

# Über 300.000 Kilometer unter Strom

Physikalisch-technische, ökonomische, ökologische und sozialwissenschaftliche Begleitforschung des Schaufensterprojektes RheinMobil: Grenzüberschreitende, perspektivisch wirtschaftliche elektrische Pendler- und Dienstwagenverkehre im deutsch-französischen Kontext.





# Vorwort

Elektromobilität scheint insbesondere dann eine Chance auf einen signifikanten Markterfolg zu haben, wenn sie praktikabel und wirtschaftlich für den Endnutzer ist. Einige Herausforderungen, die beim Betrieb von Elektrofahrzeugen auftreten, sind bereits bekannt, andere Erkenntnisse sind erst im Rahmen der Schaufensterprojekte Elektromobilität der Bundesregierung ermöglicht worden.

Eines dieser Schaufensterprojekte ist RheinMobil. RheinMobil demonstriert den grenzüberschreitenden Dienst- und Berufspendlerverkehr in der Rheinebene zwischen Karlsruhe und dem Elsass. Das Projekt soll zeigen, dass bestimmte Einsatzprofile einen wirtschaftlichen Betrieb von Elektrofahrzeugen möglich machen. Dazu sind sechs siebensitzige Kleinbusse im Pendelverkehr bei Michelin sowie ein Fahrzeug der Kompaktklasse im Dienstwagenverkehr bei Siemens im Alltag im Einsatz. Die meisten Erfahrungen wurden mit monatlichen Fahrleistungen von ca. 3.000 km pro Fahrzeug ermittelt, eine Auslastungserhöhung mit drei Fahrergruppen und zwei Fahrzeugen mit

ca. 4.500 km konnte eingeführt werden. Diese und andere Ergebnisse wie Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit, Nutzerakzeptanz, Umwelteinwirkung, etc. stellt diese Studie der Forschungspartner Karlsruher Institut für Technologie und der Fraunhofer Gesellschaft dar.

Wir hoffen Ihnen mit dieser Studie einen tieferen Blick in die Welt der Elektromobilität zu liefern und Lessons Learned von mehr als 300.000 voll elektrisch gefahrenen Kilometern mitzugeben.



Dr. Olaf Wollersheim  
Projektleiter RheinMobil (KIT)



Dr. Kevin Stella  
Projektleiter RheinMobil (KIT)

# Kernergebnisse

Die Ergebnisse der Vorabanalyse und die Erfahrungen aus zwei Jahren Betrieb zeigen, dass sich sowohl der grenzüberschreitende Berufspendlerverkehr als auch der Dienstwagenverkehr bei anspruchsvollen Fahrprofilen und der erforderlichen hohen Verfügbarkeit sehr gut für den Einsatz von Elektrofahrzeugen eignen. Mit einem sorgfältig entwickelten Mobilitätsmodell (Kap. 3) konnte eine Auslastungserhöhung der Pendlerfahrzeuge bei Michelin durch mehrere Fahrergruppen pro Tag (Kap. 4.1) im Rahmen des festen Arbeitszeitschichtmodells umgesetzt werden. Die Erfahrungen zeigen, dass vor der Einführung der Mobilitätsmodelle mit höherer Auslastung eine Bewertung ihrer Umsetzbarkeit anhand realer Betriebsdaten erfolgen muss, da die Fahrzeuge im Grenzbereich ihrer technischen Leistungsfähigkeit eingesetzt werden. Zentrale Einflussgrößen sind dabei die Ladekurven und der reale Energieverbrauch. Die Auswertung der aufgezeichneten Ladekurven (Kap. 6.1) verdeutlicht, dass beim Einsatz von DC-Schnellladung nicht nur die maximale Ladeleistung für eine Prognose der Machbarkeit ausreichend ist, sondern der ganze Verlauf der Ladekurve bekannt sein muss. Auch zeigen die Folgen ausschließlicher DC-Schnellladung, dass ein Mix unterschiedlicher Ladeleistungen eine hohe Fahrzeugverfügbarkeit ermöglicht und gleichzeitig auch das Gesamtsystem schont (Kap. 6.3). Die gemessenen Energieverbräuche verdeutlichen, dass es nicht ausreicht sich ausschließlich auf die von den Herstellern nach dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ermittelten Normverbräuche zu verlassen (Kap. 6.2). Zur Simulation des Energieverbrauchs wurde auf Basis der aufgezeichneten Realverbräuche ein funktionales Prognosemodell entwickelt. Das Modell zeigt deutlich die Abhängigkeit von unterschiedlichen Faktoren wie der Durchschnittsgeschwindigkeit oder den Einfluss der Heizung und begründet damit die Abweichungen vom NEFZ-Normverbrauch. Trotz der hohen Anforderungen an die eingesetzten Elektrofahrzeuge sind im bisherigen Projektverlauf die Batterien der Fahrzeuge den an sie gestellten Ansprüchen gerecht geworden.

Das wirtschaftliche Potential, aufgezeigt in der Modellauslegung, der Projektplanung (Kap. 3) und in einer Vorabanalyse (Kap. 4.1) ist auch im bisherigen praktischen Demonstrationbetrieb bestätigt worden. Der wirtschaftliche Break-even wird auch unter Erhöhung der Auslastung voraussichtlich nicht mehr während der Projektlaufzeit von 36 Monaten erreicht werden (Kap. 6.3). Die im Projekt vorgenommene Total Cost of Ownership (TCO) Analyse auf Basis der realen Betriebskosten prognostiziert den Break-even im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug bei ca. 200.000 km. Das Projekt RheinMobil demonstriert somit, dass es trotz der hohen Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge auch gegenwärtig schon Anwendungsprofile gibt, in denen eine Umstellung der Mobilität finanzielle Vorteile bringt. Die Anforderungen einer hohen Jahresfahrleistung bei gleichzeitig kurzen Einzeltouren, einer hohen Auslastungsfrequenz und einem möglichst planbaren Einsatz sind dafür aber hoch. Sowohl im Berufspendlerverkehr als auch im Dienstwagenverkehr zwischen festen Standorten ist ein wirtschaftlicher Betrieb möglich.

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse mittels der Methode der Ökobilanz zeigen große Bandbreiten im Umweltprofil der Elektrofahrzeuge, welche maßgeblich durch die variierenden Bandbreiten der Fahrleistungen, der gemessenen Fahrzeugenergieverbrauchswerte und letztendlich des Umweltprofils des genutzten Ladestroms resultieren. Im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit verbrennungsmotorischem Antrieb sind im Treibhauspotential (Klimabilanz) Gesamtfahrleistungen von 30.000 km (Ökostrom als Ladestrom) bis ca. 100.000 km im Ladestrom aus dem deutschen und französischen Stromnetz (RheinMobil-Mix: 50% DE/50% FR) notwendig, um einen ökologischen Mehrwert zu erreichen. In anderen Umweltwirkungskategorien, beispielsweise dem Versauerungspotential, sind deutlich höhere Fahrleistungen nötig, was auf die höheren Umweltwirkungen in der Fahrzeug-

herstellung, vor allem in der Herstellung der im Batteriesystem verwendeten Aktivmaterialien (z.B. Einsatz von Kobalt und Nickel in der Kathode) mit hohen Umweltwirkungen im Rohstoffabbau und der Materialaufbereitung zurückzuführen ist. Die Auslegung und Fahrleistung der Elektrofahrzeuge muss daher auf das Nutzungsprofil des konkreten Einsatzkontexts angepasst und der notwendige Ladestrom vornehmlich aus erneuerbaren Quellen bezogen werden. Die Gewährleistung der erforderlichen Fahrleistungen stellt in einigen Einsatzgebieten – auch unter Berücksichtigung der begrenzten Reichweiten – eine große Herausforderung für den ökologisch sinnvollen Einsatz von Elektrofahrzeugen dar. Durch den Fahrzeugeinsatz im Pendlerverkehr und Mehrschichtbetrieb werden die erforderlichen hohen Fahrzeugauslastungen gewährleistet, sodass sich im Treibhauspotential ein Mehrwert gegenüber konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen einstellt (vgl. Kapitel 6.3).

Parallel zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs im Verkehrssektor sollte ein Augenmerk auf die Energiewende im Energiesektor gelegt werden. Denn die Mobilitätswende kann nur mit der Energiewende stattfinden.

Der richtige Einsatz eines Elektrofahrzeuges ist also nicht trivial. Von der Schwierigkeit und dem positiven ökologischen Potential her gesehen sollte mit Ökostrom geladen werden. Der Pendlerverkehr ist für Elektromobile eine ideale Anwendung. Stärker herausfordernd ist es einen ökologisch und ökonomisch sinnvollen Einsatz im privaten Nutzerverkehr zu etablieren. Auf dem Weg dahin sind auf Komponentenseite, speziell hinsichtlich der Leistungselektronik, noch diverse Verbesserungen nötig. Die verlässliche Fertigung von größeren Stückzahlen wird sicher auch hier erhebliche Verbesserungen mit sich bringen.

Wenn diese technologischen, ökonomischen und ökologischen Voraussetzungen vorhanden sind, erhöht sich die Nutzerakzeptanz erfahrungsgemäß. Dann steht der zukünftigen Elektromobilität im großen Stil nicht mehr viel im Wege.

Die sozialwissenschaftliche Begleitforschung untersucht die Akzeptanz der im Projekt genutzten Fahrzeuge und deren Praxistauglichkeit im Pendel- und Dienstwagenverkehr. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse sollen nachhaltige, die Projektlaufzeit überdauernde, Ansätze ermöglichen, um die Adoptionsbereitschaft von Elektrofahrzeugen zu steigern. Zu diesem Zweck werden die teilnehmenden Pendlergruppen fortlaufend zu ihren Einschätzungen und Erfahrungen mit den Elektrofahrzeugen befragt und begleitet. Bisherige Analysen zeigen, dass Elektrofahrzeuge im Szenario des Pendelverkehrs gegenüber sonst üblichen Bedenken im privaten Kontext, wie z.B. Reichweitereinschränkung, hinweghelfen können. Zudem geben die Teilnehmer an, durch die Nutzung der Fahrzeuge einen Beitrag zum Umweltschutz leisten zu können und empfinden die Anschaffung der Elektrofahrzeuge als eine gute Entscheidung.



# Übersicht

Vorwort	1
Kernergebnisse	2
Übersicht	5
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
Formelverzeichnis	7
1 Vorstellung des Demonstrations- und Flottenprojekts RheinMobil	9
2 Technische und ökonomische Vorabanalyse von Fahrprofilen	12
2.1 Ökonomische Vorabanalyse von Fahrprofilen	12
2.2 Ausarbeitung von systemalterungsrelevanten Beanspruchungsclustern und Auswertung des Fahrverhaltens hinsichtlich Systemzuverlässigkeit	13
3 Zusammenfassung des aktuellen Stands	15
4 Inhalte und Ergebnisse der physikalisch-technischen Begleitforschung	17
4.1 Analyse der Ladevorgänge	17
4.2 Realer Energieverbrauch und Energieverbrauchsmodell	20
4.3 Technische und wirtschaftliche Bewertung der Auslastungsmodelle	24
4.4 Weitere Ergebnisse und Lessons Learned	26
5 Inhalte und Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung	28
6 Ökologische Bewertung	30
6.1 Ansätze zur Bewertung der durch Elektrofahrzeuge entstehenden Emissionen	30
6.2 Zeitdiskrete CO <sub>2</sub> -Emissionen des Ladestroms während der Elektrofahrzeug-Nutzungsphase	30
6.2.1 Datenbasis und Methodik	32
6.2.2 Ergebnisse	32
6.2.3 Fazit	33
6.3 Ergebnisse der begleitenden Ökobilanz	34
6.3.1 Anwendungsfall Berufspendlerverkehr	34
6.3.2 Anwendungsfall Dienstwagenflotte	36
6.3.3 Fazit	37
7 Schlussfolgerungen	38
Glossar	39
Quellen	41
Autorenliste	42
Danksagung	43

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: e-Wolf Delta 2 Fahrzeug	9
Abbildung 1.2: Nissan Leaf Fahrzeug	10
Abbildung 1.3: Mögliche Fahrleistungen in den unterschiedlichen Auslastungsmodellen	10
Abbildung 2.1: Einordnung des Pendlerverkehrs in RheinMobil in die deutschen Tagesfahrleistungen von Privatfahrzeugen anhand des deutschen Mobilitätspanels	13
Abbildung 2.2: Verknüpfung der Datenaufzeichnung mittels Smartphone-App und Streckenanalyse	13
Abbildung 2.3: Verknüpfung der Datenaufzeichnung mittels Smartphone-App und Streckenanalyse	13
Abbildung 2.4: Fahrstreckenanalyse mittels Algorithmus im Vergleich zur subjektiven Wahrnehmung	14
Abbildung 4.1: Konventionelle Ladekurve e-Wolf Delta 2 EVO	18
Abbildung 4.2: Konventionelle Ladekurve Nissan Leaf	18
Abbildung 4.3: DC-Schnellladekurve von e-Wolf Delta 2 EVO	19
Abbildung 4.4: DC-Schnellladekurve Nissan Leaf	20
Abbildung 4.5: Spezifischer Energieverbrauch e-Wolf	21
Abbildung 4.6: Spezifischer Energieverbrauch Nissan Leaf Route 0	21
Abbildung 4.7: Zusammensetzung Energieverluste in Antriebsstrang und Rekuperation Elektrofahrzeug	22
Abbildung 4.8: Wirkungsgradkennfeld Antriebsstrang e-Wolf Delta 2 bei 22 km/h und 50 Nm Intervallen	22
Abbildung 4.9: Vergleich gemessener Energieverbrauch und theoretischer Energieverbrauch im Modell	23
Abbildung 4.10: Zusammensetzung Energieverbrauch einer Fahrt (exemplarische Fahrt Route 1)	24
Abbildung 4.11: TCO-Elektrofahrzeugeinsatz in den Pendlermodellen	25
Abbildung 4.12: Kumulierte TCO-Elektrofahrzeug im Pendlermodell	26
Abbildung 5.1: Vorgehen im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung	28
Abbildung 6.1: Wochenprofile zeitdiskreter spezifischer CO <sub>2</sub> -Emissionen in Frankreich (blau) und Deutschland (rot)	31
Abbildung 6.2: Fahrzeugeinsatz im Pendlerbetrieb: Treibhauspotential über Fahrleistung	35
Abbildung 6.4: Fahrzeugeinsatz: Dienstwagen im grenzübergreifenden Fahrbetrieb: Treibhauspotential über Fahrleistung	36

# Tabellen- und Formelverzeichnis

Tabelle 1.1: Fahrzeuginformationen (Stand 30.04.2015)	11
Tabelle 3.1: Übersicht der Verbrauchs- und Nutzungsdaten	16
Tabelle 3.2: Übersicht Routen RheinMobil	16
Tabelle 4.1: Simulation Energieverbrauch e-Wolf Delta 2 EVO in Auslastungsmodell 3 im Pendlerverkehr	25
Tabelle 6.1: Minimale, maximale und durchschnittliche CO <sub>2</sub> -Emissionen in Frankreich und Deutschland in g CO <sub>2</sub> /kWh im Jahr 2013	33
Tabelle 6.2: Real- und Normverbräuche der Projektfahrzeuge	33
Formel 4.1: Bestimmung des realen Energieverbrauchs im Pendelverkehr	21
Formel 4.2: Antriebsleistung (am Rad)	21
Formel 4.3: Antriebs- und Rekuperationsleistung aus und in die Batterie	23
Formel 4.4: Bestimmung des Energieverbrauchs pro Fahrt	23



# 1 · Vorstellung des Demonstrations- und Flottenprojekts RheinMobil

Grenzüberschreitende deutsch-französische Elektromobilität mit wirtschaftlicher Perspektive



Abbildung 1.1: e-Wolf Delta 2 Fahrzeug

Täglich pendeln zehntausende Berufstätige in der Technologieregion Karlsruhe von ihren Wohnorten in Deutschland und Frankreich zu ihrer Arbeitsstelle oder innerbetrieblich zwischen den Arbeitsstellen hin und her. Dabei greifen sie in der Regel auf ein konventionelles Fahrzeug zurück und absolvieren Strecken von meist unter 100 km pro Wegstrecke. Diese Fahrten sind aus technischer Sicht bestens geeignet für den Einsatz von Elektrofahrzeugen. Doch die im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen hohen Anschaffungspreise machen diese Alternative für den Privatnutzer gegenwärtig noch nicht wirtschaftlich attraktiv.

Einen neuen Weg in Richtung eines wirtschaftlichen Elektrofahrzeugeinsatzes demonstriert das grenzüberschreitende Projekt RheinMobil des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Rahmen des Schaufensters LivingLabBW<sup>®</sup> mobil der Bundesregierung.

Zusammen mit den in der Region ansässigen Unternehmen Michelin und Siemens wird in einem dreijährigen Flottenversuch der Nachweis erbracht, dass in gewerblichen Einsatzprofilen eine wirtschaftliche Elektrifizierung des Berufspendlerverkehrs und des Dienstwagenverkehrs möglich ist und sich daher nachhaltige Geschäftsmodelle aus den Forschungsergebnissen ableiten lassen.

Die Wirtschaftlichkeit soll dabei über die im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen niedrigeren Betriebskosten erreicht werden. Bei den gegenwärtigen Marktpreisen für Elektrofahrzeuge sind hohe Jahresfahrleistungen notwendig, um in einer Gesamtkostenbetrachtung (inkl. Fahrzeugnutzung) günstiger zu sein als ein vergleichbares konventionelles Fahrzeug. Die Auswirkungen dieser hohen Jahresfahrleistungen untersuchen die Forschungspartner Karlsruher Institut für Technologie und die Fraunhofer-Institute für System- und Innovationsforschung (ISI), für

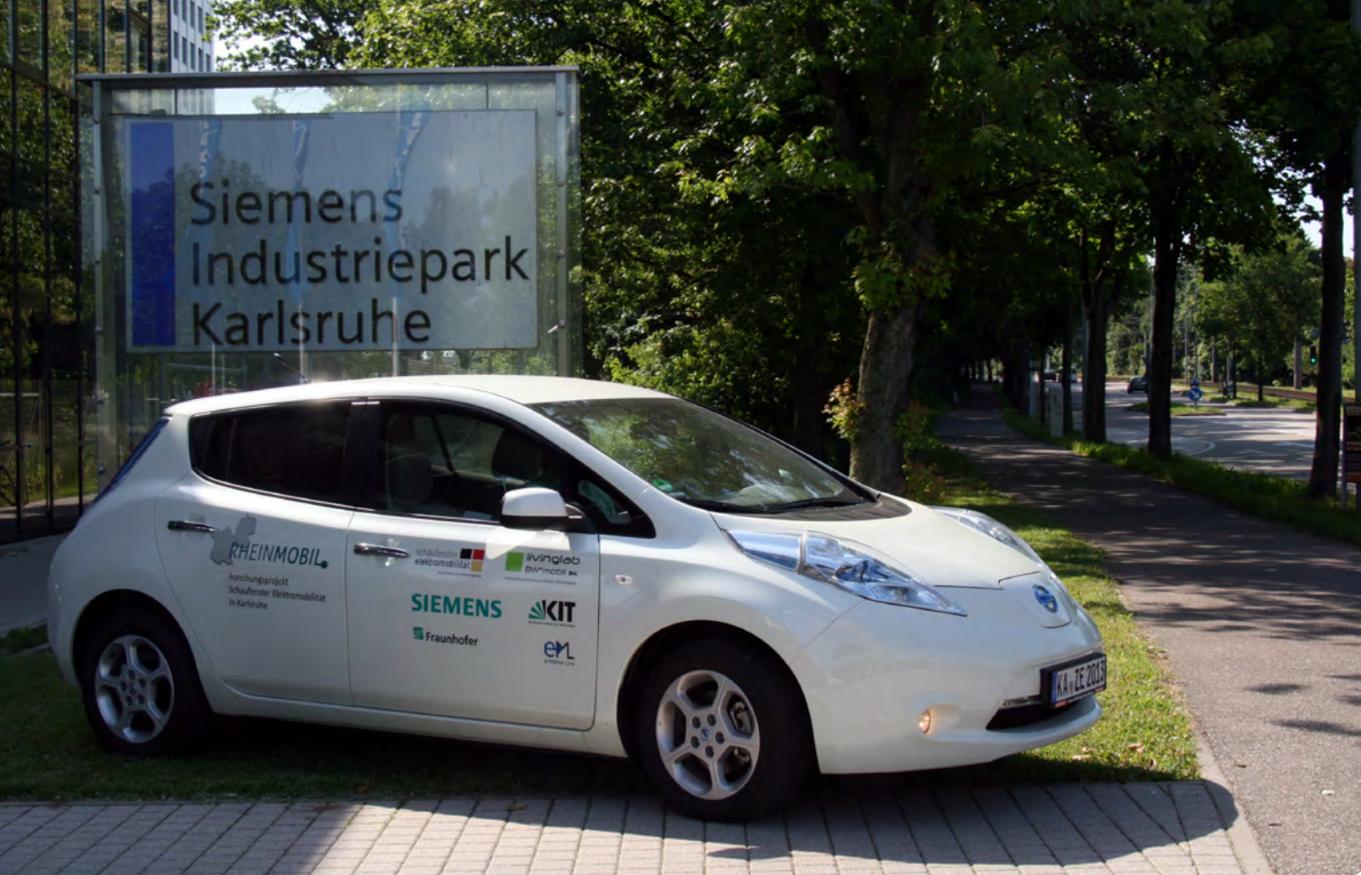


Abbildung 1.2: Nissan Leaf Fahrzeug

Bauphysik (IBP) und für Chemische Technologie (ICT) in enger Zusammenarbeit mit den Industriepartnern und dem Mobilitätsdienstleister e-Motion Line (eML). Dabei werden zwei unterschiedliche Mobilitätsverkehre betrachtet: Auf der einen Seite der Weg zur Arbeit und auf der anderen Seite der Weg, der während der Arbeitszeit zwischen unterschiedlichen Unternehmensstandorten zurückgelegt wird, um z.B. zu Besprechungen zu fahren.

Neben der rein wirtschaftlichen Betrachtungsweise wird im Rahmen der Begleitforschung auch das Nutzerverhalten bei der Nutzung der Elektrofahrzeuge im deutsch-französischen Grenzverkehr untersucht. Die Daten zu Nutzererwartungen und Nutzererfahrungen werden in der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung dazu verwendet, Markteintrittsbarrieren zu identifizieren und Maßnahmen zur Erhöhung der allgemeinen Nutzerakzeptanz zu entwickeln. Im Rahmen der physikalisch-technischen Begleitforschung wird anhand realer Daten aus den regelmäßigen Fahrten im Rahmen des Pendler- bzw. Dienstwagenverkehrs ermittelt, welche Auswirkungen Faktoren wie Batterietechnologie, Fahrverhalten und Außentemperatur auf den Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge haben.

Die im Laufe des Projektes unter Realbedingungen intensiv beanspruchten Fahrzeuge und die Ladeinfrastruktur sind sorgfältig nach dem aktuell verfügbaren Stand der Technik ausgewählt worden. Im Projekt kommen die DC-schnellladefähigen Fahrzeuge e-Wolf Delta 2 und der Nissan Leaf zum Einsatz. Diese Schnellladung zusammen mit einer ho-

hen Zuverlässigkeit der eingesetzten Fahrzeuge ermöglicht es, eine hohe Verfügbarkeit der Fahrzeuge zu gewährleisten. Denn nur wenn das Elektrofahrzeug über einen längeren Zeitraum hohe monatliche Fahrleistungen aufweist, kann so viel eingespart werden, dass sich der höhere Anschaffungspreis im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug amortisiert.

Eine Möglichkeit die Elektrofahrzeugauslastung zu erhöhen besteht darin, mehrere Fahrergruppen mit einem Fahrzeug zu befördern (Abbildung 1.3). Dieses Potential ist möglich für Fahrten auf fester Route mit einem Pendlermodell im Schichtbetrieb und benötigt eine Einsatzprofiloptimierung zur Gewährleistung optimaler Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge. Dank dieser können mehrere Pendlergruppen

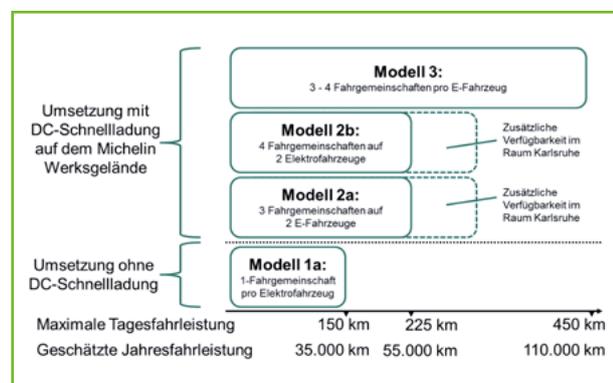


Abbildung 1.3: Mögliche Fahrleistungen in den unterschiedlichen Auslastungsmodellen

Fzg. Modell	e-Wolf Delta 2	e-Wolf Delta 2 EVO	Nissan Leaf
Anzahl Fahrzeuge im Projekt	3	3	1
Monatliche Fahrleistung pro Fahrzeug	> 3.000 km	> 3.000 km	ca. 1.500 km
Fahrten im Projekt (abgeschätzt)	2.400	2.400	450
Konventionelle Ladung	Typ 2, 230 V (2,6 kW)	Typ 2, 230 V (2,5 kW)	Typ 2, 230 V (2,5 kW)
Schnellladung	-	30 kW, 700 V DC CHAdeMO, Harting Stecker	50 kW, 500 V DC, CHAdeMO, CHAdeMO Stecker

Tabelle 1.1: Fahrzeuginformationen (Stand 30.04.2015)

im Laufe eines Tages auf das gleiche Elektrofahrzeug für ihren Pendlerweg zurückgreifen. In der potentiell höchsten Auslastung könnten so über den Tag verteilt mit einem sieben-sitzigen Elektrofahrzeug bis zu 21 Mitarbeiter transportiert werden, was zu geschätzten Jahresfahrleistungen von 110.000 km pro eingesetztem Elektrofahrzeug führt.

Bei Michelin nutzen so mehrere Fahrergruppen auf dem Pendlerweg vom Elsass zur Arbeit in Karlsruhe die e-Wolf Delta 2 Fahrzeuge (Abbildung 1.1). Bei den grenzüber-

schreitenden Dienstwagenfahrten zwischen Haguenau und Karlsruhe wird ein Nissan Leaf eingesetzt (Abbildung 1.2). Die genauen Daten sowie Informationen zur eingesetzten konventionellen und Schnellladetechnologie können Tabelle 1.1 entnommen werden. Die Besonderheit bei beiden Anwendungsmodellen ist, dass für eine konstante Aufrechterhaltung der Mobilität nur zwei feste Lademöglichkeiten an den jeweiligen Endpunkten zur Verfügung stehen müssen.

# 2 · Technische und ökonomische Vorabanalyse von Fahrprofilen

## 2.1 Ökonomische Vorabanalyse von Fahrprofilen

Elektrofahrzeuge stehen vor dem Dilemma bezüglich der Reichweite durch die Batterie limitiert zu sein, jedoch eine Mindestreichweite erfüllen zu müssen, um die Vorteile der niedrigen Betriebskosten gegenüber konventionellen Fahrzeugen ausnutzen zu können. Man kann daher ein Fenster bestimmen in dem Elektrofahrzeuge technisch möglich und ökonomisch sinnvoll sind. In Abbildung 2.1 ist dieses Fenster für Fahrzeuge mit einer elektrischen Durchschnittsreichweite von 75 km sowie den Tagesfahrleistungen des deutschen Privatfahrzeugbestands dargestellt (MOP, 2010).

Man erkennt, dass für eine große Menge an Fahrzeugen die Reichweite eines Elektrofahrzeuges ausreichend wäre, aber dass die durchschnittliche Tagesfahrleistung für mehr als 70 % der privat zugelassenen Fahrzeuge in Deutschland zu gering ist, damit sich die Kosten gegenüber einem konventionellen Fahrzeug amortisieren. Da das Nutzerverhalten nicht jeden Tag gleich ist, werden für diese Fragestellung häufig Fahrprofilanalysen in Betracht gezogen.

Im Rahmen des Projektes RheinMobil wurden 29 Fahrprofile von Michelin (25) und Siemens (4) über einen Zeitraum von drei Wochen erhoben und aus technischer und ökonomischer Sicht analysiert.

Die privat gehaltenen Fahrzeuge von Pendlern, die bei Michelin arbeiten, fahren deutlich mehr als der bundesdeutsche Durchschnitt (Abbildung 2.1), die gewerblich zugelassenen Flottenfahrzeuge von Siemens liegen im durchschnittlichen Bereich gewerblicher Halter. Beim heutigen Stand der Ladeinfrastrukturtechnologie mit ausschließlicher Lademöglichkeit über Nacht können einige wenige Pendler-Fahrprofile von reinen Batteriefahrzeugen bewältigt werden. Eine zusätzliche Lademöglichkeit am Tag erhöht den Anteil der technisch möglichen Fahrprofile deutlich.

Der Vergleich der Fahrzeuge von Siemens und Michelin zeigt aber auch, dass die zusätzliche Lademöglichkeit am Tag nur dann einen deutlich positiven (technischen, respektive ökonomischen) Effekt mit sich bringt, wenn entsprechende Fahrstrecken (hier: lange, regelmäßige Pen-

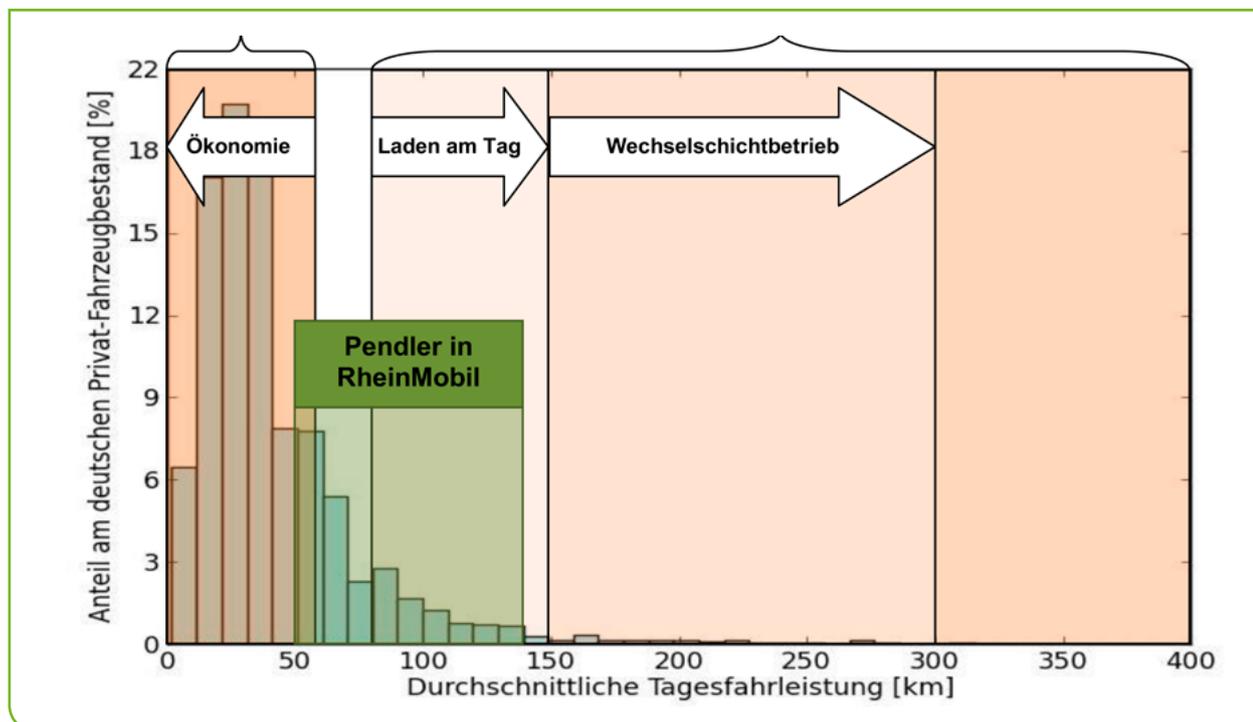


Abbildung 2.1: Einordnung des Pendlerverkehrs in RheinMobil in die deutschen Tagesfahrleistungen von Privatfahrzeugen anhand des deutschen Mobilitätspanels

delstrecken) vorliegt. Dies unterstreicht Studienergebnisse zur Identifizierung potenzieller Erstnutzer von Elektrofahrzeugen. Die Pendler von Michelin erfüllen die wirtschaftlichen Voraussetzungen für einen Elektrofahrzeugbetrieb, was auch die geringen negativen oder teilweise positiven TCO-Differenzen belegen.

Nicht berücksichtigt sind in diesen Rechnungen die Kosten für Ladeinfrastruktur, die dieses Ergebnis negativ beeinflussen könnten, wenn die Kosten auf die Fahrzeughalter umgelegt werden. Eine Mehrfachnutzung von Fahrzeugen ist möglich, bei der die Tagesfahrleistungen durch eine Weiternutzung der Fahrzeuge im Pendlerverkehr der Schichtarbeiter erhöht wird (Abbildung 2.1). Dies kann einen deutlich positiven Effekt haben, da gegebenenfalls zwei konventionelle Fahrzeuge durch ein elektrisches ersetzt werden können.

## 2.2 Ausarbeitung von systemalterungsrelevanten Beanspruchungsclustern und Auswertung des Fahrverhaltens hinsichtlich Systemzuverlässigkeit

Zur Beurteilung von Beanspruchungsclustern und der Auswertung des Fahrverhaltens wurde zunächst mit Hilfe einer der Fraunhofer Projektgruppe Neue Antriebssysteme (NAS) entwickelten Smartphone-App Fahrdaten in einem der bei Michelin eingesetzten Elektrofahrzeuge über einen Zeitraum von einer Arbeitswoche erfasst. Diese Daten wurden hinsichtlich ihres Fahrprofils analysiert und mit den durch die Firma e-Wolf zur Verfügung gestellten Fahrdaten, die direkt auf dem Fahrzeug-CAN in niedriger, nicht konsistenter Messrate erfasst und gespeichert wurden, verglichen. Anhand der Abbildung 2.2 zeigt sich die deutlich bessere Auflösung der durch das Smartphone erfassten Daten.



Abbildung 2.2: Verknüpfung der Datenaufzeichnung mittels Smartphone-App und Streckenanalyse

Es wurden des Weiteren Beschleunigungskollektive, Geschwindigkeitskollektive, Höhenverlaufprofile zur Rekuperationsabschätzung sowie Anfahrhäufigkeiten untersucht. Die erhobenen Daten können später zur Darstellung von Fahrzeugsimulationen und Energiebetrachtungen herangezogen werden.

Aus den erhobenen Fahrdaten konnte mittels eines bei der Fraunhofer Projektgruppe NAS schon vorhandenen und an die neuen Umgebungsbedingungen angepassten Algorithmus eine Fahrstreckenanalyse durchgeführt werden, siehe Abbildung 2.3.

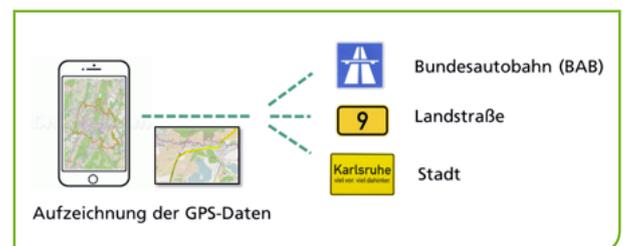


Abbildung 2.3: Verknüpfung der Datenaufzeichnung mittels Smartphone-App und Streckenanalyse

Hierbei ergaben sich bei dem eingesetzten Fahrzeug im Berufspendlerbetrieb ein Stadtanteil von 4,1 % der Gesamtfahrstrecke, ein Überlandanteil von 46,4 % und einem Autobahnanteil von 49,5 %. Verdeutlicht wird dies in Abbildung 2.4. Hier wird die subjektiv, tatsächlich zurückgelegte Streckenart der durch den Algorithmus analysierten Streckenart gegenübergestellt.

Von der ursprünglichen Zielsetzung der Ausarbeitung von systemalterungsbedingten Beanspruchungsclustern musste im Verlauf des Projektes bis zum aktuellen Stand abgesehen werden, da die über das Fahrzeug selbst erfassten und vom Hersteller e-Wolf zur Verfügung gestellten Daten nicht hinreichend genau sind.

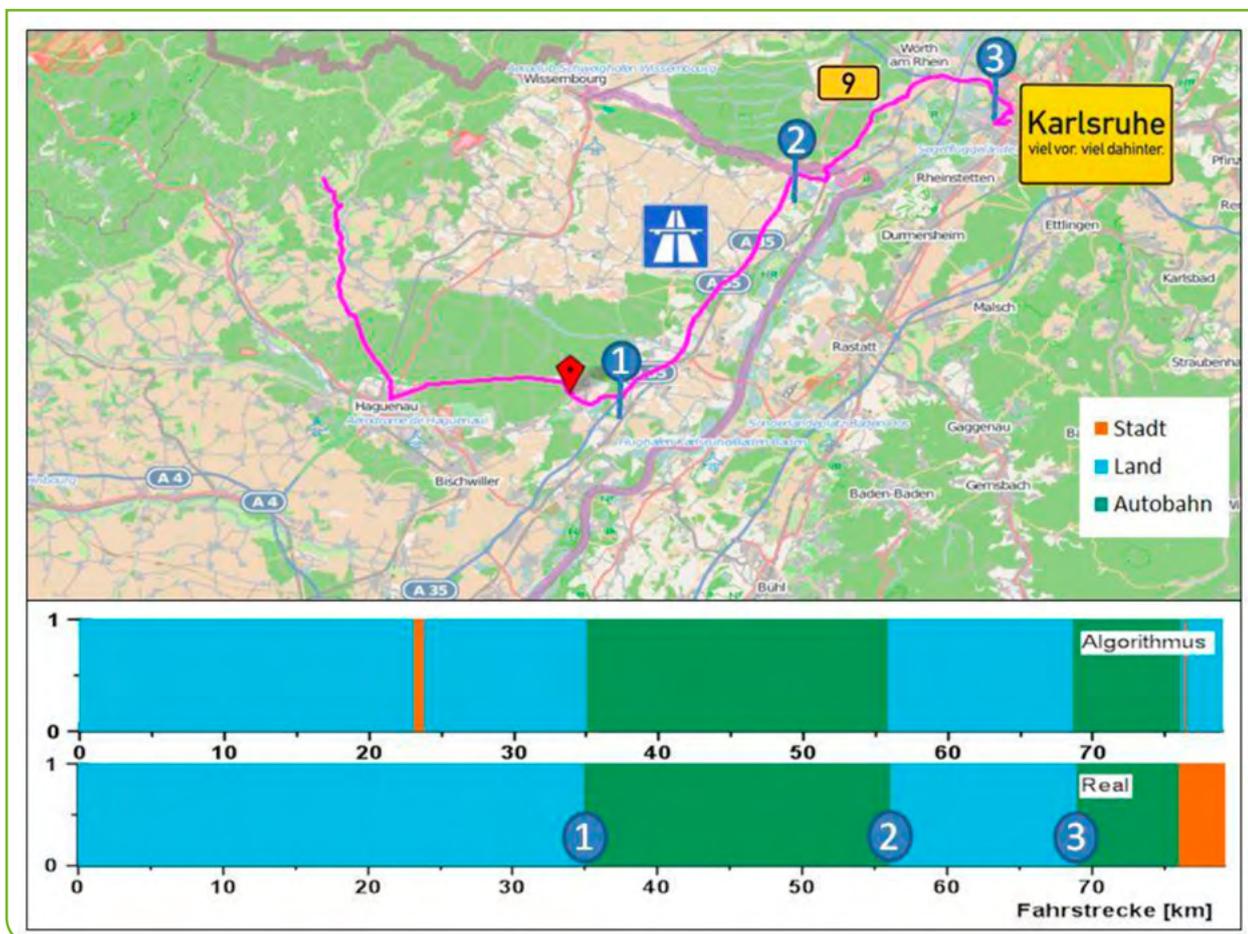


Abbildung 2.4: Fahrstreckenanalyse mittels Algorithmus im Vergleich zur subjektiven Wahrnehmung

# 3 · Zusammenfassung des aktuellen Stands

Die Elektrofahrzeuge befinden sich seit April 2013 nahezu täglich im Einsatz. Die Gesamtanzahl der Fahrzeuge wurde gemäß des Projektplans von anfangs drei in der Pendleranwendung mit der Aufnahme des Dienstwagenverkehrs zunächst auf vier Stück und später durch drei weitere Fahrzeuge in der Pendleranwendung auf sieben Stück erhöht. Insgesamt sind über die gesamte Flotte inzwischen über 330.000 km elektrisch zurückgelegt worden. Gemäß dem Normverbrauch und dem in Deutschland sowie Frankreich eingesetzten Strommix sind im Vergleich zu einem konventionellen Dieselfahrzeug so lokal knapp über 22 t CO<sub>2</sub> eingespart worden. Wie in Tabelle 3.1 ersichtlich, zeichnen sich alle elektrifizierten Fahrprofile durch eine hohe monatliche Fahrleistung aus. So fahren die e-Wolf Delta 2 Pendlerfahrzeuge mehr als 3.000 km im Monat, die Fahrleistung des Nissan Leaf im Dienstwagenverkehr liegt mit ca. 1.500 km bei der Hälfte. Dementsprechend hoch ist auch die absolute Anzahl der durchgeführten Ladevorgänge bezogen auf die vergleichsweise kleine E-Flotte. Diese Zahlen verdeutlichen, dass das Teilvorhaben des Projektes, die technischen Komponenten der Elektrofahrzeuge einem intensiven Alltagstest zu unterziehen, erreicht wird und hohe Ansprüche an die Verfügbarkeit sowie technische Zuverlässigkeit der Fahrzeuge gestellt werden.

Die Fahrzeuge im Projekt RheinMobil werden, abhängig von der zugrunde liegenden Mobilitätsanwendung, auf festen Routen eingesetzt. Zur Charakterisierung der Routen wurden sowohl vorab als auch während des Betriebs verschiedene Kennzahlen erhoben, anhand derer sich eine potentielle Eignung der Route für den Einsatz eines Elektrofahrzeugs abschätzen lässt. Tabelle 3.2 zeigt die Übersicht der Kennzahlen der im Projekt mit Elektrofahrzeugen bedienten Routen. Die Streckenlänge liegt zwischen 60 und 80 km. Dies führt in Kombination mit der Auslastungsfrequenz zu den hohen Fahrleistungen. Aufgrund des großen Anteils an Überlandstrecken liegen die Durchschnittsgeschwindigkeiten auf allen Routen über 55 km/h. Für die Route mit der höchsten Durchschnittsgeschwindigkeit liegt der Wert bei 74 km/h. In Bezug auf die Topographie bei der Höhendifferenz zwischen dem tiefsten und höchsten Punkt der Route zeigen sich die größten Differenzen bei Route 3 mit bis zu 361 Höhenmetern (Tabelle 3.2).

Fzg. Modell	e-Wolf Delta 2	e-Wolf Delta 2 EVO	Nissan Leaf
Fahrleistung im Projekt pro Fahrzeugtyp	173.000 km	122.000 km	33.000 km
Fahrten im Projekt (abgeschätzt)	2.300	1.600	450
Konventionelle Ladevorgänge (abgeschätzt)	2.300	1.590	150
DC-Schnellladevorgänge (abgeschätzt)	-	10	300
Eingesparte CO <sub>2</sub> (gem. Normverbrauch)*	12,48 t	8,81 t	1,32 t

Tabelle 3.1: Übersicht der Verbrauchs- und Nutzungsdaten

\*gemäß NEFZ-Normverbrauch Herstellerangaben & GaBi Datenbank 50/50 DE/FR Strommix (Professional Datenbank, Version 2013, SP24, Referenzjahr 2010)

Routen Nr.	Anwendung	Insassen	Streckenlänge	Ø-Geschwindigkeit	Max. Höhendifferenz
0	Dienstwagenverkehr	≤ 4	70 km	74 km/h	66 m
1	Berufspendler	7	80 km	55 km/h	110 m
2	Berufspendler	7	76 km	58 km/h	112 m
3	Berufspendler	7	76 km	56 km/h	361 m
4	Berufspendler	7	62 km	60 km/h	38 m
5	Berufspendler	6	75 km	55 km/h	158 m
6	Berufspendler	6	70 km	58 km/h	135 m

Tabelle 3.2: Übersicht Routen RheinMobil

# 4 · Inhalte und Ergebnisse der physikalisch-technischen Begleitforschung

Die physikalische und technische Begleitforschung konzentriert sich auf sechs Forschungsschwerpunkte, die alle speziell unter den Anforderungen des intensiven Fahrzeugbetriebs sowie dem kontinuierlichen Einsatz von DC-Schnellladung beantwortet werden sollen:

- Wie sicher und zuverlässig erweisen sich die technischen Komponenten der Elektrofahrzeuge im Alltag unter der intensiven Belastung sowie bei der erforderlichen hohen Verfügbarkeit?
- Wie lassen sich die Ladevorgänge charakterisieren, wie unterscheiden sie sich und welche Auswirkungen haben sie auf die Entwicklung von nachhaltigen Mobilitätsmodellen mit hoher Auslastung?
- Wie groß ist der Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge im Betrieb, wie kann er minimiert werden und welche Faktoren sind dafür ausschlaggebend?
- Welche thermischen Auswirkungen haben der intensive Betrieb und die Nutzung von DC-Schnellladung auf die Fahrzeugbatterie und welche Einschränkungen ergeben sich daraus für den Betrieb?
- Wie wirken sich der intensive Betrieb und der Einsatz von DC-Schnellladung auf die zyklische Alterung der eingesetzten Batteriezellen aus?
- Wo liegt der wirtschaftliche Break-even für ein Elektrofahrzeug im Vergleich zu einem vergleichbaren Dieselfahrzeug in den betrachteten Mobilitätsanwendungen?

Im Folgenden wird insbesondere auf das Ladeverhalten und die sich daraus ergebenden Ladestrategien, das reale und theoretische energetische Verhalten der Fahrzeuge sowie die sich daraus resultierenden Implikationen für die Entwicklung nachhaltiger Mobilitätsmodelle mit hoher Fahrzeugauslastung und deren Wirtschaftlichkeit eingegangen.

## 4.1 Analyse der Ladevorgänge

Im Rahmen der Begleitforschung wurden die konventionellen Ladevorgänge (Ladebetriebsart 2 bis 3,5 kW über eine haushaltsübliche SCHUKO-Steckdose) sowie die DC-Schnellladevorgänge der Fahrzeuge aufgezeichnet. Die Aufzeichnung der konventionellen Ladekurven ist mittels eines Energiemessgerätes erfolgt, das die an der SCHUKO-Steckdose gemessene Spannung und die Ströme aufgezeichnet hat. Die Aufzeichnung der DC-Schnellladevorgänge ist fahrzeugeitig, anhand der gemessenen Batteriespannungen und -ströme während des Ladevorgangs erfolgt.

Die aufgezeichneten konventionellen Ladekurven der e-Wolf Fahrzeuge und des Nissan Leaf unterscheiden sich nur geringfügig (Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2). Der Verlauf der Ladekurven wird vom Hersteller durch die Auslegung des Batterie Management Systems (BMS) vorgegeben. Der gemessene Ladewirkungsgrad zwischen der dem Netz entnommenen Energie und der in der Batterie gespeicherten Energie liegt zwischen 87 und 89%. Der verbleibende Anteil sind Verluste, die bei der Umwandlung von Wechsel- in Gleichstrom entstehen sowie in den übrigen Komponenten und über den Innenwiderstand der Batteriezellen verloren gehen. Beide Ladekurven bleiben für einen Großteil des Ladevorgangs konstant bei der maximalen Ladeleistung an der SCHUKO-Steckdose von 2,5 respektive 2,3 kW. Nur in ihrem Verhalten gegen Ende des Ladevorgangs unterscheiden sie sich. Bei den e-Wolf Fahrzeugen, hier am Beispiel vom Fahrzeug e-Wolf Delta 2 EVO, wird die Ladeleistung über einen vergleichsweise längeren Zeitraum ab ca. 92% State of Charge (SOC) reduziert. Die Ladeleistung des Nissan Leaf hingegen fällt erst bei knapp 99% angezeigtem SOC vom maximalen Niveau mehr oder weniger direkt auf null. Bei einem hohen SOC können höhere Ströme zu einem schnelleren Alterungsprozess in den Zellen führen. Daher geben BMS in der Regel nicht die volle Nominalkapazität als Realkapazität zur Nutzung frei. Die frühzeitige Reduktion der Ladeleistung kann folglich auf eine vergleichsweise große prozentuale Realkapazität hindeuten, aufgrund derer die Ladeleistung früher reduziert wird, um eine unnötige Alterung der Batteriezellen zu vermeiden.

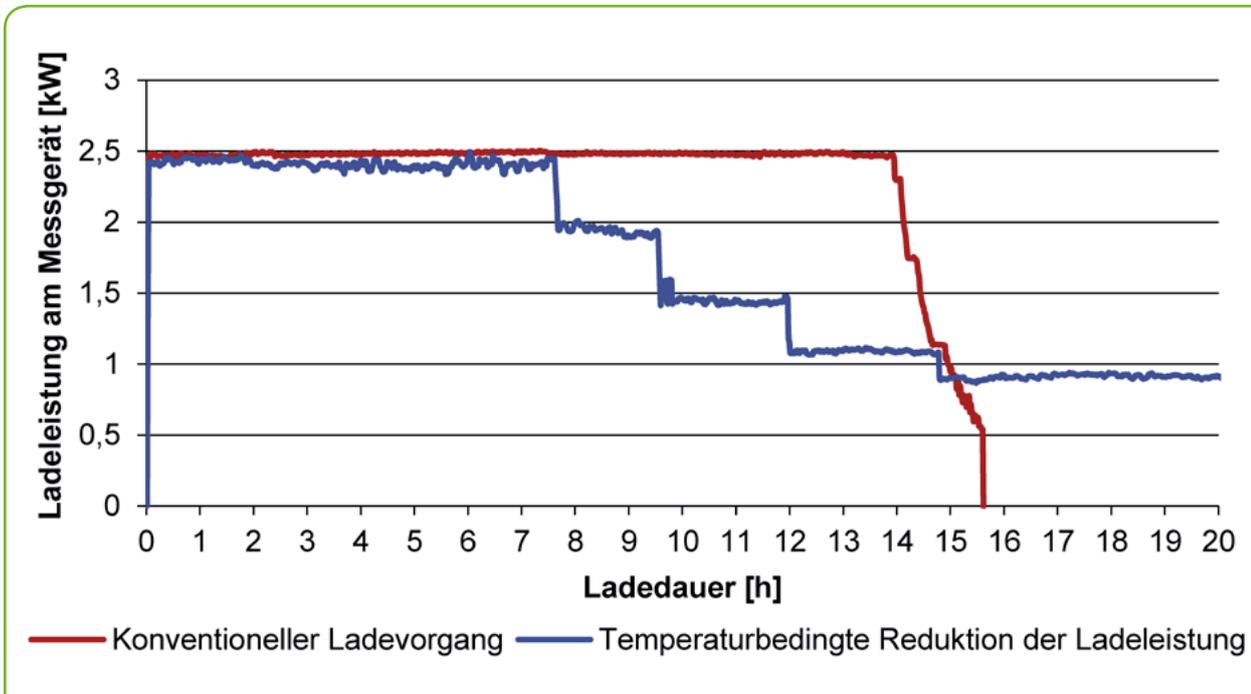


Abbildung 4.1: Konventionelle Ladekurve e-Wolf Delta 2 EVO (0-100 % SOC, Ladebetriebsart 2)

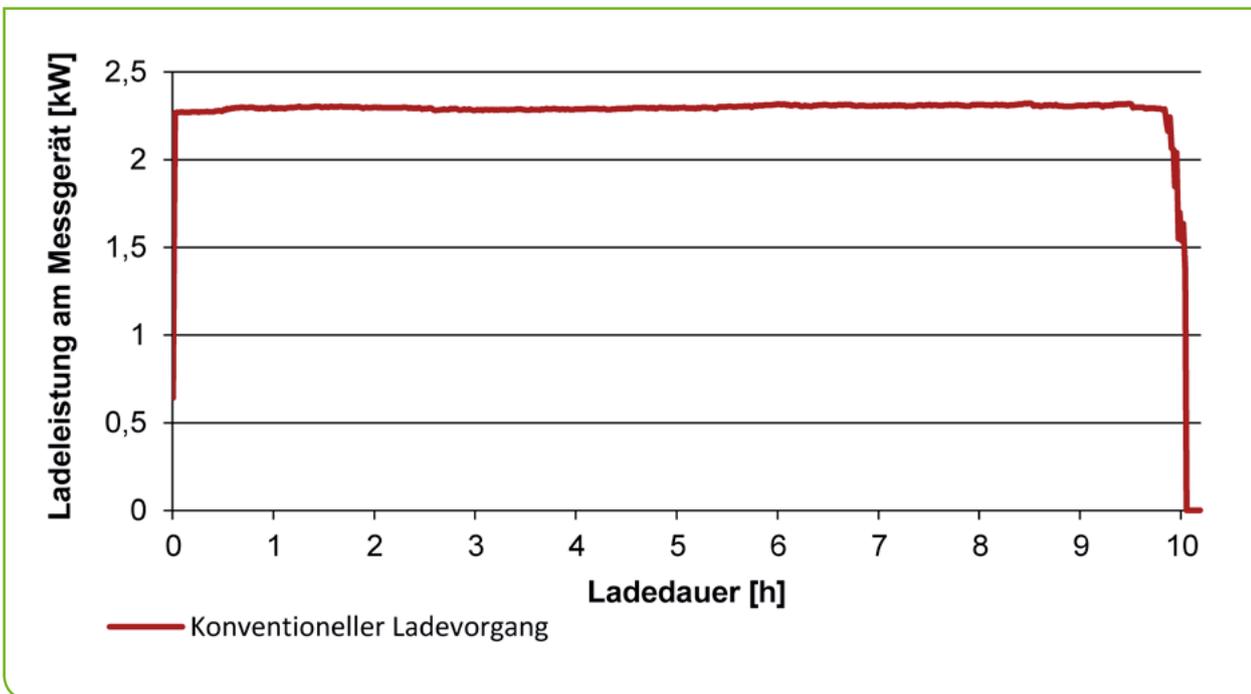


Abbildung 4.2: Konventionelle Ladekurve Nissan Leaf (0-100 % SOC, Ladebetriebsart 2)

Die im Rahmen der Begleitforschung aufgezeichneten DC-Schnellladevorgänge unterschieden sich deutlich in ihrem Verlauf. Wie auch die konventionellen Ladevorgänge ist die maximale Ladeleistung von der Ladeinfrastruktur und der lokalen Netzanbindung abhängig, primär wird ihr Verlauf aber wiederum über das BMS fahrzeugseitig bestimmt. Die gemessene Effizienz der DC-Schnellladung liegt zwischen 90 und 92%, wobei die Berechnung zum Teil auf den Herstellerangaben der Ladeinfrastruktur basiert. Im Gegensatz zu den konventionellen Ladekurven zeigen die Ladekurven der DC-Schnellladung einen deutlich ungleichmäßigeren Verlauf. Die Kurve der e-Wolf Fahrzeuge (Abbildung 4.3, rote Kurve) lässt sich in drei Abschnitte

unterteilen. Im ersten Abschnitt steigt der Ladestrom direkt auf ca. 40 A, was bei der Batteriekapazität einer Laderate von ca. 1 C entspricht, und wird dann für eine Zeit konstant gehalten. Mit der Zunahme der Zellspannung während des Ladeverlaufs steigt auch die Ladeleistung an – man spricht in dem Fall von constant current charge. Ab einem festgelegten Punkt, in diesem Fall ca. 65% SOC, beginnt die zweite Phase, in der der Ladestrom und damit auch die Ladeleistung stufenweise reduziert werden. Die dritte Phase beginnt bei optimalen Bedingungen nach etwa 100 Minuten. Ab diesem Zeitpunkt wird dann die Zellspannung konstant gehalten und der Ladestrom reduziert – man spricht von constant voltage charge.

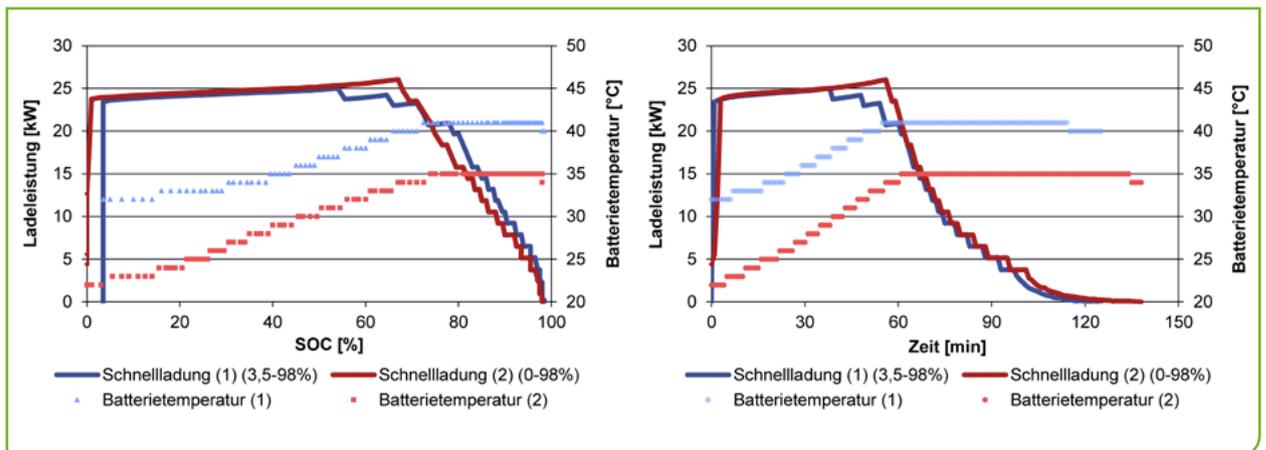


Abbildung 4.3: DC-Schnellladekurve von e-Wolf Delta 2 EVO (0-100 % SOC, Ladebetriebsart 4)

Die DC-Ladekurven des Nissan Leaf zeigen ein ähnliches Verlaufsbild wie die des e-Wolf Delta 2 EVO. Bei der Ladekurve an der Ladesäule mit einer Maximalleistung von 20 kW (blaue Kurve) steigt die Ladeleistung zunächst bei konstantem Ladestrom leicht an, bevor sie kurz nach 70% SOC bzw. 40 Minuten konstant reduziert wird. Der Abbruch nach 60 Minuten erfolgt automatisch durch das BMS fahrzeugseitig. Nach dem manuellen Neustart des Ladevorgangs steigt die Ladeleistung kurzfristig an, bevor sie

wiederum abfällt. Die Ladekurve an der 50 kW Ladesäule (rote Kurve) zeigt einen leicht abweichenden Verlauf. Auch hier steigt die Ladeleistung bei konstantem Ladestrom stetig an bis auf maximal 47 kW nach ca. 15 Minuten. Im Anschluss wird die Ladeleistung dann stetig reduziert bis der Ladevorgang nach ca. 30 Minuten und bei ca. 85% SOC durch das BMS beendet wird. Nach einem Neustart steigt die Ladeleistung nochmal kurzfristig an, bevor sie im Anschluss direkt wieder reduziert wird.

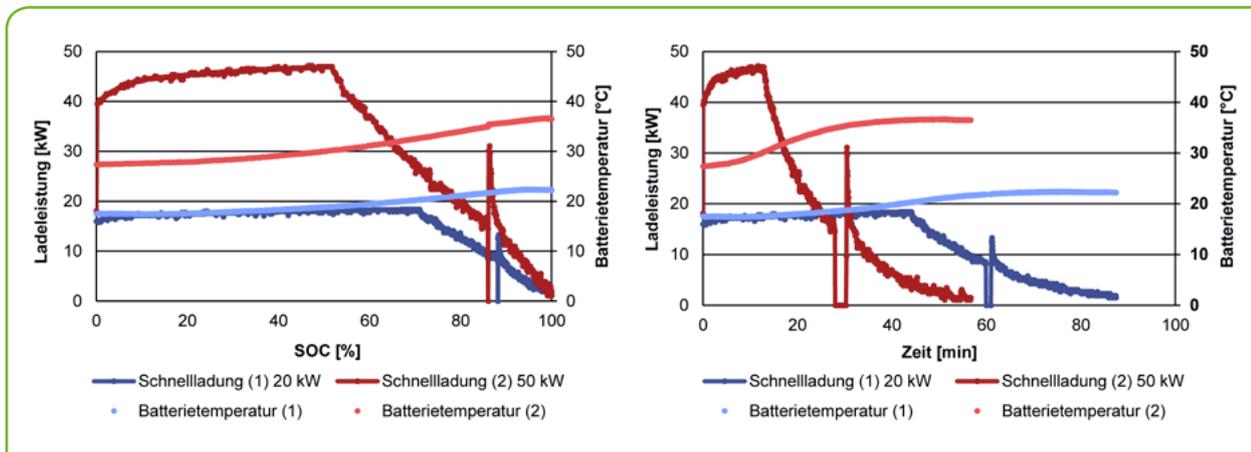


Abbildung 4.4: DC-Schnellladekurve Nissan Leaf (20 kW & 50 kW, Ladebetriebsart 4)

Wie aus den aufgezeichneten Verläufen der DC-Schnellladekurven ersichtlich wird, ist im Gegensatz zu den konventionellen Ladevorgängen die maximale Ladeleistung zwar auch aus der Sicht des Netzbetreibers relevant, alleine aber nicht ausreichend zur Abschätzung der Dauer eines Ladevorgangs. Die Reduktion der Ladeleistung ist auf eine Schonung der Batteriezellen zurückzuführen, genauer gesagt um Lithium-Plating auf der Anode zu vermeiden. Aus den Ladekurven wird ersichtlich, warum verschiedene Hersteller die Ladedauer von 0 bis 80% SOC im Kontext von DC-Schnellladung und nicht bis 100% SOC angeben. Ein Großteil der Energiemenge wird bis zu diesem Zeitpunkt zugeführt, wobei die Ladeleistung oberhalb von 80% entsprechend gering ist und die Ladedauer für die restlichen 20% wesentlich längere Zeit in Anspruch nimmt.

Neben dem Verlauf der Ladekurven erlauben die Daten der Ladevorgänge auch einen Einblick in das thermische Verhalten der Batterie. Höhere Ladeleistungen bei hohen wie auch niedrigen Temperaturen können zu einer Schädigung der Zellen führen. Daher berücksichtigen die BMS unter anderem die Temperatur bei der Regelung der Ladeleistung, wie aus den Ladekurven deutlich wird: Der Vergleich der Ladekurven in Abbildung 4.4 zeigt wie aufgrund niedriger Batterietemperaturen die Ladeleistung durch das BMS reduziert werden kann (blaue Kurve), um eine Schädigung der Zellen zu vermeiden. Bei den Schnellladekurven zeigen sich sowohl Unterschiede zwischen den beiden e-Wolf Delta 2 EVO Ladevorgängen als auch zwischen den Fahrzeugtypen Nissan Leaf und e-Wolf Delta 2. Die blaue Ladekurve in der Abbildung 4.4 zeigt einen unterschiedli-

chen Verlauf zu der roten Ladekurve bei Voraussetzungen, die sich lediglich in Bezug auf die mittlere Zelltemperatur unterscheiden. Bei der blauen Kurve wird der Ladestrom und damit die Ladeleistung schon bei einem niedrigeren SOC Niveau reduziert. In Verbindung mit den aufgezeichneten Temperaturverläufen (hellblaue Kurve) fällt auf, dass die Reduktion der Ladeleistung mit einem Anstieg der Temperatur einhergeht. Die Ladekurven des Nissan Leaf zeigen einen ähnlichen Anstieg der mittleren Batterietemperatur während des Ladevorgangs (hellblaue und hellrote Kurve in Abbildung 4.4). Man sieht im Vergleich der unterschiedlichen Ladeleistungen deutlich wie die höhere Ladeleistung von maximal 50 kW auch zu einem deutlich stärkeren Anstieg der Batterietemperatur (hellrote Kurve) in kürzerer Zeit führt.

#### 4.2 Realer Energieverbrauch und Energieverbrauchsmodell

Der Energieverbrauch der im Projekt eingesetzten Elektrofahrzeuge wird im Rahmen der Begleitforschung aus zwei unterschiedlichen Richtungen analysiert: Zum einen wurde der reale Energieverbrauch der Fahrzeuge im Betrieb ermittelt. Zum anderen wurde ein theoretisches Energieverbrauchsmodell entwickelt, das unter anderem zur Prognose des Energieverbrauchs, der Analyse der Zusammensetzung der Verbrauchskomponenten und der Bestimmung des Wirkungsgrades auf Basis aufgezeichneter Fahrprofile hergenommen werden kann. Dabei dienen die real gemessenen Energieverbräuche als Validierungs-

grundlage für das theoretische Modell. Die Betrachtung des Energieverbrauchs zieht die Systemgrenze an der Batterie, man spricht in diesem Fall von Tank-to-Wheel (TTW). Der Einfluss von Ladeverlusten sowie weiteren Verlusten im Netz bleibt in der Energiebilanz damit unberücksichtigt.

Auf den Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs nehmen viele Faktoren Einfluss. Diese sind unter anderem vom Fahrprofil und dem Fahrverhalten abhängig, was sich im unterschiedlichen Bedarf an Antriebsenergie bzw. auf die rekuperierte Energiemenge auswirkt. Ebenso nehmen die Umgebungs- und Witterungsbedingungen Einfluss, da diese sich z.B. auf den Einsatz der Nebaggregate wie Klimaanlage oder Heizung auswirken. Eigenschaften der technischen Komponenten, wie etwa der Wirkungsgrad des Motors oder der Innenwiderstand der Batteriezellen wirken sich ebenso auf den Energieverbrauch aus. Der Verlauf des gemessenen Energieverbrauchs der im Pendelverkehr eingesetzten Elektrofahrzeuge auf ihren unterschiedlichen Routen seit Mai 2013 ist in Formel 4.1 dargestellt. Der spezifische Normverbrauch gemäß dem NEFZ wird von dem Hersteller e-Wolf mit 187 Wh/km für den e-Wolf Delta 2 und 200 Wh/km für den e-Wolf Delta 2 EVO angegeben. Die aus den gemessenen Batteriedaten anhand der Formel ermittelten Werte liegen zwischen 15 bis 30% über diesen Angaben. Dies ist auf die Routenprofile der Pendlerstrecken zurückzuführen. Der höhere Energieverbrauch lässt sich insbesondere mit den hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten begründen. So weist die Route 4 (Tabelle 3.2) mit der höchsten Durchschnittsgeschwindigkeit aller Berufspendlergruppen auch den höchsten durchschnittlichen Energieverbrauch aus.

$$E_{Fahrt} = \sum_{i=Start+1}^{Ende} \frac{(U_{B,i} + U_{B,i-1})}{2} \times \frac{(I_{B,i} + I_{B,i-1})}{2} \times (t_i - t_{i-1})$$

Formel 4.1: Bestimmung des realen Energieverbrauchs im Pendelverkehr

( $E_{Fahrt}$  – Energieverbrauch pro Fahrt,  $U_{B,i}$  – Batteriespannung,  $I_{B,i}$  – Batteriestrom,  $t$  – Zeitmessungspunkt)

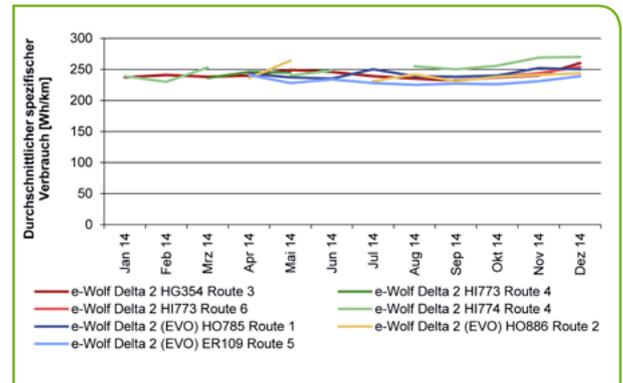


Abbildung 4.5: Spezifischer Energieverbrauch e-Wolf (monatliche Durchschnittswerte 2014)

Für den Energieverbrauch des Nissan Leaf ergibt sich ein unterschiedliches Bild. Auch wenn die e-Wolf Fahrzeuge in Abbildung 4.5 zwischen Sommer und Winter leichte Schwankungen im Energieverbrauch aufweisen, so sind die Abweichungen beim Nissan Leaf deutlich höher (Abbildung 4.6). Dieses Verhalten kann auf die Art der Heizung des Fahrzeuginnenraums zurückgeführt werden. Im Gegensatz zu den e-Wolf Fahrzeugen mit der externen Biodieselheizung, bezieht der Nissan Leaf seine Energie zur Erwärmung des Innenraums aus der Batterie. Dies führt zu dem deutlichen Anstieg des Energieverbrauchs von 150 – 160 Wh/km auf über 200 Wh/km. Die Rekuperation bleibt über das Jahr in etwa konstant und sinkt nur leicht im Vergleich zwischen Winter und Sommer.

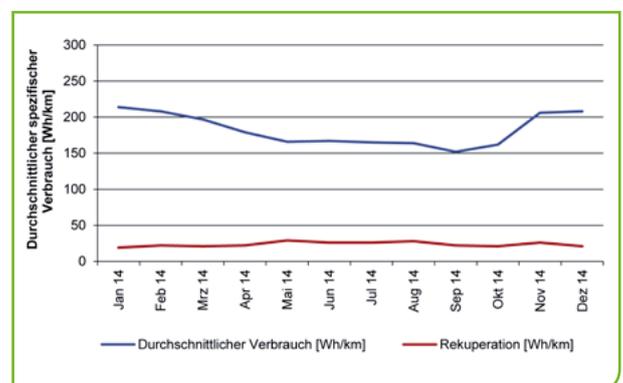


Abbildung 4.6: Spezifischer Energieverbrauch Nissan Leaf Route 0 (monatliche Durchschnittswerte 2014)

Das im Rahmen der Begleitforschung entwickelte theoretische Energieverbrauchsmodell setzt sich aus drei Bestandteilen zusammen: Die Antriebsenergie, die rekupe-rierte Energie sowie der Energieverbrauch der Nebenaggre-gate (Abbildung 4.7).

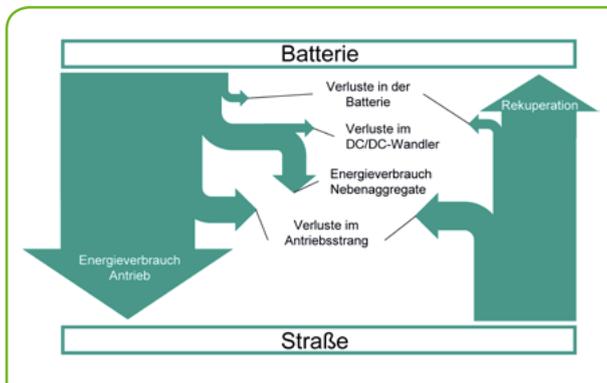


Abbildung 4.7: Zusammensetzung Energieverluste in Antriebsstrang und Rekuperation Elektrofahrzeug

Die für den Antrieb des Elektrofahrzeugs benötigte Leis-tung unterscheidet sich in ihrer Zusammensetzung nicht von der für ein konventionelles Fahrzeug (siehe Formel 4.2).

$$P_{k,Rad} = (P_{k,TR}(v, \dot{v}, m) + P_{k,RW}(v, m, \alpha) + P_{k,LW}(v) + P_{k,ST}(v, \alpha))$$

Formel 4.2: Antriebsleistung (am Rad)

( $P_{k,Rad}$  – Antriebsleistung (am Rad),  $P_{k,TR}$  – Trägheitsleistung,  $P_{k,RW}$  – Leis-tung zur Überwind des Rollwiderstands,  $P_{k,LW}$  – Leistung zur Überwin-dung des Luftwiderstands,  $P_{k,ST}$  – Steigleistung)

Der große Unterschied zum Energieverbrauch eines kon-ventionellen Fahrzeugs besteht jedoch im Wirkungsgrad der Energieumwandlung von der chemisch gespeicherten Energie in den Vortrieb des Fahrzeugs. Fahrzeuge mit Ver-brennungsmotoren der neuesten Generation kommen auf Wirkungsgrade zwischen 30 bis 45%. Für den elektrischen Antriebsstrang lassen sich gegenwärtig in der Literatur verschiedene Werte finden. Daher wurde im Rahmen der Begleitforschung der Wirkungsgrad des e-Wolf Delta 2 mit Hilfe eines Rollenprüfstands für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Drehmomente bestimmt (Abbil-dung 4.8). Die Auswertung zeigt, dass der Wirkungsgrad des Antriebs (von Batterieausgang bis zum Rad) im Durch-schnitt bei ca. 80% liegt. Die Verluste setzen sich zusammen aus den Verlusten in den Leitungen und Kontaktierungen, im Motorinverter, im Elektromotor sowie im Getriebe und Differenzial. Dieser Wert ist mittels der von den Herstellern angegebenen Werte der einzelnen Komponenten verifiziert worden. Mit Hilfe des ermittelten Kennfelds lässt sich die für den Antrieb aus der Batterie entzogene Energie bestim-men (Formel 4.3).

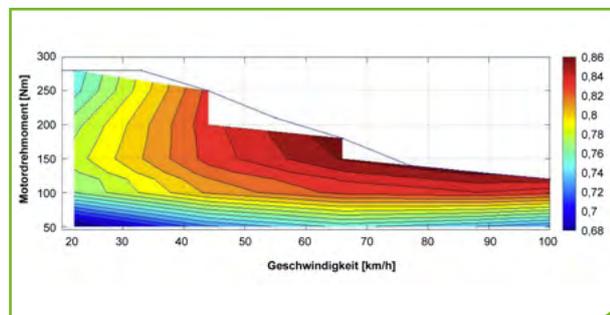
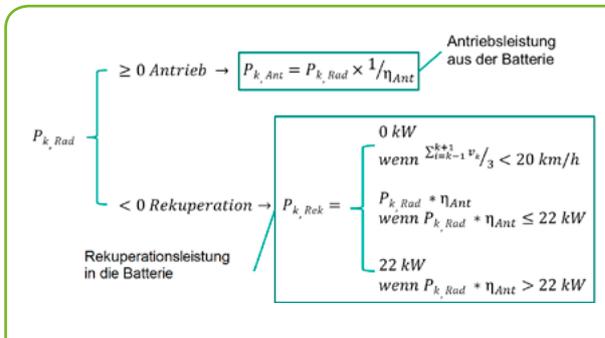


Abbildung 4.8: Wirkungsgradkennfeld Antriebsstrang e-Wolf Delta 2 bei 22 km/h und 50 Nm Intervallen



Formel 4.3: Antriebs- und Rekuperationsleistung aus und in die Batterie

( $P_{k,Rad}$  – Antriebsleistung am Rad,  $P_{k,Ant}$  – der Batterie entzogene Antriebsleistung,  $\eta_{Ant}$  – Wirkungsgrad Antrieb,  $P_{k,Rek}$  – Rekuperationsleistung in die Batterie,  $v_k$  – Fahrzeuggeschwindigkeit)

Für die Bestimmung der rekuperierten Energie ist es notwendig die individuelle Auslegung des Fahrzeugs zu berücksichtigen, da der Rekuperationsvorgang wie auch der Ladevorgang zu großen Teilen durch das BMS bestimmt wird. Im Betrieb wurden anhand der Daten für die e-Wolf Fahrzeuge folgende Rahmenbedingungen ermittelt: Zum einen findet bis 20 km/h keine Rekuperation statt, zum anderen wird bei höheren Geschwindigkeiten nur bis zu einer Rekuperationsleistung von maximal 22 kW Eingangsleistung an der Batterie die Energie zurückgewonnen (Formel 4.3). Andere Hersteller wiederum lassen in definierten SOC Bereichen oder Temperaturniveaus der Batterie keine oder nur eine deutlich reduzierte Rekuperation zu. Dies ist wie bei der Auslegung der Ladekurven auf eine Schonung der Zellen zurückzuführen.

$$E_{Fahrt} = \sum_{k=Start}^{Ende} (\Delta t_{k,k-1} \times (P_{k,Ant} + P_{NA})) + \sum_{k=Start}^{Ende} (\Delta t_{k,k-1} \times (P_{k,Rek} + P_{NA}))$$

Formel 4.4: Bestimmung des Energieverbrauchs pro Fahrt

( $E_{Fahrt}$  – Energieverbrauch pro Fahrt,  $t$  – Zeitintervall,  $P_{k,Ant}$  – der Batterie entzogene Antriebsleistung,  $P_{NA}$  – Leistungsnachfrage der Nebenaggregate,  $P_{k,Rek}$  – Rekuperationsleistung in die Batterie)

Der Verbrauch der Nebenaggregate hängt direkt von der technischen Umsetzung des untersuchten Elektrofahrzeugs ab. Dies lässt sich an den unterschiedlichen spezifischen Energieverbräuchen über den Jahresverlauf und den Einfluss der Heizung feststellen (Abbildung 4.7 und Formel 4.4). Für die e-Wolf Fahrzeuge reicht es jedoch aus, eine konstante Leistung der Nebenaggregate inklusive der Verluste gemäß den Herstellerangaben durch die Umwandlung in die niedrigere Spannung anzunehmen, da die Heizungsleistung durch das externe Aggregat erzeugt wird. Der über die einzelnen Komponenten gemessene und summierte Wert liegt im Durchschnitt bei 1,1 kW. Die für den Nissan Leaf gemessene Leistungsnachfrage der Nebenaggregate liegt bei Nutzung der Heizung im Vergleich dazu bei 4 kW oder mehr.

Der aus dem Modell ermittelte Verlauf des theoretischen Energieverbrauchs einer Fahrt für die e-Wolf Delta 2 Fahrzeuge ist dem auf Basis der real gemessenen Daten sehr ähnlich (Abbildung 4.9). Eine Transformation des Modells auf andere Elektrofahrzeuge ist jedoch nicht ohne weiteres möglich und es muss für ein aussagekräftiges Simulationsergebnis insbesondere die Auslegung der Rekuperation sowie die Auslegung der Nebenaggregate berücksichtigt werden.

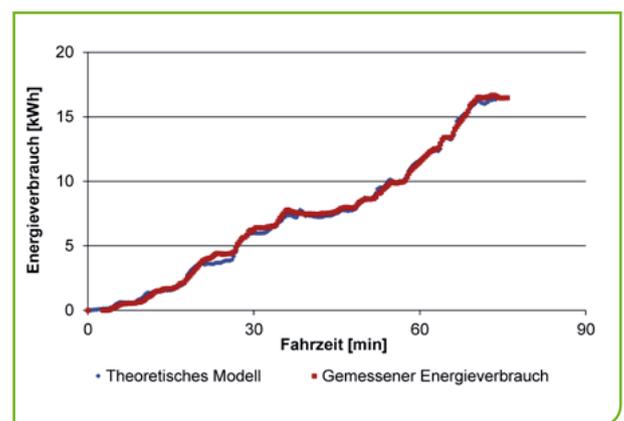


Abbildung 4.9: Vergleich gemessener Energieverbrauch und theoretischer Energieverbrauch im Modell (exemplarische Fahrt auf Route 1)

Sowohl die ermittelten Werte für den realen Energieverbrauch als auch die Werte des theoretischen Modells beziehen sich alle auf die Energieentnahme bzw. -rückspeisung am Eingang der Batterie. Für die Bestimmung des Gesamtenergieverbrauchs ist daher noch der Energieverlust in der Batterie zu berücksichtigen. Der gemessene Wirkungsgrad der Batterie liegt je nach technischer Auslegung, Art der eingesetzten Zellen und Temperatur der Zellen zwischen 95 und 98% und muss für die Bestimmung der Gesamtenergiebilanz sowohl für die entzogene als auch die in die Batterie zurückgespeiste Energie berücksichtigt werden. Auf Basis des theoretischen Modells lässt sich zudem der Einfluss der einzelnen Verbrauchsbestandteile auf den Gesamtenergieverbrauch bestimmen (Abbildung 4.10). Die Abbildung zeigt den simulierten Energieverbrauch einer Fahrt in Abhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit. Dafür wurden alle Werte eines aufgezeichneten Referenzgeschwindigkeitsprofils (Durchschnittsgeschwindigkeit 55 km/h) von 0 bis 80% jeweils in 10%-Schritten reduziert und anschließend der entsprechende Energieverbrauch berechnet. Mit sinkender Durchschnittsgeschwindigkeit verringert sich aufgrund des geringeren Luftwiderstands auch die benötigte Antriebsenergie; gleichzeitig aber steigt der Energieverbrauch der Nebenaggregate, da die Dauer pro Fahrt steigt und die bezogene Leistung konstant bleibt. Da der Luftwiderstand proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit und der Verbrauch der Nebenaggregate antiproportional zur Geschwindigkeit ist, ergibt sich für den spezifischen Energieverbrauch ein Minimum, das für das Referenzfahrprofil und die Fahrzeugauslegung des e-Wolf Delta 2 bei ca. 22 km/h liegt.

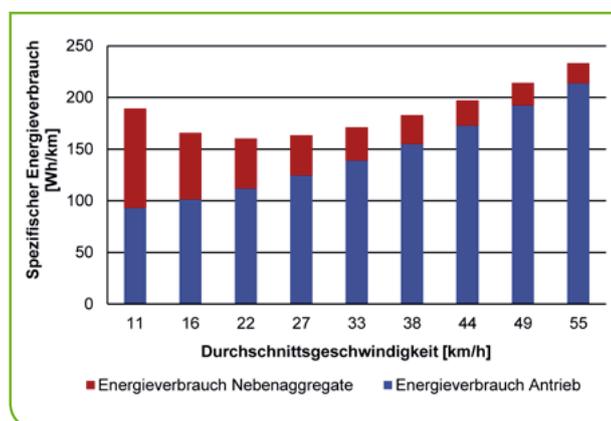


Abbildung 4.10: Zusammensetzung Energieverbrauch einer Fahrt (exemplarische Fahrt Route 1)

#### 4.3 Technische und wirtschaftliche Bewertung der Auslastungsmodelle

Die vorangegangenen Forschungsergebnisse verdeutlichen, dass eine Bewertung der technischen Realisierbarkeit und der Wirtschaftlichkeit der Mobilitätsmodelle mit höherer Auslastung unter Berücksichtigung des Ladeverhaltens und des realen Energieverbrauchs erfolgen muss. Vor Einführung der beschriebenen Mobilitätsmodelle, in denen sich auf Basis des Schichtbetriebs mehrere Pendlergruppen ein Elektrofahrzeug teilen, wurden anhand der im Fahrzeugbetrieb erhobenen Daten die Ladestände der Batterien simuliert. Ziel war es festzustellen, ob die Modelle unter den gegebenen Umständen auch in der Realität umgesetzt werden können. Dazu wurden die Ladekurven sowie die spezifischen Energieverbräuche mit in die Betrachtung aufgenommen. Im Zuge dieser Simulation konnte für das Modell 2 festgestellt werden, dass während der Arbeitszeit eine DC-Schnellladung erforderlich wird. Um die Mobilitätsanforderungen der Pendler dauerhaft zu erfüllen, müssen die Delta 2 EVO Fahrzeuge mit ihrer größeren 32 kWh Batteriekapazität eingesetzt werden. Für das Modell 3, in dem sich drei Pendlergruppen ein Elektrofahrzeug teilen, kam die Simulation zu dem Ergebnis, dass unter den aktuellen Voraussetzungen kein dauerhafter Fahrzeugbetrieb möglich ist. Dies liegt insbesondere an der durchschnittlichen Strecke von ca. 75 km pro Weg. Wie Tabelle 4.11 zeigt, liegt der Energieverbrauch für Hin- und Rückfahrt bei 75 km mit ca. 35,3 kWh deutlich über den ca. 24,5 kWh, die in der Standzeit der Fahrzeuge in Summe nachgeladen werden können. Verkürzt man lediglich die durchschnittliche Strecke und belässt die übrigen Parameter, so hat dies eine doppelt positive Auswirkung auf die Umsetzbarkeit des Modells. Zum einen wird weniger Energie für eine Strecke insgesamt benötigt, zum anderen auch weniger Zeit und somit steht mehr Zeit zur Verfügung die Fahrzeuge nachzuladen. Unter den aufgezeichneten Bedingungen liegt die Schwelle bei ca. 55 km Streckenlänge, ab der mit 26,2 kWh in Summe mehr nachgeladen werden kann, als für beide Strecken benötigt wird. Unter diesen Umständen wäre der Betrieb dauerhaft möglich. Die tägliche Fahrstrecke läge dann bei ca. 360 km und somit würden sich Jahresfahrleistungen zwischen 86.000 km und 100.000 km je nach Schichtmodell ergeben.

Fahrstrecke	km	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0
Ø-Geschwindigkeit	km/h	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0
Fahrzeit	h	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
Durchschnittsverbrauch	Wh/km	200	235	235	235	235	235
Verbrauch	kWh	10,0	12,9	14,1	15,3	16,5	17,6
Ladezeit Michelin	h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ladeleistung Michelin	kW	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0
Lademenge Michelin	kWh	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
Ladezeit Elsass	h	5,7	5,5	5,3	5,1	5,0	4,8
Ladeleistung Elsass	kW	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Lademenge Elsass	kWh	13,1	12,7	12,2	11,8	11,4	11,0
Verbrauch (Hin & Rück)	kWh	20,0	25,9	28,2	30,6	32,9	35,3
Lademenge (Gesamt)	kWh	26,6	26,2	25,7	25,3	24,9	24,5

Tabelle 4.11: Simulation Energieverbrauch e-Wolf Delta 2 EVO in Auslastungsmodell 3 im Pendlerverkehr

Die Erhöhung der Auslastung ist neben einer zuverlässigen und belastbaren Technologie die Grundvoraussetzung für einen perspektivisch wirtschaftlichen Elektrofahrzeugbetrieb in den betrachteten Anwendungen. Viele TCO-Untersuchungen haben bereits demonstriert, dass die im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen günstigeren Betriebskosten von Elektrofahrzeugen zu einem wirtschaftlichen Betrieb führen können, wenn die Jahresfahrleistung hoch genug ist, um die vergleichsweise höheren anschaffungsabhängigen Kosten zu amortisieren. Die TCO-Betrachtung (Abbildung 4.11) im Rahmen der Rhein-Mobil Begleitforschung konzentriert sich auf die 36 Monate Projektlaufzeit. Berücksichtigt werden die Annuität, Energiekosten, Steuern, Versicherung sowie Wartung- und Inspektionskosten. Die Berechnungen beruhen auf aktuellen Nettomarktpreisen für Elektrofahrzeuge und Energie. Dazu wird der e-Wolf Delta 2 mit dem Marktpreis eines in Großserie hergestellten Fahrzeugs, dem Nissan e-NV200,

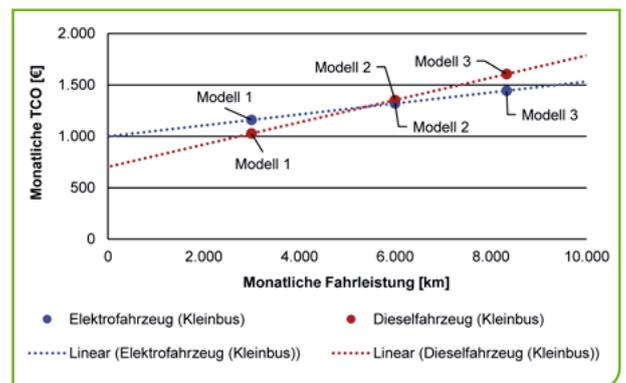


Abbildung 4.11: TCO-Elektrofahrzeugeinsatz in den Pendlermodellen

der fast die identische Fahrzeugkarosserie aufweist, veranschlagt. Zur Vereinfachung wird für alle Fahrzeuge von einem Restwert am Ende des Projekts von null ausgegangen. Zudem wird die installierte DC-Ladeinfrastruktur nicht in die Berechnung aufgenommen.

Auf die unterschiedlichen Auslastungsmodelle bezogen wird deutlich, dass in dem kurzen Projektzeitraum von 36 Monaten der wirtschaftliche Break-even mit Modell 1 nicht erreicht werden kann. Jedoch ist dies mit Modell 2 und 3 möglich. Der Break-even unter den Rahmenbedingungen des Projektes liegt bei etwa 5.500 km im Monat bzw. 200.000 km über die gesamte Projektlaufzeit. Da alle Fahrzeuge die ersten 24 Monate in Modell 1 eingesetzt waren und unter den aktuellen Voraussetzungen eine Erhöhung der Auslastung bis auf Modell 3 nicht möglich ist, wird auch durch eine Kombination der Modelle während der Projektlaufzeit der Break-even also knapp nicht erreicht werden (Abbildung 4.12).

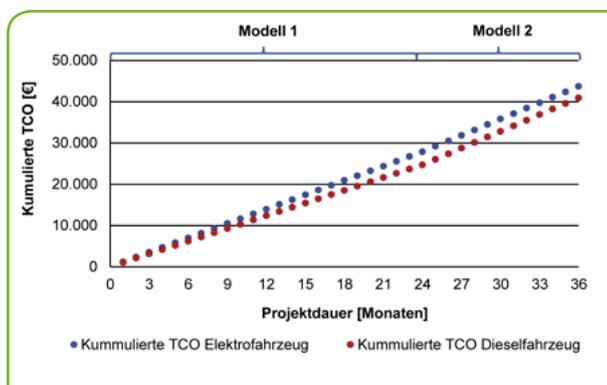


Abbildung 4.12: Kumulierte TCO-Elektrofahrzeug im Pendlermodell über die Projektlaufzeit

#### 4.4 Weitere Ergebnisse und Lessons Learned

Für den Ladevorgang der Elektrofahrzeuge gibt es über den Verlauf der Ladekurve und das thermische Verhalten hinaus noch weitere Punkte, die im Rahmen eines intensiven Fahrzeugeinsatzes Beachtung finden sollten. Zum einen spielt die Netzstabilität eine wichtige Rolle. Im Projekt ist es mehrfach vorgekommen, dass durch netzseitige Störungen der Ladevorgang bei Ladebetriebsart 2 unterbrochen wurde. Bei den e-Wolf Fahrzeugen findet aus Sicherheitsgründen kein automatischer Neustart des Ladevorgangs statt.

Da für einen Großteil der Fahrten die vorangegangenen Ladezeiten gerade ausreichen, um die notwendige Energie nachzuladen, ist daher die Zuverlässigkeit der Netzstromversorgung zwangsläufig erforderlich.

Bei dem Nissan Leaf Fahrzeug hat der ausschließliche Einsatz von DC-Schnellladung zu Beginn des Projektes zu Problemen geführt. Das BMS beendet den DC-Schnellladevorgang nach spätestens 60 Minuten (Abbildung 4.3), auch wenn das Fahrzeug noch nicht wieder vollständig geladen ist, oder bei ca. 85% SOC. Zudem findet kein passives Balancing der Zellen statt. Dies hat nach einiger Zeit zu einem signifikanten Rückgang der angezeigten Batteriekapazität geführt. Auch wenn dies herstellerspezifische Eigenschaften sind, so verdeutlicht das Beispiel die Aussage vieler Hersteller, dass die DC-Schnellladung nur eingesetzt werden sollte, wenn es unbedingt zur Erfüllung der individuellen Mobilitätsnachfrage erforderlich ist. Ansonsten sollten zur Schonung der Batteriezellen geringere Ladeleistungen eingesetzt werden. Daher wurde auch für die Ladung über Nacht eine konventionelle Lademöglichkeit mit maximal 3,7 kW Wechselstrom geschaffen, die zum einen die Zellen schont, passives Balancing ermöglicht und es zusätzlich ermöglicht den Innenraum auf die voreingestellte Temperatur vor zu konditionieren und so während der Fahrt Energie zu sparen. Es gilt damit für das Pendlermodell wie den Dienstreiseverkehr, dass ein Mix unterschiedlicher Ladeleistungen eine hohe Auslastung ermöglicht und gleichzeitig die Batterie schont.

Neben der Einschränkung durch das Ladeverhalten sind insbesondere bei hochfrequenter Ladung und Entladung der Lithium-Ionen Zellen deren thermisches Verhalten sowie die zyklische Alterung der Zellen zu berücksichtigen. Thermisch wirkt sich der Temperaturanstieg in der Batterie aufgrund des Innenwiderstands während der Fahrt bisher im Projekt positiv auf den Betrieb aus, da bei kalten Witterungsbedingungen kein aktives Thermomanagement erforderlich ist. Sofern die Fahrzeuge umgehend nach ihrer Ankunft geladen wurden, lies sich keine temperaturbedingte Reduktion der Ladeleistung feststellen. Bei einer hohen Fahrzeugauslastung kann das thermische Verhalten der Zellen hingegen zu Einschränkungen führen. Die während des DC-Schnellladevorgangs aufgezeichneten Temperaturanstiege (Abbildung 4.3) deuten dies an. Zwar hat sich im bisherigen Projektverlauf auch bei Außentemperaturen über 35°C kein Fall ergeben, in dem das BMS die

Leistungsentnahme oder -aufnahme der Batterie reduziert hat. Jedoch weisen die aufgezeichneten Daten darauf hin, dass im Auslastungsmodell 3 ohne aktives Thermomanagement die Batterietemperatur in einen Bereich ansteigen könnte, in dem aufgrund der Zellchemie aus Sicherheitsgründen nicht mehr die uneingeschränkte Verfügbarkeit der Elektrofahrzeug gewährleistet wäre.

Batterien mit einer hohen Zyklenfestigkeit sind Voraussetzung, um den intensiven Einsatz von Elektrofahrzeugen im Alltag langfristig nachhaltig umsetzen zu können. Für alle im Projekt eingesetzten Fahrzeuge lassen unterschiedliche Indikatoren, wie z.B. der gemessene Innenwiderstand der Zellen, bisher keine Alterung der Zellen feststellen. Sowohl die Bestimmung des DC-Innenwiderstands der Zellen als auch die State of Health (SOH) Daten weisen trotz der regelmäßig eingesetzten Schnellladung und über 500 Ladezyklen pro Fahrzeug nicht auf signifikante Alterungsprozesse hin, was mit den Herstellerangaben einer Zyklenfestigkeit von über 3.000 Zyklen bis zum End of Life (80% SOH) übereinstimmt.

Im Hinblick auf die allgemeine Eignung der eingesetzten Elektrofahrzeuge für die ausgewählten Anwendungen lässt sich klar feststellen, dass im bisherigen Projektverlauf kein Fahrzeug aufgrund mangelnden Ladungsstands das Fahrtziel nicht erreicht hat bzw. eine Fahrt nicht durchgeführt werden konnte. Auch die Strecken von 80 km mit Durchschnittsgeschwindigkeiten bis zu 74 km/h und Höhendifferenzen bis zu 361 m sind ohne Schwierigkeiten

im täglichen Einsatz und bei unterschiedlichsten Witterungsbedingungen zurückgelegt worden. Die technische Ersetzbarkeit unter den gegebenen Ladezeiten, Energieverbräuchen und Batteriekapazitäten von Pendlerfahrzeugen im Betrachtungshorizont des Projektes ist damit nachgewiesen. Gleiches gilt für den Nissan Leaf im Dienstwagenverkehr, der sich nach den bisherigen Erfahrungen sowohl hinsichtlich seiner Reichweite als auch der technischen Möglichkeit zur DC-Schnellladung die notwendigen technischen Voraussetzungen zur nachhaltigen Elektrifizierung der Mobilitätsanwendung mitbringt.

Die Projekterfahrungen zeigen für den Flottenbetrieb, dass je deterministischer die Mobilitätsnachfrage ist, desto höher kann die Fahrzeugauslastung gesteigert werden und dennoch gleichzeitig 100% der Nachfrage befriedigen. So ist es auf Basis des festen Schichtplans und unter Berücksichtigung der Ladekurven sowie des realen Energieverbrauchs möglich, bis zu drei Pendlergruppen am Tag ein Fahrzeug nutzen zu lassen. Bei den Dienstreisen hingegen limitiert die stochastische Nachfrage eine Auslastungsmaximierung. Der bisherige Projektverlauf hat des Weiteren deutlich gemacht, dass zur Gewährleistung einer hohen Fahrzeugverfügbarkeit eine intensive Betreuung der Fahrzeuge und der Nutzer durch ein umfangreiches Flottenmanagement notwendig ist. So können die Nutzungshürden der Elektromobilität minimiert und in realen Anwendungen Jahresfahrleistungen erreicht werden, mit denen sich mittelfristig Elektrofahrzeuge wirtschaftlich betreiben lassen.

# 5 · Inhalte und Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung

Die sozialwissenschaftliche Begleitforschung des Projekts RheinMobil beinhaltet im Wesentlichen Arbeitspakete zur Erforschung der Akzeptanz der bereitgestellten Elektrofahrzeuge und deren Praxistauglichkeit im Pendelverkehr. Ziel dieser Forschung ist es, systematisch die Adoptionsbereitschaft für Elektromobilität im Rahmen des Projektes zu erheben und dadurch Ansätze zu finden, diese nachhaltig – auch für die Zeit nach der Projektlaufzeit – zu steigern. Dafür ist es zentral, die Angebote für Elektromobile im Einklang mit den Nutzerbedürfnissen zu gestalten. Hierfür wurde ein dreistufiges Vorgehen gewählt (Abbildung 5.1).

In einem ersten Schritt wurden Interviews zu Erwartungen bei Michelin durchgeführt – mit den Projektteilnehmern und auch einigen Mitarbeitern, die nicht am Projekt teilnahmen, um deren Gegenargumente anzuhören. So konnten bereits zu einem frühen Zeitpunkt Missverständnisse über die Rahmenbedingungen der Teilnahme ausgeräumt werden und die Ergebnisse lassen Aussagen über das Für und Wider der Nutzung der Elektrofahrzeuge zu. Ein Hindernis scheint beispielsweise der Zusammenschluss von neuen Pendlergruppen zu sein – ein Problem, das die anfängliche Zurückhaltung bei der Teilnahme erklärt und nicht auf die Eigenschaften der Elektrofahrzeuge zurückzuführen ist. Es stellte sich auch heraus, dass die Elektrofahrzeuge im Projektrahmen teilweise weniger Vorbehalten gegenüberstehen als im privaten Kontext. Das überwachte Szenario und die Klarheit des Einsatzzweckes können bei den Teilnehmern offenbar typische Bedenken hinsicht-

lich Zuverlässigkeit oder Reichweiteinschränkung der Fahrzeuge ausräumen. Damit stellt die Gestaltung eines geeigneten Szenarios bereits einen wesentlichen Faktor bei der Schaffung von Akzeptanz bei der Nutzung der Elektrofahrzeuge dar.

Ebenso erhielten die Projektteilnehmer bei Siemens einen Fragebogen, um deren Erwartungen bezüglich des Projekts zu erfahren. Um die Ergebnisse der Befragungen zwischen den Flottenversuchsteilnehmern im Rahmen des Projektes CROME<sup>1</sup> (Ensslen et al., 2013) mit der Nutzerakzeptanz im Rahmen des Projektes RheinMobil vergleichen zu können, wurden die Fragebögen aufeinander abgestimmt. Das Nutzungsszenario der Fahrzeuge im Rahmen der beiden Feldtests ähnelt sich in vielerlei Hinsicht: Sowohl die deutschen CROME-Nutzer als auch die Elektrofahrzeugnutzer bei Siemens geben an, das Elektrofahrzeug fast ausschließlich für geschäftliche Fahrten zu benutzen. Dies liegt sicherlich an den zugrundeliegenden und nicht-technologiespezifischen Pool-Nutzungsbedingungen. Im Vergleich wurde deutlich, dass die Siemens-Mitarbeiter im Allgemeinen deutlich weniger häufig ein Poolfahrzeug nutzen als die deutschen Befragten im Rahmen von CROME. Zudem fiel auf, dass der zeitliche Aufwand beim Ausleihvorgang des Elektrofahrzeugs bei den Siemens-Mitarbeitern höher ist

1. Das vom BMWi und BMVI geförderte Projekt CROME mit deutschen und französischen Industrie- und Forschungspartnern hat die Demonstration grenzüberschreitenden Verkehrs mit Elektrofahrzeugen zum Ziel (siehe <http://crome-project.eu/>).

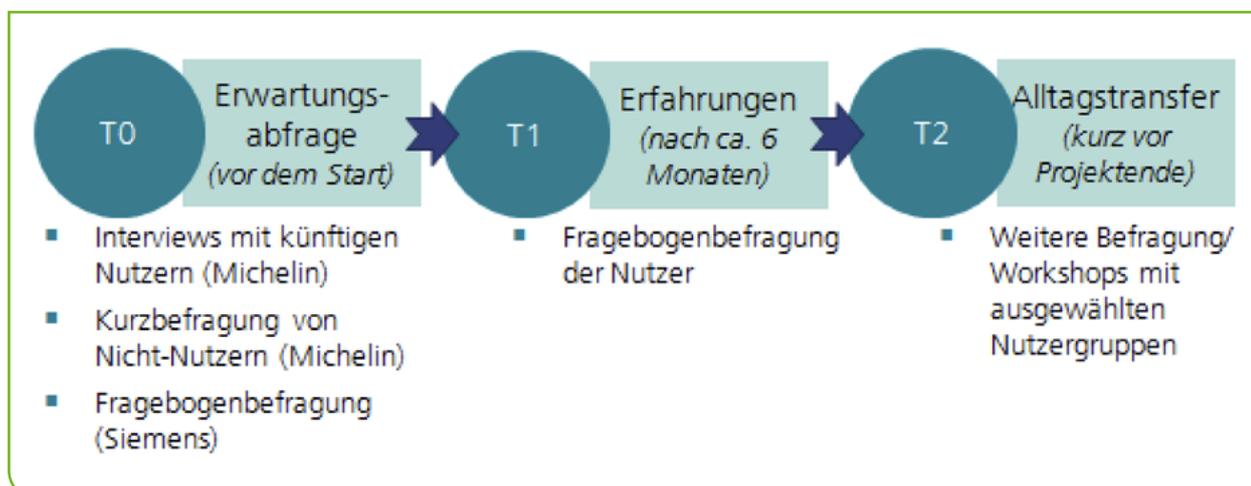


Abbildung 5.1: Vorgehen im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung

als bei den deutschen CROME-Nutzern, dafür aber geringer als bei konventionellen Fahrzeugen. Die im Rahmen von RheinMobil befragten Siemens-Mitarbeiter gaben an, das Elektrofahrzeug voraussichtlich weniger häufig zu nutzen als die im Rahmen von CROME befragten Elektrofahrzeugnutzer. Im Gegensatz zu den deutschen CROME-Nutzern werden die Fahrzeuge bei Siemens im Wesentlichen für grenzüberschreitende Pendel-Fahrten zwischen den Werksstandorten genutzt. Auf die Frage, ob die Elektrofahrzeuge den Erwartungen im Alltag gerecht werden würden, gaben die Siemens-Mitarbeiter eher ihre Zustimmung als die CROME-Nutzer, was aber mitunter auf die Tatsache zurückzuführen sein könnte, dass die Siemens-Mitarbeiter einen Nissan LEAF zur Verfügung hatten, wohingegen die deutschen CROME-Nutzer mehrheitlich Nutzer eines zweiseitigen Elektrofahrzeugs der Mikrowagenklasse (Ensslen et al., 2013) waren. Zudem zeigte sich, dass die RheinMobil-Nutzer bei Siemens weniger bereit sind einen Aufpreis für Strom aus erneuerbaren Energien für das Laden von Elektrofahrzeugen zu bezahlen als die deutschen CROME-Nutzer.

Zwischen September 2013 und November 2014 wurden (je nach Startzeitpunkt der Pendlergruppen) die Erfahrungsabfragen bei Michelin mittels Onlinebefragungen durchgeführt. Diese Befragungen dienten außerdem einem Vergleich der Stichproben der Siemens und CROME-Nutzer. Es zeigte sich, dass die Häufigkeiten der Fahrzeugnutzung den vorgesehenen Nutzungszwecken entsprechen: Bei Michelin werden die Fahrzeuge täglich zum Pendeln zwischen Wohnort und Werk benutzt, während bei den anderen beiden Gruppen die Fahrzeuge als Poolfahrzeuge bereitstehen, die Nutzung damit vom aktuellen Bedarf abhängt. Deutlicher als die Siemens-Mitarbeiter sind die Nutzer bei Michelin der Meinung, dass ihr Unternehmen durch die Teilnahme am Projekt einen Beitrag dazu leistet, Umweltprobleme zu lindern. Dies ist im Zusammenhang der konsequenten, täglichen Nutzung in der Gruppe zu sehen, die damit geeignet ist, konventionelle Fahrzeuge bzw. Einzelfahrten mit diesen direkt zu ersetzen. Den CROME-Nutzern standen überwiegend Smart electric drive oder aber Daimler A-Class E-Cell zur Verfügung (Gagnol et al., 2013). Die Siemens-Mitarbeiter hingegen nutzen einen Nissan LEAF, die Michelin-Mitarbeiter pendelten mit einem e-Wolf Delta 2. Die Elektrofahrzeugnutzer im Rahmen des Projekts RheinMobil bei Michelin gaben an, weniger

gern mit dem Elektroauto als mit einem konventionellen Fahrzeug zu fahren und waren deutlich weniger zufrieden mit den Fahrkomforteigenschaften der von ihnen genutzten Fahrzeuge als die anderen Projektgruppen. Dies könnte auf den vergleichsweise geringeren Komfort oder auch die auftretenden technischen Probleme der Projektfahrzeuge bei Michelin zurückzuführen sein. Anzumerken ist, dass es sich bei dem e-Wolf Delta 2 um in Kleinserien produzierte Forschungsfahrzeuge handelt. Die Michelin-Mitarbeiter bewerten dafür aber den Service der Hilfe bei technischen Problemen am besten, trotz der anfänglich häufig aufgetretenen Schwierigkeiten.

Hervorzuheben ist, dass nahezu alle Elektrofahrzeugnutzer im Rahmen von RheinMobil der Aussage zustimmen, dass die Beschaffung der Elektrofahrzeuge eine gute Entscheidung war. Zudem sind sie dafür, dass die gegenwärtig genutzten Elektrofahrzeuge ihrer Firma auch in Zukunft weiter genutzt werden und ihre Firma Elektrofahrzeuge kaufen sollte, wenn Neuanschaffungen von Fahrzeugen anstehen.

Um einen Transfer der Erkenntnisse in den Alltag, also eine weitere praktikable Nutzung der Fahrzeuge, zu gewährleisten, soll abschließend eine weitere Befragung der Fahrgemeinschaften bei Michelin erfolgen. Im Wesentlichen sollen dabei abschließende Eindrücke von den Nutzern selbst erfragt werden um ein tieferes Verständnis der zahlenmäßigen Ergebnisse der Onlinebefragungen zu erhalten. In diesem Zusammenhang werden weitere Verbesserungsvorschläge und Ideen der Nutzung erwartet. Die Befragungen werden im Laufe des Jahres 2015 voraussichtlich bei Michelin vor Ort stattfinden.

# 6 · Ökologische Bewertung

## 6.1 Ansätze zur Bewertung der durch Elektrofahrzeuge entstehenden Emissionen

Elektrofahrzeugspezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen können auf unterschiedliche Art und Weise bewertet werden. Je nach Fragestellung stehen unterschiedliche Bewertungsansätze zur Verfügung, beispielsweise eine Bewertung aus umweltpolitischer Sicht im Kontext des Zertifikathandels, unter Berücksichtigung des zeitlich aufgelösten Stromerzeugungsmix während des Ladevorgangs oder aus Sicht des physikalischen Fahrzeuglebenszyklus im Rahmen einer Ökobilanz.

Werden die durch das Laden der Elektrofahrzeuge entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen unter Berücksichtigung des europäischen Emissionshandels betrachtet, so ist die Schlussfolgerung zulässig, dass der Betrieb von Elektrofahrzeugen als CO<sub>2</sub>-neutral eingestuft werden kann, d.h. 0 g CO<sub>2</sub>/km werden emittiert. Diese Schlussfolgerung beruht auf der Argumentation, dass der Verkehrssektor bislang nicht Teil des europäischen Emissionshandels (EU-ETS) ist. Die Substitution von Fahrten mit konventionellen Fahrzeugen durch Fahrten mit Elektrofahrzeugen bedeutet somit, dass die durch diese Fahrten entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen nun nicht mehr im Verkehrssektor entstehen, sondern im Energiesektor. Da der Energiesektor Teil des CO<sub>2</sub>-Zertifikathandels ist, kann argumentiert werden, dass die durch Elektrofahrzeuge implizierte Elektrizitätsnachfrage eine zusätzliche (nicht in der Festlegung der EU-ETS-Ziele bis 2020 berücksichtigte) Nachfrage ist und somit (zumindest theoretisch) keine zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht. Insbesondere durch das derzeitige Überangebot an Zertifikaten gibt es jedoch Hinweise darauf, dass die aktuelle Ausgestaltung des EU-Ets hinsichtlich seiner Wirksamkeit und Kosteneffizienz fragwürdig ist (vgl. Diekmann 2012).

Aufgrund dessen werden die durch Elektrofahrzeuge entstehenden Emissionen im Rahmen des Projekts RheinMobil auf unterschiedlich disaggregierte Art und Weise untersucht.

Zum einen wird eine Ökobilanzierung (LCA, Life-Cycle-Assessment) durchgeführt, mit der alle potentiellen Umweltwirkungen über den gesamten Fahrzeuglebenszyklus – vom Rohstoffabbau und der Energiebereitstellung über die Herstellung von Materialien und Komponenten, die Fahrzeugherstellung und -nutzung bis hin zur Verwertung

und Entsorgung des Fahrzeugs quantifiziert werden (Kapitel 6.3). Die Datenbasis liefern Stoff- und Energiestrombilanzen der gesamten Prozesskette des Fahrzeuglebenszyklus. Mit der Ökobilanzierung lässt sich, über die alleinige Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen hinaus, ein breiteres Spektrum der Umweltwirkungen der Elektrofahrzeuge abbilden und somit ein belastbares Bild des ökologischen Nutzens aufzeigen. Durch die Lebenszyklussichtweise lassen sich zudem Verlagerungen von Umweltproblemen über die einzelnen Lebenszyklusphasen hinweg darstellen. Die Projektfahrzeuge pendeln ganzjährig zwischen deutschen und französischen Standorten, an denen die Fahrzeuge geladen werden. Aus diesem Grund erfolgt die Berechnung der Nutzungsphase in der Ökobilanz über das Umweltprofil des französischen und deutschen Strommix. Die Umweltprofile der länderspezifischen Strommixe basieren hierbei auf Jahresdurchschnittswerten.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit ausschließlich die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu betrachten, die während der Nutzungsphase der Fahrzeuge entstehen. Dies kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, was in Kapitel 6.2 erläutert werden soll.

## 6.2 Zeitdiskrete CO<sub>2</sub>-Emissionen des Ladestroms während der Elektrofahrzeug-Nutzungsphase

Eine Möglichkeit besteht darin nationale CO<sub>2</sub>-Jahresdurchschnittsemissionen zu verwenden. Unter der Annahme, dass Elektrofahrzeuge gleichverteilt während eines Jahres geladen werden, wäre dieses Vorgehen zur Bestimmung der im Rahmen von RheinMobil entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Laden der Fahrzeuge der richtige Ansatz. Da Elektrofahrzeuge in der Regel jedoch nicht gleichverteilt über den Tag hinweg geladen werden und die CO<sub>2</sub>-Intensität der Elektrizitätserzeugung insbesondere in Deutschland im Tagesverlauf starken Schwankungen unterliegt (Abbildung 6.1), werden zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch die Projektfahrzeuge entstehen, stündliche nationale Durchschnittsemissionen verwendet. Die täglichen, zyklischen Schwankungen der Emissionsintensität in Deutschland sind u.a. auf die Elektrizitätseinspeisung durch Photovoltaikanlagen zurückzuführen, wohingegen die Unterschiede der Emissionsintensitätsschwankungen in den Wochenprofilen in weiten Teilen eher auf das saisonal schwankende Windangebot zurückzuführen sein

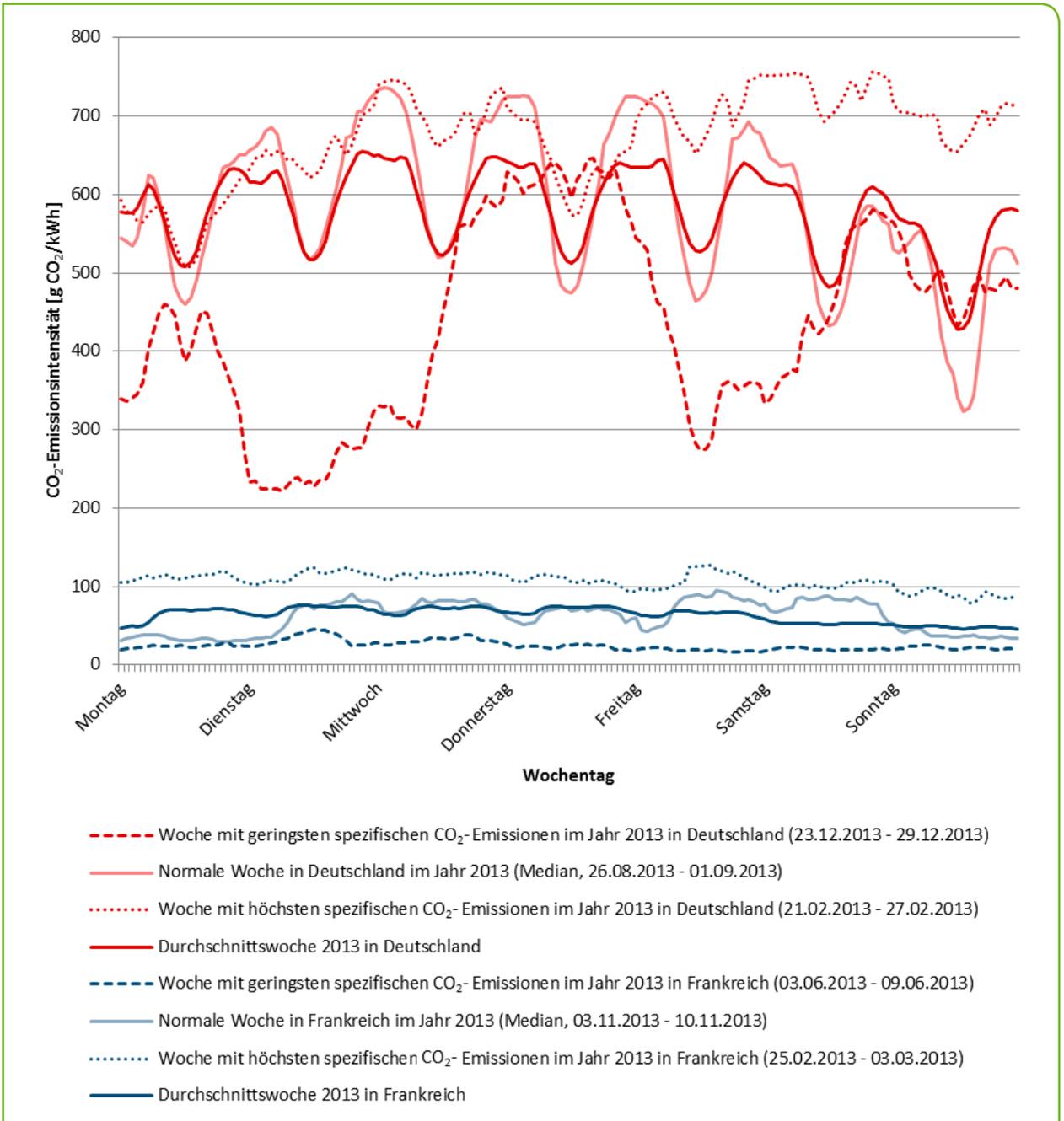


Abbildung 6.1: Wochenprofile zeitdiskreter spezifischer CO<sub>2</sub>-Emissionen in Frankreich (blau) und Deutschland (rot)

könnten. Bei hohem Anteil erneuerbarer Energien an der Elektrizitätserzeugung reduziert sich die Residuallast. Hierdurch verringert sich der Anteil konventionell, basierend auf fossilen Brennstoffen generierten Stroms, wodurch die CO<sub>2</sub>-Intensität sinkt. In Frankreich ist CO<sub>2</sub>-Emissionsintensität der Elektrizitätsproduktion hingegen vergleichsweise relativ konstant, auf vergleichsweise sehr geringem Niveau (Abbildung 6.1).

Die CO<sub>2</sub>-Faktoren, auf deren Basis die CO<sub>2</sub>-Emissionsintensitäten in Abbildung 6.1 dargestellt werden, leiten sich für Deutschland aus Icha (2014) ab, für Frankreich aus RTE (2015). Die Elektrizitätsproduktion durch Kernkraft, Windenergie, Photovoltaik und Wasserkraft wird in beiden Ländern als CO<sub>2</sub>-neutral angenommen. Die CO<sub>2</sub>-Faktoren fossiler Kraftwerke unterscheiden sich leicht. Kritisch anzumerken ist, dass regionale und lokale Gegebenheiten wie Elektrizitätsnetzrestriktionen sowie die Eigennutzung selbst erzeugten Stroms (beispielsweise Photovoltaikanlagen) bei dieser Berechnungsmethode vernachlässigt werden. Alternativ dazu hätten auch die durch Elektrofahrzeuge entstehenden marginalen CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet werden können (Jochem et al. 2014). Das bedeutet, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Bewertung herangezogen werden, die durch das zum Betrachtungszeitpunkt teuerste Kraftwerk pro Erzeugungseinheit emittiert werden. Dieser Ansatz wurde jedoch aufgrund fehlender Informationen zu zeitdiskreten Gebotspreisen von Kraftwerken sowie einer hohen Sensitivität gegenüber der Annahme, dass die Elektrizitätsnachfrage vollkommen unelastisch sei, nicht weiter verfolgt.

### 6.2.1 Datenbasis und Methodik

Um die während der Nutzungsphase im Rahmen des RheinMobil Projekts durch drei Projektfahrzeuge entstandenen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitraum von März bis August 2013 bewerten zu können, wurde auf verschiedene Daten zurückgegriffen.

- Messwerte aus Datenloggern von drei Projektfahrzeugen zur Bestimmung des Energieverbrauchs.

- Stündlich aufgelöste Daten zur Elektrizitätsproduktion nach Energieträger des kompletten Jahres 2013. Diese Daten stammen von der EEX Transparenzplattform sowie vom französischen Netzbetreiber RTE.

Die Informationen zum zeitdiskreten Energiemix in Frankreich und Deutschland sowie zur tatsächlichen Elektrizitätsnachfrage der Projektfahrzeuge während des Ladevorgangs wurden einander zugeordnet. Somit konnten die entsprechenden verursachten Emissionen in jeder Stunde von März bis August 2013 bestimmt werden.

### 6.2.2 Ergebnisse

Basierend auf diesen disaggregierten Informationen zu Standorten, an welchen die Ladevorgänge durchgeführt wurden, genauen Ladezeiträumen und der zeitspezifischen Zusammensetzung der Energieträger bei der Elektrizitätserzeugung wurden die durch die Projektfahrzeuge entstandenen CO<sub>2</sub>-Emissionen bestimmt. Die drei Projektfahrzeuge legten im Betrachtungszeitraum insgesamt 38.365 km zurück. Dabei wurden insgesamt 639 Ladevorgänge erfasst. Etwa die Hälfte der Ladevorgänge wurde in Deutschland durchgeführt. Der Anteil der Ladevorgänge in Deutschland variiert leicht bei den drei Projektfahrzeugen (zwischen 48% und 57%). Über verschiedene Berechnungsverfahren wurde der Energieverbrauch der Fahrzeuge, d.h. die tatsächlich benötigte Energie zum Laden der Fahrzeuge, unter Berücksichtigung des Ladewirkungsgrades (grid-to-wheel) bestimmt. Bei den drei Projektfahrzeugen lag dieser zwischen 266 und 274 Wh/km. Der Normverbrauch des e-Wolf Delta 2 nach NEFZ liegt bei 187 Wh/km. Im Anschluss daran wurden die in Frankreich und Deutschland während des Projektzeitraums nach realen Verbräuchen entstandenen zeitdiskreten CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt. Erstaunlicherweise sind die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Erzeugungseinheit, die durch das Laden der Projektfahrzeuge über den Betrachtungszeitraum entstehen, nahezu identisch mit den durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen während des gesamten Betrachtungszeitraums sowie während des gesamten Jahres. Auffallend ist, dass die durch das Laden der Elektrofahrzeuge entstehenden Emissionen auf französischer Seite um etwa das Zehnfache geringer sind als auf deutscher Seite (Tabelle 6.1).

	Min		Max		Durchschnitt	
	DE	FR	DE	FR	DE	FR
Bezogen auf das gesamte Jahr	221,0	17,0	844,6	138,5	578,5	64,1
Bezogen auf den Zeitraum März bis August	250,2	17,0	788,3	138,5	574,8	53,3

Tabelle 6.1: Minimale, maximale und durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emissionen in Frankreich und Deutschland in g CO<sub>2</sub>/kWh im Jahr 2013

CO <sub>2</sub> -Emissionen der Fahrzeuge	Reale Verbräuche (grid-to-wheel in g CO <sub>2</sub> /km)	Normverbräuche (in g CO <sub>2</sub> /km)
Tatsächlicher Einsatz der Projektfahrzeuge (Aufladen in DE & FR)	83 – 86	61
Hypothetische Einsatz der Projektfahrzeuge nur in DE	155 – 161	109
Hypothetischer Einsatz der Projektfahrzeuge nur in FR	13 – 14	10
Vergleichsfahrzeug mit verbrauchsärmstem Verbrennungsmotor (Nissan NV200 1.5 DCi)	-	128
Gesetzlicher Grenzwert ab 2021	-	95

Tabelle 6.2: Real- und Normverbräuche der Projektfahrzeuge

### 6.2.3 Fazit

Die Analysen der ladebezogenen, zeitdiskreten Durchschnittsemissionen der Projektfahrzeuge nach Norm- und Realverbräuche haben gezeigt, dass die Realverbräuche der Elektrofahrzeuge deutlich, das heißt etwa 40 %, über den angegebenen Normverbräuchen liegen. Zudem wurde gezeigt, dass das Laden der drei betrachteten Projektfahrzeuge im Projektzeitraum von März bis August in Frankreich um etwa das Zehnfache weniger CO<sub>2</sub>-emissionsintensiv ist als in Deutschland. Wären die Projektfahrzeuge im Betrachtungszeitraum ausschließlich in Deutschland aufgeladen worden, wären die zugehörigen CO<sub>2</sub>-Emissionen annähernd doppelt so hoch gewesen wie im grenzüber-

schreitenden Fall von RheinMobil. Nach Normverbrauch ist die Nutzung der Elektrofahrzeuge dennoch auch in Deutschland die bessere Alternative als die Nutzung eines vergleichbaren konventionellen Fahrzeugs. Hervorzuheben ist, dass die elektrofahrzeugspezifischen Emissionen insbesondere in Frankreich sehr niedrig sind.

Kritisch anzumerken ist, dass die für diese Analysen notwendigen Daten von RTE für die Monate März bis August 2014 zum Analysezeitpunkt noch nicht zur Verfügung standen. Daher wurden Erzeugungsdaten des Jahres 2013 verwendet.

## 6.3 Ergebnisse der begleitenden Ökobilanz

Im Rahmen der ökologischen Begleitforschung des Projekts RheinMobil wird der Einsatz von Elektrofahrzeugen von Berufspendlern (Michelin) und als Teil einer Dienstwagenflotte (Siemens) unter Berücksichtigung ihrer individuellen Nutzungsmuster sowie der standort- bzw. länder-spezifischen Rahmenbedingungen aus ökologischer Sicht untersucht. Auf Grundlage der erfassten Nutzungsdaten lassen sich die relevanten Einflussgrößen und die erforderlichen Rahmenbedingungen für den ökologisch sinnvollen Einsatz der Elektrofahrzeuge in den untersuchten Einsatzgebieten ermitteln.

Die Analyse der potentiellen Umweltwirkungen der Elektrofahrzeuge erfolgt mithilfe der Methode der Ökobilanz. Durch den Lebenszyklusansatz werden alle verursachten Umweltwirkungen über den gesamten Lebensweg – vom Rohstoffabbau über die Herstellung, Nutzung und der Verwertung und Entsorgung des Fahrzeugs am Lebensende – berücksichtigt. Die Berechnung der Ökobilanz erfolgt auf Basis eines generischen Fahrzeugmodells, mit dem die Umweltwirkungen verschiedener Fahrzeug- und Antriebskonzepte abgeschätzt werden können. Das untersuchte Pendlerfahrzeug hat ein Gesamtgewicht von ca. 1.700 kg, ein Li-Ionen Batteriesystem (ca. 250 kg) mit einer Speicherkapazität von 24 kWh und einen 60 kW Elektromotor. Der Dienstwagen wird anhand eines Elektrofahrzeugs aus dem Segment der Kompaktklasse mit einem Gesamtgewicht von ca. 1.600 kg und einer 24 kWh Li-Ionen Batterie und einem 80 kW Elektromotor abschätzt. Es wird von einer Fahrzeug- und Komponentenlebensdauer von 12 Jahren und einer Zyklenfestigkeit des Batteriesystems von 3.000 Volladezyklen ausgegangen. Die hinterlegten Fahrleistungen, Energieverbrauchswerte und Ladeverluste basieren auf den erfassten Nutzungsdaten zum Stand April 2015. Da die Fahrzeuge grenzübergreifend eingesetzt werden und sowohl auf deutscher wie auf französischer Seite geladen werden, wird der Ladestrom anhand eines Mix aus dem deutschen und französischen Länderstrommix abgebildet.

### 6.3.1 Anwendungsfall Berufspendler

Mit den folgenden Ergebnissen wird der Einfluss der gemessenen Bandbreiten des Fahrenergieverbrauchs und der Fahrleistungen der Flottenfahrzeuge auf die Umweltbilanz dargestellt. Zur Einordnung der Umweltprofile der Elektrofahrzeuge in den jeweiligen Einsatzgebieten wird ein Vergleich zu verbrennungsmotorischen Fahrzeugen gezogen. In Abbildung 6.2 sind die Ökobilanzergebnisse der Elektrofahrzeuge im Pendlerverkehr für das Treibhauspotential über die Fahrleistung aufgetragen. Der Schnittpunkt der Y-Achse bei Kilometer Null repräsentiert die Umweltwirkungen der Herstellung und des Lebensendes der Fahrzeuge. Bei dem untersuchten Elektrofahrzeug liegt das Treibhauspotential der Herstellung und Entsorgung bei ca. 11,3 t CO<sub>2</sub>-Äquiv., bei den konventionellen Fahrzeugen mit verbrennungsmotorischem Antrieb bei ca. 6,6 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. (Benzinfahrzeug) und 6,8 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. (Dieselfahrzeug). Das höhere Treibhauspotential des Elektrofahrzeugs lässt sich dabei maßgeblich auf die Herstellung des eingesetzten Li-Ionen Batteriesystems und der in den Batteriezellen verwendeten High-Tech-Werkstoffe, vor allem der Aktivmaterialien der Anode und Kathode, zurückführen. Die Steigungen der Geraden repräsentieren die verursachten Treibhauspotentiale im Fahrbetrieb. Bei den Elektrofahrzeugen werden diese durch die Erzeugung des Ladestroms, bei den verbrennungsmotorischen Fahrzeugen durch die Kraftstoffbereitstellung und Abgasemissionen während des Fahrbetriebs verursacht.

Auf Grundlage der aktuellen Nutzungsdaten ergeben sich Energieverbrauchswerte in einer Bandbreite von 19,6 - 27,1 kWh/100km und 23,2 kWh/100km im Durchschnitt. Für das eingesetzte Benzinfahrzeug wurde im Flottenversuch ein Kraftstoffverbrauch von ca. 8,13 l/100km ermittelt. Dieser Wert liegt rund 12 % über den NEFZ-Normverbrauchswerten des Fahrzeugs. Um zusätzlich einen Vergleich zu heutigen Dieselfahrzeugen zu ermöglichen, wurde eine entsprechende Abschätzung der Verbrauchswerte über den ermittelten Zuschlagsfaktor getroffen. Beim Elektrofahrzeug resultieren durch die ermittelten Energieverbrauchswerte, die zusätzlichen Ladeverluste von 15 % und dem hinterlegten DE/FR-Strom Mix (ca. 358 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./kWh) Treibhauspotentiale der Fahrzeugnutzung von ca. 81 bis 112 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km. Die Treibhauspotentiale der Nutzung der konventionellen

Fahrzeuge liegen inklusive der Kraftstoffbereitstellung bei ca. 157 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km (Dieselfahrzeug) und 227 g CO<sub>2</sub>-Äquiv./km (Benzinfahrzeug).

Unter den gegebenen Rahmenbedingungen lassen sich die höheren Treibhauspotentiale in der Herstellung der Elektrofahrzeuge im Vergleich zu den konventionellen Fahrzeugen nach ca. 32.000 bis 40.000 km (Benzinfahrzeug) bzw. 58.000 bis 98.000 km (Dieselfahrzeug) kompensieren.

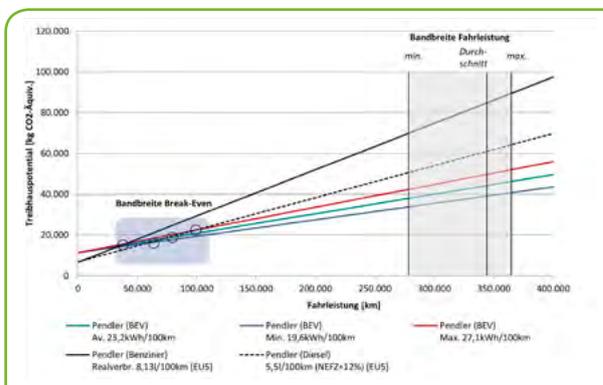


Abbildung 6.2: Fahrzeugeinsatz im Pendlerbetrieb: Treibhauspotential über Fahrleistung

Nach diesen Fahrleistungen stellt sich ein Mehrwert der Elektrofahrzeuge gegenüber den konventionellen Fahrzeugen hinsichtlich des Treibhauspotentials ein. Die Jahresfahrleistungen der Fahrzeuge liegen aktuell zwischen 23.500 und 31.000 km/Jahr, durchschnittlich bei ca. 28.300

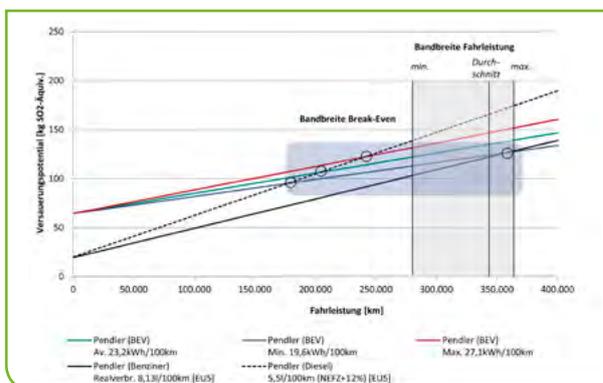


Abbildung 6.3: Fahrzeugeinsatz im Pendlerbetrieb: Versauerungspotential über Fahrleistung

km. Der Break-even zu Benzinfahrzeugen wäre demnach nach etwa 1,5 Jahren, zu Dieselfahrzeugen nach ca. 3,5 Jahren erreicht. Hochgerechnet über eine Fahrzeuglebensdauer von 12 Jahren ergeben sich Gesamtfahrleistungen von 280.000 km bis 370.000 km und etwa 340.000 km im Durchschnitt. Unter Annahme des durchschnittlichen Energieverbrauchs von 23,2 kWh/100km sind durch den Einsatz der Elektrofahrzeuge im Projekt RheinMobil Einsparungen von 32- 44 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. gegenüber Benzinfahrzeugen und 13-18 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. gegenüber Dieselfahrzeugen möglich.

Sollte während der Nutzungsdauer ein Batteriewechsel erforderlich sein, z.B. durch Erreichen der maximalen Anzahl an Ladezyklen, verringern sich die Einsparungen des Pendlerelektrofahrzeug im Treibhauspotential auf ca. 28-40 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. gegenüber Benzinfahrzeugen und ca. 8,5-14 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. beim Dieselfahrzeug.

Wie in Abbildung 6.3 dargestellt, lassen sich die vorgestellten Ergebnisse zum Treibhauspotential nicht pauschal auf andere Umweltwirkungen übertragen. Im Falle des Versauerungspotentials liegen die Beiträge der Herstellung des Elektrofahrzeugs signifikant über denen der konventionellen Fahrzeuge. Die höheren Wirkungen des Elektrofahrzeugs werden dabei überwiegend durch die Herstellung der in der Kathode eingesetzten Metalloxide des Batteriesystems, vor allem durch die energieintensiven Prozesse im Rohstoffabbau und der Aufbereitung des verwendeten Kobalt und Nickel und damit verbundenen Umweltwirkungen an den Produktionsstandorten verursacht.

Durch das höhere Versauerungspotential der Fahrzeugherstellung verschiebt sich der Break-even der Elektrofahrzeuge gegenüber dem Dieselfahrzeug in deutlich höhere Fahrleistungen von über 170.000 km, beim Benzinfahrzeug von über 350.000 km. Im Falle eines erforderlichen Batteriewechsels kann der Break-even zu den konventionellen Fahrzeugen nicht innerhalb der angenommenen Nutzungsdauer erreicht werden.

### 6.3.2 Anwendungsfall Dienstwagenflotte

Die Ergebnisse des Elektrofahrzeugs (Kompaktwagen) als Teil einer Dienstwagenflotte sind in Abbildung 6.4 für das Treibhauspotential dargestellt. Zusätzlich wird der Einfluss des hinterlegten Ladestrommix aufgezeigt. Neben dem angenommenen Ladestrommix des RheinMobil-Projekts (DE/FR-Mix, 358 g CO<sub>2</sub>/kWh) sind im Folgenden die Bandbreiten durch die Verwendung des deutschen (DE-Mix, ca. 593 g CO<sub>2</sub>/kWh) Netzstrommix und erneuerbare Energien-Mix (123 g CO<sub>2</sub>/kWh) sowie durch den Einsatz von Strom aus Windkraft (ca. 12 g CO<sub>2</sub>/kWh) aufgetragen. Die durchschnittliche Monatsfahrleistung des Dienstwagens liegt bei etwa 1.400 km/Monat bzw. 200.000 km Gesamtfahrleistung über 12 Jahre. Der durchschnittliche Fahrzeugenergieverbrauch beträgt 18,6 kWh/100 km zzgl. Ladeverluste. Für die Einordnung des potentiellen ökologischen Mehrwerts des Elektrofahrzeugs wird ein Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen aus dem Kompaktwagen-Segment gezogen. Analog zur Auswertung des Pendlerbetriebs wird bei den konventionellen Fahrzeugen ein Zuschlag von 12% auf den NEFZ-Normverbrauchswert der Fahrzeuge aufgeschlagen.

Unter den Rahmenbedingungen des RheinMobil-Flottenversuchs (DE/FR-Mix) kann der Break-even zum Benzinfahrzeug nach ca. 53.000 km erreicht werden, bei dem Dieselfahrzeug nach ca. 75.000 km. Im Vergleich zum den konventionellen Fahrzeugen sind über die Gesamtfahrleistung von 200.000 km Einsparungen von 6-11 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. im Treibhauspotential möglich. Gleichzeitig wird der hohe Einfluss des bezogenen Stromerzeugungsmix des Ladestroms deutlich. Durch das höhere Treibhauspotential des deutschen Netzstrommix sind Fahrleistungen von ca. 150.000 km erforderlich, um einen Break Even zu Benzinfahrzeugen zu erreichen. Zum Dieselfahrzeug kann über die Gesamtfahrleistung keine Verbesserung erreicht werden.

Deutliche Verbesserungen ergeben sich durch den Einsatz von Ladestrom aus erneuerbaren Energien (EE-Mix), sofern der Strom über zusätzlich installierte Kapazitäten erzeugt wurde und nicht dem bestehenden Netzstrommix entzogen wird. Über die Gesamtlauflistung von 200.000 km sind dadurch Einsparungen von bis zu 21 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. gegenüber dem Benzinfahrzeug und 16 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. gegenüber dem Dieselfahrzeug möglich. Durch den Einsatz von Strom aus Windkraft lässt sich das Treibhauspotential um weitere 5 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. senken.

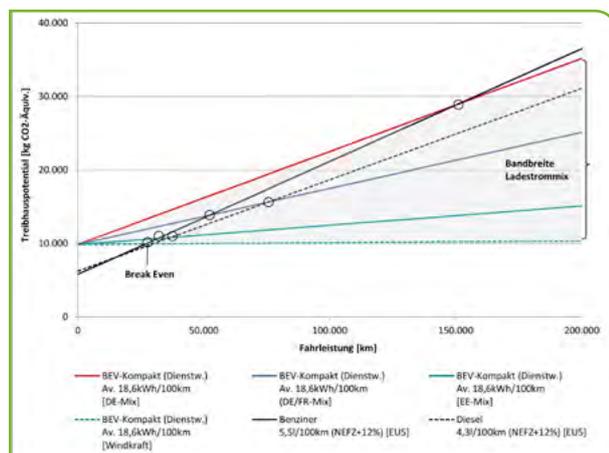


Abbildung 6.4: Fahrzeugeinsatz: Dienstwagen im grenzübergreifenden Fahrbetrieb: Treibhauspotential über Fahrleistung

### 6.3.3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der aktuelle Datenstand des Flottenversuchs ein positives Bild für die Nutzung der Elektrofahrzeuge hinsichtlich des ausgewählten Einsatzgebiets und der Verbesserung der Klimabilanz gegenüber konventionellen Fahrzeugen abzeichnet.

Ein wichtiges Kriterium für den ökologisch vorteilhaften Einsatz von Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen ist die Gewährleistung hoher Fahrleistungen, um die höheren Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung zu kompensieren. Diese werden durch den Einsatz der Fahrzeuge im Pendlerverkehr erreicht. Durch den fortschreitenden Einsatz der RheinMobil-Flotte kann somit eine signifikante Verbesserung im Treibhauspotential erreicht werden. Neben der Fahrzeugauslastung ist die Herkunft des bezogenen Ladestroms eine wichtige Einflussgröße für den ökologisch sinnvollen Einsatz von Elektrofahrzeugen. Durch den Einsatz von (zusätzlich installiertem) Strom aus erneuerbaren Energien entsteht ein wichtiger Hebel, um die Umweltbilanz der Fahrzeuge langfristig zu verbessern.

Diese Ergebnisse lassen sich jedoch nicht pauschal auf andere Wirkungskategorien übertragen, dies erfordert eine differenzierte Betrachtung. Im Versauerungspotential kann aufgrund der höheren Umweltwirkungen in der Fahrzeugherstellung, maßgeblich verbunden mit der Herstellung der Aktivmaterialien des Batteriesystems, keine bzw. nur eine geringere Verbesserung gegenüber den konventionellen Fahrzeugen erreicht werden. In der Nutzungsphase besteht jedoch das Potential, lokale Emissionen während des Fahrbetriebs zu vermeiden. Diese werden bei den Elektrofahrzeugen an den Standort der Stromerzeugung verlagert. Positive Effekte können sich weiterhin für das Sommersmogpotential in dicht besiedelten Gebieten und Ballungsräumen ergeben, indem die verantwortlichen Emissionen für Bildung von bodennahem Ozon verlagert werden. Hierfür sind jedoch weitere Untersuchungen unter Berücksichtigung der regionalen Effekte erforderlich, um eine belastbare Bewertung vornehmen zu können.

# 7 · Schlussfolgerungen

Eine wirtschaftlich sowie ökologisch sinnvolle und vom Nutzer akzeptierte Elektromobilität ist möglich. In geeigneten Anwendungen ist dies schon heute (fast) alltagsreif. Für eine erfolgreiche Elektrifizierung sollten die Anwendungen folgende Kriterien erfüllen:

- Der Nutzerkomfort und das Nutzerverhalten sollten so wenig wie möglich angepasst werden müssen.
- Die Elektrofahrzeuge müssen viele Kilometer Fahrleistung pro Jahr aufweisen.
- Das geeignetste Fahrprofil beinhaltet viel Stadtverkehr mit niedrigen Geschwindigkeiten und Stop-and-Go Betrieb.
- Die Elektrofahrzeuge sollten wenn möglich immer fahren, wenn nicht geladen wird.
- Schnellladung wird nur dann eingesetzt, wenn dies vom Fahrprofil her dringend nötig ist, um die Batterie nicht unnötig zu beschädigen.
- Geladen werden sollte idealerweise mit Strom aus erneuerbaren Energien.
- Nicht zuletzt sollten alle Komponenten der Elektrofahrzeuge und Ladestationen einen hohen Wirkungsgrad aufweisen.

# Glossar

## Annuität:

Eine vom Zinssatz und Laufzeit abhängige jährliche Zahlungsgröße, durch die ein anfänglicher Kreditbetrag während der Darlehenslaufzeit einschließlich der Zinsen getilgt wird.

## Balancing:

Beschreibt den Angleichungsprozess der individuellen Spannungen einzelner Zellen in einem Batteriepack zur Erhöhung der Kapazität und Vermeidung kritischer Ladestände.

## Batterie Management System (BMS):

Elektronische Schaltung zur Überwachung und Regelung des Elektrofahrzeugbatteriesystems.

## Break-even:

Der Punkt, an dem die Gesamtkosten eines Elektrofahrzeugs gleich denen eines konventionellen Fahrzeugs sind, auch Gewinnschwelle genannt.

## CO<sub>2</sub>-Äquivalent:

Referenzeinheit der Wirkungskategorie Treibhauspotential. Damit alle relevanten Treibhausgase (Methan, etc.) im Treibhauspotential berücksichtigt werden können, werden die Wirkungen der Treibhausgase mithilfe von Äquivalenten in Bezug zur Referenzemission Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) bemessen.

## C-Rate:

Der dimensionslose Quotient aus Ladestrom, gemessen in Ampere, und der Batteriekapazität, gemessen in Amperestunden.

## DC-Schnellladung:

Gleichstromladung in Ladebetriebsart 4 (IEC 61851-1) wobei der Gleichstrom bereits außerhalb des Fahrzeugs erzeugt und direkt in die Batterie gespeist wird.

## Ladebetriebsart:

Gemäß der NORM IEC 61851 werden vier Ladebetriebsarten für Elektrofahrzeuge unterschieden (1-3 für Wechselstromladung, 4 für Gleichstromladung).

## Lithium-Plating:

Beschreibt die Bildung von metallischem Lithium aus den freien Lithium-Ionen der Batteriezellen und Anlagerung an der Anode; es vermindert die Leistungsfähigkeit der Zelle und kann zu einem Kurzschluss oder Brand führen.

## Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ):

Durch die EU-Kommission definierter Fahrzyklus (Richtlinie 70/220/EWG) anhand dessen die Kraftstoffverbräuche und Fahrzeugemissionen aller in Europa zugelassener Fahrzeuge bestimmt werden.

## Rekuperation:

Beschreibt den Vorgang der Energierückgewinnung beim Bremsen, in dem die Bewegungsenergie des Fahrzeugs wieder in elektrische Energie umgewandelt und in der Fahrzeugbatterie gespeichert wird.

#### SO<sub>2</sub>-Äquivalent:

Referenzeinheit der Wirkungskategorie Versauerungspotential. Damit alle relevanten Emissionen des Versauerungspotential berücksichtigt werden können, werden die Wirkungen der Emissionen mithilfe von Äquivalenten in Bezug zur Referenzemission Schwefeldioxid (SO) bemessen

#### State of Charge (SOC):

Ein vom Hersteller festgelegtes und von verschiedenen Faktoren abhängiges Maß für den Ladezustand der Batterie in Prozent

#### State of Health (SOH):

Ein vom Hersteller festgelegtes und von verschiedenen Faktoren abhängiges Maß für den Alterungszustand der Batterie in Prozent

#### Tank-to-Wheel (TTW):

Betrachtet sowohl bei Elektrofahrzeugen als auch bei konventionellen Fahrzeugen die Wirkkette von aufgenommener Energie bis zur Umwandlung in kinetische Energie

#### Total Cost of Ownership (TCO):

Berücksichtigt alle anfallenden Kosten von Investitionsgütern in Anschaffung, Nutzung und Entsorgung, auch Gesamtbetriebskosten genannt

# Quellen

Diekmann, Jochen (2012). EU-Emissionshandel: Anpassungsbedarf des Caps als Reaktion auf externe Schocks und unerwartete Entwicklungen? <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4378.pdf>

Ensslen, A., Jochem, P., Fichtner, W., 2013. Experiences of EV Users in the French-German Context, Proceedings of EVS27-Conference, Barcelona, Spain.

Gagnol, P., Jochem, P., Fichtner, W., 2013. CROME: the French and German Field Demonstration of the Interoperable Mobility with EVs, Proceedings of EVS27.

Icha, P. (2014). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strom Mix in den Jahren 1990 bis 2013. Climate Change | 23/2014. Umweltbundesamt. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-0>. Aufgerufen am 08.05.2015.

Jochem, P.; Babrowski, S; Fichtner, W. (2014): The Impact of Electric Vehicles on the Power Plant Portfolio: A German Case Study for 2030 Emissions of Electric Vehicles in Germany in 2030, European Electric Vehicle Congress, Brussels, Belgium

MOP. Mobilitätspanel Deutschland 1994-2010. Projektleitung durch das Institut für Verkehrsforschung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Erhältlich unter: [www.clearingstelle-verkehr.de](http://www.clearingstelle-verkehr.de), 2010.

RTE (2015). CO2 Emissions per kWh of Electricity Generated in France. <http://www.rte-france.com/en/eco2mix/eco2mix-co2-en>. Aufgerufen am 08.05.2015.

# Autorenliste

## Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Dr. Kevin Stella (PCE)  
Dr. Olaf Wollersheim (PCE)  
Prof. Dr. Wolf Fichtner (IIP)  
Dr. Patrick Jochem (IIP)  
Maximilian Schücking (PCE)  
Max Nastold (PCE)  
Axel Ensslen (IIP)

## Fraunhofer Gesellschaft

Prof. Dr. Martin Wietschel (ISI)  
Dr. Michael Held (IBP)  
Till Gnann (ISI)  
Michael Friedmann (ICT)  
Roberta Graf (IBP)  
Katharina Wohlfath (ISI)

# Danksagung

Das Forschungs- und Demonstrationsvorhaben RheinMobil wird vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) finanziert. Die Projektbeteiligten bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens.



Das Projekt RheinMobil ist eines von rund 40 Projekten im Schaufenster Elektromobilität Baden-Württemberg „LivingLabBW<sup>e</sup> mobil“ und wird mit knapp einer Million Euro vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Rahmen der Schaufensterinitiative der Bundesregierung gefördert. Die Bundesregierung hat im April 2012 vier Regionen in Deutschland als „Schaufenster Elektromobilität“ ausgewählt und fördert hier auf Beschluss des Deutschen Bundestags die Forschung und Entwicklung von alternativen Antrieben. Insgesamt stellt der Bund für das Schaufensterprogramm Fördermittel in Höhe von 180 Millionen Euro bereit. In den groß angelegten regionalen Demonstrations- und Pilotvorhaben wird Elektromobilität an der Schnittstelle von Energiesystem, Fahrzeug und Verkehrssystem erprobt. Weitere Informationen unter [www.schaufenster-elektromobilitaet.org](http://www.schaufenster-elektromobilitaet.org)



Im baden-württembergischen Schaufenster „LivingLabBW<sup>e</sup> mobil“ erforschen mehr als 100 Partner aus Wirtschaft, Wissenschaft und öffentlicher Hand Elektromobilität in der Praxis. Die Projekte konzentrieren sich mit ihren Aktivitäten auf die Region Stuttgart und die Stadt Karlsruhe und sorgen auch international für eine große Sichtbarkeit. Das „LivingLabBW<sup>e</sup> mobil“ steht für einen systemischen Ansatz mit ineinandergreifenden Projekten, die Elektromobilität vom E-Bike über den E-PKW bis hin zum elektrischen Transporter und Plug-in-Linienbussen für jedermann erfahrbar machen. Die Projekte adressieren Fragestellungen zu Intermodalität, Flotten und gewerblichen Verkehren, Infrastruktur und Energie, Stadt- und Verkehrsplanung, Fahrzeugtechnologie, Kommunikation und Partizipation sowie Ausbildung und Qualifizierung. Koordiniert wird das „LivingLabBWe mobil“ durch die Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie e-mobil BW GmbH und die Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH (WRS). Weitere Informationen unter [www.livinglab-bwe.de](http://www.livinglab-bwe.de)



**SIEMENS**



 **Fraunhofer**



## Impressum

### Projektbetreuung und Kontakt

Dr. Kevin Stella

Telefon: +49 721 608-28243

Fax: +49 721 608-28284

[kevin.stella@kit.edu](mailto:kevin.stella@kit.edu)

### Herausgeber

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

[www.kit.edu](http://www.kit.edu)

Karlsruhe © KIT 2015

DOI: 10.5445/IR/1000048691

