3.2. Aufbau der Simulationsumgebung

Im Rahmen des AP 230 wurde eine in Matlab/Simulink integrierte Triebstrangbibliothek zusammen mit einer speziell auf die Vielzahl an Antriebsstrangtopologien ausgelegten Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung entwickelt. Die Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung, Abbildung 23, ist als Vorwärtssimulation ausgeführt, bei der ein Fahrermodell die Aufgabe der Geschwindigkeitsregelung auf die Sollgeschwindigkeit aus einem Geschwindigkeits-Zeit-Profil hat. [1]

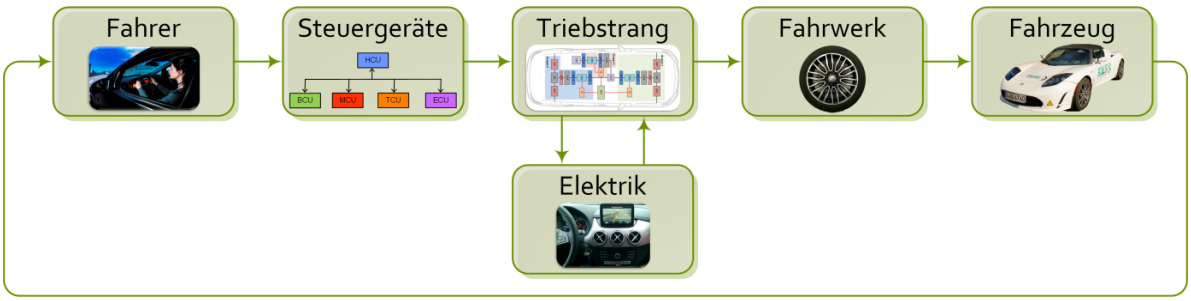


Abbildung 23: Regelungsstruktur der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung [1]

In Abbildung 24 ist die Gesamttopologie dargestellt, die alle anwendbaren Komponenten beinhaltet. Nutzbare Antriebsstrangtopologien entstehen, indem nicht benötigte Komponenten mit Leermodellen bestückt werden. Leermodelle leiten je nach Komponenten die Signale unverändert weiter, oder unterbrechen den entsprechenden Signalfluss. Beispielsweise werden bei dem Leermodell der E-Maschine das Drehmoment und die Drehzahl an die nächste Komponente unverändert durchgeschleift. [1]

Die Gesamttopologie ist zudem in drei Gruppen eingeteilt. Je nach Verwendung der verschiedenen Gruppen können Vorder- und Hinterradantrieb, sowie Allradantrieb realisiert werden. Das Verteilergetriebe dient dabei entweder als Leermodell, leitet den Signalfluss entsprechend an Vorder- bzw. Hinterrad, oder fungiert als Differentialgetriebe. Mit der gewählten Struktur können neben rein konventionellen Verbrennungsmotorantrieben und batterieelektrischen Antrieben, auch serielle und parallele Hybridantriebe modelliert werden. [1]

Beim C350e handelt es sich um einen parallelen Hybrid mit Hinterradantrieb. Dementsprechend wurden in der Gesamttopologie der Verbrennungsmotor, sowie die Komponenten der Gruppe 2 bedatet, während die restlichen Komponenten mit Leermodellen versehen wurden. Das Fahrzeug B250e besitzt dagegen einen rein elektrischen Vorderradantrieb. Für die Modellierung wurden die Komponenten der Gruppe verwendet. Die Komponenten aus Gruppe 2 und 3, sowie der Verbrennungsmotor wurden durch Leermodelle ersetzt.

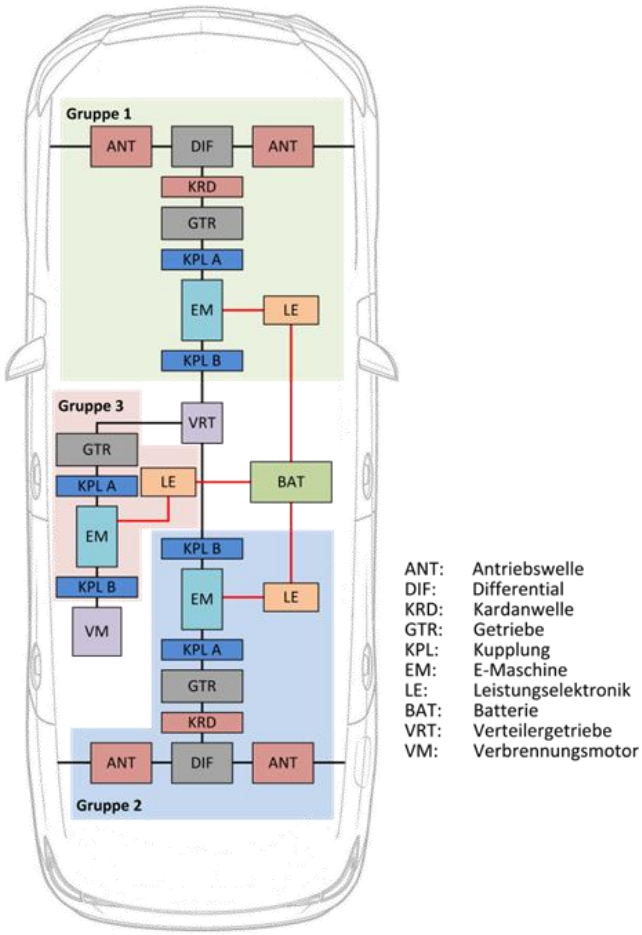


Abbildung 24: Mögliche Antriebsstrangkonfigurationen [1]

Die Steuerung der Komponentenmodelle wurde in Anlehnung an die Struktur realer Steuergeräte im Fahrzeug umgesetzt, Abbildung 25. Bei Hybridantrieben erfolgt das Management der Einzelkomponenten in der Hybridsteuerung (HCU). Die Umsetzung für den C350e wird in Kapitel 0 aufgezeigt. Wird nur eine Antriebsmaschine verwendet (beim B250e) wird der Signalfluss von der HCU direkt an die entsprechende Motorsteuereinheit (MCU) weitergeleitet, die die Kommunikation mit den Komponenten übernimmt. Der C350e besitzt zudem ein 7-Gang Automatikgetriebe. Die Getriebesteuerung und Gangwahllogik sind dabei in der TCU hinterlegt. [1]

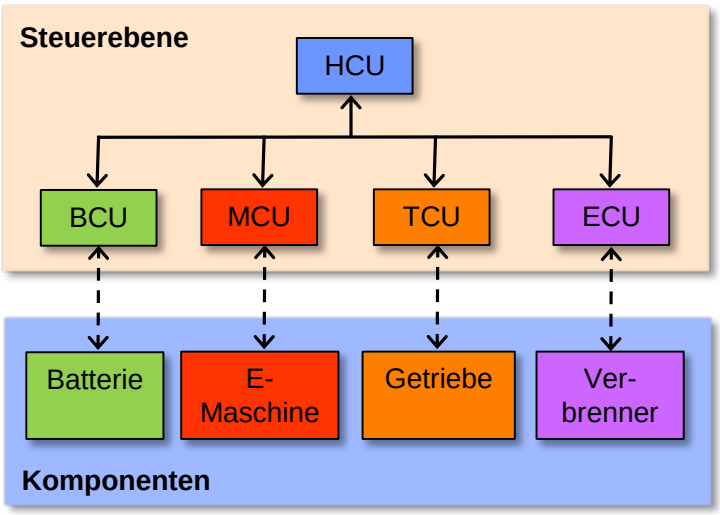


Abbildung 25: Kommunikationsstruktur zwischen Steuergeräte- und Komponentenebene [1]

Durch die strikte Trennung von Komponentenmodellen und Parametersätzen wurde die Möglichkeit der Skalierung für die folgende Antriebsstrangauslegung geschaffen. Mittels der Komponentenmodelle können verschiedene Modellierungstiefen und unterschiedliche Technologien (z.B. Asynchron- und Synchronmaschine) abgedeckt werden. Die Parametersätze beinhalten die fahrzeugspezifischen Parameter für die jeweilige Komponente. Dadurch ist es möglich die Skalierung der jeweiligen Komponente bei gleichbleibendem Komponentenmodell zu realisieren. [1]

2.3.3. Parametrierung der Simulationsmodelle

Um die erstellten Simulationsmodelle für die zu untersuchenden Fahrzeugvarianten parametrieren und ihre Übereinstimmung mit den im Projekt zu betrachtenden Fahrzeugen (B250e, C350e) sicherstellen zu können, wurden Messfahrten mit diesen Fahrzeugen auf dem am FKFS definierten und seit Jahren etablierten „Stuttgart Rundkurs“ gefahren. Der Rundkurs entspricht in seiner Zusammensetzung an Straßenkategorien (Stadt, Land, Autobahn) den Anteilen, die das Statistische Bundesamt für den deutschen KFZ-Verkehr angibt. Um an die benötigten Messgrößen zu kommen, ohne die Fahrzeuge mit umfangreicher Messtechnik ausstatten zu müssen, wurde eine Messtechnik implementiert, die aus den Daten, die über die On-board-Diagnose zur Verfügung stehen, die benötigten Größen der Triebstrangkomponenten extrahiert (Spannungen, Ströme, Drehzahlen, Drehmomente, …). Abbildung 26 zeigt exemplarisch einen zeitlichen Verlauf der Größen Fahrzeuggeschwindigkeit, Fahrpedalstellung, Ladezustand der Traktionsbatterie (SoC) die vom Fahrzeug gewählte Gangstufe, Strom der Leistungselektronik und Hochvoltbatteriespannung.

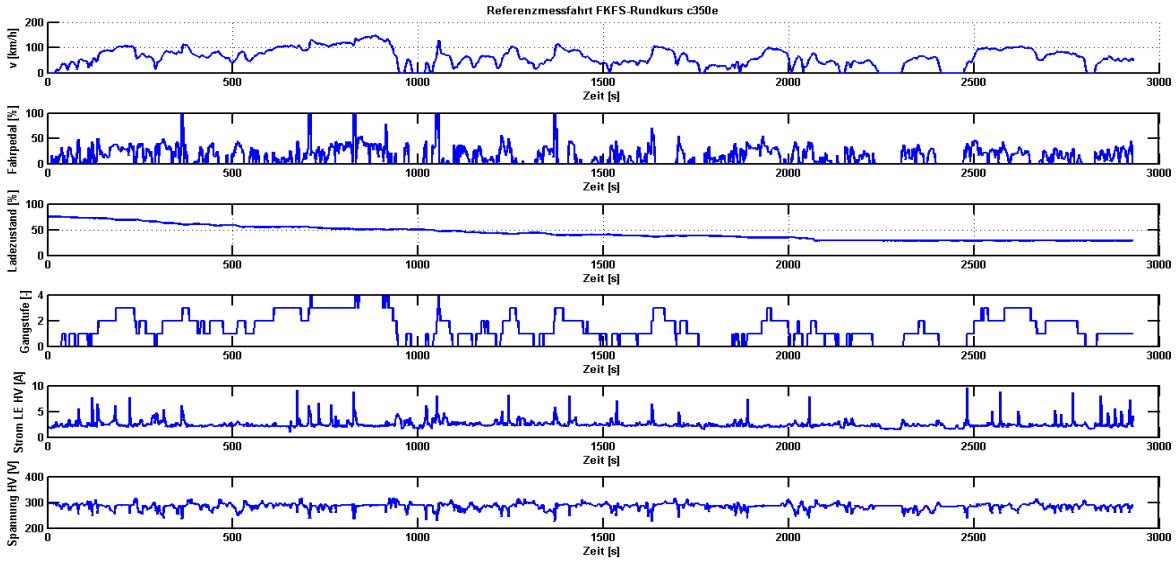


Abbildung 26: Messschrieb einiger exemplarischer Größen aus den Referenzmessfahrten

Anhand dieser Messdaten wurden die Parameter der Simulationsmodelle optimiert, um eine möglichst hohen Simulationsübereinstimmung zu erreichen. Die Simulationsmodelle dienen im Weiteren als Basis, um Ziel-/Nutzergruppenorientierte „virtuelle Auslegung“ von Antriebssträngen durchzuführen.

Die Parameter der Fahrzeugmodelle mussten entsprechend der zugrunde liegenden Realfahrzeuge angepasst werden, damit bei den gleichen Randbedingungen Fahraufgabe (bestehend aus Fahrzeuggeschwindigkeit und Beschleunigung) und Fahrzeugzuständen (im Wesentlichen Ladezustand der Traktionsbatterie und Temperaturen aller elektrischer Komponenten) auch die gleichen Entscheidungen der Betriebsstrategie bezüglich Betriebsmodus (elektrisch fahren/Verbrennungsmotorisch fahren) und Gangwahl getroffen werden und auch die physikalischen Größen des Fahrzeugmodells den Realfahrzeugen entsprechen. Abbildung 27 zeigt die sehr gute Übereinstimmung bezüglich der Wahl des Betriebsmodus und der Entwicklung einzelner physikalischer Größen im .Simulationsmodell mit den Fahrtenmessungen. Abweichungen bei der Entwicklung der Ladezustandsentwicklung entstehen durch die in der Simulation nicht berücksichtigten Steigungen der Versuchsstrecke.

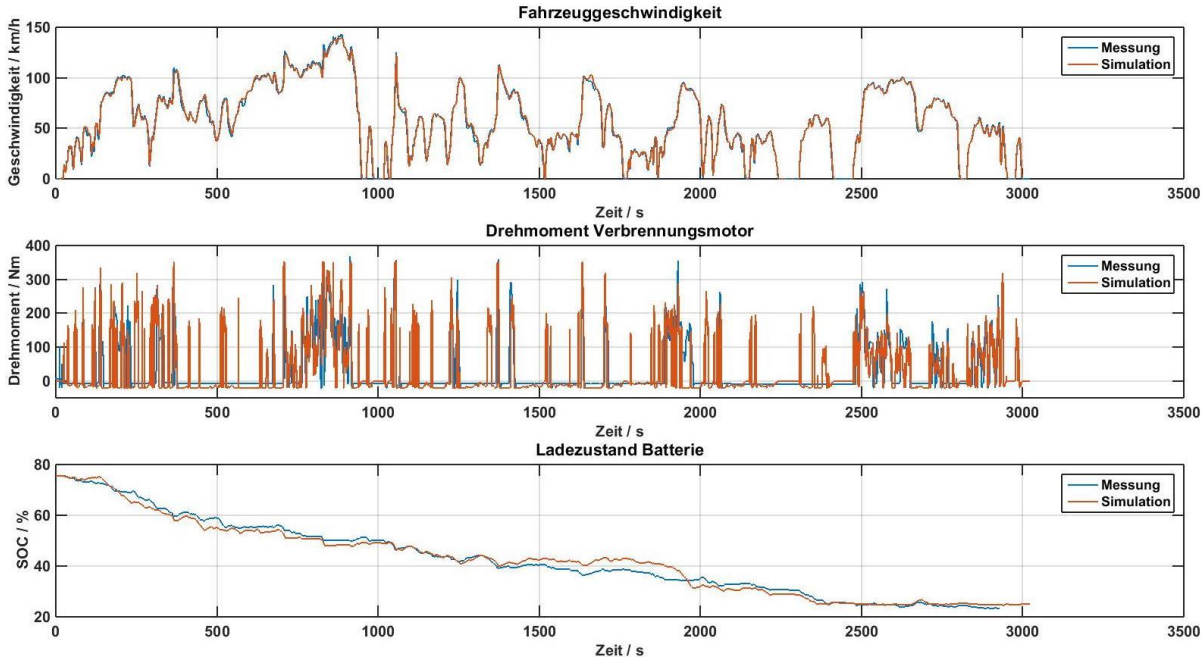


Abbildung 27: Vergleich der Simulation und Messung beim C350e

Abbildung 28 zeigt einen Vergleich zwischen Messfahrt und Fahrzeugsimulation für das zweite im Projekt betrachtete Fahrzeug, die elektrisch angetriebene Mercedes B-Klasse B250e.

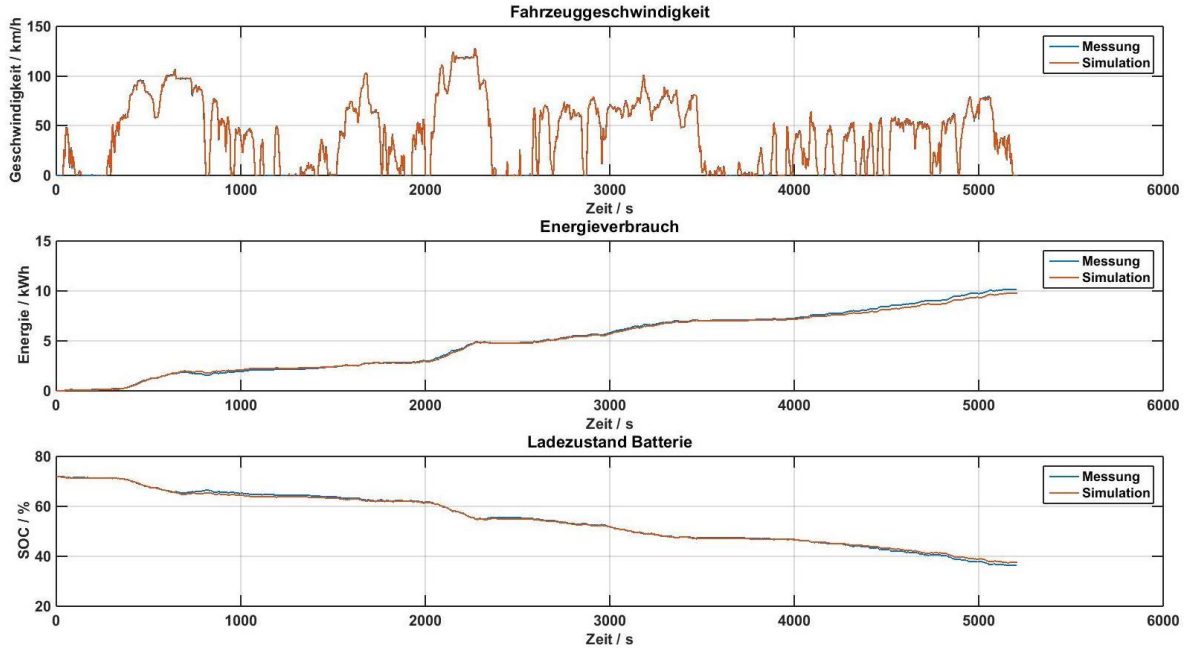


Abbildung 28: Vergleich der Simulation und Messung beim B250e

2.3.4. Antriebsstrang-Management des Plug-In Hybrid

Das Simulationsmodell für den C350e Plug-In Hybrid wurde um eine modulare Betriebsstrategie erweitert. Dafür wurde die von Keilhoff entwickelte Betriebsstrategie [2] in die HCU integriert. Diese unterstützt die in Tabelle 4 aufgeführten Betriebszustände.

Tabelle 4: Übersicht über die Betriebszustände [3]

ID	Kürzel	Betriebszustand
01	IDLE	Leerlauf
02	CDS	Laden im Stand
03	ESS	Motor Stopp/Start
11	ENG	Verbrennungsmotorisches Fahren
12	EM	Elektrisches Fahren
13	HYB	Hybrides Fahren
14	LPI	Lastpunktanhebung
31	FRIC	Reibbremsen
32	RECUP	Rekuperation

Die Betriebsstrategie lässt umfangreiche Anpassungen hinsichtlich der Ansteuerung der Triebstrangkomponenten zu, Abbildung 29. Dies ist notwendig, um eine ausreichende Übereinstimmung des Verhaltens des Simulationsmodells mit dem des zugrunde liegenden realen Fahrzeugs zu erreichen.

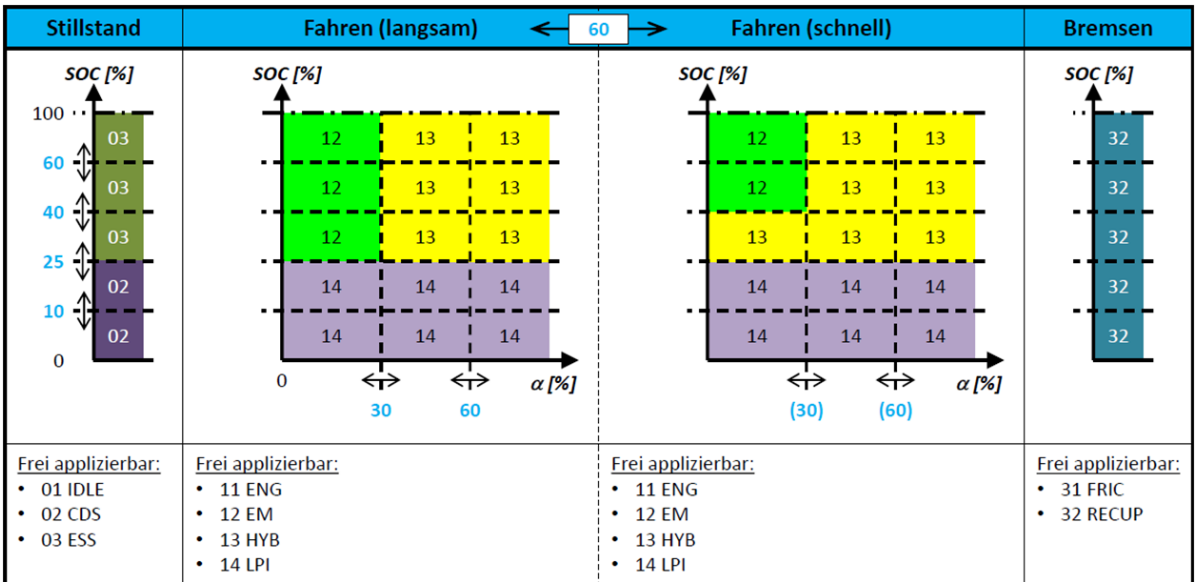


Abbildung 29: Eingabemöglichkeiten zur Parametrierung der Betriebsstrategie [3]

2.3.5. Zusammenfassung und Ergebnis

Es wurde eine Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung aufgebaut und die Antriebsstränge für den C350e und B250e modelltechnisch nachgebildet. Mittels Realfahrten konnten die Modelle anschließend parametriert werden. Für den C350e wurde zudem eine modulare Betriebsstrategie in die Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung integriert. Mit dieser ist es möglich, die Realfahrt in der Simulation mit einer höhen Güte nachzubilden.

2.4. AP 240: Analyse des Nutzungsverhaltens

2.4.1. Aufgabenbeschreibung:

- Analyse der Nutzungsdaten und der Kundenbefragung
- Klassifizierung verschiedener Nutzungsszenarien (z.B. Kurzstreckenfahrer, hohe Autobahnnutzung)

2.4.2. Durchführung und Ergebnisse der Kundenbefragung

Ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsvorhabens ist in AP 240 die Identifizierung und Einteilung der am Projekt teilnehmenden Kunden in Nutzergruppen. Neben den geloggten Nutzerdaten steht auch das Werkzeug der Kundenbefragung zur Verfügung. Diesbezüglich wurde ein Fragebogen entworfen, der von den am Projekt teilnehmenden Kunden auszufüllen war. Die Fragen teilen sich dabei in die drei Bereiche Anwender, Ladeverhalten und Anwendung auf und sind in Abbildung 30 gezeigt.

Schwerpunkt Anwender:

1. Wird das Fahrzeug dienstlich, oder privat genutzt?
2. Anzahl Personen die das Fahrzeug nutzen?
3. Einordnung der Fahrzeugnutzer in Altersgruppen:

20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	>70

4. Einordnung der Fahrzeugnutzer nach Fahrleistung im Jahr:

< 5.000	5.000 – 10.000	10.000 – 20.000	20.000 – 25.000	> 25.000

5. Einordnung der Fahrzeugnutzer nach PKW-Nutzung:

täglich	mehrmals die Woche	seltener

Schwerpunkt Ladeverhalten:

1. Wie teilt sich die prozentuale Verteilung der Ladesäulen auf?

normale Steckdose [%]	Wallbox [%]	öffentliche Ladesäule [%]

2. Wie teilt sich Ihre prozentuale Nutzung verschiedener Ladesäulen schätzungsweise auf?

öffentlicher Raum [%]	halböffentlicher Raum [%]	Arbeitsplatz [%]	Privat [%]

3. Wie oft laden Sie das Fahrzeug?

mehrmals täglich	täglich	mehrmals die Woche	seltener

Schwerpunkt Anwendung:

1. Wie teilt sich Ihre prozentuale Straßennutzung schätzungsweise auf?

Stadtverkehr [%]	Bundes-/Landstraßen [%]	Autobahn [%]

2. Wie teilt sich Ihre prozentuale Fahrstrecke auf?

< 5km [%]	5 – 15km [%]	15-50km [%]	50 – 100km [%]	> 100km [%]

Abbildung 30: Fragebogen für die Kundenbefragung

Die Befragung haben 95 Kunden ausgefüllt, von denen 76 den B250e und 19 den C350e gefahren sind. Die Nutzung verteilt sich auf 71 Fahrzeuge privat und 24 Fahrzeuge dienstlich (75% privat zu 25% dienstlich). Insgesamt sind 227 Nutzer die Fahrzeuge gefahren, von denen 203 den B250e und 24 den C350e. Der C350e Plug-In Hybrid wurde vorwiegend von nur einer Person gefahren und der Anteil dienstlicher Nutzung liegt mit 42 % deutlich höher als beim B250e (22,5 %).

Die Ergebnisse zum Schwerpunkt Anwender sind in Abbildung 31 dargestellt. Pro Fahrzeug konnten für maximal 5 Nutzer des Fahrzeuges die folgenden Angaben abgegeben werden. Bei drei Fahrzeugen in der dienstlichen Nutzung existieren mehr als fünf Nutzer, die dementsprechend nicht berücksichtigt werden konnten.

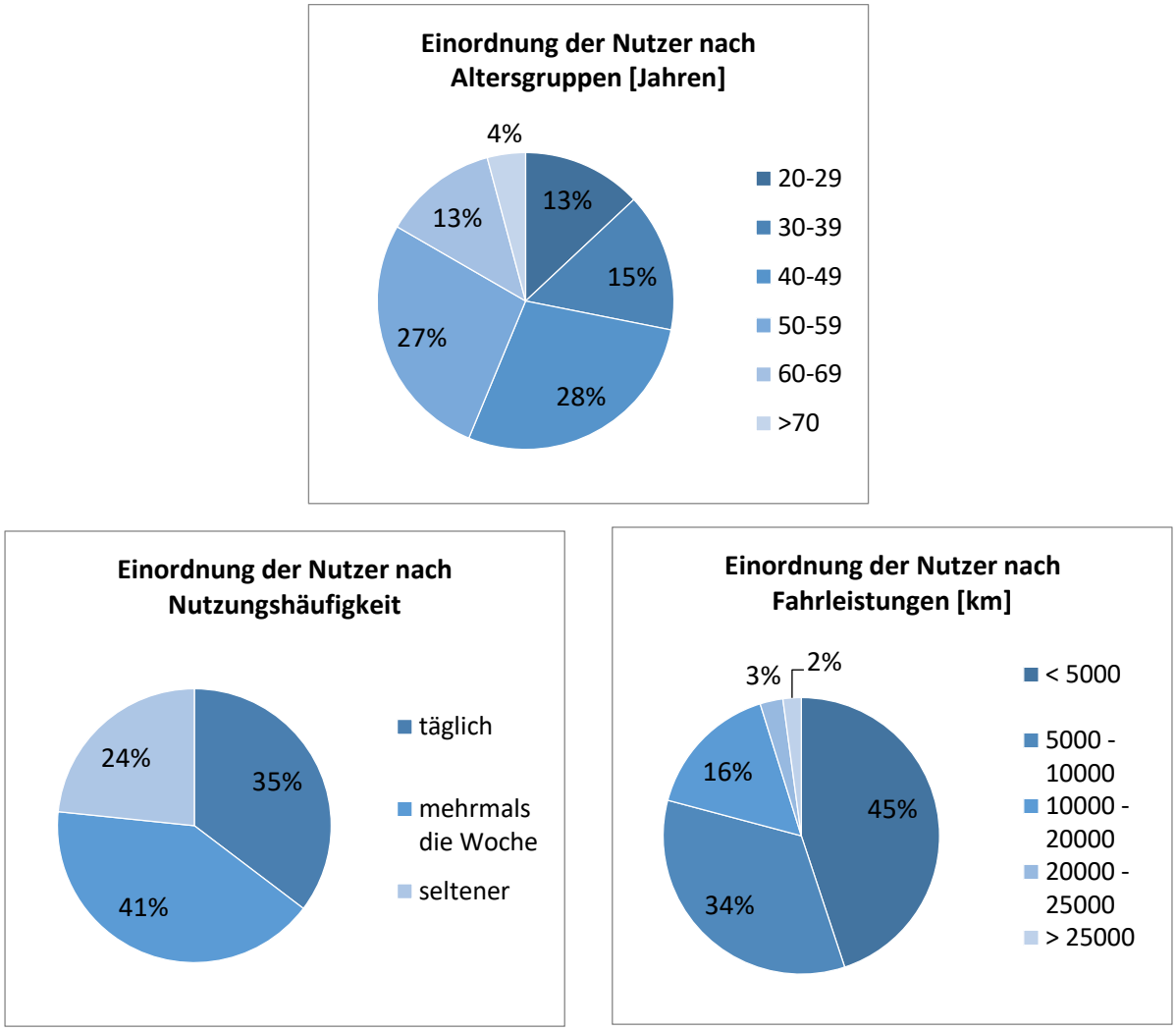


Abbildung 31: Ergebnisse der Kundenbefragung zum Schwerpunkt Anwender

In Abbildung 32 sind die Ergebnisse der Kundenbefragung zum Schwerpunkt Ladeverhalten und in Abbildung 33 und Abbildung 34 die Ergebnisse zum Schwerpunkt Anwendung abgebildet. Pro Fahrzeug konnte jeweils eine Angabe gemacht werden. Bei der Straßennutzung in Abbildung 34 ist zusätzlich die statistische Verteilung für Baden-Württemberg [4] aufgetragen. Daraus wird ersichtlich, dass das Nutzerkollektiv aus eMERGE II im Vergleich mehr innerorts unterwegs ist.

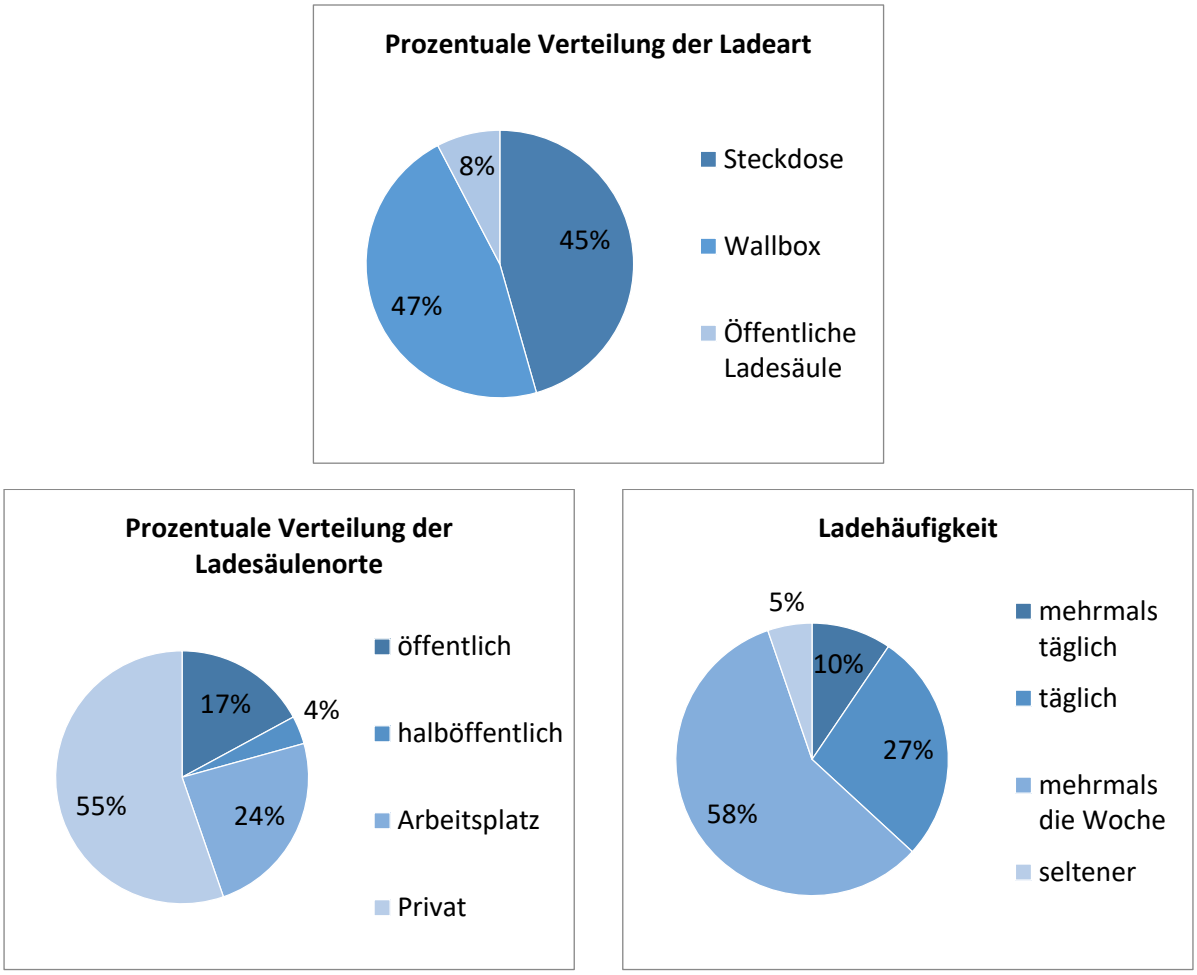


Abbildung 32: Ergebnisse der Kundenbefragung zum Schwerpunkt Ladeverhalten

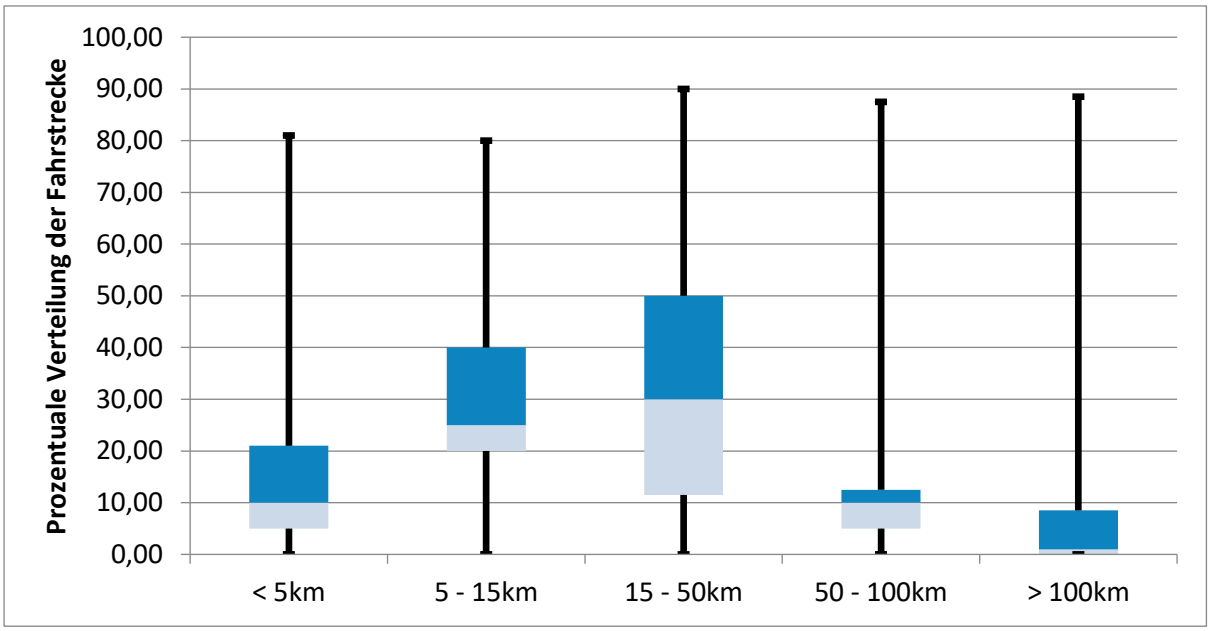


Abbildung 33: Ergebnisse der Kundenbefragung zur Fahrstrecke

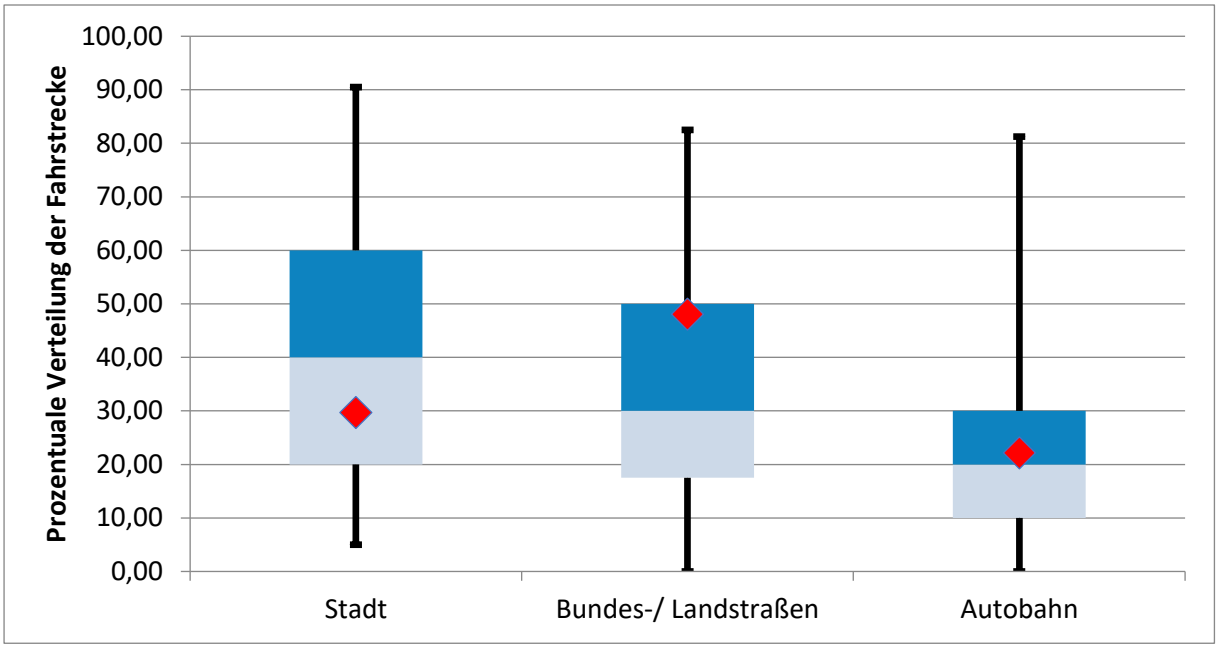


Abbildung 34: Ergebnisse der Kundenbefragung zur Straßennutzung
(rote Markierung: statistische Verteilung für Baden-Württemberg [4])

2.4.3. Identifikation von Nutzergruppen

Zur Einteilung der Kunden wurden zunächst vier Nutzergruppen identifiziert, die in Tabelle 5 aufgelistet sind. Neben den Nutzergruppen sind die typischen Fahrertypen angegeben, die zur jeweiligen Gruppe gehören und die Besonderheiten, die die Gruppe charakterisieren.

Tabelle 5: Definierte Nutzergruppen

Nutzergruppe	Gelegenheitsfahrer	Kurzstreckenfahrer	Arbeitsplatzfahrer	Vielfahrer
Fahrertyp	• Freizeitnutzer • Fernpendler (Wochenend-pendler)	• Pflegedienst • Kurierfahrer innerorts	• Nahpendler (Tages-Pendler)	• Dienstwagen • Fernpendler (täglich)
Besonderheiten	• Wenige Fahrten pro Woche, dafür mehr weite Fahrten	• Mehrere kurze Strecken pro Tag	• Weg Arbeit – Zuhause + ggf. Zusatzstrecke	• Viel Autobahnfahrt (hohe konst. v)

Damit eine Einteilung der Kunden in die Nutzergruppen möglich ist, müssen Identifikationskriterien festgelegt werden. Die Kriterien zur Unterscheidung der einzelnen Nutzergruppen sind in Tabelle 6 aufgeführt. Eine Grundlage der Kriterien ist die Unterscheidung zwischen Nah- und Fernpendler nach dem Statistischen Bundesamt. Die Kriterien unterscheiden sich weiterhin für Elektro- und Plug-In Hybridfahrzeuge, da die Reichweite aktueller Elektrofahrzeuge bei Weitem nicht der von Plug-In-Hybridfahrzeugen entspricht.

Tabelle 6: Identifikationskriterien der Nutzergruppen

	Tageskilometer [T-km]	Streckenkilometer [S-km]	Nutzungshäufigkeit [Fahrten pro Tag]
Gelegenheitsfahrer	-	> 5km	< 1
Kurzstreckenfahrer	< 50km	< 5km	-
Arbeitsplatzfahrer	10 – 50km (- 100km)[2]	5 – 25km[1] (- 50km)	< 4
Vielfahrer	> 50km (> 100km)	-	-

Mit den gezeigten Identifikationskriterien fand eine Analyse des Minimaldatensatzes der geloggten Nutzerdaten statt. Dabei wurden ausschließlich Fahrten mit Fahrtdistanzen größer als 500m ausgewertet, die von Teilnehmern stammten, von denen mehr als 10 Fahrten zur Verfügung standen. Das Ergebnis der Analyse ist in Tabelle 7 aufgeführt. Insgesamt konnten 93 Kunden in eine der vier Nutzergruppen einsortiert werden. Bei den restlichen Kunden wurden nicht genügend Fahrten für die Einsortierung erfasst.

Tabelle 7: Ergebnis der Nutzerzuordnung anhand der geloggten Nutzerdaten

Gelegenheitsfahrer	Kurzstreckenfahrer	Arbeitsplatzfahrer	Vielfahrer
44	9	33	7

2.4.4. Ergebnisse der Nutzungsdaten für die Nutzergruppen

Zur Analyse des Nutzerverhaltens fand eine kontinuierliche Auswertung des Minimaldatensatzes während der Projektlaufzeit statt. In Abbildung 35 sind die Verteilungen der zurückgelegten Fahrstrecken für die einzelnen Nutzergruppen dargestellt. Die Differenzierung der einzelnen Nutzergruppen wird hier ersichtlich.

Für die Bestimmung des Nutzungsverhaltens wurden für die vier Nutzergruppen die Geschwindigkeitsverteilungen ausgewertet, dargestellt in Abbildung 36. Der Kurzstreckenfahrer bewegt sich in Bereichen niedriger Geschwindigkeiten, während der Vielfahrer dagegen auch die Bereiche höherer Geschwindigkeit fährt. Die Gelegenheits- und Arbeitsplatzfahrer zeigen eine ausgeglichene Verteilung der Geschwindigkeiten.

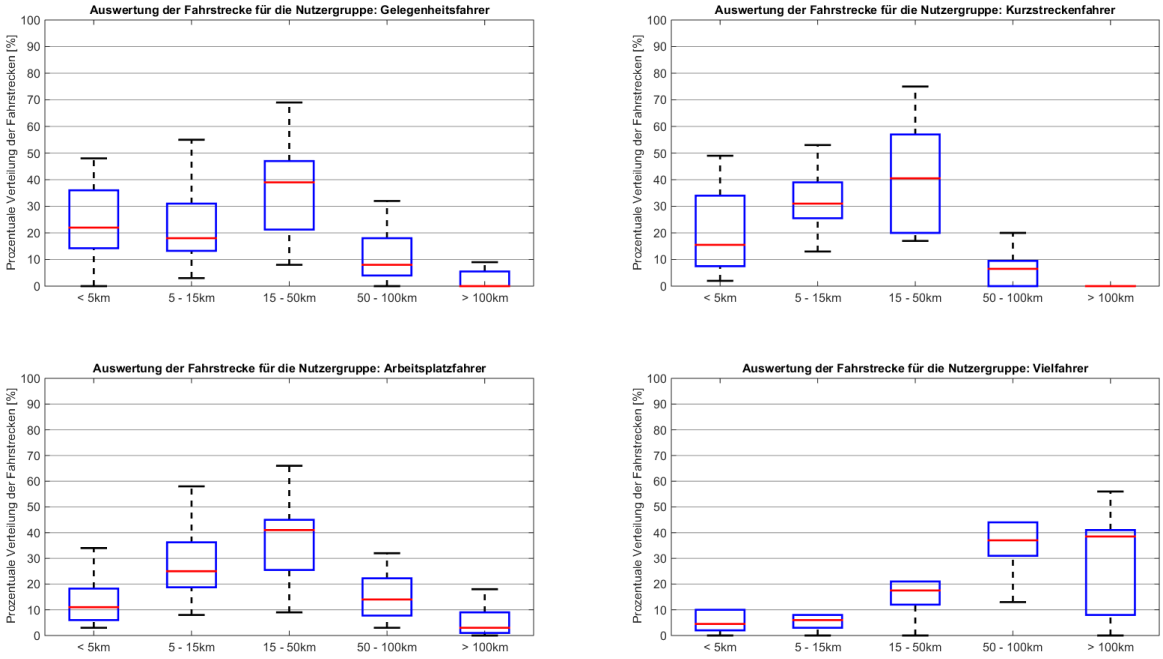


Abbildung 35: Fahrstrecken der einzelnen Nutzergruppen

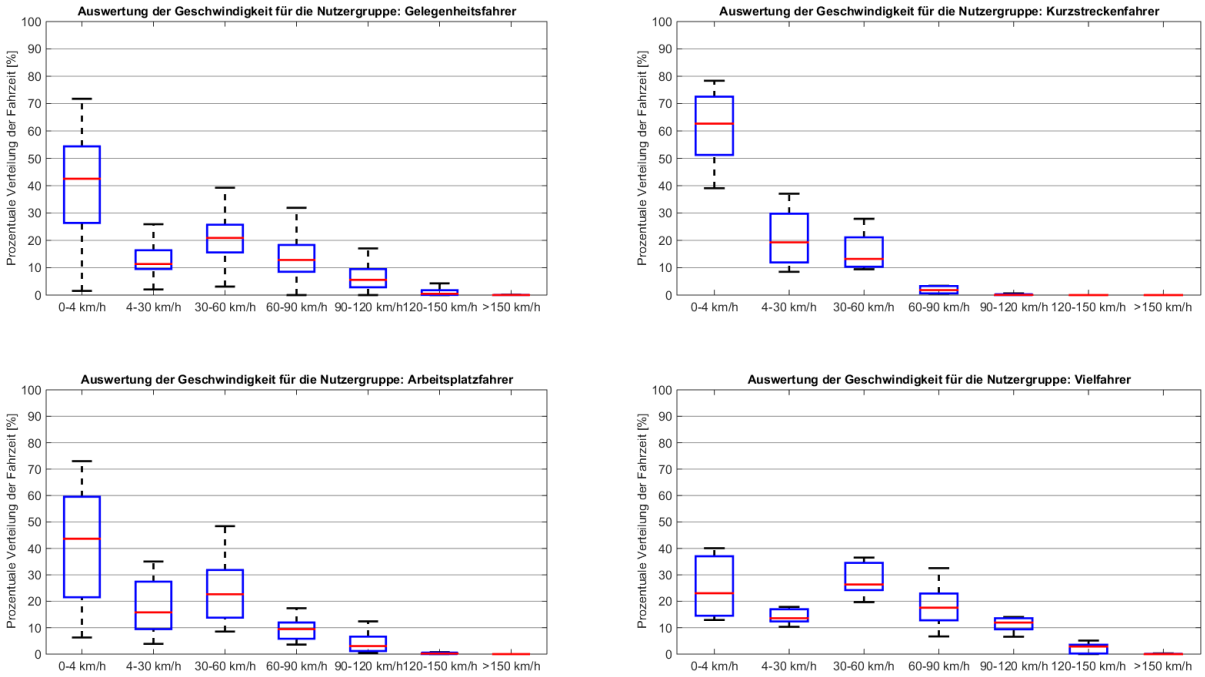


Abbildung 36: Geschwindigkeiten der einzelnen Nutzergruppen

2.4.5. Identifikation der Nutzungsszenarien für die Nutzergruppen

Zur Optimierung der Antriebsstränge für die verschiedenen Nutzergruppen wurden aus den analysierten Geschwindigkeiten Zyklen generiert (Geschwindigkeits-Zeit-Profile), die das Nutzungsverhalten der jeweiligen Nutzergruppe abbilden, Abbildung 37. Dabei wurde eine Methode angewendet, die die aggregierten Geschwindigkeitsdaten des Minimaldatensatzes als Referenz verwendet und aus am FKFS gemessenen, realen Geschwindigkeits-Zeit-Profilen die Zyklen so generiert, dass diese statistisch das Verhalten der jeweiligen Nutzergruppe abbilden. Diese Zyklen dienen als Grundlage für die folgende Bewertung und Optimierung der Antriebsstränge.

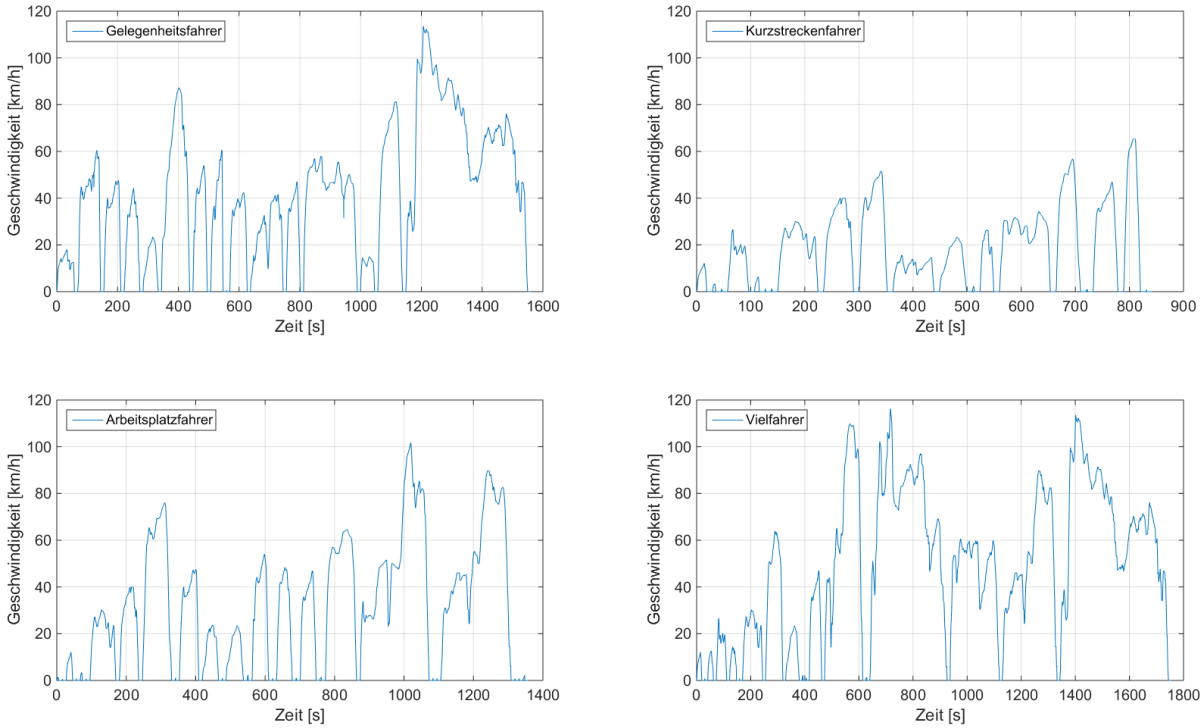


Abbildung 37: Geschwindigkeits-Zeit-Profile der vier Nutzergruppen

Des Weiteren wurden die Parameter Reichweite, Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit für die vier Nutzergruppen bestimmt. Diese dienen als Randbedingungen für die folgende Auslegung der Antriebsstränge. In Tabelle 8 sind diese speziell für den B250e aufgeführt. Die Reichweite und Höchstgeschwindigkeit wurden aufgrund der aktuellen Limitierung vom Elektrofahrzeug aus den Daten des C350e bestimmt. Dabei wurde jeweils das 99%-Perzentil angewendet. Somit können 99% der Fahrten, die mit dem Plug-In Hybrid durchgeführt wurden, mit dem später ausgelegten Elektrofahrzeug bewältigt werden. Die Beschleunigungszeiten entstammen einer Benchmark Analyse von Vergleichsfahrzeugen. Es wurde sich an typischen Fahrzeugen für die jeweilige Kategorie orientiert und folgende gewählt: Mercedes-Benz C250 für den Gelegenheits- und Vielfahrer, smart fortwo electric drive für den Kurzstreckenfahrer und B250e für den Arbeitsplatzfahrer.

Tabelle 8: Simulationsparameter der vier Nutzergruppen für den B250e

Nutzergruppe	Gelegenheitsfahrer	Kurzstreckenfahrer	Arbeitsplatzfahrer	Vielfahrer
Reichweite [km]	375	30	185	500
Beschleunigung (0 – 100 km/h) [s]	6,5	11,5	7,9	6,5
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	200	150	190	200

In Tabelle 9 sind die zusätzlichen Parameter für den C350e angegeben. Bei diesen wird zwischen den Anforderungen für das elektrische Fahren und den Gesamtanforderungen unterschieden. Die Reichweite und Höchstgeschwindigkeit für das elektrische Fahren wurden anhand des 95%-Perzentils aller Fahrten von C350e und B250e bestimmt. Somit muss bei nur 5% der Fahrten der Verbrennungsmotor verwendet werden. Die Beschleunigungszeiten entstammen wiederum einer Benchmark Analyse. Für die elektrische Beschleunigungszeit wurde der Mercedes-Benz C180d zum Vergleich gewählt. Die Zeiten für den Gelegenheits-, Arbeitsplatz- und Vielfahrer entsprechen der Beschleunigungszeit des C350e. Für den Kurzstreckenfahrer wurde mit dem Mercedes-Benz C180 ein Fahrzeug mit geringerer Motorisierung gewählt.

Tabelle 9: Simulationsparameter der vier Nutzergruppen für den C350e

Nutzergruppe	Gelegenheitsfahrer	Kurzstreckenfahrer	Arbeitsplatzfahrer	Vielfahrer
Reichweite elektr.[km]	55	12	35	60
Beschleunigung (0 – 100 km/h) [s]	5,9	8,2	5,9	5,9
Beschleunigung elektr. (0 – 100 km/h) [s]	11,1	11,1	11,1	11,1
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	250	210	250	250
Höchstgeschwindigkeit elektr. [km/h]	160	110	140	150

2.4.6. Zusammenfassung und Ergebnis

Die Nutzungsdaten und Umfrageergebnisse wurden ausgewertet und mit den Ergebnissen vier Nutzergruppen identifiziert. Für die vier Nutzergruppen wurden Geschwindigkeits-Zeit Profile erarbeitet, sowie zusätzliche kategorisierende Parameter, die als Grundlage für die Untersuchungen der folgenden Arbeitspakete 260 und 270 dienen.

2.5. AP 250: Genaue Untersuchung der Lastkollektive

2.5.1. Aufgabenbeschreibung:

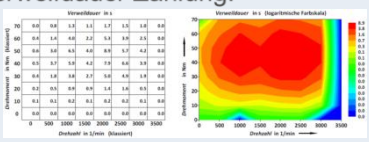
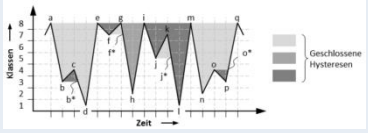
- Mithilfe des Modells aus AP240 werden detaillierte Lastkollektive (z.B. IGBT-Temperatur) für die verschiedenen Nutzungsszenarien ermittelt.
- Auswahl und Implementierung von Alterungs- und Zuverlässigkeitsmodellen
- Daraus können die Belastungen für die Antriebskomponenten (z.B. Inverter) geschätzt und miteinander verglichen werden.

2.5.2. Auswahl und Implementierung von Alterungs- und Zuverlässigkeitsmodellen

Für die Abschätzung der Belastung und Schädigung der Antriebsstrangkomponenten müssen Alterungs- und Zuverlässigkeitsmodelle in die Simulationsumgebung integriert werden. Nachfolgend werden die gewählten Modelle für die Komponenten Getriebe, E-Maschine, Leistungselektronik und Batterie vorgestellt.

Für die mechanischen Komponenten Getriebe und E-Maschine wurden die Überrollungs- und Wechsellastschädigung (Tabelle 10) zur Bestimmung der Komponentenbelastung gewählt. Als Lastkollektive dienen dafür die Drehzahl und das Drehmoment der jeweiligen Komponente. Diese können der Gesamtfahrzeugsimulation entnommen werden. Zur Berechnung der Überrollungs- und Wechsellastschädigung wurden zunächst die beiden Zählverfahren Verweildauerzählung [5] und Rainflowanalyse [6] implementiert. Anschließend wurden diese um die Berechnung der Belastung der Komponenten nach Palmgren-Miner erweitert. Die Grundlage der beiden Schadensakkumulationsverfahren bildet die fiktive Wöhlerlinie [7]. Mit dieser ist eine vergleichende Analyse von Antriebssträngen möglich. Die jeweils höhere Schädigung wird anschließend zur Bestimmung der Gesamtschädigung des Antriebsstrangs verwendet.

Tabelle 10: Überrollungs- und Wechsellastschädigung [2]

Schädigung	Überrollungsschädigung	Wechsellastschädigung
Physikal. Größen	Drehmoment + Drehzahl	Drehmoment
Zählverfahren	Verweildauer Zählung: 	Rainflow Analyse: 

Die Leistungselektronik unterliegt aufgrund von thermo-mechanischem Stress ebenfalls Alterungseffekten. Die Ursachen dafür sind hauptsächlich Temperaturschwankungen innerhalb des Bauteils, aufgrund der äußeren Belastung. Diesbezüglich wurde das Modell der Leistungselektronik um eine Temperatursimulation erweitert. Mit dieser ist es möglich für ein gewähltes Nutzungsszenario das Temperatur-Lastkollektiv zu ermitteln. Für die Bestimmung der Belastung der Leistungselektronik wurde das Alterungsmodell nach Held implementiert [8], [9]. Bei diesem werden auf Grundlage der Temperatur der Halbleiter mittels des Arrhenius Ansatzes die Anzahl Zyklen bis zum Ausfall für verschiedene Lastpunkte bestimmt. Anhand einer Rainflowanalyse werden die für das jeweilige Nutzungsszenario

auftretenden Zyklen der verschiedenen Lastpunkte bestimmt. Aus den maximal möglichen und den auftretenden Zyklen kann anschließend die Schädigung für das jeweilige Nutzungsszenario geschätzt werden.

Für die Belastung der Batterie wurde der Gesundheitszustand (SoH) als Kriterium ausgewählt. Zur Bestimmung vom SoH wurden verschiedene Alterungsmodelle von Batterien miteinander verglichen, siehe Tabelle 11. Dabei zeigte sich das Weighted-Ah Modell als am geeignetsten und wurde nach [10] umgesetzt. Als Stressfaktoren werden die Batterietemperatur und der Entladungsgrad (DoD) verwendet.

Da im Gegensatz zu den Belastungs- und Alterungsmodellen von Getriebe, E-Maschine und Leistungselektronik beim Weighted-Ah Modell keine Klassierungen mittels Zählverfahren notwendig sind, wurde dieses direkt in die Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung integriert. Aus der für das jeweilige Nutzungsszenario berechneten Kapazitätsmenge und der auf Grundlage der maximalen Anzahl an Lade- und Entladezyklen berechneten Gesamtkapazitätsmenge wird der SoH bestimmt.

Tabelle 11: Vergleich von Alterungsmodellen für Batterien

Methode	**Physikal. Modelle** (Elektrochem., Empirisch, ECM)	**Mathematische Modelle**	**Schädigungs Modelle** (Wöhler, Weighted Ah)
Vorgehen	Berechnung der Bildung der SEI-Schicht	Blackbox Modellierung mittels bspw. Neuronalen Netzwerken	$Ah_{eff} = \sum_i w_i * NEi * Ahi$
Vorteile	• Detaillierte Abbildung der Alterung anhand physikal. und chem. Formeln	• kein Zellwissen notwendig	• Einfache Implementierung • Verwendung der Palmgren-Miner Regel
Nachteile	• Detailliertes Wissen über die Zelle notwendig • Messdatensätze notwendig (Empir., ECM)	• Große Messdatensätze notwendig	• keine kalend. Alterung • Stressfaktoren müssen bekannt sein (Messung notwendig)

Die für die vier Antriebsstrangkomponenten Getriebe, E-Maschine, Leistungselektronik und Batterie berechneten Belastungen werden für die Vergleichbarkeit untereinander normiert. Die Belastung des Gesamtantriebsstrangs ergibt sich anschließend aus der Summe der vier normierten Einzelbelastungen. Durch die Einbettung der Methode in die Optimierungsumgebung ist eine Optimierung des Antriebsstrangs nach der Komponentenbelastung möglich.

2.5.3. Simulation der Belastungen der Antriebskomponenten

Für die in AP230 modellierten und parametrierten Antriebsstränge des C350e und B250e wurden die Lastkollektive für die vier Nutzungsszenarien Arbeitsplatzfahrer, Kurzstreckenfahrer, Gelegenheitsfahrer und Vielfahrer simuliert. In Abbildung 38 sind beispielhaft die Lastkollektive für den Antriebsstrang des C350e und dem Nutzungsszenario des Arbeitsplatzfahrers dargestellt. Mittels der so generierten Lastkollektive wurden die Gesamtbelastungen der Antriebstränge mit den implementierten Alterungs- und Zuverlässigkeitsmodellen bestimmt, aufgelistet in Tabelle 12. Zusätzlich wurde die benötigte Energie zum Befahren des jeweiligen Geschwindigkeits-Zeit Profils simuliert.

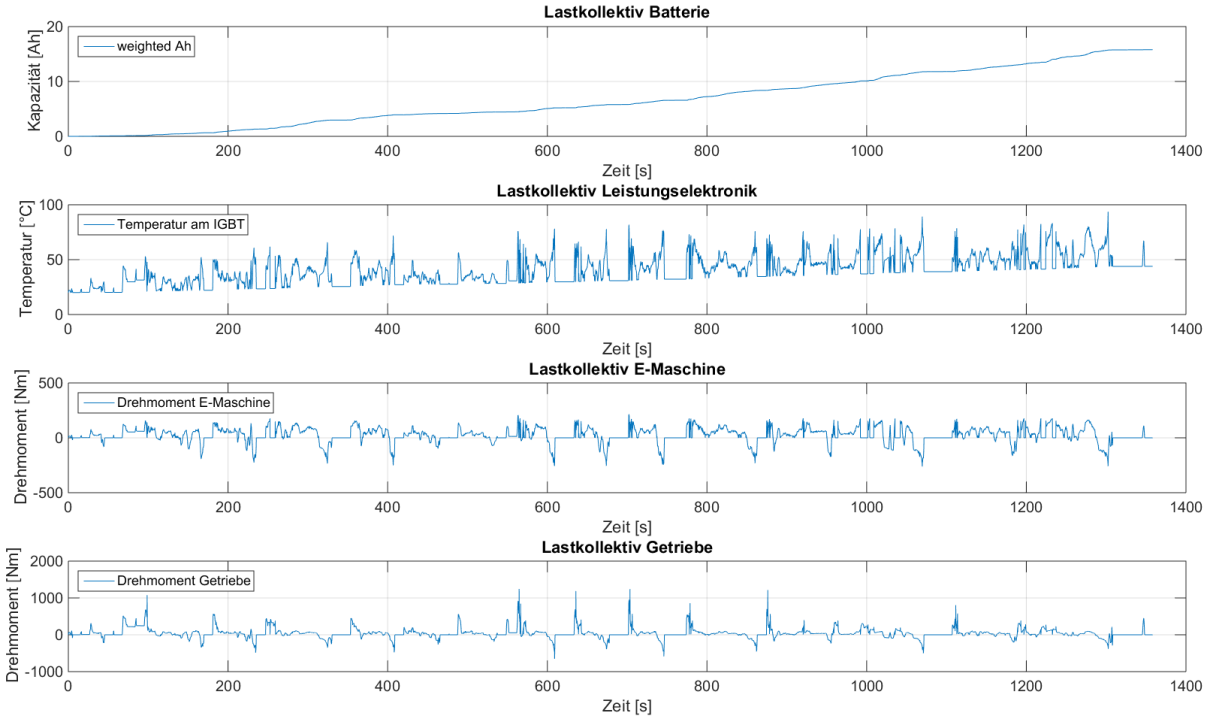


Abbildung 38: Lastkollektive für den C350e und dem Nutzungsszenario Arbeitsplatzfahrer

Tabelle 12: Ergebnisse Energieverbrauch und Belastung für Antriebsstränge C350e und B250e

Nutzergruppe (B250e)	Gelegenheitsfahrer	Kurzstreckenfahrer	Arbeitsplatzfahrer	Vielfahrer
Original – Energie [kWh]	2,95	0,76	1,97	4,15
Original – Gesamtbelastung [-]	72,1	23,2	20,1	79,5
Nutzergruppe (C350e)	**Gelegenheitsfahrer**	**Kurzstreckenfahrer**	**Arbeitsplatzfahrer**	**Vielfahrer**
Original – Energie [kWh]	9,2	2,7	5,92	9,79
Original – Gesamtbelastung [-]	6,7	3,5	3,5	4,7

2.5.4. Zusammenfassung und Ergebnis

Für die Antriebsstrangkomponenten Getriebe, E-Maschine, Leistungselektronik und Batterie wurden Alterungs- und Schädigungsmodelle recherchiert und implementiert. Die Grundlage dafür sind mittels der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung aus AP230 erzeugte Lastkollektive. Für die parametrierten Antriebsstränge des C350e und B250e aus AP230 wurden die Belastungen bestimmt und dienen als Referenz für die Optimierungen im folgenden Arbeitspaket.

2.6. AP 260: Wirkungsgradoptimierung des Gesamtsystems

2.6.1. Aufgabenbeschreibung:

- Einbettung des Antriebmodells in ein Optimierungssystem zur Auslegung und Bewertung der Topologien
- Ermittlung von Optimalkonfigurationen in Bezug auf Effizienz und bestmögliche Anpassung auf Kundenprofil (elektrische Reichweite, Ladeverhalten)

2.6.2. Anwendung eines multikriteriellen Optimierers

An die Optimierung von Antriebssträngen werden unterschiedliche Anforderungen gestellt. Es sollen mehrere, reelle Parameter variiert werden, beispielsweise die Anzahl serieller und paralleler Batteriezellen, oder die Drehmoment- und Leistungskennlinien der E-Maschine. Für diese Parameter existieren zudem Randbedingungen. Die Optimierung soll hinsichtlich mehrerer Zielgrößen geschehen, dem Energieverbrauch und der Komponentenbelastung. Die Anforderungen an die Optimierung lassen sich somit zusammenfassen:

- Betrachtung des Gesamtsystems
- Nichtlineare, multikriterielle Optimierung
- Mehrere, reelle Parameter mit Randbedingungen

Da für die Optimierung zwei Kriterien berücksichtigt werden, existieren mehrere optimale Lösungen (Pareto-Front), die abhängig von der Gewichtung der beiden Kriterien sind. Der Anwender kann schließlich die für die Problemstellung optimale Lösung aus der Pareto Front verwenden.

Für den Optimierungsablauf wurde eine Methode entwickelt, die in Abbildung 39 aufgezeigt ist. Im Schritt Preprocessing werden auf Grundlage der Auslegungskriterien aus AP240 (Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungszeit, elektr. Reichweite, …) für die zu optimierenden Parameter (z. Bsp.: Batteriegröße, Drehmoment E-Maschine, Getriebeübersetzung…) Randbedingungen definiert. Dies dient der Eingrenzung des Suchraumes, zur Beschleunigung der Optimierung und Vermeidung nicht verwendbarer Ergebnisse. Der anschließende Optimieralgorithmus beschreibt die Vorgehensweise der Generierung neuer Parameterwerte und die Bewertung der sich daraus ergebenden Simulationsergebnisse.

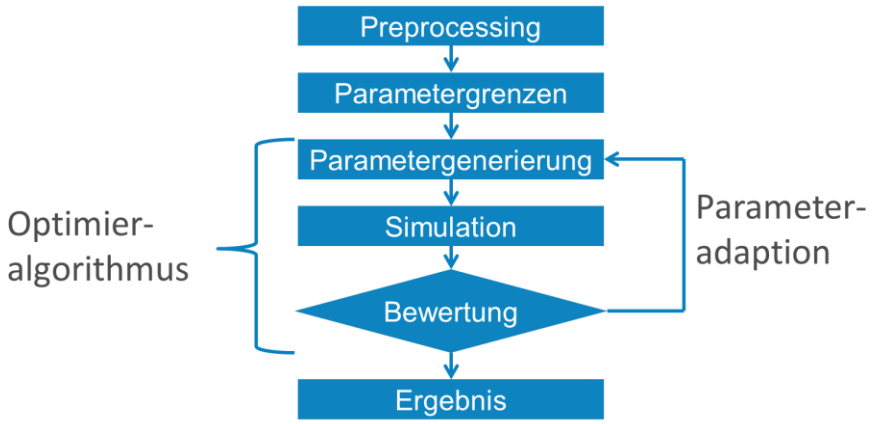


Abbildung 39: Optimierungsmethode

Anhand einer Literaturrecherche wurde sich für den Optimierungsalgorithmus „Multi-Objective Covariance Matrix Adaptation“ (MO-CMA-ES) entschieden. Der MO-CMA-ES stellt aktuell den Stand der Technik dar und in mehreren Veröffentlichungen wurde dessen Eignung für Mehrkriterielle Optimierungsprobleme nachgewiesen [11]. Es handelt sich dabei um einen Evolutionären Algorithmus.

Die Startpopulation wird im Preprocessing aus den Auslegungskriterien ermittelt und dient als erste Elternpopulation. Mittels einer Kovarianzmatrix, die in jedem Iterationsschritt abhängig vom Ergebnis angepasst wird, werden aus jedem Elternindividuum Nachkommen generiert, siehe Abbildung 40. Jeder Nachkomme beinhaltet dabei einen Satz der zu optimierenden Parameter. Dieser Parametersatz wird an die Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung übergeben und mittels der Simulation die gewählten Optimierungskriterien bestimmt. Die Kriterien werden zurück an den Optimieralgorithmus übergegeben und von diesem bewertet (Minimierungsproblem). Die Nachkommen, deren Kriterien am nächsten am Optimum liegen, gehen in die nächste Elternpopulation über, während schlechte Ergebnisse aussortiert werden.

Da das Optimum zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt ist, findet die Selektion mittels nicht-dominierender Sortierung und verteilter Hypervolumen Bestimmung statt. Die Anpassung der Schrittweite auf Grundlage eines erfolgreichen Nachkommen ist nach [12] realisiert. Sind Randbedingungen für die zu optimierenden Parameter gegeben und werden diese Überschritten, so wird nach [13] vorgegangen. Der Parameterwert wird auf den Wert der nächstgelegenen Randbedingung gesetzt und in Abhängigkeit der Distanz zwischen dem Parameterwert und dem Wert der Randbedingung wird ein Straffaktor auf das Ergebnis der Zielgrößen addiert.

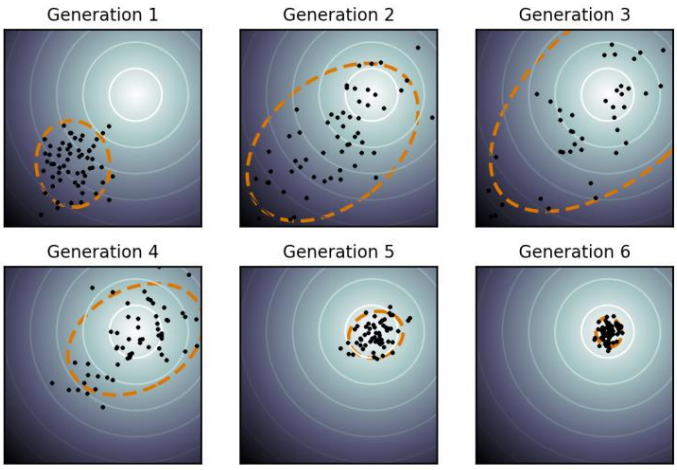


Abbildung 40: Beispieloptimierung über 6 Generationen [14]

Die Implementierung des Optimieralgorithmus wurde in Matlab® realisiert. Dies vereinfacht die Kopplung vom Optimieralgorithmus mit den erstellten Simulationsmodellen in Simulink®. Zur Bestimmung der Güte des implementierten Algorithmus MO-CMA-ES wurde dieser mittels mathematischen Testfunktionen nach [15] untersucht. Dies sind Standardprobleme mit Randbedingungen, die für Vergleiche von Optimierern eingesetzt werden. Die Ergebnisse für die Testfunktionen ZDT1, ZDT2 und ZDT3 mit jeweils zwei Zielgrößen sind in Abbildung 41 dargestellt. [1]

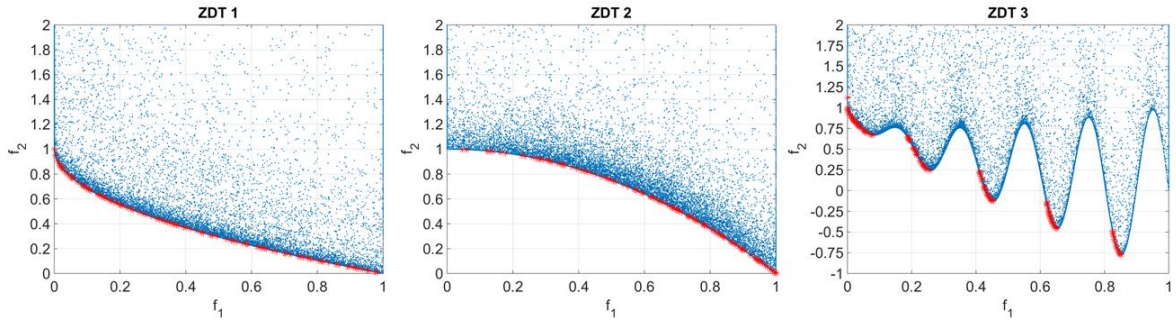


Abbildung 41: Ergebnisse der Validierung des implementierten MO-CMA-ES
(blaue Punkte: alle getesteten Lösungen, rote Sterne: Lösungen der letzten Generation) [1]

Zur Validierung wurden die in Abbildung 41 gezeigten Ergebnisse mit Ergebnissen von [16] verglichen. Dabei wurde das Hypervolumen zu einem definierten Referenzpunkt als Gütekriterium verwendet. In [16] wurde das Hypervolumen auf Grundlage einer optimalen Verteilung bestimmt. In Tabelle 13 aufgelistet ist ersichtlich, dass der implementierte Algorithmus MO-CMA-ES mit einem maximalen Fehler von 0,39 % eine hohe Güte aufweist. Der Fehler beim ZDT2 liegt an der nicht gleichverteilten Pareto-Front, aufgrund der geringen Anzahl Punkte. Bei einer höheren Anzahl Punkte ist die Abweichung vernachlässigbar. Dies zeigt, dass die Pareto-Front exakt und gleichverteilt ermittelt werden konnte. Der damit im Rahmen des AP260 nach [11] implementierte Optimierer kann für die Optimierung der Antriebsstränge eingesetzt werden. [1]

Tabelle 13: Ergebnisse der Validierung des implementierten MO-CMA-ES [1]

Funktion	Hypervolumen	Anzahl Punkte	ETH – SOP[16]	Abweichung
ZDT 1 – 1T	120,5683	100	120,6621	0,078%
ZDT 1 – 100T	120,6651	5379	120,6662	0,00091%
ZDT 2 – 1T	119,8588	100	120,3289	0,39%
ZDT 2 – 100T	120,3326	5304	120,3328	0,00017%
ZDT 3 – 1T	128,7735	100	128,7760	0,0019%
ZDT 3 – 100T	128,7774	4397	128,7777	0,00023%

Da für jeden erzeugten Nachkommen eine Simulation durchgeführt wird, wurden Methoden zur Beschleunigung des Ablaufes realisiert. Eine Methode stellt dabei die Parallelisierung dar. Der Optimieralgorithmus wurde so aufgebaut, dass mehrere Simulationen der Parametersätze der Nachkommen auf den vorhandenen Prozessorkernen laufen. Bei beispielsweise vier vorhandenen Prozessorkernen können vier Simulationen gleichzeitig laufen, wodurch eine Reduzierung der benötigen Auslegungszeit erreicht wird. Weiterhin wurden die Simulationen mit Simulink® eigenen Tools angepasst, indem eine C-Code Generierung des Simulationsmodells stattfindet. Dadurch wird die Simulationszeit gesenkt und nochmals die gesamte Auslegungszeit minimiert.

2.6.3. Ermittlung der Randbedingungen – speziell für den Plug-In Hybrid

Im Schritt Preprocessing, der gezeigten Optimierungsmethode, findet die analytische Berechnung der Randbedingungen der Antriebsstrangparameter statt. Die variierten Antriebsstrangparameter für den B250e sind:

- Anzahl serieller und paralleler Batteriezellen
- Drehmoment, Drehzahl und Leistung der E-Maschine
- Getriebeübersetzung

Beim C350e wurden folgende Antriebsstrangparameter variiert:

- Anzahl serieller Zellen
- Drehmoment und Leistung der E-Maschine
- Drehmoment und Leistung des Verbrennungsmotors
- Achsgetriebeübersetzung

Als Grundlage der Berechnung der Randbedingungen dienen einerseits die Fahrzeugparameter (cw-Wert, Stirnfläche, Bereifung, …), andererseits die in AP240 ermittelten Auslegungskriterien für die einzelnen Nutzergruppen (Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungszeit, …) und allgemeine Anforderungen für alle Nutzergruppen (Steigfähigkeit).

Für den Plug-In-Hybrid wurde ein spezielles Verfahren entworfen, dass es ermöglicht anhand der Anforderungen eine analytische Berechnung der Kennwerte der Antriebsstrangkomponenten E-Maschine und Verbrennungsmotor durchzuführen. Die minimale Leistung des Verbrennungsmotors bestimmt sich dabei aus der Höchstgeschwindigkeit, die das Fahrzeug fahren soll und das minimale Drehmoment aus der Steigfähigkeit. Aus den Kriterien der Beschleunigungszeit und Höchstgeschwindigkeit für das elektrische Fahren werden erste Kennwerte für die Leistung der E-Maschine berechnet.

Im Laufe der Bearbeitung zeigte sich, dass die Anforderung der minimalen Beschleunigungszeit für das Verfahren von Interesse ist. Das Fahrmanöver wird im Betriebsmodus Boosten bewältigt, bei dem Verbrennungsmotor und E-Maschine gleichzeitig das Fahrzeug antreiben. Die Leistung des Verbrennungsmotors wird dafür festgelegt auf die vorher berechnete Leistung aus der Höchstgeschwindigkeit. Somit kann über das entwickelte Verfahren die dafür minimal benötigte Leistung der E-Maschine berechnet werden, um die geforderte Beschleunigungszeit zu erreichen. Anhand des Vergleich der so bestimmten Leistung der E-Maschine, mit den berechneten Leistungen aus der rein elektrischen Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit kann die Randbedingung für die E-Maschinenleistung bestimmt werden. Das minimale Drehmoment der E-Maschine berechnet sich schließlich aus der vorher ermittelten Leistung und der Eckdrehzahl der E-Maschine. Der Parameter der Eckdrehzahl ist dabei für die Optimierung nicht fest definiert, sondern wird als Wertebereich angegeben.

2.6.4. Verknüpfung der Arbeitspakete 260 & 270

Im Arbeitspaket 260 erfolgte die Wirkungsgradoptimierung des Gesamtsystems, mit dem Ergebnis von ermittelten Optimalkonfigurationen der Antriebsstrangkomponenten in Bezug auf die Effizienz. Im Arbeitspaket 270 wurden diese Optimalkonfigurationen anschließend bezüglich der Komponentenbelastungen analysiert und optimiert. Diese gestaffelte Optimierung, zuerst nach dem Wirkungsgrad und anschließend nach der Komponentenbelastung, zeigte dabei starke Defizite.

Aus diesem Grund wurde die aufgebaute Optimierungsumgebung erweitert, damit die beiden Kriterien Wirkungsgrad und Komponentenbelastung gleichzeitig bewertet werden können. Anschließend werden für die Nutzungsszenarien aus dem Arbeitspaket 240 optimale Antriebsstränge ausgelegt, indem beide Randbedingungen berücksichtig werden. Die Ergebnisse der Optimierung werden in AP270 aufgezeigt.

2.7. AP 270: Erweiterung des Auslegeverfahrens um Komponentenbelastung

2.7.1. Aufgabenbeschreibung

- Analyse der Komponentenbelastung für die Auslegungen aus AP260
- Erneute Optimierung unter Berücksichtigung der Komponentenbelastung als Randbedingung
- Identifikation und Auslegungsempfehlung von besonders stark beanspruchten Komponenten

2.7.2. Optimierung der Antriebsstränge

Nach der Berechnung und Festlegung der Start- und Grenzwerte werden die Parameter dem Algorithmus MO-CMA-ES über einen Funktionsaufruf übergeben.

Der Algorithmus MO-CMA-ES wurde für die Optimierung so bedatet, dass 100 Elternindividuen jeweils ein Nachkommen erzeugen. Weiterhin wurden Abbruchkriterien definiert, die die Optimierung beenden sofern das Optimum gefunden ist, oder eine freiwählbare Anzahl von Funktionsaufrufen erfolgt ist (50.000 gewählt). Beim Funktionsaufruf wird der auf Grundlage des Elternindividuums erzeugte Antriebsstrangparametersatz des Nachkommens an die Fitnessfunktion übergeben.

Die Fitnessfunktion stellt die Schnittstelle zwischen dem Optimieralgorithmus und der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung dar. Die variierten Antriebsstrangparameter, sowie von diesen Parametern abhängige Antriebsstranggrößen werden der Simulation übergeben und die Simulation wird gestartet. Für die Auslegung des Elektro- und Plug-In-Hybrid-Antriebsstrangs werden als Zyklen die in AP240 erarbeiteten Geschwindigkeits-Zeit-Profile verwendet. Als Ergebnis der Simulation werden die benötigte Energie an die Fitnessfunktion übergeben, sowie die Lastkollektive für Getriebe, E-Maschine, Leistungselektronik und Batterie. Die benötigte Energie ist dabei die erste Zielgröße der Optimierung. Für den B250e wird die Energie aus der Leistungsbilanz an der Batterie gebildet, beim C350e zudem die dem Verbrennungsmotor in Form von Kraftstoff zugeführte Energie berücksichtigt. Aus den Lastkollektiven werden nach AP250 die Belastungen der einzelnen Komponenten bestimmt und zu einem Kennwert der Belastung des gesamten Antriebsstrangs zusammengefasst. Die Gesamtbelastung ist die zweite Zielgröße der Optimierung.

Da aufgrund der Variation der Antriebsstrangparameter die Auslegungskriterien aus AP240 in bestimmten Konstellationen nicht erfüllt werden, findet eine Überprüfung bezüglich der Beschleunigungszeit, Höchstgeschwindigkeit und Steigfähigkeit statt. Wird eine Anforderung nicht erfüllt, so wird ein Straffaktor, gleich dem Überschreiten von Randbedingungen von Antriebsstrangparameter in Kapitel 2.6.2, addiert. Anschließend werden die beiden Zielgrößen Energie und Belastung dem Algorithmus MO-CMA-ES übergeben.

Für die zwei Antriebsstränge des B250e und C350e aus AP230 wurden Optimierungen für die vier Nutzungsszenarien Gelegenheitsfahrer, Kurzstreckenfahrer, Arbeitsplatzfahrer und Vielfahrer durchgeführt. In Abbildung 42und Abbildung 43 sind die Ergebnisse der Optimierung im Vergleich zu den in AP250 berechneten Werten der Original Antriebstränge aufgezeigt. Es wird ersichtlich, dass mit den speziell optimieren Antriebssträngen für jedes Nutzungsszenario eine Verbesserung bezüglich des Energieverbrauchs und der Komponentenbelastung erzielt werden kann.

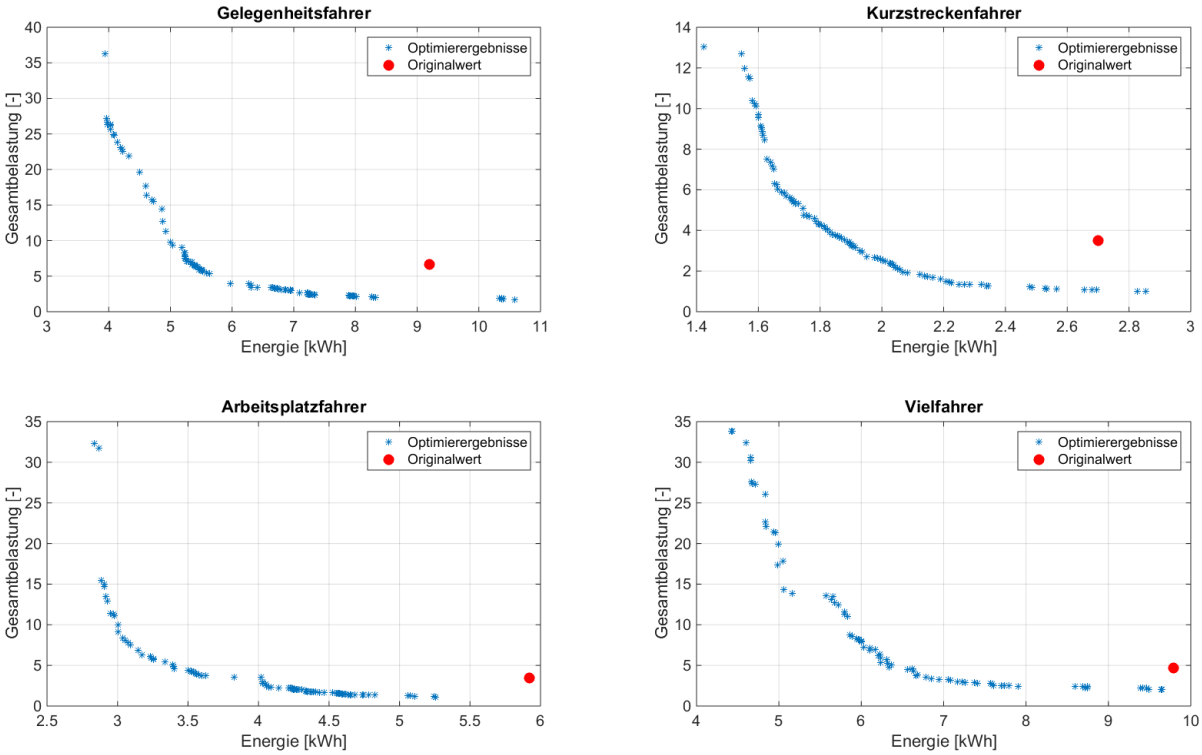


Abbildung 42: Ergebnisse für den C350e Plug-In Hybrid

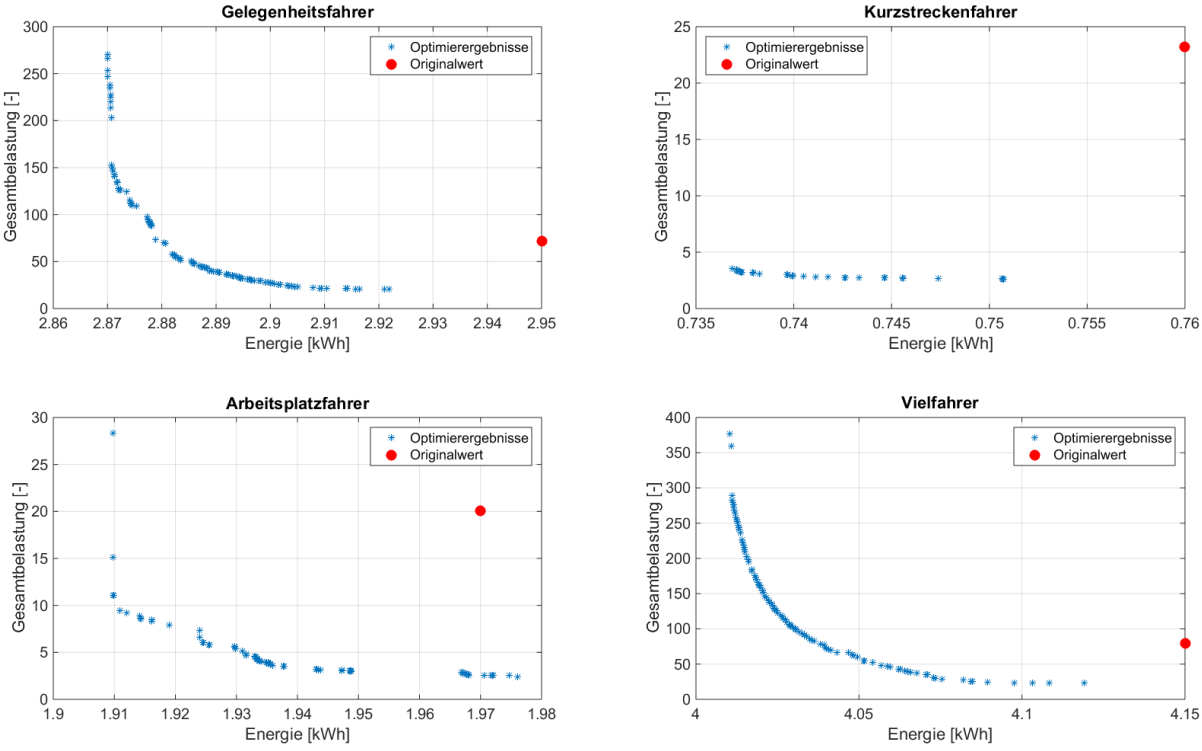


Abbildung 43: Ergebnisse für den B250e

2.7.3. Auswertung der Komponentenbelastung

Die Komponentenbelastung konnte für alle Nutzungsszenarien mittels der Optimierung reduziert werden. Es zeigt sich jedoch, dass die Komponentenbelastung und der Energieverbrauch einen Pareto-effizienten Zustand aufweisen. Eine weitere Reduzierung der Komponentenbelastung ist nur durch einen höheren Energieeinsatz zu realisieren.

Die Belastung der Batterie zeigt dabei einen konträren Verlauf zur Gesamtbelastung. Dies liegt daran, dass die Batteriebelastung sich aus der Energiebilanz berechnet und bei weniger benötigter Energie somit auch die Belastung sinkt.

Beim B250e hat die Belastung der E-Maschine den maßgebenden Anteil an der Gesamtbelastung. Ursächlich ist die Variation des Antriebsstrangparameters der Getriebeübersetzung. Mit abnehmender Getriebeübersetzung steigt die Belastung. Zum Befahren des Zyklus werden bei geringerer Übersetzung höhere Momente benötigt. Dies führt zur Zunahme der Überrollungs- und Wechsellastschädigung.

Beim C350e hat die Belastung des Getriebes den entscheidenden Einfluss an der Gesamtbelastung. Ursache ist hierbei die Variation des Antriebsstrangparameters der Achsgetriebeübersetzung. Bei kleinerer Achsgetriebeübersetzung wird ein höheres Getriebeausgangsmoment benötigt und dies erhöht wiederum die Überrollungs- und Wechsellastschädigung.

2.7.4. Zusammenfassung und Ergebnis

Es wurde ein Auslegungsverfahren entwickelt, dass es ermöglicht auf Grundlage von Nutzungsszenarien Antriebsstränge hinsichtlich Energieverbrauch und Komponentenbelastung zu optimieren. Für die Optimierung wird ein Evolutionärer Algorithmus eingesetzt, der im Anschluss an die Implementierung noch validiert wurde. Der Optimierer ist mit der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung gekoppelt. Dies ermöglicht die Ermittlung der Lastkollektive der Antriebsstrangkomponenten und daraus die Bestimmung der Gesamtbelastung des Antriebsstrangs.

Die Funktionalität wurde anhand der Optimierung der beiden Antriebsstränge des C350e und B250e nachgewiesen. Die Lösungen der Optimierung für die Zielgrößen Energieverbrauch und Komponentenbelastung liegen dabei als Pareto-Optimum vor. Jede Lösung wiederum enthält einen Satz Antriebsstrangparameter und definiert so einen Antriebsstrang. Es konnte gezeigt werden, dass die Pareto-optimalen Lösungen eine Verbesserung für die beiden Zielgrößen im Vergleich zum Original-Antriebsstrang darstellen.

2.7.5. Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projektes eMERGE II konnten zwei Veröffentlichungen realisiert werden. Auf der „VDI/VDE-Fachtagung AUTOREG 2017“ am 05./06. Juli 2017 in Berlin wurde der Beitrag „Optimierte Auslegung von Antriebssträngen mittels der FKFS-Triebstrangbibliothek“ vorgetragen. Dabei wurde die entwickelte Triebstrangbibliothek zusammen mit der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung vorgestellt.

Weiterhin wurde die Kopplung der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung mit dem Evolutionären Algorithmus MO-CMA-ES zur Multikriteriellen Optimierung von Antriebssträngen thematisiert. Die Methode wurde anhand einer Beispielauslegung eines Elektrofahrzeuges vorgestellt.

Die zweite Veröffentlichung wurde in der Zeitschrift MTZextra „Prüfstände und Simulation für Antriebe“ vom August 2017 mit dem Titel „Bewertung simulativ ausgelegter Antriebsstränge am Stuttgart Fahrsimulator“ platziert. Es wurde ebenfalls die entwickelte Triebstrangbibliothek zusammen mit der Gesamtfahrzeugsimulationsumgebung vorgestellt. Im nächsten Schritt fand die Kopplung mit dem Stuttgarter Fahrsimulator statt. Dies ermöglicht es simulativ ausgelegte Antriebsstränge am Fahrsimulator zu Fahren und zu Bewerten.

2.7.6. Literatur AP230-270

[1] Ebel, A.; Orner, M.; Riemer, T.; Reuss, H.-C.: Optimierte Auslegung von Antriebssträngen mittels der FKFS-Triebstrangbibliothek. VDI/VDE-Fachtagung AUTOREG, Berlin, 2017.

[2] Keilhoff, D.: Ein methodischer Ansatz zur Erstellung von Hybrid-Betriebsstrategien für die simulative Ermittlung von Lastkollektiven, Springer Vieweg, 2016.

[3] Keilhoff, D.; Reuss, H.-C.: Modulare Hybrid-Betriebsstrategie für die simulative Ermittlung von Lastkollektiven; Tag d. „Kooperativen Promotionskollegs Hybrid“, Stuttgart, 2014.

[4] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Fahrleistungen im Straßenverkehr, http://statistik-bw.de/Verkehr/KFZBelastung/v5c01.jsp (11.10.2017)

[5] Köhler, M.; Jenne, S.; Pötter, K.; Zenner, H.: Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.

[6] Endo, T.; Matsuishi, M.; K Mitsunaga, K. K.; Takahashi, K.: Rain Flow Method, the proposal and the applications, In: Memoirs of the Kyushu Institute of Technology, 33-62, Kitakyushu, 1974.

[7] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau, Aufl. 3, Springer Verlag, Berlin, 2004.

[8] Held, M.; et al.: Fast Power Cycling Test for IGBT Modules in Traction Application, Proceedings Power Electronics and Drive Systems, IEEE, 1997.

[9] Bayerer, R.; et al.: Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules – various factors influencing lifetime, 5th Int. Conf. on Integrated Power Systems (CIPS), Nürnberg, 11-13. März 2008

[10] Onori, S.; et al.: A new life estimation method for lithium-ion batteries in plug-in hybrid electric vehicles applications, Int. J. Power Electronics, Vol. 4, No. 3, S. 302-319, 2012.

[11] Igel, C., Hansen, N. und Roth, S.: „Covariance Matrix Adaption for Multi-objective Optimization,“ Evolutionary Computation, vol. 15, no. 1, pp. 1-28, März 2007.

[12] Voß, T., Hansen, N. und Igel, C.: „Improved Step Size Adaptation for the MO-CMA-ES,“ GECCO '10: Proceedings of the 12th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, pp. 487-494, Juli 2010.

[13] Hansen, N.: „The CMA Evolution Strategy: A Tutorial,“ 04 April 2016. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1604.00772.pdf. [Zugriff am 17 Mai 2016].

[14] Glass, C. W.: Modellierung, Simulation und Optimierung II, Vorlesungsskript, Stuttgart: Institut für Höchstleistungsrechnen, 2015.

[15] Zitzler, E., Thiele, L. und Kalyanmoy, D.: „Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results,“ Evolutionary Computation, vol. 8, no. 2, pp. 173-195, Juni 2000.

[16] „Systems Optimization,“ Institut TIK, ETH Zürich, Oktober 2009. [Online]. Available: http://people.ee.ethz.ch/~sop/download/supplementary/testproblems/ . [Zugriff am 06 09 2016].

2.8. AP 280: Requirements- und Test-Traceability xEV

2.8.1. Ziel des Arbeitspakets

Ziel ist die Erarbeitung eines technischen Verlinkungskonzepts, um die Nachvollziehbarkeit und Rückverfolgbarkeit von Entwicklungsartefakten für xEV zu ermöglichen. Die Ergebnisse dieses APs unterstützen die fachlichen Analysen in AP 210 auf technischer Ebene.

2.8.2. Aktivitäten, Verlauf und Ergebnisse

Im Rahmen des AP210 wurde eine Analyse der Spezifikationsdokumente des Systems *Charging System* (Ladesystem) durchgeführt. Im Hinblick auf die Verknüpfung von modellbasierter Spezifikation und textueller Spezifikation konnte festgestellt werden, dass im aktuellen Stand keine Verknüpfungen in Form von „Trace-Links“ zwischen den Elementen der Modelle und den Objekten des Textes vorhanden sind. Lediglich die finalen Diagramme der Modelle sind als Bilder in die Lastenhefte eingebunden. Diese Diagramme können durch ein Attribut (*Modell-Link*) im Spezifikationsdokument in das Enterprise Architect Modell zurückverfolgt werden. In den Attributen dieser Objekte im Spezifikationsdokument sind Bezeichner aus dem Enterprise Architect Modell abgelegt. Dies findet jedoch nicht für einzelne Modellelemente statt.

Es wurde eine Befragung von beteiligten Entwicklern durchgeführt ([BVR17]), welche aktiv an der Spezifikation des Systems arbeiten oder das Spezifikationsdokument für weitere Entwicklungsschritte nutzen. Zur Bewertung der fehlenden Verknüpfungen von textuellen Objekten und Modellelementen wurden den Teilnehmern zwei Beispiele aus dem Spezifikationsdokument präsentiert. Das erste Beispiel wurde von 72% der Teilnehmer als Beeinträchtigung der Qualität des Dokumentes bewertet. Das zweite Beispiel wurde sogar von 86% der Teilnehmer als Beeinträchtigung der Qualität bewertet.

Weiterhin sehen bei beiden präsentierten Beispielen 72% der Befragten einen dringenden Handlungsbedarf diesen Umstand zu beheben. Demgegenüber stehen jedoch 28% der Befragten, welche daraus keinen Handlungsbedarf ableiten. Der dringende Handlungsbedarf in Kombination mit der Tatsache, dass praktisch alle relevanten Elemente von fehlender Nachverfolgbarkeit betroffen sind, macht deutlich, dass zur Steigerung der Qualität der Spezifikationsdokumente Anpassungen an dem verwendeten Spezifikationsprozess notwendig sind.

Als Grund für die vorliegende Situation konnte der hohe Aufwand, bei der manuellen Verlinkung von Textobjekten und Modellelemente identifiziert werden. Erschwert wird die Verlinkung zudem durch die Tatsache, dass der Zugriff auf Bezeichner von Modellelementen in dem Werkzeug Enterprise Architect als sehr umständlich empfunden wird.

Zur Verbesserung der Verlinkungssituation ist daher eine automatisierte Lösung zu bevorzugen. Daraus resultieren außerdem, die in AP210 herausgestellten, Vorteile der Zeitersparnis und der Vermeidung von Fehlern und Inkonsistenzen durch die manuelle Übertragung von Modellinformationen in eine textuelle Spezifikation.

Auf Basis der durchgeführten Analysen ist ein Konzept zur Verknüpfung von modellbasierter und textueller Spezifikation erarbeitet worden. Im Rahmen des AP280 ist ein Prototyp entstanden, der das Konzept umsetzt. Die Aufgabe des Prototyps besteht darin unter Verwendung der bei Daimler eingesetzten Werkzeuge zur Spezifikation (Enterprise Architect) und IBM DOORS® einen hybriden Spezifikationsprozess zu unterstützen, wie er bei der Entwicklung von Teilsystemen (wie dem Ladesystem) von Elektrofahrzeugen Anwendung findet.

Der Prototyp soll dabei folgende Tätigkeiten automatisiert durchführen:

- Erzeugung von Anforderungen für das Lastenheft
- Korrekte Anordnung der Anforderungen in der Dokumentenstruktur
- Verlinkung der Entwicklungsartefakte der Aktivitätsdiagramme mit denen im Lastenheft

In der im Rahmen von AP210 durchgeführten Studie sind als Qualitätsbeeinträchtigung die Kategorie *Unnötige Wiederholung* und *Redundantes Element* identifiziert worden. Obwohl diese Kategorien nach Ansicht der Befragten im Vergleich zu den anderen Kategorien weniger schwerwiegend sind, erschweren diese eine korrekte Verlinkung.

In Abbildung 8 sind Elemente vorhanden, welche mehr als einmal auftreten. Im Lastenheft kann es darüber hinaus passieren, dass mehrere textuelle Objekte entstehen, welche sich auf lediglich ein einzelnes Modellelement beziehen. Bei der Änderung eines Textobjektes muss also sowohl ein weiteres Textobjekt geändert werden als auch das zugrunde liegende Modellelement. Sind im Aktivitätsdiagramm mehrere gleiche Elemente vorhanden, so müssen auch alle weiteren Modellelemente und die davon abgeleiteten Textobjekte angepasst werden.

Um dieses Problem zu umgehen ist zunächst ein Konzept entwickelt worden, welches automatisiert redundante Elemente aus Aktivitätsdiagrammen entfernt und dabei den Ablauf sowie die logischen Zusammenhänge erhält [BS16], [BMV17]. Für das Aktivitätsdiagramm in Abbildung 8**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ergibt sich durch die Anwendung des entwickelten Konzepts das Aktivitätsdiagramm, welches in Abbildung 44**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt ist. Im Gegensatz zu dem originalen Aktivitätsdiagramm sind alle mehrfach vorkommenden *Checks* und *Trigger* zu einzelnen Elementen zusammengeführt worden. Durch das Einfügen von zusätzlichen Steuerungselementen kann gleichzeitig der Ablauf und die logischen Zusammenhänge des ursprünglichen Aktivitätsdiagramms erhalten werden.

Aufgrund der Verzweigungen der Verbindungen und der zusätzlichen Steuerungselemente ist die Verständlichkeit des Aktivitätsdiagramms verschlechtert. Das redundanzfreie Aktivitätsdiagramm dient jedoch lediglich als Basis für die automatische Generierung und Strukturierung der Anforderungen sowie der automatisierten Verlinkung. Der Nutzer kann nach wie vor die Ansicht des Aktivitätsdiagramms nutzen, welche er gewohnt ist. Es wird daher eine parallele Nutzung der Aktivitätsdiagramme empfohlen.

Neben mehrfach auftretenden Modellelementen und Textobjekten stellt ein weiteres Problem die aktuelle verwendete textuelle Repräsentation im Lastenheft ein Problem dar. Beeinträchtigungen wie die Kategorien *Falscher aussagenlogischer Zusammenhang* und *Falsche Platzierung* sind darauf zurückzuführen.

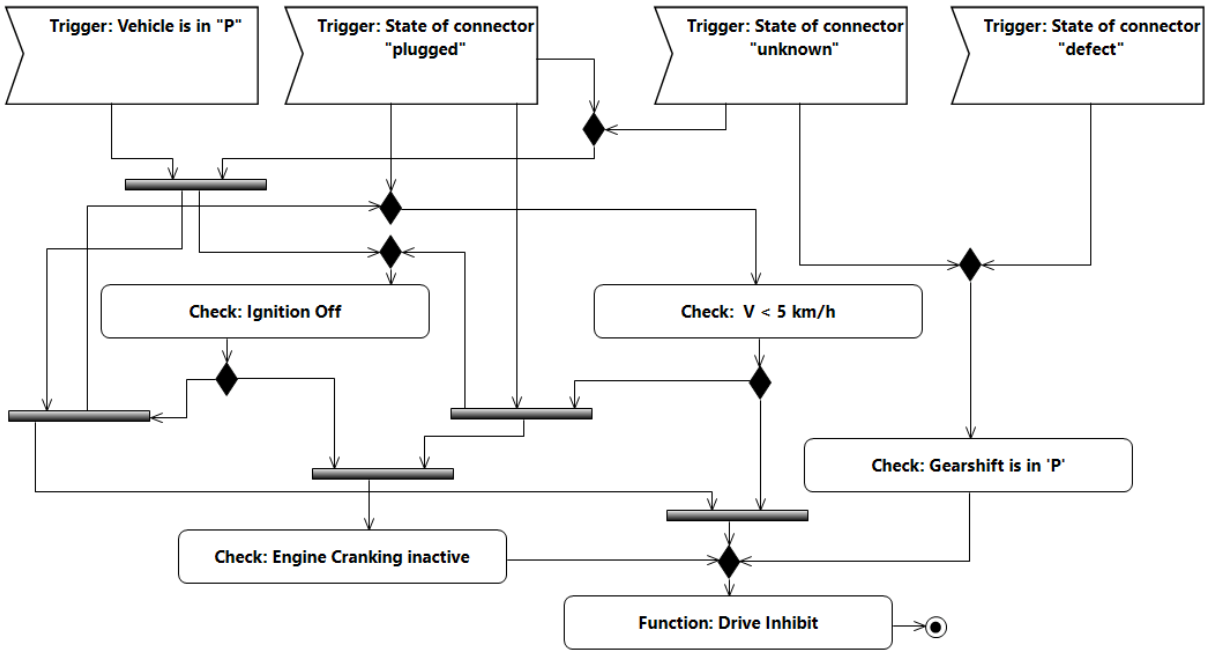


Abbildung 44: Aktivitätsdiagramm aus Abbildung 8 ohne redundante Elemente

Die aktuell verwendete textuelle Ansicht für das Aktivitätsdiagramm aus Abbildung 8 ist in Abbildung 45 dargestellt. Diese Ansicht zeichnet sich dadurch aus, dass Elemente, welche einen gemeinsamen Operator haben in ein Textobjekt zusammengefasst sind. Weiterhin werden die Operatoren am Ende eines Textobjektes explizit als String angefügt. In dieser Ansicht lassen sich die vorher benannten Beeinträchtigungen wiederfinden.

ID	Text	Leve	Type
1000	**Drive Inhibit**	2	Function
1236	State of connector "unknown" OR State of connector "defect" OR	3	Trigger
1237	Vehicle Gear Selector is in position "P"	4	Check
1111	State of connector "plugged on vehicle and EVSE side" ("PLUGGED"). OR	3	Trigger
1115	Ignition Off AND	4	Check
1112	Vehicle velocity is below 5 km/h AND	4	Check
1113	Engine Cranking inactive	4	Check
1114	Vehicle Gear selector is in position "P" OR	3	Trigger
1232	Vehicle velocity is below 5 km/h	4	Check
1233	State of connector "plugged on vehicle and EVSE side" OR State of connector "unknown" AND	3	Trigger
1238	Vehicle velocity is below 5 km/h AND	4	Check
1239	Ignition Off	4	Check

Abbildung 45: Aktuell verwendete textuelle Ansicht (Original)

Um eine geeignetere Ansicht zu finden, ist daher eine weitere Untersuchung durchgeführt worden. Im ersten Schritt der Untersuchung sind Vorschläge ausgearbeitet worden wie Alternativen zu der bisher verwendeten textuellen Darstellung aussehen können. Dabei hat sich herauskristallisiert, dass

für die Anwendung während der Spezifikation bei Daimler besonders die aussagenlogischen Zusammenhänge von Interesse sind. Als Resultat sind vier Alternativen entstanden [BV17]. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Gruppierungsansicht: Diese Ansicht ist in Abbildung 46 dargestellt. Sie orientiert sich stark an der aktuell verwendeten textuellen Ansicht. Zusätzlichen werden jedoch Textobjekte verwendet, welche dazu genutzt werden das Dokument feiner zu strukturieren. Dadurch können Beeinträchtigungen wie *Unnötige Wiederholung* und *Falscher aussagenlogischer Zusammenhang* verhindert werden. Die zusätzlichen Textobjekte im Lastenheft dienen lediglich zur Strukturierung und stellen keine Anforderungen als solche dar. Außerdem sind durch die feinere Strukturierung zusätzliche Dokumentenebenen notwendig. Dies kann das Verständnis der Spezifikation erschweren.

Text	Leve	Type
Drive Inhibit	2	Function
GROUP {	3	-
GROUP {	4	-
Vehicle is in "P" AND	5	Trigger
GROUP {	5	-
State of connector "plugged" OR	6	Trigger
State of connector "unknown"	6	Trigger
}	5	-
} THEN	4	-
Ignition Off	4	Check
V < 5 km/h	4	Check
} OR	3	-
GROUP {	3	-
State of connector "plugged" THEN	5	Trigger
V < 5 km/h THEN	4	Check
Ignition Off THEN	4	Check
Engine Cranking inactive	4	Check
} OR	3	-
GROUP {	3	-
GROUP {	4	-
State of connector "defect" OR	5	Trigger
State of connector "unknown"	5	Trigger
} THEN	4	-
Gearshift is in "P"	4	Check
}	3	-

Abbildung 46: Gruppierungsansicht

Normalformansicht: Die Normalformansicht ist in Abbildung 47 dargestellt. Diese Ansicht konzentriert sich allein auf die aussagenlogischen Zusammenhänge, welche in einem Aktivitätsdiagramm vorhanden sind. Dabei wird der ursprüngliche aussagenlogische Zusammenhang durch Umformungsregeln so umgeformt, dass eine disjunktive Normalform der Aussage entsteht. In dieser Normalform sind auf der untersten Ebene die benötigen Elemente mit einer UND-Verknüpfung verbunden. Auf der nächsthöheren Ebene sind mehrere dieser Elemente über ein logisches ODER verknüpft. Dieser Fokus auf die Aussagenlogik erlaubt schnell festzustellen, welche Elemente an bestimmten Zweigen

des Aktivitätsdiagramms zur Ausführung der Funktion notwendig sind. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass durch diese Darstellung lediglich zwei Ebenen in der Dokumentenhierarchie notwendig sind. Nachteil dieser Darstellung liegt jedoch in genau der Umformung in eine Normalform. Bei diesen Umformungen werden nicht benötigte Teilaussagen entfernt. Die Entfernung ist zulässig, wenn man sich komplett auf die logischen Zusammenhänge beschränkt. Dabei gehen jedoch Information über die Ausführungsreihenfolge verloren. Damit einher geht ein Verlust über die Informationen, welche Elemente unabhängig voneinander ausgeführt werden können. Eine Möglichkeit dem zu begegnen ist Gruppierungselement einzufügen, welche Elemente zusammenfassen, die parallel voneinander ausgeführt werden können.

Text	Leve	Type
Drive Inhibit	2	Function
GROUP OR	3	-
State of connector "plugged"	4	Trigger
Vehicle is in "P"	4	Trigger
Ignition Off	4	Check
V < 5 km/h	4	Check
GROUP OR	3	-
State of connector "unknown"	4	Trigger
Vehicle is in "P"	4	Trigger
Ignition Off	4	Check
V < 5 km/h	4	Check
GROUP OR	3	-
State of connector "plugged"	4	Trigger
V < 5 km/h	4	Check
Ignition Off	4	Check
Engine Cranking inactive	4	Check
GROUP OR	3	-
State of connector "unknown"	4	Trigger
Gearshift is in "P"	4	Check
GROUP	3	-
State of connector "defect"	4	Trigger
Gearshift is in "P"	4	Check

Abbildung 47: Normalformansicht

Baumansicht: Diese Ansicht ist in Abbildung 48 dargestellt. Sie orientiert sich an Syntaxbäumen [GF04]. Anstatt einzelne Textobjekte direkt miteinander zu verknüpfen, werden diese in Gruppen zusammengefügt, welche eine gemeinsame Verknüpfung haben (logisches UND / ODER). Unterhalb dieser Operatoren können weitere Operatoren mit Textobjekten platziert werden. Vorteil dieser Ansicht liegt in der Vermeidung der Beeinträchtigung *Falscher aussagenlogischer Zusammenhang*. Diese Ansicht ist näher an der Struktur des Aktivitätsdiagramms als die Normalformansicht. Jedoch besteht auch hier fast ein ausschließlicher Fokus auf aussagenlogische Zusammenhänge.

Text	Level	Type
Drive Inhibit	2	Function
OR	3	-
AND	4	-
Vehicle is in "P"	5	Trigger
OR	5	-
State of connector "plugged"	6	Trigger
State of connector "unknown"	6	Trigger
Ignition Off	5	Check
V < 5 km/h	5	Check
AND	4	-
State of connector "plugged"	5	Trigger
V < 5 km/h	5	Check
Ignition Off	5	Check
Engine Cranking inactive	5	Check
AND	4	-
OR	5	-
State of connector "defect"	6	Trigger
State of connector "unknown"	6	Trigger
Gearshift is in "P"	5	Check

Abbildung 48: Baumansicht

Exakt äquivalente Ansicht: Diese Ansicht ist aus der Literatur entnommen [FMC09]. Die Umsetzung auf das Beispiel ist in Abbildung 49 dargestellt. Die Idee besteht darin die Elemente des Aktivitätsdiagrammes direkt auf textuelle Zeichenfolgen zu übertragen. Die Darstellung einer *Action* eines Aktivitätsdiagramms wird beispielsweise durch die Verwendung von Klammern dargestellt, beispielsweise: *(Check: V < 5 km/h)*.

Text	Level	Type
Drive Inhibit	2	Function
>Trigger: Vehicle is in "P"] -> <JoinNode *jn1> -> (Check: Ignition Off) -> (Check: V < 5 km/h) -> <MergeNode *mn1> -> (Function: Drive Inhibit) -> <ActivityFinal> >Trigger: State of connector "plugged"] -> <MergeNode *mn2> -> <*jn1> >Trigger: State of connector "unknown"] -> <*mn2> >Trigger: State of connector "plugged"] -> (Check: Ignition Off) -> (Check: V < 5 km/h) -> (Check: Engine Cranking inactive) -> <*mn1> >Trigger: State of connector "defect"] -> <MergeNode *mn3> -> (Check: Gearshift is in "P") -> <*mn1> >Trigger: State of connector "unknown"] -> <MergeNode *mn3>	3	-

Abbildung 49: Exakt äquivalente Ansicht

Verbindungen zwischen einzelnen Elementen werden durch ASCII Pfeile (← und →) dargestellt. Für die mehrfache Verwendung werden Referenzen bei der erstmaligen Verwendung eines Elements genutzt, die an späterer Stelle wiederverwendet werden können. Vorteil dieser Darstellung ist, dass alle Informationen eines Aktivitätsdiagrammes abgebildet werden können. Nachteil ist, dass die Übersichtlichkeit und Lesbarkeit des resultierenden Textes nicht gegeben ist. Zudem ist diese Ansicht nicht geeignet für Personen, welche kein Wissen über Aktivitätsdiagramme haben. Dies stellt jedoch einen wichtigen Anwendungszweck der textuellen Repräsentation dar.

Der zweite Schritt der Untersuchung beschäftigte sich damit herauszufinden, welche der Ansichten den Beteiligten am Lastenheft Ladesystem am meisten zusagt. Von den Teilnehmenden der Untersuchung von AP210, haben sich auch fünf Personen bereit erklärt an dieser Untersuchung mitzuwirken. Den Teilnehmern wurde eine Fahrzeugfunktion aus dem Lastenheft Ladesystem präsentiert. Diese entspricht dem in Abbildung 8 dargestellten Aktivitätsdiagramm. Einziger Unterschied besteht darin, dass das Beispiel der Befragung direkt aus Enterprise Architect entnommen wurde. Anschließend sind den Teilnehmern die vier vorgestellten Ansichten sowie die derzeit verwendete Ansicht präsentiert worden. Zu jeder Ansicht gehörten ein erklärender Text sowie eine Auflistung von den jeweiligen Vor- und Nachteilen der Ansicht.

Im letzten Teil der Befragung erstellten die Teilnehmer eine Reihenfolge gemäß ihrer Präferenzen der textuellen Ansichten. Dazu mussten die Teilnehmer mittels paarweiser Vergleiche entscheiden, ob sie zwei Ansichten gleich nützlich finden oder ob sie eine Ansicht der anderen Ansicht bevorzugen. Für alle Kombinationen folgen daraus zehn Entscheidungen. Außerdem hatten die Teilnehmer die Möglichkeit in einem Freitextfeld einen Kommentar zu hinterlassen.

Die Ergebnisse dieser Befragung sind in Tabelle 14 dargestellt. In absteigender Folge sind die Präferenzen der Teilnehmer dargestellt. Sind in einer Spalte zwei Ansichten in einer Zelle, dann hat diese Ansicht dem Teilnehmer nach den gleichen Nutzen.

Tabelle 14: Reihenfolge der Ansichten für jeden Teilnehmer in absteigender Folge

Teilnehmer 1	**Teilnehmer 2**	**Teilnehmer 3**	**Teilnehmer 4**	**Teilnehmer 5**
Normalform	Gruppierung	Gruppierung	Gruppierung	Original
Gruppierung	Baum	Original	Baum	Baum
Original	Original	Baum	Original	Gruppierung
Baum	Normalform	Normalform	Normalform	Normalform
Exakt äquivalent	Exakt äquivalent	Exakt äquivalent	Exakt äquivalent	Exakt äquivalent

Die Gruppierungsansicht steht als eine der am höchsten gewerteten Ansichten drei Mal auf der obersten Position in der Reihenfolge. Die Normalform wurde von einem Teilnehmer auf die erste Position gewählt und von den restlichen Teilnehmern auf die vierte Position. Die derzeitige verwendete Ansicht (Original) ist einmal auf der ersten Position, einmal auf der zweiten Position und sonst auf der dritten Position vertreten. Die Baumansicht ist einmal auf der ersten Position, zwei Mal auf der zweiten Position. Die Exakt Äquivalente Ansicht wurde von allen Teilnehmern auf die letzte Position gewählt.

In Anbetracht der guten Positionierung der Gruppierungsansicht, scheint dies die am besten geeignete Ansicht zu sein. Gründe dafür liegen darin, dass die Ansicht der aktuellen ähnelt und daher den Teilnehmern bekannt ist. Außerdem werden die bekannten Schwächen der aktuellen Ansicht adressiert. Die Exakt Äquivalente Ansicht hingegen trifft auf gar keine Zustimmung. Daraus lässt sich ableiten, dass eine reine Transformation eines grafischen Modells zu Text im Rahmen des Spezifikationsprozesses nicht sinnvoll ist. Dies ist auf die geringe Lesbarkeit des resultierenden Textes zurückzuführen. Nichtsdestotrotz haben die Baumansicht und Normalform von einzelnen Teilnehmern Zustimmung erhalten. Beide haben den Vorteil, dass bestimmte Aspekte der Aktivitätsdiagramme (hier vor allem aussagenlogische Zusammenhänge) explizit gemacht werden. Um diese expliziten Informationen zu nutzen, ist jedoch der jeweilige Hintergrund der Teilnehmer zu beachten.

Zur Verbesserung der Qualität des Lastenheftes ist daher bevorzugt die Gruppierungsansicht zu verwenden. In Zukunft ist es auch denkbar für den jeweiligen Nutzer gewünschte Ansichten zu erzeugen. Dabei gibt es jedoch durch das verwendete Werkzeug DOORS einige Grenzen, da andere Ansichten nur möglich sind, wenn diese redundant im Lastenheft auftauchen. Reine Alternativen sind nicht umsetzbar.

Unter Beachtung dieser Erkenntnisse ist ein Prototyp entwickelt worden, welcher die eingangs erwähnten Tätigkeiten automatisiert.

In Abbildung 50 ist die Architektur des Prototyps dargestellt. Durch die Nutzung von Adaptern kann der Prototyp an beliebige Werkzeuge angeschlossen werden. Dies ist sowohl auf Seiten der textuellen als auch der modellbasierten Spezifikation möglich.

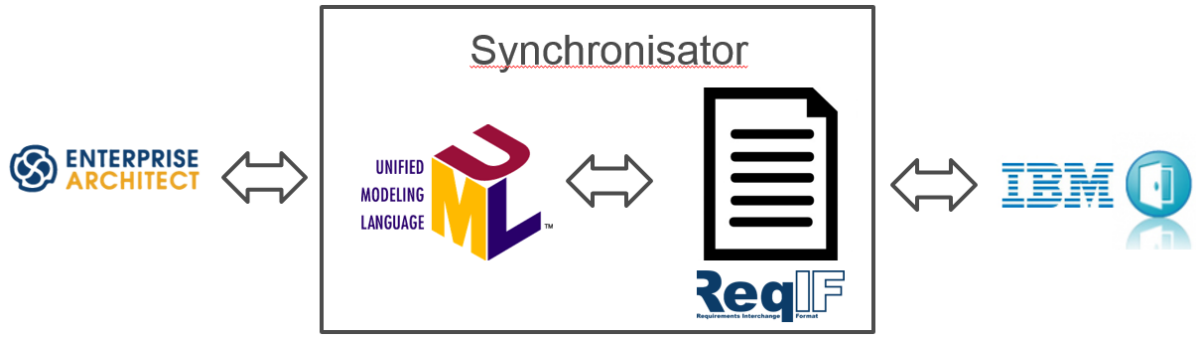


Abbildung 50: Schematische Funktionsweise des Prototyps

Zur Transformation zwischen der modellbasierten Spezifikation und der textuellen Spezifikation wird auf offene und freiverfügbare Implementierungen gesetzt. Dies gewährleistet eine Weiterentwicklung unabhängig von kommerziellen Werkzeugen. Die Zwischenschicht dient zu dem als Basis, um verschiedene Ansichten zu erzeugen. Die derzeit generierte Gruppierungsansicht kann daher jederzeit durch eine andere Ansicht ersetzt oder ergänzt werden.

Auf Seiten der modellbasierten Spezifikation wird die Umsetzung der Spezifikation UML2.5 mittels MDT UML realisiert [MDT]. Auf Seiten der textuellen Spezifikation wird eine modifizierte Variante des offenen Austauschformats ReqIF [REQIF] eingesetzt. Dieses Format dient ursprünglich dem Aus-

tausch von Anforderungs- und Spezifikationsinformationen von verschiedenen textuellen Werkzeugen. Als solches bietet es geeignete Strukturen, um textuelle Informationen persistent zu verwahren. Zudem ist eine vollständige Abbildung der Informationen der Modelle möglich.

Die aktuelle Version des Prototypen beinhaltet die Adapter zu den bei Daimler eingesetzten Werkzeugen Enterprise Architect und IBM Doors®. Weiterhin ist die Extraktion der relevanten Informationen aus den Modellen für die textuelle Spezifikation umgesetzt. Die Rückführung von Informationen aus der textuellen Spezifikation in die modellbasierte Spezifikation umfasst den Abgleich, ob Elemente im Text oder im Modell fehlen und ob diese von der enthaltenen Beschreibung und vom Typ her identisch sind. Des Weiteren ist es möglich Unterschiede bezüglich der zugrunde liegenden Logik zu entdecken. Dies beinhaltet aussagenlogische Zusammenhänge und Ausführungsaspekte der einzelnen Aktionen.

Die Verknüpfung der einzelnen Entwicklungsartefakte wird automatisiert durchgeführt bei der Erstellung der textuellen Bestandteile des Lastenheftes. Dabei werden sowohl im Lastenheft als auch in den Modellen die benötigten Informationen zu den korrespondierenden Entwicklungsartefakten abgelegt. Die Bidirektionale Verbindung wird von Prozessmodellen wie CMMI gefordert [CMMI].

In Abbildung 51 ist die grafische Oberfläche der aktuellen Version der prototypischen Implementierung dargestellt. In der linken Hälfte der Abbildung muss zunächst ein Enterprise Architect Modell oder ein daraus konvertiertes „.uml“ angegeben werden. Eine Konvertierung eines Enterprise Architect Modells nach „.uml“ wird automatisch durch den implementierten Adapter durchgeführt.

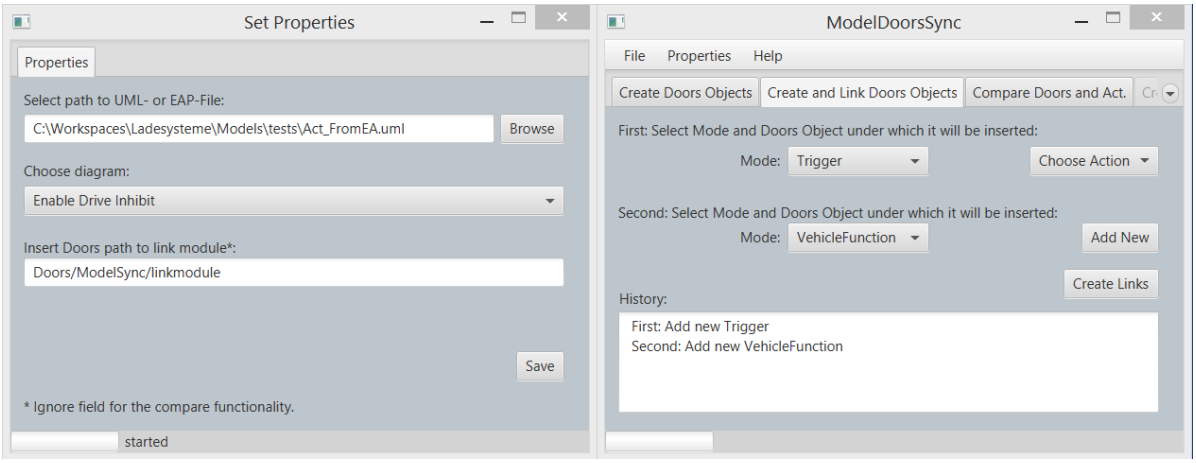


Abbildung 51: Grafische Oberfläche der Implementierung des Prototyps

Anschließend kann ein Diagramm aus dem Modell ausgewählt werden. Auf Basis dieses Diagramms kann in einem Spezifikationsdokument in IBM Doors® eine Fahrzeugfunktion erstellt werden. In der Abbildung ist als Beispiel die Funktion der Wegfahrsperre beim Aufladen des Fahrzeuges (Enable Drive Inhibit) ausgewählt. Die Auswahl eines Doors Link Modules ist nicht für die Verknüpfung von Modellelementen und Textobjekten notwendig, sondern dient dazu innerhalb von Doors Textobjekte miteinander zu verknüpfen (beispielsweise Anforderungen und Testfälle). Die Verknüpfungsinformationen werden bei der Erzeugung der Fahrzeugfunktion im Spezifikationsdokument automatisch un-

ter Nutzung eines Attributs (Modell-Link) eingefügt. Auf Seiten des Modells sind die einzelnen Elemente ebenfalls mit einem Attribut ausgestattet, in welchem Identifizierungsinformationen aus IBM Doors® enthalten sind.

In der rechten Hälfte der Abbildung ist der Dialog zur Erstellung einer Fahrzeugfunktion im Spezifikationsdokument dargestellt. Voraussetzung ist eine laufende Instanz von IBM Doors®. Zunächst können in einem optionalen Schritt bestimmte Informationen wie Auslöser (Trigger) aus den Fahrzeugfunktionen extrahiert werden. Anschließend wird die Erstellung der Fahrzeugfunktion durchgeführt. Dazu wird in der laufenden Instanz von IBM Doors® im Spezifikationsdokument die Position ausgewählt, an welcher die Fahrzeugfunktion erstellt werden soll. Ist eine Verknüpfung von extrahierten Informationen aus der Fahrzeugfunktion und der Fahrzeugfunktion selbst gewünscht, können diese Verknüpfungen ebenfalls automatisiert erstellt werden.

In einem weiteren Dialog sind die Synchronisationsfähigkeiten des Prototyps untergebracht. Darin enthalten sind Überprüfungen, ob sowohl Modell als auch Lastenheft vollständig sind in Bezug auf die vorhandenen Elemente in dem einen oder dem anderem. Zusätzlich können verlinkte Elemente auf Übereinstimmung überprüft und angepasst werden. Dadurch wird sichergestellt, dass auch bei iterativen Entwicklungsprozessen stets das grafische Modell und die textuelle Repräsentation im Lastenheft übereinstimmen.

Weitere Fähigkeiten des Prototyps umfassen das Anzeigen von Abweichungen bei aussagenlogischen Zusammenhängen sowie Abweichungen bei der Ausführungsreihenfolge. Erste Rückmeldungen von den Benutzern haben ergeben, dass Änderung dieser Aspekte vornehmlich auf Seiten der Modellbasierten Spezifikation sattfinden und daher eine Übertragung vom Lastenheft zu Modell bei Abweichungen für diese Fälle nicht notwendig ist.

2.8.3. Literatur

[BS16] M. Beckmann and A. Schlutter, "*Automatische Duplikateliminierung in Aktivitätsdiagrammen von Fahrzeugfunktionen*," in INFORMATIK 2016, Lecture Notes in Informatics (LNI), 2016.

[BMV17] M. Beckmann, V. Michalke, A. Vogelsang and A. Schlutter „*Removal of Redundant Elements within UML Activity Diagrams*“, in ACM/IEEE 20th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems, 2017.

[BV17] M. Beckmann and A. Vogelsang "*What is a Good Textual Representation of Activity Diagrams in Requirements Documents?"*, in 7th International Model-Driven Requirements Engineering Workshop (MoDRE). IEEE, 2017.

[GF04] R. Gilberg and B. Forouzan, "*Data Structures: A pseudocode approach with C. Nelson Education*", 2004

[FMC09] D. Flater, P. Martin, and M. Crane, "*Rendering UML activity diagrams as human-readable text.*" NISTIR 7469, National Institute of Standards and Technology, Tech. Rep., 2009

[BW06] Madeleine Bates and Ralph M. Weischedel. „*Challenges in natural language processing*“. Cambridge University Press. 2006.

[MDT] Eclipse Model Development Tools.
World Wide Web: http://www.eclipse.org/modeling/mdt/

[REQIF] Object Management Group. World Wide Web:
http://www.omg.org/spec/ReqIF/1.1/

3. AP 300: Nutzerverhalten

3.1. AP 310: Aufbereitung aktueller Erkenntnisse zum Nutzerverhalten

3.1.1. Ziel des Arbeitspakets

Innovative Produkte sowie neue Technologien waren am Markt immer dann erfolgreich, wenn Sie tatsächlich eine nutzenstiftende Funktion für die Konsumenten hatten. In einer Vielzahl von Studien zeigte sich immer wieder die Bedeutung der Analyse des Nutzerverhaltens für den Markterfolg von technologischen Innovationen. Genau aus diesem Blickwinkel lassen sich auch Elektro- bzw. Plug-In-Hybridfahrzeuge betrachten. Aus diesem Grund war es das primäre Ziel der Universität Siegen, in dem Forschungsprojekt eMERGE2 Kundengruppen zu identifizieren und Anforderungen, Bedürfnisse aber auch Hemmnisse gegenüber dieser Form von Fahrzeugen zu ermitteln. Den Grundstein dieser Arbeitspakete bildeten dabei die Ergebnisse bzw. resultierenden Erkenntnisse aus vergangenen Studien. Insbesondere im AP310 bestand die Aufgabe darin, den aktuellen Forschungsstand zum Thema Elektromobilität aufzubereiten und entsprechend den Mehrwert der eigenen Studien herauszuarbeiten. Aufgrund aktueller gesellschaftlicher Entwicklungen musste es sich hierbei um einen fortlaufenden Forschungsprozess handeln, da diese Anforderungen sich stetig wandeln und neue Technologien die Wahrnehmung dieser Fahrzeuge verändern, wodurch sich ebenfalls immer wieder neue detaillierte Fragestellungen ergaben.

3.1.2. Bisherige Studien zur Akzeptanz von Elektrofahrzeugen

Vor circa 8 Jahren wurden beispielweise noch Elektrofahrzeuge als nur bedingt alltagstauglich wahrgenommen und wenn, dann auch nur für kurze regelmäßige Fahrten innerhalb einer Großstadt (Bernstein Research 2011). Mit dieser vorgefertigten Meinung ging auch das Phänomen einher, dass Fahrzeuge mit alternativen Antriebsarten stetig mit Fahrzeugen, die einen herkömmlichen Verbrennungsmotor besitzen, bzgl. der Reichweite, des Preises und der Lade- und Tankinfrastruktur verglichen wurden. Der Mehrwert hinsichtlich des Fahrkomforts, aber natürlich auch hinsichtlich der Umweltschonung wurde zunächst von Probanden weitestgehend ignoriert (Peters und Dütschke 2010). Interessanterweise zeigten statistisch gesehen sowohl aktive Nutzer als auch Nicht-Nutzer eine positive Einstellung gegenüber der Elektromobilität als solches. Sowohl Kolke und Gärtner (2010) sowie Peters und Hoffmann (2011) hatten eine solche allgemeine positive Einstellung nachweisen können, dennoch überwogen bei einem potentiellen Neukauf immer die Angst bzw. die wahrgenommenen Einschränkungen im Alltag, wodurch diese Fahrzeuge noch nicht den gewünschten Markterfolg erzielten.

Im Zuge dessen widmeten sich darauffolgende Studien der Fragestellung, wodurch diese Hemmnisse abgebaut werden könnten bzw. wie die positive Einstellung weiter gesteigert werden könnte, da unabhängig von Elektrofahrzeugen bei den meisten Produkten, aber eben auch bei Elektrofahrzeugen, ein starker Zusammenhang zwischen der Einstellung und einem tatsächlichen Kaufakt besteht (Dütschke et al. 2011). Es war jedoch nicht möglich, auf Basis der bisherigen Forschung eine allgemeingültige Aussage über die Höhe der Kaufabsicht zu treffen, da diese je nach Studie in der Vergangenheit stark geschwankt hat. Festzuhalten ist jedoch, dass, ausgehend von bisherigen Studien, eine grundsätzliche Kaufbereitschaft unter den Verbrauchern existiert. Gegenüber den wahrgenommenen Hemmnissen, die sich allerdings durch Proben und Testen von Elektrofahrzeugen verringern las-

sen, stand immer noch das Problem der quasi nicht existenten Aufpreisbereitschaft gegenüber Elektrofahrzeugen (Krems et al. 2011). Bei Kundengruppen, die grundsätzlich eine hohe Technikaffinität sowie ein besonders hohes Umweltbewusstsein aufzeigten, existierte zwar eine geringe Bereitschaft, für Elektrofahrzeuge mehr zu zahlen als für Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor (Kurani et al. 1994), allerdings war dieser Mehrbetrag erheblich geringer als die tatsächliche preisliche Differenz auf dem Markt, die zwischen einem Elektroauto und einem äquivalenten Fahrzeug mit Verbrennungsmotor besteht. Die aktuellen Anschaffungspreise sind also deutlich zu hoch und stellen ein weiteres Hemmnis dar, auch wenn potentielle Käufer unter bestimmten Umständen durchaus bereit wären, grundsätzlich ein Elektrofahrzeug zu kaufen. Eine These, die ebenfalls bereits von Peters und Dütschke (2010) bestätigt wurde. Dennoch, eine Begeisterung und das Interesse an neuen Technologien sowie ein hohes Umweltbewusstsein waren bei den meisten aktiven Fahrern von Elektrofahrzeugen vorhanden (Knie et al. 1997; Truffer, Harms und Wächter 2000; Peters und Dütschke 2011; Hidrue et al. 2011; Krems et al. 2011; Wietschel et al. 2011). Diese Fahrer sind also offen für neue Technologien und es reizt sie, diese auch auszuprobieren. Oftmals arbeiten Sie sogar in technikbezogenen Berufen (Peters et al. 2011). So gaben beispielsweise freiwillige Teilnehmer einer Feldstudie an, ihre Motivation beruhe darauf, die Technologie verbessern zu wollen, und es hinterlasse bei Geschäftspartnern und Kunden schlichtweg einen guten Eindruck, mit diesen Fahrzeugen bei einem Termin zu erscheinen (Krems et al. 2011). Außerdem sind die Teilnehmer dieser Studien meistes besorgt über aktuelle Umweltentwicklungen und verhalten sich umweltbewusster als die Allgemeinheit. Gordon und Sargöllü (2000) konnten konkret einen statistisch signifikanten Einfluss der Umwelt- und Technikeinstellungen auf die Wahl des Fahrzeugantriebs feststellen: Umweltbewusstere und technikbegeisterte Probanden wählten also mit einer höheren Wahrscheinlichkeit ein Elektrofahrzeug.

Eine weitere Variable, die die Einstellung ebenfalls positiv beeinflussen kann, ist das vorhandene Grundwissen zum Thema Elektromobilität. Peters et al. (2011) konnten zeigen, dass der Wissensstand mit der Einstellung und der Kaufabsicht signifikant korreliert. Je mehr ein potentieller Kunde also über das Gesamtthema Elektromobilität wusste, desto positiver waren auch seine Einstellung und seine erklärte Kaufabsicht gegenüber Elektrofahrzeugen. Truffer, Harms und Wächter (2000) zeigten zudem, dass auch unter Erstnutzern von Elektrofahrzeugen (trotz hoher Selbsteinschätzung des eigenen Wissensstandes) viele Unsicherheiten bzgl. des genutzten Fahrzeugs bestanden. So könnten bspw. Folgekosten, die Zuverlässigkeit eines Elektroautos oder das Feedback des sozialen Umfelds nur schwer abgeschätzt werden (Truffer, Harms und Wächter 2000).

Verschiedene Studien belegten somit zunächst ein allgemeines Informationsdefizit, insbesondere im Umgang mit den Themen der tatsächlichen Reichweite, Ladeinfrastruktur und Verbrauchsersparnissen (Turrentine und Kurani 1995). Sowohl qualitative Studien (durchgeführt meist in Form von persönlichen Interviews) als auch quantitative Befragungen belegten allerdings den unmittelbaren positiven Zusammenhang zwischen einem hohen Vorwissen und einer positiven Einstellung zum Fahrzeug. Dennoch zeigten die Daten auch, dass die Vorkenntnisse zum Thema Elektromobilität grundsätzlich allgemein sehr mangelhaft waren und dass, abgesehen von Experten, ein großes Informationsdefizit in der Bevölkerung vorherrschte (Roland Berger Strategy Consultants 2010). In weiteren Studien von Ozaki und Sevastyanove (2011) wurde allerdings belegt, dass sich dieses Informationsdefizit teilweise durch Testfahren beseitigen lässt. Die Autoren konnten zeigen, dass vorausgehende Erfahrungen mit Elektrofahrzeugen, ob persönlich oder von Bekannten, die Wahrnehmung wesentlich verbessern. Unabhängig davon entdeckten Deffner et al. (2012) das Phänomen der sozialen Anerkennung, welches mit der aktiven Nutzung von Elektrofahrzeugen einherging. In mehreren Studien berichteten Fahrer von dem sehr positiven sozialen Feedback, das ihnen durch Arbeitskollegen, Familienmitglieder sowie Fremden auf der Straße entgegengebracht wurde. Des Weiteren zeigte dieses Umfeld im Anschluss an die positiven Reaktionen stets ein hohes Interesse an dem Themenbereich

Elektromobilität. Deffner et al. (2012) beschrieben solche Situationen als „Show-Effekt“, wobei sie das Fahrzeug zunehmend als positives Statussymbol bezeichneten. Eine weitere spannende Verhaltensweise, die aktiven Fahrern zugrunde lag, bestand darin, dass sie ein multimodales Mobilitätsverhalten zeigten. Sie waren also dadurch gekennzeichnet, dass sie eine kombinierte Nutzung von unterschiedlichen Fortbewegungsmitteln bevorzugten. Peters und Hoffmann (2011) konnten zeigen, dass Verbraucher mit multimodalem Mobilitätsverhalten eher zur Nutzung und zum Kauf eines Elektroautos tendierten. Das Elektrofahrzeug stellte für sie somit nur eine weitere Möglichkeit dar, die eigene Flexibilität und mobile Individualität zu erhöhen (Peters und Hoffmann 2011). Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass solche Early Adopter umweltbewusst und technikaffin sind, ein hohes Vorwissen besitzen und oftmals multimodal mobil sind.

3.1.3. Studien zu spezifischen Fahrzeugeigenschaften

Neben diesen psychologischen Merkmalen, mit denen sich Kundengruppen beschreiben lassen, um bewusst Zielgruppen anzusprechen und um Maßnahmen zu entwickeln, die die grundsätzliche Einstellung, Akzeptanz und Kaufbereitschaft steigern, beschäftigten sich auch zahlreiche jüngere Studien mit den unmittelbaren Auswirkungen von Fahrzeugeigenschaften sowie der vorhandenen Ladeinfrastruktur. In einer Studie mit 62 Probanden wurden Teilnehmer in einer Feldstudie mit einer besonders langsamen bzw. besonders schnellen Ladestation konfrontiert. So zeigten Gebauer et al. (2016) einen unmittelbaren positiven Anstieg und eine Weiternutzungsintention der Fahrzeuge nach dem Gebrauch einer Schnellladestation. Probanden berichteten hier, dass der aktive Test bzw. die aktive Nutzung von solchen Säulen die Bedenken von langen Ladezeiten verringerten. Neben der Ladezeit signalisierten Probanden mit einem geringen Vorwissen ebenfalls eine hohe Reichweitenangst bzw. eine Angst, mit dem Wagen auf der Landstraße oder auf der Autobahn zum Erliegen zu kommen. Damit einhergehend machten sich Teilnehmer oftmals Sorgen, den gewünschten Zielort nicht erreichen zu können oder aufgrund von beispielsweise klimatischen Bedingungen im Winter die real verbleibende Reichweite nicht einschätzen zu können. Die Studie von Franke et al. (2012) zeigte allerdings, dass erfahrene Nutzer schnell ein natürliches Gespür für die verbliebene Reichweite ihrer Fahrzeuge entwickelten und längere Strecken im Vorfeld schlicht besser planten. Nach einer Weile der Nutzung verschwand somit die Reichweitenangst im Alltag komplett. Darüber hinaus erwähnten die Probanden, dass ein Großteil der jeweils getätigten Fahrten nur zwischen 3 und 10 Kilometern lang war, was problemlos selbst bei einer Hin-und Rückfahrt durch Elektrofahrzeuge gewährleistet werden kann. Dies ist auch ein Beispiel dafür, dass der reale Bedarf an Reichweite von Fahrern oftmals falsch eingeschätzt wird. Hahnel et al. (2013) wiesen eine grundsätzliche Tendenz nach, wonach Fahrer die benötigte Reichweite bzw. die real gefahrenen Kilometer stetig überbewertet hatten.

Dennoch ist diese Angst bzgl. der Reichweite und einer möglicherweise hohen Ladedauer bei Fahrern, die kein Elektrofahrzeug oder Plug-In-Hybrid Fahrzeug besitzen oder schon einmal testweise gefahren sind, nun einmal vorhanden. Dies belegten alle Studien und genau diese beiden Punkte werden, abgesehen vom Preis, auch stets als größtes Hemmnis beim Kauf angegeben. Es liegt somit an der Industrie, eben diese beiden Punkte vergleichbar mit dem Komfort eines Verbrennungsfahrzeugs zu gestalten. Dies ist für einen Massenmarkt von Elektrofahrzeuge unabdingbar. Aufbauend auf diesen Studien setzen nun die in eMERGE2 durchgeführten Arbeitspakete an. Zunächst wurden vereinzelnd immer wieder die Auswirkungen der psychologischen Variablen auf die Einstellung und die Kaufabsicht nachgewiesen, da bislang ein umfassendes Model, welches alle Variablen auf einmal betrachtet, in der Forschung fehlte. Des Weiteren bestand eine große Forschungslücke darin, in wie weit diese Variablen auch eine Wiederkaufsintention bei aktiven Fahrern von Elektrofahrzeugen oder

Plug-in-Hybriden erklären. Außerdem war es unklar, wie hoch die Reichweite und wie gering die Ladezeit tatsächlich sein müssen, damit sie nicht mehr als eine Behinderung bzw. Hemmnis im Alltag wahrgenommen werden. Insbesondere herrscht hierbei bei Fahrzeugherstellern eine große Unsicherheit hinsichtlich der Zahlungsbereitschaft für beispielsweise weitere 100 Kilometer an Reichweite. Einhergehend mit der Zahlungsbereitschaft ist es ebenfalls aus politischer Sicht wichtig zu erfahren, in wie weit eine Nachfrage durch kostenbezogene Anreize gesteigert werden kann.

3.2. AP 320: Längsschnittanalyse des Nutzerverhaltens

3.2.1. Ziel des Arbeitspakets

Das Ziel dieses Arbeitspaket war es, die Wirkungszusammenhänge, die in den angegeben Studien vereinzelt angesprochen wurden, in einem Gesamtmodel abzubilden. Zur Systematisierung der Variablen wurden zum einem die Innovation Diffusion Factors von Everett M. Rogers (2003) sowie die Theory of Reasoned Action von Ajzen und Fishbein (2002) verwendet.

3.2.2. Einflussfaktoren auf die Einstellung und Kaufintention

Nach Rogers lässt sich die Akzeptanz einer neuen technischen Innovation anhand von 5 Faktoren bzw. Variablen erklären. Zunächst muss das Produkt bzw. die Innovation einen gewissen wahrgenommenen Vorteil bieten. Je positiver dieser wahrgenommene Vorteil ist, desto positiver sollte auch die Einstellung gegenüber diesem Produkt sein. Im Kontext der Elektromobilität werden diese Fahrzeuge allerdings eher mit Hemmnissen und technischen Einschränkungen gegenüber einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor verbunden. Im Rahmen des Forschungsprojektes eMERGE2 äußerten die Flottenteilnehmer allerdings auch immer wieder, dass Sie sehr von dem Fahrkomfort und der Leistung überrascht waren. Das bedeutet, neben einem möglichen Bewusstsein, etwas Positives für die Umwelt zu tun, müssen zukünftige Fahrzeughalter auch einen klaren Vorteil in diesen Autos erkennen und diesen als wichtig für den Kaufentscheidungsprozess einstufen. Wenn dies der Fall ist, sollte sich dadurch die Einstellung gegenüber dem Fahrzeug allgemein verbessern.

Der nächste Faktor, basierend auf der Theorie von Rogers, ist die wahrgenommene Komplexität. Der Ladevorgang unterscheidet sich beispielsweise von einem herkömmlichen Tankvorgang eines Verbrennungsfahrzeuges. So bedarf es z.B. einer App oder eines Lageplans über die Ladeinfrastruktur der jeweiligen Umgebung, in der ein Fahrer sich aufhält. Ladesäulen sind zudem mit unterschiedlichen Ladekabeln bzw. Bezahlungsmechanismen ausgestattet. Aufgrund einer fehlenden Standardisierung und möglicherweise mangelnder Erfahrung der Fahrzeughalter, kann die alltägliche Nutzung von Elektrofahrzeugen im Vorfeld als sehr komplex eingestuft werden. Der Umgang mit den Ladesäulen fungiert hierbei nur als Beispiel. Probanden aus eMEREGE2 berichteten zudem von Problemen und Unsicherheiten bezüglich der Anzeigen der Rekuperationen und Restreichweite. Somit kann eine wahrgenommene hohe Komplexität also eher zu einer Verringerung der Einstellung führen. Eine erhöhte Akzeptanz von Elektrofahrzeugen kann sich ebenso bei einer erhöhten Wahrnehmung dieser Fahrzeuge im sozialen Umfeld einstellen. Wenn mögliche Kaufinteressierte viele Fahrzeuge in ihrer unmittelbaren Umgebung wahrnehmen, fällt die Evaluierung für die Nützlichkeit dieser Fahrzeuge leichter. Außerdem fördert generell eine erhöhte Marktpenetration von Elektrofahrzeugen das Bewusstsein, dass solche Fahrzeuge existieren, funktionieren und im Alltag geeignet sind. Auch hier lässt sich somit die Hypothese unterstellen, dass eine erhöhte Wahrnehmung im sozialen Umfeld die Einstellung positiv beeinflusst.

Vorurteile und persönliche Skepsis gegenüber einem Produkt können auch durch Erprobungen und Testdurchläufe abgebaut werden. Der erhöhten Fahrkomfort und die tolle Leistung von Elektrofahrzeugen ist vielen Studienteilnehmern im Vorfeld nicht bewusst gewesen. Auch im Projekt eMERGE2 berichteten die Flottenteilnehmer oftmals, dass Freunde und Verwandte nach einer Testfahrt vom Fahrzeug begeistert waren. Solche Ereignisse können sich somit sehr stark positiv auf die Akzeptanz der Fahrzeuge auswirken. Sollte sich also auch diese Hypothese bewahrheiten, wäre es eine klare

Handlungsempfehlung, in allen Verkaufshäusern jedem Interessierten eine Testfahrt schnell und unkompliziert anzubieten.

Selbst wenn alle bisherigen vier Variablen stark positiv ausgeprägt sind, kann die individuelle Einstellung dennoch sehr niedrig für Elektrofahrzeuge ausfallen, wenn diese Fahrzeuge einfach nicht als alltagskompatibel eingestuft werden. Die Universität Siegen unterstützte beispielsweise stark den Aufnahmeprozess der Teilnehmer für die Flotte. Hierbei schilderten potentielle Kunden im Interview immer wieder, dass sie sehr gerne ein solches Fahrzeug (in diesem Fall die Mercedes-Benz B250e) nutzen würden, allerdings beispielsweise im medizinischen Bereich arbeiteten und auch im Winter sicher ohne Ladevorgang 250 Kilometer fahren müssten. Ein solches Szenario ist in der Regel für die Fahrzeuge nicht umsetzbar. Dieses Beispiel illustriert die Bedeutung der Alltagstauglichkeit. Egal um welche Technologie es sich handelt, wäre eine daraus resultierende Produktinkompatibilität im Alltag ein klares Nutzungshemmnis. Wenn das Produkt allerdings als kompatibel wahrgenommen wird, müsste sich die Einstellung entsprechend stark erhöhen.

Basierend auf Theory of Reasoned Action ist es wichtig, die Motive zur Einstellungsbildung zu erfassen, da die Variable Einstellung unmittelbar mit einer konkreten Nutzungs- bzw. Kaufabsicht zusammenhängt. In zahlreichen Marketingstudien konnte dieser Zusammenhang immer wieder nachgewiesen werden. Die Einstellung ist allerdings nicht die einzige Variable, die auf eine Kaufabsicht wirkt. Ebenso wichtig ist die wahrgenommene soziale Anerkennung, die durch eine unmittelbare Nutzung resultieren würde. Bereits Deffner et al. (2012) konnten zeigen, dass die Nutzer eines Elektrofahrzeuges stets Anerkennung aus dem sozialen Umfeld erhielten. Ausgehend von dieser Idee wäre es denkbar, dass die Anschaffung ebenfalls mit einem Wunsch nach Prestige zusammenhängt. Diese Hypothese wurde bereits in zahlreichen Interviews der Geschäftskunden von eMERGE2 bestätigt. Viele Teilnehmer wollten durch das Fahrzeug bei einem Geschäftstermin einen guten Eindruck hinterlassen. Eine weitere wichtige Variable, die basierend auf der Theory of Reasoned Action positiv auf die Kaufabsicht wirkt, ist die Wahrnehmung, selbstständig die Kaufentscheidung treffen zu können. So kann es Kunden geben, die eine extrem positive Einstellung gegenüber diesen Fahrzeugen hegen und auch davon überzeugt sind, dass die Nutzung eine hohe soziale Anerkennung mit sich bringen wird, die aber nicht über genügend finanzielle Ressourcen verfügen oder bei denen die Anschaffung eher eine Gemeinschaftsentscheidung ist und somit durch die Bedürfnisse des Partners moderiert wird.

Ausgehend von diesen Argumenten bzw. Hypothesen lassen sich zwei Modelle zur Erklärung der Einflussgrößen auf die Einstellung sowie die Nutzungsabsicht abbilden. Basierend auf den Innovation Diffusion Factors von Everett M. Rogers (2003) wurde daher der Einfluss dieser 5 Faktoren auf die Einstellung über ein Regressionsverfahren untersucht, zusammen mit den aus der bisherigen Literatur bekannten Kontrollvariablen Vorwissen, Technologieaffinität und Umweltbewusstsein. Dieses Verfahren ist eine übliche statistische Methode, um Wirkungszusammenhänge zwischen metrisch skalierten Variablen nachzuweisen und im Ergebnis die aufgestellten Hypothesen zu bestätigen oder abzulehnen. So ist beispielsweise die Einstellung gegenüber Elektrofahrzeugen bei den Befragten unterschiedlich hoch bzw. niedrig. Möglicherweise korreliert aber dieses Antwortverhalten mit dem Umweltbewusstsein. So überprüft eine lineare Regression unter Berücksichtigung der Probandenanzahl und der Streuung der Daten, ob mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von über 95% ein Zusammenhang der Variablen tatsächlich bestehen muss und nicht durch einen Zufall entstanden ist. Sollte sich dieser Zusammenhang bestätigen, kann es dennoch Teilnehmer geben, die zwar ein hohes Umweltbewusstsein besitzen, aber eine negative Einstellung gegenüber Elektrofahrzeugen besitzen. Solch eine Abweichung könnte im Einzelfall auf ein geringes Vorwissen zurückgeführt werden. Das bedeutet, dass ein Regressionsverfahren alle eingeschlossenen unabhängigen Variablen bzw. Erklärungsvariablen simultan betrachtet und möglichst viel der Varianz der abhängigen Variable zu erklären versucht. Nach diesem Verfahren wurden ebenso, basierend auf der Theory of Reasoned Action,

die Einflüsse auf die Nutzungsabsicht untersucht, durch die Einstellung, soziale Norm bzw. die Wahrnehmung die alleinige Kontrolle über die Kaufentscheidung zu haben.

Daher wurde zunächst dieses Modell, in Form einer ersten Studie, durch einen Fragebogen mit einem Sample von 728 Teilnehmer abgefragt. Dabei wurden die einzelnen Variablen über mehrere Einzelfallfragen auf einer 7er-Skala erhoben. Diese Voruntersuchung diente dazu, die Wirkungszusammenhänge auf die Einstellung gegenüber Fahrzeugen mit alternativen Antriebsarten allgemein in der deutschen Gesellschaft abzubilden. Unter dieser ersten Studie befanden sich 58% Männer und 42% Frauen. Das Durchschnittsalter lag bei 41 Jahren, wobei der jüngste Befragte 18 Jahre alt war und der älteste 67. In folgender Tabelle ist eine Zusammenfassung dieser Wirkungszusammenhänge:

Tabelle 15: Ergebnisse der 1. Studie (Einstellung)

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.
	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta		
(Konstante)	-0.17	0.35		-0.49	0.63
Wahrgenommener Vorteil	0.45	0.05	0.45	8.48	0.00
Komplexität	-0.19	0.05	-0.17	3.76	0.00
Möglichkeit der Erprobung	-0.01	0.03	-0.01	-0.14	0.89
Wahrnehmung im sozialen Umfeld	0.02	0.04	0.02	0.45	0.65
Alltagskompatibilität	0.29	0.05	0.34	6.14	0.00
Umweltbewusstsein	0.12	0.04	0.11	2.86	0.00
Vorwissen	0.07	0.04	0.07	-1.93	0.05
Technologieaffinität	0.01	0.04	0.01	0.30	0.77

Mit Hilfe dieser Daten konnte gezeigt werden, dass sich statistisch hochsignifikant der wahrgenommene Vorteil, die Komplexität, die Alltagskompatibilität, ein hohes Umweltbewusstsein und ein ausgeprägtes Vorwissen positiv auf die Einstellung auswirken. In diesem Maße bestätigen diese Ergebnisse weitestgehend vorhandene Studien. Ein direkter positiver Effekt, ausgelöst durch eine besonders hohe Technikaffinität, konnte durch die Daten nicht nachgewiesen werden. Insgesamt konnte hier circa 70% der Varianz der abhängigen Variable Einstellung mit diesem Modell erklärt werden. Bei der Regressionsanalyse mit der Kaufabsicht als abhängige Variable konnte hingegen nur 60% der Varianz der Daten erklärt werden:

Tabelle 16: Ergebnisse der 1. Studie (Kaufintention)

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.
	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta		
(Konstante)	-0.17	0.35		-0.49	0.63
Einstellung	0.57	0.06	0.52	9.26	0.00
Eigenständige Entscheidung	-0.02	0.05	-0.02	-0.46	0.65
Soziale Wahrnehmung	0.16	0.05	0.14	3.00	0.00

Hier zeigte es sich, dass die Einstellung signifikant den größten Einfluss auf eine Kaufabsicht ausübt. Konkret abgelesen am unstandardisierten Regressionskoeffizienten Beta bedeutet der Wert, dass die Kaufabsicht in der Befragung auf der 7er-Skala um eben diese 0,57 Einheiten steigen würde, wenn die grundsätzliche Einstellung um eine Einheit ansteigt. Ebenfalls signifikant in diesem Model ist die gefühlte soziale Norm. Hier ist der Regressionskoeffizient zwar kleiner als bei der Einstellung und damit ist diese Variable auch etwas unbedeutender, dennoch ist auch hier der Effekt hochsignifikant und unterstützt somit auch statistisch die Aussagen aus den vorangegangen Interviews.

3.2.3. Einflussfaktoren auf die Wiederkaufsintention

Obwohl beide Auswertung einen guten Überblick geben, wie Elektrofahrzeuge gesamtgesellschaftlich wahrgenommen werden und welche Variablen die Einstellung und die Kaufabsicht bedingen, bleibt in der empirischen Sozialforschung immer eine gewisse Diskrepanz zwischen einer getätigten Aussage und dem tatsächlichen Verhalten, in diesem Fall also einem realen Kauf. Aus diesem Grunde wurde dieses Modell ebenfalls bei den eMERGE2 Flottenteilnehmern berechnet. In dieser zweiten Studie wurde dann allerdings nicht mehr nach einer Kaufintention gefragt, sondern nach einer Wiederkaufsintention. Zunächst sind hier die Ergebnisse der Einflussgrößen auf die Einstellung:

Tabelle 17: Ergebnisse der 2. Studie (Einstellung)

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.
	Regressionsko-effizient B	Standardfehler	Beta		
(Konstante)	-0.17	0.35		-0.49	0.63
Wahrgenommener Vorteil	0.04	0.07	0.06	0.64	0.52
Komplexität	0.16	0.08	0.18	2.07	0.04
Möglichkeit der Erprobung	0.07	0.05	0.13	1.49	0.14
Wahrnehmung im sozialen Umfeld	-0.08	0.06	-0.12	-1.42	0.16
Alltagskompatibilität	0.34	0.09	0.39	3.86	0.00
Umweltbewusstsein	-0.09	0.08	-0.10	-1.19	0.24
Vorwissen	0.21	0.11	0.19	2.03	0.04
Technologieaffinität	0.00	0.12	0.00	0.02	0.99

Es zeigen sich dabei diverse Unterschiede zu den Ergebnissen aus der ersten Studie. So sind nun nur noch die Alltagskompatibilität, der wahrgenommene Vorteil und das Vorwissen signifikante Einflussgrößen, wobei die wahrgenommene Kompatibilität im Alltag den wichtigsten Effekt darstellt. Durch die tatsächliche regelmäßige Nutzung kristallisiert sich also heraus, dass basierend auf einer wahrgenommen ausreichenden Reichweite und genügend Lademöglichkeiten diese Komponenten das Fahrzeug alltagstauglich gestalten und eben dieser Punkt bei der Beeinflussung der Einstellung die wichtigste Variable ist. Spannenderweise hat das Umweltbewusstsein keinen signifikanten Einfluss mehr. Eine reine Fokussierung auf diese Variable, insbesondere bei der Bewerbung von Elektrofahrzeugen, ist also keine ausreichende Eigenschaft, um neue potentielle Käufer für ein solches Fahrzeug zu begeistern und langfristig an diese Technologie zu binden. Es müssen eher die unmittelbaren Vorteile des Fahrzeugs, beispielweise bei der Leistung und dem Komfort, beworben werden. Außerdem sollte

z.B. über Messen oder Fallbeispiele die Alltagstauglichkeit der Fahrzeuge stärker kommuniziert werden. Die Analyse der Wirkungen auf die Wiederkaufsintention zeigte weitestgehend ähnliche Effekte. Dieses Modell wurde mit der Flotte mehrmals erhoben und blieb im Zeitverlauf stabil.

Tabelle 18: Ergebnisse der 2. Studie (Wiederkaufsintention)

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.
	Regressionskoeffizient B	Standardfehler	Beta		
(Konstante)	-0.84	0.65		-1.30	0.20
Einstellung	0.52	0.12	0.36	4.53	0.00
Eigenständige Entscheidung	0.45	0.09	0.38	4.87	0.00
Soziale Wahrnehmung	0.22	0.07	0.25	3.39	0.00

3.3. AP 330: Erarbeitung von Nutzerprofilen

3.3.1. Bisherige Studien

Es ist wichtig, Nutzerprofile zu beschreiben, um zielgerichtete Maßnahmen ergreifen zu können, damit diese Fahrzeuge für die jeweiligen Kundenbedürfnisse optimiert werden. Es existieren bereits vereinzelte Studien, die versucht haben, das Fahrverhalten von aktiven Nutzern zu gruppieren. Innerhalb einer in Irland durchgeführten Studie differenzierten Wehldon et al. (2016) zwischen privaten und geschäftlichen Nutzern. Im Ergebnis der Untersuchung zeigte sich, dass die Elektrofahrzeugnutzer im privaten sowie im beruflichen Bereich bei einem Ladevorgang ähnliche Lademengen nachfragten. Entscheidende Unterschiede waren allerdings in der Ladehäufigkeit zu beobachten: beruflich genutzte Elektrofahrzeuge wurden weniger häufig, dafür aber regelmäßiger geladen als privat genutzte. Ein genereller Trend, der bei allen Gruppen erkennbar war, ist die relativ kurze gefahrene Distanz von nur etwa 30 km bis zum nächsten Ladevorgang. Die Nutzer der Elektrofahrzeuge neigten also dazu, die Kapazitäten der Fahrzeuge (hier circa 130 km Reichweite) nicht auszureizen. Diese Beobachtung war unabhängig von geschäftlicher oder privater Nutzung sowie der Nutzung an Werktagen oder am Wochenende. So konnte ermittelt werden, dass bei rd. 71% aller Ladevorgängen ein weiterer Ladevorgang bereits nach nicht einmal 24 Stunden vorgenommen wurde. Kurze Strecken und typische Verhaltensmuster, wie das Aufladen des Elektrofahrzeuges nach einer Fahrt, wurden als Gründe für die geringe Ausnutzung der Reichweite der Fahrzeuge angeführt. Die Fahrzeuge wurden somit bei nahezu jeder Gelegenheit an einer Ladestation angeschlossen. Generell legten beruflich genutzte Elektrofahrzeuge größere Distanzen zwischen Ladevorgängen zurück als privat genutzt.

Diese Ergebnisse der Untersuchung aus Irland sollten kleinen und mittelgroßen Städten als Grundlage dienen, um das Stromnetz hinsichtlich der ermittelten Verhaltensmuster von Elektrofahrzeugen zu optimieren. In einer weiteren Untersuchung aus Kanada wurde eine Umfrage bezüglich der Preisgestaltung von Elektroautos und der darauf angemessenen Reaktion der Politik analysiert. So definierten Larson et al. (2014) drei Kundengruppen (erfahrene Nutzer, Studenten, allgemeine Bevölkerung), die hinsichtlich verschiedener psychologischer Motive miteinander verglichen wurden. Es herrschte bei allen drei Gruppen ein gleichverteiltes allgemeines Interesse an dem Thema Elektromobilität. Die wahrgenommene Alltagskompatibilität und der wahrgenommene Vorteil dieser Fahrzeuge hingegen unterschied sich extrem zwischen den Gruppen. Eine Alltagstauglichkeit wurde hier von der allgemeinen Bevölkerung als signifikant schlechter beurteilt als von den anderen beiden Gruppen. Als Ergebnis der Befragung resultierten verschiedene strategische Folgerungen, insbesondere im Hinblick auf die Notwendigkeit von zusätzlichen relevanten Informationen über Elektrofahrzeuge, deren Kosten, Reichweite und insbesondere Zuverlässigkeit in den Wintermonaten. Dabei kommt der Regierung eine entscheidende Rolle in der finanziellen Unterstützung der Forschung, dem Verbreiten von objektiven Informationen sowie der Erweiterung des Wissensstandes der Verbraucher zu.

3.3.2. Beschreibung der Flottenteilnehmer

Diesen Studien liegt bislang jedoch die Einschränkung zugrunde, dass sie den Schwerpunkt immer nur differenziert auf einige wenige Variablen legen. Unabhängig davon erscheint allerdings die Differenzierung zwischen einer privaten und beruflichen Nutzung als sehr sinnvoll da hier bereits Wehldon et al. (2016) die meisten signifikanten Unterschiede vorweisen konnten. Auch in dem Forschungsprojekt eMERGE2 wurden die Flottenteilnehmer in diese beiden Kategorien eingeteilt. Es waren sowohl Fahrzeuge der B-Klasse 250e als auch der C-Klasse 350e im Einsatz. Im Zuge dessen erfolgte in diesem Arbeitspaket eine genaue Beschreibung der Kundengruppen, die entweder die B-Klasse 250e oder C-

Klasse 350e jeweils geschäftlich oder privat nutzten. Zunächst lässt sich das Gesamtsample wie folgt allgemein beschreiben: Das durchschnittliche Alter aller Befragten lag bei 51 Jahren. Der jüngste Umfrageteilnehmer war 29 Jahre alt, der älteste hingegen 77 Jahre. Etwa 18% der Befragten war weiblich. Die meisten Befragten lebten in Baden-Württemberg und Bayern. Bei der Betrachtung der Anzahl der Kinder im Haushalt war zu erkennen, dass bei etwas mehr als der Hälfte der Befragten, bei einer privaten Nutzung, keine Kinder unter 18 Jahre zu Hause wohnten oder keine Kinder vorhanden waren, während exakt bei der anderen Hälfte ein oder mehrere Kinder im Haushalt lebten. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass antriebsunabhängig beide Fahrzeuge gleichermaßen im Familienleben, von Alleinstehenden oder von Partnern ohne Kinder genutzt wurden. Von allen Befragten besaßen 89,7% einen eigenen Stellplatz mit Stromanschluss für ihr Fahrzeug. Des Weiteren konnte ermittelt werden, dass 71,4% zur Arbeit hin und zurück pendelten, während 28,6% ihre Arbeitsstelle in direkter Nähe hatten oder das Fahrzeug nicht zur Fahrt zur Arbeit nutzten. Im Bereich der privat genutzten Fahrzeuge, gaben 59,2% an, den Wagen als Erstwagen zu nutzen. 26,5% nutzen ihn als Zweitwagen und 14,3% gleichwertig zu einem anderen Fahrzeug im Haushalt. Die Tatsache, dass mehr als die Hälfte hauptsächlich ein Fahrzeug mit einer alternativen Antriebstechnik nutzten, kann darin begründet sein, dass dieses Fahrzeug durchaus das Potential besitzt, eine vollwertige Alternative zu konventionellen Fahrzeugen zu sein. Ein Großteil von 61,8% aller Befragten stand in einem Angestelltenverhältnis in Vollzeit. Eine selbstständige Tätigkeit übten 22,1% aus und 13,2% der Befragten waren bereits in Rente. Die restlichen 3% machten diesbzgl. keine Angabe. 70,6 % der Befragten besitzen mindestens Abitur und 52,9% der Befragten entweder Fachhochschul- oder Universitätsabschluss, weshalb die Flottenteilnehmer insgesamt durch einen sehr hohen Bildungsgrad gekennzeichnet waren.

Die geschäftlich genutzten Fahrzeuge wurden in verschiedensten Unternehmensbranchen eingesetzt. Der Einsatz der geschäftlich genutzten Fahrzeuge erfolgte dabei überwiegend in kleinen Unternehmen. Rund 70% der Fahrzeuge in Unternehmen mit bis zu 49 Mitarbeitern eingesetzt. Weitere 17% waren in Unternehmen mit bis zu 250 Mitarbeiter vorhanden und 12% sogar in noch größeren Unternehmen. Bezogen auf die psychologischen Merkmale war das Vorwissen der Befragten sehr hoch, was möglicherweise ein Resultat des Informationsprozesses vor der Kaufentscheidung und der praktischen Nutzung der Fahrzeuge war. Allgemein war die Einstellung der Befragten gegenüber den Elektrofahrzeugen und Plug-in-Hybridfahrzeugen sehr positiv. Das Umweltbewusstsein der Befragten sowie die Technikaffinität waren relativ hoch. Die Bewertung des getätigten Investments bei der Anschaffung der Fahrzeuge war durchschnittlich positiv, sodass man vermuten kann, dass die Befragten mit ihrer Entscheidung für ein Fahrzeug mit alternativem Antrieb zufrieden waren. Die Integrierbarkeit in das alltägliche Leben wird ebenfalls durchschnittlich als gut empfunden. Die Befragten empfanden die Nutzung der Fahrzeuge als sehr einfach und leicht zu erlernen. Die Beobachtbarkeit von Elektrofahrzeugnutzern und Plug-In- Hybridfahrzeugen wurde von den Befragten jedoch als schlecht empfunden. Ein weiteres Ergebnis war, dass die Befragten im Durchschnitt wieder ein solches Fahrzeug kaufen und es auch weiterempfehlen würden. Eine klare Differenzierung zwischen der Nutzungsart war, dass die Vorteilhaftigkeit bei Privatpersonen im Allgemeinen, bei der B-Klasse 250e aber nochmal im Besonderen höher war als bei Geschäftskunden bzw. der C-Klasse 350e. Dies könnte darin begründet sein, dass letztendlich die B-Klasse voll elektrisch ist und somit insbesondere der positive Effekt der Umweltschonung bewusster wahrgenommen wird. Demgegenüber wurde die C-Klasse allerdings sowohl im privaten als auch im geschäftlichen Gebrauch als alltagstauglicher angesehen. Auch hier mag dieser Effekt darin begründet sein, dass die C-Klasse, durch die Hinzuschaltung des Verbrennungsmotors einfacher längere Strecken zurücklegen kann. Abschließend lässt sich noch festhalten, dass bei beiden Fahrzeugtypen Geschäftskunden grundsätzlich eine niedrigere Wiederkaufsintention besaßen. Obwohl immer wieder der Effekt des hohen Ansehens bei Geschäftstätigkeiten geäußert wurde, ist womöglich die Notwendigkeit der genaueren Planung von Fahrten ein Hemmnis in der betrieblichen Nutzung.

3.4. AP 340: Validierung von Kundenpräferenzen

3.4.1. Ziel des Arbeitspaketes

Eine auswahlbasierte Conjoint-Methode kann individuelle Nutzenwerte von einzelnen Fahrzeugattributen berechnen. Der Begriff „Conjoint-Analyse“, oder auch „Conjoint-Measurement“ genannt, bezeichnet im Allgemeinen eine empirische Verfahrensweise, die die Präferenz- und Nutzenstruktur von Konsumenten analysiert. Für die Ermittlung der Präferenzen werden dem Probanden verschiedene Konzeptalternativen (also hier komplette Fahrzeuge mit unterschiedlichen Merkmalen) vorgelegt. Die dargestellten Fahrzeuge gehen aus einer zufälligen Kombination von Produkteigenschaften und verschiedenen Eigenschaftsausprägungen hervor. Der Proband soll dann signalisieren, welches der dargestellten Fahrzeuge er bei einem Neukauf am ehesten präferieren würde. Rückwirkend werden aus diesen Angaben die Teilnutzenwerte der einzelnen Eigenschaftsausprägungen errechnet. Somit können diese Teilnutzenwerte bei der Erstellung von nutzenmaximalen Fahrzeugen helfen und bei der Erstellung von Marketingstrategien hilfreich sein. Weiter können die relativen Wichtigkeiten einzelner Produktattribute herausgestellt werden (z.B. Reichweite vs. Preis). Vor dem Hintergrund der sich aktuell wandelnden Automobiltechnik kann diese Conjoint-Methode folglich als Verfahren herangezogen werden, auf dessen Grundlage die Kernanforderungen bei der Betrachtung von Fahrzeugen mit alternativem Antrieb bestimmt werden können.

3.4.2. Aufbau der Studie

Bei der konkreten Umsetzung müssen daher zunächst relevante Fahrzeugeigenschaften und realistische Ausprägungen definiert werden. Die Auswahl in diesem Arbeitspaket wurde auf Basis der Daten zehn repräsentativer Fahrzeugmarken und deren elektrisch betriebener Fahrzeugmodelle erstellt. Diese Methode stellt zum einen sicher, dass jede Wahlmenge bzw. jedes fiktive Fahrzeugmodell einen signifikanten Grad an Attributvariation enthält. Zum anderen trägt es dazu bei, dass diese Wahlmenge annähernd die tatsächliche Breite der Fahrzeugauswahl, die jedem Befragten zum Zeitpunkt des Kaufs zur Verfügung steht, entspricht, welches eine Grundbedingung der Conjoint-Methode ist (Axsen et al. 2007). Vor diesem Hintergrund soll die repräsentative Auswahl alle verfügbaren Preis-, Leistungs- und Modellsegmente der deutschen Automobillandschaft abbilden und dabei alle technisch sowie kostenseitig relevanten Eigenschaften berücksichtigen. Diese Voraussetzungen führten zu einer Auswahl von acht Produktmerkmalen, deren Ausprägungen die realen Spannen zwischen verfügbaren Alternativen der deutschen Automobilbranche wiedergeben. Eine Übersicht der verwendeten Merkmale lässt sich aus der folgenden Tabelle entnehmen:

Tabelle 19: Verwendete Merkmale der Conjoint Analyse

Fahrzeugmarke	Renault, Toyota, VW, BMW, Opel, Mercedes, Audi, Porsche, Tesla, Nissan
Fahrzeugklasse	Kleinwagen, Sportwagen, Geländewagen, Mittelklasse, Premiumklasse, Luxusklasse, Minibus
Antriebskonzept	Elektromotor, Plug-In Hybrid, Verbrennungsmotor, Brennstoffzellenantrieb
Leistung	55kW / 75PS, 66kW / 90PS, 74kW / 100PS, 110kW / 150 PS, 150kW / 204PS, 240kW / 326PS, 330kW / 449PS, 450kW / 590PS, 539kW/ 733PS
Anschaffungspreis	18.000€, 28.000€, 36.000€, 50.000€, 85.000€, 90.000€, 110.000€, 166.000€
Kraftstoffkosten	2€, 3€, 4€, 5€, 6€, 8€, 12€
Maximale Reichweite	50km, 100km, 200km, 300km, 400km, 500km, 600km
Ladedauer für 80% Kapazität	30 Minuten, 50 Minuten, 60 Minuten, 90 Minuten, 140 Minuten, 3,5 Stunden, 6 Stunden.

Fahrzeugmarke: Die Auswahl der relevanten Marken wurde so vorgenommen, dass jedes Preissegment des deutschen Automobilmarktes abgebildet wird und die Bandbreite der in Deutschland verfügbaren Automarken auf diese Weise näherungsweise dargestellt wird. Im Bereich des Niedrigpreissegments (repräsentativ Nissan, Renault und Toyota) ist besonders die Marke Nissan im Bereich der Elektromobilität von großer Bedeutung, da der Nissan Leaf das meistverkaufte Elektroauto der Welt ist (Forbes 2017). Der Vorreiter im Bereich der Hybridantriebe ist Toyota (Toyota 2017). Im mittleren Preissegment (repräsentativ Volkswagen und Opel) ist Volkswagen als weltweit größter Automobilhersteller für den deutschen Automobilmarkt essenziell wichtig. Der Opel Ampera E mit einer vollelektrischen Reichweite von 520km konkurriert daneben als einziges deutsches Fahrzeug mit den Modellen des Automobilherstellers Tesla und ist daher ebenfalls von Relevanz. Als Vertreter des Premiumsegments bestimmen die deutschen Automobilhersteller Mercedes-Benz, Audi und BMW den deutschen Markt und wurden in dieser Analyse repräsentativ für eben diese Kategorie ausgewählt. Die Repräsentanten des Luxussegments in der vorliegenden Analyse sind Porsche und Tesla.

Fahrzeugklasse: Hierunter versteht man bestimmte Gruppen von Pkw-Modellen, die sich untereinander durch Preis, Fahrzeuggröße und Aufbauform unterscheiden. Es wurden folgende sieben Ausprägungen in diese Kategorie aufgenommen: Kleinwagen, Sportwagen, Geländewagen/SUV, Mittelklasse, Premiumklasse, Luxusklasse und Minibus/Van. Damit werden die wichtigsten der in Deutschland relevanten Fahrzeugklassen des Individualverkehrs abgebildet.

Antriebskonzept: Das Antriebskonzept eines Fahrzeugs beschreibt, mit welcher Technologie ein Fahrzeug seine Leistung generiert, um es anzutreiben. Vor dem Hintergrund des beschriebenen Technologiefortschritts in der Automobilindustrie werden in dieser Kategorie neben dem konventionellen Verbrennungsmotor auch die alternativen Antriebe, wie der reine Elektromotor, der kombinierte Plug-in-Hybrid, sowie der Brennstoffzellenantrieb in der Studie dargestellt.

Leistung: Die maximale Systemleistung (kW/PS) gibt die Motorleistung eines Fahrzeugs an. Die Auswahl der Ausprägungen bildet eine Spanne von der niedrigsten bis hin zu den höchsten offiziellen Kennwerten der betrachteten Fahrzeuge. Der niedrigsten Systemleistung von 55 kW folgen sieben Zwischenwerte bis zu einer maximalen Systemleistung von 539 kW (wie beim Tesla Model X P100D).

Maximale Reichweite: Diese beschreibt die maximal zu erreichende vollelektrische Reichweite eines Fahrzeugs, die sich aus einer Ladung ergibt. Als Maßstab wurden hier die offiziell zertifizierten Normwerte der jeweiligen Fahrzeuge genommen. Die Normwerte ergaben eine Auswahl von 50km (Toyota Prius) mit fünf reellen Zwischenwerten bis hin zu 572km (Tesla Model S).

Ladedauer: Diese Kategorie beschreibt die Dauer, die ein elektrisches Fahrzeug an einer Ladesäule angeschlossen werden muss, um eine Ladekapazität von 80% zu erreichen. Vor dem Hintergrund, dass der Verbrennungsmotor Teil des Choice-Sets ist, beginnt die Auswahl der Ausprägungen bei einer Ladezeit von 0 min, die in der Umfrage als leeres Feld angezeigt wird. Dieser Ausprägung folgen fünf Zwischenwerte bis hin zu einer Ladezeit von 6 h (wie beim Tesla Model X 90d).

Anschaffungspreis: Unter dem Anschaffungspreis wird der Kaufpreis verstanden, den der Konsument zum Erwerb eines Produktes bezahlen muss. In vorliegender Umfrage richtet sich der Anschaffungspreis nach den Listenpreisen der betrachteten Serienfahrzeuge. Die Preisausprägungen beginnen bei 17.000€ (Toyota Yaris) und haben sechs Zwischenwerte bis hin zu einem Wert von 166.000€ (Tesla Model X P100d).

Kraftstoffkosten: Diese Kategorie beschreibt die Kraftstoffkosten auf 100 km, die sich zusammen aus dem Kraftstoffverbrauch und dem Preis pro Einheit (Liter/kWh) ergeben. Die Werte, die in der folgenden Studie Verwendung finden, wurden auf Basis aktueller Benzinpreise und dem Aspekt kombi-

nierten Kraftstoffverbrauchs aus Strom und Benzin bzw. der Nutzung von voll elektrischen oder konventionellen Antriebstechnologien gewählt. So ergeben sich in dieser Kategorie Ausprägungen der Kraftstoffpreise von 2€ (für rein elektrische Fahrt) mit fünf Zwischenwerten bis hin zu der Ausprägung 12€ (benzinbetriebene Fahrt). Mit diesen Werten wurde das Conjoint-Design entworfen, bei dem jedem Probanden mehrmals zufallsgeneriert verschiedene Fahrzeuge präsentiert wurden und der Teilnehmer jedes Mal zu seiner Präferenz bei einem Fahrzeugkauf befragt wurde. Zur besseren Illustration ist hier ein solches Szenario aus dem Fragebogen abgebildet:

Tabelle 20: Fragebogen-Szenario der Conjoint Analyse

Marke	Volkswagen	Mercedes	Nissan	Opel	Keinen.
Fahrzeugklasse	Mittelklasse	Minibus/Van	Sportwagen	Premiumklasse	
Motor	Elektromotor	Brennstoffzellenantrieb	Plug-In Hybrid	Verbrennungsmotor	
Leistung (kW/PS)	150kW / 204PS	66kW / 90PS	74kW / 100PS	55kW / 75PS	
Preis	85.000 €	166.000 €	91.000 €	36.000 €	
Kraftstoffkosten auf 100km	4 €	2 €	8 €	5 €	
Reichweite	200 km	400 km	300 km	572 km	
Ladedauer für 80% Kapazität	140 Minuten		50 Minuten		
	○	○	○	○	○

Durch die geäußerten Präferenzen lassen sich über alle Teilnehmer hinweg (in diesem Sample wurden 1.018 Leute befragt) Nutzenwerte für jede einzelne Ausprägung errechnen. Diese metrisch berechneten Teilnutzenwerte können Werte von maximal -100 (sehr negativ bewertet) bis 100 (sehr positiv bewertet) annehmen. Bei der Betrachtung der Rubrik Fahrzeugmarke ist festzustellen, dass die Marke Audi im direkten Vergleich am besten bewertet wurde. Mit absteigenden Teilnutzenwerten folgen Mercedes, BMW, Volkswagen, Tesla und Porsche. Bei diesen Ausprägungen wurde ein positiver Nutzenwert gemessen. Diese positiven Teilnutzenwerte erhöhen folglich den Gesamtnutzenwert eines Fahrzeugs. Die Ausprägungen Opel, Toyota, Renault und Nissan liegen im negativen Teilnutzenbereich, wobei Nissan von allen Ausprägungen am schlechtesten bewertet wurde. Auffällig dabei ist insbesondere die positive Beurteilung des Großteils der deutschen Autohersteller.

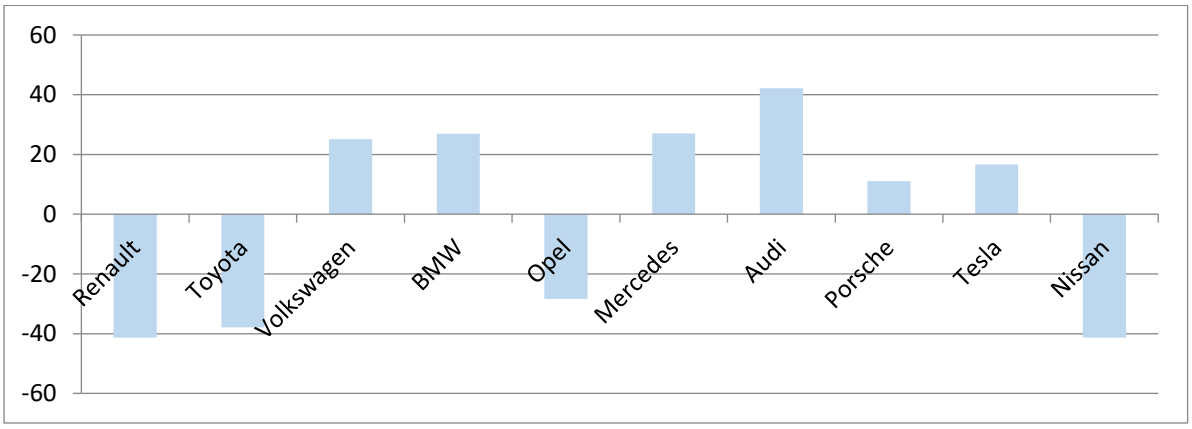


Abbildung 52: Nutzenwerte der Fahrzeugmarke

Bei der Analyse der Fahrzeugklasse zeigt sich, dass der Sportwagen in der Kategorie am besten bewertet wurde. In der allgemeinen Interpretation ist ein Sportwagen durch ein besonderes Fahrerlebnis gekennzeichnet, das verbunden mit einer überdurchschnittlichen Motorleistung und einem hohen Kaufpreis einen besonders hohen Prestigewert für die Konsumenten darstellen kann. Bei dieser Kategorie ist festzustellen, dass die Teilnutzenwerte einer Fahrzeugklasse so subjektiv zu bewerten sind, dass kein allgemeingültiges Muster erkennbar ist. Insgesamt sind sechs der insgesamt acht Fahrzeugklassen nutzensteigernd, wobei der Minibus deutlich den niedrigsten Nutzenwert besitzt. Die Teilnutzenwerte der einzelnen Ausprägungen im positiven Nutzenbereich liegen dicht beieinander. Folglich haben die Verbraucher keinen eindeutigen Favoriten, der mit großem Abstand besser bewertet wurde als die übrigen Ausprägungen.

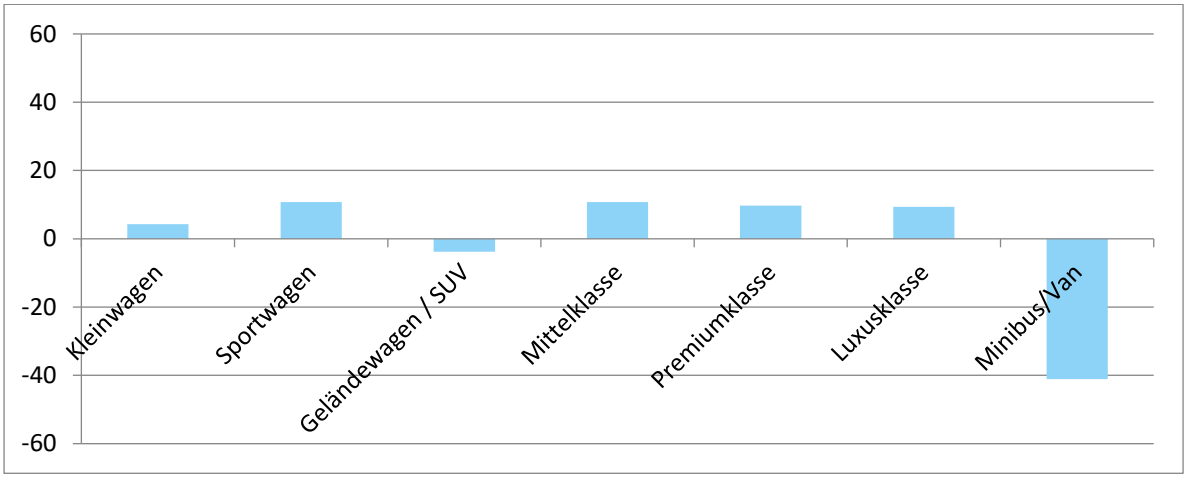


Abbildung 53: Nutzenwerte der Fahrzeugklasse

Mit Blick auf die Kategorie Antriebskonzept zeigt sich eine eindeutige Präferenzstruktur der Probanden. Die Ausprägung Brennstoffzellenantrieb verfügt über den höchsten Teilnutzenwert, gefolgt vom konventionellen Verbrennungsmotor. Auf Rang drei, und damit bereits im negativen Teilnutzenbereich, befindet sich der Elektromotor. Den geringsten Teilnutzenwert zeigt der Plug-In-Hybrid. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass der reine Elektromotor (BEV) auch aus Probandensicht deutliche Nutzennachteile mit sich bringt. Der Brennstoffzellenantrieb besitzt den höchsten wahrgenommenen Nutzen. Obgleich diese Fahrzeuge nicht wirklich für die Probanden ersichtlich sind, wird diese Technologie mit einer starken Nutzenstiftung assoziiert.

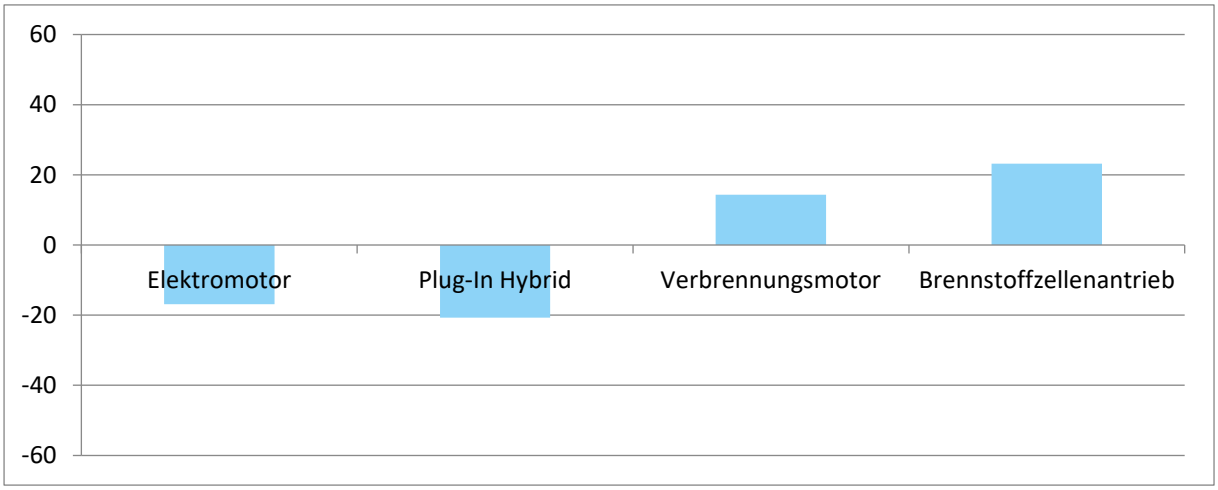


Abbildung 54: Nutzenwerte des Antriebskonzepts

Bei der maximalen Systemleistung ist das Muster erkennbar, dass mit Steigerung der Systemleistung auch der wahrgenommene Nutzen steigt, allerdings nur bis zu umgerechnet 200PS. Hier scheint ein Punkt erreicht, ab dem höhere Motorleistungen nicht mehr mit einem höheren Nutzen verbunden sind. Den niedrigsten Nutzen brachte demnach auch die kleinste Systemleistung von 75 PS. Der wahrgenommene Nutzen steigt mit den nächst höheren Systemleistungen solange an, bis bei einer Systemleistung von 200 PS schließlich das Nutzenmaximum erreicht wird. Die darauffolgenden Ausprägungen deuten auf einen Grenznutzen hin und implizieren damit eine gewisse Sättigung bezüglich der Leistung bei den befragten Probanden.

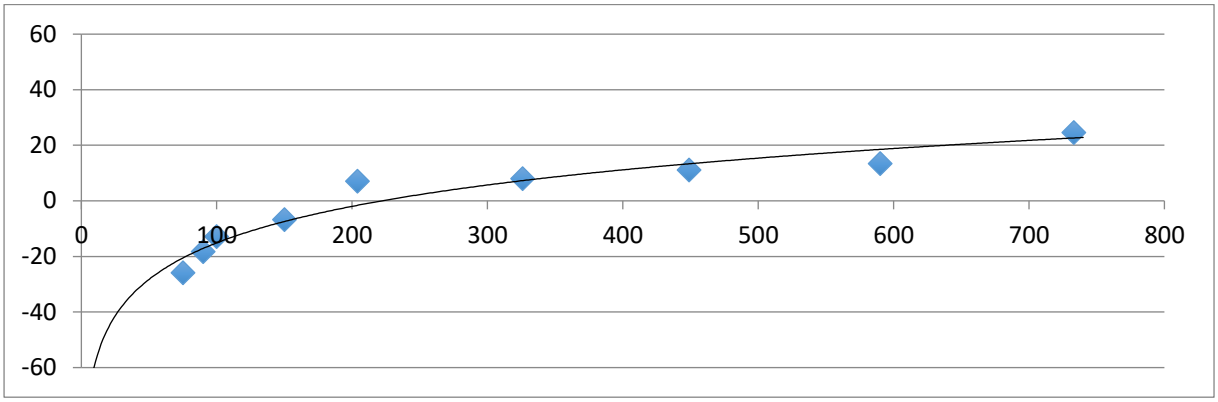


Abbildung 55: Nutzenwerte der maximalen Systemleistung

Die Teilnutzenwerte der einzelnen Preise bewegen sich angefangen beim niedrigsten Preis auf höchstem Präferenzniveau und fallen mit steigenden Preisen auf ein sehr niedriges Level. Alle wahrgenommenen Nutzenwerte lassen sich dahingehend erklären, dass die Präferenz bei steigendem Preis abnimmt und dies ab Werten von 85.000€ sogar sehr deutlich. Diese Beobachtung erstreckt sich über eine Wertespannweite von über 100 Punkten zwischen dem geringsten und höchsten Nutzenwert innerhalb dieser Kategorie. Das bedeutet, dass Probanden diese Eigenschaft sehr wichtig ist, da die Nutzenwerte sich stark zwischen den Ausprägungen unterscheiden. Bei sehr niedrigem Preis ist die Bereitschaft eines Kaufs zu diesem Preis sehr hoch. Entsprechend niedrig ist die Kaufbereitschaft bei einem sehr hohen Preis. Der Mehrpreis, der aufgrund der technisch aufwendigen Hochvoltbatterie entsteht, sorgt für einen erheblichen Wettbewerbsnachteil im Vergleich zu konventionellen Verbrennerfahrzeugen. Außerdem zeigt die Auswahl elektrischer Fahrzeuge eine noch unzureichende Bandbreite verschiedener Preissegmente. Das Angebot an rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen kann folglich nur eine begrenzte Zielgruppe erreichen und mit vorhandenen Preisstufen noch nicht den gesamten Markt abdecken.

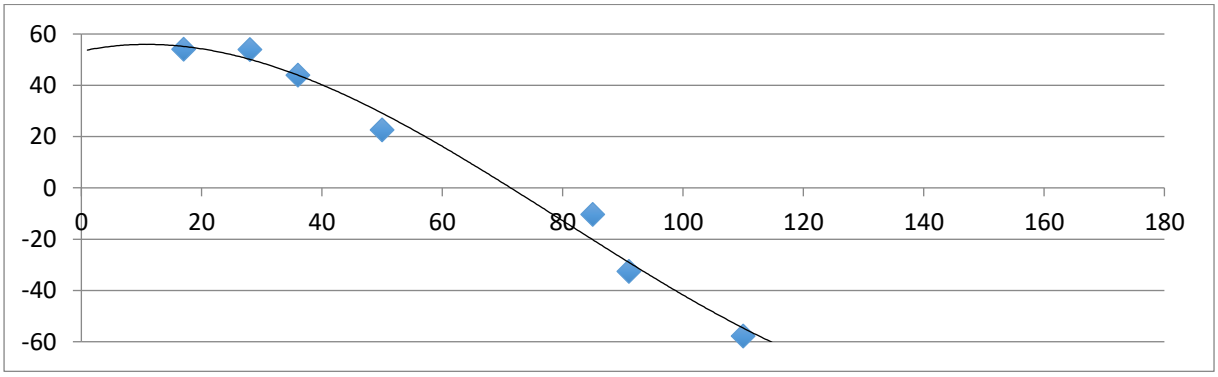


Abbildung 56: Nutzenwerte des Preises

Die niedrigsten Kraftstoffkosten von 2€ pro 100km werden mit einem Nutzenwert von 27 am positivsten bewertet. Die höchsten Kraftstoffkosten von 12€ haben den geringsten Nutzenwert von -29 Punkten. Je höher die Kraftstoffkosten also sind, desto geringer ist der wahrgenommene Nutzen. Vor dem Hintergrund deutlich geringerer Kraftstoffkosten pro gefahrenem Kilometer bei Elektrofahrzeugen könnte dies zunächst einen deutlichen Wettbewerbsvorteil gegenüber konventionellen Verbrennerfahrzeugen bedeuten. Da sich dieser Kostenvorteil allerdings nur bei Vielfahrern, wie z.B. Bussen oder Lieferdiensten, ergibt, kann ein durchschnittlicher Fahrer kaum von diesem Vorteil Gebrauch machen. Unzureichende elektrische Reichweiten und lange Ladezeiten würden Langstrecken so oft unterbrechen, dass der Komfort erheblich eingeschränkt würde.

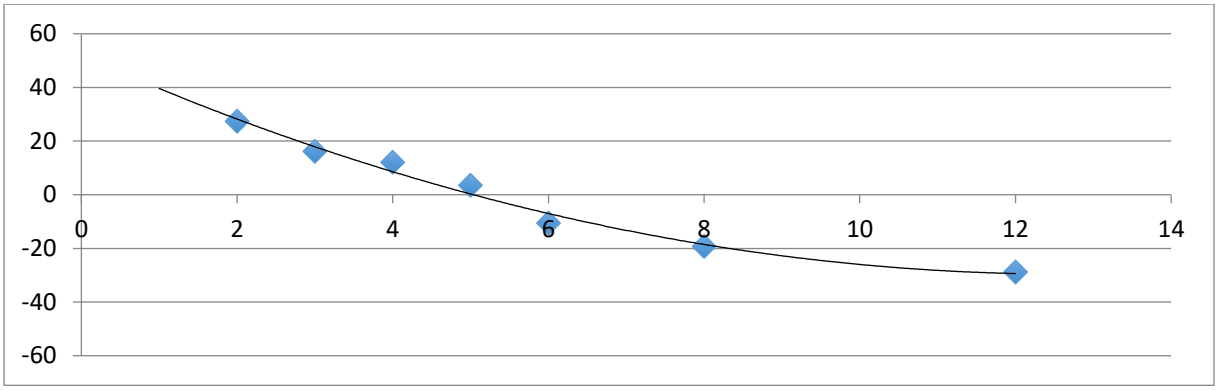


Abbildung 57: Nutzenwerte der Kraftstoffkosten

Die niedrigste mögliche Reichweite beträgt in dieser Studie 50km, die Höchste 572km. Hierbei stellt sich eine eindeutige Präferenz gegenüber hohen Reichweiten ein. Mit einem Nutzenwert von 23 Punkten wurde die höchste maximale Reichweite von 572 km auch am höchsten bewertet, jedoch weisen die Nutzenwerte der Ausprägungen, die größer als 300km sind, eine hohe Gleichverteilung auf. Dies kann so interpretiert werden, dass eine Reichweite von über 300km zu einer geminderten Nutzensteigerung führt, da mit einer Reichweite von 300km gefühlt keine Einschränkung im Alltag mehr vorliegt. Alle Ausprägungen unter einer Reichweite von 300km werden von den Verbrauchern stetig als stark nutzensteigernd wahrgenommen.

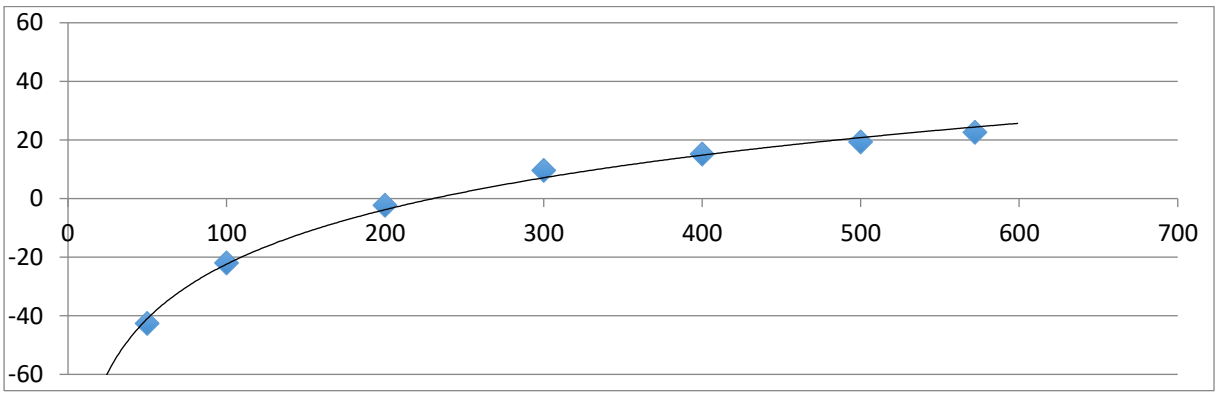


Abbildung 58:Nutzenwerte der Reichweite

Bei der Betrachtung der letzten Kategorie Ladezeit fällt ebenfalls der logische Verlauf der Teilnutzenwerte auf, bei denen der wahrgenommene Nutzen stetig mit einer Erhöhung der Ladezeit fällt. Ausgehend vom 0-Punkt wird allerdings erst eine Ladezeit ab 90 Minuten als wirklich störend empfunden. Bis dahin können sich scheinbar Nutzer mit dieser Zeit im Alltag arrangieren.

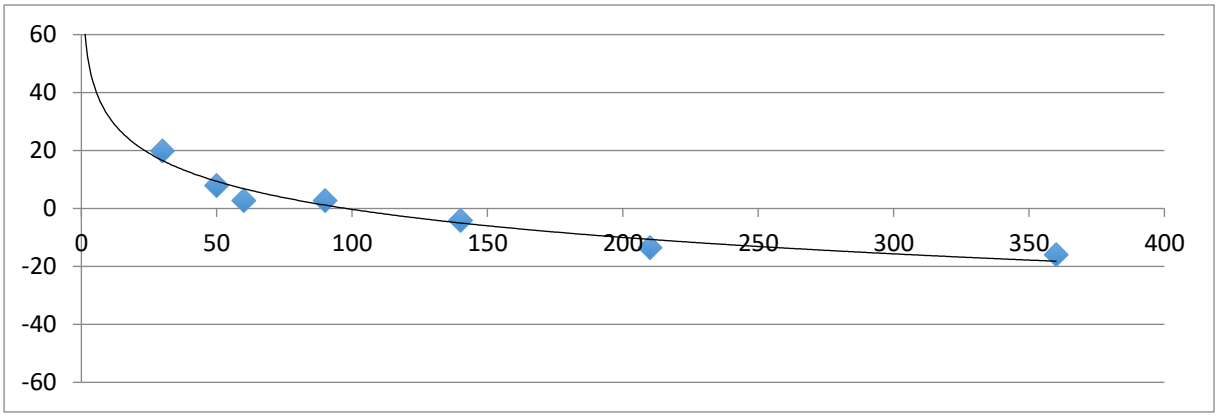


Abbildung 59: Nutzenwerte der Ladezeit

Entscheidend bei dieser Analyse ist es final allerdings noch, die relativen Wichtigkeiten der einzelnen Fahrzeugattribute zu bestimmen. Entscheidend für die Bewertung der relativen Wichtigkeit eines jeden Produktattributs ist die Spannweite der einzelnen Attribute bzw. der jeweiligen Ausprägungen. Je höher die Spannweite, desto größer ist die Bedeutung der entsprechenden Produkteigenschaft zur Präferenzveränderung. Bei der Betrachtung der Spannweiten über alle Produktattribute kann festgehalten werden, dass die Ausprägungen des Attributs Anschaffungspreis mit großem Abstand am ungleichmäßigsten verteilt sind. Die Spannweite liegt hier bei einem Wert von knapp 110 Punkten. Zum Vergleich: Die nächstgrößere Spannweite der Fahrzeugeigenschaft Fahrzeugmarke liegt hier bei knapp 82 Punkten, während sich alle restlichen Spannweiten zwischen Werten von 57 und 46 bewegen.

Daraus ergibt sich eine Rangfolge derjenigen Nutzeranforderungen, die im Fragebogen bewertet wurden. Bei der Betrachtung der relativen Wichtigkeiten der einzelnen Produktattribute ist zu beobachten, dass dem Anschaffungspreis der größte Einfluss auf die Kaufentscheidung eines Neuwagens zugesprochen wird. Die zweitwichtigste Eigenschaft liegt bei der Fahrzeugmarke. Auf Rang drei folgt die maximale Reichweite. Anschließend werden die Fahrzeugklasse und die Leistung ähnlich wichtig wahrgenommen. Die Ladedauer und die Kraftstoffkosten weisen hingegen die geringsten relativen Wichtigkeiten auf (siehe nachfolgende Abbildung).

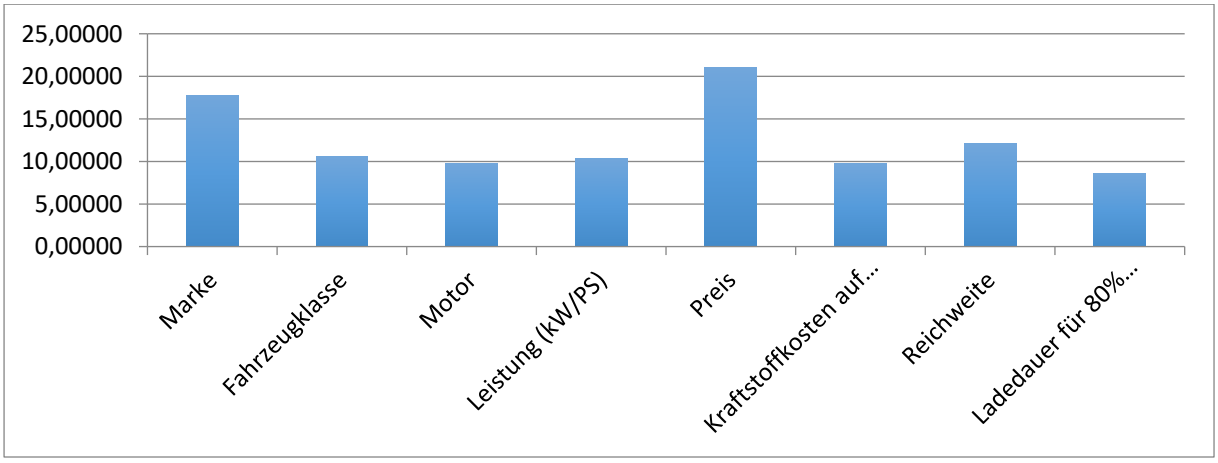


Abbildung 60: Relative Wichtigkeiten der Fahrzeugattribute

3.5. AP 350: Preiswahrnehmung und Kaufentscheidungsprozesse

3.5.1. Ziel des Arbeitspaketes

Sondernutzungsrechte im Straßenverkehr oder Steuervergünstigungen haben das Ziel, die Akzeptanz und Kaufentscheidung von Elektro- und Hybridfahrzeugen zu steigern. Um diese Wirkungen tatsächlich zu untersuchen, wurde erneut eine Conjoint-Studie mit einem ähnlichen Ablauf wie im vorangegangen Arbeitspaket umgesetzt. Allgemein liegt die zentrale Funktion von Anreizen darin, den relativen Vorteil der Innovation oder des Produktes zu steigern. Diese können unterschiedliche Formen annehmen, wie monetäre und nichtmonetäre, und werden angeboten, um den Diffusionsprozess von Innovationen zu beschleunigen. Somit soll ein motivierendes Verhalten bei den Konsumenten ausgelöst werden, welches den Adoptionsprozess beschleunigt.

3.5.2. Ermittlung der Wirkungsweisen von kostenbezogenen Anreizen

Betrachtet man staatliche Anreize, so spiegeln sich diese i.d.R. in Form von Subventionen wider. Subventionen stellen meist Finanzhilfen durch Geldleistungen der Bundesrepublik dar oder durch die Einräumung von Sondernutzungsrechten. Um die Akzeptanz der Elektromobilität in Deutschland zu steigern, wurden bislang unterschiedliche Maßnahmen diskutiert und umgesetzt, wie beispielsweise eine Kaufprämie sowie ein Sondernutzungsrecht von speziellen Fahrspuren. Die Anreize und Rahmenbedingungen zur Intensivierung der Nachfrage von Elektrofahrzeugen werden im Elektromobilitätgesetz (EmoG) festgelegt, welches zunächst bis zum 30. Juni 2030 befristet ist (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2014). Ziel des Gesetzes ist es, den Kommunen die Möglichkeit zu geben, Elektrofahrzeugen mit entsprechender Kennzeichnung Bevorrechtigungen in der Straßenverkehrs-Ordnung einzuräumen. Hierzu zählen reine Elektrofahrzeuge sowie Hybridfahrzeuge mit einer Mindestreichweite von 40 Kilometern durch Elektroantrieb. Kommunen sind dadurch berechtigt, Sonderparkplätze für Elektrofahrzeuge an Ladesäulen einzurichten und öffentliche Parkplätze zu besonderen Konditionen oder kostenfrei anzubieten. Zudem können Durchfahrtsverbote und Zufahrtsbeschränkungen aufgehoben und die Nutzung von gesonderten öffentlichen Straßen ermöglicht werden. Hierzu zählen Busspuren, sofern der öffentliche Personenverkehr dadurch nicht beeinträchtigt. Des Weiteren erhalten Elektrofahrzeuge derzeit steuerliche Vergünstigungen. Diese sind im § 3d des Kraftfahrzeugsteuergesetzes (KraftStG) verankert. Demnach sind reine Elektrofahrzeuge mit einer Erstzulassung zwischen dem 18. Mai 2011 und 31.Dezember 2015 für zehn Jahre von der Kraftfahrzeugsteuer befreit. Wurden diese vor dem 18. Mai 2011 zugelassen, so sind die Fahrzeuge fünf Jahre befreit. Ebenfalls eine Befreiung von fünf Jahren erhalten solche elektroangetriebenen Fahrzeuge, die ab dem 01. Januar 2016 bis zum 31. Dezember 2016 zugelassen wurden. Hybridfahrzeuge sind bislang von dieser Regelung ausgeschlossen (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 2015). Auf der folgenden Tabelle sind zudem Anreize aus unterschiedlichen Ländern gelistet, die eine Förderung von reinen Elektrofahrzeugen umsetzen.

Tabelle 21: Übersicht von Vergünstigungen für E-Fahrzeuge

Land	Vergünstigung
Belgien	Reduzierte Kfz-Steuer
Dänemark	Entfall der Zulassungsgebühr
Spanien	Zuschuss in Höhe von 6500 Euro auf den Kaufpreis
Frankreich	Bis 20 Gramm CO2 pro Kilometer: Zuschuss in Höhe von 6500 Euro
Großbritanien	Bis zu 75 Gramm CO2 pro Kilometer: Zuschuss in Höhe von bis zu 6200 Euro
Italien	Entfall der Kfz-Steuer auf fünf Jahre
Luxemburg	Bis zu 60 Gramm CO2 pro Kilometer: Zuschuss in Höhe von 5500 Euro
Niederlande	Entfall der Zulassungssteuer
Norwegen	Entfall der Mehrwertsteuer und Zulassungssteuer
Schweden	Entfall der Kfz-Steuer für fünf Jahre
Österreich	Entfall der Kfz-Steuer

Ausgehend von diesem Überblick wurde für die Conjoint-Studie wieder eine Auswahl an Fahrzeugeigenschaften aufgenommen, die in der folgenden Tabelle zusammengestellt wurden:

Tabelle 22: Eigenschaften für Conjoint Analyse zu Vergünstigungen

Eigenschaft	Ausprägung
Antriebskonzept	Verbrennungsmotor, Elektromotor, Plug-in-Hybrid
Anschaffungspreis	18000€, 26000€, 38000€, 56000€, 89000€
Kraftstoffkosten	2€, 4€, 7€, 10€
Subventionen auf den Verkaufspreis	Keinen Erlass, 2500€ Erlass auf den Verkaufspreis, 5500€ Erlass auf den Verkaufspreis
Steuerliche Vergünstigungen	Keine steuerlichen Vergünstigungen, Wegfall der Mehrwertsteuer, Unbefristeter Wegfall der Kfz-Steuer, Befristeter Wegfall der Kfz-Steuer auf 5 Jahre
Privilegien	Keine, Nutzung der Busspur, Gesonderte Parkplätze, Wegfall der Parkgebühr auf öffentlichen Parkplätzen
Reichweite des Fahrzeugs	200km, 300km, 400km, 500km

An dieser Studie nahmen 378 Probanden teil und es wurden erneut die jeweiligen Teilnutzenwerte für jede Ausprägung berechnet und die damit verbundenen Spannweiten zur Ermittlung der Wichtigkeit einer Eigenschaft beim Fahrzeugkauf. So machen Anreizsysteme lediglich 18,367 % des Kaufentscheidungsprozesses aus. Der Preis eines Fahrzeugs hingegen war für die Teilnehmer von großer Wichtigkeit (36,18%). Dieser Wert ist etwa doppelt so hoch wie der Gesamtwert der Anreizsysteme. Es folgten die Art des Antriebs mit einem Nutzenwert von 21, 66% sowie die Reichweite eines Fahrzeugs (12,34%) und die Kraftstoffkosten auf einer Wegstrecke von 100 Kilometern (11,44%).

Im folgenden Verlauf gilt es, die einzelnen Anreizsysteme und ihre Ausprägungen getrennt voneinander zu betrachten und ihren Einfluss auf die Akzeptanz und Kaufentscheidung von batteriebetriebenen Fahrzeugen zu beurteilen. Zunächst kann festgestellt werden, dass die offerierten Anreize im Vergleich zu den übrigen Eigenschaften den kleinsten Nutzen für den Konsumenten stifteten und somit den geringsten Anteil an der Kaufentscheidung ausmachten. Den größten Einfluss stellt ein Kaufpreiserlass von 5.000 Euro als Ausprägung politischer Subventionen dar. Ein Nachlass von 2.500 Euro hingegen wies keinen signifikanten Effekt auf.

Auch alle anderen Anreize signalisierten keine Tendenz in dem Auswahlverhalten der Probanden und zeigten somit keine kaufrelevante Wirkung. Daraus resultiert, dass Anreize, die sich nur direkt in Geldwerten abbilden lassen, von den Kunden als vorteilhaft wahrgenommen werden. Diese Vermutung verstärkt sich durch die nicht wahrgenommene Wichtigkeit von steuerlichen Vorteilen. Hier wird für den Probanden keine direkte Einsparung ersichtlich, so dass durch den Wegfall der Kraftfahrzeug-Steuer oder der Mehrwertsteuer kein monetärer Vorteil sofort erkennbar ist. Zeitkostenersparnisse für den Konsumenten bieten die Privilegien in Form von gesonderten Parkplätzen oder Mitnutzung der Busspur, da weniger Zeit bei der Parkplatzsuche oder im Stau aufgewendet werden muss. Hinzu kommt der Entfall von Parkgebühren auf öffentlichen Parkplätzen. Diese Aspekte weisen allerdings die niedrigsten Nutzenwerte auf. Auch durch eine fehlende Signifikanz konnte kein Einfluss auf die Akzeptanz eines Elektrofahrzeugs nachgewiesen werden. Zeitkostenbezogene Anreize sowie Anreize mit einem geringen Geldwert in Form von erlassenen Parkgebühren führen folglich nicht zu dem gewünschten Effekt.

Der Kostenbezug der Teilnehmer wird auch bei Betrachtung der übrigen Eigenschaften deutlich. Der Preis eines Fahrzeugs steht für den Kunden im Vordergrund und zeigt einen negativen linearen Zusammenhang. Der Nutzen für den Probanden nimmt somit ab, sobald der Preis ansteigt. Gleichwohl präferieren die befragten Personen eine hohe Reichweite der Pkw, wobei in der Studie nachgewiesen werden konnte, dass die derzeit erreichbare Wegstrecke mit einem reinen Elektrofahrzeug und zudem auch in vielen Fällen die eines Plug-in-Hybrids ausreichen, um die durchschnittliche Tagesstrecke zu überbrücken. Weiterhin bevorzugen Konsumenten niedrige Kraftstoffkosten, die von einem Elektrofahrzeug erzielt werden können. Hinzu kommt die Wichtigkeit der Antriebsart. Diese genannten Eigenschaften übertreffen den Nutzen der Anreizsysteme. Somit kann festgestellt werden, dass eine Wirkung kostenbezogener Anreizsysteme nur dann auftritt, sobald der Nutzen direkt monetär für den Kunden sichtbar ist und zudem eine Höhe annimmt, die für den Kunden akzeptabel ist.

3.6. Literatur

Axsen, J./ Mountain, D.C./ Jaccard, M. (2007): Combining stated and revealed choice research to simulate the neighbor effect: The case of hybrid-electric vehicles, in: Resource and Energy Economics, 31. Jg., Nr. 3, S. 221-238.

BernsteinResearch (2011): Is Reality Bursting the Electric Dream? Consumer Acceptance Issues, in Bernstein Global Wealth Management (Hrsg.): Bernstein Black Book – Global Autos: Don't believe the hype – Analyzing the costs & potentials of fuel-efficient technology, New York, S.65-74.

Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz (2015): Kraftfahrzeugsteuergesetz. KraftStG, http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/kraftstg/gesamt.pdf

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2014): Infopapier Elektromobilitätsgesetz, in: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/informationspapier-elektromobiliaetsgesetz.pdf

Deffner, J./Birzle-Harder, B./Hefter, T./Götz, K. (2012): Elektrofahrzeuge in betrieblichen Fahrzeugflotten - Akzeptanz, Attraktivität und Nutzungsverhalten. Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts Future Fleet. Frankfurt am Main. ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung.

Dütschke, E./Schneider, U./Sauer, A./Wietschel, M./Hoffmann, J./Domke, S. (2011): Roadmap zur Kundenakzeptanz – Zentrale Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung in den Modellregionen, in: Schriftenreihe des Fraunhofer ISI, Nr.3.

Ewing, G./ Sargöllü, E. (2000): Assessing Consumer Preferences for Clean-Fuel Vehicles: A Discrete Choice Experiment, in: Journal of Public Policy & Marketing, 19 Jg., Nr. 1, S. 106-118.

Fishbein, M./ Ajzen, I. (1975): Belief, Attitute, Intention and Behavior: An Introduction to Theory and Research, Reading (Massachusetts) u.a.

Forbes (2017): Who Is The World's Leading EV Maker? It's Not Tesla, https://www.econstor.eu/bitstream/10419/49555/1/376731028.pdf

Franke, T./ Neumann, I./ Bühler,F. /Cocron, P. /Krems, J.F. (2012): Experiencing in an Electric Vehicle: Understanding Psychological Barriers, in: Applied Psychology: An International Review, 61 Jg., Nr. 3, S. 368-391.

Gebauer, F./ Villimek, R./Keinath, A./Carbon,C. (2016): Changing attituted towards e-mobility by actively elaborating fast-charging technology, in: Technological Forecasting and Social Change: An International Journal, 106 Jg., S. 31-36,.

Hahnel, U.J.J./ Gölz, S./ Spada,H. (2013): How accurate are drivers´predictions of their own mobility? Acconting for psychological factors in the development of intelligent charging technology for electric vehicles, in: Transportation Research Part A, 48 Jg., S. 123-131.

Hidrue, M. K./Parsons, G. R./Kempton, W./Gardner, M. P. (2011): Willingness to pay for electric vehicles and their attributes, in: Resource and Energy Economics, 33 Jg., Nr. 3, S. 686-705.

Kolke, R./Gärtner, A. (2010): Alternative Antriebe im Straßentest - ein ADAC-Bericht. München. ADAC.

Krems, J./Barthold, L./Cocron, P./Dielmann, B./Franke, T./Henning, M./Ischebeck, M./ Schleinitz, K. (2011): MINI E powered by Vattenfall V2.0. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben – Verbundprojekt: MINI E powered by Vattenfall V2.0. Chemnitz. Technische Universität Chemnitz.

Kurani, K.S./Turrentine, T./Sperling, D. (1994): Demand for electric vehicles in hybrid households: an exploratory analysis, in: Transport Policy, 1. Jg., Nr. 4, S. 244–256.

Larson, P.D./ Viafara, J./ Parson, R.V./ Elias, A. (2014): Consumer attitudes about electric cars: Pricing analysis and policy implications, in: Transportation Research Part A, 69 Jg., S. 299-314.

Ozaki, R./Sevastyanova, K. (2011): Going hybrid: An analysis of consumer purchase motivations, in: Energy Policy, 39. Jg., S.2217-2227.

Peters, A./Dütschke, E. (2010): Zur Nutzerakzeptanz von Elektromobilität – Analyse aus Expertensicht, Karlsruhe. Fraunhofer ISI.

Peters, A./Hoffmann J. (2011): Nutzerakzeptanz von Elektromobilität – Eine empirische Studie zu attraktiven Nutzungsvarianten, Fahrzeugkonzepten und Geschäftsmodellen aus Sicht potenzieller Nutzer. Karlsruhe. Fraunhofer ISI.

Rogers, E. M. (2203): Diffusion of Innovations, 5. Aufl., New York u.a.

Roland Berger Strategy Consultants (2010): Powertrain 2020. Electric Vehicles - Voice of Customer. München.

Tesla (2017): Fahrzeugdaten, https://www.tesla.com/de_DE/,

Truffer, B./Harms, S./Wächter, M. (2000): Regional experiments and changing consumer behavior: The emergence of integrated mobility forms, in: Cowan, R. (Hg.): Electric Vehicles: socio-economic prospects and technological challenges. Aldershot: Ashgate, S. 173–204.

Turrentine, T. S./Kurani, K. S. (1995): The Household Market for Electric Vehicles. Testing the Hybrid Household Hypothesis – A Reflively Designed Survey of New-car-buying, Multi-vehicle California Households. Davis. Institute of Transportation Studies.

Weldon, P./ Morrisey, P./ Brady, J./ O´Mahony, M. (2016): An investigation into usae patterns of electric vehicles in Ireland, in: Transportation Research Part D. 43 Jg., S. 207-252.

Wietschel, M./Dütschke, E./Funke, S./Peters, A./Plötz, P./Schneider, U. (2012): Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten „Early Adoptern“. Karlsruhe. Fraunhofer ISI und Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien.

4. AP 400: Verkehr, Energie und Infrastruktur

4.1. AP 410: Anforderungsanalyse und Modellerweiterung

Ziel dieses Arbeitspakets war es, geeignete spezifische Ziele, Bewertungskriterien und Steuerungsinstrumente zu identifizieren. Es wurden relevante Anwendungsfälle spezifiziert und Fragestellungen formuliert, welche die Grundlage für die Entwicklung von geeigneten Szenarien für die ganzheitlichen Untersuchungen darstellen. Die Arbeiten dieses Arbeitspaketes wurden im September 2015 beendet.

Als ein wesentlicher Aspekt zur Verbesserung der Elektromobilität wurden rekuperative Aufladevorgänge identifiziert. Die in eMERGE II eingesetzte B-Klasse B250e verfügt beispielsweise über eine radarbasierte Rekuperation. Ziel ist es hierbei, während eines Bremsvorgangs des Fahrzeuges möglichst viel Energie zurückzugewinnen und in die Batterie einzuspeisen. Der Radar wird hierbei eingesetzt, um den Abstand des Fahrzeugs zum vorausfahrenden Fahrzeug zu messen und diese Information zu nutzen, um einen notwendigen Bremsvorgang hinsichtlich einer maximalen Rekuperation zu optimieren. In AP 440 wurden dann Strategien untersucht, die eine weitere Verbesserung von rekuperativen Bremsvorgängen, zusätzlich zu den bereits in der B-Klasse B250e umgesetzten Mechanismen, ermöglichen. Ziel war es hierbei, die Reichweite des Elektrofahrzeuges weiter zu erhöhen und somit den Nutzungskomfort zu verbessern. Die verbesserten Rekuperations-Strategien wurden mit Hilfe von Simulationen untersucht. Hierzu wurden Erweiterungen an dem bereits in eMERGE entwickelten ganzheitlichen Modell notwendig, um die Anforderungen hinsichtlich der untersuchten Rekuperations-Strategien zu erfüllen. In diesem Zusammenhang wurde beispielsweise in AP 410 ein Konzept zur Verbesserung der Modelle des Batterie-Simulators entwickelt, das auch rekuperative Aufladevorgänge während der Fahrt miteinschließt. Weiterhin wurde das Feedback aus eMERGE genutzt, um weitere Optimierungen für die Simulationsarchitektur VSimRTI zu spezifizieren, die dann in AP 420 umgesetzt wurden.

In AP 410 wurden weiterhin Konzepte für die Durchführung der Untersuchungen in AP 440 entwickelt. Abbildung 61 zeigt den Ablauf und die notwendigen Werkzeuge zur Durchführung der Untersuchung. In einem ersten Schritt wird mikroskopisch[1] Gesamtverkehr einer Großstadt untersucht. Dabei werden Bremsszenarien extrahiert, die anschließend in einer submikroskopischen[2] Untersuchung der in AP 430 entwickelten Rekuperations-Strategien detailliert simuliert werden. Aus den Ergebnissen der mikroskopischen und submikroskopischen Simulationen können anschließend Aussagen über den Einfluss der untersuchten Rekuperations-Strategien auf das Gesamtsystem getroffen werden.

Um eine sinnvolle Untersuchung der verbesserten Rekuperations-Strategien zu ermöglichen, ist eine Modellierung von physikalischen Fahrzeugeigenschaften und Fahrdynamiken notwendig. Das Simulationsframework VSimRTI setzte bisher den mikroskopischen Verkehrssimulator SUMO zur Modellierung von Fahrzeugen und deren Bewegungen ein. Für die Untersuchungen in eMERGE II ist die Genauigkeit dieses Simulators nicht ausreichend. Als eine geeignete Alternative wurde der Fahrzeugsimulators PHABMACS identifiziert, der physikalische Fahrzeugeigenschaften und Fahrdynamiken hinreichend genau modellieren kann. Es wurde ein Konzept entwickelt, um diesen Fahrzeugsimulator an das Simulationsframework VSimRTI anzukoppeln. Ziel war es, in AP 440 alle Fahrzeugbewegungen mit Hilfe des Simulators PHABMACS modellieren zu können.

[1] Mikroskopisch: Einfache Simulation der Fahrzeugbewegungen, mit individueller Betrachtung jedes Fahrzeugs
[2] Submikroskopisch: Detaillierte Simulation der Fahrzeugdynamik inkl. Motor, Getriebe, Reifen, etc.

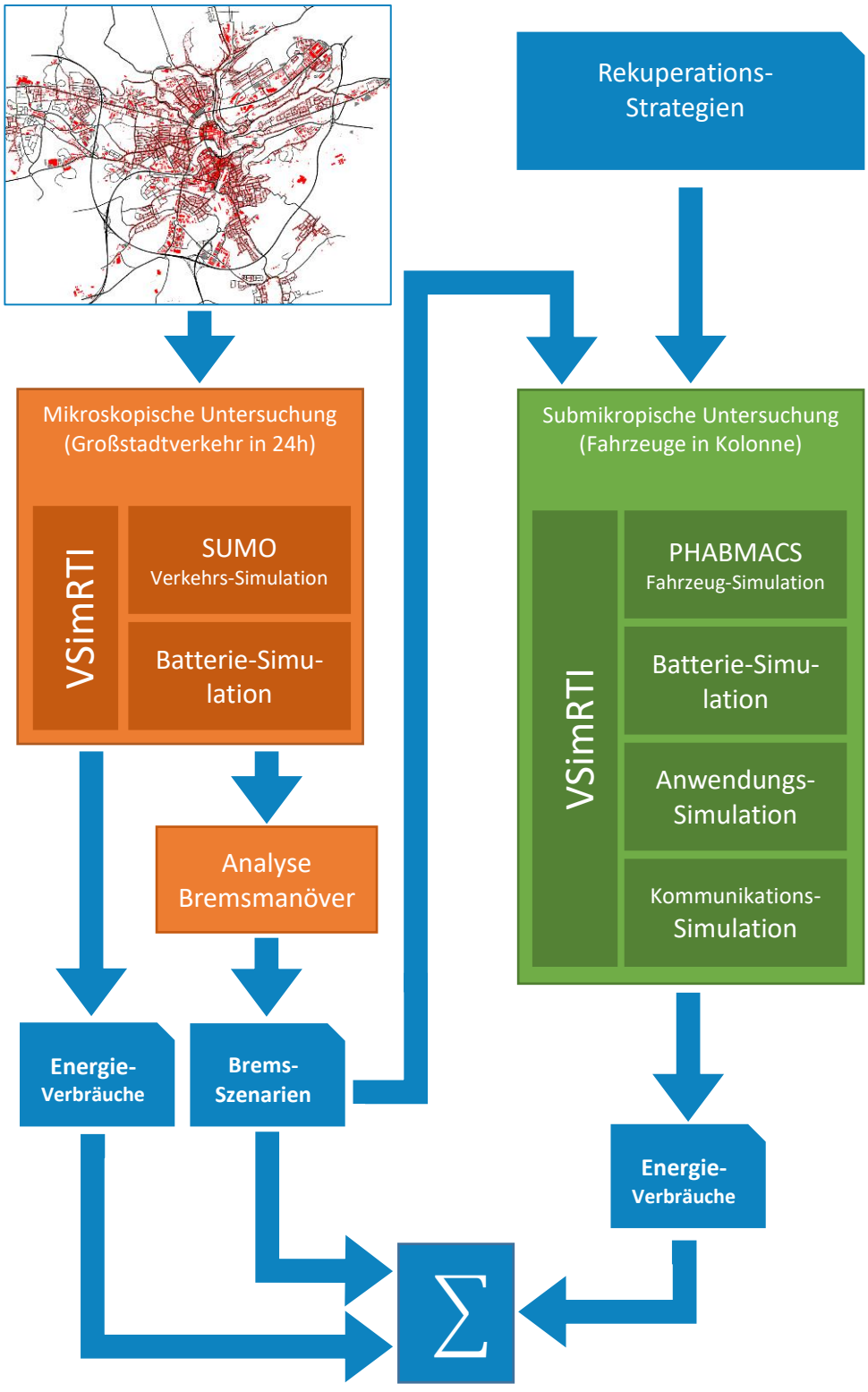


Abbildung 61: Simulationskonzept für die in AP 440 durchzuführenden Untersuchungen

4.2. AP 420: Erweiterung der Simulationsumgebung

Als zentrales Tool der simulativen Untersuchungen in AP 400 wurde die Simulationsumgebung VSimRTI vorgesehen, die gemeinsam von Fraunhofer FOKUS und der TU Berlin im Fachgebiet ODS entwickelt wurde. In eMERGE wurde VSimRTI um Komponenten zur Simulation von Elektrofahrzeugen und Ladeinfrastruktur erweitert und erfolgreich zur ganzheitlichen Evaluierung eingesetzt. Um auch die zusätzlichen Bedürfnisse von eMERGE II zu erfüllen, wurde VSimRTI in AP 420 geeignet erweitert. Hierzu wurden die in AP 410 entwickelten Konzepte implementiert. Die Arbeiten wurden im Juli 2015 gestartet und im März 2016 planmäßig abgeschlossen.

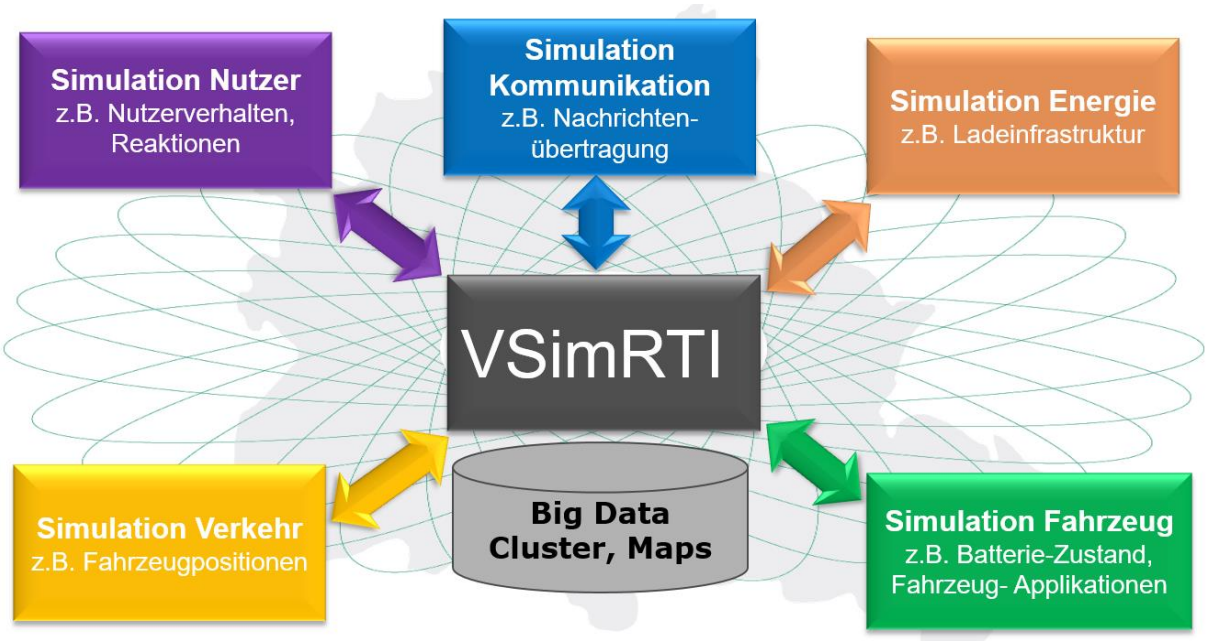


Abbildung 62: Simulationsframework VSimRTI

Ein Schwerpunkt in AP 420 lag auf der Integration des Fahrzeugsimulators PHABMACS in das Simulationsframework VSimRTI. VSimRTI basiert auf den Konzepten des „IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)“. Der Standard beschreibt einen generischen Ansatz, wie verschiedene Simulatoren mit Hilfe einer Runtime Infrastructure (RTI) zu einem Simulationsframework zusammengekoppelt werden können. Management, Datenaustausch und Synchronisation der einzelnen Simulatoren werden dabei durch die RTI durchgeführt. Es existiert ein Ambassador-Konzept, das beschreibt, wie ein Simulator an das Simulationsframework angekoppelt werden kann [VSIMRTI].

Diesem Konzept folgend, wurde für den Fahrzeugsimulator PHABMACS in AP 420 ein Ambassador implementiert, der ihn in das Simulationsframework VSimRTI integriert. Als Ergebnis dieser Kopplung konnten alle Features des Fahrzeugsimulators in VSimRTI genutzt werden. Somit konnten physikalische Fahrzeugeigenschaften und Fahrdynamiken hinreichend genau für die Untersuchung der Rekuperations-Strategien in VSimRTI modelliert werden.

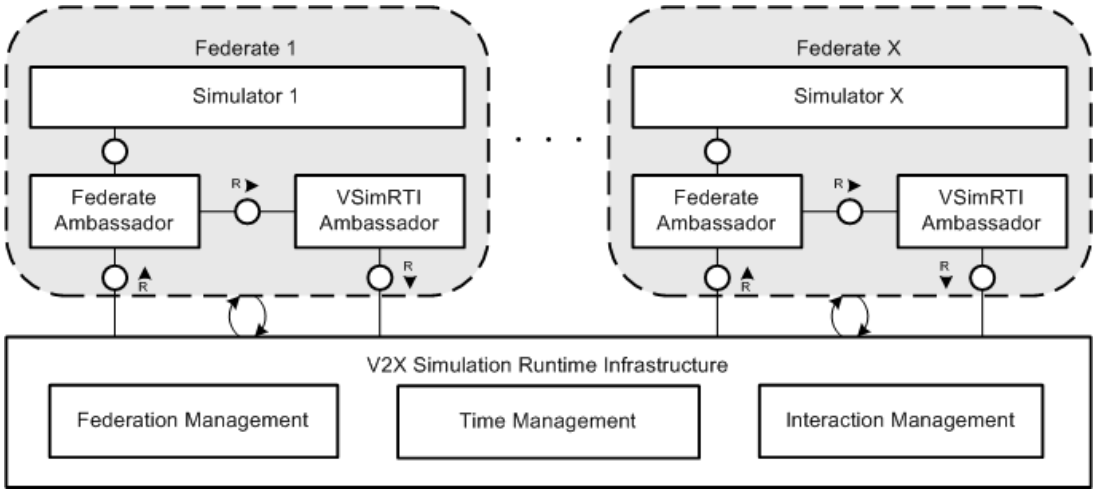


Abbildung 63: Ambassador-Konzept von VSimRTI

Bei der Kopplung des Fahrzeugsimulators PHABMACS an die Simulationsinfrastruktur VSimRTI wurde das Konzept des Ambassadors und Federates entsprechend Abbildung 63 umgesetzt. Ein Ambassador, direkt an VSimRTI gekoppelt, tauscht mit dem PHABMACS-Federate alle notwendigen Informationen aus. Dabei wurden folgende Funktionen bei der Kopplung berücksichtigt, die für eine Simulation im Verbund mit VSimRTI von großer Bedeutung sind:

- Hinzufügen eines Fahrzeuges zur Simulation an eine beliebige Startposition
- Umfassende Parametrisierung des Fahrzeuges und des Fahrermodells
    - Physikalische Eigenschaften des Fahrzeuges, insbesondere (Elektro)-Motor, Räder, Aufhängung, Bremse
    - Bevorzugter Abstand zum Vordermann, Geschwindigkeit, und Reaktionszeit des Fahrers
    - Konfiguration der zu folgenden Route
    - Konfiguration der gewünschten Fahrzeugfunktionen
- Auslesen der für VSimRTI notwendigen Informationen aus simulierten Fahrzeugen
- Setzen der Aktuatoren (Beschleunigung/Entschleunigung) eines Fahrzeugs
- Ausführen von Bremsmanövern bei einer zuvor konfigurierten Position

Weiterhin wurde PHABMACS um die Möglichkeit erweitert, Elektrofahrzeuge umfassend zu simulieren. Die bisherige Implementierung hätte für die in AP 440 durchzuführenden Untersuchungen nicht ausgereicht. Daher wurden hier das Batteriemodell, die Modellierung von Rekuperation, und die verschiedenen Möglichkeiten zur Modellierung einer regenerativen Bremse (siehe auch Abbildung 64) überarbeitet. Weitere Implementierungsarbeiten, die im Fahrzeugsimulator PHABMACS notwendig waren und in AP 420 umgesetzt wurden, sind u.a.:

- Verbesserte Modellierung eines menschlichen Fahrers
- Visualisierung von Elektrofahrzeug-spezifischen Informationen (u.a. Batteriekapazität)
- Visualisierung von Kommunikation (u.a. empfangene Nachrichten)
- Parametrierung und Einbettung eines Modells der Mercedes Benz B-Klasse 250e

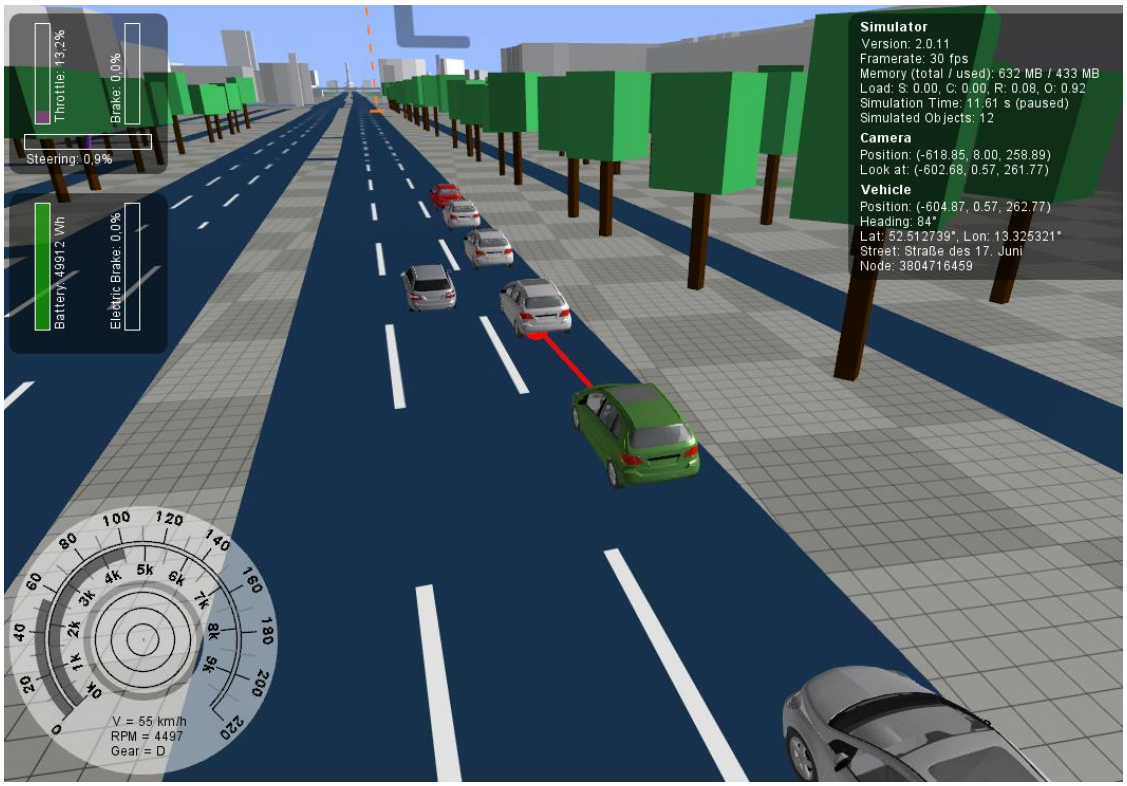


Abbildung 64: Visualisierung einer Fahrzeug-Simulation in PHABMACS

Weiterhin wurde eine Optimierung der Simulationsarchitektur VSimRTI auf Basis des Feedbacks aus eMERGE umgesetzt und das Visualisierungs- und Auswertetools ITEF ausgebaut, um die Untersuchungsergebnisse aus AP 440 visuell anschaulich darstellen zu können.

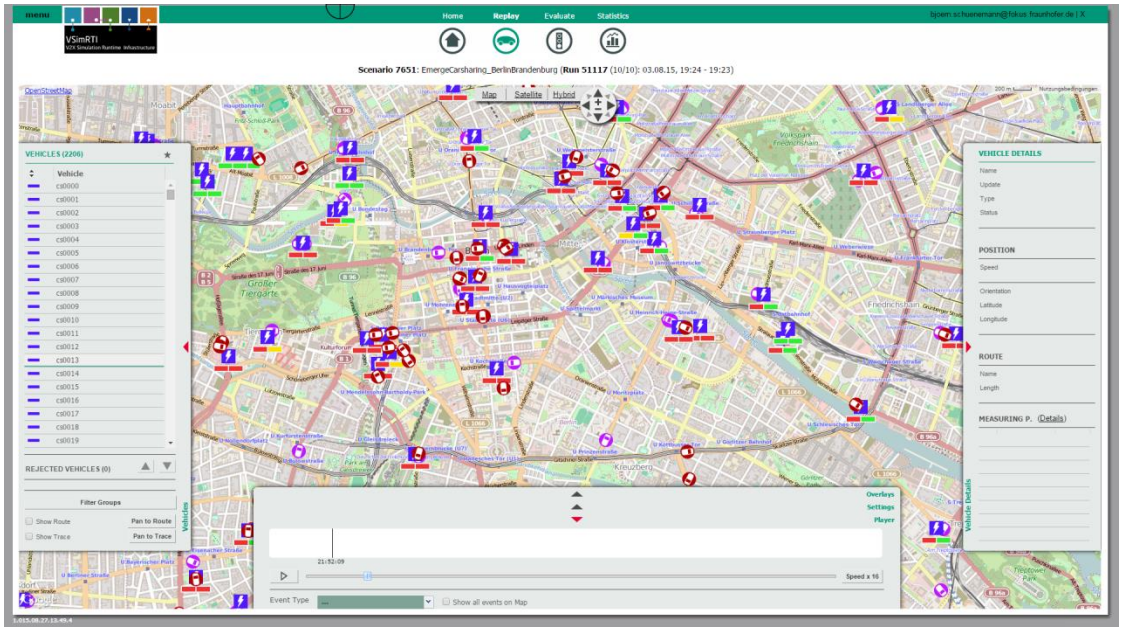


Abbildung 65: Visualisierungs- und Auswertetool ITEF

4.3. AP 430: Entwicklung von Anwendungen zur Optimierung der Elektromobilität

Stadtverkehr ist von Brems- und Beschleunigungsvorgängen geprägt und bietet hier einen guten Ansatzpunkt für eine Optimierung. Neben einer Minimierung der Brems- und Beschleunigungsvorgänge können optimierte Rekuperations-Strategien den Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen verringern. Diese beiden Punkte waren die Basis für die in AP 430 zu entwickelnden Anwendungen.

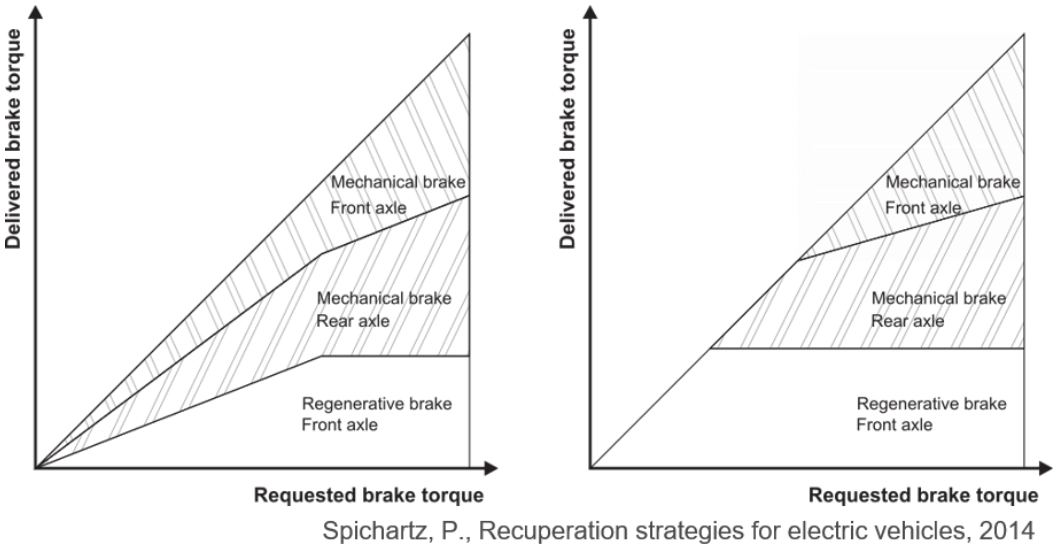


Abbildung 66: Strategien zum regenerativen Bremsen

Das Abbremsen des Fahrzeuges wird im Falle der Rekuperation über den Elektromotor getätigt, der in diesem Moment als Generator fungiert und die Bremsenergie in die Batterie zurückführt. Ist der vom Fahrer gewünschte Bremsmoment zu hoch um vom Elektromotor verarbeitet werden zu können, wird zusätzlich die klassische mechanische Bremse verwendet. Hierbei gibt es zwei verschiedene Ansätze, die in Abbildung 66 deutlich werden. So gibt es den Ansatz, die rekuperative und mechanische Bremse in ausgeglichenem Maße zu verwenden (Abbildung 66, links). Ein Vorteil hierbei ist, dass die mechanische Bremse weiterhin in allen Bremsvorgängen involviert ist und so ein Verschleiß durch Nichtnutzung vermieden wird. Im zweiten Ansatz wird die regenerative Bremse so weit wie möglich beansprucht, bis sie das gewünschte Bremsmoment nicht mehr liefern kann. Erst dann kommt die mechanische Bremse zusätzlich zum Einsatz. Die Literatur ist sich hier einig, dass es am effizientesten ist erst so viel wie möglich regenerativ zu bremsen, bevor die mechanische Bremse zum Einsatz kommt (Abbildung 66, rechts) [SPICH14]. Auch im Hinblick auf die in eMERGE II untersuchten Rekuperations-Strategien macht dieser Ansatz nur Sinn.

Für eine optimale Rekuperation ist es wichtig, so wenig wie möglich die mechanische Bremse zu tätige. Um dieses Ziel zu erreichen, muss vor allem frühzeitig gebremst werden. Für eine frühzeitige Erkennung einer notwendigen Bremsung können die Sensoren des Fahrzeuges verwendet werden, beispielsweise über Radar, oder, über eine direkte Kommunikation mit vorrausfahrenden Fahrzeugen (über zelluläre oder Ad-hoc-Netzwerke). Dabei melden Fahrzeuge in regelmäßigen Abständen ihre Position und Geschwindigkeit, woraufhin hinterherfahrende Fahrzeuge frühzeitig auf Bremsmanöver reagieren und somit optimal rekuperieren können.

4.3.1. Radarbasierte Rekuperation

Bei der radarbasierten Rekuperation wird der Radarsensor des eigenen Fahrzeuges verwendet, um kontinuierlich den Abstand zum direkt vorfahrenden Fahrzeug zu messen. Bremst dieses, kann darauf frühzeitig reagiert werden. Ziel der Strategie soll es dabei auch sein, soviel wie möglich die rekuperative Bremse zu verwenden und erst, wenn nötig, die mechanische Bremse einzusetzen. Auf diese Weise kann die optimale Menge an Energie in das eigene Fahrzeug zurückgespeist werden.

Auch wenn das radarunterstützte Bremsen bereits in den Fahrzeugen der Testflotte integriert ist, fließt diese Rekuperations-Strategie in die simulativen Untersuchungen in AP 440 mit ein. So kann sie direkt mit der erweiterten, kommunikationsbasierten Rekuperation verglichen werden. Auch kann damit der Einfluss unterschiedlicher Ausstattungsraten auf die radarbasierte Rekuperation detailliert untersucht werden.

Abbildung 67: Schaubild zur Darstellung der radarbasierten Rekuperation

4.3.2. Kommunikationsbasierte Rekuperation

Als Erweiterung zur radarbasierten Rekuperation kann die kommunikationsbasierte Rekuperation gesehen werden. Hierbei wird nicht Radar als primärer Sensor verwendet, sondern direkte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen. Die Kommunikation kann hierbei über den ITS-G5 Standard stattfinden, wobei Fahrzeuge direkt über eine Luftschnittstelle miteinander kommunizieren, oder aber auch mit Hilfe zellularer Netzwerke (LTE-V, 5G). In regelmäßigen Abständen tauschen die Fahrzeuge Nachrichten aus, in denen sie ihre Position, Geschwindigkeit, Beschleunigungswerte, etc. mitteilen. Fahrzeuge, die diese Informationen empfangen, können auf Basis dessen dank verbesserte Reaktionsgeschwindigkeit und erhöhter Vorausschau noch besser auf Bremsmanöver vorrausfahrender Fahrzeuge reagieren. Vor allem ist es bei diesem Ansatz möglich, über mehrere Fahrzeuge hinweg Informationen zu erhalten.

Sowohl die radarbasierte, als auch die kommunikationsbasierte Rekuperation wurden in AP 430 entwickelt und in AP 440 detailliert analysiert. Ergebnisse aus AP 440 sind ebenso in die Weiterentwicklung der Anwendungen eingeflossen um die individuellen Algorithmen zu verbessern und zu optimieren.

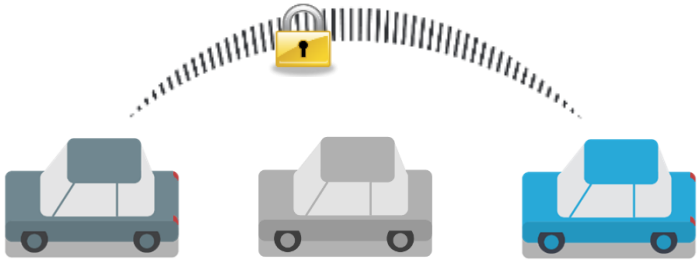


Abbildung 68: Schaubild zur Darstellung der kommunikationsbasierten Rekuperation

4.4. AP 440: Simulative Untersuchungen und Auswertung der Ergebnisse

Die Simulationsstudie der Rekuperations-Strategien folgte einem zweiteiligen Konzept. In einem ersten Schritt wurden in einer großflächigen Simulation Bremsmanöver ermittelt wie sie in einer Großstadt typischerweise auftreten. Für diese eher grobe Untersuchung wurde der mikroskopische Verkehrssimulator SUMO verwendet um mehrere tausend Fahrzeuge gleichzeitig simulieren zu können. Anschließend wurden auf Basis dieser Ergebnisse repräsentative Simulationsszenarien erstellt, in der dann die Rekuperations-Strategien detailliert untersucht wurden. Bei dieser zweiten submikroskopischen Untersuchung wurde der in AP 420 an VSimRTI gekoppelte Fahrsimulator PHABMACS verwendet. Die in dieser Untersuchung ermittelten Ergebnisse konnten anschließend auf das großflächige Simulationsszenario hochgerechnet werden.

4.4.1. Simulation für ein großflächiges Stadtszenario

Für eine umfangreiche Impactanalyse wurde im ersten Schritt ein großflächiges Stadtszenario simuliert. Aus der Simulation von Stadtverkehr wurden typische Situationen extrahiert in der die zu untersuchenden Rekuperations-Strategien zum Einsatz kommen können. Dazu wurde der Gesamtverkehr der Stadt Luxemburg über den Zeitraum eines kompletten Tages betrachtet. Dieses Szenario wurde in der Forschungsarbeit *„Luxembourg SUMO Traffic (LuST) Scenario: 24 Hours of Mobility for Vehicular Networking Research“* [LUST15] aufgesetzt und kalibriert und steht für Forschungszwecke zur Verfügung. Abbildung 69 zeigt das Szenario mit Einfärbung unterschiedlicher Mobilitätsaktivitäten.

Abbildung 69: Verkehrsnetz Luxemburg für die großflächige Verkehrssimulation

Um die Simulation des Stadtszenarios und die Anschließende Auswertung zu ermöglichen, musste VSimRTI entsprechend erweitert werden. So war es bisher nicht möglich, mit VSimRTI von anderen Forschungseinrichtungen erstellte Simulationsszenarien zu simulieren. Dies wurde im Rahmen dieses Arbeitspakets ermöglicht.

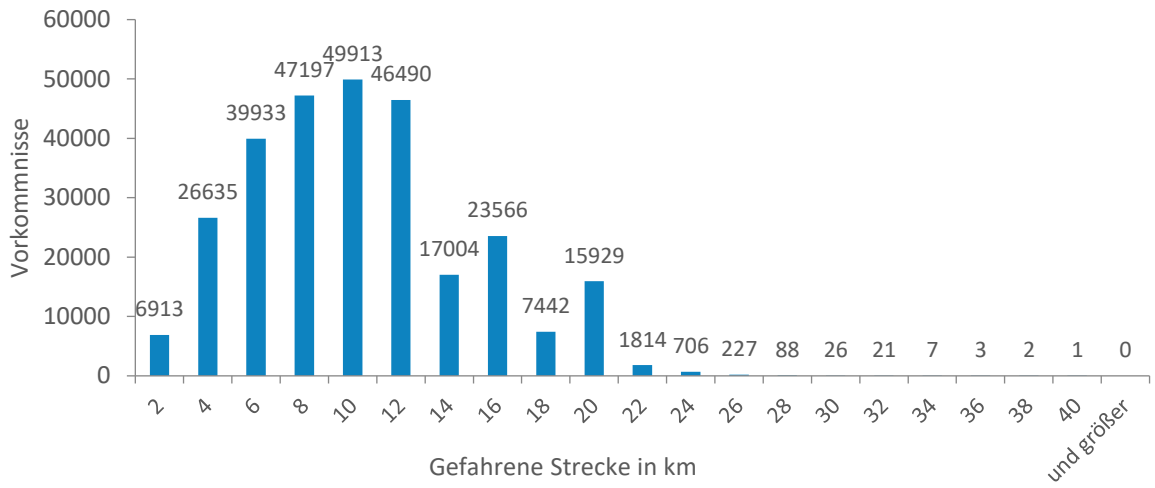


Abbildung 70: Histogramm der gefahrenen Strecken im Luxemburg-Szenario

Das Luxemburg-Szenario besteht aus der Simulation von Verkehr eines gesamten Tages (24 Stunden Simulationszeit). In dieser Zeit fanden insgesamt 283.917 Fahrten statt, wodurch insgesamt 2.642.984 km von den Fahrzeugen abgefahren wurden. Durchschnittlich wurden so 9,31 km pro Fahrt in der Simulation zurückgelegt. Abbildung 70 zeigt hierbei die Verteilung der Fahrten anhand der gefahrenen Strecke.

Die Fahrzeugbewegungen in der Simulation wurden anschließend mit Methoden der Big-Data-Analyse auf typische Fahrprofile und -manöver, vor allem Bremsmanöver, untersucht. Die dabei identifizierten Werte dienten dann zur Choreographie und Konfiguration der submikroskopischen Szenarien. Später konnten dann die bei der submikroskopischen Simulation ermittelten Ergebnisse wiederum in das hier simulierte großflächige Szenario einfließen um die ganzheitliche Auswertung der Rekuperations-Strategien zu ermöglichen. Im Folgenden wird die Analyse der Fahrzeugbewegungen erläutert.

4.4.2. Datenauswertung der Simulation für ein großflächiges Stadtszenario

Für die Datenauswertung wurden die aus dem Simulationsdurchlauf des Stadtszenarios entstandenen Fahrzeugbewegungen analysiert. Hierbei wurden explizit Bremsmanöver und Kolonnenfahrten[3] gesucht, da diese für den Einsatz der zu untersuchenden Rekuperations-Strategien eine große Rolle spielen. Aus den in den Daten enthaltenen Informationen wie z.B. Fahrtrichtung, Fahrtgeschwindigkeit oder Positionsdaten können Rückschlüsse darüber gezogen werden, wie oft die gesuchten Bremsmanöver vorkommen und wie viele Fahrzeuge durch Kolonnenfahrten von möglichen Einsparungen durch den Einsatz regenerativer Bremsstrategien profitieren würden.

Im simulierten Stadtszenario wurden in den 24 Stunden Simulationszeit 283.917 Fahrten simuliert. In den Logdateien finden sich etwa 185 Millionen Datenpunkten. Um die Fahrprofile identifizieren zu können, wurden die Daten nach Fahrzeugen gruppiert.

[3] Als Kolonnenfahrt werden hier Fahrten von 2 oder mehr dicht aufeinanderfolgenden Fahrzeugen bezeichnet.

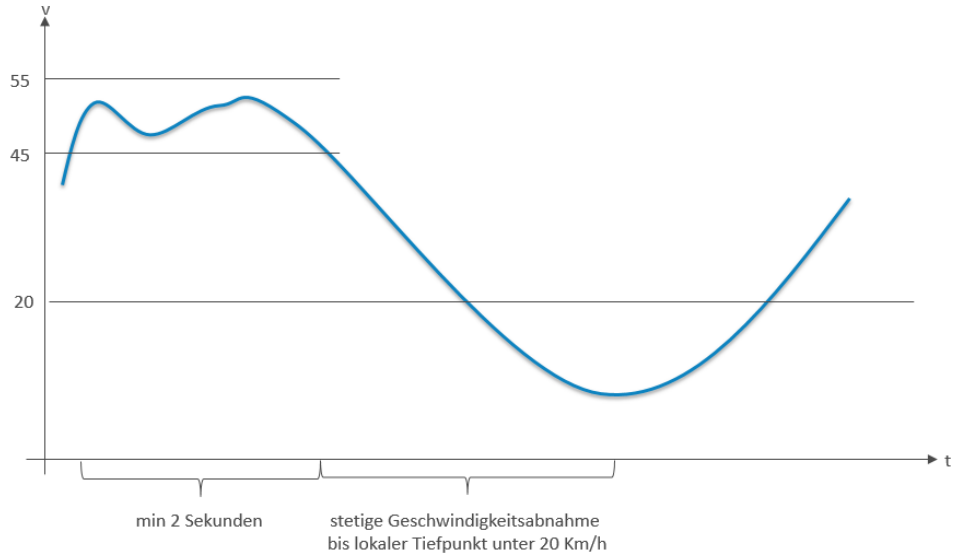


Abbildung 71: Gesuchtes Fahrprofil für ein Bremsmanöver bei 50 km/h

Abbildung 71 zeigt eine schematische Darstellung eines gesuchten Fahrprofils. Dieses Fahrprofil repräsentiert ein Bremsmanöver bei 50 km/h. Zunächst muss sich die Fahrzeuggeschwindigkeit für mindestens zwei Sekunden in einem Korridor von +/- 5 km/h um die Ausgangsgeschwindigkeit bewegen. Danach muss eine kontinuierliche Geschwindigkeitsabnahme bis zu einem Tiefpunkt erfolgen, der unter 20 Km/h liegt. Sind all diese Eigenschaften erfüllt, wird das Bremsmanöver mit in die weitere Analyse miteinbezogen. Weiterhin wurden für die Ausgangsgeschwindigkeiten 30 km/h und 80 km/h ebenfalls Bremsmanöver gesucht. Die gefundenen Bremsmanöver wurden anschließend noch in Beziehung zueinander gesetzt, um Kolonnenfahrten zu ermitteln. Fanden mindestens zwei Bremsmanöver in unmittelbarer Nähe statt, dann wurde eine Kolonnenfahrt gefunden. Nur diese sind relevant für die Untersuchung der Rekuperations-Strategien. Tabelle 23 zeigt die Anzahl der gefundenen Bremsmanöver und die Anzahl der Fahrzeuge, die von Kolonnenfahrten betroffen waren.

Tabelle 23: Auswertung der Fahrprofile nach Geschwindigkeit

	30 Km/h	50 Km/h	80 Km/h
Anzahl	29.572	663.441	28.223
Von Kolonnenfahrten betroffene Fahrzeuge	4.945	118.349	3.356

In der Auswertung zeigt sich, dass durchschnittlich 2,3 Mal pro Fahrt das Fahrprofil mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 50 Km/h getroffen wird. Davon sind allerdings nur ein gutes Sechstel in Kolonnenfahrten involviert. Bei schnelleren Landstraßen bzw. Autobahnfahrten, die mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 80 Km/h analysiert werden, sowie bei langsamen Fahrten mit einer Zielgeschwindigkeit von 30 Km/h ergeben sich in der Auswertung deutlich niedrigere Werte.

Zusätzlich zu der Analyse der Fahrzeugbewegungen wurde der Energieverbrauch des Gesamtverkehrs ermittelt. Hierzu wurde jedes Fahrzeug in der Simulation mit einem Batteriemodell ausgestattet, welche den Energieverbrauch der einzelnen Fahrzeuge simuliert wurden. Hier wurde der in

eMERGE entwickelte Batteriesimulator verwendet, der bereits an VSimRTI gekoppelt ist. Aus der Simulation lässt sich der Energieverbrauch der einzelnen Fahrzeuge und des Gesamtverkehrs über einen ganzen Tag der Stadt Luxemburg ermitteln, würden dort alle Fahrzeuge mit Elektroantrieb fahren. Die ermittelten Energiewerte sind in Tabelle 24 zu finden.

Tabelle 24: Energieverbrauch der Fahrzeuge in der Simulation

Energieverbrauch	
Gesamt	679 MWh
Pro Fahrt	2,4 kWh
Pro 100km	25,7 kWh

4.4.3. Submikroskopische Simulation der Rekuperations-Strategien

Auf Basis der ermittelten Fahrprofile wurden repräsentative Simulationsszenarien für eine submikroskopische Simulation der Rekuperations-Strategien erstellt. Hierbei wurden Fahrdynamik und Rekuperations-Strategien detailliert mit Hilfe der Simulationsinfrastruktur VSimRTI und den in AP 420 angekoppelten Fahrdynamik-Simulator PHABMACS submikroskopisch simuliert.

Simulationsszenarien

Für die Untersuchung der radarbasierten und kommunikationsbasierten Rekuperations-Strategien wurden drei verschiedene Szenarien erstellt, in den eine Kolonne von Fahrzeugen in unterschiedlichen Abständen eine Straße entlangfährt. Das führende Fahrzeug muss dabei an einer zuvor festgelegten Position ein unerwartetes Bremsmanöver ausführen, wodurch es auf eine niedrigere Geschwindigkeit abbremst, und anschließend wieder auf die Ausgangsgeschwindigkeit beschleunigt. Dieses Bremsmanöver entspricht den in der großflächigen Simulation häufig identifizierten Bremsmanövern. Alle darauffolgenden Fahrzeuge reagieren anschließend auf das Bremsen des vorfahrenden Fahrzeuges, je nachdem ob und mit welcher Technologie sie ausgestattet sind. Folgende Szenarien wurden hierfür erstellt und untersucht:

- **Stadtverkehr auf Hauptstraße**
  - Strecke:
    Mehrspurige Hauptstraße „Straße des 17. Juni“
  - Anzahl Fahrzeuge in der Kolonne:
    Führungsfahrzeug + 5 Folgefahrzeuge
  - Zielgeschwindigkeit der Kolonne:
    50 km/h
  - Geschwindigkeit bei Bremsmanöver:
    15 km/h
  - Zeitabstände zwischen den Fahrzeugen:
    Zwischen 1s und 1,5s

Abbildung 72: Szenario Hauptstraße

- **Stadtverkehr auf Nebenstraße**
  - Strecke:
    Einspurige Nebenstraße in Berlin-Dahlem
  - Anzahl Fahrzeuge in der Kolonne:
    Führungsfahrzeug + 5 Folgefahrzeuge
  - Zielgeschwindigkeit der Kolonne:
    30 km/h
  - Geschwindigkeit bei Bremsmanöver:
    12 km/h
  - Zeitabstände zwischen den Fahrzeugen:
    Zwischen 1s und 1,5s

Abbildung 73: Szenario Nebenstraße

- **Stadtverkehr auf Stadt-Autobahn**
  - Strecke:
    Fahrt auf Stadt-Autobahn in Berlin-Moabit
  - Anzahl Fahrzeuge in der Kolonne:
    Führungsfahrzeug + 5 Folgefahrzeuge
  - Zielgeschwindigkeit der Kolonne:
    80 km/h
  - Geschwindigkeit bei Bremsmanöver:
    32 km/h
  - Zeitabstände zwischen den Fahrzeugen:
    Zwischen 1,3s und 1,6s

Abbildung 74: Szenario Stadtautobahn

Parametrierung

In den Szenarien der submikroskopischen Simulation wurden die Fahrzeuge mit Fahrzeugeigenschaften der Mercedes Benz B-Klasse 250e parametrisiert. Die Fahrzeugbatterie wurde in der Simulation mit einer Kapazität von 28 kWh konfiguriert.

Bei der Simulation der Szenarien wurden die Fahrzeuge mit verschiedenen Modellen ausgestattet, die zum einem das menschliche Fahrverhalten modellieren, aber auch die Fahrzeugfunktionen in Form der Rekuperations-Strategien. Insgesamt wurden vier verschiedene Typen von Fahrzeugen modelliert:

- **Führungsfahrzeug**
  Folgt der vordefinierten Strecke mit der im Szenario festgelegten Zielgeschwindigkeit (bspw. 50 km/h) und muss an der festgelegten Position unerwartet bremsen. Nach dem Bremsmanöver beschleunigt das Fahrzeug wieder.

- **Menschlicher Fahrer in der Kolonne**
  Dieser Fahrzeugtyp folgt dem vorfahrenden Fahrzeug und reagiert auf Bremsmanöver verzögert mit einer für Menschen typischen Reaktionszeit (ca. 1s). Bei der Bremsung rekuperiert

das Fahrzeug. Ist das vom Fahrer gewünschte Bremsmoment größer als die rekuperative Bremse leisten kann, wird zusätzlich die mechanische Bremse verwendet.

- **Fahrzeug mit radarbasierter Rekuperation**
  Diese Fahrzeuge sind mit einem Modell eines Radarsensors ausgestattet. Dieser Sensor detektiert die Position von Objekten vor dem Fahrzeug mit einer Verzögerung von 300 ms und gibt diese an die Fahrzeugfunktion „Radarbasierte Rekuperation“ weiter. Die radarbasierte Rekuperation versucht hierbei, sobald es ein bremsendes Fahrzeug direkt vor sich erkennt, dass für eine Rekuperation maximale Bremsmoment zu berechnen, ohne dass die mechanische Bremse getätigt werden muss. Ist durch das Bremsen eine Geschwindigkeit von unter 10 km/h erreicht, und ausreichend Platz zum Vorderfahrzeug vorhanden, wird nur noch leicht gebremst. Beschleunigt das Vorderfahrzeug, so wird das Bremsen unterbrochen und das Fahrermodell übernimmt das eigene Fahrzeug wodurch es ebenfalls beschleunigt. Der Algorithmus versucht stets so viel wie möglich regenerativ, aber nicht unnötig zu bremsen.

- **Fahrzeug mit kommunikationsbasierter Rekuperation**
  Fahrzeuge dieses Typs sind mit der erweiterten Fahrzeugfunktion für das regenerative Bremsen ausgestattet. Diese Fahrzeuge können von anderen Fahrzeugen Nachrichten mit Positionsdaten empfangen. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass alle anderen Fahrzeuge in der Simulation mit einer entsprechenden Sende-Einheit ausgestattet sind. Diese senden in einem Takt von 50 Hz Informationen über ihre Position, Ausrichtung und Geschwindigkeit. Der Austausch der Information wurde mit Hilfe eines Ad-hoc Kommunikationssimulators modelliert, womit Verzögerungen und Fehlerraten in der Kommunikation zwischen den modelliert wurden. Wie bereits in AP 430 erwähnt, berücksichtigt die Fahrzeugfunktion „Kommunikationsbasierte Rekuperation“ nun nicht nur das direkt vorausfahrende Fahrzeug, sondern die Positionen aller vorfahrenden Fahrzeuge der Kolonne. So wird bereits ein leichtes Bremsmoment angewandt, wenn ein weit vorfahrendes Fahrzeug bremst. Je näher das vorfahrende Fahrzeug ist, umso stärker ist die eigene Bremsung. Hierbei wird wieder stets so viel wie möglich regenerativ gebremst, ohne in einem unnötigen Bremsvorgang zu resultieren. Auf Grund von Ungenauigkeiten und Fehlerraten in der Übertragung der Fahrzeugpositionen, wird stets der Radarsensor des Fahrzeugs verwendet und mit den Positionsdaten aus der Funkübertragung fusioniert. Weiterhin werden Positions- und Geschwindigkeitsänderungen vorfahrender Fahrzeuge antizipiert, wenn bspw. Nachrichten bei der Übertragung verloren gehen.

Die erstellten Szenarien wurden für eine ausführliche Auswertung vielfältig parametriert. So wurde die Ausstattungsrate der Fahrzeugfunktionen, als auch die Abstände zwischen den Fahrzeugen unterschiedlich parametriert. Folgende Ausstattungsraten wurden gewählt aus denen sich jeweils unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten der Ausstattung der fünf Folgefahrzeuge ergaben:

- 0% Ausstattungsrate, rein menschliche Fahrer als Basisszenario
  - 1 Kombinationsmöglichkeit
- 20% Ausstattung der Fahrzeuge mit radarbasierter Rekuperation
  - 5 Kombinationsmöglichkeiten
- 40% Ausstattung der Fahrzeuge mit radarbasierter Rekuperation
  - 10 Kombinationsmöglichkeiten
- 60% Ausstattung der Fahrzeuge mit radarbasierter Rekuperation
  - 10 Kombinationsmöglichkeiten
- 80% Ausstattung der Fahrzeuge mit radarbasierter Rekuperation
  - 5 Kombinationsmöglichkeiten

- 100% Ausstattung der Fahrzeuge mit radarbasierter Rekuperation
    - 1 Kombinationsmöglichkeit
- 20% Ausstattung der Fahrzeuge mit kommunikationsbasierter Rekuperation
    - 5 Kombinationsmöglichkeiten
- 40% Ausstattung der Fahrzeuge mit kommunikationsbasierter Rekuperation
    - 10 Kombinationsmöglichkeiten
- 60% Ausstattung der Fahrzeuge mit kommunikationsbasierter Rekuperation
    - 10 Kombinationsmöglichkeiten
- 80% Ausstattung der Fahrzeuge mit kommunikationsbasierter Rekuperation
    - 5 Kombinationsmöglichkeiten
- 100% Ausstattung der Fahrzeuge mit kommunikationsbasierter Rekuperation
    - 1 Kombinationsmöglichkeit

Zusätzlich zu der Ausstattungsrate wurden die Abstände zwischen den Fahrzeugen mit Hilfe einer Gaußschen Normalverteilung parametriert. Pro Szenario wurden fünf verschiedene Kombinationen zufälliger Fahrzeugabstände zwischen 1s und 1,6s generiert. Insgesamt ergaben sich daraus pro Szenario 315 Simulationsläufe; insgesamt also 945 Simulationsläufe die anschließend ausgewertet wurden.

4.4.4. Auswertung der Submikroskopische Simulationen

Bei der Simulation der Szenarien wurden verschiedene Werte gemessen, die für die Auswertung relevant waren:

- **Energieverbrauch auf der Gesamtstrecke in Wh**
  Gesamtverbrauch pro Fahrzeug während des gesamten Simulationslaufs.
- **Energieverbrauch während des Bremsmanövers der Kolonne in Wh**
  Der Verbrauch pro Fahrzeug während der Ausführung des Bremsmanövers der gesamten Kolonne. Die Messung wurde gestartet, sobald das erste Fahrzeug den Bremsvorgang begonnen hat. Die Messung wurde pro Fahrzeug beendet, sobald es seit Start der Messung 400m (30 km/h), 500m (50km/h) bzw. 700m (80 km/h) zurückgelegt hat.
- **Minimalgeschwindigkeit während des Bremsmanövers in km/h**
  Die bei dem Bremsmanöver am niedrigsten erreichte Geschwindigkeit pro Fahrzeug.

Für einen Vergleich der radarbasierten Rekuperation mit der kommunikationsbasierten Rekuperation wurden die Verbesserung des Energieverbrauchs während des Manövers gegenüber der nicht ausgestatteten Situation (rein menschliche Fahrer) berechnet. Hier zeigte sich, dass die Ausgangsgeschwindigkeit der Kolonne einen großen Einfluss auf die Wirksamkeit der Technologien hat. So konnten bei 30 km/h maximal 5,6% der normalerweise verbrauchten Energie während des Manövers eingespart werden. Bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 80 km/h gab es hingegen ein Einsparpotential von bis zu 18,4 % im radarbasierten bzw. 29,1% im kommunikationsbasierten Ansatz. Weiterhin konnte die kommunikationsbasierte Rekuperation bei 30 km/h kaum Verbesserungspotential gegenüber der radarbasierten Rekuperation aufzeigen. Bei 80 km/h arbeitete die kommunikationsbasierte Rekuperation schon bei einer Ausstattungsrate von 40% deutlich effektiver, als eine mit Radar vollausgestattete Kolonne. Die Diagramme in den folgenden Abbildungen Abbildung 75 bis Abbildung 77 verdeutlichen das Verbesserungspotential der verschiedenen Ansätze in den Szenarien bei unterschiedlichen Ausstattungsraten.

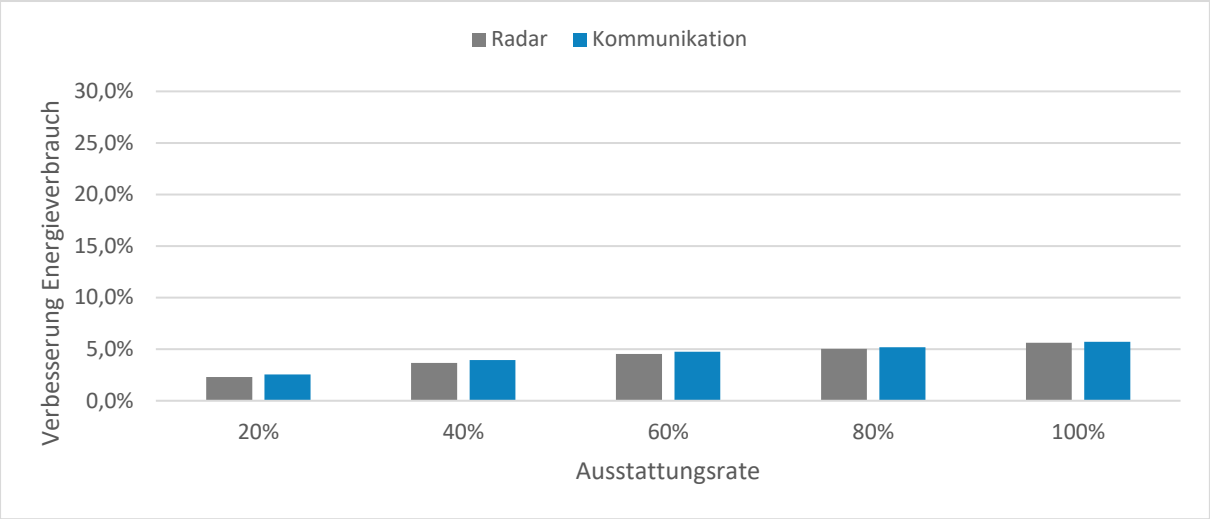


Abbildung 75: Vergleich der Verbesserung bei beiden Rekuperations-Strategien bei 30 km/h

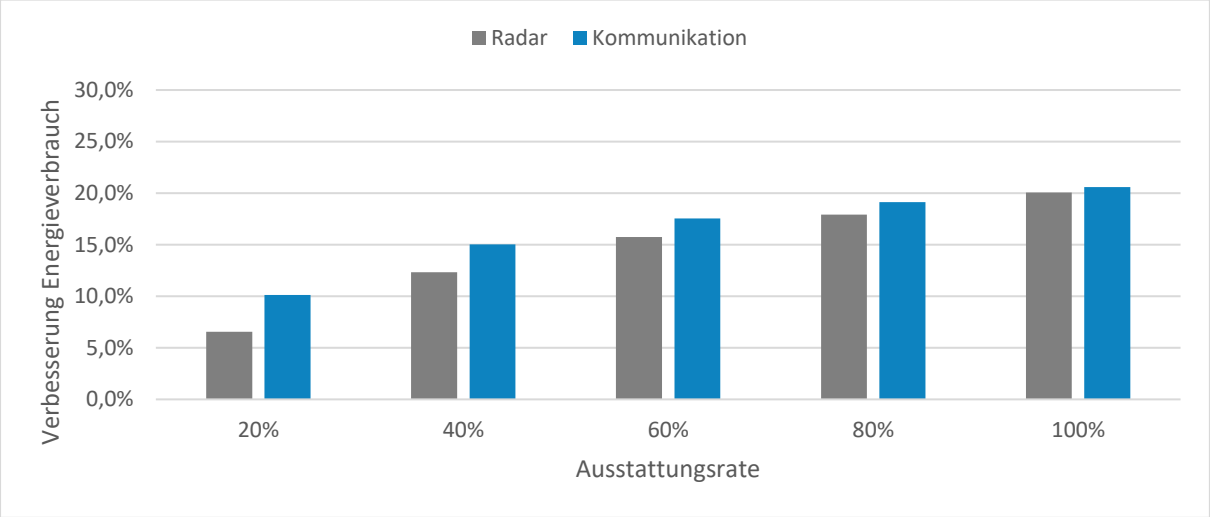


Abbildung 76: Vergleich der Verbesserung bei beiden Rekuperations-Strategien bei 50 km/h

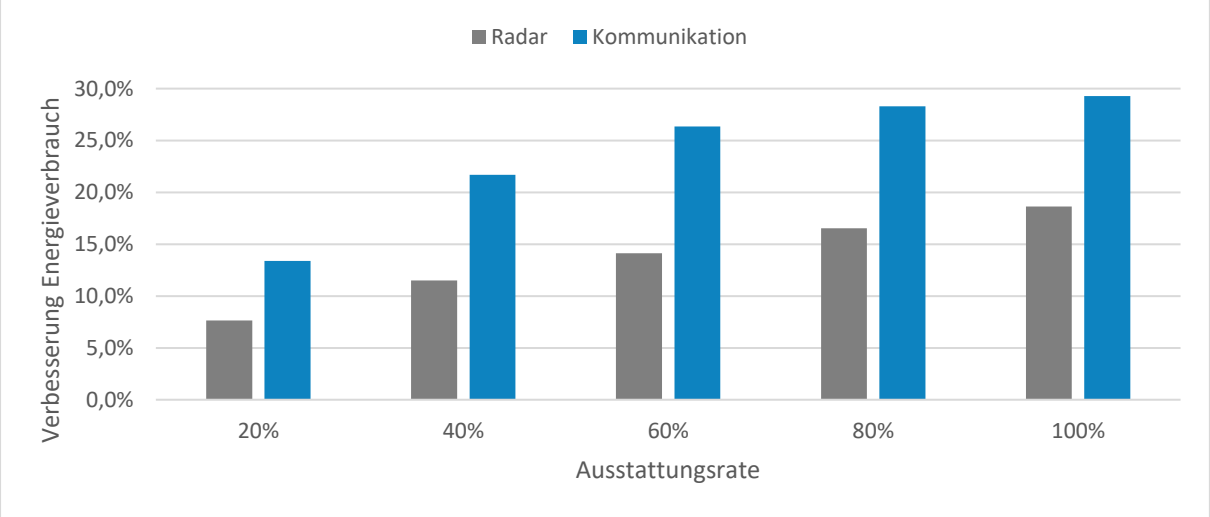


Abbildung 77: Vergleich der Verbesserung bei beiden Rekuperations-Strategien bei 80 km/h

In Tabelle 25**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wird zudem deutlich, wie viel Energie von der Kolonne absolut eingespart wurde. Sind es bei 30 km/h maximal 16 Wh die durch den Einsatz von radarbasierter oder kommunikationsbasierter Rekuperation eingespart werden konnten, beträgt das Einsparungspotential bei 50 km/h bereits bis zu 113 Wh, und bei 80 km/h bis zu 380 Wh pro Kolonne und pro Bremsmanöver bei voller Ausstattungsrate. Pro Fahrzeug in der Kolonne entspricht dies einer zusätzlichen Reichweite von 458m [4].

Tabelle 25: Durchschn. Energieverbräuche der Fahrzeugkolonne und Reichweitenverbesserung
pro Fahrzeug beim Bremsmanöver in den jeweiligen Szenarien, Technologien und Ausstattungsraten[4]

Ausstattungsrate	0%	20%	40%	60%	80%	100%
30 km/h Radar	281 Wh	275 Wh -2,3% +7 m	271 Wh -3,7% +12 m	268 Wh -4,6% +16 m	266 Wh -5,1% +18 m	265 Wh -5,5% +19 m
30 km/h Kommunikation	281 Wh	274 Wh -2,6% +8 m	270 Wh -4,0% + 13 m	267 Wh -4,8% +16 m	266 Wh -5,3% +18 m	265 Wh -5,6% +19 m
50 km/h Radar	546 Wh	510 Wh -6,6% +43 m	478 Wh -12,4% +82 m	459 Wh -15,9% +105 m	448 Wh -18,1% +118 m	436 Wh -20,2% +133 m
50 km/h Kommunikation	546 Wh	491 Wh -10,2% +66 m	464 Wh -15,1% +99 m	450 Wh -17,7% +116 m	441 Wh -19,3% +127 m	433 Wh -20,8% +136 m
80 km/h Radar	1303 Wh	1203 Wh -7,7% +120 m	1152 Wh -11,5% +182 m	1118 Wh -14,2% +223 m	1086 Wh -16,6% +261 m	1062 Wh -18,4% +290 m
80 km/h Kommunikation	1303 Wh	1128 Wh -13,4% +211 m	1019 Wh -21,7% +342 m	958 Wh -26,4% +416 m	933 Wh -28,4% +446 m	923 Wh -29,1% +458 m

Beim Betrachten der Minimalgeschwindigkeit des letzten Fahrzeugs in der Kolonne während der Fahrt zeigt sich, dass dieses durch das Bremsmanöver fast zum Stehen kam (siehe Abbildung 78). Obwohl das erste Fahrzeug der Kolonne nur bis 15 km/h abbremste, schaukelte sich das Bremsverhalten durch die Reaktionsverzögerung der menschlichen Fahrer soweit auf, dass das letzte Fahrzeug bis zum Stillstand bremsen musste.

Dieses Verhalten konnte in allen Szenarien beobachtet werden. Im Stadt- und Autobahnverkehr können solche Situation schnell zu langanhaltenden Staus führen. Durch den Einsatz der radarbasierten Rekuperation konnte das notwendige Abbremsen verringert werden. Im simulierten Szenario Stadtverkehr wurde schon bei einer Ausstattungsrate von 40% das Anhalten nahezu verhindert. Hier lag die Minimalgeschwindigkeit des letzten Fahrzeugs nur noch bei rund 10 km/h. Mit Hilfe von Kommunikation konnte die Minimalgeschwindigkeit bereits ab einer Ausstattungsrate von 20% deutlich ver-

[4] Bei einem vom Hersteller für die B-Klasse B250e angegebenen gewichteten Normalverbrauch von 16,6 kWh pro 100km

ringert werden. Bei höheren Ausstattungsraten war die Minimalgeschwindigkeit des letzten Fahrzeugs im Durchschnitt sogar höher, als die des bremsenden vorfahrenden Fahrzeugs, wodurch ein verbesserter Verkehrsfluss erreicht werden kann.

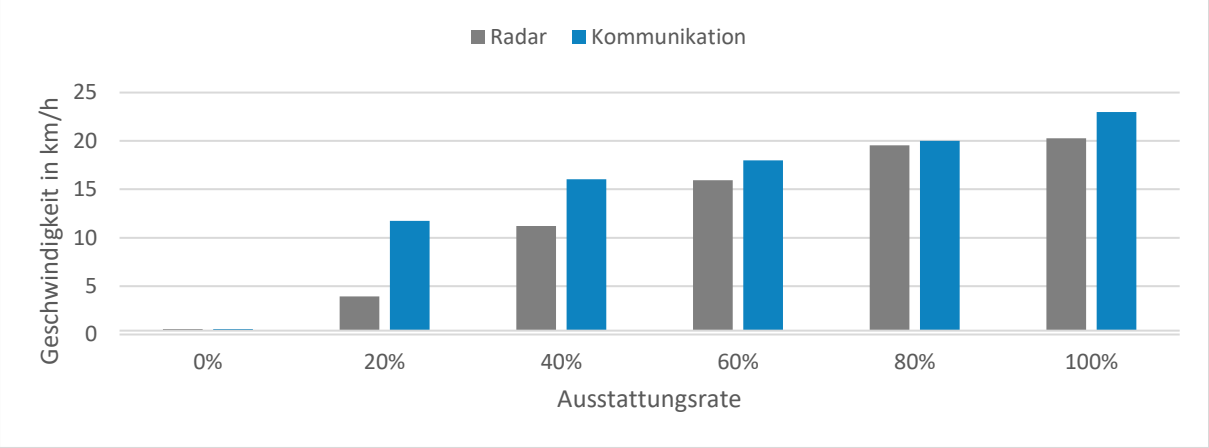


Abbildung 78: Minimale Geschwindigkeit des letzten Fahrzeugs während des Manövers (50 km/h)

4.4.5. Hochrechnung der submikroskopischen Ergebnisse auf Stadtverkehr

Um umfassende Aussagen über die Wirksamkeit der untersuchten Technologien machen zu können, wurden die in der submikroskopischen Untersuchung gewonnenen Ergebnisse auf die großflächige Luxemburg-Simulation hochskaliert. Bei der Suche nach Bremsmanövern im Stadtverkehr wurde die Anzahl der darin involvierten Fahrzeuge ermittelt (siehe Tabelle 26). Bei den unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen hat sich gezeigt, dass das untersuchte Bremsmanöver im Stadtverkehr bei 50 km/h deutlich häufiger auftreten (ca. 118.000 beteiligte Fahrzeuge) als in Nebenstraßen oder auf Autobahnen (ca. 4.900 bzw. 3.500 beteiligte Fahrzeuge). Diese Zahlen können dazu genutzt werden, um das Einsparungspotential der submikroskopisch untersuchten Rekuperations-Strategien auf einen ganzen Tag Stadtverkehr hochzurechnen.

Die Berechnung der durch radarbasierte Rekuperation eingesparte Energie im Gesamtverkehr E_r bei einer Ausstattungsrate p ergibt sich durch:

$$E_r(p) = \sum_{v \in \{30,50,80)} (e_r(v,p) - e_r(v,0)) \cdot n(v)$$

wobei $e_r(v,p)$ den durchschnittlichen Energieverbrauch eines Fahrzeugs beim Bremsmanöver bei der Ausgangsgeschwindigkeit v, und $n(v)$ die Anzahl der an einer Kolonnenfahrt beteiligten Fahrzeuge bei der Geschwindigkeit v ist. Die Werte für $e_r(v,p)$ finden sich in Tabelle 25, die Werte für $n(v)$ in Tabelle 23**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Beispielsweise gilt $e_r(50, 0.4) = 478\,Wh$.

Für die kommunikationsbasierte Rekuperation gilt analog dazu:

$$E_k(p) = \sum_{v \in \{30,50,80)} (e_k(v,p) - e_k(v,0)) \cdot n(v)$$

Daraus ergeben sich die in Tabelle 26**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** einsehbaren Energieeinsparungen bei Einsatz der unterschiedlichen Technologien und Ausstattungsraten.

Tabelle 26: Einsparungspotential des Gesamtverkehrs bei Einsatz der Rekuperations-Strategien

	20%	40%	60%	80%	100%
Radar	925 kWh	1721 kWh	2196 kWh	2480 kWh	2781 kWh
Kommunikation	1426 kWh	2142 kWh	2518 kWh	2749 kWh	2946 kWh

4.4.6. Zusammenfassung und Fazit AP 410 bis AP 440

In den Arbeitspaketen AP 410 bis AP 440 hat das Fachgebiet ODS der TU Berlin ganzheitliche Untersuchungen durchgeführt, die die Auswirkungen höherer Penetrationsraten von Elektrofahrzeugen speziell auf die Domänen Verkehr und Energie analysiert haben. Das Konzept der Rekuperation hat hierbei als wichtiger Aspekt herausgestochen und spielte in der Entwicklung von Anwendungen und Systemen zur Leistungssteigerung des „Gesamtsystems Elektromobilität“ eine entscheidende Rolle. Die bereits in der B-Klasse B250e implementierte radarbasierte Rekuperation wurde zusammen mit einer erweiterten, kommunikationsbasierten Rekuperations-Strategie detailliert untersucht und verglichen. In einer zweistufigen Simulation wurden erst großflächig Fahrzeugbewegungen in einer Großstadt untersucht und Szenarien identifiziert, die häufig vorkommen und bei Rekuperations-Strategien eine Rolle spielen können. Die ermittelten Szenarien wurden anschließend detailliert simuliert um den Einfluss der Rekuperations-Strategien in Hinblick auf Energieeffizienz und Ausstattungsraten herauszuarbeiten. Im Vorlauf wurden für die bei der Untersuchung verwendete Simulationsumgebung VSimRTI diverse notwendige Erweiterungen, wie die Kopplung des Fahrzeugsimulators PHABMACS und die Erweiterung des VSimRTI Batterie-Simulators für Rekuperation implementiert.

In der Untersuchung wurden die bei Kolonnenverkehr im städtischen Umfeld auftretenden Bremsmanöver bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten submikroskopisch simuliert. Fahrzeuge wurden je nach Ausstattungsrate mit radarbasierten bzw. kommunikationsbasierten Technologien ausgerüstet. Hierbei hat sich gezeigt, dass eine radarbasierte Rekuperation grundsätzlich schon eine gute Energieeinsparung vorweisen kann. Die erweitere, kommunikationsbasierte Rekuperation zeigt bei niedrigen Ausstattungsraten und hohen Geschwindigkeiten noch deutliche Verbesserungen. Hier ergibt sich durch die hohe Kommunikationsreichweite gegenüber Radar ein deutlich besseres Bild des Umfelds und auch Bremsmanöver weit vorrausfahrender Fahrzeuge können erkannt und in die Optimierung der Rekuperation mit einfließen. In den Untersuchungen der kommunikationsbasierten Rekuperation hat sich auch gezeigt, dass die Qualität des Umfeld-Bildes für die Optimierung eine große Rolle spielt und sich bisher übliche Kommunikationsstandards im Fahrzeugbereich (insbesondere die zu niedrige Kommunikationsfrequenz laut ETSI Standard [ETSI14]) für eine optimale Rekuperations-Strategie nicht ausreichend gut eignen.

Die Ergebnisse aus der submikroskopischen Untersuchung konnten von einzeln untersuchten Manövern auf den Gesamtverkehr einer Großstadt hochgerechnet werden. Hierbei wurden durch eine großflächige Simulation von Verkehr Bremsmanöver identifiziert. Die bei dieser Untersuchung verwendeten Verkehrsmodelle wurden bewusst einfach gehalten, um eine Simulation von knapp 300.000 Fahrzeugen überhaupt zu ermöglichen. Hierbei mussten gewisse Aspekte vernachlässigt werden, die im realen Verkehr zum Tragen kommen würden (bspw. Bremsmanöver durch unvorher-

gesehene Ereignisse, gefährliche Spurwechsel, kurzzeitig zugestellte Spuren etc.). Die für die Hochrechnung verwendeten Häufigkeiten von Bremsmanövern, und somit auch das ermittelte Einsparungspotential von bis zu 3 MWh bei einer kleineren Großstadt, können daher mitunter sogar höher sein.

Für zukünftige Forschungsarbeiten wäre sicherlich auch interessant, noch weitere Szenarien und Manöver zu untersuchen, um noch bessere Aussagen über das Einsparungspotential der Technologien treffen zu können. Hierfür ist ein genaueres Verkehrsmodell von Nöten, welches menschliches Verhalten noch besser modelliert. Weiterhin können in fortführenden Untersuchungen weitere Technologien und Szenarien analysiert werden, die auf Energieeinsparungen durch intelligente Vernetzung im Bereich Elektromobilität abzielen. Als Beispiel kann hier die Optimierung des Energieverbrauchs der Fahrzeuge durch Berücksichtigung von Lichtsignalanlagen genannt werden, oder eine intelligente Routensuche mit Berücksichtigung des Höhenprofils der Straße.

4.5. AP 450: Einordnung heterogener Ladeinfrastrukturen

4.5.1. Ziel des Arbeitspakets

Ziel des Arbeitspakets 450 ist die Einordnung heterogener Ladeinfrastrukturen (in Bezug auf Verortung, Ladeverfahren, etc.) sowie des Nutzerverhaltens in einen ökonomischen Untersuchungsansatz gewesen. Dabei umfasst der Untersuchungsansatz insbesondere die unterschiedlichen Eigenschaften von öffentlicher, halböffentlicher bzw. öffentlich zugänglicher und privater Ladeinfrastruktur und aller gängigen Ladetechnologien (AC 1, AC 3, DC).

4.5.2. Vorgehen

Das Vorgehen für die Arbeitspakete 450 bis 470, die von der TU Berlin, FG Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik bearbeitet worden sind, kann nachfolgender Abbildung entnommen werden.

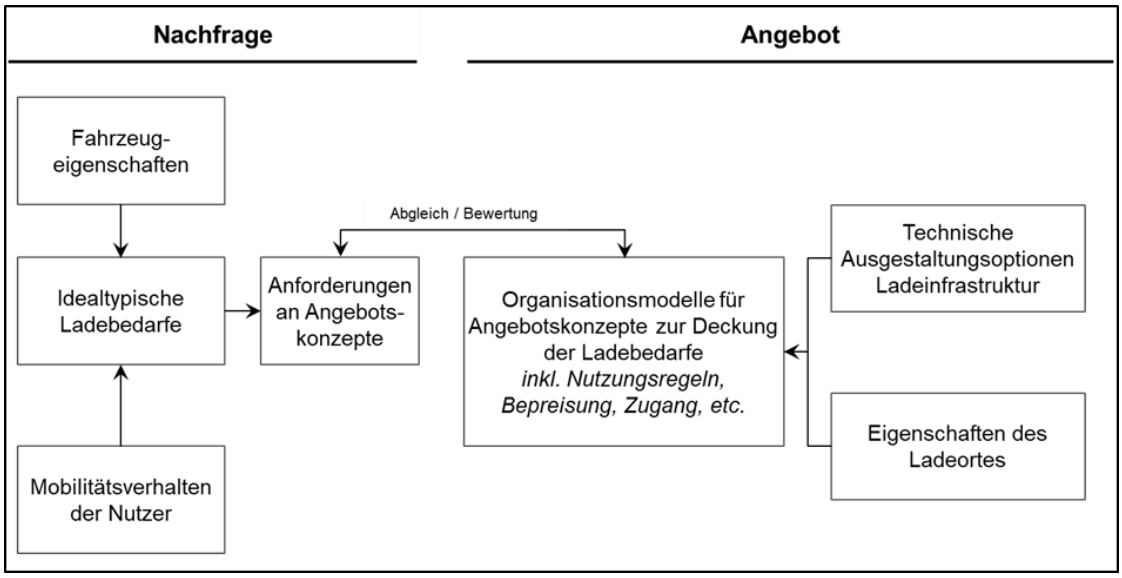


Abbildung 79: Vorgehen Arbeitspakete 450 bis 470[5]

Ausgangspunkt für die Untersuchungen auf Seiten der Nachfrage ist die Recherche zum Mobilitätsverhalten von privaten Nutzern. Dabei wird sowohl auf das allgemeine Mobilitätsverhalten innerhalb des motorisierten Individualverkehrs und entsprechende Statistiken als auch in einem späteren Schritt auf die Erfahrungen der Nutzer innerhalb des eMERGE II-Projekts zurückgegriffen. Der Rückgriff auf Daten zum allgemeinen Mobilitätsverhalten, das zurzeit noch durch den überwiegenden Einsatz von Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen gekennzeichnet ist, wird damit begründet, dass der Nutzer beim Umstieg auf ein Fahrzeug mit Elektromotor keine Nachteile erfahren soll und somit das Mobilitätsverhalten auch nach dem Umstieg potenziell nahezu unverändert bleiben kann. Zusätzlich zu dem Mobilitätsverhalten werden kurz Eigenschaften heutiger rein batterieelektrischer Fahrzeuge vorgestellt, um dann für die Nachfrageseite idealtypische Ladebedarfe abzuleiten.

Auf der Angebotsseite stehen zunächst technische Ausgestaltungsoptionen von Ladeinfrastruktur, wie die Ladegeschwindigkeit oder die Ladetechnologie – Wechselstromladen mit der AC-Ladetechnologie oder Gleichstromladen mit der DC-Ladetechnologie – im Mittelpunkt der Betrachtungen. Zusätzlich können sich bei dem Angebot von Ladeinfrastruktur zudem die Eigenschaften des Ladeortes

[5] Vgl. Hildebrandt (2016, S. 42).

beispielsweise in Bezug auf die Aktivitäten, die während des Ladevorgangs wahrgenommen werden können, unterscheiden.

Im AP 460 erfolgen dann das Aufstellen und die ökonomische Analyse von so genannten Organisationsmodellen für verschiedene Optionen des Ladeinfrastruktur-Angebots, die jeweils möglichst gut zu den aus den Eigenschaften der Nachfrage abgeleiteten Ladebedarfen passen sollten.

Im folgenden Abschnitt, in dem die Ergebnisse des Arbeitspakets 450 dargestellt werden, stehen also Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten und Eigenschaften von Elektrofahrzeugen im Fokus der Betrachtungen, um idealtypische Ladebedarfe abzuleiten und Eigenschaften des Angebots von Ladeinfrastruktur, um den Ladebedarfen idealtypische Angebotskonzepte gegenüberzustellen.

4.5.3. Ergebnisse

Mobilitätsverhalten

Beim Mobilitätsverhalten werden im Folgenden insbesondere folgende Eigenschaften betrachtet:

- Die täglichen Fahrleistungen von PKW,
- die Parkorte von PKW,
- Parkdauer und Parkanlass von PKW.

Tägliche Fahrleistung

Für die Fahrleistungen, die durchschnittlich an einem Tag mit dem PKW zurückgelegt werden, wird die große Stichtagsbefragung Mobilität in Deutschland 2008 herangezogen. In der nachfolgenden Abbildung ist die Verteilung der Fahrleistungen dargestellt.

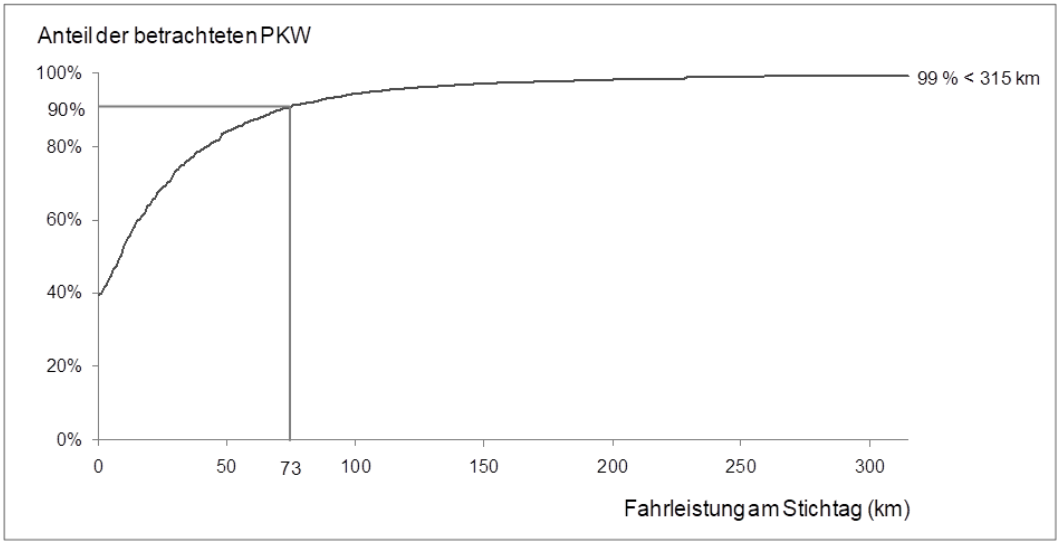


Abbildung 80: Verteilung der täglichen Fahrleistung[6]

[6] Vgl. Mobilität in Deutschland (2008).

Es wird deutlich, dass bei über der Hälfte der Fahrzeuge eine tägliche Fahrleistung von unter 50 km vorliegt. 90 % der täglichen Fahrtweiten haben zudem eine Länge von unter 73 km. Diese Werte unterscheiden sich zwischen verschiedenen Gebietstypen wie Städten oder eher ländlichen Gebieten eher unwesentlich. Unter Berücksichtigung der Verteilung der Fahrleistungen nach einzelnen Wochentagen ergibt sich, dass am Freitag und Sonntag wohl aufgrund des erhöhten Pendlerverkehrs die Fahrleistungen leicht erhöht sind.

Bei den Wegezwecken von privaten Nutzern überwiegt bei den Strecken über 100 km der Zweck „Reisen“. Dabei fällt die Wahl bei zwei Dritteln der Reisen bis 500 km auf den PKW, während Reisen bis zu 1000 km zur Hälfte mit dem PKW zurückgelegt werden. Zur Häufigkeit von Reisen gibt ein Anteil von 50 % der Befragten des Panels von Mobilität in Deutschland an, im letzten Quartal eine Reise mit mindestens einer Übernachtung unternommen zu haben.[7]

Parkorte

Da (regelmäßige) Parkorte potenziell für Ladevorgänge dienen können, ist relevant, an welchen Orten Parkvorgänge erfolgen. Ein überwiegender Anteil der Bevölkerung in Deutschland stellt den PKW auf einem privaten Stellplatz wie in einer Garage oder unter einem Carport ab. Ein Drittel der PKW-Besitzer parken ihr Fahrzeug im öffentlichen Raum und zählen zu den sogenannten „Laternen-Parkern“.[8]

Diese Angaben unterscheiden sich allerdings im Gegensatz zu den täglichen Fahrleistungen erheblich je nach Agglomerationsgrad des Wohngebiets. Dies wird in der nachfolgenden Abbildung deutlich.

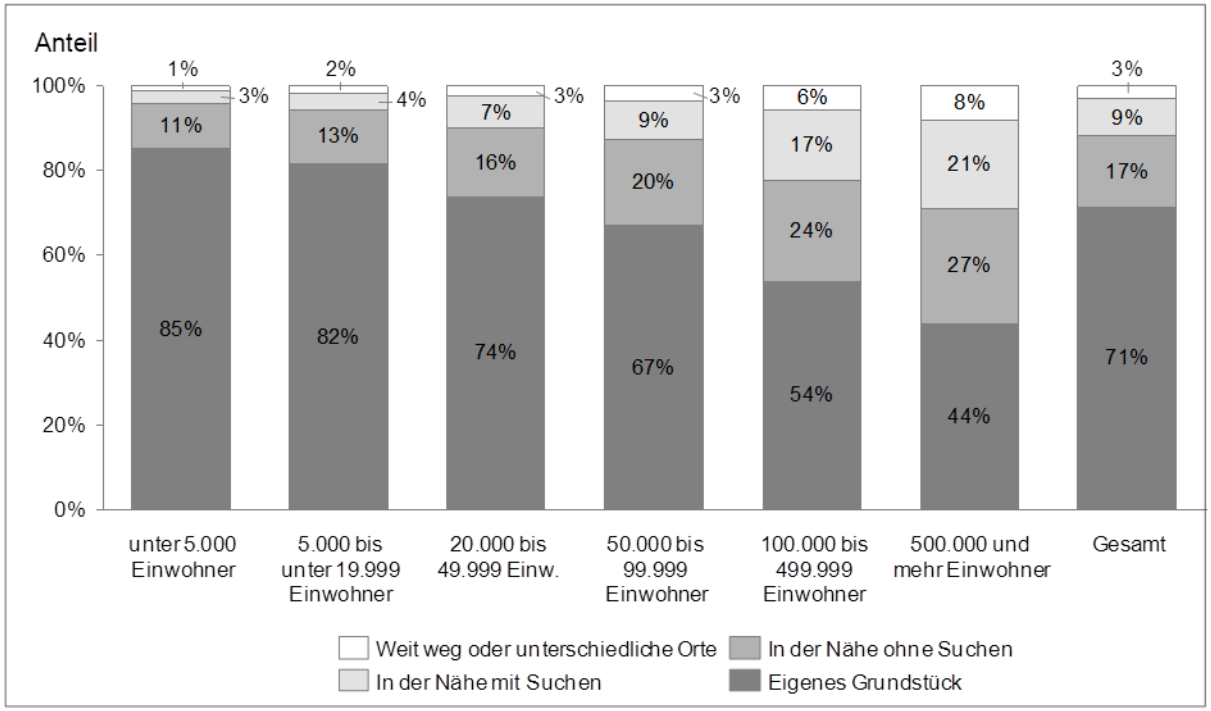


Abbildung 81: Parkorte in Abhängigkeit des Agglomerationsgrads[9]

[7] Vgl. für den gesamten Abschnitt Mobilität in Deutschland (2008).
[8] Vgl. Ahrens (2009).
[9] Vgl. Mobilität in Deutschland (2008).

In Gebieten mit weniger als 5.000 Einwohnern parken praktisch alle PKW-Besitzer auf dem eigenen Grundstück bzw. haben einen regelmäßigen Parkort in der Nähe ihres Grundstücks. Mit zunehmender Einwohnerzahl wird der Anteil der Laternen-Parker relevanter. Dieser steigt von 18 % bei einer Einwohnerzahl bis 20.000 bis hin zu einem Anteil von über 50 % bei Städten mit mehr als einer halben Millionen Einwohnern.

Parkdauer und Parkanlass

Der zeitlich mit Abstand längste Parkvorgang erfolgt in der Regel über Nacht am regelmäßigen Parkort. Dort steht das Fahrzeug potenziell über zehn Stunden für einen Ladevorgang zur Verfügung. In folgender Abbildung sind weitere Parkorte mit einer potenziell für Ladevorgänge relevanten Standzeit zusammengefasst.

Wegezweck	Anteil an den betrachteten Wege	Durchschnittliche Parkdauer (min)
Bringen oder Holen von Personen	13 %	65
Dienstlich oder geschäftlich	2 %	164
Einkauf	26 %	52
Erreichen des Arbeits-/Ausbildungsplatzes	24 %	423
Freizeitaktivität	20 %	159
Private Erledigungen	15 %	84

Anmerkungen:
- Verkehrsmittel Auto.
- Parkdauer wird berechnet als Zeit bis zum nächsten Weg, der mit dem Auto zurückgelegt wird.

Abbildung 82: Parkorte und Parkdauer[10]

Insbesondere die Parkzeit am Arbeitsplatz von etwa acht Stunden bietet Zeit für das Laden tagsüber an einem regelmäßigen Stellplatz. Auch im Rahmen von Freizeitaktivitäten oder dem Einkaufen werden Standzeiten von knapp einer bis zu zweieinhalb Stunden erreicht.

Fahrzeugeigenschaften

Für die Fahrzeuge werden folgende Eigenschaften festgehalten:

- Zunächst werden ausschließlich rein batterieelektrische Fahrzeuge betrachtet.
- Es wird durchschnittlich von einer Batteriekapazität von 20 bis 30 kWh ausgegangen.
- Bei einem Verbrauch von durchschnittlich 15 kWh pro 100 km ergibt sich so eine Reichweite von 130 bis 200 km.

[10] Vgl. Mobilität in Deutschland (2008).

- Es werden ausschließlich konduktive Ladeschnittstellen zum Fahrzeug betrachtet – also kein Laden per Induktion.
- Die Fahrzeuge verfügen sowohl über eine AC- als auch über eine DC-Schnittstelle zur Ladeinfrastruktur.

Drei abgeleitete idealtypische Ladebedarfe

Aus den Daten zum Mobilitätsverhalten und den Eigenschaften der Elektrofahrzeuge werden folgende drei idealtypische Ladebedarfe abgeleitet:

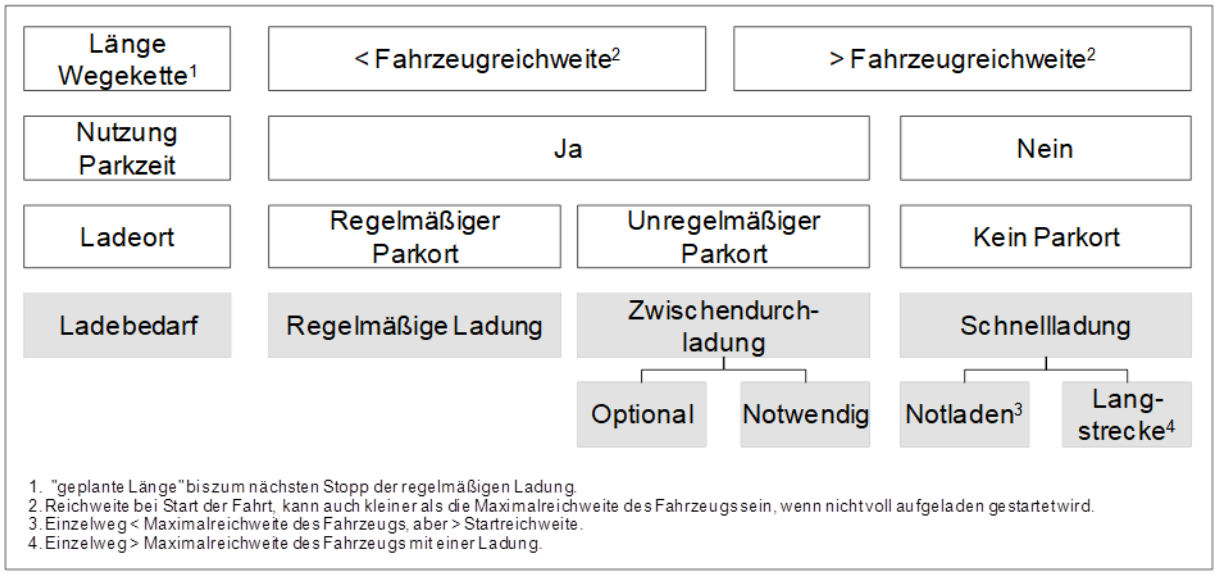


Abbildung 83: Drei idealtypische Ladebedarfe[11]

1) Bedarf nach Schnellladung:

- Bedarf nach Schellladung besteht, wenn die gerade vorliegende oder die absolute Fahrzeugreichweite unzureichend ist, um eine geplante und bereits begonnene Strecke zurückzulegen.
- Der Zwischenstopp zum Laden erfolgt unfreiwillig, sodass Zeitkosten durch das Laden entstehen.
- Der Bedarf tritt sowohl an Bundesfernstraßen auf, auf denen Langstrecken zurückgelegt werden, als auch in Ballungszentren, in denen ein Bedarf nach Notladen bestehen kann. Der Bedarf nach Notladen besteht, wenn aus technischen Gründen eine längere Standzeit nicht zum Laden genutzt werden konnte oder wenn ungeplant längere Strecken innerhalb von Ballungsräumen zurückgelegt werden müssen.

[11] Vgl. Hildebrandt (2016, S. 55).

2) Bedarf nach regelmäßiger Ladung:

- Um die täglichen Strecken, die in der Regel die Fahrzeugreichweite nicht überschreiten, zu bewältigen, besteht ein Bedarf nach regelmäßiger Ladung. Dieser tritt bei entsprechend langen täglichen Fahrtweiten auch beinahe täglich auf.
- Für das Laden können ohnehin vorliegende und geplante Parkzeiten und -orte genutzt werden, sodass durch das Laden keine zusätzlichen Zeitkosten entstehen. Regelmäßige Parkorte bestehen über Nacht im Umfeld des Wohnsitzes und tagsüber beim Arbeitgeber.

3) Bedarf nach Zwischendurchladung:

- Der Bedarf tritt auf, wenn an unregelmäßigen Parkorten Zeitfenster entstehen, die zum Laden genutzt werden können, beispielsweise bei Freizeitaktivitäten
- Der Bedarf ist optional, solange der Rückweg auch ohne Laden erfolgen könnte, und notwendig, wenn der Rückweg die Reichweite überschreitet.

Mobilitätsverhalten und Ladebedarfe von den Teilnehmern des Projekts eMERGE II

Sowohl zum Mobilitätsverhalten als auch zu den Ladebedarfen hat ein intensiver Austausch mit den eMERGE-II-Projektteilnehmern stattgefunden. Dies ist unter anderem auch in Form von mehreren Umfragen erfolgt. Über 80 % der Projektteilnehmer haben in Bezug auf das regelmäßige Laden angegeben, dass dieses Zuhause am Wohnsitz erfolgt. Bei den übrigen Teilnehmern ist der regelmäßige Ladepunkt beim Arbeitgeber verortet bzw. es steht ein zusätzlicher Ladepunkt beim Arbeitgeber zur Verfügung (50 % mit Ladepunkt beim Arbeitgeber). Die Nutzung von Ladepunkten zur Zwischendurchladung ist eher gering ausgefallen. Lediglich knapp über die Hälfte der Teilnehmer hat überhaupt schon einmal einen solchen Ladepunkt, beispielsweise beim Einzelhandel, genutzt. Die rein batterieelektrischen Fahrzeuge sind praktisch kaum im Fernverkehr zum Einsatz gekommen (8 % der Fahrten über 100 km). Dies lässt sich allerdings auch mit der fehlenden fahrzeugseitigen Möglichkeit zum DC-Schnellladen erklären.

Technische Ausgestaltungoptionen bei Ladeinfrastruktur

Die verschiedenen technischen Ausgestaltungsoptionen bei Ladeinfrastruktur haben folgende Eigenschaften:

- Bei AC-Ladeinfrastruktur erfolgt die Umwandlung von netzseitig anliegendem Wechselstrom in Gleichstrom für die Batterie im Fahrzeug. In oder an der Ladeinfrastruktur wird somit kein Gleichrichter benötigt. Je nach Leistungsfähigkeit des fahrzeugseitigen Gleichrichters und des Netzanschlusses der Ladeinfrastruktur sind beim einphasigen Laden bis zu 3,7 kW und beim dreiphasigen Laden bis zu 43 kW möglich.
- Bei DC-Ladeinfrastruktur erfolgt die Umwandlung in Gleichstrom infrastrukturseitig. Da dort anders als im Fahrzeug keine Restriktionen in Bezug auf Volumen oder Gewicht des Gleichrichters bestehen, können leistungsfähigere Gleichrichter eingesetzt werden, sodass Ladeleistungen von 50 bis zu 100 kW realisiert werden können. Allerdings ist DC-Ladeinfrastruktur auch mit steigenden Ladeleistungen deutlich teurer als AC-Ladeinfrastruktur.

- Grundsätzlich gibt es verschiedene Bauformen von Ladeinfrastruktur: von der einfachen Wall-Box für den privaten Bereich, über kleinere AC-Ladesäulen für den öffentlich zugänglichen Bereich, bis hin zu aufwendigen DC-Ladesäulen ebenfalls für den öffentlich zugänglichen Bereich. Aufwendigere Bauformen gehen teils mit deutlich höheren Kosten einher.

Drei idealtypische Angebotskonzepte für Ladeinfrastruktur

Aus den drei idealtypischen Ladebedarfen, die die Nachfrageseite repräsentieren, lassen sich Anforderungen an das Angebot von Ladeinfrastruktur ableiten, sodass den Ladebedarfen drei idealtypische Angebotskonzepte gegenübergestellt werden. Die Angebotskonzepte werden durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

1) Angebotskonzept für die Schnellladung:

- Zur Deckung des Bedarfs ist eine flächendeckende Bereitstellung von Ladeinfrastruktur sowohl entlang der Fernstraßen als auch in verdichteten Agglomerationen notwendig.
- Zur Lösung des „Henne-Ei-Problems“ muss die Schnellladeinfrastruktur vorgelagert zum Fahrzeughochlauf bereitgestellt werden.
- Es sollten Ladeleistungen angestrebt werden, die ein nahezu vollständiges Laden innerhalb weniger Minuten ermöglichen. Dies ist ausschließlich mit der DC-Ladetechnologie zu erreichen.

2) Angebotskonzept für die regelmäßige Ladung:

- Ladeinfrastruktur für die regelmäßige Ladung sollte in der Nähe des Wohnsitzes bereitgestellt werden und wenn möglich im privaten Bereich verortet werden, da dort durch eine eins-zu-eins-Zuordnung zwischen Ladepunkt und Fahrzeug eine verlässliche Verfügbarkeit gewährleistet werden kann. Diese im öffentlichen Bereich für „Laternen-Parker“ herzustellen, ist eine Herausforderung.
- Durch die langen Standzeiten reichen geringe Ladeleistungen aus, die mit niedrigeren Kosten bei der Ladeinfrastruktur einhergehen.
- Die Ladeinfrastruktur für die regelmäßige Ladung muss unmittelbar vor dem Fahrzeugkauf zur Verfügung stehen.

3) Angebotskonzept für die Zwischendurchladung:

- Die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur zur Zwischendurchladung ist für das Gesamt-System weniger wichtig und kann bedarfsgerecht mit steigender Anzahl von Elektrofahrzeugen bereitgestellt werden.
- Die Ladeleistungen sind den unterschiedlich langen Standzeiten anzupassen, die sich je nach Aktivität unterscheiden können.

4.6. AP 460: Übergreifende Modelle für das integrierte Angebot heterogener Ladeinfrastrukturen

4.6.1. Ziel des Arbeitspakets

Ziel des AP 460 ist es gewesen Organisationsmodelle für die einzelnen Angebotskonzepte zu entwerfen, zu analysieren und Handlungsempfehlungen abzuleiten.

4.6.2. Vorgehen

Aufbauend auf dem Sektormodell und dem Entscheidungsmodell werden bei den Untersuchungen zunächst Organisationsmodelle für das Angebot von Ladeinfrastruktur entworfen und im zweiten Schritt unter Zuhilfenahme von ökonomischen Theorien analysiert. Die Bestandteile der einzelnen Modelle, die in ihrer Gesamtheit das Untersuchungsmodell bilden, können nachfolgender Abbildung entnommen werden.

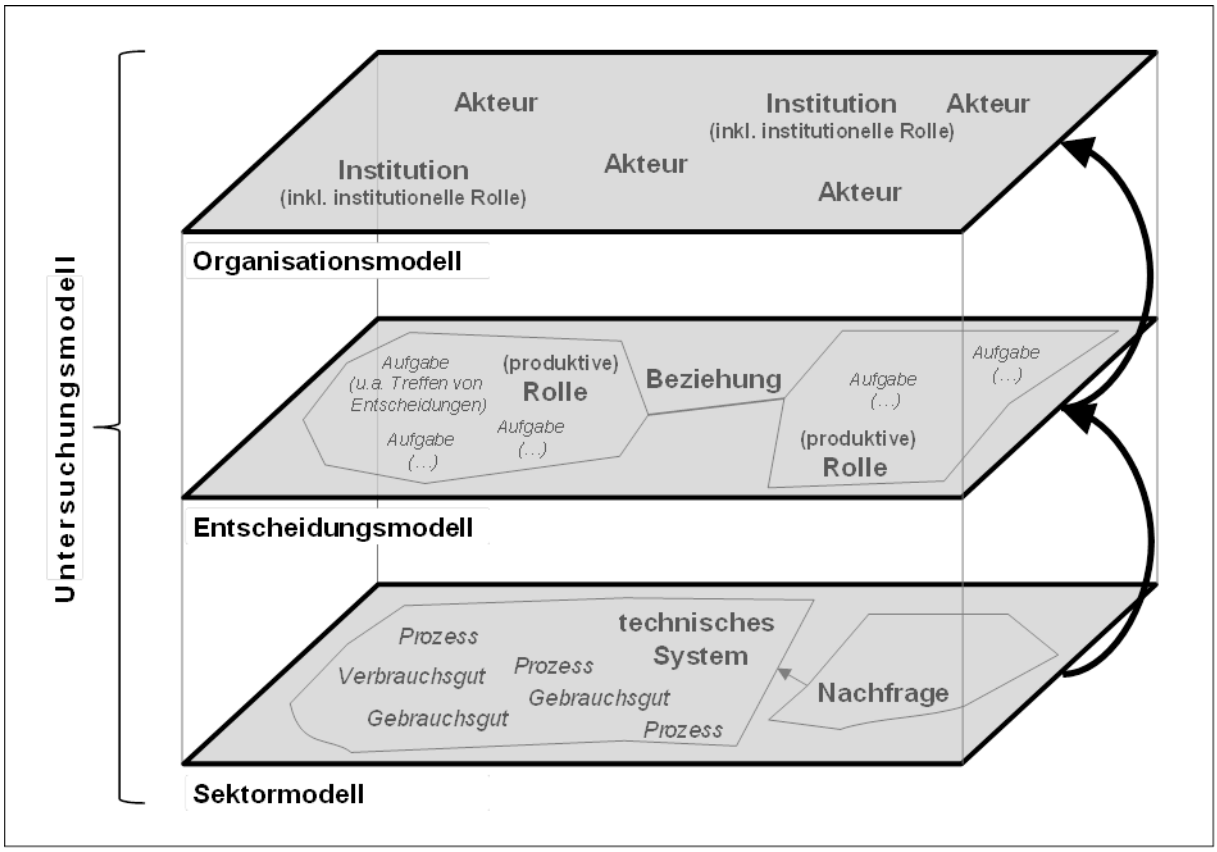


Abbildung 84: Bestandteile Untersuchungsmodell[12]

Auf unterster Ebene wird im **Sektormodell** für die Elektromobilität im Allgemeinen und Ladeinfrastruktur im Speziellen das technische System beschrieben und die Nachfrage charakterisiert. Beides ist im AP 450 erfolgt. Im **Entscheidungsmodell** werden Aufgaben über die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur definiert und Entscheidungssituationen hinsichtlich dieser Aufgaben herausgearbeitet.

[12] Vgl. (Gizzi 2016, S. 10).

Diese Aufgaben werden dann jeweils zu Rollen zusammengefasst. Für die Wahrnehmung von Rollen werden beispielsweise Anforderungen an Ressourcen definiert und Koordinationsbereich zwischen einzelnen Rollen identifiziert. Im **Organisationsmodell** werden dann Akteure modelliert, die die einzelnen Rollen bei der Bereitstellung von Ladeinfrastruktur wahrnehmen können. Akteure unterscheiden sich beispielsweise hinsichtlich ihres Zielsystems oder ihrer Ressourcen-Ausstattung. Darüber hinaus können auch verschiedene Institutionen wie beispielsweise Gesetze oder Verordnungen einen Einfluss auf die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur haben.

Unter Rückgriff auf ökonomische Theorien werden die Wirkungen unterschiedlicher Organisationsmodelle auf Analyseparameter näher untersucht. Zu den Analyseparametern zählen u.a. Kapazität und Verteilung, nutzerseitige Transaktionskosten, dauerhafte Produktionskosten oder einmalige Implementierungskosten. Die verwendeten ökonomischen Theorien sind in nachfolgender Abbildung zusammengefasst.

Abbildung 85: Überblick über die verwendeten ökonomischen Theorien[13]

Ziel der Untersuchung ist unter anderem die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die öffentliche Hand.

4.6.3. Ergebnisse

Getrennt nach den drei idealtypischen Angebotskonzepten können folgende Ergebnisse festgehalten werden.

1) Angebotskonzept für die Schnellladung:

- Die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für die Schnellladung durch private Unternehmen im Wettbewerb geht mit verschiedenen Wirkungen einher, die nicht mit den Anforderungen an das Angebotskonzept übereinstimmen. Bei der Kapazität und Verteilung können sowohl Überkapazitäten an Nachfrageschwerpunkten durch Strategien des „Rosinen-Pickens“, als auch „weiße Flecken“ durch Vernachlässigung von nachfrageärmeren Regionen entstehen.

[13] Vgl. Gizzi (2016, S. 34).

Somit wird die Anforderung einer flächendeckenden Bereitstellung von Schnellladeinfrastruktur nicht erreicht. Bei der Bereitstellung durch private Unternehmen im Wettbewerb bestehen zudem Unsicherheiten über Investitionszeitpunkte. Gegenüber den Endkunden können folglich keine glaubhaften Commitments in Bezug auf den Auf- und Ausbau von Kapazitäten abgegeben werden. Dies trägt nicht zur Lösung des „Henne-Ei-Problems“ bei. Zudem können Strategien der Produktdifferenzierung zur uneinheitlichen Ausgestaltung der Schnittstelle zum Nutzer führen und somit hohe nutzerseitige Transaktionskosten verursachen.

- Bei einer zentralen Fällung der Bereitstellungsaufgaben, beispielsweise durch die öffentliche Hand, kann eine integrierte Planung der Kapazität und Verteilung erfolgen, sodass eine Flächendeckung erreicht wird. Eine dem Fahrzeughochlauf vorgelagerte Bereitstellung der Schnellladinfrastruktur stellt ein glaubhaftes Commitment dar und trägt zur Lösung des „Henne-Ei-Problems“ bei. Zudem sollten Commitments bezüglich der Kapazitätsanpassung im Zuge steigender Fahrzeugzahlen abgegeben werden. Eine zentrale Bereitstellung führt zudem zu einer einheitlichen Ausgestaltung der Schnellladeinfrastruktur, sodass auch nutzerseitige Transaktionskosten vergleichsweise gering ausfallen.

- Die Bereitstellungsentscheidungen für die Schnellladeinfrastruktur sollten also zentral durch die öffentliche Hand getroffen werden. Bei der Umsetzung dieser Entscheidungen in Form der Leistungserstellung sollte allerdings umfangreich auf das Engagement von privaten Unternehmen gesetzt werden. Langfristige Verträge mit privaten Betreibern in Form von so genannten Öffentlich Privaten Partnerschaften stellen ein geeignetes Modell für die Umsetzung dar.

- Bei der Finanzierung der Schnellladeinfrastruktur sollte umfangreich auf kollektiv erhobene Mittel (u. a. Grundgebühren, „Ladeinfrastruktur-Vignette“ oder Haushaltsmittel) und nicht auf Einnahmen zurückgegriffen werden, die aus der Bepreisung des einzelnen Ladevorgangs generiert werden. Dies liegt zum einen darin begründet, dass der Aufbau von Schnellladeinfrastruktur in hohem Maß von Fixkosten geprägt ist, deren Finanzierung über Preisaufschläge zu einer ineffizienten Verdrängung von Nachfragern führt. Zum anderen ist dem Vorhandensein einer flächendeckenden Schnellladeinfrastruktur ein Optionsnutzen zuzusprechen, der also auch besteht, wenn keine direkten Nutzungen erfolgen. Beiden Eigenschaften kann mit der Erhebung von kollektiv erhobenen Mitteln begegnet werden. Erfolgt die Finanzierung der Ladeinfrastruktur aus kollektiv erhobene Mitteln, kann der einzelne Ladevorgang nach Grenzkosten bepreist werden, die sich im Wesentlichen aus den Kosten des verbrauchten Stroms zusammensetzen. Gegebenenfalls können in dem Preis für den einzelnen Ladevorgang auch zusätzlich noch Opportunitätskosten berücksichtigt werden, die sich aus der Blockade des Ladeplatzes ergeben.

2) Angebotskonzept für die regelmäßige Ladung:

- Bei der Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für die regelmäßige Ladung ist insbesondere die Gewährleistung einer verlässlichen Verfügbarkeit beispielsweise durch eine nahezu eins-zu-eins Zuordnung von Nutzer bzw. Fahrzeug und Ladeinfrastruktur von hoher Bedeutung. Da in diesem Zusammenhang insbesondere auch die Verfügbarkeit eines entsprechenden Parkplatzes notwendig ist, sollte die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für die regelmäßige Ladung durch denjenigen Akteur erfolgen, der das Eigentum bzw. umfangreiche Verfügungsrechte an dem regelmäßigen Parkplatz hält.

- Dementsprechend werden die weiteren Ergebnisse entlang der möglichen Verortung des regelmäßigen Parkplatzes diskutiert, die in der nachfolgenden Abbildung dargestellt werden.

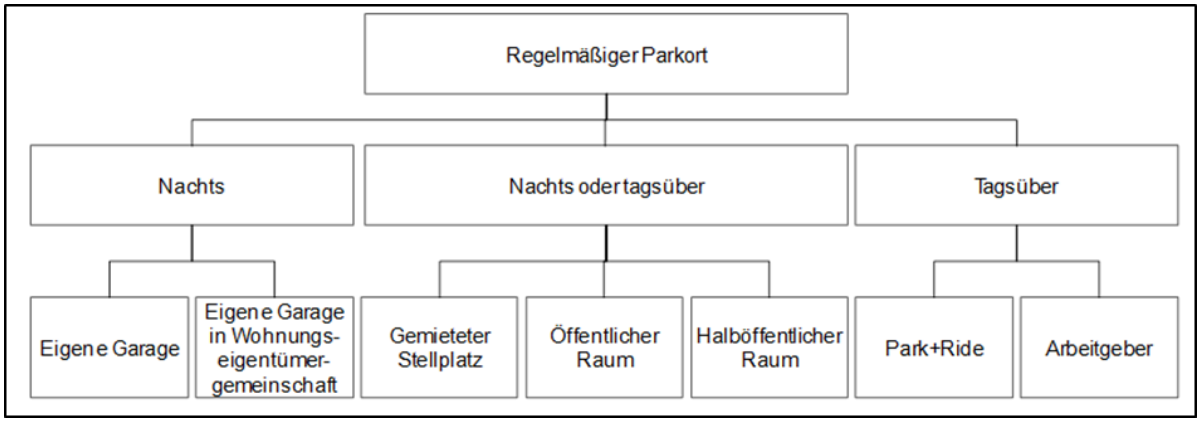


Abbildung 86: Verortung der Ladeinfrastruktur für die regelmäßige Ladung[14]

- Ist der regelmäßige Parkort in der **eigenen Garage** verortet, bestehen keine Koordinationsbereiche, die gesonderte Regelungen bedürfen würden. Allgemein kann im Zuge der Förderung der Elektromobilität über eine (anteilige) finanzielle Förderung nachgedacht werden. Allerdings ist diese nicht unbedingt notwendig.

- Bei Ladeinfrastruktur in der **Tiefgarage**, die vereinfachend stellvertretend für ein Mietverhältnis betrachtet wird, entstehen ggfs. hohe Transaktionskosten durch Verhandlungen zwischen dem Mieter, der hier ein Elektrofahrzeug anschaffen will bzw. besitzt, und dem Vermieter der Wohnung bzw. des Stellplatzes. Zur Förderung der Elektromobilität sollte in diesen Fällen den Mietern ein Recht auf die Installation eines Ladepunktes eingeräumt werden, wobei dabei auch Fragen der Kostentragung geklärt werden sollten.

- Die Ladeinfrastruktur für die regelmäßige Ladung kann zudem tagsüber beim **Arbeitgeber** verortet sein. Auch hier sollte ggfs. ein Anrecht für Arbeitnehmer auf einen Ladepunkt geschaffen werden. Bei der Finanzierung ist durchaus denkbar, dass die Kosten vom Arbeitgeber getragen werden, der so den Arbeitnehmer enger an seinen Arbeitsplatz bindet.

- Bei allen bisher genannten Ladeorten im privaten Bereich ist es zudem sinnvoll, dass beim Neubau von Objekten bereits technische Vorinstallationen getätigt werden, die eine spätere Nachrüstung deutlich einfacher und kostengünstiger machen.

- Im **öffentlichen** Bereich für sogenannte „Laternen-Parker“ sind die dezentrale Gebietskörperschaften Bereitsteller der Parkfläche. Somit sollten diese auch die entsprechende Ladeinfrastruktur bereitstellen. Herausforderungen bestehen bei der Abschätzung des Bedarfs und der Gewährleistung einer verlässlichen Verfügbarkeit des Ladepunktes. Ersteres kann beispielsweise über das Vorweisen eines bereits abgeschlossenen Kaufvertrags gelöst werden, wobei darauf die Genehmigung und Installation der Ladeinfrastruktur recht schnell erfolgen muss. Die Gewährleistung einer verlässlichen Verfügbarkeit kann über Nutzungsregeln wie die Einführung einer „Ladeinfrastruktur-Plakette“ erreicht werden, die ähnlich funktioniert wie die bereits bekannten „Anwohner-Parkausweise“. Die Finanzierung sollte wiederum aus

[14] Vgl. Hildebrandt (2016, S. 135).

kollektiv erhobenen Mitteln erfolgen und die Bepreisung sollte sich an den Grenzkosten orientieren. Es sollte allerdings beachtet werden, dass keine ineffizienten Ausweicheffekte von Nutzern entstehen, die eigentlich die Möglichkeit der Installation von Ladeinfrastruktur beispielsweise in der Tiefgarage hätten, aber auf Grund des Angebots der dezentralen Gebietskörperschaften in den öffentlichen Raum ausweichen.

- Abschließend sei auch noch der **halböffentliche** Bereich als mögliche Verortung für Ladeinfrastruktur für die regelmäßige Ladung erwähnt. Potenziell könnte in diesem Bereich durch die nächtliche Öffnung von Parkflächen des Einzelhandles „Laternen-Parkern" ebenfalls eine Möglichkeit zum Laden gegeben werden. Diese Öffnung des halböffentlichen Raums wird allerdings derzeit nur vereinzelt diskutiert.

3) Angebotskonzept für die Zwischendurchladung:

- Es ist davon auszugehen, dass zukünftig Einzelhandels- oder Freizeitanbieter Anreizen unterliegen, neben kostenlosem Parkraum auch Ladeinfrastruktur unentgeltlich für ihre Kunden bereitzustellen.

- Da diese Ladeinfrastruktur für den Gesamterfolg des Elektromobilitätssystems weniger wichtig ist, kann die Bereitstellung zeitlich parallel zum Fahrzeughochlauf stattfinden.

Ebenso wie bei der Ladeinfrastruktur für die regelmäßige Ladung in privaten Garagen kann auch eine anteilige Förderung durch die öffentliche Hand für die allgemeine Unterstützung der Elektromobilität erfolgen. Dies sollte aber nicht prioritär behandelt werden. Außerdem sollte an eine solche Förderung ein diskriminierungsfreier Zugang für alle Nutzer geknüpft sein, egal ob diese bei dem entsprechenden Anbieter von Einkauf oder Freizeit Kunde sind oder nicht.

4.7. AP 470: Erweiterung der Betrachtung um zusätzliche technische Optionen und Nutzerprofile

4.7.1. Ziel des Arbeitspakets

Ziel ist weiterhin die Identifikation und Untersuchung übergreifender Modelle für das integrierte Angebot heterogener Ladeinfrastrukturen. In diesem Arbeitspakt erfolgt dabei als Ausblick die Erweiterung der bisherigen Untersuchungen um zusätzliche technische Optionen wie PHEV und um zusätzliche Nutzungen, wie stationsbasiertes und flexibles Carsharing und Taxis.

4.7.2. Vorgehen

Bei der Erweiterung werden die bereits dargestellten Arbeitsschritte aus den vorherigen Arbeitspaketen wiederholt. Zunächst werden die Anforderungen aus den geänderten technischen Eigenschaften (PHEV) bzw. aus dem geänderten Mobilitätsverhalten der beiden Nutzungen Carsharing und Taxis betrachtet, wie in folgender Abbildung dargestellt ist.

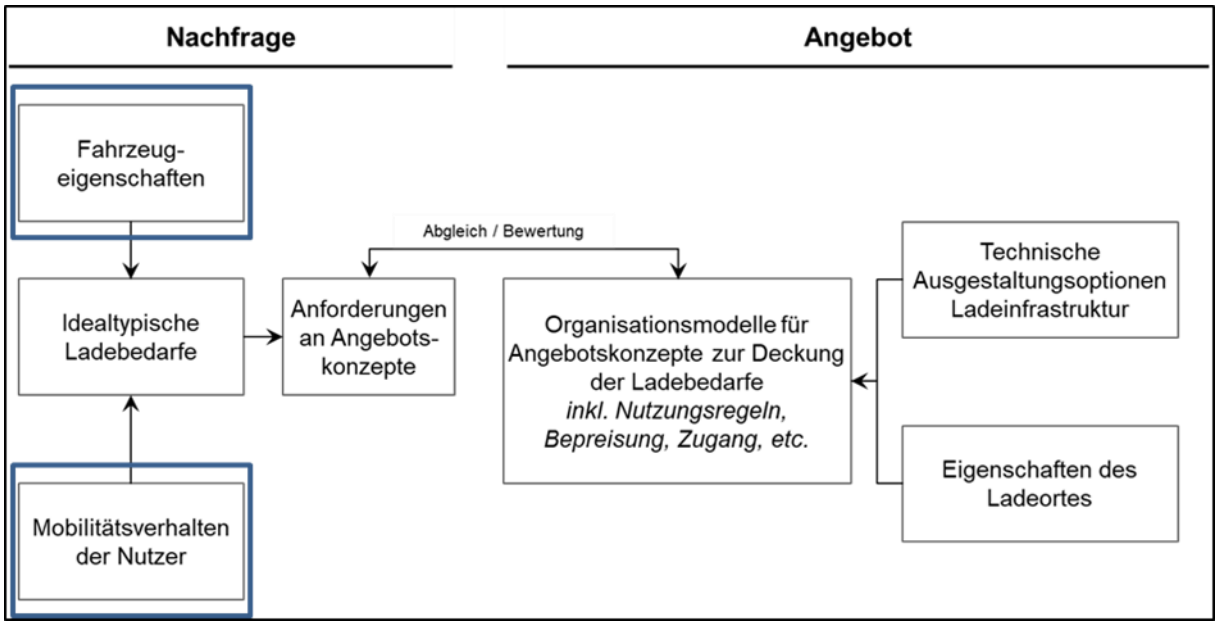


Abbildung 87: Vorgehen Arbeitspaket 470[15]

Darauf folgt ein Abgleich mit den bisherigen Ergebnissen in Bezug auf die Angebotskonzepte und ggfs. die Ableitung von zusätzlichen Handlungsempfehlungen.

4.7.3. Ergebnisse

Für Fahrzeuge mit kombiniertem Verbrennungs- und Elektromotor (Plug in Hybrid Electric Vehicles – PHEV) lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

[15] Vgl. Hildebrandt (2016, S. 42).

- Auf technischer Seite verfügen die Fahrzeuge über eine reale rein elektrische Reichweite von 20-40 km. Beim zusätzlichen Einsatz des Verbrennungsmotors wird eine Reichweite von mehreren hundert Kilometer möglich.
- Beim Mobilitätsverhalten wird weiterhin davon ausgegangen, dass sich dieses im Vergleich zu Fahrzeugen nicht ändern soll, die ausschließlich über einen Verbrennungsmotor angetrieben werden.
- Es besteht ein Bedarf nach regelmäßiger Ladung und Zwischendurchladung, um den Anteil des rein elektrischen Betriebs möglichst hoch zu halten. Der Bedarf nach Schnellladung im Fernverkehr aber auch zur Notladung wird durch das Vorhandensein des Verbrennungsmotors substituiert.
- In Bezug auf die Angebotskonzepte bleiben somit die Aussagen von AP 460 bestehen, wobei das Angebot zur Zwischendurchladung etwas an Bedeutung gewinnt und das Angebot zur Schnellladung für PHEV weniger wichtig ist. Bei der Schnellladung ist beim Vorhandensein von PHEV aber insbesondere zu berücksichtigen, dass diese die Ladepunkte nicht unnötigerweise für rein batterieelektrische Fahrzeuge blockieren, die auf diese Ladepunkte unbedingt angewiesen sind. Somit müssten gegebenenfalls gesonderte Nutzungsregeln vorgesehen werden.

Für stationsbasiertes voll elektrisches Carsharing können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

- Beim stationsbasierten Carsharing können die Fahrzeuge von den Endkunden an einem bestimmten Parkort auch für einen längeren Zeitraum angemietet werden. Die Rückgabe erfolgt an dem gleichen Standort.
- Somit haben die Fahrzeuge ähnlich wie die Fahrzeuge privater Nutzer einen regelmäßigen Standort. Allerdings können die täglichen Fahrtweiten durch mehrfache tägliche Anmietung deutlich höher ausfallen.
- Übergreifend bestehen keine größeren Unterschiede in Bezug auf die Ladebedarfe, außerdass eventuell ein regelmäßiges Laden zwischen zwei Anmietungen mit etwas höheren Ladegeschwindigkeiten erfolgen sollte.

Für flexibles voll elektrisches Carsharing können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

- Beim flexiblen Carsharing können die Fahrzeuge durch die Endkunden innerhalb eines definierten Geschäftsgebiets an beliebigen Orten im öffentlichen Bereich angemietet und wieder abgestellt werden.
- Somit ergibt sich, dass der Bedarf an regelmäßiger Ladung nicht an einem bestimmten regelmäßigen Parkort besteht bzw. dem Bedarf nach Zwischendurchladung ähnelt. In Bezug auf den weniger relevanten Bedarf nach Schnellladung gelten weiterhin die Ausführungen des AP 460.
- In der Regel werden die Endkunden durch Gutschriften dazu angereizt, die Fahrzeuge unterhalb eines gewissen Batterieladestands an einem Ladepunkt im öffentlichen Bereich abzustellen und an einen Ladepunkt anzuschließen. Dabei besteht eine gewisse Flexibilität bei der verlässlichen Verfügbarkeit, da die Belegung von einzelnen Ladepunkten durch ein Ausweichen auf andere Ladepunkte ausgeglichen werden kann.
- Für das Angebotskonzept der Zwischendurchladung im öffentlichen Bereich ergeben sich nun Schwierigkeiten insbesondere für den Fall, dass es zu einer größeren Nutzungskonkurrenz

zwischen privaten und Carsharing-Fahrzeugen kommt. In diesem Fall muss möglicherweise eine Trennung dieser Angebote vorgenommen werden, sodass Ladpunkte exklusiv für das Carsharing vorgesehen werden.

Für Taxis können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

- Die Nutzung von Taxi-Fahrzeugen ist sehr heterogen je nach Einsatz bei großen Taxi-Unternehmen oder durch einzelne Fahrer. Sie reicht von kürzeren Schichten mit einer täglichen Fahrtweite um die 100 km und regelmäßigen Standzeiten bis zu einem Vielschicht-System und täglichen Fahrtweiten bis zu 500 km inklusive der Minimierung von Standzeiten.
- Somit kann der Ladebedarf sowohl mit dem Fahrzeug eines privaten Nutzers übereinstimmen als auch ein Bedarf nach Schnellladung bei kurzen Standzeiten bestehen.

Soll das Laden per Schnellladung erfolgen, müssen für das Angebotskonzept Ladepunkte an zentralen Orten für Taxis bzw. direkt an Taxiständen geschaffen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass gegebenenfalls neue Nutzungsregeln an Taxiständen in Bezug auf die Reihung von Fahrzeugen eingeführt werden müssen, falls einzelne Fahrzeuge während des Ladevorgangs außer der Reihe warten müssen und nicht kontinuierlich in der Reihe vorrücken können.

4.8. Veröffentlichungen und Vorträge

Veröffentlichungen

Hildebrandt, J. (2016): Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung idealtypischer Ladebedarfe. Eine institutionenökonomische Analyse. Dissertationsschrift. Online Veröffentlichung: http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-5137.

Vorträge

Hübner, K. (2017/11/10): Analyse der Verbesserungspotentiale des Gesamtsystems Elektromobilität durch Vernetzung. Vortrag auf der „Abschlussveranstaltung eMERGE II: Ergebnisse zur Weiterentwicklung des Gesamtsystems Elektromobilität aus Fahrzeug-, Lade- und Nutzerperspektive“, Berlin.

Kreft, T. (2017/09/22): Bereitstellung von öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Vortrag auf der Konferenz „Kommunales Infrastruktur-Management“, Berlin.

Kreft, T. (2017/11/10): Modelle für die Bereitstellung und Finanzierung von Ladeinfrastruktur. Vortrag auf der „Abschlussveranstaltung eMERGE II: Ergebnisse zur Weiterentwicklung des Gesamtsystems Elektromobilität aus Fahrzeug-, Lade- und Nutzerperspektive“, Berlin.

4.9. Literatur

Ahrens, G.-A. (2009): Endbericht zur Verkehrserhebung, Mobilität in Städten – SrV 2008‘ und Auswertungen zum SrV-Städtepegel.

Codeca L. / Frank, R. / Engel, T. (2015): Luxembourg SUMO Traffic (LuST) Scenario: 24 Hours of Mobility for Vehicular Networking Research. In: Proceedings of the 7th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC15). **[LUST15]**

European Telecommunications Standards Institute (2014): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, ETSI EN 302 637- 2 V1.3.1. **[ETSI14]**

Gizzi, F. (2016): Implementierung komplexer Systemgüter. Ein methodischer Ansatz für ökonomische Untersuchungen und seine Anwendung auf Verkehrstelematiksysteme für die Straße. Dissertationsschrift. Abgerufen am 15.09.2017 unter: http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-5022.

Hildebrandt, J. (2016): Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung idealtypischer Ladebedarfe. Eine institutionenökonomische Analyse. Dissertationsschrift. Abgerufen am 15.09.2017 unter: http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-5137.

Mobilität in Deutschland (MiD) 2008.

Schünemann, B. (2011): V2X Simulation Runtime Infrastructure VSimRTI: An Assessment Tool to Design Smart Traffic Management Systems. In: Computer Networks, Volume 55, Issue 14. **[VSIMRTI]**

Spichartz, P. / Dost, P. / Sourkounis, C. (2014): Recuperation Strategies for electric vehicles. Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies. **[SPICH14]**

5. AP 500: Geschäftsmodellierung

5.1. AP 510: Total Cost of Ownership (Ausgangssituation)

Im Jahr 2016 sind in Deutschland 59.406 Elektrofahrzeuge (EVs), davon 11.410 rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs), 13.744 Plug-In Hybridelektrofahrzeuge (PHEVs) und 34.252 Hybridelektrofahrzeuge (HEVs), zugelassen worden (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt, 2017). Folglich ist das angestrebte Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen bis 2020 zurück gezogen worden (vgl. Armbruster, 2017). Die niedrige Anzahl an Neuzulassungen hat vielfältige Ursachen. Ein Grund sind die hohen Anschaffungskosten, geprägt unter anderem durch die Fahrzeugbatterie, im Vergleich zu Verbrennern (Benzin/Diesel). Zudem sind die Betriebskostenvorteile der Elektrofahrzeuge auf den ersten Blick nicht transparent. Durch den direkten Vergleich aller anfallenden Kosten über die Nutzungsdauer eines Fahrzeugs anhand der TCO, werden Gesamtkostenunterschiede zwischen EVs und konventionellen Fahrzeugen (ICEVs) transparent gemacht. Deshalb ist die Beantwortung der folgenden Frage relevant: Wie hoch ist die TCO für ein Elektrofahrzeug im Vergleich zu Referenzmodellen ähnlicher Fahrzeugklassen und wie verteilen sich die damit einhergehenden Zahlungsströme auf die Nutzungsdauer der Fahrzeuge? Diese Fragestellung wird im Folgenden anhand eines eigenentwickelten TCO-Models beantwortet.

5.1.1. Auswahl der Fahrzeuge

Das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) veröffentlicht jährlich Statistiken über KFZ Neuzulassungen nach Umwelt-Merkmalen und gliedert die Fahrzeugmodelle nach Segmente. Für eine umfassende Marktabdeckung sind die zehn häufigsten neuzugelassenen BEVs und HEVs der jeweiligen KBA-Segmente aus dem Jahr 2014 sowie entsprechende Referenzmodelle in Form von ICEVs berücksichtigt worden. Die ausgewählten Fahrzeuge sind Tabelle 27 zu entnehmen.

Tabelle 27: Ausgewählte Fahrzeugmodelle nach Größenklasse
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt, 2015)

Größenklasse	Fahrzeugsegment	Elektroantrieb (BEV)	Hybridantrieb (HEV)	Verbrenner (ICEV)
Pkw Klein	Minis	Smart ForTwo ED, VW e-Up, Mitsubishi i-Miev	-	Smart ForTwo, VW up, Mitsubishi Space Star
	Kleinwagen	BMWi3, Renault Zoe Z.E.	Honda Jazz, Toyota Yaris	BMW 120i[1,2], BMW 120d[1,2], Renault Clio TCe, Renault Clio dCi, Honda Jazz 1.4, Toyota Yaris 1.3, Toyota Yaris 1.4
Pkw Mittel	Kompaktklasse	VW e-Golf, Nissan Leaf	Toyota Auris, Lexus CT 200h	VW Golf TSI, VW Golf TDI, Nissan Pulsar DIG-T, Nissan Pulsar dCi, Toyota Auris 1.6, Toyota Auris 2.0
	Mittelklasse	-	LexusIS 300h, Peugeot 508 RXH	LexusIS 200t, Peugeot RXH
	Obere Mittelklasse	-	Mercedes E300h	Mercedes E250, Mercedes E300
Pkw Groß	Oberklasse	TeslaS	Mercedes S400h	Mercedes S400, Mercedes S350d
	Van	Mercedes B250e	Toyota Prius +[1]	Mercedes B250, Mercedes B220d, Toyota Verso 1.6, Toyota Verso 1.6-D
	SUV	TeslaX	Lexus RX450h	Lexus RX200t, BMW x5 XDrive35i, BMW X5 xDrive30d

[1]Nächsthöheres Fahrzeugsegment, [2]Automatik

5.1.2. Entwicklung des TCO-Modells

Die Basis für die Entwicklung des TCO-Modells bildete eine umfassende Literaturrecherche zur Berechnung einer endkundenorientierten TCO zur Elektromobilität. Dies ergab 26 relevante Publikationen aus den Jahren 2007 bis 2016 (vgl. Bubeck u. a., 2016; Hellgren, 2007). Bei den berücksichtigen Publikationen ist die Batterie-Restkapazität von Elektrofahrzeugen am Nutzungsende bislang unvollständig untersucht worden, sodass nur schwer Aussagen über eine mögliche Weiterverwendung zur Zweitnutzung und zum Recycling zu treffen sind. Da die Batterie abhängig vom Fahrprofil der Nutzer ist, kann dies einen großen Einfluss auf die TCO haben. Nur zwei Artikel haben die Restkapazität am Nutzungsende für das Recycling berücksichtigt (vgl. Faria u. a., 2013; Hou u. a., 2014). Das auf Basis der Literatur entwickelte TCO-Modell ist um den zuvor beschriebenen fehlenden Aspekt erweitert worden und lässt sich wie folgt darstellen:

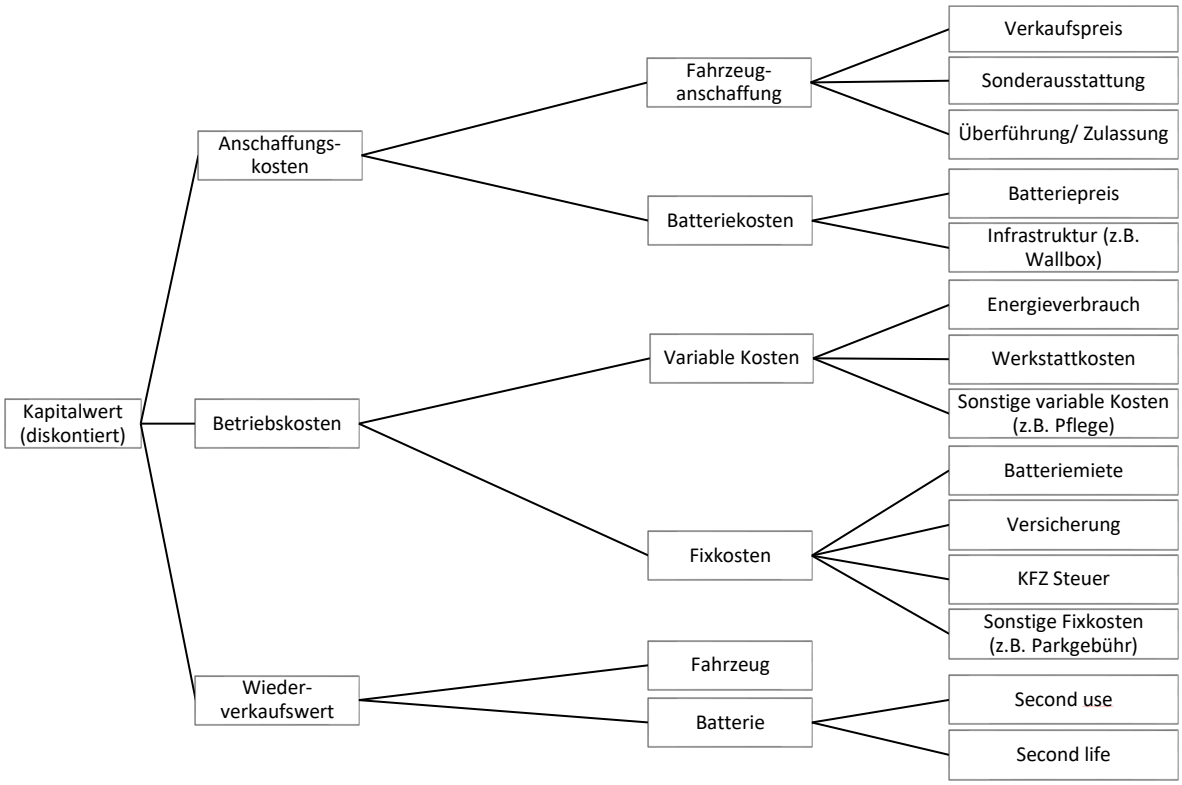


Abbildung 88: TCO-Modell
Quelle: Eigene Darstellung

5.1.3. Durchführung der TCO Berechnungen

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung ist mittels der dynamischen Kapitalwertmethode für die Jahre 2016 sowie 2021 durchgeführt worden. Es wurde eine Haltedauer von 5 Jahren und ein Diskontfaktor in Höhe von 4,99% p.a. berücksichtigt (vgl. Deutsche Bundesbank, 2016; Mohr, 2015). Ferner wurden fünf unterschiedliche Jahresfahrleistungen 5.000 km, 10.000 km, 15.000 km, 20.000 km sowie 30.000 km untersucht (vgl. Verbrauchs- und Medienanalyse -VuMA, 2016).

5.1.3.1. Daten

Anschaffungskosten

Fahrzeuganschaffung. Bezüglich der Fahrzeuganschaffung sind drei Kosten definiert: Verkaufspreis, Sonderausstattung und Überführung/Zulassung. Die Verkaufspreise sind den Preislisten der Hersteller entnommen. Für BEVs ist eine Subvention von 4.000 EUR (Verkaufspreis bis 60.000 EUR netto) berücksichtigt (vgl. BMVI, 2016; Gammelin und Balser, 2016). Durch die Entwicklungsfortschritte und Skaleneffekte ist eine Fahrzeugpreisreduktion in Höhe von 5.000 EUR für BEVs im Jahr 2021 prognostiziert (vgl. Lebeau u. a., 2013). Bei allen Fahrzeugmodellen ist eine Sonderausstattung von 20% auf den Verkaufspreis addiert worden (vgl. Lüder, 2014). Für die Überführung bzw. Zulassung wurde eine Pauschale von 500 EUR berücksichtigt (vgl. ADAC, 2012).

Batteriekosten. Die Batteriekosten bestehen aus zwei unterschiedlichen Kostenparametern: Batteriepreis und Infrastruktur, wie z.B. Wallbox oder Schnellladekabel. Der Batteriepreis [EUR] wird in Anlehnung an Hacker (2015) berechnet. Die OEM Herstellungskosten für Lithium-Ionen Batterien lagen bei 331,20 EUR/kWh in 2015, die anhand des Durchschnittspreises von 360 EUR/kWh in 2014 und der Kostenreduzierung in Höhe von -8% berechnet worden sind (vgl. Habi, 2015; MacDonald, 2016; Neubauer u. a., 2015; Nykvist und Nilsson, 2015). Bei gleichbleibender Preisentwicklung belaufen sich folglich die Batterieherstellkosten in 2020 auf 169 EUR/kWh (vgl. Habi, 2015; MacDonald, 2016; Neubauer u. a., 2015; Nykvist und Nilsson, 2015). Bezüglich der Infrastrukturkosten ist ein Netzladekabel für die Haushaltssteckdose berücksichtigt worden, das in der Regel im Verkaufspreis bei Elektrofahrzeugen enthalten ist. Die Gründe hierfür sind, dass die Kunden es bevorzugen (1) zum einen zu Hause und (2) zum anderen am Abend bzw. über Nacht zuladen. Darüber hinaus ist (3) die Ladeinfrastruktur in Deutschland noch nicht flächendeckend ausgebaut (vgl. Bozem u. a., 2013; Jakobsson u. a., 2016; Lebeau u. a., 2016; Madina u. a., 2016; Peters und Dütschke, 2010; Spiegel, 2016a).

Betriebskosten

Variable Kosten. Die variablen Kosten beinhalten Energie- und Werkstattkosten sowie sonstige variable Kosten, wie z.B. die Wagenwäsche/Pflege. Der Energieverbrauch ist mittels des durchschnittlichen Kraftstoffpreises je Stromtarif pro kWh bzw. Liter errechnet worden und ist von der jährlichen Fahrleistung abhängig. Der kombinierte Kraftstoffverbrauch in kWh/100 km bzw. l/100 km ist den Preislisten der OEMs entnommen. Zusätzlich wurde beim NEFZ-Fahrzyklus ein Real-world Uplift Effizienzfaktor berücksichtigt, um den effektiven Energieverbrauch aus Kundensicht zu reflektieren (vgl. ADAC, 2014; Fetene u. a., 2016; Hill u. a., 2015, 2012; Sokolov, 2016; Waldor, 2014; Wu u. a., 2015). Die Fahrzeugspezifischen Parameter inkl. der jährlichen Wachstumsrate sind Tabelle 28 zu entnehmen.

Die Werkstattkosten enthalten drei Kosten-Aspekte: Ölwechsel/Inspektion, typische Verschleißreparaturen sowie eine festgelegte Reparaturkostenpauschale, die ab einer Gesamtlaufleistung von 80.000 km oder einer Haltedauer von über drei Jahren einberechnet wird (vgl. ADAC, 2012). Als Quelle hierfür dient die umfangreiche ADAC (2015) Autokosten-Datenbank. Bei einer jährlichen Fahrleistung von 30.000 km erfolgt zudem für BEVs im vierten Jahr ein Batteriewechsel mit einmaligen Kosten von 70,93 EUR – bei einem Wechselkurs von 1 EUR = 1,1279 USD (vgl. Economento, 2014). Ferner wurde für die sonstigen variablen Kosten, wie z.B. Wagenwäsche/Pflege eine Pauschale von 250 EUR pro Jahr angenommen (vgl. ADAC, 2012).

Tabelle 28: Übersicht Energiekosten
Quelle: Eigene Darstellung

Parameter	Werte					Quellen
	BEV	HEV-Benzin	HEV-Diesel	ICEV-Benzin	ICEV-Diesel	
Energieverbrauch 2015	0,2881 EUR/kWh	1,394 EUR/l	1,117 EUR/l	1,394 EUR/l	1,117 EUR/l	BDEW (2015); MWV (2015)
Energieverbrauch 2020	0,2920 EUR/kWh	1,530 EUR/l	1,440 EUR/l	1,530 EUR/l	1,440 EUR/l	Schlesinger et al. (2014); Statista (2015)
CAGR 2015	4,96%	2,12%	2,54%	2,12%	2,54%	BDEW (2015); MWV (2015)
CAGR 2020	3,77%	2,06%	2,96%	2,06%	2,96%	BDEW (2015); MWV (2015); Schlesinger et al. (2014); Statista (2015)
Real-world Uplift Faktor	46,4%	25%	25%	10%	14%	ADAC (2014); Fetene et al. (2016); Hill et al. (2015); Sokolov (2016); Waldor (2014)

Fixkosten. Die fixen Kosten setzen sich aus der Batteriemiete, Kraftfahrtversicherung, der KFZ-Steuer sowie sonstigen Fixkosten zusammen. Die jeweilige Batteriemiete wurde berücksichtigt, wenn kein Vollerwerb vom Fahrzeughersteller vorgesehen ist. Die Batteriemiete kann den Preislisten der Fahrzeughersteller entnommen werden. Die Versicherungskosten sind kilometerbezogen über die Nutzungsdauer zugrunde gelegt und der ADAC (2015) Autokosten-Datenbank entnommen worden. Die KFZ-Steuer für HEVs und ICEVs ist unter der Berücksichtigung der Preislisten der Fahrzeughersteller anhand des online KFZ-Steuerrechners ermittelt worden (vgl. Pkw-Steuer, 2015). EVs sind von der KFZ-Steuer für 10 Jahre bei einem Fahrzeugkauf bis 31.12.2026 befreit (vgl. Bundesregierung, 2016; Pkw-Steuer, 2015). Des Weiteren, wurde eine Pauschale für bspw. Parkgebühren in Höhe von 200 EUR pro Jahr als sonstige Fixkosten angenommen (vgl. ADAC, 2012).

Wiederverkaufswert

Fahrzeug. Der Basispreis für die Ermittlung des Restwertes der Fahrzeuge ist in Anlehnung an Dexheimer (2003) mittels der Jahresfahrleistung sowie den Anschaffungskosten des Fahrzeugs und der Batterie errechnet worden.

Batterie. Der Batterierestwert ist mittels des Batteriepreises, der Jahresfahrleistung im jeweiligen Jahr, der Gesamtlaufleistung der Batterie sowie des Restwerts am Nutzungsende errechnet worden. Es wird eine Gesamtlaufleistung von 100.000 km angenommen, da im Durchschnitt die Fahrzeughersteller eine Gesamtlaufleistung zwischen 100.000 km und 150.000 km garantieren (vgl. OEM Preislisten). Der Restwert am Nutzungsende ergibt sich aus der Differenz des gebrauchten Wiederverkaufswert der Batterie und den Batteriekosten im Jahr 2020. Der Wiederverkaufswert ergibt sich aus der Zweitnutzungskapazität (50% der nutzbaren Kapazität in kWh und der Annahme von 32 EUR/kWh Wiederverwendbarkeitskosten der Batterie – Wechselkurs 1 EUR = 1,1279 USD (vgl. Neubauer u. a., 2015).

5.1.3.2. Gesamtkosten

Aus einer Befragung von 105 Teilnehmern bei der IAA'15 kann abgeleitet werden, dass die Priorisierung der TCO von EVs gegenüber ICEVs „richtig" eingeschätzt werden kann. Beispielsweise konnte fast die Hälfte der Teilnehmer mittels Angaben wie Anschaffungspreis, Kraftstoffverbrauch pro 100 km, KFZ-Steuer pro Jahr, Reichweite und CO2-Emissionen für die drei Fahrzeuge „BMW i3", „VW e-Golf" und „Mercedes B250e" gegenüber deren vergleichbaren Referenzmodellen die monatlichen TCO nahezu „richtig" beurteilen. Hingegen konnte nur jeder Dritte die absolute monatliche TCO mittels Angaben wie Verkaufspreis, Kraftstoffverbrauch pro 100 km, Reichweite und CO2-Emissionen einschätzen.

Aus der Berechnung ergibt sich, dass bereits heute vier BEVs (BMWi3, TeslaS, Mercedes B250e, TeslaX) und fünf HEVs (Honda Jazz, Toyota Auris, LexusIS, Mercedes-E, Merceds-S) aus Endkundensicht wirtschaftlicher gegenüber vergleichbaren ICEVs in unterschiedlichen Jahresfahrleistungen sind. Beispielsweise beträgt die TCO vom Mercedes B250e 787,46 EUR pro Monat (1,89 EUR pro km) und ist somit wirtschaftlicher gegenüber dem Dieselfahrzeug bis zu 5.000 km p.a., wie in Abbildung 89 dargestellt ist.

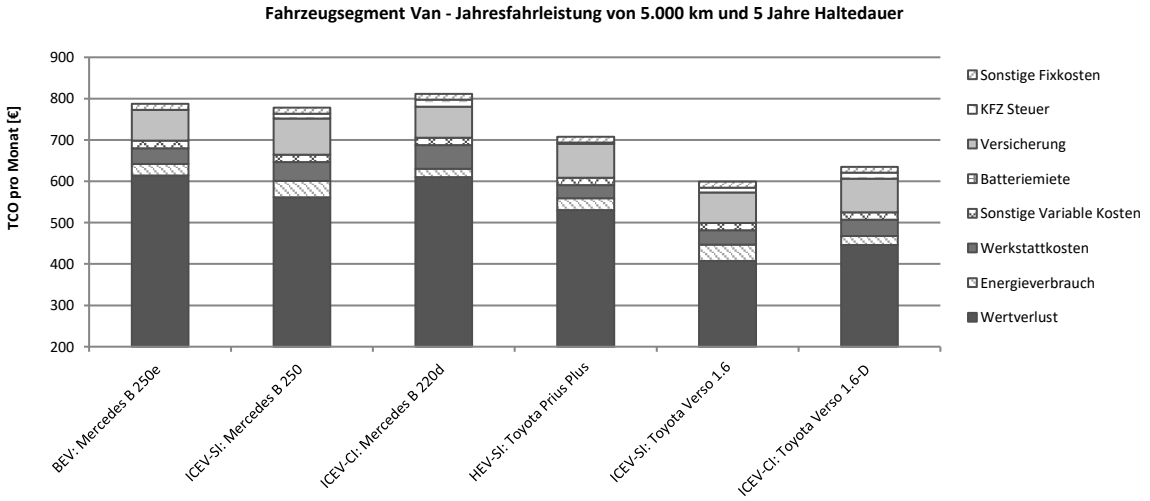


Abbildung 89: AP510 ohne Subvention 2016
Quelle: Eigene Darstellung

Mit der Subvention von 4.000 EUR verändern sich die Kosten leicht, sodass insgesamt fünf BEVs (zusätzlich Renault Zoe Z.E.) wirtschaftlich werden. Beispielsweise verbessert sich die Wirtschaftlichkeit des Mercedes B250e gegenüber dem Benziner für alle untersuchten Jahresfahrleistungen und gegenüber dem Dieselfahrzeug bis zu 20.000 km. Die TCO liegt nun unter den gleichen Annahmen bei 715,89 EUR pro Monat (1,72 EUR pro km), wie Abbildung 90 entnommen werden kann.

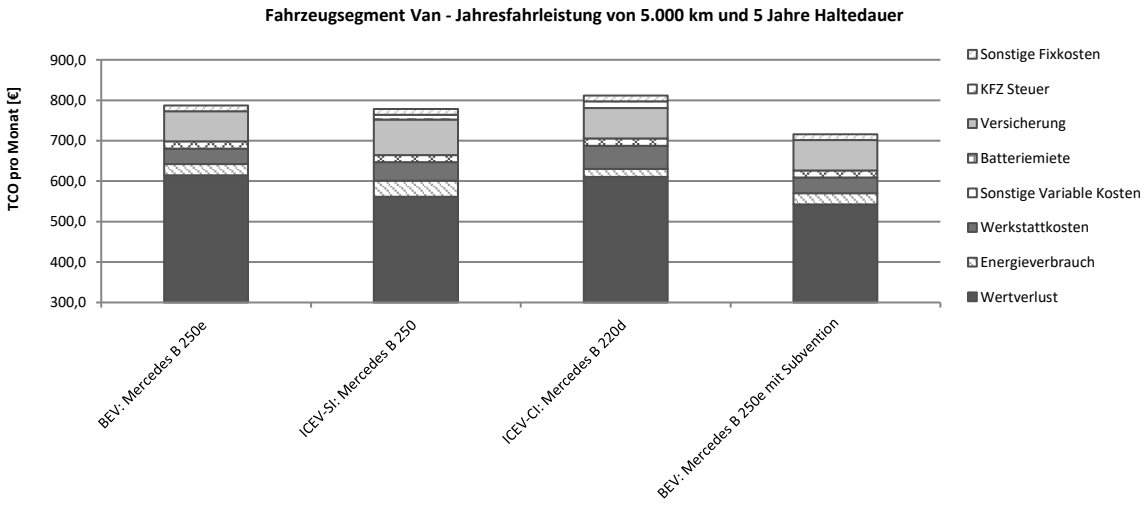


Abbildung 90: AP510 mit Subvention 2016
Quelle: Eigene Darstellung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Subvention eine positive Auswirkung auf die TCO hat, jedoch nicht zugunsten aller untersuchten BEVs. Die beiden Fahrzeugsegmente „Minis“ und „Kompaktklasse“ sind auch mit einer finanziellen Förderung nicht wirtschaftlich.

5.1.3.3. Kostenrisiken

Um mittelfristig die Wirtschaftlichkeit von EVs geeignet abzubilden, sind mögliche Unsicherheiten in der Entwicklung von Energie- sowie Batteriepreisen mittels einer Monte Carlo Simulation ermittelt worden. Der Energieverbrauch wird von zwei Faktoren beeinflusst. Zum einen ist die Entwicklung der Strompreise abhängig von den erneuerbaren Energien, was eine Wachstumsrate zwischen -1% und 13% ermöglicht (vgl. BDEW, 2016). Zum anderen ist die Entwicklung der Kraftstoffkosten abhängig von Rohölpreisen, was eine Wachstumsrate für Benziner zwischen -9% und 11% sowie für Dieselfahrzeuge zwischen -19% und 16% ermöglicht (vgl. MWV, 2015). Die Entwicklung der Batteriepreise ist abhängig von Entwicklungsfortschritten und Skaleneffekten, was eine Senkung des Batteriepreises von -10% und -8% ermöglicht. Daraus resultiert ein Batteriepreis zwischen 331,20 EUR/kWh und 489,10 EUR/kWh (vgl. Habi, 2015; MacDonald, 2016; Nykvist und Nilsson, 2015).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit der BEVs und HEVs gegenüber den Verbrennern erhalten bleibt. Beispielsweise bleibt der Mercedes B250e günstiger gegenüber dem Dieselfahrzeug für eine Jahresfahrleistung von 5.000 km und eine Haltedauer von 5 Jahren. Die monatliche TCO liegt zwischen [773,33 EUR, 782,18 EUR] und beträgt durchschnittlich 777,76 EUR (Abbildung 91).

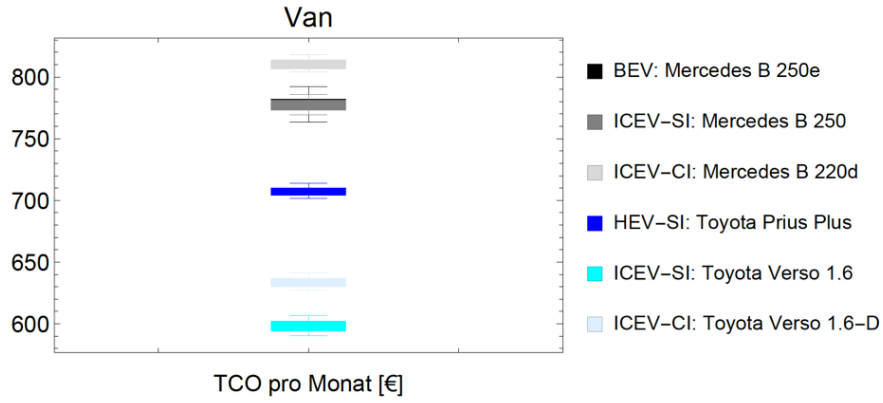


Abbildung 91: AP510 Kostenrisiken 2016
Quelle: Eigene Darstellung

Für die Anschaffung eines Fahrzeuges in 2021 ist ein Zukunftsszenario entwickelt worden, bei welchem insbesondere die Anschaffungskosten betrachtet wurden. Da der Verkaufspreis und die Batteriekosten wesentliche Einflussgrößen für die Anschaffungskosten darstellen, lässt sich eine positive Entwicklung der Wirtschaftlichkeit für das Jahr 2021 erkennen. Beispielsweise wird der Mercedes B250e günstiger als beide Verbrenner für alle untersuchten Jahresfahrleistungen. Die monatliche TCO liegt zwischen [709,40 EUR, 718,49 EUR] und der Durchschnitt ergibt sich zu 713,95 EUR für eine Jahresfahrleistung von 5.000 km und eine Haltedauer von 5 Jahren (Abbildung 92).

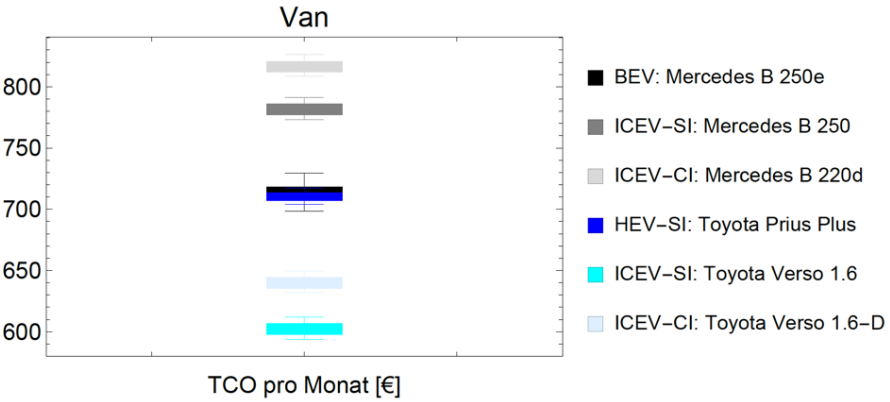


Abbildung 92: AP510 Kostenrisiken 2021
Quelle: Eigene Darstellung

Zusammenfassend zeigt sich, dass der im Rahmen dieser Untersuchung verwendete TCO Ansatz einen guten Vergleich aller anfallenden Gesamtkosten über die Nutzungsdauer eines Fahrzeuges ermöglicht. Die Ergebnisse für das Jahr 2016 bestätigen, dass vier BEVs (BMWi3, TeslaS, Mercedes B250e, TeslaX) und fünf HEVs (Honda Jazz, Toyota Auris, LexusIS, Mercedes-E, Merceds-S) aus Endkundensicht wirtschaftlicher gegenüber ähnlichen Verbrennern sind. Mit der Subvention in Höhe von 4.000 EUR für BEVs werden insgesamt fünf BEVs (zusätzlich Renault Zoe Z.E.) kosteneffizienter gegenüber Verbrennern. Darüber hinaus bleibt die Wirtschaftlichkeit dieser EVs bei möglichen Unsicherheiten in der Entwicklung von Energie- und Batteriepreisen erhalten.

5.2. AP 520: Geschäftsmodellierung unter Berücksichtigung der Daten der B-Klasse ED

Um die Elektromobilität im Allgemeinen betriebswirtschaftlich sinnvoll für den Endkunden zu gestalten, sind innovative Geschäftsmodelle erforderlich. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage: Wie können die erarbeiteten Geschäftsmodelle inkl. der damit einhergehenden Pricingmodelle verändert werden, um die TCO und die Verteilung der Zahlungsströme über den Nutzungszeitraum der Fahrzeuge aus Nutzersicht positiv zu beeinflussen?

Auf Grundlage der Nutzungskonstellationen Eigentumserwerb und temporärer Nutzen sind zwei anbieterseitige Geschäftsmodelle entwickelt worden.

5.2.1. Entwicklung anbieterseitiger Geschäftsmodelle

Eigentumserwerb

Bei der Entwicklung des Geschäftsmodells für den Eigentumserwerb liegt der Fokus auf dem Elektrofahrzeug, der Fahrzeugbatterie und dem Stromnetz.

Elektrofahrzeug. Der Eigentumserwerb beinhaltet den Kauf des Mercedes B250e inkl. Batterie, was zu hohen Zusatzkosten führt. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung aus dem Arbeitspaket 510 zeigt, dass die Mehrkosten des Anschaffungspreises eines Mercedes B250e bei 7.276 EUR gegenüber dem Benziner bzw. 3.591 EUR gegenüber dem Diesel liegen.

Fahrzeugbatterie. Die Herstellungskosten für Lithium-Ionen Batterien betragen für den Mercedes B250e ca. 7.419 EUR. Dies wurde mittels des durchschnittlichen Preises berechnet. Da der Fahrzeughersteller keine Mischvariante anbietet, bei der der Endkunde das Elektrofahrzeug kauft und die Batterie mietet, ist der Kauf des Mercedes B250e inkl. einer Batteriemiete modelliert worden. Auf Basis der Wirtschaftlichkeitsrechnung ist die Batteriemiete pro Monat für eine Haltedauer von 5 Jahren in Höhe von 26 EUR (5.000 km), 52 EUR (10.000 km), 78 EUR (15.000 km), 104 EUR (20.000 km) und 120 EUR (30.000 km) ermittelt worden. Die Batteriekosten beinhalten Wartung und Service. Die Gesamtleistung der Fahrzeugbatterie soll als fixe Speicherkapazität konfiguriert sein. Zusätzlich soll der Akku austauschbar sein. Die Fahrzeugbatterie ist beim Fahrzeughersteller zu mieten.

Stromnetz. Die Energiekosten sind abhängig vom Stromtarif und der jeweiligen Jahresfahrleistung. Auch wenn der Mercedes B250e in 2016 Kostenvorteile, insbesondere bei den Energiekosten, gegenüber dem Benziner aufweist, kann die Wirtschaftlichkeit durch mögliche sinkende Kraftstoffkosten beeinträchtigt werden. Demnach sind Kostenvorteile hinsichtlich der Energie nicht garantiert. Die durchschnittlichen Energiekosten pro Monat für den Mercedes B250e und seiner Vergleichsmodelle in 2016 sind Tabelle 29 zu entnehmen.

Tabelle 29: Übersicht Energieverbrauch pro Monat
Quelle: Eigene Berechnung

Jahresfahrleis-tung	Stromkosten pro Monat	Benzinkosten pro Monat	Dieselkosten pro Monat
5.000 km	29 €	43 €	22 €
10.000 km	58 €	87 €	44 €
15.000 km	88 €	130 €	65 €
20.000 km	117 €	174 €	87 €
30.000 km	175 €	261 €	131 €

Darauf aufbauend ist ein Stromflatrate-Tarif mit Festpreisgarantie modelliert worden, ähnlich wie es bei Mobilfunkanbietern bekannt ist. Der Endkunde kann mit einer Ladekarte sein Fahrzeug sowohl von zu Hause als auch an allen öffentlichen Ladestationen aufladen. Folglich ergibt sich ein Volumen-Flatrate-Paket, das eine Batteriemiete und eine pauschale Abrechnung der Energie beinhaltet. Für das Geschäftsmodell wird ein Tarif von 49 EUR pro Monat für alle Jahresfahrleistungen angenommen. Bei diesem Angebot kooperieren die Fahrzeughersteller mit den Energieunternehmen.

Temporärer Nutzen

Bei der Entwicklung des Geschäftsmodells für den temporären Nutzen liegt der Fokus auf dem E-Carsharing Angebot und dem Stromnetz.

E-Carsharing. Beim Kauf des Mercedes B250e werden standardmäßig zwei Leihsysteme angeboten: 15 jährliche Miettage für einen beliebigen Pkw oder eine Carsharing Nutzung von „car2go“ oder „car2go black“ für drei Stunden monatlich (vgl. Mercedes-Benz-Bank, 2014). Das free floating Carsharing „car2go“ bietet den Smart als Elektro- oder konventionelle Variante für den Stadtbereich an. Beim stationsbasierten Carsharing „car2go black“ steht der konventionelle Mercedes B250 zur Auswahl. Die einmalige Anmeldegebühr für den Mercedes B250 beträgt 19 EUR. Zu den variablen Kosten gehören die monatlichen Fahrkosten inklusive 50 km pro Stunde in Höhe von 14,90 EUR und monatliche Kosten pro weiteren Kilometer in Höhe von 0,29 EUR (inkl. aller Kosten). Zusätzlich fällt eine Gebühr in Höhe von 4,90 EUR für den Flughafen und das Mietende außerhalb der Startzone an. Aktuell wird der Mercedes B250e nicht beim „car2go black“ Carsharing angeboten.

Zur Aufnahme des Mercedes B250e in das stationsbasierte E-Carsharing muss in erster Linie die Break-Even-Fahrleistung (BEF) überprüft werden. Die BEF gibt an, ob die jährliche Kilometerleistung eines Fahrzeugs für ein E-Carsharing Angebot geeignet ist, welche in Anlehnung an Baum et al. (2012) errechnet worden ist. Im Rahmen der Untersuchung ergibt sich für das E-Carsharing eine durchschnittliche BEF von 28.212 km pro Jahr. Für den Mercedes B250e ergibt sich eine BEF in Höhe von 28.199 km pro Jahr und 83.411 km pro Jahr für den Smart ForTwo ED. Folglich liegt der Mercedes B250e knapp unterhalb der errechneten Durchschnittsfahrleistung und ist wirtschaftlich sinnvoller für die Integration im E-Carsharing als der Smart ForTwo ED, der bereits im „car2go“ angeboten wird.

Somit soll das stationsbasierte E-Carsharing „car2go black“ mit dem Mercedes B250e insbesondere für Wochenendfahrten und Fahrten außerhalb der Startzone z.B. zwischen Düsseldorf und Köln oder Nürnberg und Erlangen ergänzt werden. Das stationsbasierte E-Carsharing soll sowohl einen eigenen aktiven Service als auch eine Plattform von anderen Unternehmen anbieten. Das Angebot kann zusätzlich um verschiedene Verkehrsmittel erweitert werden, etwa dem Fernverkehr der Deutschen Bahn (DB) für Überlandfahrten oder dem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) für Stadtfahrten. Diese Angebote unterstützen nachhaltiges Mobilitätsverhalten und die regionalen Wertschöpfungsketten. Das E-Carsharing Angebot kann außerdem mit Fahrern ergänzt werden.

Stromnetz. Für das stationsbasierten E-Carsharing Angebot eignet sich eine fixe Ladeinfrastruktur. Für die Vernetzung des E-Carsharing Angebots wird das „moovel“-Kundenkonto in Betracht gezogen. Dabei soll die Einzahlung eines Fixbetrages auf das Kundenkonto jährlich z.B. mit ÖPNV-Tickets belohnt werden. Die vier Stufen orientieren sich an der Jahresfahrleistung (siehe Tabelle 30)

Tabelle 30: Übersicht Mobilitätsgutschrift
Quelle: Eigene Berechnung

Stufe	Jahresfahrleistung	Einzahlung	Gutschrift	Gutschrift
1	5.000 km p.a.	1.500 €	2,5 %	37,50 €
2	8.000 km p.a.	2.000 €	5,0 %	100 €
3	10.000 km p.a.	3.000 €	7,5 %	225 €
4	15.000 km p.a.	5.000 €	10,0 %	500 €

Folglich ergibt sich ein Geschäftsmodell in Form eines flexiblen Mobilitätspakets zur Verbindung des E-Carsharing Angebots mit dem Fernverkehr der DB sowie ÖPNV, mit welchem sich die Marktakteure Wettbewerbsvorteile auf dem Zukunftsmarkt verschaffen und die Akzeptanz der Elektromobilität für die Endkunden erhöhen.

5.2.2. Beurteilung der Geschäftsmodelle aus TCO-Sicht

Volumen-Flatrate-Paket

Das Volumen-Flatrate-Paket beinhaltet die Mischvariante des Eigentumserwerbs wie „Batteriemiete“ und eine pauschale Abrechnung der Energie wie „Stromtarif-Flatrate“. Da Energieverbrauch und Batteriepreis einen großen Einfluss auf die TCO haben, ist es wichtig, beide Kosten in einem Paket anzubieten. Beispielsweise zeigt der Mercedes B250e im Jahr 2016 mit dem Volumen-Flatrate-Paket eine 8% niedrigere TCO und somit eine Ersparnis in Höhe von 61 EUR pro Monat im Vergleich zur Ausgangssituation bei einer Jahresfahrleistung von 5.000 km und einer Haltedauer von 5 Jahren auf (Abbildung 93).

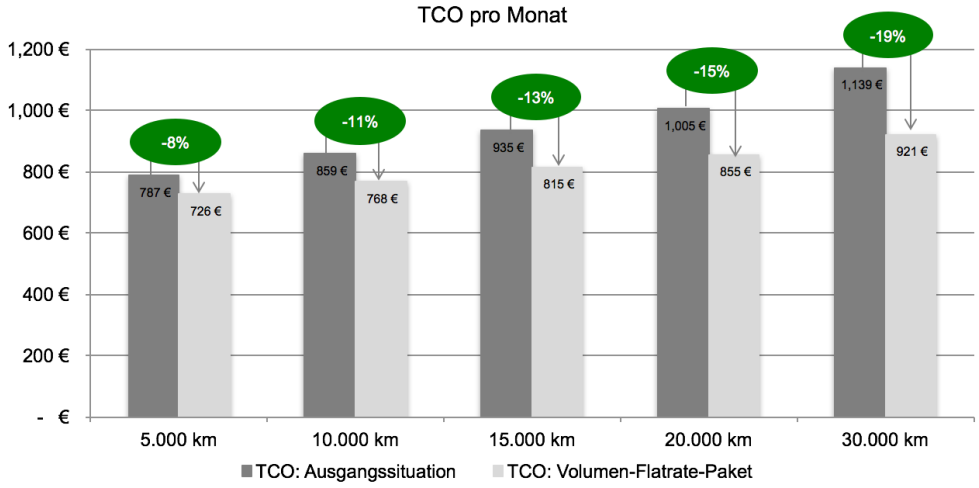


Abbildung 93: AP520 „Volumen-Flatrate-Paket“
Quelle: Eigene Darstellung

Folglich weist das Volumen-Flatrate-Paket über den Nutzungszeitraum der untersuchten Fahrzeuge eine positive TCO-Bilanz auf, sodass die bestehenden vier BEVs – BMWi3, TeslaS, Mercedes B250e, TeslaX – noch wirtschaftlicher werden. Mit der Berücksichtigung der Subvention werden insgesamt sechs BEVs – zusätzlich Renault Zoe Z.E., Nissan Leaf – rentabler. Das Fahrzeugsegment „Minis“ ist weiterhin im Volumen-Flatrate-Paket nicht wirtschaftlich aus Endkundensicht.

Flexibles Mobilitätspaket

Das flexible Mobilitätspaket beinhaltet einerseits ein stationsbasiertes E-Carsharing Angebot für Wochenendfahrten, andererseits die Einzahlung eines Fixbetrages mit Belohnung auf das moovel-Kundenkonto für die Nutzung des öffentlichen Verkehrs.

Beim stationsbasierten E-Carsharing bezahlen Nutzer bei „car2go black“ eine einmalige Anmeldegebühr, ggf. monatliche Kosten pro Stunde, ggf. zusätzliche monatliche Kosten pro Kilometer und ggf. Pauschalbeträge für z.B. den Flughafen oder das Mietende außerhalb der Startzone. Diese Kosten orientieren sich an dem vergleichbaren konventionellen Fahrzeug Angebot „car2go black“. Demnach entfallen Kosten wie z.B. die Anschaffung, Werkstattkosten und Kraftfahrtversicherung. Allerdings werden diese Kosten auf die pauschalen monatlichen Kosten pro Stunde umgelegt. Die relevanten Kosten dienen als Basis für die Gesamtkostenberechnung. Die Ergebnisse zeigen, dass Endkunden für die Nutzung des Mercedes B250e im E-Carsharing eine TCO in Höhe von 126,83 EUR pro Monat und 0,30 EUR pro km bei einer Jahresfahrleistung von 5.000 km und einer Halterdauer von 5 Jahren bezahlen (siehe Abbildung 94).

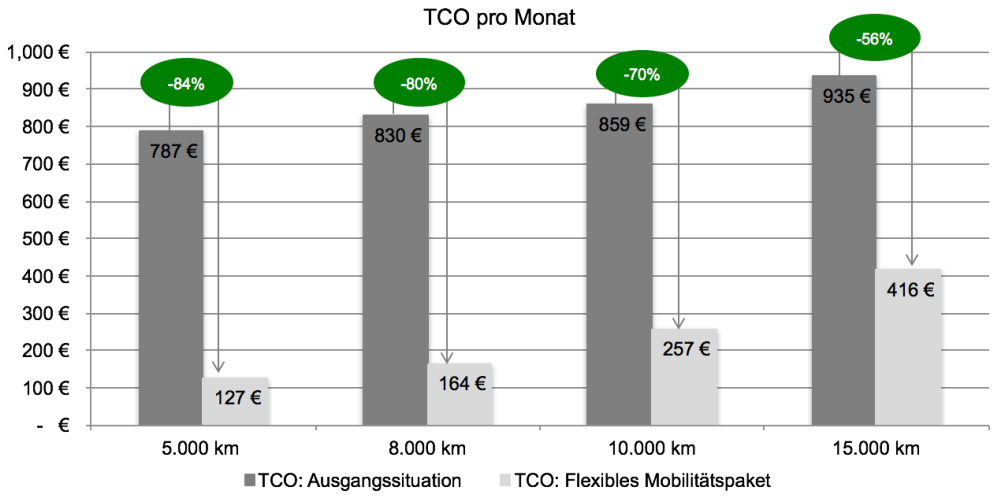


Abbildung 94: AP520 „Flexibles Mobilitätspaket“
Quelle: Eigene Darstellung

Folglich ergibt sich ein Ersparnis in Höhe von ca. 660 EUR pro Monat (84%) im Vergleich zur Ausgangssituation. Somit, weist das flexible Mobilitätspaket über den Nutzungszeitraum der Fahrzeuge eine positive TCO-Bilanz für den Mercedes B250e auf.

5.3. AP 530: Standardisierung und Komplexitätsverringerung

Durch Maßnahmen der Standardisierungen und Komplexitätsverringerung wird die wirtschaftliche Beurteilung von Elektromobilitätskonzepten beeinflusst. Deshalb stellt sich die Frage: Welche Standardisierungsmöglichkeiten im Bereich Tanken, Serviceleistungen, Parken und Vorrangdienstleistungen die Komplexität der produktbegleitenden Dienstleistungen zum Elektrofahrzeug verringern können? Diese Frage wird im Rahmen des Arbeitspaketes 530 anhand von unterschiedlichen Perspektiven beantwortet.

5.3.1. Analyse von Standardisierungs- & Komplexitätsreduktionsmöglichkeiten

Für die Ausarbeitung von Standardisierungs- & Komplexitätsreduktionsmöglichkeiten wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, bei der sich insgesamt 23 relevante Publikationen ergaben (vgl. Bjerkan u. a., 2016; San Roma u. a., 2011). Die Auswertung erfolgte mithilfe einer Häufigkeitsanalyse. Für die Analyse sind die Bereiche Infrastruktur und Energieverbrauch ausgewählt worden. Der Grund hierfür ist, dass die Ladesäulenverordnung in Deutschland den Betreibern das punktuelle Aufladen ermöglicht, ohne dass ein auf Dauer angelegter Stromvertrag mit dem betreffenden Elektrizitätsversorgungsunternehmen geschlossen werden muss. Dies wiederum hat aber einen erheblichen Einfluss auf verschiedene Zahlungsmöglichkeiten.

Grundsätzlich lassen sich bei den Zahlungsarten zwei Varianten unterscheiden, die dem Kunden in verschiedenen Ausführungen angeboten werden. Zum einen besteht die Möglichkeit den Ladevorgang an der Ladesäule mithilfe einer Karte, die der Kunde vom Betreiber erhält, zu zahlen. Bei dieser

Variante bestellt der Kunde eine spezielle Guthabenkarte bei seinem regionalen Betreiber von Ladesäulen (meist Stadtwerke). Die Abbuchung der Beträge erfolgt in Form von Prepaid. Konkret bedeutet dies, dass der Kunde ein Guthaben auf seine Karte bucht. Bei jedem Ladevorgang wird der entsprechende Betrag von der Karte abgezogen, bis der Kunde wieder ein neues Guthaben auf seine Karte lädt. Die Vorteile hier sind einerseits die einfache Nutzung und andererseits der Kostenüberblick für den Kunden, da maximal das auf der Karte vorhandene Guthaben abgebucht werden kann. Zudem ist diese Zahlungsweise vertragsfrei und bietet dem Kunden dadurch eine hohe Flexibilität. Dem gegenübersteht, dass diese Form des Bezahlens oft nur regional nutzbar ist. Hierdurch ist der Kunde auf den Geltungsbereich der Ladekarte beschränkt bzw. muss für andere Bereiche Ladekarten vom jeweiligen Anbieter bestellen.

Zum anderen kann eine Bezahlung mithilfe eines Mobiltelefons erfolgen. Hier kann die Abbuchung des Ladevorgangs entweder über SMS („SMS&charge“, EWE AG (2016)), das Abscannen eines QR Codes („Ladepay“, Ladenetz (2016)) oder über eine Applikation für das Smartphone (vgl. Stromnetz Hamburg, 2016) erfolgen. Alle Verfahren bieten dem Nutzer eine hohe Flexibilität an, da dieser für die Bezahlung keine spezielle Karte, sondern lediglich sein Mobiltelefon benötigt. Hierdurch kann der Kunde sein Fahrzeug auch in überregionalen Bereichen laden. Tabelle 31 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Bezahlungsmöglichkeiten in Deutschland und deren Vor- und Nachteile.

Tabelle 31: Zahlungsmöglichkeiten an einer Ladesäule
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (EnBW, 2016; Ladenetz, 2016)

Bezahlungsart	Vertrag	Vorteile	Nachteile
Ladekarte	Ja	Einfache Nutzung	Oft nur regional nutzbar
Ladeticket	Nein	Verschiedene Nutzungsdauer	Nur für ausgewählte Stationen in der Region
Prepaid-Ladekarte	Nein	Kostenüberblick	Oft nur regional nutzbar, feste Guthabenbeträge
Direct-pay mittels SMS	Nein	Flexibilität, Abrechnung über Mobilfunkanbieter	Ggf. abweichende Kosten für ausländische Nutzer, hohe Transaktionskosten
Ladepay über QR Code	Nein	Flexibilität	Ggf. eingeschränkte Zahlungsmöglichkeiten
Handyapp (RWE ePower direct)	Nein	Flexibilität	Ggf. eingeschränkte Zahlungsmöglichkeit

Folglich wird deutlich, dass verschiedene Zahlungsmöglichkeiten existieren und somit ein einheitliches Bezahlsystem erforderlich ist, um die Komplexität der produktbegleitenden Dienstleistungen von Elektrofahrzeugen zu verringern.

5.3.2. Zentrale Maßnahmen zur Standardisierung und Komplexitätsreduktion

Angebotsseitige Akteure aus der Energiewirtschaft, der Automobil- und IT-Branche haben sich bereits zusammengeschlossen, um an der erfolgreichen Umsetzung eines einheitlichen Bezahlsystems zu arbeiten. Beispielsweise unternimmt das Unternehmen Hubject eine konkrete Umsetzung der Standardisierung des Bezahlsystems an öffentlichen Ladesäulen. Das Unternehmen Hubject hat in den letzten Jahren eine eRoaming-Plattform errichtet, die es den Kunden erlaubt an Ladesäulen verschiedener Anbieter vertragsfrei und zu jeder Zeit ihr Elektrofahrzeug zu beladen. Allerdings stellt sich aus Kundensicht die Frage, ob es mögliche Preisabweichungen zwischen den Preisen im Hubject-

Netzwerk und einem direkten Laden über den Anbieter gibt. In der Untersuchung wurde die „Charge&Pay App für Mercedes-Benz“ ausgewählt, welche an das Hubject-Netzwerk angeschlossen ist. Bei der Betrachtung der verschiedenen Ladesäulenbetreiber kristallisieren sich drei Anbieter heraus, die den Markt in Deutschland dominieren: innogy (ehem. RWE), die mit Schwerpunkten im Rheinland und Berlin Ladesäulen betreiben; EnBW, die vor allem in der Region Stuttgart Ladesäulen errichten und anbieten; und der Stadtwerkeverbund ladenetz.de, die ebenfalls als Zusammenschluss von regionalen Stadtwerken, wie Stadtwerke Aachen oder Stadtwerke München, kooperieren.

Um die Vergleichbarkeit einer möglichen Preisabweichung zu gewährleisten, wird der Mercedes B250e mit einer Ladestrommenge von 16A (Lademenge pro Stunde 6,4 kWh) ausgewählt. Es wird ein kombinierter Stromverbrauch von 24,3 kWh/100 km und eine durchschnittlich tägliche zurückgelegte Strecke von 30 km angenommen. Alle Preise werden in Euro pro Stunde berechnet. Falls der Kunde bei einem Anbieter über verschiedene Tarifmodelle (z.B. vertragsfrei und vertragsgebunden mit Grundgebühren) wählen kann, dann werden in der Untersuchung alle angebotenen Tarife betrachtet und mit den Preisen bei der Nutzung der App verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der App-Nutzer deutschlandweit unabhängig von der Tageszeit an den Ladesäulen des jeweiligen Betreibers einen für jeden Betreiber festgelegten Strompreis pro Ladedauer bezahlt (Tabelle 32).

Tabelle 32: Preisunterschiede bei verschiedenen Bezahloptionen
Quelle: Eigene Darstellung

Station/Anbieter	**Daimler**	**Anbieter**	
	Mercedes-Benz App	**Vertragsfrei**	**Vertragsgebunden**
innogy	4,23 € / h	4,95 € / h	7,96 € / h
EnBW	6,82 € / h	2,40 € / h	1,45 € / h
Ladenetz: Stadtwerke Aachen*	5,59 € / h	3,50 € / h	-
Ladenetz: Stadtwerke Ludwigsburg*	5,59 € / h	3,50 € / h	-
Ladenetz: Stadtwerke München	5,59 € / h	3,50 € / h	2,12 € / h
*=Annahme: Ladezeit 2h, nur stundenweise Abrechnung möglich			

Dabei wird deutlich, dass sich die anfallenden Kosten zum Teil deutlich unterscheiden. So ist die Nutzung der Mercedes-Benz App lediglich in Kombination mit dem Anbieter innogy wirtschaftlich. In den übrigen Fällen lohnt sich eine Nutzung der App nicht, da auf direktem Weg beim Anbieter entweder über einen Vertrag oder vertragsfrei weniger bezahlt werden muss. Durch diese Erkenntnisse zeigt sich, dass eine Erleichterung des Ladevorgangs für den Endkunden etwa durch ein einheitliches und durchdachtes Bezahlsystem in Folge einer Kooperation der beteiligten Akteure möglich wäre. Aus TCO-Sicht wurden bereits zuvor die Kostenrisiken bei der Entwicklung von Energiepreisen für das Normalladen betrachtet. Allerdings haben wir bislang die Energiepreise für das Schnellladen in der TCO nicht berücksichtigt. Da aber in naher Zukunft eine Verschiebung zum Schnellladen stattfinden wird, ist es deshalb notwendig die Auswirkung auf die TCO zu analysieren.

Für das Schnellladen wurden Stromkosten von 0,56 EUR/kWh (vgl. Frahm und Pander, 2017). Die Ergebnisse zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit beim Schnellladen nur für den TeslaS gegenüber ähnlichen ICEVs bei unterschiedlichen Jahresfahrleistungen erhalten bleibt. Die TCO des Mercedes B250e liegt beim Schnellladen nun bei 817 EUR pro Monat (1,96 EUR pro km) im Vergleich zum Normalladen

bei 787,46 EUR pro Monat (1,89 EUR pro km) für eine Jahresfahrleistung von 5.000 km und eine Haltedauer von 5 Jahren (siehe Abbildung 95).

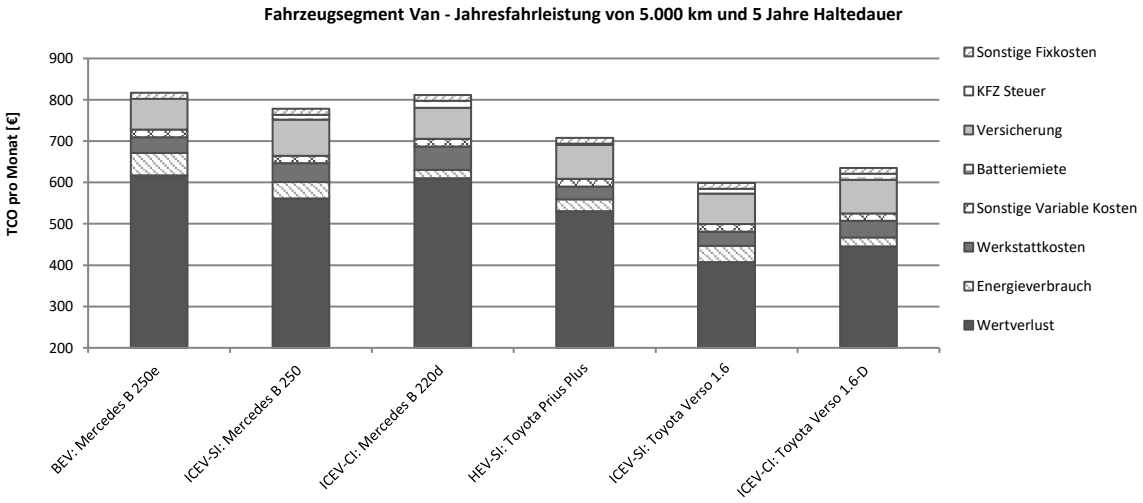


Abbildung 95: AP530 ohne Subvention 2016
Quelle: eigene Darstellung

Mit der Subvention bleibt die Wirtschaftlichkeit für die bestehenden vier BEVs (BMWi3, TeslaS, Mercedes B250e, TeslaX) erhalten. Beispielsweise ist der Mercedes B250e günstiger gegenüber dem Benziner bis zu 8.000 km und dem Dieselfahrzeug bis zu 10.000 km. Die TCO liegt nun bei 745,43 EUR pro Monat (1,79 EUR pro km) im Vergleich zum Normalladen bei 715,89 EUR pro Monat (1,72 EUR pro km), siehe Abbildung 96.**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

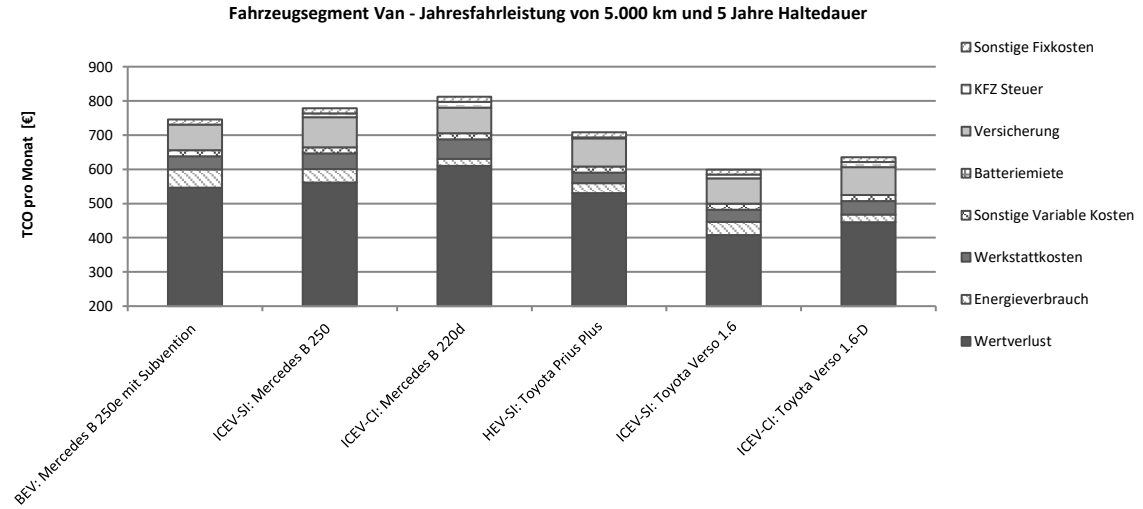


Abbildung 96: AP530 mit Subvention 2016
Quelle: eigene Darstellung

Zusammenfassen lässt sich sagen, dass das Schnellladen eine negative Auswirkung auf die TCO hat. Deshalb müssen sich die Kunden in erster Linie bei den Betreibern über die Zahlungsmöglichkeiten an den Ladesäulen informieren. Die Flexibilität des Elektrofahrzeugbesitzers wird durch die „Vorher-

Registrierung oder -Kartenbestellung“ (besonders außerhalb der Region) stark eingeschränkt, da das sofortige Laden an einer beliebigen Ladesäule nicht möglich ist. Daher leitet sich als Lösungsvorschlag die Einführung einer einheitlichen Ladekarte oder App für Mobiltelefone ab. Anhand dieses einheitlichen Bezahlsystems würde dem Kunden das Laden an jeder beliebigen Ladesäule ermöglicht werden, wie es auch beim Tanken eines konventionellen Fahrzeugs an jeder Tankstelle möglich ist. Neben der gesteigerten Flexibilität des Kunden können auch Bedenken potentieller Elektrofahrzeugkäufer entgegengewirkt werden, keine Ladesäule zu finden und so womöglich aufgrund eines entladenen Autos „auf der Strecke“ zu bleiben.

Um zügig mit dem BEV weiterzufahren sowie große Staus bei Ladesäulen zu vermeiden, wird in naher Zukunft eine Verschiebung zum Schnellladen stattfinden. Deshalb muss sich der Kunde über das Schnellladen informieren, denn das „viertelstündige“ Laden ist aktuell teurer als eine 100 km Tankfüllung für ein Dieselfahrzeug. Um den Strom günstiger anzubieten, ist eine Kombination mit erneuerbaren Energiequellen notwendig. Zusätzlich ist eine bessere Aufklärung über die notwendigen einmaligen Ausstattungskosten für das Schnellladesystem seitens der Automobilhersteller erforderlich. Darüber hinaus sollten Ladesäulen mit einem Oktopus-Anschluss angeboten werden, da bis zu acht Elektrofahrzeuge parallel laden und somit zusätzliche Staus vermieden werden können.

5.4. AP 540: Anbieterseitige Kooperationsmodelle

Um die Kooperationserfordernisse aus TCO- und Anbietersicht zu treffen, ist ein Kooperationsmodell erforderlich. Dazu stellt sich die folgende Frage: Welche anbieterseitigen Kooperationen können zu einer Komplexitätsverringerung und zur Reduktion der TCO beitragen? Diese Fragestellung wird im Nachfolgenden beantwortet.

5.4.1. Akteursbezogene Anforderungen zur Implementierung von Standards

Die Daimler AG kooperiert mit unterschiedlichen Akteuren aus den Bereichen der Elektromobilität, Energiespeicher und produktbegleitenden Dienstleistungen. Darunter finden sich, teilweise projektbezogene Kooperationen mit und ohne Kapitalbeteiligung, strategische Partnerschaften, Gründungen von Joint Ventures, Forschungsprojekte sowie Kooperationen mit Vereinsstrukturen. Überwiegend ist die Daimler AG als Automobilhersteller beteiligt. In manchen Fällen, wie etwa bei der Kooperation „Wallbox Installation Service“, „Ladesystem mit BMW“, „Li-Tec Battery GmbH“ und „Deutsche ACCUmotive GmbH & Co. KG“, ist die Daimler AG als Elektrotechnik-Unternehmen vertreten. Außerdem ist die Daimler AG in der Kooperation „B flexible Package“ als Finanzdienstleister und Fahrzeugvermietung beteiligt. Darüber hinaus nimmt die Daimler AG an der „Partnerschaft mit Hamburg“ als IKT-Unternehmen teil. All diese Kooperationen versuchen Lösungen für eine Vielzahl von offenen Fragestellungen im Bereich Elektromobilität zu finden. Dazu zählen z.B. die nachhaltige Versorgung mit Ökostrom, Forschung an Batteriezellen und –systemen, der Ausbau und die Verbesserung der Ladeinfrastruktur (intelligente Ladelösungen, induktives Laden, Schnellladenetz, Standardisierung von Ladeanschlüssen, App-Entwicklung). Auf Grundlage der bestehenden Kooperationen wird im Nachfolgenden ein Kooperationsmodell entwickelt.

5.4.2. Entwicklung eines Kooperationsmodells

Bei dem Kooperationsmodell mit einem „Vehicle to Grid“ Ansatz sind neben der Daimler AG und einem Energieunternehmen auch die einzelnen Nutzer der Elektrofahrzeuge beteiligt. Zur Veranschaulichung der konkreten Ausgestaltung des Kooperationsmodells dient Abbildung 97, die den Aufbau und die Funktionsweise des Konzepts zeigt:

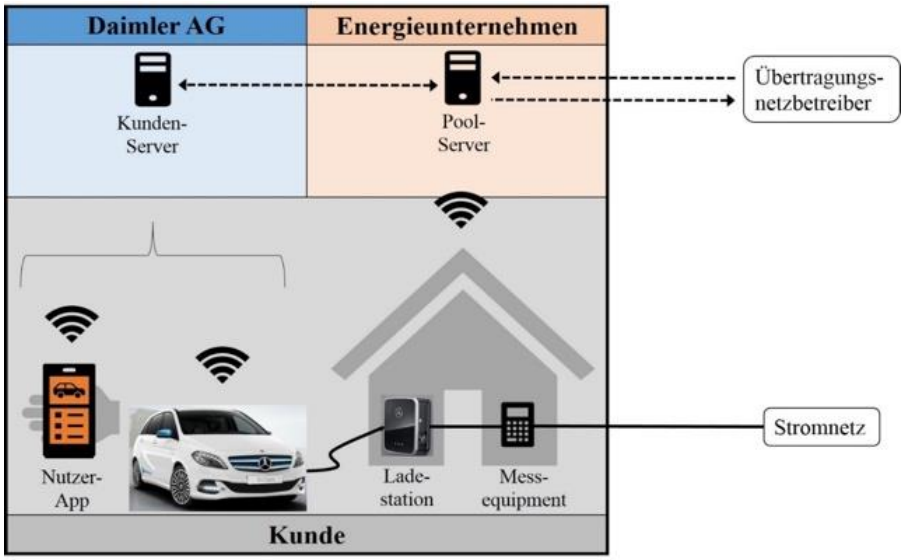


Abbildung 97: Aufbau und Funktionsweise des Kooperationsmodells
Quelle: Eigene Darstellung

Daimler AG. Die Daimler AG stellt mit der B-Klasse 250e dem jeweiligen Kunden das Fahrzeug zur Verfügung. Bisher haben potentielle Kunden das Fahrzeug, einschließlich der Batterie, erwerben müssen. Die Möglichkeit einer Batteriemiete wurde dabei nicht angeboten, wie bereits in AP520 erwähnt wurde. Deshalb wird die Batteriemiete im Kooperationsmodell betrachtet. Der Grund dafür ist, dass die Batterie neben den Ladezyklen für die Elektromobilität auch für die Stromspeichernutzung be- und entladen werden kann. Mit dem zusätzlichen Nutzungszweck sind auch eine höhere Beanspruchung und damit eine stärkere Abnutzung der Leistungsfähigkeit der Batterie verbunden. Dieses zusätzliche Risiko, verbunden mit einer eventuellen Nicht-Teilnahme an der Kooperation, wird von dem Kunden abgewendet, indem er die Batterie für die Nutzungsdauer mietet und anschließend zurückgibt. Der Kunde erwirbt das Fahrzeug somit ohne Batterie.

Energieunternehmen. Das Energieunternehmen koordiniert die einzelnen tatsächlich angeschlossenen Elektrofahrzeuge an den bidirektionalen Ladestationen und tritt als Ansprechpartner des "Batterie-Pools" am Energiemarkt für Übertragungsnetzbetreiber auf. Es erfährt die Energienachfrage des Stromnetzes und übermittelt das Energieangebot der gesamten Systemdienstleistung. Diese Interaktion generiert schließlich den Zusatznutzen und die monetäre Vergütung der gesamten Systemdienstleistung. Zusätzlich steht dem Kunden eine einheitliche Ladekarte oder App für Mobiltelefone zur Verfügung. Somit ist gewährleistet, dass der Kunden an jeder beliebigen Ladesäule einheitlich laden kann, wie in AP530 bereits aufgezeigt wurde.

Kunde. Die Nutzer besitzen damit jeweils das Elektrofahrzeug und eine modifizierte, bidirektionale Ladestation der Daimler AG, die sowohl das Beladen als auch das Entladen des Fahrzeuges mit Strom erlaubt. An dem gewohnten Ladevorgang eines Elektrofahrzeuges ändert sich nichts. Der Strom gelangt dabei aus dem Stromnetz, über Messinstrumente und die Ladestation in das Fahrzeug. Das neuartige Entladen geschieht dementsprechend entgegengesetzt. Dieser Vorgang berechtigt den Fahrzeugnutzer zu der später vorgestellten Prämienauszahlung und kann auch gegebenenfalls vom Kunden unterbunden werden.

Über eine Nutzer-App können die Kunden Angaben zu ihrer Mobilität eintragen. Sowohl die Nutzer-App wie auch die Elektrofahrzeuge kommunizieren dabei mit Servern der Daimler AG und geben beispielsweise zukünftige Mobilitätsbedürfnisse der Kunden oder die aktuelle Restreichweite des Fahrzeuges weiter. Die Daimler AG übermittelt ihrerseits die relevanten Informationen der einzelnen Nutzer an das Energieunternehmen und gibt somit das aktuelle Zwischenspeicher-Potential der aggregierten Batteriekapazitäten weiter.

Der Erfolg des "Batterie-Pools" hängt maßgeblich von der Integration der einzelnen Elektrofahrzeuge ab. Um einen Anreiz für die kooperative Teilnahme für die Fahrzeugnutzer zu schaffen, ist ein Modell mit den folgenden Stellgrößen für eine variable Auszahlungsprämie gewählt worden: (1) Eingabe der Mindestreichweite (reservierte Kapazität), (2) Standzeit an der Ladestation (Steckzeit) und (3) Fahrtenplanung (Eingabe der Abfahrtszeiten, Wunschfüllstand). Die Eingabe der Mindestreichweite gewährleistet dem Kunden spontane Mobilitätsbedürfnisse. Durch die (Teil-)Reservierung der Batteriekapazität bleibt ein festgelegter Puffer bestehen. Die Standzeit an der Ladestation beeinflusst am stärksten das Potential, da nur in diesem Zeitraum die Fahrzeugbatterie auch tatsächlich am „Batterie-Pool“ angeschlossen ist. Die Fahrtenplanung durch Eingabe der Abfahrtszeiten und Wunschfüllstandes erlaubt dem Kunden ein uneingeschränktes Mobilitätsverhalten. Um das entwickelte Kooperationsmodell aus Kundensicht zu beurteilen, wurde eine Befragung mit 38 eMERGE II Kunden bzw. „Experten“ im Juli 2017 online durchgeführt**.**

5.4.3. Beurteilung des Kooperationsmodells aus Kundensicht

Die Ergebnisse mit den eMERGE II Kunden bzw. „Experten“ zeigen, dass die Mehrheit der Kunden das ausgearbeitete Kooperationsmodell bevorzugen (Mittelwert = 1.74), welches den Kauf der B-Klasse 250e (ohne Batterie), Miete der Batterie über die Nutzungsdauer und die Teilnahme am Modell mit Prämienzahlung beinhaltet. An zweiter Stelle ziehen die Kunden den Kauf der B-Klasse 250e (mit Batterie) vor (Mittelwert = 2.11). Als letztes favorisieren die Kunden den Kauf der B-Klasse 250e (ohne Batterie) mit einer Batteriemiete über die Nutzungsdauer (Mittelwert = 2.16). Jedoch sieht der Großteil der Umfrageteilnehmer die Zwischenspeicher-Idee für Elektrofahrzeuge als ökologisch und ökonomisch sinnvoll an.

Demographische Daten. Die Teilnehmer waren überwiegend männlichen Geschlechts. Das durchschnittliche Alter lag zwischen 40 und 49 Jahren und die Teilnehmer besaßen mindestens ein (Fach-)Abitur. Darüber hinaus nahmen Personen mit einem hohen Einkommen (zwischen 75.000 EUR und 99.999 EUR) teil. Das BEV wird als Privatfahrzeug für eine durchschnittliche Jahresfahrleistung zwischen 10.000 km und 14.999 km eingesetzt. Dabei ist eine Mindestreichweite zwischen 40 km und 59 km für spontane Mobilitätsbedürfnisse (z.B. Einkaufen) erforderlich. Primär werden die BEVs von den Teilnehmern überwiegend über die Wallbox mit einer durchschnittlichen Steckzeit zwischen 7 und 10 Stunden pro Tag geladen. Hingegen ist eine durchschnittliche Steckzeit zwischen 11 und 14 Stunden pro Tag möglich, wenn eine Teilnahme an dem Kooperationsmodell erfolgt.

5.4.4. Ermittlung der TCO-Auswirkungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die vier BEVs (BMWi3, TeslaS, Mercedes B250e, TeslaX) und fünf HEVs (Honda Jazz, Toyota Auris, LexusIS, Mercedes-E, Mercedes-S) weiterhin wirtschaftlich gegenüber vergleichbaren ICEVs bleiben. Am Beispiel des Mercedes B 250e zeigt sich, dass dessen TCO von 697,25 EUR pro Monat (1,67 EUR pro km) unter dem Wert des vergleichbaren Benziners von 778,21 EUR pro Monat (1,87 EUR pro km) und des Diesel-Modells von 811,94 EUR pro Monat (1,95 EUR pro km) liegt, siehe Abbildung 98.

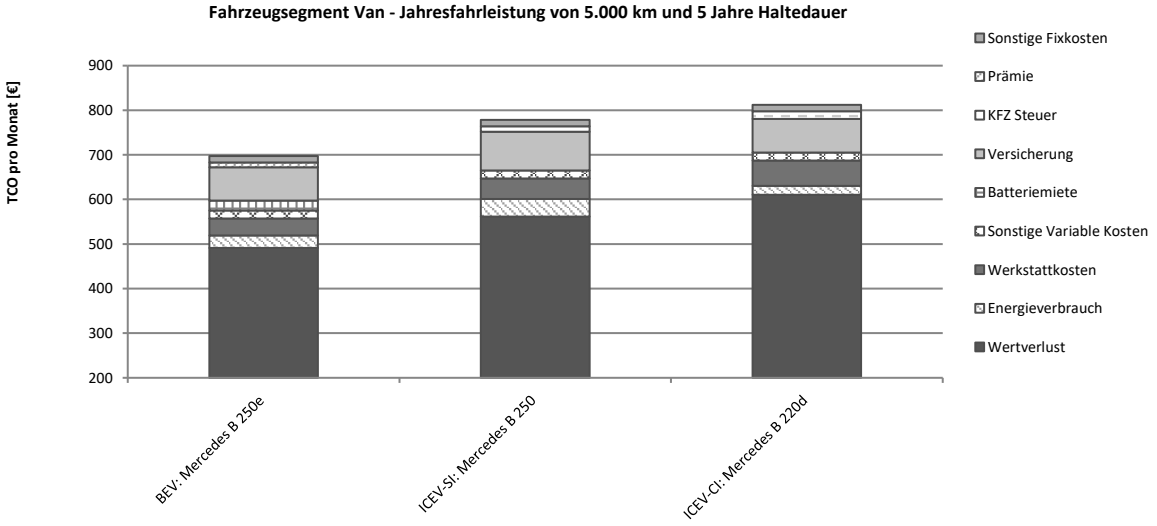


Abbildung 98: AP540 ohne Subvention 2016
Quelle: Eigene Darstellung

Mit der Subvention werden insgesamt sieben BEVs (zusätzlich Renault Zoe Z.E., VW e-Golf, Nissan Leaf) wirtschaftlich rentabler als das vergleichbare konventionelle Fahrzeug. Beispielsweise bleibt der Mercedes B250e günstiger gegenüber beiden Verbrennern für alle untersuchten Jahresfahrleistungen. Die TCO beträgt 625,68 EUR je Monat (1,50 EUR pro km) und ist in Abbildung 99 dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Kooperationsmodell eine positive Auswirkung auf die TCO hat, jedoch nicht zugunsten aller untersuchten BEVs. Das Fahrzeugsegment „Minis“ bleibt weiterhin nicht wirtschaftlich.

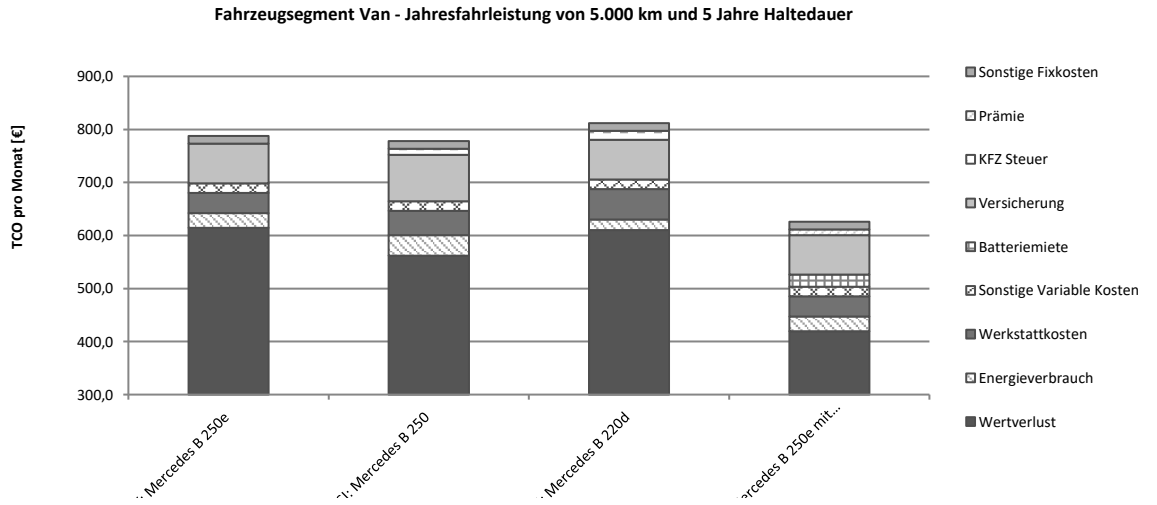


Abbildung 99: AP540 mit Subvention 2016
Quelle: Eigene Darstellung

5.5. AP 550: Pricingmodelle aus verhaltenswissenschaftlicher Sicht

Das Ziel des Arbeitspakets 550 besteht darin, ein Konzept für Pricingmodelle aus verhaltenswissenschaftlicher Sicht zu erstellen, die eine positive Auswirkung auf die TCO mit Fokus auf die Verteilung der Zahlungsströme und Kostenrisiken haben. Im Nachfolgenden Abschnitt wird zuerst auf die experimentelle Studie eingegangen, um anschließend die wirtschaftlichen Auswirkungen der Pricingmodelle zu ermitteln.

5.5.1. Experimentelle Studie für Pricingmodelle

Es sind zwei experimentelle Studien mit unterschiedlichen Teilnehmerkreisen durchgeführt worden. Die erste Studie ist mit 17 eMERGE II Kunden bzw. „Experten“ im Oktober 2016 beim Kommunikationsevent und die zweite Studie ist deutschlandweit mit 379 „potentiellen Käufern“ im Dezember 2016 mittels der online Service-Plattform Clickworker durchgeführt worden. Beiden Studien liegt ein 2 (anwesend vs. abwesend TCO Information) x 2 (anwesend vs. abwesend Risiko für ICEVs) between-subject Design zugrunde. Hauptbestandteil der experimentellen Studie war es, die TCO Information und die Information über das Inkrafttreten des Fahrverbots mit einer 50% Wahrscheinlichkeit für Verbrenner im Jahr 2020 auf die Auswahl von rein batterieelektrischen Fahrzeugen zu testen. Im Anschluss an das Experiment folgte ein Fragebogen, welcher zum einen Fragen zum Experiment und zum anderen Fragen zur Person beinhaltete.

Experten

Die Ergebnisse mit den eMERGE II Kunden bzw. „Experten“ zeigen, dass die Untersuchung der beiden unabhängigen Variablen TCO Information sowie Risiko für ICEVs ohne Berücksichtigung weiterer Variablen zunächst beide keinen signifikanten Einfluss auf die Kaufentscheidung haben. Da es sich bei den Kunden um Early Adopters von Elektrofahrzeugen handelt, scheint es schlüssig zu sein, dass für diese Gruppe das Fahrverbot für ICEVs keinen Einfluss auf die Kaufentscheidung hat. Es zeigt sich jedoch, dass die Gewichtung der TCO Information mit der TCO Differenz einen signifikanten Einfluss auf die Kaufentscheidung hat ($p < 0.001$). Zudem hat das Geschlecht einen signifikanten Einfluss auf die Kaufentscheidung ($p < 0.05$).

Demographische Daten. Die Teilnehmer waren überwiegend männlichen Geschlechts. Das durchschnittliche Alter lag zwischen 40 und 49 Jahren. Der Bildungsstand war durchgehend hoch, sodass jeder der Teilnehmer mindestens einen (Fach-)Abitur Abschluss besaß. Darüber hinaus nahmen vermehrt Personen mit hohem Einkommen (zwischen 50.000 EUR und 74.999 EUR) teil, die in Haushalten mit meist drei Personen wohnen. Die Teilnehmer kamen durchschnittlich aus Mittelstädten mit 20.000 bis 99.9999 Einwohnern. Durchschnittlich besaßen zwei Personen des Haushaltes einen PKW Führerschein mit etwa 2 PKWs pro Haushalt. Die durchschnittliche PKW-Jahresfahrleistung lag zwischen 15.000 km und 19.999 km. Die Mehrzahl aller Teilnehmer gab an, innerhalb von 12 Monaten ein Neufahrzeug kaufen zu wollen.

Elektrofahrzeug spezifische Daten. Von den Teilnehmern der Expertengruppe besaß etwa die Hälfte der Teilnehmer ein batterieelektrisches Fahrzeug. Dementsprechend hoch war das Interesse dieser Personen an batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen. Weiterhin hatten beinahe alle Teilnehmer bereits Erfahrung mit Elektrofahrzeugen im Allgemeinen, über 80% mit batterieelektrischen Fahrzeugen, etwa ein Drittel auch mit Plug-In Hybridfahrzeugen und etwa ein Fünftel mit Hybridfahrzeugen.

Die Hauptgründe für den Kauf eines batterieelektrischen Fahrzeuges waren in den Augen der Teilnehmer der Umweltschutz mit 65% sowie das Interesse an der Technologie mit etwa 50% Zustimmung. Weiterhin erwähnte etwa ein Drittel die geringen Betriebskosten sowie den Test der Technologie und die Vorbildfunktion. Weniger bedeutsam erschienen Prestige mit 12%, die Förderung vom Staat (Subvention in Höhe von 4.000 EUR und der Erlassung der KFZ-Steuer für 10 Jahre) und Vorgaben vom Staat, beide mit weniger als 10% Zustimmung. Beinahe alle Teilnehmer gaben an, dass die Nachhaltigkeit der ausschlaggebende Grund für den Kauf eines batterieelektrischen Fahrzeugs sei und schätzten dieses eher als nachhaltigste Wahl an Verkehrsmitteln ein. Bei der Frage nach den attraktivsten Eigenschaften von batterieelektrischen Fahrzeugen ist die Nachhaltigkeit und das Einsparungspotential von Treibhausgasemissionen, die KFZ-Steuerbefreiung für 10 Jahre, die Kraftstoffeinsparung sowie der Energieverbrauch für die Kunden sehr attraktiv. Zudem ist für die meisten Teilnehmer die monatlichen TCO und Subvention vom Staat für die Kunden attraktiv. Als größte Sorge beim Kauf eines BEVs nannten etwa die Hälfte der Befragten die Ladeinfrastruktur sowie die Reichweite. Etwa ein Viertel erwähnte die hohen Anschaffungskosten.

Potentielle Käufer

Die Ergebnisse mit den „potentiellen Käufer“ zeigen, dass die Manipulation beider Variablen – TCO Information sowie Risiko für ICEVs – erfolgreich war. Die TCO Information hat keinen signifikanten Einfluss auf die Kaufentscheidung. Wenn diese allerdings mit der TCO-Differenz gewichtet wird, hat diese einen hoch signifikanten Einfluss auf die Kaufentscheidung ($p < 0.001$). Das Risiko für ICEVs hat ebenfalls einen hoch signifikanten Einfluss ($p < 0.001$) auf die Auswahl von rein batterieelektrischen Fahrzeugen. Weiterhin besteht ein hoch signifikanter Einfluss auf die Kaufentscheidung für den Ausgangspreis, die Reichweite und das BEV Bewusstsein ($p < 0.001$). Ein positiver, signifikanter Einfluss zeigt sich zudem für die Erfahrung mit batterieelektrischen Fahrzeugen ($p < 0.01$) und die Bildung der Befragten ($p < 0.05$). Für die Jahresfahrleistung besteht ein negativer, höchst signifikanter Einfluss auf die Kaufentscheidung ($p < 0.001$).

Demographische Daten. An der Befragung nahmen mit 59% mehr Männer als Frauen teil. Das Alter der Teilnehmer lag zwischen 30 und 39 Jahren. Der Bildungsstand war durchgehend hoch, sodass die Mehrzahl ein (Fach-)Abitur besaß. Darüber hinaus nahmen überwiegend Personen mit einem Einkommen zwischen 25.000 EUR und 49.999 EUR teil, die meist in Haushalten mit etwa zwei Personen wohnen. Die Teilnehmer kamen durchschnittlich aus Mittelstädten (zwischen 20.000 und 99.999 Einwohnern). Durchschnittlich besaßen zwei Personen des Haushaltes einen PKW Führerschein und es gab etwa ein PKW pro Haushalt. Die durchschnittliche PKW-Jahresfahrleistung lag zwischen 10.000 und 14.999 km. Die Mehrzahl aller Teilnehmer gab an, in den nächsten 13 bis 24 Monaten ein Neufahrzeug kaufen zu wollen.

Elektrofahrzeug spezifische Daten. Mit 98% besaß die Mehrzahl der Befragten kein batterieelektrisches Fahrzeug. Das Interesse an batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen war durchschnittlich. Bereits Erfahrung mit Elektrofahrzeugen im Allgemeinen hatten etwa ein Fünftel der Befragten, etwa 10% mit batterieelektrischen Fahrzeugen und Hybrid-Fahrzeugen, weniger als 3% mit Plug-In Hybridfahrzeugen. Etwa 80% nannten den Umweltschutz als Hauptgrund für den Kauf eines batterieelektrischen Fahrzeuges. Etwa die Hälfte erwähnte die geringen Betriebskosten. Weiterhin wurden von etwa einem Drittel der Befragten die Förderung vom Staat (Subvention in Höhe von 4.000 EUR und der Erlassung der KFZ-Steuer für 10 Jahre) sowie das Interesse an der Technologie erwähnt. Weniger bedeutsam erscheinen mit etwa 20% Zustimmung der Test der Technologie und die Vorbildfunktion. Kaum Grund zum Kauf erwecken Vorgaben vom Staat und Prestige. Ungefähr ein Drittel der Befrag-

ten gaben an, dass die Nachhaltigkeit der ausschlaggebende Grund für den Kauf eines batterieelektrischen Fahrzeugs sei und schätzten dieses eher als nachhaltigste Wahl an Verkehrsmitteln ein. Bei der Frage nach den attraktivsten Eigenschaften von batterieelektrischen Fahrzeugen ist die KFZ-Steuerbefreiung für 10 Jahre, die Nachhaltigkeit und deren Einsparungspotential von Treibhausgasemissionen sowie die Kraftstoffeinsparung für die meisten potentiellen Käufer sehr attraktiv. Zudem ist der Energieverbrauch, die monatliche TCO und Subvention vom Staat attraktiv für die potentiellen Käufer. Die größte Sorge beim Kauf eines batterieelektrischen Fahrzeuges unter den Befragten ist mit etwa 84% die Reichweite. Weiterhin erwähnten über die Hälfte die Ladeinfrastruktur, die Ladedauer und die hohen Anschaffungskosten.

5.5.2. Ermittlung der TCO-Auswirkungen

Das Fahrverbot für ICEVs in deutschen Städten kann etwaige finanzielle nachteilige Folgen mit sich bringen (vgl. Imhof, 2016; Sorge, 2016; Spiegel, 2017, 2016b). Beispielsweise prognostizieren Experten einen Preisrückgang von 20% für Verbrenner (vgl. Spiegel, 2017). Folglich kann die Regulierung zur Reduktion der TCO beitragen.

Die Ergebnisse zeigen für das Jahr 2016, dass die Wirtschaftlichkeit für die bestehenden vier BEVs erhalten bleiben und sieben HEVs (zusätzlich Toyota Yaris, Peugeot 508 RXH) gegenüber ähnlichen konventionellen Fahrzeugen rentabler werden. Beispielsweise bleibt der Mercedes B250e günstiger gegenüber dem Benziner für alle untersuchten Jahresfahrleistungen und gegenüber dem Dieselfahrzeug bis zu 15.000 km. Die TCO liegt nun bei 787,46 EUR pro Monat (1,89 EUR pro km) im Vergleich zum Benziner in Höhe von 822,45 EUR pro Monat (1,97 EUR pro km) sowie dem Dieselfahrzeug in Höhe von 859,88 EUR pro Monat (2,06 EUR pro km), wie in Abbildung 100 dargestellt ist.

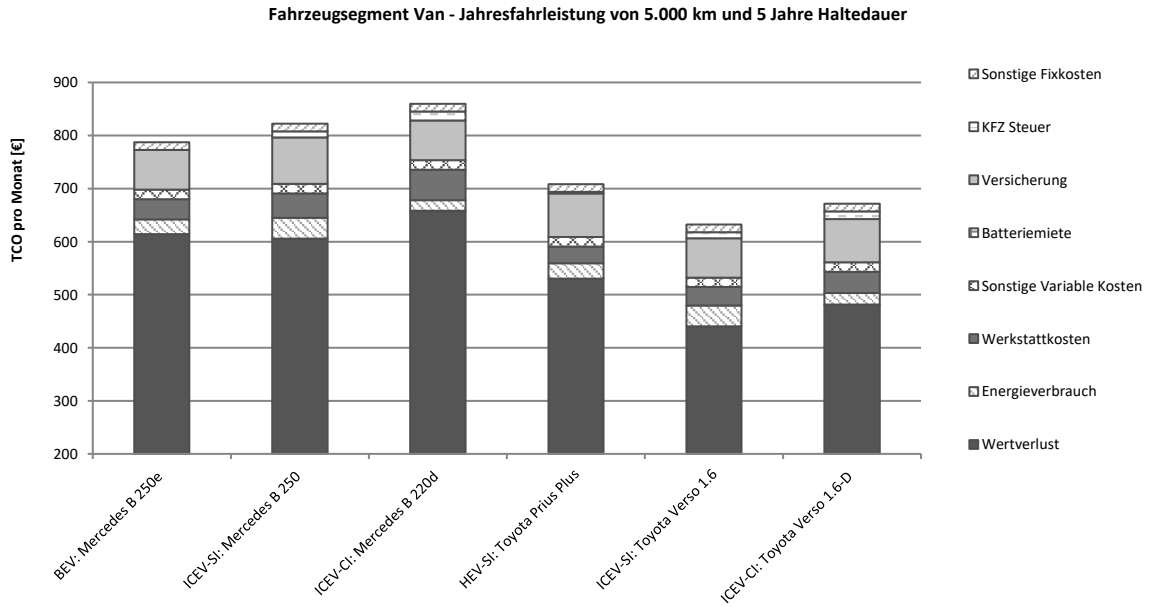


Abbildung 100: AP550 ohne Subvention 2016
Quelle: Eigene Darstellung

Mit der Subvention bleiben auch die bestehenden fünf BEVs kosteneffizienter gegenüber den Verbrennern. Beispielsweise bleibt der Mercedes B250e günstiger gegenüber beiden Verbrennern für alle untersuchten Jahresfahrleistungen. Die TCO liegt nun bei 715,89 EUR pro Monat (1,72 EUR pro km) und ist in Abbildung 101 aufgezeigt.

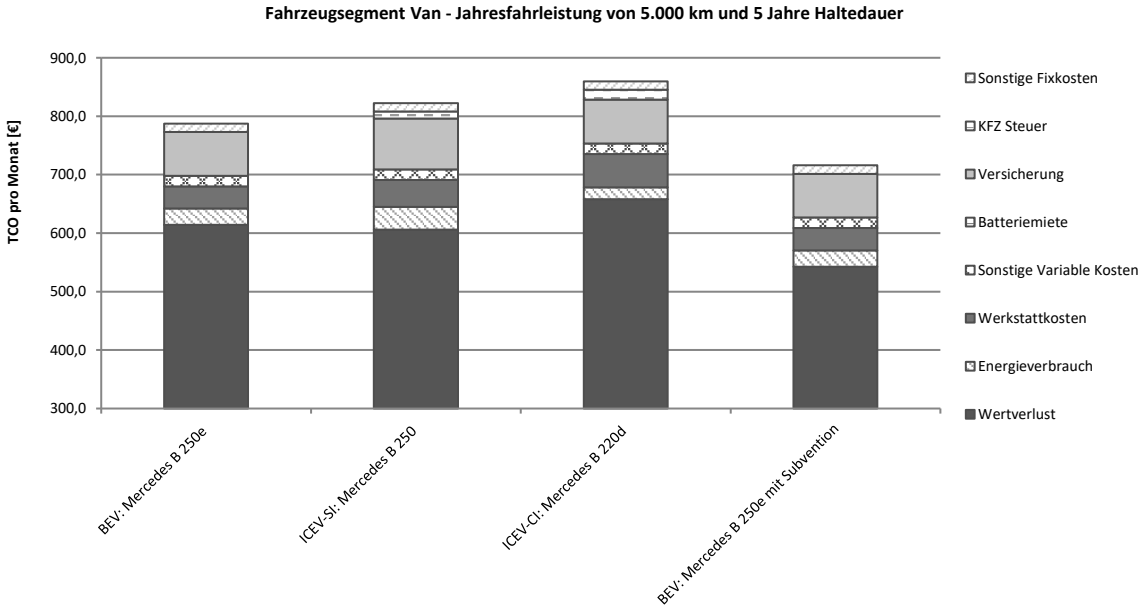


Abbildung 101: AP550 mit Subvention 2016
Quelle: Eigene Darstellung

Den Ergebnissen zufolge haben sowohl die Einführung eines Fahrverbots als auch die Angabe der TCO Information einen positiven Einfluss auf die BEV Kaufentscheidung. Gerade in Hinblick auf den aktuellen Diesel-Skandal und die geäußerte Forderung einer Quote für Elektrofahrzeuge, sind gesetzliche Regulierungen für Verbrennungsfahrzeuge oder zur Förderung von Elektrofahrzeugen von großer Bedeutung für den Ausbau der Elektromobilität. Allerdings bleibt das Fahrzeugsegment „Minis“ weiterhin nicht wirtschaftlich.

5.6. AP 560: Total Cost of Ownership (optimiert)

Das Ziel des Arbeitspakets 560 besteht darin, unter Einbeziehung der erarbeiteten Arbeitspakete die Veränderungen der TCO und der Kostentreiber zu beurteilen. Somit stellt sich die Frage: Welche technologischen Disruptivitäten würden die Ergebnisse und daraus abgeleitete Handlungsempfehlungen in Frage stellen? Diese zentrale Frage wird im Nachfolgenden anhand von unterschiedlichen Perspektiven beantwortet. Im folgenden Abschnitt wird zuerst eine Analyse der vorherigen Arbeitspakete vorgenommen. Darauf aufbauend werden zentrale Handlungsempfehlungen zur Implementierung von Maßnahmebündeln zur Reduzierung der TCO und Steigerung der Kostenreduktion mit dem Ziel der beschleunigten Marktdiffusion elektrisch betriebener Fahrzeuge formuliert.

5.6.1. Vergleich der TCO-Ergebnisse

Bereits heute sind vier BEVs (BMWi3, TeslaS, Mercedes B250e, TeslaX) und fünf HEVs (Honda Jazz, Toyota Auris, Lexus IS, Mercedes-E, Mercedes-S) aus Endkundensicht wirtschaftlicher gegenüber

ähnlichen ICEVs in unterschiedlichen Jahresfahrleistungen trotz Risiken in der Batterie- und Energiepreisentwicklung. Die finanzielle Förderung oder Fahrzeugpreisreduzierung für BEVs im Jahr 2021 wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus, jedoch nicht zugunsten aller betrachteten BEVs. Beispielsweise wird zusätzlich der Renault Zoe Z.E. rentabler gegenüber dem vergleichbaren Dieselfahrzeug (siehe AP510).

Da die Energie- sowie Batteriepreise einen großen Einfluss auf die TCO haben, ist ein Geschäftsmodell mit beiden Kostentreibern in einem Paket gebündelt entwickelt worden. Folglich hat das Geschäftsmodell – „Batteriemiete“ und eine pauschale Abrechnung der Energie wie „Stromtarif-Flatrate“ – einen positiven Einfluss auf die TCO für alle untersuchten Jahresfahrleistungen (siehe AP520). Auch hier bleibt die Wirtschaftlichkeit für die vier BEVs gegenüber den ICEVs erhalten. Zusätzlich ist die Integrierung des „Mercedes B250e“ in das E-Carsharing wirtschaftlich und wirkt sich positiv auf die TCO aus Endkundensicht aus.

Nachdem aktuell die öffentlichen Ladestationen deutliche Kostenunterschiede aufweisen, kann ein einheitliches Bezahlsystem die Komplexität der produktbegleitenden Dienstleistung verringern (siehe AP530). Beispielsweise ist das Schnellladen aktuell teurer als eine 100 km Tankfüllung für ein Dieselfahrzeug. Folglich wirkt sich das Schnellladen negativ auf die Wirtschaftlichkeit von EVs aus. Die Ergebnisse zeigen, dass nur ein BEV (TeslaS) rentabler ist. Jedoch, bleibt die Wirtschaftlichkeit mit der Subvention für die bestehenden vier BEVs gegenüber ähnlichen ICEVs erhalten. Somit ermöglicht ein einheitliches Bezahlsystem dem Kunden das Laden an jeder beliebigen Ladesäule, wie es auch beim Tanken eines konventionellen Fahrzeugs an jeder Tankstelle möglich ist.

Um konkrete Aussagen zur sinnvollen Kooperation und zur Reduktion der TCO zu treffen, ist ein anbieterseitiges Kooperationsmodell mit einem „Vehicle to Grid“ Ansatz für BEVs entwickelt worden (siehe AP540). Die befragten Kunden ziehen das Kooperationsmodell im Vergleich zum Fahrzeugkauf plus Batteriekauf/-miete vor. Zudem wirkt es sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit von EVs aus. Die Ergebnisse zeigen, dass die vier BEVs und fünf HEVs weiterhin wirtschaftlich gegenüber vergleichbaren ICEVs bleiben. Unter der Berücksichtigung von der aktuellen Subvention werden sogar insgesamt sieben BEVs (zusätzlich Renault Zoe Z.E., VW e-Golf, Nissan Leaf) rentabler im Vergleich zu den ICEVs.

Ferner können Maßnahmen wie das Fahrverbot für ICEVs in deutschen Städten die Wirtschaftlichkeit von EVs beeinflussen sowie den Markt ankurbeln (siehe AP550). Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Drohung des Fahrverbots statistisch signifikant mehr Leute BEVs kaufen würden. Zudem bleibt die Wirtschaftlichkeit für die vier BEVs erhalten und insgesamt werden sieben HEVs (zusätzlich Toyota Yaris, Peugeot 508 RXH) rentabler.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Fahrzeugsegment „Minis“ in allen betrachteten Szenarien nicht wirtschaftlich für Endkunden ist. Somit ist ein Handlungsbedarf wie z.B. Preisreduktionen notwendig, um dieses Segment attraktiver für den Kunden zu gestalten. Ein Überblick über die Ergebnisse der wirtschaftlichen EVs gegenüber ähnlichen ICEVs ohne Subvention ist Tabelle 34 sowie mit Subvention Tabelle 35**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu entnehmen.

5.6.2. Empfehlungen für die Implementierung von Maßnahmebündeln

Wie aus den Ergebnissen der experimentellen Studie in AP550 ersichtlich wurde, zweifelt ein Großteil der potentiellen Käufer an der Zuverlässigkeit batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge. Die Sorge der potentiellen Käufer lässt sich im Grunde auf drei Einflussfaktoren zurückführen: Reichweite, Infrastruktur und Preis, was in der Branche auch als R.I.P. abgekürzt wird (vgl. Pander, 2017). Aus diesem

Grund werden im Nachfolgenden für die Bereiche Ladeinfrastruktur, Strombeschaffung und Ressourcen Maßnahmenbündel zur Steigerung der TCO-Werte und der Kostenreduktion beschrieben. Eine Übersicht der Empfehlungen für die Implementierung von Maßnahmenbündeln ist Tabelle 33 dargestellt, wobei die drei Bereiche Ladeinfrastruktur, Strom(-beschaffung) und Ressourcen nicht separat voneinander betrachtet werden sollten, sondern sich überschneiden und gegenseitig bedingen.

Tabelle 33: Übersicht Maßnahmebündel
Quelle: eigene Darstellung

I. Ladeinfrastruktur	II. Strom(-beschaffung)	III. Ressourcen
a. Verfügbarkeit von Ladesäulen	a. Erneuerbare Energien als Quelle	a. Abbau der Rohstoffe
Netzausbau inkl. Schnellladesäulen	Verfügbarkeit	Reichweite
Anschlüsse	Subventionierung	Umweltbedingungen
Gesetzlicher Schutz	Design (z.B. Solar-Ladesäulen)	Soziale Bedingungen
b. Art der Ladesäulen	b. Abrechnungsarten	b. Produktion
Standardisierung	Standardisierung	Effizienz
Design (z.B. Oktopus)	Pauschale Abrechnung (Flatrate)	Batteriekapazität
c. Staatliche Subventionierung von Ladesäulen	c. Interdisziplinäre Kooperation zwischen Anbietern	c. Zweitnutzung / Recycling
Privatkunden	Ladesäulenbetreiber und Energieversorger	Second-Life Werke
Geschäftskunden	Finanzdienstleister	Ausbau der Infrastruktur zur Wiederverwertung
		Prozess zur Verwertbarkeit von Li-Ionen Batterien

Ladeinfrastruktur. Aktuell sind 2.859 Ladestationen mit 6.517 öffentlichen Ladepunkten in Deutschland vorhanden (vgl. BDEW, 2016). Im Vergleich dazu sind beispielsweise in den Niederlanden viermal so viele Ladestationen wie in Deutschland verfügbar (vgl. Specht, 2016a). Deshalb muss die *Verfügbarkeit von Ladestationen* in Deutschland erhöht werden. Dies bedeutet zum einen den flächendeckenden Ausbau von Ladesäulen. Zum anderen sollte vor allem in intelligente Schnellladesäulen investiert werden, z.B. an Tankstellen.

Dadurch können gleichzeitig zum 20 bis 30-minütigen Ladevorgang durch den Aufenthalt in der Tankstelle eine höhere Kundenbindung und weniger Staus erfolgen. Außerdem gibt es bereits Versuche in Städten Straßenlaternen zu Ladesäulen umzufunktionieren (vgl. Dworak, 2014). Zusätzlich sollten gesetzliche Maßnahmen getroffen werden, um dem Elektrofahrzeugbesitzer die Verfügbarkeit der Ladesäulen zu garantieren. Ein gesetzlicher Schutz in Form von Strafen für falsch parkende Verbrennungsfahrzeuge im Stadtbereich könnte dabei in Betracht gezogen werden. Des Weiteren sollte *die Art der Ladesäulen* in Betracht gezogen werden. Durch eine Standardisierung könnte die Vielfalt der Anschlüsse minimiert werden, um die Kompatibilität der Ladesäulen zu erhöhen und damit den Ladevorgang für den Kunden zu vereinfachen. Außerdem sollte am Design der Ladestationen gearbeitet werden, da bereits geladene Elektrofahrzeuge die Ladesäulen blockieren können, ein Abstecken derselben jedoch nicht erlaubt ist. Wie bereits in AP530 beschrieben, könnte ein Oktopus-Ladeanschluss zur Lösung dieser Problematik beitragen. Jedoch müssen die Parkmöglichkeiten für bis zu acht Elektrofahrzeuge an der Ladesäule ebenfalls angepasst werden, was vor allem in Städten zu Problemen bei der Umsetzung führen könnte. Ferner könnte durch *staatliche Subventionen der Ladeinfrastruktur* die Marktdiffusion gesteigert werden. Zwar ist es möglich, ein batterieelektrisches Fahrzeug an einer gewöhnlichen Haushaltssteckdose zu laden, jedoch ist dies mit einer langen Ladedauer verbunden und auch nicht in jedem Fall komfortabel. Durch die Verringerung der Kosten für die Installation einer Heimladesäule erhöht sich der Nutzen für den Kunden und Geschäftsmodelle könnten sowohl auf Privat- als auch Geschäftskunden zugeschnitten werden.

Tabelle 34: Übersicht der TCO Wirtschaftlichkeit ohne Subvention
Quelle: Eigene Darstellung

Elektrofahrzeug	vs. ICEV	TCO_C Wirtschaftlichkeit für bestimmte Jahresfahrleistung in km						
		AP510 2016	AP510 Kostenrisiken 2016	AP510 Kostenrisiken 2021	AP520 2016	AP530 2016	AP540 2016	AP550 2016
BMW i3 (BEV)	Benzin	-	-	Alle	Alle	-	Alle	Alle
	Diesel	Bis 15.000	Bis 10.000	Alle	Alle	-	Alle	Alle
Renault Zoe Z.E. (BEV)	Benzin	-	-	-	-	-	-	-
	Diesel	-	-	Bis 5.000	-	-	-	-
Toyota Yaris (HEV)	Benzin	-	-	-	-	-	-	-
	Diesel	-	-	-	-	-	-	Bis 5.000
Honda Jazz (HEV)	Benzin	8 – 30.000	Alle	Alle	8 – 30.000	8 – 30.000	8 – 30.000	Alle
Toyota Auris (HEV)	Benzin	30.000	30.000	20 – 30.000	30.000	30.000	30.000	10 – 30.000
	Diesel	Bis 15.000	Bis 15.000	Alle	Bis 15.000	Bis 15.000	Bis 15.000	Alle
Peugeot 508RXH (HEV)	Diesel	-	-	-	-	-	-	Bis 15.000
Lexus IS (HEV)	Benzin	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle
Mercedes-E (HEV)	Benzin	20 – 30.000	20 – 30.000	30.000	20 – 30.000	20 – 30.000	20 – 30.000	Alle
	Diesel	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle
Tesla Model S (BEV)	Benzin	Alle	Alle	Alle	Alle	Bis 20.000	Alle	Bis 20.000
	Diesel	Bis 10.000	Bis 10.000	Alle	Alle	Bis 8.000	Alle	Bis 20.000
Mercedes-S (HEV)	Benzin	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle
	Diesel	-	-	-	-	-	-	Bis 20.000
Mercedes B250e (BEV)	Benzin	-	-	Alle	Alle	-	Alle	Alle
	Diesel	Bis 8.000	Bis 8.000	Alle	Alle	-	Bis 20.000	Bis 15.000
Tesla X (BEV)	Benzin	Bis 5.000	Bis 5.000	Bis 10.000	Alle	-	Alle	Bis 10.000
	Diesel	-	-	Bis 5.000	Alle	-	Bis 15.000	Bis 8.000

Tabelle 35: Übersicht der TCO Wirtschaftlichkeit mit Subvention
Quelle: eigene Darstellung

Elektrofahrzeug	**vs.**	**TCO_C Wirtschaftlichkeit für bestimmte Jahresfahrleistung in km**				
	ICEV	**AP510 2016**	**AP520 2016**	**AP530 2016**	**AP540 2016**	**AP550 2016**
BMW i3 (BEV)	Benzin	Alle	Alle	Bis 10.000	Alle	Alle
	Diesel	Alle	Alle	Bis 15.000	Alle	Alle
Renault Zoe Z.E. (BEV)	Benzin	-	20 – 30.000	-	-	Bis 5.000
	Diesel	Bis 5.000	30.000	-	Bis 5.000	Bis 5.000
VW e-Golf (BEV	Benzin	-	-	-	Bis 5.000	-
	Diesel	-	-	-	Bis 10.000	-
Nissan Leaf (BEV)	Benzin	-	20 – 30.000	-	-	-
	Diesel	-	Alle	-	Bis 10.000	-
Toyota Yaris (HEV)	Benzin	-	-	-	-	-
	Diesel	-	-	-	-	Bis 5.000
Honda Jazz (HEV)	Benzin	-	8 – 30.000	8 – 30.000	8 – 30.000	Alle
Toyota Auris (HEV)	Benzin	-	30.000	30.000	30.000	10 – 30.000
	Diesel	-	Bis 15.000	Bis 15.000	Bis 15.000	Alle
Peogeot 508 RXH (HEV)	Diesel	-	-	-	-	Bis 15.000
Lexus IS (HEV)	Benzin	-	Alle	Alle	Alle	Alle
Mercedes-E (HEV)	Benzin	-	20 – 30.000	20 - 30.000	20 – 30.000	Alle
	Diesel	-	Alle	Alle	Alle	Alle
Tesla Model S (BEV)	Benzin	Alle	Alle	Bis 20.000	Alle	Alle
	Diesel	Bis 10.000	Alle	Bis 8.000	Alle	Bis 20.000
Mercedes-S (HEV)	Benzin	-	Alle	Alle	Alle	Alle
	Diesel	-	-	-	-	Bis 20.000
Mercedes B250e (BEV)	Benzin	Alle	Alle	Bis 5.000	Alle	Alle
	Diesel	Bis 20.000	Alle	Bis 10.000	Alle	Alle
Tesla X (BEV)	Benzin	Bis 10.000	Alle	Bis 5.000	Alle	Bis 15.000
	Diesel	Bis 5.000	Alle	Bis 5.000	Bis 20.000	Bis 10.000

Strombeschaffung. Die wesentlichen Kostentreiber von EVs sind der Batteriepreis sowie der Energieverbrauch. Die Batteriepreise sind sowohl von Entwicklungsfortschritten und Skaleneffekten abhängig, als auch vom technologischen Fortschritt bei der Leistung und der Preisentwicklung. Im Hinblick auf die Kosten des Energieverbrauchs bestehen zwei Risikofaktoren: zum einen ist der Strompreis abhängig von dem Anteil erneuerbarer Energien, zum anderen sind die Rohölpreise von Bedeutung. Für das Laden von Elektrofahrzeugen muss in jedem Fall *Strom aus erneuerbaren Energien* verwendet werden, da ansonsten die Umweltvorteile eines EVs im Vergleich zu einem ICEV nicht mehr ins Gewicht fallen. Die Investition in eine flächendeckende günstige Verfügbarkeit von CO_2-neutral hergestelltem Strom ist deshalb von großer Wichtigkeit. Durch eine staatliche Subventionierung sollte deshalb die Verbindung von erneuerbaren Energien mit der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Betracht gezogen werden. Beispielsweise kann eine Kombination von Solarstrom und Ladesäulen in Form von Solarladestationen für die Versorgung der Elektrofahrzeuge mit grünem Strom verwendet werden. Eine Subventionierung von erneuerbaren Energien sollte auch zu einer Erhöhung der Vorhersagekraft des Strompreises für erneuerbare Energien beitragen, welche auf lange Sicht hin unsicher ist. Des Weiteren muss im Bereich der Strombeschaffung die *Bezahlung des aufgeladenen Stroms* für den Endkunden vereinfacht werden. Wie bereits in AP530 ausgearbeitet, könnte durch eine Standardisierung eine höhere Kundenorientierung im Hinblick auf die große Vielfalt an Anbietern und Abrechnungssystemen erfolgen. Durch das zusätzliche Angebot von Flatrate-Tarifen könnte die Nachfrage vor allem bei Kunden mit hohem Bedarf an Ladevorgängen gesteigert werden. Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung der standardisierten Abrechnungsarten ist eine *interdisziplinäre Zusammenarbeit* von allen beteiligten Partnern, wie Ladesäulenbetreibern, Energieversorgern und Finanzdienstleistern.

Ressourcen. Bei Elektrofahrzeugbatterien muss auf einen *nachhaltigen Abbau der Rohstoffe* geachtet werden. Dies gilt beispielsweise für die weltweiten Vorräte an Lithium, welche endlich sind und derzeit auf etwa 30 Jahre geschätzt werden (vgl. Odenwald, 2009). Durch die niedrige statistische Reichweite lässt sich die tatsächliche zukünftige Nachfrage an Lithium nur schwer abschätzen und somit ist die Vorhersage der Preise für Lithium anfällig für Unsicherheiten. Außerdem müssen die Bedingungen des Rohstoffabbaus, sowohl in Hinblick auf gesellschaftliche als auch Umweltaspekte, in Betracht gezogen werden. Wichtig ist, dass die Gewinnung der Ressourcen auf nachhaltige Weise geschieht, da ansonsten die wahrgenommenen Vorteile von EVs bezüglich der Nachhaltigkeit beim Endkunden geschmälert werden und dies zu einem Rückgang der Nachfrage führen könnte. Durch die Endlichkeit der Lithiumvorräte muss jedoch eine langfristige Umstellung der weltweiten ICEVs auf BEVs mit einer Investition in Forschung nach alternativen Rohstoffen für Batterietechnik Hand in Hand gehen, denn es wäre nicht möglich, den aktuellen und zukünftigen globalen Bedarf an Fahrzeugbatterien nur mit Lithium-Ionen Batterien zu decken. Weiterhin sollte im Bereich der Ressourcen *bei der Produktion von Lithium-Ionen Batterien* eine höhere Effizienz erreicht werden, um für eine Reduktion an benötigten Rohstoffen zu sorgen. Erreicht man zusätzlich eine höhere Kapazität der Lithium-Ionen Batterien, trägt dies zu einer höheren Reichweite bei EVs bei und hilft somit wiederum die Nachfrage an EVs auszubauen. Da die Reichweite von BEVs in AP550 bei den Kunden als auch potentiellen Käufern als Nachteil eingeschätzt wurde, sollte der Fokus verstärkt auf diese Problematik gelegt werden. Zuletzt sollte wegen der abnehmenden realen Batteriekapazität von Elektrofahrzeugbatterien und der Endlichkeit der verfügbaren Rohstoffe ein Blick auf die Verwendung der Lithium-Ionen Batterien nach ihrer Nutzungsdauer geworfen werden. Hierbei stehen sowohl die *Zweitnutzung als auch das Recycling* als Alternativen zur Verfügung. Ein Pilotprojekt für die Zweitnutzung in Form eines Batteriespeichers wird von Daimler in Kooperation mit dem Recycling-Unternehmen Remondis betrieben, welcher der größte Second-Life-Batteriespeicher weltweit ist (vgl. Specht, 2016b). Für das Recycling von verbrauchten Batterien muss in den Ausbau der Infrastruktur investiert werden. Ein Prozess zur Rückgewinnung der in Lithium-Ionen Batterien enthaltenen Rohstoffe wurde von dem belgischen Unternehmen Umicore entwickelt, der

UHT-Prozess (ultra high temperature), bei dem weniger als ein Prozent an Rückständen entstehen soll (vgl. Schwarzer, 2015).

5.7. Literaturverzeichnis

ADAC, 2015. ADAC Autokosten - Was kostet mein Auto tatsächlich [WWW Document]. ADAC. URL https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/default.aspx (zugegriffen 8.2.15).

ADAC, 2014. Zwischen Herstellerangaben und Wirklichkeit - Wie viel darf mein Auto verbrauchen? [WWW Document]. ADAC. URL https://www.adac.de/infotestrat/

fahrzeugkauf-und-verkauf/neufahrzeuge/verbrauch/default.aspx?prevPageNFB=1 (zugegriffen 11.2.15).

ADAC, 2012. ADAC Autokosten 2012, Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. Munich.

Armbruster, A., 2017. Merkel kassiert Deutschlands Elektroauto-Ziel [WWW Document]. Frankfurter Allg. Zeitung. URL http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/

wirtschaftspolitik/neue-antriebstechnik-merkel-kassiert-deutschlands-elektroauto-ziel-15017473.html (zugegriffen 5.16.17).

Baum, H., Heinicke, B., Mennecke, C., 2012. Carsharing als alternative Nutzungsform für Elektromobilität. Zeitschrift für Verkehrswiss. 2, 63–109.

BDEW, 2016. BDEW-Erhebung Elektromobilität [WWW Document]. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. URL https://www.bdew.de/internet.nsf/id/bdew-erhebung-elektromobilitaet-de (zugegriffen 4.2.16).

BDEW, 2015. Stromrechnung für Haushalte [WWW Document]. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. URL https://www.bdew.de/internet.nsf/id/preise-de (zugegriffen 8.19.15).

Bjerkan, K.Y., Nørbech, T.E., Nordtømme, M.E., 2016. Incentives for promoting battery electric vehicle (BEV) adoption in Norway. Transp. Res. Part D 43, 169–180.

BMVI, 2016. Minister Dobrindt zur Förderung der Elektromobilität [WWW Document]. Bundesministerium für Verkehr und Digit. Infrastruktur. URL http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/foerderung-elektromobilitaet.html (zugegriffen 4.28.16).

Bozem, K., Nagl, A., Rath, V., Haubrock, A., 2013. Elektromobilität: Kundensicht, Strategien, Geschäftsmodelle. Springer Vieweg, Wiesbaden.

Bubeck, S., Tomaschek, J., Fahl, U., 2016. Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany. Transp. Policy 50, 63–77.

Bundesregierung, 2016. Verbesserte Förderung von Elektrofahrzeugen [WWW Document]. Bundesregierung. URL https://www.bundesregierung.de/Content/DE/

Infodienst/2016/05/2016-05-18-elektromobilitaet1/2016-05-18-elektromobilitaet.html (zugegriffen 5.19.16).

Deutsche Bundesbank, 2016. Loans for consumption to households/instalment credits [WWW Document]. URL https://www.bundesbank.de/Redaktion/EN/

Downloads/Statistics/Money_Capital_Markets/Interest_Rates_Yields/S11BATRATE.pdf?__blob=publicationFile (zugegriffen 2.2.16).

Dexheimer, V., 2003. Hedonic methods of price measurement for used cars, German Federal Statistical Office. Wiesbaden.

Dworak, M., 2014. Lampen zu Zapfsäulen [WWW Document]. Die Zeit. URL http://www.zeit.de/2014/21/ubitricity-elektroauto-stromzapfstellen (zugegriffen 9.8.16).

Econoмento, 2014. Tesla Motors kündigt erste Batteriewechsel-Stationen für Kalifornien an [WWW Document]. URL http://ecomento.tv/2014/02/06/tesla-motors-kuendigt-elektroauto-batteriewechsel-stationen-fuer-kalifornien-an/ (zugegriffen 8.15.15).

EnBW, 2016. EnBW Elektronauten Prepaid- Ladekarte [WWW Document]. EnBW. URL https://www.enbw.com/privatkunden/tarife-und-produkte/e-mobilitaet/enbw-elektronauten-prepaid-ladekarte/index.html (zugegriffen 5.31.16).

EWE AG, 2016. E-Auto laden mit der EWE-Stromtankkarte [WWW Document]. EWE. URL http://www.ewe.de/privatkunden/service/ratgeber/smart-unterwegs/elektromobilitaet/stromtankkarte (zugegriffen 5.31.16).

Faria, R., Marques, P., Moura, P., Freire, F., Delgado, J., de Almeida, A.T., 2013. Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. Renew. Sustain. Energy Rev. 24, 271–287.

Fetene, G.M., Prato, C.G., Kaplan, S., Mabit, S.L., Jensen, A.F., 2016. Harnessing big-data for estimating the energy consumption and driving range of electric vehicles, in: 95th Annual Meeting of the Transportation Research. S. 0–14.

Frahm, C., Pander, J., 2017. Zapfsäulen zu Steckdosen. Die Zeit 1–122.

Gammelin, C., Balser, M., 2016. Förderung soll 400 000 E-Autos auf die Straße bringen [WWW Document]. Süddeutsche Zeitschrift. URL http://www.sueddeutsche.de/auto

/elektromobilitaet-foerderung-soll-e-autos-auf-die-strasse-bringen-1.2968895 (zugegriffen 4.27.16).

Habi, R., 2015. Akku-Studie überrascht: Sind Elektroautos schon bald günstiger als Benziner? WirtschaftsWoche Green 1–2.

Hacker, F., 2015. Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen, IKT für Elektomobilität. Berlin.

Hellgren, J., 2007. Life cycle cost analysis of a car, a city bus and an intercity bus powertrain for year 2005 and 2020. Energy Policy 35, 39–49.

Hill, N., Dun, C., Watson, R., James, K., 2015. 2015 government GHG conversion factors for company reporting: Methodology paper for emission factors final report, Department of Energy & Climate Change. London.

Hill, N., Varma, A., Harries, J., Norris, J., Kay, D., 2012. A review of the efficiency and cost assumptions for road transport vehicles to 2050, AEA Technology plc. Oxfordshire.

Hou, C., Wang, H., Ouyang, M., 2014. Battery sizing for plug-in hybrid electric vehicles in Beijing: A TCO model based analysis. Energies 7, 5374–5399.

Imhof, T., 2016. Diese Länder planen die Abschaffung des Verbrennungsmotors [WWW Document]. Die Welt. URL http://www.welt.de/motor/modelle/article154606460/Diese-Laender-planen-die-Abschaffung-des-Verbrennungsmotors.html (zugegriffen 5.6.16).

Jakobsson, N., Gnann, T., Plötz, P., Sprei, F., Karlsson, S., 2016. Are multi-car households better suited for battery electric vehicles? – Driving patterns and economics in Sweden and Germany. Transp. Res. Part C 65, 1–15.

Kraftfahrt-Bundesamt, 2017. Pressemitteilung Nr. 01/2017 - Fahrzeugzulassungen im Dezember 2016 - Jahresbilanz [WWW Document]. Kraftfahrt-Bundesamt. URL http://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2017/Fahrzeugzulassungen/pm01_2017_n_12_16_pm_komplett.html?nn=1558870 (zugegriffen 1.26.17).

Kraftfahrt-Bundesamt, 2015. Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen im Jahr 2014, Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg.

Ladenetz, 2016. Grenzenlos laden mit ladenetz.de [WWW Document]. Ladenetz. URL www.ladenetz.de/laden (zugegriffen 5.31.16).

Lebeau, K., Lebeau, P., Macharis, C., Van Mierlo, J., 2013. How expensive are electric vehicles? A total cost of ownership analysis. Electr. Veh. Symp. Exhib. 6, 1–22.

Lebeau, P., Macharis, C., Mierlo, J. Van, 2016. Exploring the choice of battery electric vehicles in city logistics: A conjoint-based choice analysis. Transp. Res. Part E 91, 245–258.

Lüder, C., 2014. Die Mischung machts teuer: Das Geschäft mit Auto-Extras [WWW Document]. Aachener-Zeitung. URL http://www.aachener-zeitung.de/news/auto/die-mischung-machts-teuer-das-geschaeft-mit-auto-extras-1.884660 (zugegriffen 8.1.15).

MacDonald, J., 2016. Electric vehicles to be 35% of global new car sales by 2040. Bloom. New Energy Financ. 1–2.

Madina, C., Zamora, I., Zabala, E., 2016. Methodology for assessing electric vehicle charging infrastructure business models. Energy Policy 89, 284–293.

Mercedes-Benz-Bank, 2014. Einzigartiges Mobilitätspaket für die B-Klasse Electric Drive [WWW Document]. Daimler AG. URL https://www.mercedes-benz-bank.de/

intrade/cms/Presse_2014_mobilitaetsdienstleistungen.html (zugegriffen 12.1.15).

Mohr, B., 2015. Der Automarkt in Deutschland, Creditreform Rating AG. Neuss.

MWV, 2015. Jährliche Verbraucherpreise für Mineralölprodukte 1950-2015 (inkl. MwSt.) [WWW Document]. Miner. e.V. URL http://www.mwv.de/index.php/daten/statistikenpreise/?loc=8 (zugegriffen 2.4.16).

Neubauer, J., Smith, K., Wood, E., Pesaran, A., 2015. Identifying and overcoming critical barriers to widespread second use of PEV batteries, National Renewable Energy Laboratory. Denver.

Nykvist, B., Nilsson, M., 2015. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. Nat. Clim. Chang. 5, 329–332.

Odenwald, M., 2009. Das Ende der Reserven [WWW Document]. Focus (Madison). URL http://www.focus.de/wissen/weltraum/odenwalds_universum/tid-16100/lithium-das-ende-der-reserven_aid_451604.html (zugegriffen 9.8.16).

Pander, J., 2017. Es blitzt im Norden [WWW Document]. Die Zeit. URL http://www.zeit.de/

2017/20/opel-norwegen-ampera-e-elektroauto/seite-2 (zugegriffen 5.13.17).

Peters, A., Dütschke, E., 2010. Zur Nutzerakzeptanz von Elektromobilität: Analyse aus Expertensicht, Fraunhofer ISI. Karlsruhe.

Pkw-Steuer, 2015. Neue Autosteuer - Kfz Steuerrechner [WWW Document]. URL http://www.pkw-steuer.de/kfz-steuerrechner.html (zugegriffen 8.27.15).

San Roma, T.G., Momber, I., Abbad, M.R., 2011. Regulatory framework and business models for charging plug-in electric vehicles: Infrastructure, agents, and commercial relationships. Energy Policy 39, 6360–6375.

Schlesinger, M., Lindenberger, D., Lutz, C., 2014. Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose, EWI - Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln. Basel/Cologne/Osnabrueck.

Schwarzer, C.M., 2015. Die Mär vom Sondermüll auf Rädern [WWW Document]. Die Zeit. URL http://www.zeit.de/mobilitaet/2015-08/elektromobilitaet-batterie-recycling (zugegriffen 9.12.16).

Sokolov, D.A., 2016. E-Autos verbrauchen viel mehr Strom als angegeben [WWW Document]. Heise. URL http://www.heise.de/newsticker/meldung/E-Autos-verbrauchen-viel-mehr-Strom-als-angegeben-3081667.html (zugegriffen 2.2.16).

Sorge, N.-V., 2016. Diese Länder planen Verbot für Diesel und Benziner [WWW Document]. Manager-Magazin. URL http://www.manager-magazin.de/

unternehmen/autoindustrie/abgasskandal-mehrere-laender-planen-verbrenner-verbot-a-1087099.html (zugegriffen 5.9.16).

Specht, M., 2016a. Die Last mit dem Stromladen [WWW Document]. Die Zeit. URL http://www.zeit.de/mobilitaet/2016-10/elektromobilitaet-elektroautos-strom-aufladung-infrastruktur (zugegriffen 11.5.16).

Specht, M., 2016b. Das zweite Leben nach dem Elektroauto [WWW Document]. Die Zeit. URL http://www.zeit.de/mobilitaet/2016-11/batterie-recycling-elektroauto-speicher-stromnetz (zugegriffen 12.12.16).

Spiegel, 2017. Händler-Verband beklagt Preisverfall bei Dieselautos [WWW Document]. Spiegel. URL http://www.spiegel.de/auto/aktuell/fahrverbote-haendler-verband-beklagt-preisverfall-bei-dieselautos-a-1135845.html (zugegriffen 2.23.17).

Spiegel, 2016a. Ladenotstand in Deutschland [WWW Document]. Spiegel. URL http://www.spiegel.de/auto/aktuell/elektro-autos-ausbau-von-ladesaeulen-kommt-kaum-voran-a-1099218.html (zugegriffen 7.15.16).

Spiegel, 2016b. Fahrverbote in Innenstädten - was meinen Sie? [WWW Document]. Spiegel. URL http://www.spiegel.de/auto/aktuell/fahrverbote-in-innenstaedten-was-halten-sie-davon-a-1126375.html (zugegriffen 12.20.16).

Statista, 2015. Prognose zur Preisentwicklung von Rohöl, Benzin, Diesel und Erdgas von 2010 bis zum Jahr 2040 [WWW Document]. Statista. URL http://de.statista.com/

statistik/daten/studie/285608/umfrage/rohoel-benzin-diesel-und-erdgas-prognose-zur-preisentwicklung/ (zugegriffen 8.15.15).

Stromnetz Hamburg, 2016. Zugang zur Hamburger Ladeinfrastruktur [WWW Document]. Stromnetz. URL www.stromnetz.hamburg/ueber-uns/innovationen/e-mobility/zugang-zur-ladeinfrastruktur (zugegriffen 5.31.16).

Verbrauchs- und Medienanalyse -VuMA, 2016. Autofahrer in Deutschland nach selbst gefahrenen Kilometern pro Jahr von 2010 bis 2015 (Personen in Millionen) [WWW Document]. Statista. URL http://de.statista.com/statistik/daten/

studie/183003/umfrage/pkw---gefahrene-kilometer-pro-jahr/ (zugegriffen 3.6.16).

Waldor, K., 2014. Kraftstoffverbrauch: Erdgasfahrzeuge weichen in der Praxis am wenigsten von den Herstellerangaben ab [WWW Document]. Erdgas Mob. GmbH. URL https://www.erdgas-mobil.de/fileadmin/downloads/Presse/

140703_PM_Verbrauchswerte_FINAL.pdf (zugegriffen 9.25.15).

Wu, G., Inderbitzin, A., Bening, C., 2015. Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments. Energy Policy 80, 196–214.

6. AP 600: Flottentest

6.1. AP 610: Aufbau und Verkauf B-Klasse ED und PHEV von Mercedes-Benz

6.1.1. Ziel des Arbeitspakets

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, Kunden zu gewinnen, die mit ihren Mercedes-Benz Batterie- oder Plug-In-Hybrid Fahrzeugen am Projekt teilnehmen.

6.1.2. Aktivitäten, Verlauf und Ergebnisse

Die Fahrzeuge, mit denen der Flottentest stattfindet, bilden die Basis für die anderen Arbeitspakete im Projekt und sind daher für alle Partner wichtig. Zu Beginn des Projektes lag der Fokus zunächst darauf, bis zu 200 Kunden zu gewinnen, die ihr Fahrzeug mit einem Datenlogger ausstatten lassen und somit am Projekt teilnehmen.

Zu diesem Zweck begann die technische Projektkoordination der Daimler AG mit der Definition des Kundenakquiseprozesses. In diesem wurden alle Stufen von der Kundenansprache bis hin zur Übernahme des Fahrzeugs im Projekt aufgestellt. Damit einher ging die Bestimmung der beteiligten Personen innerhalb der Forschung & Entwicklung der Daimler AG, des Mercedes-Benz Vertriebs, der Autohäuser und des Projektpartners Universität Siegen.

Der Prozess kann in 3 Schritte aufgegliedert werden und wird im Folgenden detailliert beschrieben:

- Kundenansprache durch Mercedes-Benz Händler, Flyer, Internet, Firmenangehörigengeschäft
- Sammlung und Konsolidierung der Kundendaten über eMERGE II Homepage durch Uni Siegen
- Vertragsabschluss durch Forschung & Entwicklung Daimler

Zuvor wird auf die im Projekt eingesetzten Fahrzeuge eingegangen.

Fahrzeuge

Im Projekt kamen Mercedes-Benz Fahrzeuge sowohl aus verschiedenen Segmenten als auch mit unterschiedlichen Antriebssträngen zum Einsatz. Neben der rein elektrisch angetriebenen B-Klasse B250e wurden die Plug-In Hybride der C- und E-Klasse untersucht. Während die B-Klasse im Bereich der Minivans angesiedelt ist, handelt es sich bei C- und E-Klasse um Fahrzeuge aus der (oberen) Mittelklasse.

Abbildung 102: Mercedes-Benz B-Klasse B250e

Vor allem auf technischer Seite unterschieden sich demenentsprechend die Eckpunkte der Antriebsstränge. Während im B250e eine große Batterie mit 28 kWh Kapazität verbaut ist, ist die in den Plug-In Hybriden mit 6,4 kWh vergleichsweise kleiner. Dies wirkt sich natürlich unmittelbar auf die elektrische Reichweite der Fahrzeuge aus: beim B250e stehen dem Kunden komfortable 200 km zur Verfügung, bei den Plug-In Hybriden gut 30 km.

Abbildung 103: Mercedes-Benz C-Klasse C350e

Bei den Plug-In Hybriden liegt der Schwerpunkt also nach wie vor auf dem Verbrennungsmotor, der intelligent um einen elektrischen Antrieb ergänzt wird, der für die Abdeckung der meisten Alltagsfahrten ausreicht. Damit die Partner diese Differenzierung zwischen rein elektrischem und Plug-In Hybrid Fahrzeug in ihren Untersuchungen aufgreifen konnten, wurden die durch die Datenlogger erfassten Daten um Verbrennungsmotor spezifische Parameter wie z.B. Spritverbrauch, erweitert.

Abbildung 104: Mercedes-Benz E-Klasse E350e

Zu Beginn des Projekts war eine Überlegung auch S-Klasse Kunden mit dem S500e in das Projekt einzubeziehen. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Personengruppe, die S-Klasse fährt, nicht auf die Kundenakquise ansprang. Es ist zu vermuten, dass die Kunden die Aufwandsentschädigung als nicht relevant ansah, um in einem Projekt Verpflichtungen (Datenloggerverbau, Interviews) einzugehen. Des Weiteren war bei den B250e Kunden noch zu spüren, dass hier eher „E-Enthusiasten“ Kunde waren, die nicht wegen des Geldes am Projekt teilnahmen, sondern um sich in die Entwicklung der Elektromobilität zu engagieren. Beide Effekte waren auch bei den E-Klasse Kunden untergeordnet, so dass letztendlich nur ein E350e im Projekt aufgenommen und das Fahrzeug mit einem Datenlogger ausgerüstet wurde. Für die Untersuchungen war dies nachrangig, da ausreichend C350e Plug-In Hybrid Kunden gewonnen werden konnten.

In Tabelle 36 wird eine Übersicht über die technischen Daten der drei eingesetzten Fahrzeugtypen gegeben.

Tabelle 36: Technische Daten der eMERGE II Fahrzeuge

Quelle: Produktbroschüren der Mercedes-Benz B-Klasse, C-Klasse und E-Klasse 2017

Technische Daten	Mercedes-Benz B-Klasse B250e	Mercedes-Benz C-Klasse C350e	Mercedes-Benz E-Klasse E350e
Batteriekapazität [kWh]	28,0	6,4	6,4
Nennleistung [kW]	132 peak	155 + 60 peak	155 + 65 peak
Beschleunigung von 0 auf 100 km/h [s]	7,9	5,9	6,2
Ladezeit von 20-100% an einer Steckdose (230V/13A) [h]	9	3,1	3,1
Ladezeit von 20-100% an einer Steckdose (400V/16A) [h]	2,4	1,5	1,5
Elektrischer Energieverbrauch NEFZ [kWh]	17,9	13,2	11,5
Elektrische Reichweite NEFZ [km]	198	31	33

Kundenansprache:

Bereits beim Aufsetzen des Projektes war klar, dass ein zentraler Punkt die Akquise der bis zu 200 Kunden sein würde, die an dem Projekt maximal teilnehmen konnten. Daher hatte die Daimler AG ein besonderes Augenmerk auf die **Kundenansprache** gelegt. Von Beginn an wurde der Mercedes-Benz Vertrieb Deutschland eingebunden, um auf allen verfügbaren Kommunikationskanälen die stringente Ansprache der Kunden zu gewährleisten.

Als wichtigster Kanal wurden die Autohäuser identifiziert, die tagtäglich mit Kunden in Kontakt stehen und deren Verkäufer ihre Kunden und deren Fahrzeuge kennen. Daher wurde viel Wert auf die Erstellung eines **Informationsleitfadens** zum Förderprojekt eMERGE II gelegt, der den Verkäufern der involvierten Mercedes-Benz Händler vor Ort für die Kundenansprache dienen sollte. Hierin waren sämtliche Informationen zum Projekt – also Laufzeit, Inhalt, Modalitäten der Aufwandsentschädigung, Erwartungen an den Kunden – dargestellt. Flankiert wurde dieser Leitfaden, der sich an die Verkäufer richtete, von einem Kundenflyer, der in den Autohäusern ausgelegt wurde und mit dem die Kunden direkt angesprochen werden sollten.

Sammlung und Konsolidierung:

Neben der Ansprache im Autohaus wurde zusammen mit der Universität Siegen die eMERGE II Homepage so angepasst, dass dort ebenfalls alle Informationen zum Projekt einsehbar waren. Somit standen

auch hier die Inhalte des Kundenflyers zur Verfügung und die Webseite konnte fortan als Kundenakquiseinstrument fungieren.

Darüber hinaus implementierte die Universität Siegen ein Formular, auf dem sich am Projekt Interessierte eintragen konnten. Über diesen Weg konnte sichergestellt werden, dass alle relevanten Informationen der Kunden aufgenommen und auch gleich auf Plausibilität geprüft wurden, was die Voraussetzung für die weitere digitale Weiterverarbeitung darstellte.

Die Kunden, die sich im Portal eingetragen hatten, wurden anschließend von der Universität Siegen an Daimler weitergegeben, wo der administrative Teil abgewickelt wurde, um die Kunden auch vertraglich in das Projekt einzugliedern.

Vertragsabschluss

Die Grundlage für die Teilnahme der Kunden am Projekt war, wie schon in eMERGE, eine „Vereinbarung zur Teilnahme am Forschungsvorhaben eMERGE II“. Diese wurde innerhalb der Daimler AG von der technischen Koordination gemeinsam mit dem Fördermittelcontrolling erstellt. Hierin sind die Rechte und Pflichten der Zusammenarbeit geregelt. Im wesentlich geht es darum, dass der Kunde das Einverständnis gibt, einen Datenlogger im Fahrzeug zu verbauen und nach Projektende wieder ausbauen zu lassen. Die Kosten dafür trägt Daimler. Des Weiteren verpflichtet sich der Kunden zur Teilnahme an projektbezogenen Befragungen.

Im Gegenzug ist hierin festgelegt, dass der Kunde maximal 12 Monate am Projekt teilnehmen kann und dafür eine Aufwandsentschädigung von 150 Euro (B-Klasse Kunden) bzw. 120 Euro (Plug-In Hybrid Kunden) pro Monat erhält.

Um sicherzustellen, dass alle Daten (z.B. Personalausweis-Nr., Bankverbindung, Postanschrift, Email Adressen) und Unterschriften sowohl des Kunden als auch der Verantwortlichen bei Daimler vorliegen, wurde ein Prozess innerhalb des Konzerns aufgesetzt, der dies gewährleistete.

Im 1. Halbjahr 2015 waren die Vorarbeiten zur Kundenakquise – also das Aufsetzen des Informationsleitfadens, der Prozess der Kundenakquise, der Kundenflyer und die Zusatzvereinbarung – abgeschlossen und es begann im dritten Quartal die Kundenakquise. Dazu wurden das Informationsmaterial an die Mercedes-Benz Händler verteilt. Da es sich absehen ließ, dass die ursprünglich anvisierten Modellregionen ein zu enges Kundenspektrum beinhalteten, entschloss man sich Mitte des Jahres dazu, die Kundenansprache auf ganz Deutschland auszudehnen. Dementsprechend nutzte man den Kommunikationskanal des Mercedes-Benz Vertrieb Deutschlands, der über einen Vertriebsnewsletter über das Projekt eMERGE II informierte und die entsprechenden Unterlagen an alle Händler versandte.

Dieses Vorgehen führte dazu, dass es bis zum Jahresende 2015 bereits 90 Anmeldungen zum Projekt gab und man dazu überging, fortan Händler (Verkäufer und Serviceberater), die sich besonders interessiert zeigten, über Projekthintergründe separat zu informieren und über die Vorgehensweise bei der Akquise von Kunden zu schulen. Gleichzeitig erfolgten der Druck sowie die Verteilung der erstellten Projekt-Kundenflyer und das Auslegen derselben in den Autohäusern.

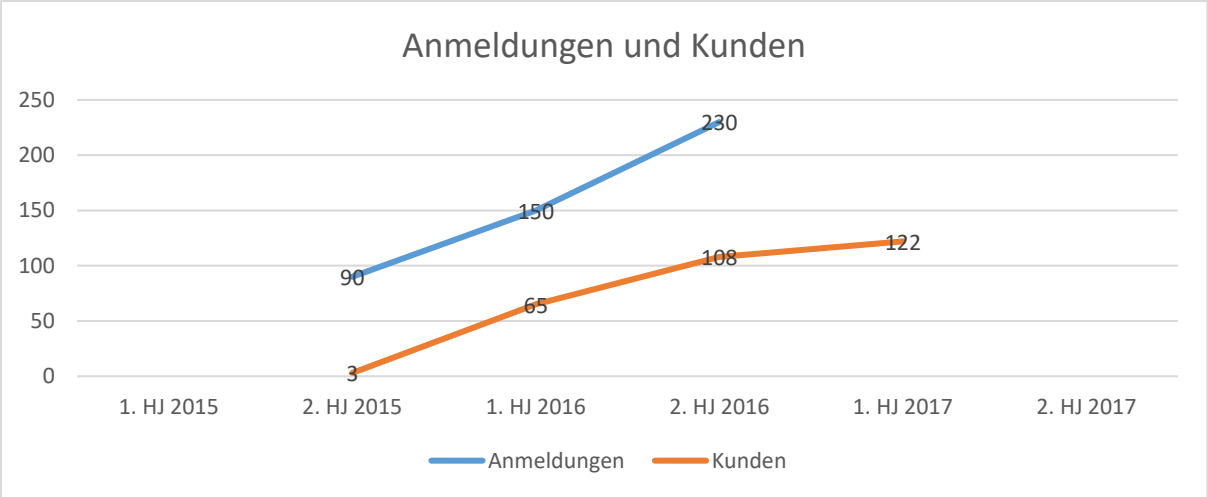
Eine Maßgabe bei der Kundenakquise lag im anvisierten Teilnahmezeitraum von 12 Monaten. Unter Einbezug des Projektendes am 31.3.2017 bedeutete dies, dass die Akquise am 31.3.2016 hätte abgeschlossen sein sollen. Im Laufe des Jahres 2016 kamen kontinuierlich weitere Kunden auf der Anmeldeplattform dazu, jedoch noch nicht die anvisierten 200, so dass man sich dazu entschloss, den Akquisezeitraum auszudehnen. Die damit einhergehende Verringerung der Teilnahmezeiträume legte man auf minimal 6 Monate fest. Bis Mitte des Jahres lagen dann 150 Anmeldungen vor. Um sich aber weiter

die Möglichkeit offen zu halten, 200 Kunden ins Projekt zu involvieren, entschloss das Konsortium sich zu einer Projektverlängerung bis 30.9.2017. So hatte man bis zum 31.3.2017 Zeit, Kunden zu akquirieren und deren Fahrzeug mit Datenloggern auszustatten.

Nachdem im zweiten Halbjahr 2016 nochmal über den Vertrieb und in der Mitarbeiterzeitschrift der Daimler AG auf die Möglichkeit am Projekt teilzunehmen hingewiesen wurde, stiegen die Anmeldungen der Interessenten bis Ende des Jahres auf 230.

Auch wenn die Anmeldungen letztendlich die anvisierte Zahl von 200 Kunden überstiegt, konnten insgesamt nur 122 Kunden gewonnen werden. Die Diskrepanz zwischen den 230 Anmeldungen und den 122 im Projekt involvierten Kunden ist mit verschiedenen Sachverhalten zu erklären:

- Zu lange Lieferzeiten der Fahrzeuge
- Zwanglose Anmeldung auf der Homepage durch neugierige Kunden, die das Thema antesteten ohne die konkrete Absicht zu haben, am Projekt teilzunehmen
- Kunden, die konkretes Interesse hatten, bekamen dann, als es um den Vertragsabschluss ging, „kalte Füße“. Gründe dafür waren, dass ihnen die Pflichten im Vertrag zu aufwendig waren (Stichwort regelmäßige Befragungen), sie mit dem Datenschutz vorsichtig sind (Stichwort kontinuierliche Aufzeichnung der GPS-Daten), o.ä.
- Mitarbeiter von Unternehmen, die Interesse gehabt hätten, aber dann keine Freigabe von ihrem Chef erhalten haben, dem letztendlich das Fahrzeug gehört
- Kunden, bei denen es Komplikationen bei der Terminfindung zum Einbau des Datenloggers gab und die sich dann vom Projekt abgewendet haben



Die Fahrzeuge der 122 Kunden, die am Projekt teilgenommen haben und in deren Fahrzeuge ein Datenlogger verbaut wurde gliedern sich wie folgt:

- 103 Mercedes Benz B250e
- 18 Mercedes-Benz C350e
- 1 Mercedes-Benz E350e.

Auch wenn insgesamt nicht die anvisierten 200 Fahrzeuge im Projekte erreicht wurden, stellen die umfangreichen Fahr- und Ladedaten der 122 mit Datenloggern ausgerüsteten Fahrzeuge eine solide Basis für die von den Projektpartnern adressierten Fragestellungen dar.

6.2. AP 620: Datenerfassung in Kundenfahrzeugen

6.2.1. Ziel des Arbeitspakets

In diesem Arbeitspaket ist es das Ziel, die in den Kundenfahrzeugen erfassten Fahr- und Ladedaten für die Evaluierung des Feldtests Daimler-intern sowie zur Kundenanalyse, Triebstrang- und Geschäftsmodellierung an die Partner zur Verfügung zu stellen. Des Weiteren erfolgt die Weitergabe der Daten an die Begleitforschung des Modellregionenprogramms.

6.2.2. Aktivitäten, Verlauf

Basis für einen Großteil der Auswertungen im Projekt eMERGE II ist die Erfassung von Fahr- und Ladedaten in den Kundenfahrzeugen. Daher ist ein wichtiger Teil des Projekts das Ausstatten der Fahrzeuge mit Datenloggern. Um dies zu gewährleisten, mussten im Daimler Konzern und der Vertriebsgesellschaft umfangreiche Vor- und Koordinationsarbeiten geleistet werden, damit alle Kunden lückenlos Daten liefern.

Aufgrund der Erfahrung, die man im Vorgängerprojekt eMERGE gesammelt hatte, konnte man z.T. auf vorhandenen Prozessen aufbauen. Das deutschlandweite Ausrollen der Kundenakquise bedeutete jedoch mehr Aufwand, als noch beim auf die Modellregionen Berlin und Rhein-Ruhr fokussierten Flottentest in eMERGE.

Nachdem der Prozess der Kundenakquise aufgesetzt und gestartet war, wurde parallel daran gearbeitet, die Vertriebsgesellschaft von Mercedes-Benz darauf vorzubereiten, mit Kunden des Projekts eMERGE II zielgerichtet umzugehen. Das bedeutet, dass zunächst der Prozess innerhalb des Daimler Konzerns definiert werden musste, wie nach der vertraglichen Fixierung der Kundenteilnahme weiter verfahren wird, um die Voraussetzungen für den Einbau des Datenloggers zu gewährleisten. Denn erst mit Einbau des Datenloggers waren die Kunden auch tatsächlich qualifiziert, um als Kunde zu Projektende die Aufwandsentschädigung zu erhalten.

Nach Definition dieses Prozesses zwischen der Daimler Forschung & Entwicklung sowie der Mercedes-Benz Vertriebsgesellschaft ging es dann an die Umsetzung und Information der Autohäuser und Werkstätten.

Erstellung einer Einbauanleitung

Zunächst musste für die Werkstätten ein allgemeingültiger Leitfaden zum Einbau des zertifizierten Datenloggers, der in den definierten Fahrzeugen zum Einsatz kam, erfolgen. Dazu leistete der externe Lieferant, der von Daimler beauftragt wurde, um die Datenerfassung zu gewährleisten, technischen Input. Dies stellte dann die Grundlage dar, in einer bereits im eMERGE-Projekt involvierten Niederlassung in Berlin den Probeeinbau durchzuführen. Hier zeichnete sich schon ab, dass beim Einbau zahlreiche Fallstricke auf die Mechaniker warteten, die benannt und beschrieben werden mussten. Mit Hilfe einer detaillierten Fotodokumentation wurden die Einbauschritte Stück für Stück erweitert und beschrieben, so dass im Ergebnis eine umfangreiche Einbauanleitung vorlag.

Begonnen wurde mit der Anleitung für die Batterieelektrische B-Klasse (B250e). Anschließend wurde das gleiche für den C-Klasse Plug-In Hybrid (C350e) durchgeführt. Im weiteren Verlauf des Projekts war auch ein Leitfaden für den S-Klasse und E-Klasse Plug-In Hybrid geplant. Hier jedoch führte die geringe

Nachfrage dieser Fahrer im Projekt dazu, dass lediglich ein Kunde gewonnen werden konnte und so die umfangreiche Erstellung eines Leitfadens zu aufwändig war. Stattdessen wurde eine abgespeckte Version einer Einbauinformation erstellt.

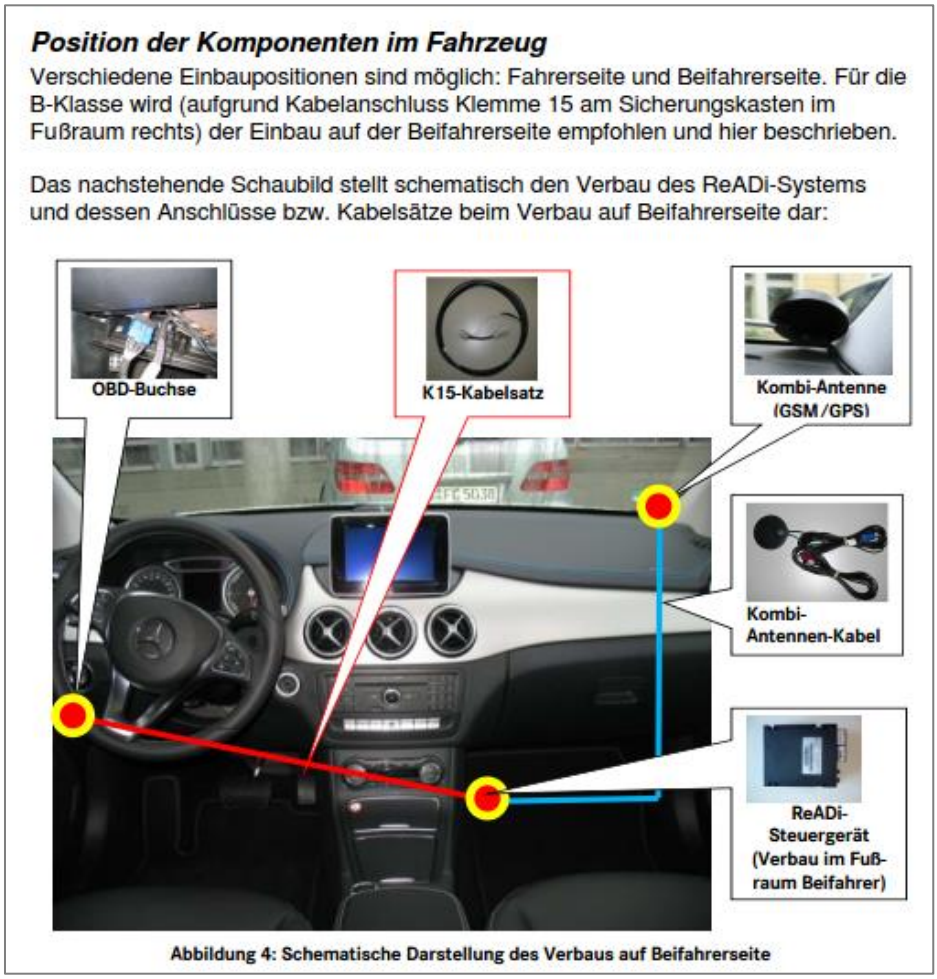


Abbildung 105: Auszug aus der Einbauanleitung für den B250e

Auf die Erstellung einer expliziten Ausbauanleitung konnte verzichtet werden, da in der Einbauanleitung alle relevanten Schritte in einer Granularität vorlagen, die beim Ausbau in umgekehrter Reihenfolge nutzbar war.

Im Verlauf des Projekts stellte sich dieser Leitfaden als unverzichtbares Dokument heraus, welches die Vielzahl an Werkstätten, die im Projekt involviert waren, intensiv nutzten, um die Datenlogger in die Fahrzeuge einzubauen. Aufgrund dessen wurden auch bis Ende 2016 Ergänzungen und Optimierungen an den jeweiligen Leitfäden eingefügt, um die Qualität zu verbessern.

Schulung von Werkstätten

Im zweiten Schritt erfolgte nun die Ertüchtigung der Werkstätten hinsichtlich des Umgangs mit eMERGE II-Kunden. Diese unterschied sich ggü. eMERGE dahingehend, dass im Vorgängerprojekt eine klar umrissene Anzahl von Werkstätten am Projekt teilnahm. Dadurch konnte man jede dieser Werkstätten explizit schulen und somit bestmöglich auf das Förderprojekt vorbereiten. In eMERGE II war

dies aufgrund des flächenmäßig über ganz Deutschland ausgerollten Projekts nicht möglich. Dies bedeutete jeder Kunde, egal, wo in Deutschland er sich befand, konnte am Projekt teilnehmen. Die Werkstätten, die ein potenzieller Kunde also für den Verbau des Datenloggers aufsuchen würde, waren also nicht vorgegeben und auch nicht vorhersehbar.

Damit wurde es notwendig, einen anderen Weg zu gehen und die Möglichkeiten der Mercedes-Benz Vertriebsorganisation (MBVD) in Form des regelmäßig von der Zentrale in Berlin an die Autohäuser versandten Newsletter zu nutzen. Nur über diesen Kanal konnte sichergestellt werden, dass alle autorisierten Mercedes-Benz Werkstätten, Händler und Niederlassungen die entsprechenden Informationen erhalten.

Um die Autohäuser gezielt zu unterrichten, wurde ein kurzer Informationsleitfaden erstellt, in dem alle relevanten, projektbezogenen Details erläutert wurden, die dazu dienen sollten, alle Verkäufer und Werkstattmitarbeiter mit dem Projekt bekannt zu machen und den interessierten Kunden optimal zu betreuen. Inhalte waren:

- Eckdaten, Ziele und Inhalte des Förderprojekts eMERGE II
- Benefit für den Kunden (Aufwandsentschädigung)
- Pflichten für den Kunden (Datenloggereinbau, Teilnahme an Befragungen)
- Ein- und Ausbau des Datenloggers

Abbildung 106: Deckblatt des Informationsleitfadens in eMERGE II

Damit stand ein Dokument zur Verfügung, dass für die Werkstätten alle Informationen beinhaltete, um einen eMERGE II-Kunden vollumfänglich zu betreuen. Natürlich stand das Projektmanagement allen Autohäusern für weitergehende Fragen zur Verfügung. Es stellte sich heraus, dass dies auch häufig in Anspruch genommen wurde. Daneben wurden große Niederlassungen in den Ballungsräumen, die das Potenzial hatten, mehrere eMERGE II Kunden in das Projekt einzubringen, vom eMERGE II-Projektmanagement separat geschult.

In der Anfangsphase des Projekts gab es viele Fragen hinsichtlich Details beim Einbau in die Fahrzeuge, die vom externen Dienstleister der Daimler AG beantwortet werden konnten. Aber auch bei der Beklebung galt es die Rückfragen aus den Autohäusern zielgenau zu beantworten, um die Förderkonforme Platzierung der Aufkleber zu gewährleisten, die vom Projektmanagement nach den Vorgaben des Fördermittelgebers gedruckt wurden.

Koordination des Einbaus

Die große Zahl an Kunden und die Kommunikation mit fast ebenso vielen Autohäusern brachten es im Verlaufe des Projekts mit sich, dass die Koordination des Einbaus sehr viel Zeit in Anspruch nahm. Nachdem sich ein Kunde bei eMERGE II angemeldet und den Vertrag unterschrieben hatte, wurde ein Einbautermin mit der von ihm ausgewählten Werkstatt vereinbart. Wichtig war nun, dass der Werkstatt zu diesem Termin alle relevanten Instruktionen zur Verfügung standen, um den Einbau fehlerfrei durchführen zu können.

Dazu sendete das eMERGE II-Projektmanagement nicht nur die entsprechenden Unterlagen zu, sondern auch die Hardware, also den Datenlogger samt Zubehör. So konnte in den meisten Fällen ein reibungsloser Einbau des Datenloggers und Anbringen der Aufkleber gewährleistet werden.

Trotzdem gab es natürlich Fälle, in denen sich Probleme einschlichen, die im Nachhinein geklärt werden mussten. Dies reichte vom Abhandenkommen von Datenloggern auf dem Postweg über Verzögerungen bei der Terminvereinbarung bis hin zu Elektronikproblemen beim Anschluss der Datenlogger. Letztendlich konnten (fast) alle Schwierigkeiten überwunden werden, was nicht zuletzt an der Geduld der engagierten Kunden sowie des großen Arbeitseinsatzes der Mercedes-Benz Mitarbeiter in den Werkstätten sowie des eMERGE II-Projektmanagements lag.

Aufbau und Durchführung der Datenaufzeichnungen

Mit Beginn der ersten Einbauten von Datenloggern in Kundenfahrzeuge Anfang 2016 erfolgte die Datenaufzeichnung. Die entsprechenden Systeme wurden Daimler-intern bereits seit Mitte 2015 aufgesetzt. Hierbei galt es vor allem, die Datenlogger so zu programmieren, dass sowohl die Daten des Minimaldatensets als auch die Datenwünsche, der internen Kunden berücksichtigt wurden.

Zusätzlich musste gewährleistet werden, dass die regelmäßige Übertragung der Daten an das Daimler Backend reibungslos funktionierte. Durch die Datenwünsche der unterschiedlichen Abteilungen war die Datensammlung sehr umfangreich. Insgesamt wurden 122 Datenlogger verbaut, davon 18 in C350e Fahrzeuge, einer in einen E350e und 103 in B250e. Drei Einbauten in den B250e waren jedoch fehlerhaft, so dass von diesen Fahrzeugen keine verwertbaren Daten vorlagen. Wenn man bedenkt, wie viele unterschiedliche Werkstätten in den Einbauprozess involviert waren, ist diese Fehlerquote von 2,46% sehr gut.

Koordination des Ausbaus der Datenlogger

Am Ende eines jeden Teilnahmezeitraums, der für alle Kunden je nach Einbaudatum individuell war, musste dafür gesorgt werden, dass der Ausbau des Datenloggers erfolgt. Dazu wurde dezidiert verfolgt, wann die Einbauten stattfanden und auf Basis der Verträge der Ausbau zu erfolgen hatte. Bei einem Großteil der Kunden wurde die maximale einjährige Laufzeit erreicht. Einige wenige Kunden

erreichten durch den früheren Verkauf oder Rückgabe der Fahrzeuge als geplant die minimalen halbjährlichen Teilnahmezeiten. Vor allem Kunden, die Ende 2016 bis Anfang 2017 ins Projekt kamen konnten natürlich den maximalen Teilnahmezeitraum von 12 Monaten nicht erreichen.

So wurde die Kundenliste vom Projektmanagement zweiwöchentlich geprüft, und fortlaufend entsprechende Kunden angeschrieben, deren Projektzeitraum sich dem Ende zuneigte. Mit dabei waren Informationen („eMERGE II-FAQs“) über den Ausbau der Fahrzeuge für die Werkstatt, in der Details zur Abwicklung wie z.B. Rechnungsadresse, Versandadresse des Datenloggers sowie Abrechnungsmöglichkeiten dargestellt waren.

Im September 2017 wurden die letzten Datenlogger ausgebaut. Dies war eine größere Anzahl von Kunden, da das Ende des Projektzeitraums am 30.9. für ca. 50 Kunden auch gleichzeitig das Ende ihrer Teilnahme darstellte.

Insgesamt ist festzustellen, dass der Ausbau der Datenlogger gut funktioniert hat, auch wenn viele Kunden und Autohäuser beim Projektmanagement anriefen, um sich über Details der Abwicklung bzgl. Abrechnung, Datenloggerversand, u.ä. zu informieren. Diese Unsicherheiten konnte das Projektmanagement zeitnah aus der Welt schaffen. Wenn man sich vor Augen führt, wie viele Kunden und Werkstätten involviert waren, verwundert es jedoch nicht, dass bei 3 der 122 Fahrzeuge der zeitnahe Ausbau der Datenlogger versäumt wurde und die Fahrzeuge ohne Wissen der Verkäufer, dass ein Datenlogger verbaut war, weiterverkauft wurden. Aber auch diese Probleme konnten gelöst werden.

Rechnungsprüfung

Im Anschluss an den Ausbau der Datenlogger aus den Fahrzeugen oblag es nun dem Projektmanagement zu verfolgen, in wie weit die Rechnungen, die von den beteiligten Werkstätten für den Ausbau an die Daimler Forschung & Entwicklung gestellt wurden, vollständig und gerechtfertigt waren. War dies nicht der Fall wurden sie entsprechend korrigiert und erst dann freigegeben. Des Weiteren wurde überprüft, ob die Datenlogger vollständig von den Werkstätten zurückgeschickt wurden.

Kalkulation der Gutschriften

Ein für die Kunden wichtiger Grund für die Teilnahme am eMERGE II-Projekt war die Aufwandsentschädigung, die für den Verbau der Datenlogger in den Kundenfahrzeugen sowie der Teilnahme an den regelmäßigen Interviews gewährt wurde. Für die Erstattung in Form von Gutschriften wurden innerhalb der Projektlaufzeit drei Auszahlungstermine durchgeführt: für den Zeitraum bis Juni 2016, bis März 2017 und bis September 2017.

Zur Kalkulation der Gutschriftenhöhe wurde anhand der Ein- und Ausbaudaten Tag genau der Teilnahmezeitraum ermittelt. Das Projektmanagement gab diese Daten an das Daimler Fördermittelcontrolling weiter, das dann die Auszahlungen in der Daimler Buchhaltung veranlasste. Aufgrund der Einbeziehung verschiedener Abteilungen innerhalb des Konzerns erfolgten die Gutschriften im auf den Ermittlungszeitraum folgenden Quartal. Insgesamt wurden fast 170.000 Euro an die Kunden, die am Projekt teilgenommen haben, ausgezahlt.

6.2.3. Ergebnisse

Vom Erstellen der Einbauanleitung und der Einbindung der Werkstätten über die Koordination des Einbaus der Datenlogger und der Sicherstellung der Datenaufzeichnungen bis hin zum Ausbau der Datenlogger und der sich anschließenden Rechnungsprüfung sowie der Kalkulation der Gutschriften wurde innerhalb des Daimler Konzerns recht umfangreiche Prozesse aufgebaut, um die Erfassung der Fahr- und Ladedaten sicherzustellen.

Der Aufwand hat sich gelohnt, denn über die gesamte Projektlaufzeit wurden insgesamt 1,1 Mio. Dateien aufgezeichnet, was einer Datenmenge von 620 GB entsprach. Diese Daten wurden allen interessierten Fachabteilungen zur Verfügung gestellt und bildeten so die Basis für die Durchführung von Auswertungen spezifischer Fragestellungen. Da die Fachabteilungen aus ganz unterschiedlichen Bereichen kommen wie z.B. der Auslegung von Hardwarekomponenten wie Getriebe oder auch der Entwicklung von Ladelösungen, konnten sie dort einen erheblichen Mehrwert in der Bearbeitung der Elektromobilitätsbezogenen Themen stiften.

Auch der Begleitforschung der Modellregionen Projekte konnte der Minimaldatenset im 1-Monats-Turnus zur Verfügung gestellt werden, so dass die Daten von eMERGE II Einzug fanden, in die Projektübergreifenden Auswertungen auf nationaler Ebene.

Im Folgenden wird ein Überblick über die erfassten Fahr- und Ladedaten gegeben. Von den 122 Fahrzeugen wurden fast 40.000 Fahrten erfasst und ausgewertet. Davon wurden mehr als ¾ der Fahrten von B-Klasse Kunden durchgeführt. Zwischen Dezember 2015 und September 2017 fuhren die eMERGE II Kunden insgesamt 390.000 km. Dabei lag die Fahrtenlänge beim batteriebetriebenen B250e bei ca. 9 km, bei den Plug-In Hybriden bei gut 12 km.

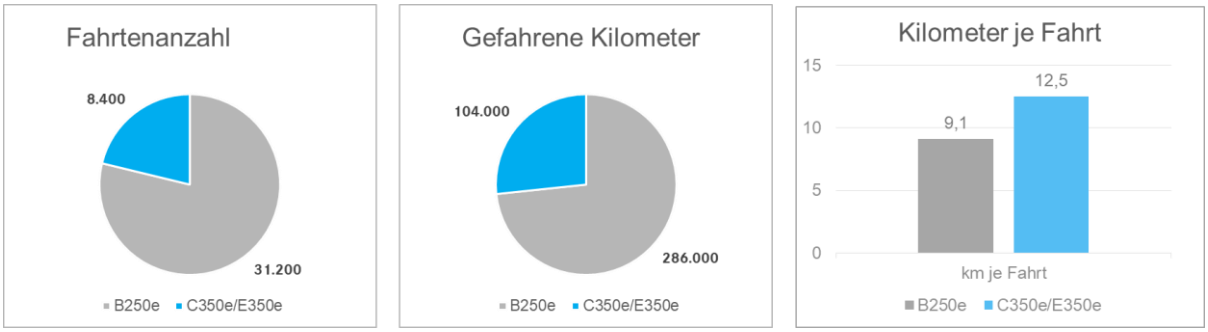


Abbildung 107: Fahrten und Kilometerleistung in eMERGE II

Hinsichtlich der Ladedaten, die in der nachfolgenden Abbildung dargestellt werden, wurden über 13.000 Ladevorgänge ausgewertet. Mehr als 90% der Ladevorgänge wurden von B-Klasse Kunden durchgeführt. Insgesamt luden die eMERGE II Kunden fast 135.000 kWh zwischen Dezember 2015 und September 2017. Ein Großteil des Ladevolumens entfiel auf die B-Klasse Fahrer.

Die B250e Fahrer laden dabei im Schnitt ca. 11 kWh je Ladevorgang. Das entspricht etwa 1/3 der Batteriegröße. Die C350e Fahrer hingegen laden im Schnitt ca. 3 kWh je Ladevorgang. Das entspricht in etwa 50% der Batteriegröße.

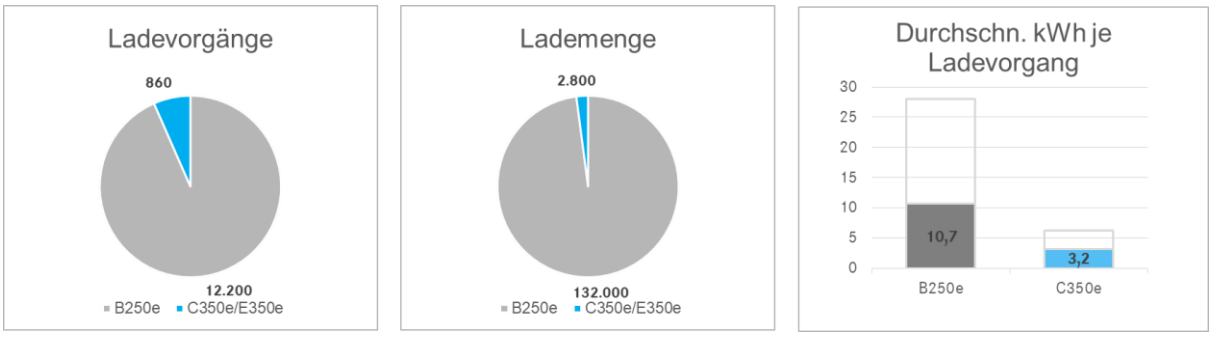


Abbildung 108: Ladevorgänge und -menge in eMERGE II

Schon diese Daten zeigen die Unterschiede zwischen Plug-In Hybriden und reinen Batteriefahrzeugen. So konnten den Partnern, der Begleitforschung des BMVI sowie den involvierten Daimler Abteilungen wertvolle Daten zur Verfügung gestellt werden, die für weitergehende, detaillierte Auswertungen genutzt wurden.

7. AP100: Projektmanagement

7.1. Aufgaben

Für die Partnerübergreifende Koordination des Projekts wurde der Dienstleister contor consulting & engineering gmbh aus Stuttgart beauftragt, der bereits vor Beginn des Projekts in der Antragsphase Inhalte konsolidiert und die Vorhabenbeschreibung innerhalb des Konsortiums abgestimmt hat.

Während der Projektlaufzeit lag der Fokus der Aktivitäten dann im Aufsetzen einer systematischen Regelkommunikation der Projektpartner, in der sich alle Beteiligten regelmäßig vor allem hinsichtlich der Verknüpfung von Inhalten Arbeitspaketübergreifend austauschen konnten. In diesem Rahmen wurden die entsprechenden Termine administrativ vorbereitet, organisiert, moderiert und im Nachgang in Form von Protokollen aufbereitet. Für die Regelkommunikation wurden zwei Plattformen aufgesetzt.

Projektleitertreffen:

Die Projektleitertreffen starteten 2015 mit einem Kick-off Termin in Sindelfingen. Teilnehmer waren 3-4 mal pro Jahr die Projektleiter der jeweiligen Partner, um über die Fortschritte im Projekt zu berichten und abzustimmen. In diesem Rahmen wurden auch grundsätzliche Entscheidungen wie z.B. die Durchführung des Kommunikationsevents, das Vertreten von eMERGE II auf Fachkongressen oder die Projektverlängerung zu diskutieren.

Neben allgemein anstehenden Themen über den Aktivitätsfortschritt in den Arbeitspaketen wurden die Treffen darüber hinaus dazu genutzt, bestimmte „Schwerpunkt“-Themen, die gerade akut waren, vertieft zu präsentieren und diskutieren.

Über die Projektlaufzeit fanden folgende Termine statt:

- 2015: Kick-off im April bei Daimler in Sindelfingen
- 2015: Projektleitertreffen im Juli an der Technischen Universität in Berlin
- 2015: Projektleitertreffen im November an der Universität in Siegen
- 2016: Projektleitertreffen im März an der Technischen Universität in Berlin
- 2016: Projektleitertreffen im Juni an der RWTH in Aachen
- 2016: Projektleitertreffen im Oktober im FKFS in Stuttgart
- 2017: Projektleitertreffen im Februar an der Technischen Universität in Berlin
- 2017: Projektleitertreffen im Mai an der Universität in Siegen

Telefonkonferenzen:

Zusätzlich zu den Projektleitertreffen wurden eMERGE II-Telefonkonferenzen durchgeführt, in denen sich die Projektbeteiligten in kurzen Abständen regelmäßig über den Status der Arbeitspakete informierten. Zu Beginn des Projekts startete man mit einem zweiwöchigen Turnus, der ab Herbst 2015 auf dreiwöchig ausgedehnt wurde. Im Folgenden ist eine kurze Aufstellung über die Anzahl der Telefonkonferenzen gegeben:

- 2015: 12 Telefonkonferenzen
- 2016: 13 Telefonkonferenzen
- 2017: 13 Telefonkonferenzen

Weitere Tätigkeiten des Projektmanagements lagen in der Erstellung des Abschlussberichts. Dazu wurde ein Layout für das Berichtsdokument erstellt, auf dessen Basis die Inhalte von den Partnern eingeholt wurden. Neben der Konsolidierung der Inhalte wurden allgemeine, Partnerübergreifende Inhalte erarbeitet und formuliert.

Auch bei verschiedenen Veranstaltungen wie bspw. Treffen Kompetenztreffen der Elektromobilität, die von der Energieagentur Nordrhein-Westphalen veranstaltet werden, wurden Beiträge des Projekts eMERGE II koordiniert und präsentiert.

7.2. Technische und vertriebliche Umfragen

Das Projekt, in dem reale Kunden über 120 Fahrzeuge bewegten, wurde von verschiedenen Daimler Abteilungen genutzt, um weitere Erkenntnisse über die Einstellungen von Kunden zu erhalten. Dazu wurden im Jahr 2017 zwei Umfragen durchgeführt, in denen es darum ging, ein tiefergehendes Verständnis der Einstellungen der Kunden zu Elektrofahrzeugspezifischen Themen zu erlangen.

Im Frühjahr 2017 formulierte der Mercedes-Benz Vertrieb Deutschland Fragen zu den Themenkomplexen

- Motivation des Kaufs
- Produktdesign
- Preis
- Beratung im Autohaus
- Ladenetz.

Abbildung 109: eMERGE II Teilnehmer zu Besuch bei der Daimler AG in Möhringen

Diese Umfrage wurde dann von 84 Kunden im Rahmen der turnusmäßigen Befragungen der Universität Siegen vorgelegt und beantwortet. Genauso verfuhr man auch bei der Befragung der Daimler Entwicklung zu spezifischen Fragen der Elektrofahrzeugspeizischen Themen zur Technik. Hier ging es um die Themen:

- technische Aspekte des Ladevorgangs,

- öffentliche Ladestationen und Konnektivität,
- Serviceverträge und Kaufbereitschaften

Diese Befragung, die im Sommer 2017 stattfand wurde von 73 Kunden beantwortet.

Die Ergebnisse der Befragungen wurden Daimler intern genutzt, um sowohl im Vertrieb als auch in der Entwicklung zu überprüfen, ob die aktuellen Anforderungen an die Entwicklung und Ausstattung von Elektrofahrzeugen und damit verbundenen Services, die vom Konzern definiert werden, möglichst deckungsgleich sind mit den Einstellungen der Kunden. Die Ergebnisse stießen Denkprozesse an und werden bei der zukünftigen Entwicklung von Elektrofahrzeugen berücksichtigt.

7.3. eMERGE II Kommunikation

eMERGE II Kommunikationsevent am 7./8. Oktober 2016 in Stuttgart

Zur Mitte der Projektlaufzeit wurden die Teilnehmer am Projekt zum eMERGE II Kommunikationsevent eingeladen. Ziel war es, den Kunden das Projekt näher vorzustellen, und die Möglichkeit zu bieten, sich mit den Projektverantwortlichen auszutauschen. Darüber hinaus gab das Projektkonsortium einen exklusiven Einblick im Bereich der Entwicklung der Elektromobilität. Letztlich sollte der Termin auch dazu dienen, gemeinsam mit den Kunden in Form von Workshops an zukünftigen Fragestellungen zu arbeiten.

Dieser Event war in seiner Dimensionierung etwas aufwändiger, so dass für die Planung ein eigenes Konsortialtreffen im Mai 2016 in Weimar stattgefunden hat. Dort erarbeiteten die Partner die grundsätzlichen Inhalte und verständigten sich auf den Rahmen der Veranstaltung. Das Ergebnis war, dass die Veranstaltung auf zwei Tage am 7. und 8. Oktober 2016 verteilt war und die Gäste nach Stuttgart eingeladen wurden. Am ersten Tag stand ein Besuch im Mercedes-Benz Museum mit anschließendem Abendessen auf dem Programm

Abbildung 110: eMERGE II Kommunikationsevent bei der Daimler AG

Am zweiten Tag ging es dann zunächst an den Standort der Daimler AG nach Möhringen, wo Vorträge zu Elektrofahrzeugen, Ladeinfrastruktur und Workshops zur Technik von E-Fahrzeugen gegeben wurden. Dabei konnten sich die Kunden mit vielen Fachleuten und Entwicklern der Daimler AG austauschen.

Damit neben den Vorträgen und dem technischen Austausch der Eventcharakter nicht zu kurz kam, ging es anschließend mit einem E-Korso zum FKFS ins benachbarte Stuttgart-Vaihingen, wo die Besichtigung diverser automotiver Entwicklungstechnologien beim FKFS, z.B. Europas größter Fahrsimulator, Forschungsladestationen zum konduktiven und induktiven Laden, Formula Student E-Team, den Abschluss bildete.

Abbildung 111: eMERGE II Kommunikationsevent beim FKFS

Insgesamt nahmen über beide Tage ca. 75 Personen teil, von denen ca. 46 Kunden des eMERGE II Projekts waren. Der Event wurde den ganzen Tag über von einer Filmagentur (u.a. mit einer Kameradrohne) begleitet. Aus dem Filmmaterial wurde ein Projektfilm generiert. Der Projektfilm wurde auf folgender Seite veröffentlicht: https://www.youtube.com/watch?v=O3wiXMXq7-U

eMERGE II Abschlussveranstaltung am 10. November 2017 in Berlin

Zum Ende des mehrjährigen Projekts wurde am 10. November 2017 die Abschlussveranstaltung durchgeführt. Gastgeber war die NOW, die als nationale Koordinationsstelle der Modellregionen Elektromobilität, die vom BMVI gefördert werden, fungiert. Sie lud alle Partner, Projektteilnehmer, den Projektträger, Vertreter des BMVI und sonstige Interessierte in die Räumlichkeiten des Bundesverkehrsministeriums in Berlin ein, um sich von den Projektpartnern die Ergebnisse von eMERGE II vorstellen zu lassen.

Die ganztägige Veranstaltung wurde von mehr als 50 Zuhörern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik sowie Kunden besucht und stellte einen gelungenen Abschluss des Projekts dar. Nach einem einleitenden Grußwort des parlamentarischen Staatssekretärs des BMVI Hr. Barthle stellten die Partner in 6

umfangreichen Vorträgen die zentralen Ergebnisse dar und gaben einen tiefen Einblick in die jeweiligen Arbeitspakete des Projekts und damit in das Gesamtsystem Elektromobilität.

Besonders interessant waren die praktischen Berichte eines Kunden, der mit viel Engagement von seinen Erfahrungen mit den Elektrofahrzeugen berichteten. In der anschließenden Diskussion entwickelte sich mit weiteren Projektteilnehmern, die die Veranstaltung besuchten, ein reger Erfahrungsaustausch, der sowohl den Projektpartnern als auch den Vertretern des Fördermittelgebers wertvolle Informationen zu verschiedenen Aspekten der Elektromobilität aus Kundensicht gab.

Abbildung 112: eMERGE II Abschlussveranstaltung im Erich-Klausener-Saal des BMVI

Zusammenfassung

8. Wesentliche Ergebnisse

Daimler AG

AP220 und AP600 Flottentest

- Gewinnung von über 100 Kunden mit 122 Fahrzeugen der B-Klasse B250e, der C-Klasse C350e und der E-Klasse E350e für die Teilnahme am Projekt eMERGE II
- Ertüchtigung von Mercedes-Benz Werkstätten deutschlandweit zum Ein- und Ausbau der Datenlogger zur Erfassung von Fahr- und Ladedaten
- Erweiterung der Daimler IT Infrastruktur zur komplikationsfreien Erfassung und Übertragung der Daten von den Fahrzeugen an das Readi-Backend. Bereitstellung der gesammelten Daten aus dem Flottenbetrieb an die Begleitforschung des BMVI sowie an die internen Daimler Kunden (Entwicklungsabteilungen) und an die Projektpartner (Nutzung der Daten für die jeweiligen eMERGE II Arbeitspakete)
- Sammlung von über 620 GB Daten in 1,1 Mio. Datensätzen
- Ermittlung und Analyse von Kundenlastkollektiven auf Basis der erfassten Felddaten. Dabei Erzielung von Erkenntnissen für die zukünftige bedarfsgerechte und kundenorientierte Auslegung elektrifizierter Antriebe. Die mechanische Beanspruchung des Antriebstrangs in Kundenhand, kann basierend auf diesen Erkenntnissen besser eingeschätzt und die Prüfstanderprobung weiter optimiert werden. Eine geänderte Durchmischung der Fahrprogramme in den Prüfläufen ist ein Resultat des Projekts. Anhand der Kundendaten konnten deutliche Unterschiede hinsichtlich der mechanischen Belastung aus Drehzahl / Drehmoment bis zum Ladeverhalten beobachtet werden.

FKFS

AP230-270: Simulation und Optimierung der Fahrzeugantriebsstränge

- Analyse der Loggingdaten und einer Kundenbefragung, daraus Identifizierung und Kategorisierung von vier Nutzergruppen: Gelegenheitsfahrer, Kurzstreckenfahrer, Arbeitsplatzfahrer und Vielfahrer.
- Aufbau einer Simulationsumgebung und Kopplung dieser mit dem multikriteriellen Optimierer MO-CMA-ES zur Auslegung der Antriebsstrangkomponenten Batterie, E-Maschine und Getriebe.
- Optimierte Auslegung von Elektrofahrzeug und Plug-In Hybrid Antriebssträngen für die vier Nutzergruppen mit dem Ziel der Minimierung von Energieverbrauch und Komponentenbelastung

TU Berlin – Fachgebiet Softwaretechnik (SWT)

AP 210 und 280: Anforderungsspezifikation und Funktionsabsicherung von xEV

- Analyse und Bewertung der Methoden und der Artefakte, die zur Spezifikation von Funktionen des Ladesystems eingesetzt werden
- Es wurden zu auftretenden Inkonsistenzen und Abweichungen in den Spezifikations- und Absicherungsdokumenten Kategorien definiert und nach deren möglichem Einfluss auf die Qualität bewertet

- Entwicklung eines Tool-Prototypen, der Nutzer des angewandten Vorgehens durch Automatisierung bei der Erstellung von Spezifikations- und Absicherungsdokumenten unterstützt und dadurch die identifizierten Abweichungen vermeidet
- Zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit wurden in dem Tool-Prototyp darüber hinaus Mittel integriert, um eine eindeutige Zuordnung von Spezifikationsinhalten zu ermöglichen

TU Berlin – Fachgebiet Open Distributed Systems (ODS)

AP410-440: Verkehr und Energie

- Mit Hilfe von Simulationen wurden verschiedene Technologien untersucht, mit denen Fahrzeuge in angebrachten Situationen energieeffiziente Bremsmanöver vollziehen können, die zu einer optimalen Rückführung von Energie in die Fahrzeugbatterie führen. Diese Rekuperations-Strategien beziehen zum einen lokale Sensorik (Radar) ein, oder verwenden standardisierte Kommunikationsverfahren zwischen Fahrzeugen um ein verbessertes Bild des Umfelds zu erhalten.
- In simulativen Untersuchungen wurde gezeigt, dass durch den breiten Einsatz von radarbasierter Rekuperation eine Fahrzeugkolonne bei einem Bremsmanöver in der Stadt zusätzliche Batteriekapazität in Form von rund 130 m zusätzlicher Reichweite gegenüber menschlichen Fahrern erzeugen kann. Bei höheren Geschwindigkeiten auf Stadtautobahnen kann durch solch intelligente Bremsmanöver eine zusätzliche Reichweite von 290 m gewonnen werden.
- Bei der kommunikationsunterstützten Rekuperation-Strategie kann im Stadtverkehr bei niedrigen Ausstattungsraten mehr Energie gespart werden als mit einer radarbasierten Technik. Bei höheren Geschwindigkeiten liefert die kommunikationsbasierte Rekuperation noch deutlich bessere Ergebnisse von 450 m zusätzlicher Reichweite pro Fahrzeug gegenüber dem menschlichen Fahrer. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die kommunikationsbasierte Rekuperation durch ein umfassendes Bild der Umgebung zu einem verbesserten Verkehrsfluss führen kann.
- Eine Hochrechnung der Ergebnisse auf eine rein elektrifizierte Großstadt mit ca. 100.000 Einwohnern hat ergeben, dass allein die Ausstattung der Fahrzeuge mit den untersuchten Rekuperations-Strategien eine zusätzliche Reichweite von insgesamt ca. 20.000 km erzeugen kann.

TU – Berlin, Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP)

AP450-470: Bereitstellung und Finanzierung von Ladeinfrastruktur

- Bei der Bereitstellung und Finanzierung von Ladeinfrastruktur sollten differenzierte Angebotskonzepte (Verortung, technisches System, Bepreisung, Nutzungsregeln, etc.) berücksichtigt werden, um den – ebenfalls differenzierten – Bedarf nach Ladevorgängen zu decken.
- Die Bereitstellungsentscheidungen für die Schnellladeinfrastruktur sollten mit dem Ziel der Flächendeckung zentral durch die öffentliche Hand getroffen werden. Bei der Umsetzung dieser Entscheidungen in Form der Leistungserstellung sollte allerdings umfangreich auf das Engagement von privaten Unternehmen gesetzt werden. Langfristige Verträge mit privaten Betreibern in Form von so genannten Öffentlich Privaten Partnerschaften stellen ein geeignetes Modell für die Umsetzung dar. Bei der Finanzierung der Schnellladeinfrastruktur sollte umfangreich auf kollektiv erhobene Mittel (u. a. Grundgebühren, „Ladeinfrastruktur-Vignette“ oder Haushaltsmittel) und nicht auf Einnahmen zurückgegriffen werden, die aus der Bepreisung des einzelnen Ladevorgangs generiert werden.
- Um die regelmäßige Ladung im privaten Bereich zu ermöglichen, sollten Anrechte gegenüber Vermietern oder innerhalb von Wohneigentümergemeinschaften zur Installation von Ladepunkten

geschaffen werden. Im öffentlichen Bereich für sogenannte „Laternen-Parker“ müssen Nutzungsregeln geschaffen werden, die eine hohe Verlässlichkeit der Verfügbarkeit gewährleisten können.

- Anbieter von Freizeit- und Einkaufsaktivitäten im halböffentlichen Bereich unterliegen Anreizen, zukünftig ihren Endkunden neben Parkplätzen auch Ladeinfrastruktur zur Verfügung zu stellen. In diesem Bereich scheint eine (Ko-)Finanzierung durch die öffentliche Hand nicht unbedingt notwendig.

RWTH Aachen

AP500: Geschäftsmodellierung

Für die Berechnung der TCO sind die zehn häufigsten neuzugelassenen BEVs sowie HEVs aus dem Jahr 2014 mit den entsprechenden Referenzmodellen in Form von ICEVs berücksichtigt worden. Dabei ist deutlich geworden, dass bereits heute vier rein batterieelektrische Fahrzeuge (BMWi3, TeslaS, Mercedes B250e, TeslaX) und fünf Voll-Hybrid-Fahrzeuge (Honda Jazz, Toyota Auris, Lexus IS, Mercedes-E, Mercedes-S) aus Endkundensicht wirtschaftlicher gegenüber ähnlichen ICEVs in unterschiedlichen Jahresfahrleistungen trotz Risiken in der Batterie- und Energiepreisentwicklung sind. Die finanzielle Förderung (4.000 EUR) oder Fahrzeugpreisreduzierung für BEVs im Jahr 2021 wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus, jedoch nicht zugunsten aller betrachteten BEVs. Beispielsweise wird zusätzlich der Renault Zoe Z.E. rentabler gegenüber dem vergleichbaren Dieselfahrzeug.

Da die Energie- sowie Batteriepreise einen großen Einfluss auf die TCO haben, ist ein Geschäftsmodell mit beiden Kostentreibern in einem Paket gebündelt entwickelt worden. Folglich hat das Geschäftsmodell – „Batteriemiete“ und eine pauschale Abrechnung der Energie wie „Stromtarif-Flatrate“ – einen positiven Einfluss auf die TCO für alle untersuchten Jahresfahrleistungen. Auch hier bleibt die Wirtschaftlichkeit für die vier BEVs gegenüber ähnlichen ICEVs erhalten. Zusätzlich ist die Integrierung des „Mercedes B250e“ in das E-Carsharing für Automobilhersteller wirtschaftlich und wirkt sich positiv auf die TCO für Endkunden aus.

Nachdem aktuell die öffentlichen Ladestationen deutliche Kostenunterschiede aufweisen, kann ein einheitliches Bezahlsystem die Nutzungskomplexität der produktbegleitenden Dienstleistung verringern. Beispielsweise ist das Schnellladen aktuell teurer als eine 100 km Tankfüllung für ein Dieselfahrzeug. Folglich wirkt sich das Schnellladen negativ auf die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen (EVs) aus. Die Ergebnisse zeigen, dass nur ein BEV (TeslaS) rentabler ist. Jedoch, bleibt die Wirtschaftlichkeit mit der Subvention für die bestehenden vier BEVs gegenüber ähnlichen ICEVs erhalten. Somit ermöglicht ein einheitliches Bezahlsystem dem Kunden das Laden an jeder beliebigen Ladesäule, wie es auch beim Tanken eines ICEVs an jeder Tankstelle möglich ist.

Um konkrete Aussagen zur sinnvollen Kooperation und zur Reduktion der TCO zu treffen, ist ein anbieterseitiges Kooperationsmodell mit einem „Vehicle to Grid“ Ansatz für BEVs entwickelt worden. Die befragten Kunden ziehen das Kooperationsmodell im Vergleich zum Fahrzeugkauf plus Batteriekauf/-miete vor. Zudem wirkt es sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit von EVs aus. Die Ergebnisse zeigen, dass die vier BEVs und HEVs weiterhin wirtschaftlich gegenüber vergleichbaren ICEVs bleiben. Unter der Berücksichtigung von der Subvention werden sogar insgesamt sieben BEVs (zusätzlich Renault Zoe Z.E., VW e-Golf, Nissan Leaf) rentabler.

Ferner können Maßnahmen wie das Fahrverbot für ICEVs in deutschen Städten die Wirtschaftlichkeit von EVs beeinflussen sowie den Markt ankurbeln. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Drohung des Fahrverbots statistisch signifikant mehr potentielle Käufer einen BEV kaufen würden. Zusätzlich beein-

flusst statistisch signifikant die Transparenz der Gesamtkostendifferenz zwischen einem Elektrofahrzeug und konventionellen Fahrzeug die Kaufentscheidung von „Experten“ und „potentiellen Käufern“, welches durch ein Experiment belegt worden ist. Zudem bleibt die Wirtschaftlichkeit für die vier BEVs erhalten und insgesamt werden sieben HEVs (zusätzlich Toyota Yaris, Peugeot 508 RXH) rentabler.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Fahrzeugsegment „Minis“ in allen betrachteten Szenarien nicht wirtschaftlich ist. Somit ist ein Handlungsbedarf wie z.B. Preisreduktionen seitens der Automobilhersteller sowie weitere finanzielle Anreize seitens der Regierung notwendig, um dieses Segment attraktiv für die Kunden zu gestalten.

Universität Siegen

AP 300: Nutzerverhalten

Eine wahrgenommene Alltagskompatibilität (durch eine Reichweite von mindestens 300 km und einer Ladezeit von unter 90 Minuten) sowie ein direkter wahrgenommener Vorteil (durch den Fahrkomfort und die Leistung) sind die wichtigsten Punkte, um die Einstellung aber auch Nutzungsabsicht von Elektro- und Plug-In-Hybrid Fahrzeugen zu steigern. Darüber hinaus ist es insbesondre bei Geschäftskunden wichtig, ein gewisses Ansehen bei Geschäftskontakten durch das Fahrzeug zu erlangen. Eine reine Fokussierung auf die Umweltschonung in der Bewerbung dieser Fahrzeuge ist kein adäquates Mittel, um neue potentielle Käufer für ein solches Fahrzeug zu begeistern und langfristig an diese Technology zu binden.

Beim Kauf direkt zeigt sich, dass der hohe Preis dieser Fahrzeuge immer noch das größte Hemmnis für viele Kunden darstellt. Grundsätzlich zeigten aber die Ergebnisse, dass Kunden klar deutsche Automobilhersteller präferieren würden, solange mit jenen Fahrzeugen mindestens eine stabile Reichweite von 300 km erreicht wird und genügend Schnellladepunkte in der unmittelbaren Umgebung vorhanden sind und somit eine Nutzung der Fahrzeuge im Alltag problemlos gewährleistet wird.

Diese Ergebnisse basieren auch auf der Tatsache, dass nur eine direkte Subvention von mindestens 5000€ auf den Kaufpreis, die Nachfrage signifikant steigen ließe. Mögliche Privilegien (z.B. gesonderte Parkplätze, Nutzung einer Busspur) zeigen keine Effekte.