

Schlussbericht CO₂-freie Zustellung in Bonn

DPOR: SARAH BÜSCHGENS, ASTRID DETTENBACH

FCN: STEFANIE WOLFF, REINHARD MADLENER, ANDRÉ HACKBARTH

PGS: ILKA SCHÖNEBERGER, FABIAN RÜCKER

Deutsche Post Lehrstuhl für
Optimierung (DPOR)
von Distributionsnetzwerken
RWTH Aachen University
Kackertstraße 7
D-52072 Aachen
Telefon: 0241 80 96185
Telefax: 0241 80 92168
Mail: info@dpor.rwth-aachen.de
www.dpor.rwth-aachen.de

Institute for Power Generation and Storage
Systems (PGS)
E.ON Energy Research Center (E.ON ERC)
RWTH Aachen University
Mathieustraße 10
D-52074 Aachen
Telefon: 0241 80 49668
Telefax: 0241 80 49669
Mail: pgs-office@eoner.rwth-aachen.de
www.pgs.eoner.rwth-aachen.de

Lehrstuhl für Wirtschaftswissenschaften, insb. Energieökonomik
Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN)
E.ON Energy Research Center (E.ON ERC)
RWTH Aachen University
Mathieustraße 10
D-52074 Aachen
Telefon: 0241 80 49838
Telefax: 0241 80 49829
Mail: post_fcn@eoner.rwth-aachen.de
www.fcn.eoner.rwth-aachen.de

Inhalt

1 Einführung	1
2 Einleitung und Problemstellung des DPOR	3
2.1 Ausgangssituationen	4
2.1.1 Verbundzustellung.....	4
2.1.2 Paketzustellung	5
2.2 Planung und Ablauf des Vorhabens	6
2.3 Stand der Wissenschaft.....	7
2.3.1 Flexible Bezirksschneidung.....	8
2.3.2 Notfallplanung	8
2.4 Flexible Bezirksschneidung	9
2.4.1 Bildung der Kerngebiete.....	9
2.4.2 Tägliche Tourenplanung in der Verbundzustellung	12
2.4.3 Tägliche Tourenplanung in der Paketzustellung	13
2.5 Notfallplanung.....	15
3 Ergebnisse des DPOR	16
3.1 Ergebnisse Kerngebietsschneidung	16
3.2 Ergebnisse flexible Bezirksschneidung	18
3.2.1 Verbundzustellung.....	18
3.2.2 Paketzustellung	25
3.3 Ergebnisse Notfallplanung.....	45
3.4 Veröffentlichungen des DPOR	53
4 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse des DPOR für KMU	54
5 Einleitung und Problemstellung des FCN	55
5.1 Ausgangssituation und Stand der Wissenschaft: Wirtschaftlichkeitsanalyse und Untersuchung der Ladestrategie: techno-ökonomische Optimierung und Nutzerverhalten ..	55
5.1.1 Kriterien zur Beurteilung von Ladestrategien	56
5.1.2 Optimierung der Ladestrategien.....	56
5.1.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse	57
5.1.4 Entscheidungsmodell zur Flottenumstellung	59
5.1.5 Nutzerakzeptanzbefragungen	59
5.2 Ausgangssituation und Stand der Wissenschaft: Auswirkungen des Flottenbetriebs auf das Stromnetz	62
5.2.1 Ermittlung der Beeinflussung der Stromnetzstabilität	63
5.2.2 Lebenszyklusanalyse	64
5.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	64

6	Ergebnisse des FCN	66
6.1	Wirtschaftlichkeitsanalyse und Untersuchung der Ladestrategie: techno-ökonomische Optimierung und Nutzerverhalten	66
6.1.1	Kriterien zur Beurteilung von Ladestrategien	66
6.1.2	Optimierung der Ladestrategien	66
6.1.3	Wirtschaftlichkeitsanalyse	71
6.1.4	Nutzerakzeptanzbefragungen	76
6.1.5	Entscheidungsmodell zur Flottenumstellung	84
6.2	Auswirkungen des Flottenbetriebs auf das Stromnetz	91
6.2.1	Ermittlung der Beeinflussung der Stromnetzstabilität	91
6.2.2	Lebenszyklusanalyse	94
6.3	Veröffentlichungen des FCN	97
7	Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse des FCN für KMU	99
8	Einleitung und Problemstellung des PGS	100
8.1	Ausgangssituation	100
8.2	Planung und Ablauf des Vorhabens	101
8.3	Stand der Wissenschaft	101
9	Ergebnisse des PGS	102
9.1	Beurteilung der Ladekonzepte	102
9.2	Optimierung der Ladestrategie/Optimierte Flottenladestrategie	109
9.2.1	Vorarbeiten	109
9.2.2	Nichtlineares Optimierungsproblem	109
9.2.3	Eingangsdaten:	112
9.2.4	Ergebnisse der Optimierung	114
9.2.5	Zusammenfassung	118
9.3	Batteriealterung	119
9.3.1	Vermessung der Ladekurve	119
9.3.2	Betriebsdatenanalyse	121
9.3.3	Fahrzeug im Labor	124
9.4	Auswirkungen des Flottenbetriebs	127
9.4.1	Auswirkungen auf die Umwelt	127
9.4.2	Eingangsdaten, Ergebnisse und Betrachtungsbereich	127
9.4.3	Methodischer Ansatz der Marktsimulation	128
9.4.4	Optimierungsalgorithmus	129
9.4.5	Untersuchungen	130
9.5	Auswirkungen auf das Stromnetz	131
9.5.1	Eingangsdaten, Ergebnisse und Betrachtungsbereich	132
9.5.2	Methodischer Ansatz	134

9.5.3 Untersuchungen	135
9.6 Veröffentlichungen des PGS	137
10 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse des PGS für KMU	139
11 Abbildungsverzeichnis	140
12 Tabellenverzeichnis	145
13 Abkürzungsverzeichnis	147
14 Literaturverzeichnis	148

1 Einführung

Das Verbundvorhaben „Erprobung von E-Mobilität im Flottenbetrieb – CO₂ freie Zustellung in Bonn – CO₂ GoGreen“ wurde zusammen mit der Deutschen Post DHL und zwei weiteren Partnern durchgeführt. Neben der Langmatz GmbH war die RWTH Aachen mit drei Instituten aus unterschiedlichen Fakultäten und/oder Fachrichtungen als wissenschaftlicher Partner an dem Projekt beteiligt, um den vielseitigen technischen, ökologischen und ökonomischen Interdependenzen des Forschungsgegenstandes Rechnung zu tragen. Unter der Verbundleitung des Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN) brachten das Institute for Power Generation and Storage Systems (PGS) und der Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken (DPOR) ihre Expertisen in das Vorhaben ein.

Ziel des Verbundvorhabens war die Entwicklung eines wissenschaftlich validierten und praxistauglichen Gesamtansatzes für eine flächendeckende Umstellung von Logistik Verkehrsflotten (vor allem Zustellfahrzeuge für Brief- und Paketpost) auf elektromobile Antriebe. Im Mittelpunkt standen hierbei insbesondere Herausforderungen hinsichtlich der betrieblichen Auswirkungen einer vollständigen Umstellung von Transporten auf Elektrofahrzeuge¹, der Auslegung großflottentauglicher Ladestrategien- und Infrastrukturlösungen für den Einsatz im gewerblichen Sektor und der Auswirkungen dieser Ladestrategien auf die lokalen Stromnetze und die Umwelt. Die jeweiligen technischen, ökonomischen und ökologischen Effekte der verschiedenen zur Wahl stehenden Optionen und Strategien zur Lösung dieser Herausforderungen wurden seitens der RWTH Aachen ermittelt und optimiert.

Im Speziellen umfassten die Aufgaben der RWTH Aachen:

- die Entwicklung eines Modells, das den Einsatz der elektrischen Transportfahrzeuge durch eine variable Gestaltung der Zustellbezirksgröße und der zu fahrenden Touren in Abhängigkeit verschiedener Rahmenbedingungen (z.B. Sendungsmenge und Ladestrategie) optimiert;
- die technische, ökonomische und ökologische Bewertung und Optimierung von verschiedenen Ladestrategien unter besonderer Berücksichtigung ihrer jeweiligen Auswirkungen auf die Batteriealterung;
- die Ermittlung der Auswirkungen der verschiedenen Ladestrategien auf das Stromnetz und seine Stabilität sowie des Potentials von Netzdienstleistungsangeboten durch die Elektrofahrzeugflotte;

¹ Die Begriffe *Elektrofahrzeug*, *E-Fahrzeug*, *E-Auto* etc. bezeichnen die in diesem Forschungsprojekt untersuchten elektrisch angetriebenen Zustell-Fahrzeuge (*E-ZFZ*). Mit *konventionellen (Zustell-) Fahrzeugen*, *Verbrennungsfahrzeugen*, *konventionellen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor* etc. sind die herkömmlichen (konventionellen), mit fossilen Brennstoffen (Diesel) angetriebenen (Zustell-) Fahrzeuge gemeint. In beiden Fällen handelt es sich um Nutzfahrzeuge und nicht um Personenkraftfahrzeuge.

- die Quantifizierung der Umwelteffekte der verschiedenen Ladestrategien sowie eine Lebenszyklusanalyse zur Bewertung der ökologischen Vor- oder Nachteilhaftigkeit einer Elektrofahrzeugflotte;
- die Bestimmung der Praxistauglichkeit der Elektromobilität für Transportdienstleistungen im Allgemeinen und der entwickelten Ladestrategien und Einsatzmodelle im Speziellen mittels Nutzerakzeptanzbefragungen; und
- die Berechnung der Wirtschaftlichkeit einer elektrifizierten Transportfahrzeugflotte und die Entwicklung eines ökonomischen Entscheidungsmodells zur zeitlich optimalen Umstellung der Flotte auf Elektrofahrzeuge.

Der Schlussbericht ist nach den beteiligten RWTH-Institutionen unterteilt (DPOR, FCN, PGS.)

2 Einleitung und Problemstellung des DPOR

Der Einsatz von Elektrofahrzeugen bringt neue Herausforderungen in der postalischen Zustellung von Briefen und Paketen mit sich. Die größte Herausforderung ist dabei, dass keine Erfahrungswerte in der Zustellung mit Elektrofahrzeugen vorhanden sind. Weiter ist – im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen - eine variable Reichweite charakteristisch für die Elektrofahrzeuge. Die Reichweite hängt von Faktoren wie dem Alter der Batterie, der Witterung aber auch dem Profil der Strecke ab. Andere zu meisternde Punkte sind die derzeit noch im Aufbau befindliche Ladeinfrastruktur und die Kapazitätsrestriktionen der Fahrzeuge. Die geänderten Rahmenbedingungen in der Zustellung durch die E-Fahrzeuge erfordern die Anpassung der Bezirks- und Tourenplanung an die neue Situation. Ziel ist die Konzeption von innovativen Strategien, um eine zuverlässige Zustellung, auch mit Elektrofahrzeugen, zu gewährleisten. Im Bereich der Zustellung werden dazu Strategien zur Sicherstellung einer ausreichenden Flexibilität bei Reichweiten- und Zustellmenschwankungen untersucht.

Um besser auf die genannten Herausforderungen reagieren zu können, werden dynamische und statische Aspekte der Touren- und Tourgebietsplanung kombiniert und ein Verfahren zur flexiblen Bezirksschneidung entwickelt, welches die jeweiligen Vorteile der Verfahren ausnutzt. Die Idee ist die Bildung von Kerngebieten, die idealerweise Grundstock eines Bezirks bilden. Zur Bildung der Kerngebiete werden zunächst Ankerpunkte im Gebiet festgelegt und über ein Zuordnungsverfahren Straßenabschnitte dem Kerngebiet zugeordnet. Flexible Randbereiche werden diesen Kerngebieten täglich neu zugeordnet. Hierfür werden in der Verbundzustellung ein Memetischer Algorithmus und in der Paketzustellung ein Simulated Annealing Verfahren entwickelt, die zeitnah Lösungen für die tagesangepasste Zuordnung der flexiblen Straßenabschnitte liefern.

Zum „Betanken“ der Elektrofahrzeuge wird eine spezielle Infrastruktur benötigt, welche die Ladeterminals bereitstellt. Die Platzierung der Ladeterminals, die Bezirksschneidung und die Auslegung der Fahrzeugflotte beeinflussen sich wechselseitig. Die Ergebnisse der jeweiligen Planungsprobleme dienen als Inputfaktor des anderen Optimierungsproblems. Durch eine geschickte Wahl der Infrastruktur können weite Wege zum Depot entfallen (Ergebnis der Bezirksplanung) und Fahrzeuge mit kleineren Akkumulatoren eingesetzt werden (Flottenplanung), oder eine Ladestrategie verfolgt werden, bei der die Batterien nicht vollständig geladen werden. Über sogenannte Location-Routing-Probleme können Fragestellungen über die Installation von dezentralen Ladesäulen gemeinsam mit Fragestellungen der Bezirks- und Tourenplanung gelöst werden. Die Lokationsentscheidung wird dazu in das entwickelte Verfahren integriert.

Egal wie gut Touren geplant sind, sie unterliegen dem Risiko von Ausfällen oder Störungen im Betriebsablauf. Maßnahmen müssen unternommen werden, um die negativen Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu reduzieren. Ziele können beispielsweise die Sicherstellung des laufenden Betriebs und die Reduktion der Verzögerungen sein. Es wird deshalb für den statischen Fall eine Entscheidungshilfe zur Behebung von Notfallsituationen, wie bspw. Einem Fahrzeugausfall, entwickelt.

In Kapitel 1 wird der Stand der Wissenschaft dargelegt und die Lösungsansätze für die flexible Bezirksplanung sowie für die Notfallplanung erläutert. Zunächst werden dazu in Kapitel 2.1 die Ausgangssituationen für die Verbund- und die Paketzustellung geschildert. Der Stand der Wissenschaft der flexiblen Bezirksplanung wird in Abschnitt 2.3.1 dargestellt. Kapitel 2.3.2 befasst sich mit dem Stand der Wissenschaft zur Notfallplanung. Die Ausgestaltung der Verfahren zur flexiblen Bezirksplanung und der täglichen Zuordnung sind Gegenstand von Kapitel 2.4. Fokus von Kapitel 2.5 liegt auf der Notfallplanung.

Kapitel 3 präsentiert die Ergebnisse. Zunächst werden in Kapitel 3.1 die Ergebnisse für die Kerngebietsschneidung erläutert. Kapitel 3.2 widmet sich den Ergebnissen der täglichen Tourenplanung für die Verbund- und die Paketzustellung. Die Ergebnisse der Notfallplanung werden in Kapitel 3.3 vorgestellt. Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse folgen in Kapitel 4.

Im Folgenden wird nun die Verbund- und die Paketzustellung beschrieben.

2.1 Ausgangssituationen

2.1.1 Verbundzustellung

Die gemeinsame Zustellung der Briefe und Pakete erfolgt bei der Verbundzustellung von sogenannten Zustellstützpunkten (ZSP) aus. Einem Zustellstützpunkt ist dabei ein bestimmtes Versorgungsgebiet zugeordnet, welches täglich beliefert wird. Dieses Gebiet ist in fest definierte, statische Touren unterteilt. Die Touren beinhalten von der Deutsche Post DHL vorher festgelegte Zustellabschnitte (ZAb), die in einer bestimmten Reihenfolge bedient werden. Ein Zustellabschnitt kann dabei z.B. ein Haus oder ein Straßenabschnitt sein. Bei der Verbundzustellung wird für die Touren eine feste Gangfolge vorgegeben, weil durch die Zustellung der Briefsendungsmengen mit großer Wahrscheinlichkeit jeder Zustellabschnitt täglich angefahren wird. Die Briefe werden daher bereits im Sortierzentrum weitgehend auf die vorgegebene Gangfolge sortiert. Der Anteil der Paketsendungen wird in Zukunft einen immer höheren Anteil in der Verbundzustellung einnehmen. Nach einer vom Bundesverband Paket und Expresslogistik veröffentlichten KEP-Studie wird das Paketvolumen bis 2019 jährlich um 6,6 % wachsen. Dies ist vor allem durch den erhöhten e-Commerce-Handel zu begründen. Auf der anderen Seite geht durch den elektronischen Brief (E-Mail) das Briefvolumen zurück. Die bislang stabile Verbundzustellung wird zunehmend den variablen Charakter der Paketzustellung übernehmen und bedarf einer flexiblen Bezirksplanung, die den dynamischen Charakter, wie schwankende Sendungsmenge und die variable Reichweite der Fahrzeuge aufnimmt.

2.1.2 Paketzustellung

Das Versorgungsgebiet einer Zustellbasis (ZB) ist in Bezirke unterteilt. Von der ZB starten die Zusteller² in ihre Bezirke, stellen die Pakete den Adressaten zu und kehren am Ende der Zustellung zu der Zustellbasis wieder zurück. Die Anzahl der Bezirke wird in der Paketzustellung flexibel gewählt. Es gibt unterschiedliche Musterschnitte, die abhängig vom Wochentag und von der Saison sind. Ein Bezirk besteht wiederum aus kleineren Einheiten, den Zustellabschnitten (ZAb). Einem Bezirk wird eine bestimmte Anzahl dieser ZAb zugeordnet. Für jeden Bezirk gibt es einen Rahmentourenplan, der eine Reihenfolgeempfehlung der anzufahrenden ZAb darstellt. Der Rahmentourenplan hat im operationellen Betrieb kaum Bestand, weil an den einzelnen Tagen nicht alle ZAb angefahren werden müssen. Darin unterscheidet sich die Paketzustellung grundlegend von der Briefzustellung, in der jeder ZAb täglich zu bedienen ist.

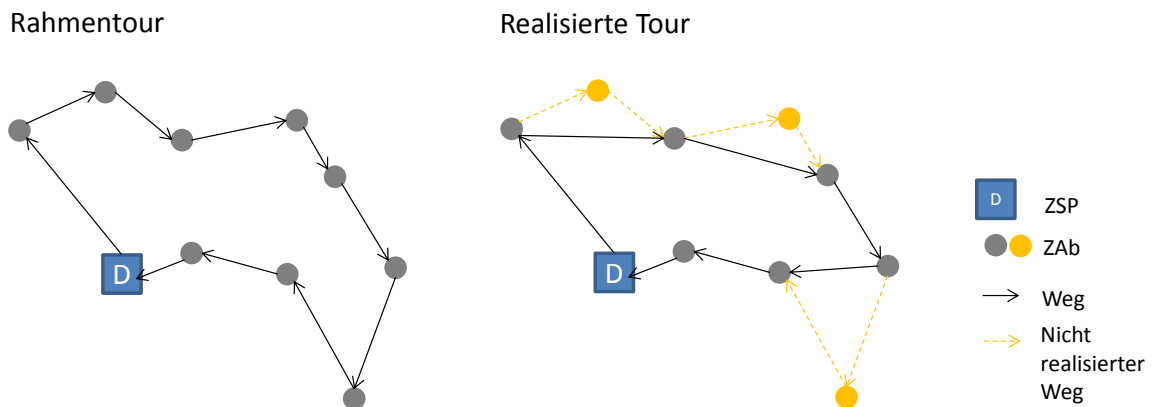


Abbildung 1 Ein Bezirk mit Rahmentour und einer realisierten Tour, in der drei Anfahrpunkte entfallen sind

Abbildung 1 zeigt beispielhaft eine Rahmentour (links). Eine realisierte Instanz der Rahmentour ist auf der rechten Seite angegeben. Drei ZAbs werden an dem spezifischen Tag nicht angefahren. Daraus ergibt sich für den Zusteller eine geänderte Route. Unter Umständen kann sich sogar die Anfahrreihenfolge ändern.

Im operativen Betrieb können Abweichungen vom Plan eintreten, so dass der Zustellplan nicht realisierbar ist. Solche Sondersituationen können beispielsweise auftreten, wenn in einem Bezirk, die Reichweite der Fahrzeuge oder die Paketauslastung zu hoch ist und innerhalb der dafür vorgesehenen Reichweite oder Zeit die Pakete nicht vollständig zugestellt werden können. Zur gleichen Zeit können Bezirke existieren, die genügend Puffer haben und Teilbezirke übernehmen können. Ziel ist die Entwicklung einer Entscheidungshilfe, die die Planer bei der Verteilung der

² In diesem Dokument wird das Wort *Zusteller* für beide Geschlechter (Zustellerinnen und Zusteller) gleichermaßen genutzt. Im weiteren Verlauf wird aufgrund der Übersichtlichkeit lediglich die maskuline Form verwendet.

Aufträge auf die Bezirke unterstützt, mit dem Ziel eine Zustellzeit-minimale Verteilung zu erreichen.

Die Paketzusteller sind in ihrer täglichen Route routiniert unterwegs. Zeitvorteile durch die Routine in der Zustellung können bei einer gravierenden Umplanung nicht realisiert werden. Um dennoch flexibel auf betriebliche Zustände, wie die tägliche Sendungsmenge und die Ladestände der Fahrzeuge reagieren zu können, werden Kerngebiete identifiziert, deren Zusammensetzung täglich gleichbleibend ist. Den Kerngebieten werden Situations-angepasst umliegende Zustellabschnitte zugeordnet. Dieser Ansatz ermöglicht es, weiterhin von der Routine der Zusteller zu profitieren, und zeitgleich flexibel auf die Bedürfnisse der E-Fahrzeuge reagieren zu können. Insgesamt wird die Gesamtarbeitszeit minimiert.

Zusätzlich zur Tourenplanung wird eine Entscheidung über die Lage von den zusätzlichen Depots, sowie der Zuordnung der Bezirke zu den zusätzlichen Depots in dem Lösungsansatz aufgenommen. Für die Bereitstellung der Pakete vor Ort an den Ladeterminals wird eine zusätzliche Versorgungstour eingeführt, welche bei den Berechnungen zu berücksichtigen ist.

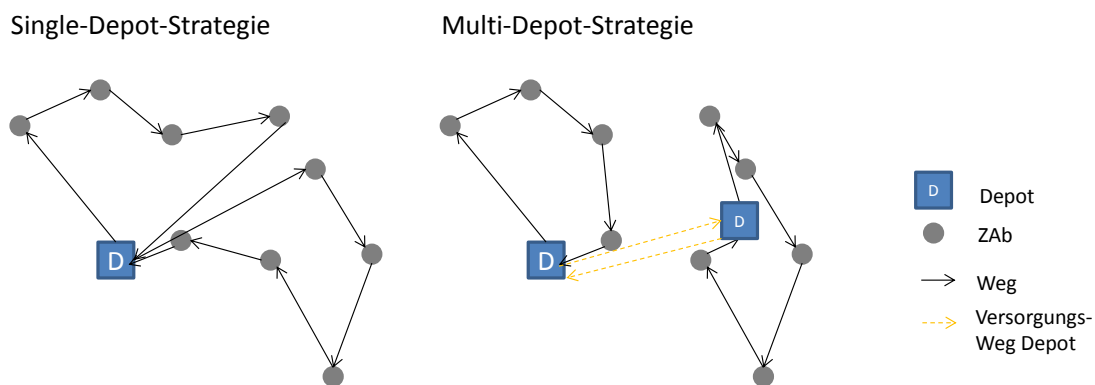


Abbildung 2 Gegenüberstellung der Single-Depot- und Multi-Depot-Strategie

Abbildung 2 illustriert die Single-Depot-Strategie und die Multi-Depot-Strategie. Bei der Single-Depot-Strategie starten und enden alle Touren am gleichen Depot. Bei der Multi-Depot-Strategie können Touren von unterschiedlichen Depots versorgt werden. Es wird angenommen, dass alle Fahrzeuge jeweils zu dem Depot zurückkehren, von welchem sie gestartet sind. Außerdem wird angenommen, dass die Vorbereitung nach wie vor an der ZB stattfindet: Die Pakete werden im Nachlauf von den Sortierzentren zur ZB transportiert. An der ZB werden die Pakete für die einzelnen Bezirke zusammengestellt. Über eine zusätzliche Versorgungstour (gelb gestrichelter Weg) werden die Pakete zu den installierten Ladesäulen gebracht und dort für die Zusteller bereitgestellt.

2.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Ziele waren über den Projektantrag vorab definiert worden. Um die Ziele zu erreichen, wurde das Projekt in die folgenden Teilbereiche untergliedert:

- Literaturrecherche

Erfassung des aktuellen Stands der Forschung

- Datenaquisition

In Absprache mit dem Projektpartner wurden die benötigten Daten angefordert und von der Deutsche Post DHL bereitgestellt. Diese Daten umfassten Informationen zum Zustellgebiet, zur aktuellen Bezirksschneidung und Paketvolumendaten.

- Konzeption der Lösungsverfahren

Über die im Vorfeld durchgeführte Literatur- und Datenanalyse haben sich Ansätze für die Lösungsverfahren herausgebildet. Die bekannten Verfahren aus der Literatur wurden für die hier vorliegende Aufgabenstellung angepasst und erweitert.

- Implementierung und Bewertung der Lösungsverfahren

Die konzipierten Lösungsverfahren wurden implementiert. Die Rechenergebnisse sind fortlaufend in die Verbesserung der Lösungsverfahren eingeflossen. Dazu wurden die Ergebnisse analysiert, Verbesserungspotenziale identifiziert und Lösungsansätze evaluiert, um die Verfahren zu verbessern.

Die Einführung der Elektrofahrzeuge beim Projektpartner hat die Bereitstellung einer Entscheidungshilfe für die Notfallplanung erfordert. Aus diesem Grund wird die Notfallplanung in den folgenden Kapiteln eigenständig aufgenommen.

2.3 Stand der Wissenschaft

Das kapazitierte Vehicle-Routing-Problem (CVRP) und Arc-Routing Problem (CARP) sind in der Literatur häufig untersuchte Problemstellungen. Die klassische Problemformulierung betrachtet ein Depot, in welchem Güter für die Zustellung an Endkunden bereitgestellt werden. Die Menge der Endkunden und deren Nachfragemengen werden als bekannt angenommen. Für die Zustellung steht eine endliche Anzahl an Fahrzeugen zur Verfügung. Die Fahrzeuge weisen in der Regel eine Kapazitätsbeschränkung auf. Die Touren starten und enden am Depot. CVRP sind Knoten-orientierte und CARP Kanten-orientierte Probleme. Die Nachfrage entsteht in den beiden genannten Problemen jeweils an definierten Knoten (VRP), oder an definierten Kanten (ARP). Tourenprobleme entscheiden über die Zuordnung von Nachfragern zu den Touren und der Reihenfolge, in der die Nachfrager bedient werden. Der Tourenplan muss dabei problemspezifische Restriktionen, wie eine maximale Arbeitszeit, Kapazitätsbeschränkungen der Fahrzeuge oder Zeitfenster, einhalten. Eine Vielzahl Forscher haben sich bereits diesen Themen gewidmet. Toth und Vigo (Toth und Vigo 2001) geben hierzu eine Übersicht über das VRP und dessen Lösungsansätze. Eine weitere Übersicht ist in (Eksioglu, Vural und Reisman 2009) zu finden. In deren Beitrag wird ein Rahmentourenplan vorgegeben. Rahmentouren werden häufig modelliert und beschreiben einen tägliche oder wöchentlichen Tourenplan, der über einen längeren Zeitraum Gültigkeit besitzt. (Wøhlk 2008) gibt eine Übersicht zu kapazitierten Arc

Routing Problemen der vergangenen Jahre. Eine allgemeine Übersicht zu Arc Routing Problemen ist in (Benavent, Corberán und Sanchis 2000) zu finden.

2.3.1 Flexible Bezirksschneidung

In diesem Bericht wird eine flexible Bezirksschneidung entwickelt, welches sowohl den Vorteil der Lerneffekte erhält und gleichzeitig eine täglich dynamischere Planung ermöglicht.

Dynamische Ansätze scheitern in der Praxis meist an der Komplexität. Ein mögliches Vorgehen ist es daher, die dynamischen Ansätze soweit in der Größe zu reduzieren, dass eine dynamische Touren- und Tourgebietsplanung in der Praxis anwendbar ist. Ansätze dazu sind z.B. Kunden nach Postleitzahlen oder anderen Kriterien zusammen zu fassen, sodass die Anzahl an Kunden reduziert wird (z.B. (Beasley und Christofides 1997) oder (Janssens, et al. 2015)) oder Kunden zu Clustern und bei der täglichen Tourenplanung nur alle Kunden zu Touren zusammen zu fassen, die in einem Cluster liegen (Campbell, Clarke und Savelsbergh 2002), wobei es mehrere Touren pro Cluster geben kann.

Zhong et al. (Zhong , Hall und Dessouky 2007) entwickeln als erstes die Idee eines Verfahrens zur flexiblen Touren- und Tourgebietsplanung, welches statische und dynamische Aspekte kombiniert. Die Idee ist, sogenannte Kerngebiete und flexible Gebiete zu bestimmen. Die Kerngebiete sind dabei statisch bestimmte Gebiete kleinerer Größe. Um die täglichen Touren zu bilden, werden den Kerngebieten dynamisch Teile der flexiblen Gebiete zugeteilt. Bei dieser täglichen Zuordnung wird für jeden Fahrer eine Lernkurve berücksichtigt. Ziel ist es die flexiblen Gebiete so zu zuordnen, dass unter Berücksichtigung von Lerneffekten eine möglichst zeitschnelle, kostengünstige Tourenplanung geschieht. Zhong et al. (Zhong , Hall und Dessouky 2007) gehen bei ihrer Planung davon aus, dass die Standorte der Kunden und deren Nachfrage von Tag zu Tag variieren. Diese Situation liegt z.B. bei der Paketzustellung vor. Die Autoren entwickeln eine Tabu Suche (TS) um das Problem zu lösen.

Schneider et al. (Schneider, et al. 2014) greifen die Idee der Planung mit Hilfe von Kerngebieten von Zhong et al. (Zhong , Hall und Dessouky 2007) auf. Auch sie nehmen eine täglich schwankende Kundenmenge an. Zusätzlich berücksichtigen sie bei der Tourenplanung Zeitfenster und passen das TS-Verfahren zur Kerngebietsbestimmung entsprechend an.

Der Ansatz eines flexiblen Verfahrens zur Touren- und Tourgebietsplanung unter Berücksichtigung einer vorgegebenen Gangfolge bei der Verbundzustellung und die Aufnahme der Lokationsentscheidung in der Paketzustellung wurde bislang noch nicht verfolgt und wird in diesem Bericht betrachtet.

2.3.2 Notfallplanung

Zur Bewältigung von Unsicherheiten in Distributionssystem können unterschiedliche Herangehensweisen gewählt werden (Yu und Xiangtong 2004). Ein Ansatzpunkt ist es, das Auftreten von Störungen bereits bei der Planung der Rahmentour zu berücksichtigen. Die Planung erfolgt hier bereits im Voraus. Ansätze, die als "vorausschauende Planungsmodelle"

klassifiziert werden, sind: stochastische Modellierung, robuste Optimierung und die Notfallplanung.

Stochastische Probleme berücksichtigen die Unsicherheit über die Modellierung stochastischer Prozesse. Als Unsicherheiten werden oft die Bedienzeit oder die Nachfrage der Kunden modelliert. Ziel der stochastischen Probleme ist das Erzeugen von Plänen, die den durchschnittlichen Output optimieren und dabei jedes erdenkliche Szenario abdecken. Laporte et al. (Laporte, Musmanno und Vocaturo 2010) führen beispielsweise ein kapazitiertes Arc-Routing Modell mit stochastischer Nachfrage ein. Als Anwendungsfall dient ihnen die Müllabfuhr.

Robuste Optimierung zielt darauf ab, die Unsicherheit über die Aufnahme von speziellen Faktoren zu reduzieren. In der robusten Optimierung wird keine Risiko-Verteilungsfunktion wie bei der stochastischen Optimierung benötigt, dafür müssen allerdings alle möglichen Szenarien spezifiziert werden. Über die Optimierung wird ein Plan generiert, der auch im Worst-Case-Szenario vom Entscheider akzeptiert wird. Tajik et al. (Tajik, et al. 2014) präsentieren ein Pick-up-and-Delivery-Modell mit einer robusten Komponente.

Die Bewältigung von Risiken ist Teil der Notfallplanung. Der erste Schritt der Planung besteht aus der Identifikation und Analyse von Risiken und deren Auswirkungen auf die betrieblichen Abläufe. Verschiedene Szenarien und Lösungen werden zur Bewältigung von Störungen entwickelt umgesetzt. Bei Auftreten einer Störung wird die vordefinierte Abfolge von Aktionen eingeleitet, um der Störung zu entgegen. Dieser Ansatzpunkt wird in diesem Bericht in Kapitel 2.5 betrachtet. Der nächste Abschnitt 2.4 widmet sich der flexiblen Bezirksschneidung.

2.4 Flexible Bezirksschneidung

In der flexiblen Bezirksschneidung wird das Versorgungsgebiet in Kerngebiete und flexible Gebiete unterteilt. In einem ersten Schritt wird eine Entscheidung getroffen, ob ein Zustellabschnitt einem Kerngebiet zugeordnet wird, oder ob er als flexibler Zustellabschnitt deklariert wird, über dessen Zuordnung zu einem Kerngebiet täglich neu entschieden wird. Die Zuordnungen zu den Kerngebieten sind strategischer-taktischer Natur und ändern sich kurzfristig nicht. In der Verbundzustellung wird zugleich eine Gangfolge in den Kerngebieten geplant. Zunächst wird in Kapitel 2.4.1 die Bildung der Kerngebiete und die Gangfolgeplanung in der Verbundzustellung erläutert. Die tägliche Zuordnung und Tourenplanung ist Gegenstand der nachfolgenden Kapiteln 2.4.2 und 2.4.3.

2.4.1 Bildung der Kerngebiete

Ziel des Verfahrens ist es, das Zustellgebiet in Kerngebiete und flexible Gebiete zu unterteilen. Zur Bestimmung der Kerngebiete und flexiblen Gebiete wird ein Cluster-First Route-Second Verfahren entwickelt. Cluster-First Route-Second bedeutet, dass zuerst die Zustellabschnitte in Kerngebiete und flexible Gebiete aufgeteilt werden und erst nach der Unterteilung die Tourenplanung durchgeführt wird.

Im Folgenden werden nun die einzelnen Verfahrensschritte kurz vorgestellt und erläutert.

Anzahl der Kerngebiete bestimmen

Bei der Kerngebietsbestimmung werden Zustellabschnitte einem Kerngebiet zugeordnet. Die Zusammensetzung eines Kerngebiets ändert sich mittelfristig nicht. Die verbleibenden, freien ZAB werden täglich neu den Kerngebieten zugeordnet. Die Zuordnungsentscheidung ist davon abhängig wie viele Kerngebiete eingerichtet werden. Die Anzahl der einzurichtenden Kerngebiete wird, wie nachfolgend beschrieben, bestimmt. Eine untere Schranke für die Anzahl der Kerngebiete ist das Maximum folgender Werte:

- Kapazität: $\frac{\text{Gesamtzahl Pakete pro Tag}}{\text{Durchschnittliche Anzahl der Pakete auf einer Tour}}$
- Länge: $\frac{\text{Benötigte Reichweite zur Zustellung}}{\text{Reichweite eines Fahrzeuges}}$
- Zeit: $\frac{\text{Benötigte Zeit zur Zustellung}}{\text{Arbeitszeit eines Zustellers pro Tag}}$

Die Werte beziehen sich dabei auf das komplette Gebiet eines Zustellstützpunktes. Die benötigte Reichweite als auch die benötigte Zeit zur Zustellung werden approximiert. Mit der erhaltenen unteren Schranke für die Anzahl an Kerngebieten wird das Verfahren zur Kerngebietsbestimmung durchgeführt. Sollte dabei bemerkt werden, dass eine komplette Zustellung mit dieser Anzahl nicht möglich ist, wird die Anzahl der Kerngebiete um eins erhöht.

Wahl von Ankerpunkten für Kerngebiete

Nachdem die Anzahl an Kerngebieten bestimmt ist, werden die Kerngebiete gebildet. Die Kerngebiete werden über sogenannte Anker initialisiert. Die Anker sind ein Keim für das jeweilige Kerngebiet, welchem sukzessive weitere Zustellabschnitte zugeordnet werden. Die Idee ist, in dem Versorgungsgebiet eine entsprechende Anzahl an Ankern zu bestimmen. Diese Anker werden so gewählt, dass sie in Regionen liegen, welche gut für ein Kerngebiet geeignet sind. Als Anker kann jeder Zustellabschnitt aus dem Versorgungsgebiet gewählt werden. Wie die Anker gewählt werden, wird in den nächsten Abschnitten erläutert.

Als Grundlage für die Wahl von Ankern wird ein Verfahren von Savelsbergh und Goetschalckx (Savelsbergh und Goetschalckx 1995) verwendet. Um jeden Zustellabschnitt wird hier ein Kreis mit maximalem Radius gelegt, sodass eine bestimmte Fahrzeugkapazität eingehalten wird, wenn alle Zustellabschnitte innerhalb des Kreises bedient werden. Nach der Bestimmung der Radien werden die Zustellabschnitte der Größe der Radien nach aufsteigend angeordnet. Kleine Radien weisen auf eine hohe Kompaktheit hin. Der Zustellabschnitt mit dem kleinsten Radius stellt den ersten Anker dar. Alle Kunden in diesem Radius fallen als mögliche weitere potentielle Anker weg. Der Zustellabschnitt mit dem nächst kleinsten Radius stellt den nächsten Anker dar. Das Verfahren wird iterativ fortgesetzt, bis die vorab definierte Anzahl Anker erreicht ist. Zu dem

Verfahren gibt es eine Erweiterung von Schmidhöfer (Schmidhöfer 2003). Dort wird bei der Radiusbestimmung zusätzlich noch der Faktor „Zeit“ berücksichtigt.

Damit die Kerngebiete zusätzlich zur Eigenschaft der Kompaktheit nicht direkt aneinander grenzen und sie geringen Paketschwankungen unterliegen, wird das Verfahren noch erweitert und angepasst.

Bestimmung von Kerngebieten

Den gewählten Ankern werden zur Bildung von Kerngebieten umliegende Zustellabschnitte zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt dabei solange, bis eine bestimmte Prozentzahl an Zeit überschritten ist. Die Zuordnungsentscheidung ist abhängig von der verfolgten Zielstellung. Erste Möglichkeit ist die Zuordnung mittels eines Modells, welches nur die Minimierung der Zeit der Zustellabschnitte zu den Ankern als Zielkriterium verwendet.

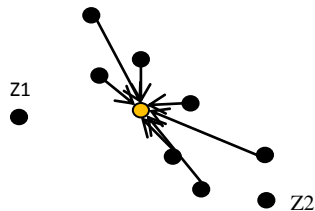


Abbildung 3 Zuordnung von Zustellabschnitten zu Ankern

Bei dieser Zuordnung wird die Zeit zu den Ankern minimiert. Nicht berücksichtigt wird, ob ein ZAb z2 vielleicht weiter entfernt ist als ein ZAb z1, aber dafür sehr nah an einen weiteren ZAb grenzt, der bereits zugeordnet ist (s. Abbildung 3). Durch die Verwendung einer Heuristik kann dieser Sachverhalt berücksichtigt werden.

Für die Verbundzustellung wird in den Kerngebieten eine Gangfolgebestimmung vorgenommen. Diese Gangfolge wird auch bei der täglichen Zuordnung der freien Zustellabschnitte aus den flexiblen Gebieten zu den Kerngebieten eingehalten. Im nächsten Schritt wird daher kurz auf die Gangfolgeplanung in den Kerngebieten eingegangen, bevor in Kapitel 2.4.2 das tägliche Zuordnungsverfahren vorgestellt wird.

Gangfolgeplanung in den Kerngebieten der Verbundzustellung

Weil in der Briefzustellung Straßenzüge bedient werden, spielen Straßeneigenschaften eine wichtige Rolle bei der Gangfolgeplanung. Dabei wird berücksichtigt, ob eine Einbahnstraße vorliegt und ob die Straße nur einseitig oder mit Zickzackwegen bedient werden kann. Des Weiteren wird zwischen Zustellabschnittswegen, welche durchlaufen werden müssen, und Verbindungswegen unterschieden. Bei der Gangfolgeplanung werden diese

Straßeneigenschaften mit abgebildet und daher für diese Planung ein kantenorientiertes Problem betrachtet. Die Straßensituation wird für jedes Kerngebiet in einem gemischten Graphen abgebildet.

In dem gebildeten Graphen wird nach einer kostenminimalen Tour gesucht, die alle zu bedienenden Zustellabschnitte durchläuft und vollständig bedient. Auf dem Weg zu einem zu bedienenden Zustellabschnitt können weitere nicht zu bedienende Straßenabschnitte bzw. Verbindungswege durchlaufen werden. Es ist daher ein Mixed Rural Postman Problem (MRPP) zu lösen. In der Literatur gibt es verschiedene Formulierungen und Lösungsverfahren (z.B. (Dror 2000)).

Durch Lösen des MRPP für jedes Kerngebiet wird die jeweilige Gangfolge bestimmt, welche dann bei der täglichen Zuordnung der flexiblen ZAbs zu den Kerngebieten berücksichtigt wird.

2.4.2 Tägliche Tourenplanung in der Verbundzustellung

Nachdem die Kerngebiete mit Gangfolge bestimmt sind, wird im folgenden Kapitel das tägliche Zuordnungsverfahren beschrieben.

Ausgangssituation

Als Ausgangssituation zur täglichen Zuordnung liegt ein Zustellgebiet vor, welches in flexible ZAbs und Kerngebiete unterteilt ist. In den Kerngebieten ist eine feste Gangfolge vorgegeben. Ziel ist es nun, die flexiblen ZAbs zu den Kerngebieten – unter Berücksichtigung der Gangfolge in den Kerngebieten, der aktuellen Ladestände der Batterien und unter Einhaltung von Kapazitäts- und Zeitbeschränkungen – zu zuordnen. „Zuordnung unter Berücksichtigung der Gangfolge“ heißt dabei, dass die Gangfolge unterbrochen aber nicht geändert werden darf. Dies hat zum Vorteil, dass weiter von Lerneffekten profitiert werden kann und auch die praktische Umsetzung leichter ist.

Modellierung

Für das tägliche Zuordnungsverfahren müssen drei Entscheidungen getroffen werden:

- Welcher flexible ZAb wird welchem Kerngebiet zugeordnet?
- An welcher Position wird der ZAb eingefügt?
- Welche Verbindungswege werden verwendet?

Zur Findung einer Zuordnung wird ein Mixed Capacitated Arc Routing Problem (MCARP) auf die gegebene Situation erweitert. Durch Lösen des Modells erhält man die tägliche Zuordnung der flexiblen ZAb zu den Kerngebieten. Da das Modell allerdings sehr komplex ist und bei der täglichen Zuordnung eine zeitschnelle Lösung benötigt wird, ist die Entwicklung einer Heuristik notwendig.

Heuristik

Da das Modell eine Erweiterung des MCARP ist, werden als Grundlage Ansätze für Heuristiken des MCARP herangezogen. Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Ansätzen (z.B. (Mourao und Amado 2005), (Bautista, Fernández und Pereira 2008), (Belenguer, et al. 2006)). Mourao et al. (Mourao und Amado 2005) versuchen ungerichtete Kanten so zu richten, dass die Knoten ausbalanciert sind. Sie erhalten ein DCARP, welches sie lösen. Bautista et al. (Bautista, Fernández und Pereira 2008) transformieren das Kanten-orientierte Problem in ein Knoten-orientiertes Problem. Belenguer et al. (Belenguer, et al. 2006) beschäftigen sich sowohl mit unteren als auch mit oberen Schranken für das MCARP. Dabei verwenden sie abgewandelte klassische Konstruktionsheuristiken wie Augment-Merge oder Path-Scanning und einen Memetischen Algorithmus.

Ein Schwerpunkt in der Heuristik-Auswahl für das MCARP ist nicht zu erkennen und liefert daher auch keinen Hinweis auf ein möglicherweise geeignetes Verfahren. Als Basis für die zu entwickelnde Heuristik wird ein Memetischer Algorithmus gewählt. Ein solcher wird in (Belenguer, et al. 2006) verwendet und liefert dort für das gegebene Problem gute Lösungen. Die Grundidee dieses Memetischen Algorithmus wird auch in diesem Bericht angewendet und speziell auf die vorliegende Situation angepasst. Ein Memetischer Algorithmus ist ein Genetischer Algorithmus, der durch eine Lokale Suche erweitert wird. Eine Übersicht zu Memetischen Algorithmen findet sich beispielsweise in (Moscato 1999). Allgemein sieht die grobe Vorgehensweise eines Memetischen Algorithmus wie folgt aus:

Grobe Vorgehensweise Memetischer Algorithmus	
1	Erzeuge Menge an Startlösungen
2	Solange bis Abbruchkriterium erreicht:
3	Wahl zweier zufälligen Lösungen
4	Rekombination der Lösungen
5	Durchführung einer Lokalen Suche mit der neuen Lösung
6	Löschen alter Lösung & Einfügen neuer Lösung in die Lösungsmenge

Die beste Lösung, die der entwickelte Memetische Algorithmus nach einer vorher bestimmten Zeit berechnet hat, gibt dann die Zuordnung der flexiblen ZAb zu den Kerngebieten sowie deren Anfahrposition unter Berücksichtigung der apriori bestimmten Gangfolge in den Kerngebieten an. Im Folgenden wird das Verfahren für die Paketzustellung vorgestellt.

2.4.3 Tägliche Tourenplanung in der Paketzustellung

In diesem Kapitel wird die Problemstellung des täglichen Zuordnungsverfahrens erörtert. Ausgangslage für das tägliche Zuordnungsverfahren sind Kerngebiete, die vorab definiert wurden. Charakteristisch für die Kerngebiete ist ihre gleichbleibende Zusammensetzung: Unabhängig von externen Einflussgrößen (z. B. die tägliche Sendungsmenge) sind stets die gleichen ZAbs den Kerngebieten zugeordnet. Die Kerngebiete bilden den Grundstock für die

Bildung der finalen Bezirke: Nach der Bildung der Kerngebiete, ist über die Zuordnung der freien ZAbs zu den Kerngebieten und die Anfahrreihenfolge zu entscheiden. Wir betrachten also eine integrierte Bezirks- und Tourenplanung basierend auf Kerngebieten.

Das Verfahren für die Paketzustellung unterscheidet sich zu dem der Verbundzustellung dahingehend, dass bei der Verbundzustellung eine Gangreihenfolge berücksichtigt wird und in den Kerngebieten bereits eine Reihenfolge bestimmt wird, die beim täglichen Zuordnungsverfahren weitgehend eingehalten wird. Die Gangfolge wird bereits bei der Bearbeitung in den Briefzentren berücksichtigt – die Briefe werden auf den Sortiermaschinen nach der Gangreihenfolge sortiert. Eine solche Sortierung findet in der Paketzustellung nicht statt, weil die Adressen täglich stark variieren und teils komplette ZAbs an einem konkreten Tag keiner Zustellung bedürfen. Daher wird von einer fixen Gangfolge in den Paket-Kerngebieten abgesehen. Die Anfahrreihenfolge in den Kerngebieten wird mit der Zuordnung der flexiblen Gebiete täglich angepasst.

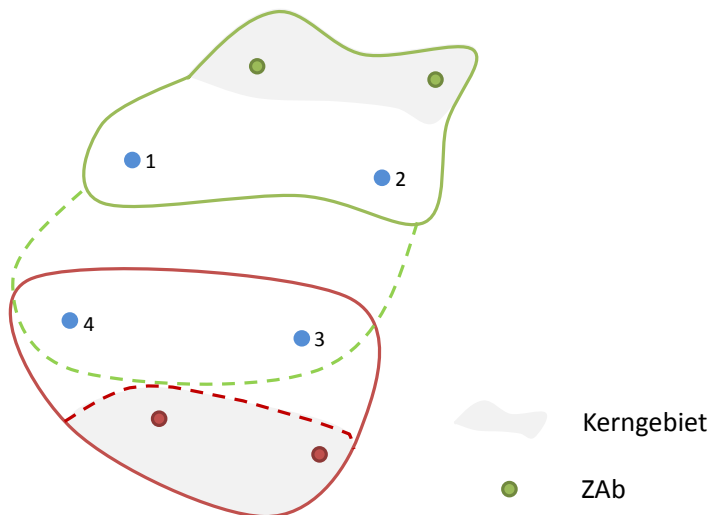


Abbildung 4 Flexibles Zuordnungsverfahren zu Bezirken

Abbildung 4 zeigt illustrativ die Funktionsweise des täglichen Zuordnungsverfahrens. Die grau hinterlegten Flächen deuten die Kerngebiete mit deren zugeordneten ZAb an. Die blau markierten ZAb 1, 2, 3 und 4 sind „frei“ und sind täglich situativ den Kerngebieten zu zuordnen. In einer Variante werden die Knoten 1 und 2 dem grünen Kerngebiet zugeordnet und Knoten 3 und 4 dem Roten. In der zweiten Variante werden die Knoten 1, 2, 3 und 4 dem grünen Gebiet zugeordnet. Die konkrete Anfahrreihenfolge wird hier vereinfachend weggelassen.

Die zeitnahe situative Bestimmung von optimalen Touren über Tourenplanungsprobleme ist aufgrund der NP-Schwere der Probleme mit einem zu großen Rechenaufwand verbunden. Der Fokus hier liegt folglich auf der heuristischen Lösung des Problems. Ergebnis der Heuristik ist die

Zuordnung der freien ZAb zu den Kerngebieten und die Anfahrreihenfolge innerhalb der Tour unter Beachtung von Kapazitäten, wie maximale tägliche Arbeitszeit, Sendungsmengen- und Reichweiteneinschränkungen der Fahrzeuge. Das implementierte Verfahren besteht aus einer Anfangsheuristik und einem Verbesserungsverfahren, welche in einer Metaheuristik, dem Simulated Annealing, eingebettet sind. Das Verbesserungsverfahren basiert auf einer Nachbarschaftssuche.

Anpassungen des Lösungsverfahrens für das Location-Routing Problem

Bei der klassischen Tourenplanung wird ein zentrales Depot angenommen, von dem die Zusteller in ihre Bezirke starten. In diesem Kapitel werden alternative Standorte in die Optimierung aufgenommen und eine Entscheidung darüber getroffen, welche Tour von welchem Depot versorgt wird. Die zusätzlichen Standorte können das Ergebnis der Bezirks- und Tourenplanung beeinflussen. Das Location-Routing-Problem vereint somit zwei Probleme unterschiedlicher Natur. Das Location-Problem der Ladesäulen hat einen strategischen/taktischen Charakter - die installierte Ladesäuleninfrastruktur ist kurzfristig nicht änderbar. Die Tourenplanung ist dagegen taktischer/operativer Natur und operiert mit tagesaktuellen Daten. Beide Probleme werden über Anpassungen des Lösungsverfahrens zu einem integrierten Problem vereint. Eine alleinige Betrachtung der Bezirks- und Tourenplanung ist weiterhin möglich. Hierbei können alternative Depots bei der Planung berücksichtigt werden.

2.5 Notfallplanung

In diesem Kapitel liegt der Fokus auf der Betrachtung von Störungen in der postalischen Zustellung. Ziel ist die Entwicklung einer Entscheidungshilfe, welche den Planer im Falle eines Notfalls bei der Suche nach einer geeigneten Maßnahme unterstützt. Bei der Entscheidungsfindung sollen dabei verschiedene Einflussfaktoren, wie die zur Verfügung stehende Kapazität, die Arbeitszeit, der Ladezustand, die Ladestrategie, die Witterung und das Profil der Strecke, berücksichtigt werden. Die hier vorgestellten Ansätze berücksichtigen Kapazitäten, Arbeitszeiten und Ladezustände, weil zu den weiteren Einflussfaktoren nicht alle notwendigen Informationen zur Planung vorhanden sind.

Für die Entscheidungsfindung wird zunächst ein allgemeines standardisiertes Vorgehen abgeleitet, welches für spezifische Notfälle konkretisiert wird. Die Entscheidungshilfe wird in Form von Entscheidungsbäumen visualisiert. Für die Maßnahme „Bezirk aufteilen“ wird ein Modell formuliert, bei der ein Bezirk bei Bedarf aufteilt wird und dessen Straßenabschnitte neu zugeordnet werden. Dabei wird die Gangfolge der bestehenden Bezirke weitgehend eingehalten. Das Modell wird in kommerzieller Optimierungssoftware implementiert und gelöst.

3 Ergebnisse des DPOR

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu den oben genannten Verfahren vorgestellt. Alle Modelle wurden dabei in der kommerziellen Optimierungssoftware AIMMS implementiert und alle beschriebenen weiteren Verfahren in C++ implementiert.

3.1 Ergebnisse Kerngebietsschneidung

Als Testinstanz dienen Daten eines Zustellgebiets in Deutschland. Dieses Zustellgebiet wird aktuell mit 13 statischen Touren bedient. Aus diesen Daten wurden vier Testinstanzen erzeugt (s. Tabelle 1). Zwei Instanzen (Groß-13KG und Groß-12KG) bilden dabei das gesamte Zustellgebiet ab. Sie unterscheiden sich in der Anzahl der Kerngebiete (13 sowie 12). Die mittlere Instanz ist eine Teilmenge von sechs aktuellen Touren (sechs Kerngebiete) und die kleine Instanz ist eine Teilmenge von drei aktuellen Touren (drei Kerngebiete).

Mit diesen vier Testinstanzen wurden verschiedene Testrechnungen mit durchschnittlichen Zeit- und Mengenannahmen durchgeführt. Die Rechnungen dienen zur Bewertung des Verfahrens der Kerngebietsbestimmung, zur Bewertung der täglichen Zuordnungsheuristik und zur Bewertung des kompletten flexiblen Ansatzes.

	Groß-13KG	Groß-12KG	Mittel-6KG	Klein-3KG
Knoten	733	733	346	167
Kanten	537306	537306	119726	27893
ZAb	1181	1181	542	270
Verbindungswege	536125	536125	119184	27623

Tabelle 1 Testinstanzen

Zunächst werden für die vier Testinstanzen die Kerngebiete bestimmt. Die Bestimmung erfolgt mit durchschnittlichen Mengen- und Zeitwerten. Daten, die noch benötigt werden, sind die Distanzen und Zeiten der Verbindungswege. Diese werden über ein Tool des Deutsche Post Lehrstuhls errechnet. Als Annahmen werden eine obere Schranke von 193 Paketen, eine Reichweite von 140 Kilometern (km) und eine Zustellzeit von 8 Stunden (h) angenommen. Diese Schranken ergeben sich als Durchschnittswerte über alle eingesetzten Fahrzeuge.

Um die Anker der Kerngebiete zu bestimmen, werden zunächst die Radien berechnet. Hierbei wird ein prozentualer Kerngebietsanteil von 60 % angenommen. Dies kann allerdings beliebig verändert werden. Bei der Bestimmung der Anker werden aus Gründen der Vereinfachung für die Testrechnungen zunächst nur die Radiusgrößen berücksichtigt und nicht die Schwankungen. Der maximale Abstand der Radien zueinander ist von dem zuvor gewählten prozentualen Kerngebietsanteil abhängig. In dem vollständigen Testgebiet sind ca. 0 m – 250 m zulässig. Für

die Testrechnungen wird der Abstand auf 150 m gesetzt. So wird verhindert, dass die Kerngebiete direkt beieinander liegen, aber auch nicht unbedingt komplett an den Rand gedrängt werden. 150 m sind bei den Instanzen der Teilgebiete nicht mehr zulässig, sodass dort 50 m angenommen werden. Im Anschluss an die Ankerbestimmung erfolgt die Bildung der Kerngebiete. Graphisch sind die Ergebnisse für die kleine Instanz Klein_3GK in Abbildung 5 dargestellt. Auf der linken Seite sind alle ZAb des Gebietes abgebildet und auf der rechten Seite die Kerngebiete. Die Anzahl der zuzuordnenden ZAb und die Anzahl der ZAb der Kerngebiete splitten sich wie in Tabelle 2 gezeigt auf.

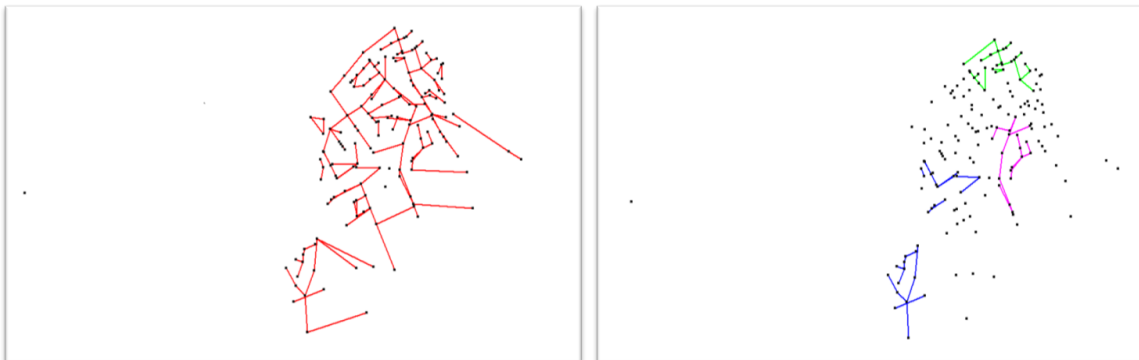


Abbildung 5 Zustellgebiet (links) und Kerngebiete (rechts) der Instanz Klein_3KG -

	Groß-13 KG	Groß-12 KG	Mittel-6 KG	Klein-3 KG
Knoten	733	733	346	167
Kanten	537306	537306	119726	27893
ZAb	1181	1181	542	270
Anzahl zuzuordnender ZAb	686	721	323	156
Anzahl ZAb KG	495	460	219	114
Verbindungswege	536125	536125	119184	27623

Tabelle 2 Testinstanzen nach Kerngebietsbestimmung

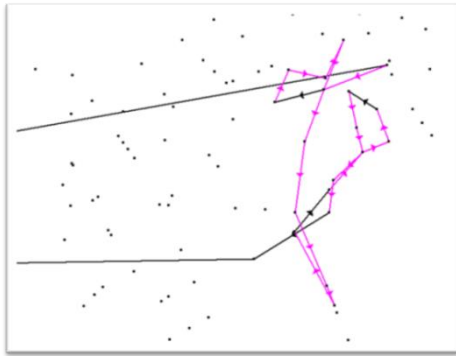


Abbildung 6 Gangfolge in einem Kerngebiet

Für jedes der Kerngebiete erfolgt anschließend noch die Gangfolgebestimmung. Die optimale Lösung für eines der Kerngebiete ist beispielhaft in Abbildung 6 dargestellt.

3.2 Ergebnisse flexible Bezirksschneidung

3.2.1 Verbundzustellung

Mit Hilfe der täglichen Zuordnungsheuristik werden die flexiblen ZAb den Kerngebieten zugeordnet, ohne die Gangfolge in den Kerngebieten zu verletzen. Für ein beispielhaftes Kerngebiet ist dies in Abbildung 7 dargestellt. Auf der linken Grafik ist die Gangfolgeplanung zu erkennen und auf der rechten Grafik die Zuordnung.

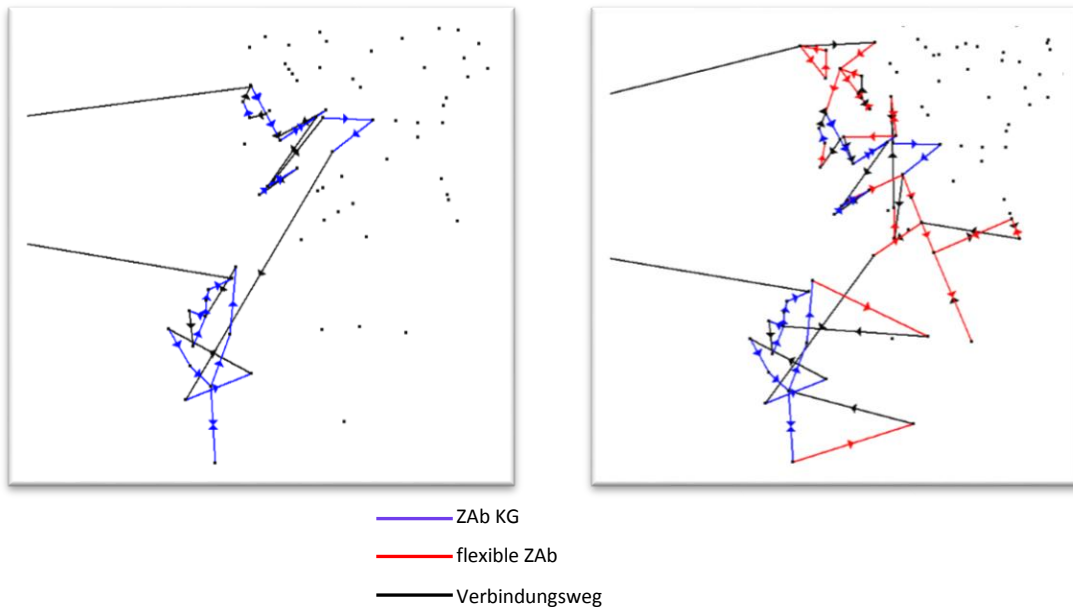


Abbildung 7 Beispiellösung - Zuordnung in Gangfolge

Zur Bewertung der Heuristik werden verschiedene Testrechnungen mit durchschnittlichen Zeit- und Mengenannahmen durchgeführt. Dabei wurden folgende allgemeinen Annahmen getroffen: Die oberen Schranken für die Zustellzeit liegt bei 8 h, die obere Schranke für die Paketmenge bei 193 Paketen und die obere Schranke für die Reichweite bei 140 km. Erfolgt in der Heuristik eine Erhöhung der Zustellzeit, so wird die verfügbare Zeit um 1 h erhöht. Generell gilt, dass bevor bei einem Fahrer die Zeit um 2 h erhöht wird, erst die Zeit aller anderen Fahrer um 1 h erhöht wird und versucht wird eine Lösung zu finden. Reichweite und Kapazität können nicht erhöht werden. Für die Bewertung wurde die benötigte Zustellzeit verwendet, da Analysen gezeigt haben, dass die Zeit den größten Engpassfaktor darstellt. Sind Erhöhungen notwendig, so ist die Heuristik so programmiert, dass sie Lösungen, in welchen weniger Zusteller eine Überstunde machen müssen, besser bewertet werden als Lösungen mit mehr Überstunden, auch wenn dies bedeutet, dass die Zustellzeit dadurch erhöht wird. Ist gewünscht Priorität auf die Zustellzeit zu legen, kann dies in der Bewertungsfunktion der Heuristik entsprechend geändert werden. Die Einstellungen innerhalb der Heuristik wurden für die ersten Rechnungen wie folgt gemacht: Die Lokale Suche bricht nach 100 vergebenen Versuchen ab, die Größe der Lösungsmenge wurde auf 10 gesetzt und die Heuristik bricht nach einer vorgegebenen Zeit ab. Diese Zeit ist abhängig von der Instanzgröße und liegt bei acht, vier und zwei Minuten. Die Zeit wird so kurz gewählt, da die Heuristik zum einen für eine zeitnahe kurzfristige Planung verwendet werden soll. Zum anderen werden nach (Belenguer, et al. 2006) gute Lösungen eher am Anfang der Berechnungen des Memetischen Algorithmus gefunden und es wird empfohlen eher mehrere kürzere Rechnungen durchzuführen. Für jede Instanz wurden mit den gegebenen Einstellungen 10 Testläufe gemacht.

Zur Bewertung der Heuristik wurde versucht mit dem aufgestellten Zuordnungsmodell eine optimale Lösung oder eine untere Schranke zu berechnen. Unter der Bedingung die Gangfolge nicht zu verletzen, wurde allerdings für keine Instanz in 24 h eine Lösung gefunden. Das Modell liefert nur Lösungen für kleinere nicht in der Praxis zu gebrauchende Instanzen. Erlaubt man dem Modell die Gangfolge zu ändern und nur die Zuordnung zu den Kerngebieten beizubehalten, so erhält man zumindest für die kleine Instanz eine optimale Lösung und somit eine untere Schranke.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse für die vier verschiedenen Instanzen dargestellt. Betrachtet man nur die verschiedenen Lösungen der Heuristik, so ist zu erkennen, dass es sich wie in (Belenguer, et al. 2006) beschrieben lohnt, die Heuristik öfters auszuführen. Die durchschnittliche Lösung stellt zwar eine kleine Verbesserung gegenüber der Eröffnungsheuristik da, betrachtet man diese im Vergleich zur besten gefundenen Lösung in den zehn Durchläufen, so erhält man zur vorher erzielten Verbesserung eine gute Steigerung. Allgemein fallen die Verbesserungen alle unter einem Prozent aus, was erst einmal sehr gering scheint. Vergleicht man allerdings für die Instanz Klein-3 KG die gefundene Lösung mit der errechneten unteren Schranke so sieht man, dass die durchschnittliche Lösung 1.97 % und die beste Lösung aus den Testläufen 1.65 % davon abweicht. Da bei der unteren Schranke die Gangfolge noch nicht eingehalten wird, kann man sagen, dass die Heuristik zumindest für die kleine Instanz gute, brauchbare Ergebnisse liefert.

Groß-13 KG	Groß-12 KG	Mittel-6 KG	Klein-3 KG
------------	------------	-------------	------------

	belegte Zeit (h pro Tag) Erhöhungen Verbesserung zur Eröffnungslösung (%)			
Optimale Lösung (Modell)	-	-	-	-
Untere Schranke	-	-	-	20.0284 0
Beste Eröffnungslösung	100.756 0	100.252 9	44.6336 0	20.5300 0
Durchschnittliche Lösung	100.753 0 0.36 %	100.310 7.7	44.5823 0 0.12 %	20.4236 0 0.52 %
Beste Lösung aus Testläufen	99.9077 0 0.55 %	99.7173 6	44.4713 0 0.36 %	20.3677 0 0.79 %

Gap: 1.97 %

Gap: 1.65 %

Tabelle 3 Vergleich der Lösungen der Heuristik

Weiter zeigen die Ergebnisse, dass die bisher verwendete Tourenanzahl auch für die Kerngebietsplanung eine gute Größe darstellt. Es gelingt nicht, das komplette Zustellgebiet mit 12 statt 13 Touren zu beliefern. Bei der Planung mit 12 Touren müssen bei der besten gefundenen Lösung immer noch sechs Zusteller zwischen acht und neun Stunden arbeiten und daher mehr als die geforderten maximalen acht Stunden.

Bei den zuvor durchgeführten Testrechnungen wurden feste Einstellungen innerhalb der Heuristik verwendet. Um zu analysieren, wie sich die Ergebnisse ändern, wenn man die Einstellungen verändert, wurden mit der Instanz Klein-3 KG verschiedene weitere Szenarien gerechnet. Das Abbruchkriterium der Lokale Suche wurde dabei auf 50 bzw. 150 vergebenen Versuche gesetzt und die Größe der Lösungsmenge von 10 auf 20 erhöht. Die Laufzeit wurde bei zwei Minuten belassen. Es entstehen so drei verschiedene Szenarien (50_10_2, 150_10_2, 100_20_2) die mit dem vorher verwendeten Einstellungen (100_20_2) verglichen werden können. Es wurden auch für diese Szenarien wieder zehn Testläufe durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse finden sich in den Tabelle 4 und Tabelle 5.

In Tabelle 4 werden die verschiedenen Szenarien im Vergleich zu der Eröffnungslösung und in Tabelle 5 im Vergleich zu der unteren Schranke dargestellt. Beide Vergleiche zeigen, dass sowohl eine Veränderung des Abbruchkriteriums der Lokalen Suche, als auch eine Veränderung der Größe der Lösungsmenge nicht zu einer großen Veränderung und vor allem nicht zu einer Verbesserung führen. Die folgenden Rechnungen zur Bewertung des flexiblen Verfahrens werden daher mit den zuvor verwendeten Einstellungen durchgeführt.

	50_10_2			100_10_2			150_10_2			100_20_2		
	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen	Gap (%)	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen	Gap (%)	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen	Gap (%)	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen	Gap (%)
Beste Eröffnungslösung	20.5300	0		20.5300	0		20.5300	0		20.5300	0	
Durchschnittliche Lösung	20.4646	0	0.32%	20.4236	0	0.52%	20.4491	0	0.39%	20.4554	0	0.36%
Beste Lösung	20.4074	0	0.60%	20.3678	0	0.79%	20.3919	0	0.67%	20.4177	0	0.55%

Tabelle 4 Vergleich der besten Eröffnungslösung mit der durchschnittlichen und der besten Lösung – Instanz: Klein-3KG

	50_10_2			100_10_2			150_10_2			100_20_2		
	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen	Gap (%)	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen	Gap (%)	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen	Gap (%)	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen	Gap (%)
Untere Schranke	20.0285	0		20.0285	0		20.0285	0		20.0285	0	
Durchschnittliche Lösung	20.4646	0	2.18%	20.4236	0	1.97%	20.4491	0	2.10%	20.4554	0	2.13%
Beste Lösung	20.4074	0	1.89%	20.3678	0	1.69%	20.3919	0	1.81%	20.4177	0	1.94%

Tabelle 5 Vergleich der unteren Schranke mit der durchschnittlichen und der besten Lösung – Instanz: Klein-3KG

Ergebnisse zur Bewertung des flexiblen Ansatzes in der Verbundzustellung

Das flexible Verfahren wird auf zweifache Weise untersucht und bewertet. Zum einen werden die aktuellen Touren mit den Touren des flexiblen Verfahrens auf unterschiedliche Weise verglichen und die Vor- und Nachteile der jeweiligen Ansätze heraus gearbeitet. Zum anderen wird geprüft wie das flexible Verfahren auf Störfälle wie z.B. einem nicht ausreichend geladenen Fahrzeug reagiert.

Um die flexibel geplanten Touren mit den aktuellen Touren vergleichen zu können, müssen diese mit identischen Zeitwerten bewertet werden. Das Ergebnis ist in Tabelle 6 dargestellt.

	Groß-13 KG		Mittel-6 KG		Klein-3 KG	
	belegte Zeit in h pro Tag	Gap zu aktuelle Touren (%)	belegte Zeit in h pro Tag	Gap zu aktuelle Touren (%)	belegte Zeit in h pro Tag	Gap zu aktuelle Touren (%)
Aktuelle Touren	96.9312		42.2095		19.9525	
Durchschnittliche Lösung	100.7538	3.94 %	44.5823	5.62 %	20.4236	2.36 %
Beste Lösung	99.9077	3.07 %	44.4713	5.36 %	20.3678	2.08 %

Tabelle 6 Vergleich der flexiblen Planung mit der aktuellen statischen Planung

Man sieht, wie zu erwarten, dass die statische Planung für alle drei Testinstanzen eine geringere Bearbeitungszeit benötigt. D.h. für den Fall, dass man davon ausgeht, dass die Paketmengen nur geringfügig um den Durchschnitt schwanken und keine Störfälle, wie z.B. ein nicht geladenes Fahrzeug auftreten, ist die statische Planung geeigneter. Wichtig bei dem Vergleich der Zeiten ist noch zu wissen, dass wenn man das Gebiet der großen Instanz mit den entsprechenden zur Planung verwendeten Werten bewertet, insgesamt vier von 13 Touren über den geforderten acht Stunden liegen. Der Zeitvergleich des großen Gebiets ist daher nur mit Vorsicht zu betrachten.

Nach dem reinen Kostenvergleich bei einer Planung mit Durchschnittswerten, soll im Folgenden untersucht werden wie sich die Touren bei Schwankungen verhalten, da bei der Paketzustellung, d.h. auch bei der Verbundzustellung, häufig Schwankungen auftreten. Betrachtet man die die gesamte Paketmenge des Testgebiets tritt eine tägliche Schwankung von etwa 19 % auf. Diese Prozentzahl erhöht sich noch, wenn man die Mengen auf kleiner aggregierter Ebene, wie z.B. Touren, betrachtet. Da Schwankungen unter den Durchschnitt keine Probleme darstellen, werden Paketmengensteigerungen über den Durchschnitt untersucht. Hierfür wurden mit der Instanz Groß-13 KG weitere vier Szenarien mit wieder jeweils zehn Testläufen gerechnet. Die vier Szenarien bestehen daraus, dass die durchschnittliche Sendungsmenge um 2.5 %, 5 %, 7.5 % und 10 % erhöht wird. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 7 zu sehen. Die Tabelle gibt die benötigte Zeit für die Zustellung, die Anzahl der Überstunden (Erhöhungen) und die Anzahl an Fahrern an, die mehr als eine Überstunde machen müssen (mehrfach).

	Durchschnittswerte		plus 2.5 %		plus 5 %		plus 7.5 %		plus 10 %	
	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen mehrfach	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen mehrfach	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen mehrfach	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen mehrfach	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen mehrfach
Aktuelle Touren	96.9312	5.0 1	99.1175	5.0 1	101.3578	5.0 1	103.5982	6.0 1	105.8385	11 4
Beste Eröffnungslösung	100.7566	0.0 0	103.1445	7.0 0	105.2793	7.0 0	107.2010	9.0 0	109.6696	9.0 0
Durchschnittliche Lösung	100.7539	0.0 0	102.7398	0.8 0	105.8462	5.6 0	107.9348	6.6 0	109.5798	8.0 0
Beste Lösung	99.90771	0.0 0	104	0.0 0	105.0020	3.0 0	106.9540	5.0 0	108.7723	8.0 0

Tabelle 7 Verhalten bei Schwankungen – 1

Ziel der Heuristik ist es, dass möglichst wenig Fahrer eine Überstunde machen müssen. Dieses Ziel wird im Vergleich zu den aktuell gefahrenen statischen Touren erreicht. In allen Szenarien müssen deutlich weniger Zusteller Überstunden machen und kein Zusteller muss mehr als eine Stunde länger arbeiten. Bei den aktuellen Touren ist zwar die benötigte Zustellzeit weniger, dafür wird sie aber auf wenige Zusteller verteilt und manche Zusteller müssen sogar mehrere Überstunden machen. Das Ziel mit der flexiblen Zustellung bei Paketmengenschwankungen eine „gerechtere“ Aufteilung zu erzielen wird demnach erreicht.

In einem nächsten Schritt werden noch Szenarien getestet, in welchen nicht die komplette Menge um einen bestimmten prozentualen Anteil erhöht wird, sondern nur Teile. Beispielhaft werden nur die ZAb der Kerngebiete um fünf sowie zehn Prozent erhöht. Das Ergebnis ist in Tabelle 8 zu finden. Das Ergebnis spiegelt das bei kompletten Steigerungen wieder. Es müssen weniger Zusteller Überstunden machen, wobei die gesamte Zustellzeit etwas erhöht ist im Vergleich zu den aktuellen statischen Touren. Bei der Erhöhung um 5 % kommt die Heuristik sogar ohne Überstunden aus.

	plus 10 % der KG-Menge		plus 5 % der KG-Menge	
	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen mehrfach	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen mehrfach
aktuelle Touren	100.7266	5.0 1	98.8185	5.0 1
Beste Eröffnungslösung	105.8890	7.0 0	102.1082	7.0 0
Durchschnittliche Lösung	103.4322	4.2 0	102.1613	0.6 0
Beste Lösung	102.66307	3.0 0	102.2820	0.0 0

Tabelle 8 Verhalten bei Schwankungen – 2

Abschließend wird untersucht, wie sich der flexible Ansatz bei Störfällen verhält. Während bei Störfällen und einer statischen Planung gleich ein Notfallkonzept greift, kann der flexible Ansatz idealerweise auf Störfälle reagieren. Als Störfälle können z.B. nicht ausreichend geladene Fahrzeuge oder ein Fahrzeugausfall zählen. Zur Untersuchung wurden zwei Szenarien gerechnet, in welchem jeweils einem KG keine weiteren ZAb zugeteilt werden durften, weil z.B. das Fahrzeug nicht vollständig geladen ist. In einem dritten Szenario dürfen zwei KG nichts mehr zugeordnet bekommen. Dieser Fall ähnelt z.B. einem Fahrzeugausfall. Auch diese Szenarien wurden alle mit der Instanz Groß-13 KG gerechnet. Die Ergebnisse der Testdurchläufe sind in Tabelle 9 dargestellt.

Die gemachten Rechnungen zeigen, dass solch kleinere Störfälle mit dem flexiblen Verfahren gut abgefangen werden können, indem einzelne Zusteller Überstunden machen. Bei jeweils einem nicht ausreichend geladenen Kerngebiet (ersten zwei Spalten) müssen jeweils drei Zusteller etwas mehr als acht Stunden arbeiten. Die komplette Zustellzeit aller Zusteller liegt dabei jeweils nur ganz knapp über dem Durchschnittswert von acht Stunden pro Tour pro Tag. Bei dem dritten Szenario, welches zwei nicht ausreichend geladene Fahrzeuge oder einen Fahrzeugausfall simulieren soll, müssen mehr

Überstunden gemacht werden (insgesamt 8), allerdings nicht mehr als eine pro Fahrer. Der Mehraufwand wird also auf mehrere Zusteller verteilt.

	Kerngebiet A nicht genug geladen		Kerngebiet B nicht genug geladen		Kerngebiete A&B nicht genug geladen	
	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen	belegte Zeit h pro Tag	Erhöhungen
Beste						
Eröffnungslösung	105.3368	7.0	105.4803	7.0	110.8382	7.0
Durchschnitt	105.2076	3.8	105.2395	4.3	106.4261	10.0
Beste Lösung	104.5352	3.0	104.9117	3.0	109.8976	8.0

Tabelle 9 Verhalten bei Störungen

3.2.2 Paketzustellung

In diesem Kapitel werden Rechenergebnisse zum entwickelten Lösungsverfahren vorgestellt. Die Berechnungen wurden auf einen PC mit zwei 3,1 GHz Intel® Xeon® Prozessoren und 128 MB Arbeitsspeicher durchgeführt. Als Inputdaten werden exemplarisch die knotenbasierten Daten eines Versorgungsgebiets eines Zustellstützpunktes herangezogen. Hierbei liegen Informationen zum Fuhrpark vor. Aus diesen Daten werden die Kapazitätsbeschränkungen für Bezirke abgeleitet. Als Restriktionen werden Reichweiten- und Volumenbeschränkungen der Elektrofahrzeuge aufgenommen. Die täglich maximale Arbeitszeit wird als Attribut der Fahrzeuge modelliert und wird über eine Restriktion berücksichtigt. Für jeden ZAb liegt der individuelle Ressourcenverbrauch vor. Beispielsweise liegt die Zeit t_i vor, die es für die Bedienung des ZAb i bedarf.

Analysen zeigen, dass die Grundarbeitszeit der beschränkende Faktor in der Case Study ist. Im Verfahren werden dennoch die nicht-beschränkenden Faktoren aufgenommen, weil das Verfahren allgemeingültig und auf weitere Datensätze anwendbar sein soll. Ziel ist es außerdem das Verfahren für betriebliche Störfälle, wie beispielsweise eine nicht ausreichend geladene Batterie, anzuwenden. Die Kerngebiete werden über das Verfahren aus Kapitel 2.4.1 berechnet und dienen als Input für dieses Lösungsverfahren. Im Folgenden werden Ergebnisse für unterschiedliche Testrechnungen vorgestellt, die sich in der Anzahl Kerngebiete unterscheiden: Es werden 11, 12 und 13 Kerngebiete simuliert.

Die Annahme von Kerngebieten schränkt den Lösungsraum der Tourenplanung ein, weil die Kerngebieten-ZAbs nicht verschoben werden dürfen. Sind alle ZAbs flexibel und können beliebigen Bezirken an beliebigen Positionen zugeordnet werden, so liegt ein allgemeines kapazitiertes Vehicle Routing Problem (CVRP) vor. Die Lösung des CVRP ist eine untere Schranke für das CVRP mit Kerngebieten (CVRPKG) – die Lösung des CVRP ist idealerweise besser als die Lösung des CVRPKG.

Um die Güte der Lösung des VRPKG zu bewerten, wird diese mit der Lösung des CVRP verglichen³. Als zweites Maß dient uns die prozentuale Verbesserung der Anfangslösung. Letztere spielt insbesondere dann eine Rolle, falls keine Referenzwerte vorliegen. Der Vorteil der Anfangslösung ist, dass der Wert dieser Lösung beim Verfahren ohne Zusatzaufwand erzeugt werden kann. Es werden jeweils zehn Durchläufe mit unterschiedlichen Zufallszahlen für 11, 12 und 13 vorhandenen Fahrzeugen bzw. Kerngebiete durchgeführt. Für diese Instanzen werden jeweils Berechnungen mit (CVRPKG) und ohne Kerngebieten (CVRP) durchgeführt.

<i>Typ</i>	<i>KG</i>	<i>Saving [%]</i>	<i>Zfw_CVRPKG:CVRP [%]</i>	<i>Zfw_(KG-1):KG [%]</i>
CVRP	11	-11.8	4.7	-0.8
	12	-12.5	5.9	-0.4
	13	-12.2	6.2	
CVRPKG	11	-31.7		-2.0
	12	-33.5		-0.6
	13	-34.0		

Tabelle 10 Prozentuale Verbesserung der Anfangslösung und Sensitivitätsanalyse des Zielfunktionswertes

Bevor wir auf eine Parameteranalyse eingehen, betrachten wir zunächst die Leistungsfähigkeit des Simulated Annealing. Tabelle 10 gibt uns Auskunft über die prozentuale Verbesserung der Anfangslösung⁴. In Spalte „Typ“ wird angegeben, ob wir ein CVRP ohne Kerngebiete betrachten, oder die flexible Bezirksplanung mit Kerngebieten (CVRPKG). Spalte „KG“ gibt die Anzahl der Kerngebiete bzw. die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge an. Spalte „Saving“ erfasst die prozentuale Veränderung der Anfangslösung. Negative Werte bedeuten, dass die Anfangslösung verbessert wird. Die Anfangslösung ohne Annahme von Kerngebieten (CVRP) wird im Schnitt um 12,1 % verbessert. Die mit Kerngebieten (CVRPKG) durchschnittlich um 33 %. Diese Aussage deutet darauf hin, dass die Anfangslösungen mit Kerngebieten schlechter sind als ohne Kerngebiete. In Spalte „Zfw_CVRPKG:CVRP“ werden die Werte der Lösungen mit Kerngebieten, denen ohne Kerngebiete verglichen. Ein positiver Wert bedeutet, dass die Lösung des CVRPKG einen höheren Wert als die korrespondierende Lösung des CVRP aufweist. Im Schnitt sind die Lösungswerte von CVRPKG um 5,6 % höher als die des CVRP. Dieses Ergebnis ist zu erwarten, weil die Zuordnung des CVRP vollständig flexibel ist, wohingegen beim CVRPKG die Zuordnung der Kerngebieten-ZAb vorgegeben und einzuhalten ist. Die letzte Spalte „Zfw_(KG-1):KG“ vergleicht partiell noch die Lösungen der Probleme unterschiedlicher Kerngebieten-Anzahl miteinander. In den Zeilen mit KG-Spalten-Wert 11 werden die

³ Weil Heuristiken keine exakten Verfahren sind und der Simulated Annealing zudem abhängig von Zufallszahlen ist, kann es unter Umständen vorkommen, dass die Lösung des CVRPKG besser ist als die Lösung des CVRP.

⁴ Der Lösungswert setzt sich aus den Verbindungswegen zusammen, weil diese als Entscheidungsrelevant angenommen werden. Zeiten für die Zustellung des Produktes werden vom Weg unabhängig angenommen und fallen stets bei der Zustellung an. Diese Zeiten spielen bei der Einhaltung der maximalen Arbeitszeit eine Rolle und werden in der Restriktion berücksichtigt.

Lösungen der Probleme mit 11 geplanten Fahrzeugen, denen mit 12 geplanten Fahrzeugen gegenübergestellt. In Zeilen mit KG-Spalten-Wert 12 die Lösungen der Probleme mit 12 geplanten Fahrzeugen, denen mit 13 Fahrzeugen. Wie erwartet, werden in Problemen mit weniger geplanten Fahrzeugen weniger Verbindungsstrecken zurückgelegt. Man spart sich Hin- und Rückwege der Fahrzeuge zum Depot.

Parameteranalyse

Der Simulated Annealing wird über einen Abkühlplan gesteuert. Der Abkühlplan besteht aus Komponenten: Anfangstemperatur T_0 , Abkühlfaktor λ , Schritte bei konstanter Temperatur, Abbruchkriterien und einer Reheat-Option. Eine gute Wahl des Abkühlplan ist der Schlüssel für die Leistungsfähigkeit des Simulated Annealing. In ersten Rechentests werden verschiedene Parameter für die Faktoren: Anfangstemperatur, Abkühlfaktor und Schritte bei konstanter Temperatur getestet. Der Algorithmus wird beendet, wenn eine Akzeptanzrate zulässiger Lösungen von 0,1% unterschritten wird bzw. eine vergebene Anzahl Temperaturschritte ($1/3 \cdot |N|$) durchlaufen wurde. Alle Basiswerte werden so gewählt, dass ein ausgewogenes Verhältnis der Lösungsqualität und Rechenzeit erzielt wird. Ziel ist es Parametereinstellungen zu finden, die über alle unterschiedlichen Recheninstanzen leistungsfähig sind.

Folgende Parameterwerte werden für die weiteren Faktoren getestet

- Anfangstemperatur: Um den Faktor 1, 2 oder 3 erhöhte Standardabweichung in den Kosten zulässiger Nachbarlösungen der Anfangslösung
- Abkühlfaktor: $\lambda \in \{0,8; 0,9; 0,99\}$
- Schritte bei konstanter Temperatur: Entweder 0,5-, 1-, 2-fache vom Basiswert $100 \cdot |N|$ untersuchter zulässiger Lösungen oder 0,5-, 1-, 2-fache vom Basiswert $10 \cdot |N|$ durchgeführter Austauschschritte.

Analysen der Rechenergebnisse zeigen, dass bessere Ergebnisse mit einer niedrigen Anfangstemperatur gewonnen werden. Der Grund liegt im langsamen Abkühlverlauf. Bei einer hohen Anfangstemperatur wird das Verfahren durch die Anzahl Temperaturschritte beendet. Bei Abbruch des Verfahrens liegen dann vergleichsweise noch relativ hohe Lösungswerte vor. Gleiche Beobachtung wird für einen langsamen Abkühlschema mit $\lambda = 0,99$ beobachtet. Mit einem mittlerem Abkühlfaktor von $\lambda = 0,9$ können bei sonst gleichen Einstellungen im Schnitt bessere Ergebnisse erzielt werden, als mit einem schnelleren Abkühlschema, welches einen Faktor $\lambda = 0,8$ verwendet.

Eine Analyse der Kriterien der Schritte bei konstanter Temperatur zeigen, dass die Anzahl durchgeführter Austauschschritte keine Signifikanz haben. Eine höhere Anzahl (2-facher Basiswert) untersuchter zulässiger Lösungen bei konstanter Temperatur erweist sich als vorteilhaft. Eine weitere Erhöhung in zusätzlichen Rechentests zeigte keine Verbesserung bzw. wirkt sich negativ aus, weil ein solcher Abkühlverlauf wiederum zu langsam wird und die zeitliche Begrenzung des Verfahrens ausschlaggebend für die Lösungsqualität wird. Aufgrund dieser Analysen wird die Anfangstemperatur auf eine Standardabweichung fixiert. Die Anzahl durchgeführter Austauschschritte je Temperaturschritt wird auf den Basiswert terminiert.

Einfluss eines Reheat

Mit zunehmend geringeren Temperaturen ähnelt der Simulated Annealing einer lokalen Suche, weil nur noch verbessernde Lösungen akzeptiert werden. Um ein Verharren in lokalen Optima bei extrem niedrigen Temperaturen zu überwinden, wird eine Reheat-Option implementiert und getestet.

Ein Reheat r findet statt, wenn in zwei Temperaturschritten keine verbessernde Lösung gefunden wird. Die Temperatur T_j nach Temperaturschritt j wird erhöht auf die Reheat-Temperatur T_r . Diese berechnet sich aus dem Maximum der vorigen halben Reheat-Temperatur T_{r-1} und der Temperatur T_{best} , bei der die beste Lösung bis dato gefunden wurde:

$$T_r = \max\left\{\frac{1}{2}T_{r-1}, T_{best}\right\}$$

Das Verfahren wird beendet, wenn zwei Reheats stattgefunden haben und ein dritter Reheat stattfinden würde, oder nach 10 Minuten Rechenzeit.

Die Reheat-Option wird den Berechnungen ohne Reheat gegenübergestellt. Das Verfahren ohne Reheat endet dann, wenn die Akzeptanz zulässiger Lösungen 0,1% unterschreitet, oder 10 Minuten Rechenzeit erreicht sind.

Die Analyse der Rechenergebnisse zeigt, dass ein geringfügiger Unterschied in den Lösungswerten mit Reheat besteht. Datensätze mit Reheat weisen tendenziell schlechtere Lösungswerte auf. Die Durchläufe werden mit Reheat schneller beendet: das Kriterium maximale Anzahl Reheats greift schneller als das Akzeptanzkriterium ohne Reheat. Der Abkühlfaktor $\lambda = 0,9$ wirkt sich positiv auf die Lösungswerte aus, ebenso wie die Evaluation vieler Austauschschritte bei konstanter Temperatur.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Einstellparameter $\lambda = 0,9$, kein Reheat, $2 \cdot 100 \cdot |N|$ untersuchter zulässiger Lösungen bei konstanter Temperatur über alle Szenarien am robustesten sind. Diese Parameterausprägungen werden im Folgenden für eine Analyse der Lösungen gewählt. Im Folgenden betrachten wir die Ergebnisse auf Touren-Ebene. In die Auswertungen gehen 10 Durchläufe mit der genannten Simulated Annealing Einstellung ein.

Analyse der Lösungen für die flexible Bezirksplanung mit Kerngebieten

Das Lösungsverfahren wird mit einer zulässigen Lösung initiiert. Falls mit den gegebenen Kapazitäten keine zulässige Lösung erzeugt werden kann, können die Kapazitäten der Bezirke zur Generierung einer zulässigen Anfangslösung erhöht werden. Über einen Steuerungswert wird für jeden Bezirk einzeln eingestellt, ob die Kapazitäten erweitert werden dürfen. In den Testrechnungen wird die Option der Kapazitätserhöhung für alle Bezirke aktiviert. Im Verlauf des Verfahrens werden die zu Beginn angepassten Kapazitäten nicht wieder angepasst.

Bevor wir auf eine Analyse auf Tourenebene eingehen, betrachten wir die Lösungen auf Versorgungsgebiete-Ebene. Dazu analysieren wir die Gesamtarbeitszeit und die gesamten geleisteten Überstunden an.

<i>Typ</i>	<i>KG</i>	<i>Avg(GrAZ) [h] (ZSP)</i>	<i>Avg(Überstunden) [h] (ZSP)</i>	<i>Avg(Überstunden) [h] (Tour)</i>	<i>max(Überstunden) [h](Tour)</i>
CVRP	11	91.35	3.84	0.35	0.48
	12	91.42	-	-	-
	13	91.44	-	-	-
CVRPKG	11	91.77	5.92	0.54	0.99
	12	92.02	1.62	0.14	0.48
	13	92.09	-	-	-

Tabelle 11 Kennzahlen auf Versorgungsgebietsebene (GrAZ)

Tabelle 11 gibt für die flexible Planung ohne Kerngebiete (CVRP) und mit Kerngebieten (CVRPKG) die durchschnittliche Grundarbeitszeit des Versorgungsgebietes (ZSP) (Spalte „GrAZ (ZSP)“) an, sowie die Summe der zu leistenden Überstunden (Spalte „Überstunden (ZSP)“). Auf Tour-Ebene werden die durchschnittlichen Überstunden (Spalte „Avg(Überstunden) (Tour)“) und die maximale Überstundenzahl (Spalte „max(Überstunden) (Tour)“) angegeben, die ein Zusteller absolviert. Wie zu erwarten sind die Grundarbeitszeiten für Schneidungen mit einer geringeren Anzahl Fahrzeuge niedriger. Auch ersichtlich ist, dass die Planung mit Kerngebieten (CVRPKG) im Schnitt eine höhere Grundarbeitszeit aufweist als die Planung ohne Kerngebiete (CVRP). Mit Kerngebieten sind folglich mehr Überstunden zu leisten.

Im Folgenden betrachten wir illustrativ die durchschnittliche Auslastung der einzelnen Kerngebiete für die drei Szenarien mit 11, 12 und 13 Kerngebieten. Reichweite und Pakete werden nicht analysiert, weil der beschränkende Faktor die zur Verfügung stehende Personalzeit ist. Um dennoch einen Eindruck zu gewinnen, gibt Tabelle 12 aggregiert die durchschnittliche Meter-Leistung eines Bezirks (Spalte „Avg(Meter)“) an. Spalte „Max(Meter)“ gibt die maximale Kapazität der Bezirke an. Durch die Eröffnungsheuristik tauchen hier unterschiedliche Werte auf, weil alle Kapazitäten zur Generierung einer zulässigen Lösung erhöht werden. Spalten 5 („Avg(Pakete)“) und 6 („Max(Pakete)“) geben entsprechend Auskunft über die Anzahl Pakete.

<i>Typ</i>	<i>KG</i>	<i>Avg(Meter)</i>	<i>Max(Meter)</i>	<i>Avg(Pakete)</i>	<i>Max(Pakete)</i>
CVRP	11	21108	148400	59	201
	12	19855	140000	54	190
	13	18321	140000	50	190
CVRPKG	11	21916	157304	59	213
	12	20673	148400	54	201
	13	19368	140000	50	190

Tabelle 12 Durchschnittliche Meter-Leistung und Anzahl Pakete je Tour

In Tabelle 13, Tabelle 14 und Tabelle 15 werden die Ergebnisse auf einzelne Touren aufgeschlüsselt analysiert. In Spalte „KG“ wird die zu planende Anzahl Bezirke angezeigt. Die Tour-Nummer wird in Spalte 2 „TNr“ aufgeführt. Spalten 3 bis 5 zeigen die durchschnittliche Arbeitsbelastung der Touren (Spalte „Avg(GrAZ)“) und die durchschnittlich geleisteten Überstunden (Spalte „Avg(Überstunden)“) für das CVRPKG an. Die Ergebnisse für das CVRVP folgen in den Spalten 6 bis 8.

Tabelle 13 gibt die Werte für die Planung von 11 Kerngebieten im CVRPKG bzw. Touren im CVRVP an. Die ursprünglich maximale Arbeitszeit von 8 Stunden ist in beiden Problemtypen ist zu knapp bemessen und Überstunden sind die Regel sowohl für die flexible Planung mit Kerngebieten wie auch ohne Angabe von Kerngebieten.

KG	TN r	Typ	Avg(GrAZ) [h]	Avg(Überstunden) [h]	Typ	Avg(GrAZ) [h]	Avg(Überstunden) [h]
11	0	CVRPKG	7.08	0.04	CVRP	8.22	0.32
	1	CVRPKG	8.62	0.62	CVRP	8.32	0.38
	2	CVRPKG	8.19	0.36	CVRP	8.37	0.37
	3	CVRPKG	8.19	0.60	CVRP	8.29	0.37
	4	CVRPKG	8.80	0.80	CVRP	8.37	0.37
	5	CVRPKG	8.60	0.60	CVRP	8.23	0.36
	6	CVRPKG	8.78	0.78	CVRP	8.40	0.40
	7	CVRPKG	8.53	0.59	CVRP	8.29	0.31
	8	CVRPKG	8.66	0.66	CVRP	8.36	0.36
	9	CVRPKG	8.56	0.57	CVRP	8.32	0.32
	10	CVRPKG	7.78	0.30	CVRP	8.18	0.28

Tabelle 13 Bezirksübersicht – GrAZ für 11 KG (ohne Reheat)

KG	TN r	Typ	Avg(GrAZ) [h]	Avg(Überstunden) [h]	Typ	Avg(GrAZ) [h]	Avg(Überstunden) [h]
12	0	CVRPKG	6.96	0.01	CVRP	7.65	0
	1	CVRPKG	8.02	0.15	CVRP	7.71	0
	2	CVRPKG	7.18	0.00	CVRP	7.76	0
	3	CVRPKG	6.91	0.11	CVRP	7.33	0
	4	CVRPKG	7.92	0.12	CVRP	7.24	0
	5	CVRPKG	7.30	0.02	CVRP	7.78	0
	6	CVRPKG	7.88	0.16	CVRP	7.34	0
	7	CVRPKG	8.37	0.38	CVRP	7.71	0
	8	CVRPKG	7.81	0.05	CVRP	7.67	0

	9	CVRPKG	7.39	0.10	CVRP	7.53	0
	10	CVRPKG	8.24	0.30	CVRP	7.86	0
	11	CVRPKG	8.04	0.24	CVRP	7.84	0

Tabelle 14 Bezirksübersicht – GrAZ für 12 KG (ohne Reheat)

In Tabelle 14 werden die Arbeitszeiten der Planung von 12 Touren angegeben. Weil zu Beginn höherer Arbeitszeiten bei der Planung mit 12 Kerngebieten im CVRPKG erlaubt werden, leisten einige Bezirke Überstunden. Das CVRP kommt ohne Überstunden aus.

Tabelle 15 bereitet die Ergebnisse für die Planung von 13 Touren auf. Alle Touren können den Arbeitsaufwand in der ursprünglich vorgegebenen Zeit von 8 Stunden absolvieren. Es sind keine Überstunden im CVRPKG und CVRP zu erwarten. Die Analyse der Touren zeigt, dass die Lösungen des CVRP mit 13 geplanten Touren stets eine Tour schließen und somit 12 Touren geplant werden. Beim CVRPKG zeigt sich, dass Tour-Nummern 3 und 4 meistens weniger stark ausgelastet werden als die Anderen.

KG	TNr	Typ	Avg(GrAZ) [h]	Avg(Überstunden)) [h]	Typ	Avg(GrAZ) [h]	Avg(Überstunden)) [h]
13	0	CVRPKG	6.99	0	CVRP	7.56	0
	1	CVRPKG	6.78	0	CVRP	7.54	0
	2	CVRPKG	7.84	0	CVRP	7.55	0
	3	CVRPKG	5.60	0	CVRP	7.41	0
	4	CVRPKG	5.25	0	CVRP	7.76	0
	5	CVRPKG	7.47	0	CVRP	7.62	0
	6	CVRPKG	6.91	0	CVRP	7.78	0
	7	CVRPKG	7.53	0	CVRP	7.40	0
	8	CVRPKG	7.80	0	CVRP	7.50	0
	9	CVRPKG	7.74	0	CVRP	7.80	0
	10	CVRPKG	7.20	0	CVRP	7.79	0
	11	CVRPKG	7.61	0	CVRP	7.72	0
	12	CVRPKG	7.36	0	CVRP	0.00	0

Tabelle 15 Bezirksübersicht – GrAZ für 13 KG (ohne Reheat)

Die Analyse der Wochenarbeitszeiten des CVRPKG mit 12 Kerngebieten in Tabelle 14 zeigt, dass einzelne Bezirke gering ausgelastet sind. Dafür absolvieren andere Bezirke Überstunden. Dies ist möglich, weil in den Testrechnungen angenommen wird, dass alle Bezirke ihre Kapazitäten zur Generierung einer zulässigen Lösung simultan erhöhen und diese Kapazitäten nicht wieder

runtergeschraubt werden.⁵ Bei einer Planung mit 8 Stunden und 12 Bezirken stehen insgesamt 96 Stunden zur Verfügung. Im Schnitt werden im CVRPKG mit 12 Kerngebieten 91 Stunden eingeplant. Insgesamt sollte in diesen Szenarien daher genügend Arbeitszeit zur Verfügung stehen, um alle Bezirke Überstunden-frei zu planen. Ziel ist es nun, durch Aufnahme von Strafkosten, zu bewirken, dass die Bezirke die 8 Stunden Arbeitszeit einhalten, obwohl ihnen zu Beginn des Algorithmus mehr Kapazität zugewiesen wird. Dazu wird ein Strafkostenstundensatz eingeführt. Im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse der Planung mit einem Strafkostenfaktor vorgestellt.

Einfluss von Strafkosten - Parameteranalyse

Eine Analyse der Touren des CVRPKG mit 12 Kerngebieten ergibt, dass die Bezirke unterschiedlich stark ausgelastet sind und dass die in Summe bereitgestellten Kapazitäten ausreichen könnten, um Bezirke ohne Überstunden einzurichten. Es existieren Bezirke, die nur zu 50 % ausgelastet sind. Andererseits existieren Bezirke, die Überstunden aufweisen. Die Idee ist nun über Strafkosten auf Überstunden dem System einen Anreiz zu geben, Überstunden abzubauen. In den gerechneten Szenarien werden für alle Bezirke zusätzliche Kapazitäten zur Verfügung gestellt. Werden die ursprünglichen Kapazitäten der Zustellzeit überschritten, werden Strafkosten in Höhe von 50 Euro je Stunde eingeführt. Im Folgenden erläutern wir die Ergebnisse der Rechentest mit einem Strafkostenfaktor. Wir beginnen mit den Ergebnissen einer Sensitivitätsanalyse.

Eine Analyse der Parameter des Simulated Annealing zeigt, dass der Temperaturfaktor von 0.9 einen positiven Einfluss auf die Entwicklung des Zielfunktionswertes hat. Wenige Schritte bei konstanter Temperatur (0.5*Basiswert) wirken sich negativ auf die Lösungsqualität aus. Ein Reheat erweist sich bei 11 und 12 Kerngebieten als positive Option. Bei 13 Kerngebieten ist kein Vorteil festzustellen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen ohne Strafkostenfaktor. Bei der Planung mit 13 Kerngebieten können alle Bezirke von Beginn an ohne Überstunden geplant werden. Damit hat der Strafkostenkostenfaktor keinen Einfluss auf die Berechnungen. Sofern Strafkosten in der Lösung keine Rolle spielen, hat der Reheat tendenziell einen negativen Einfluss.

Im nächsten Abschnitt betrachten wir, in wie weit die Überstunden in den Kerngebieten reduziert werden, wenn Strafkosten in die Kostenmodellierung aufgenommen werden.

Analyse der Lösungen für die flexible Bezirksplanung mit Kerngebieten

In diesem Abschnitt wollen wir die Effektivität der Strafkosten untersuchen. Im Fokus steht die Planung mit 12 Kerngebieten. Interessant ist auch ein Vergleich der Lösungen mit 11 Kerngebieten hinsichtlich der Fragestellung, ob die Überstunden reduziert werden können. Weil der Reheat einen positiven Einfluss auf die Planung mit Kerngebieten hat, betrachten wir im Folgenden Ergebnisse, die die Reheat-Option nutzen. Die weiteren Einstellparameter sind wie bisher $\lambda = 0,9$ und $2 \cdot 100 \cdot |N|$ untersuchter zulässigen Lösungen bei konstanter Temperatur. Tabelle 16 zeigt, dass die Strafkosten den gewünschten Effekt aufweisen. In keinem Bezirk mit Kerngebiet sind Überstunden geplant.

⁵ Es besteht die Option beispielsweise nur einem Bezirk zu erlauben, die Kapazitäten zu erhöhen. Damit wird die Anzahl der Bezirke, die Überstunden absolvieren können, beschränkt. Allerdings wird die Kapazität des einen Bezirks stark erhöht, so dass unter Umständen eine Tour entsteht, die sehr viele Überstunden zu leisten hat.

Weil die in Summe zur Verfügung stehenden Kapazitäten für die Planung von 11 Touren zu knapp sind, können die Überstunden nicht verhindert, jedoch reduziert werden. Tabelle 17 schlüsselt die durchschnittliche Arbeitszeiten und Überstunden für die Touren auf.

KG	TNr	Typ	Avg(GrAZ) [h]	Avg(Überstunden) [h]	Typ	Avg(GrAZ) [h]	Avg(Überstunden) [h]
12	0	CVRPKG	7.73	0	CVRP	7.41	0
	1	CVRPKG	7.83	0	CVRP	7.29	0
	2	CVRPKG	7.45	0	CVRP	7.60	0
	3	CVRPKG	7.88	0	CVRP	7.64	0
	4	CVRPKG	7.68	0	CVRP	7.77	0
	5	CVRPKG	7.47	0	CVRP	7.85	0
	6	CVRPKG	7.47	0	CVRP	7.75	0
	7	CVRPKG	7.87	0	CVRP	7.84	0
	8	CVRPKG	7.75	0	CVRP	7.53	0
	9	CVRPKG	7.39	0	CVRP	7.87	0
	10	CVRPKG	7.85	0	CVRP	7.52	0
11	CVRPKG	7.75	0	CVRP	7.41	0	

Tabelle 16 Bezirksübersicht – GrAZ für 12 KG (mit Strafkosten und Reheat)

KG	TNr	Typ	Avg(GrAZ) [h]	Avg(Überstunden) [h]	Typ	Avg(GrAZ) [h]	Avg(Überstunden) [h]
11	0	CVRPKG	8.21	0.21	CVRP	8.17	0.17
	1	CVRPKG	8.60	0.60	CVRP	8.23	0.23
	2	CVRPKG	8.14	0.14	CVRP	8.16	0.16
	3	CVRPKG	8.40	0.40	CVRP	8.20	0.20
	4	CVRPKG	8.38	0.38	CVRP	8.29	0.29
	5	CVRPKG	8.24	0.24	CVRP	8.40	0.40
	6	CVRPKG	8.65	0.65	CVRP	8.39	0.39
	7	CVRPKG	8.23	0.23	CVRP	8.41	0.41
	8	CVRPKG	8.35	0.35	CVRP	8.31	0.31
	9	CVRPKG	8.26	0.26	CVRP	8.44	0.44
	10	CVRPKG	8.30	0.30	CVRP	8.40	0.40

Tabelle 17 Bezirksübersicht – GrAZ für 11 KG (mit Strafkosten und Reheat)

Typ	KG	Avg(GrAZ) [h] (ZSP)	Avg(Überstunden) [h] (ZSP)	Avg(Überstunden) [h] (Tour)	max(Überstunden) [h](Tour)
CVRP	11	91.39	3.39	0.31	0.48
	12	91.48	0.00	0.00	0.00
	13	91.56	0.00	0.00	0.00
CVRPKG	11	91.77	3.77	0.34	0.98
	12	92.13	0.00	0.00	0.00
	13	92.10	0.00	0.00	0.00

Tabelle 18 Kennzahlen auf Versorgungsgebietsebene (GrAZ) mit Strafkosten und Reheat

Tabelle 18 fasst die Ergebnisse auf Versorgungsebene zusammen. Ein Vergleich mit Tabelle 11 zeigt, dass die durchschnittlichen Überstunden deutlich reduziert werden. Mit 11 Kerngebieten betragen die Überstunden ohne Strafkosten im Schnitt 5,92 Stunden. Mit Strafkosten können die Überstunden auf durchschnittlich 3,77 Stunden reduziert werden, wobei der durchschnittliche gesamtgeleistete Arbeitsaufwand (Spalte 3) nicht steigt. Bei der Planung mit 12 Bezirken entfallen die Überstunden nun komplett. Im Schnitt steigt der Arbeitsaufwand geringfügig. Vergleichen wir die Ergebnisse des Problems CVRP, so zeigt sich, dass auch hier die Überstunden leicht gesenkt werden können. Auch erkennbar ist, dass die Option mit Reheat leicht schlechtere Lösungen mit einer höheren GrAZ erzeugt. Dieses Ergebnis bestätigt die Erkenntnisse der Sensitivitätsanalyse.

Die Evaluation der Ergebnisse zeigt, dass die Einführung von Strafkosten ein effektives Instrumentarium zur Reduktion von Überstunden ist. In diesem Abschnitt betrachteten wir die flexible Tourenplanung mit Kerngebieten. Im nächsten Abschnitt wenden wir uns einem betrieblichen Störfall – dem Ausfall von Touren – zu, der vor Beginn der Zustellung auftreten kann.

Störfallgerechte Bezirksschneidung

Im Folgenden werden die Ergebnisse für Teil- und Totalausfall mit der flexiblen Kerngebiets-basierten Bezirksplanung vorgestellt. Falls ein Kerngebiet komplett ausfällt, so wird dieses kurzfristig als flexibler Randbereich definiert. Wir betrachten folgende Szenarien

- Ein Kerngebiet fällt komplett aus
- Zwei Kerngebiete fallen komplett aus
- Ein Kerngebiet fällt teilweise aus: es darf keine weiteren Zustellabschnitte übernehmen
- Zwei Kerngebiete fallen teilweise aus: beide dürfen keine weiteren Zustellabschnitte übernehmen

Die Notfälle werden für die Szenarien mit 11, 12 und 13 Kerngebieten evaluiert. Wir nehmen Strafkosten an, mit dem Ziel Überstunden weitgehend zu vermeiden. Als Problembezirke werden zufällig die Bezirke 6 und 8 gewählt, wobei erst genannter für Szenarien mit einem Kerngebiet verwendet wird.

Tabelle 19 gibt in Spalte 5 „Avg(GrAZ)“ die durchschnittlichen Grundarbeitszeiten für die vollständige Versorgung des Zustellgebietes an. Wir unterscheiden in Spalte 2 („Ausfall“), ob die Kerngebiete komplett oder teilweise ausfallen. In Spalte 3 („#“) wird die Information über die Anzahl der ausfallenden Kerngebiete bereitgestellt. In Spalte 4 („KG“) wird indiziert, mit wie vielen Kerngebieten ursprünglich geplant wurde. Bei einem kompletten Ausfall fällt auf, dass die gesamte durchschnittliche Arbeitszeit abnimmt. In dem mehr Zustellabschnitte flexibel, und damit kostenminimierender zu geordnet werden, nimmt die Arbeitszeit ab. Lerneffekte sind bei den Kosten nicht berücksichtigt, daher ist nicht ersichtlich, welcher Zusatzaufwand für den Zusteller entsteht, weil er ein ungewohntes Gebiet übernimmt. Ein Vergleich mit den Kennzahlen aus Tabelle 11 mit der ursprünglichen Planung zeigt, dass bei einem

teilweisen Ausfall die Grundarbeitszeiten leicht ansteigen⁶. Die letzte Spalte gibt die im Schnitt anfallenden Überstunden im Versorgungsgebiet an. Je mehr ursprünglich verplanter Zustellabschnitte nicht bedient werden können, desto mehr Überstunden sind von den verbleibenden Zustellern zu absolvieren. Die Ergebnisse zeigen, dass der Lösungsansatz und Algorithmus robuste Ergebnisse in unterschiedlichen Szenarien liefert. Die Arbeitslast der verbleibenden Zusteller nimmt entsprechend zu.

<i>Typ</i>	<i>Ausfall</i>	<i>#</i>	<i>KG</i>	<i>Avg(GrAZ) [h]</i>	<i>Avg(Überstunden) [h]</i>
CVRPKG	komplett	1	11	91.3	11.3
			12	91.7	3.7
			13	92.0	0.0
		2	11	91.0	19.0
			12	91.1	11.1
			13	91.7	3.7
	teilweise	1	11	91.8	8.8
			12	92.3	0.9
			13	92.6	0.0
		2	11	92.2	13.5
			12	92.2	5.7
			13	92.2	5.7
				93.1	0.0

Tabelle 19 Notfallplanung: durchschnittliche Arbeitszeiten des Versorgungsgebiets (mit Strafkosten und Reheat)

Im Folgenden werfen wir noch einen Blick auf die geleisteten Überstunden auf Tourenebene. Tabelle 20 gibt für die Szenarien die durchschnittlich geleisteten Überstunden (Spalte „Avg(Überstunden)“) an. Die Planung mit 13 Kerngebieten ist sehr großzügig. Überstunden sind hier erst dann zu leisten, wenn zwei Bezirke komplett ausfallen.

Je mehr Bezirke ausfallen, desto höher sind die durchschnittlich zu leistenden Überstunden je Tour. Die Überstunden mit zwei teilweise ausfallenden Touren sind ähnlich zu dem mit einem kompletten Ausfall. Im hier betrachteten Worst-Case mit zwei komplett ausfallenden Touren und 11 Kerngebieten sind im Schnitt 2,1 Überstunden pro Tour zu leisten. In den 10 betrachteten Instanzen dieses Szenarios tritt in einem Bezirk eine maximale Überstundenanzahl von 2,7 auf.

Tabelle 21 zeigt die durchschnittlichen Arbeitsbelastung und Überstunden der einzelnen Touren, wenn Kerngebiet 6 und 8 exemplarisch ausfallen.

<i>Typ</i>	<i>Ausfall</i>	<i>#</i>	<i>KG</i>	<i>Avg(Überstunden) [h]</i>	<i>Max(Überstunden) [h]</i>
------------	----------------	----------	-----------	-----------------------------	-----------------------------

⁶ Die Ergebnisse sind nur annähernd vergleichbar, weil unterschiedliche Datenbasen in die jeweilige Berechnung einfließen. Die Werte können dennoch als Anhaltspunkt dienen.

				(Tour)	(Tour)
CVRPKG	komplett	1	11	1.1	2.1
			12	0.3	1.0
			13	0	0
		2	11	2.1	2.7
			12	1.1	2.1
			13	0.3	1.0
	teilweise	1	11	0.8	1.5
			12	0.1	0.4
			13	0	0
		2	11	1.2	2.1
			12	0.5	1.5
			13	0	0

Tabelle 20 Notfallplanung: durchschnittliche Überstunden je Tour (mit Strafkosten und Reheat)

Typ	Ausfall	#	KG	TNr	Avg(GrAZ) [h]	Avg(Überstunden) [h]
CVRPKG	komplett	2	12	0	8.65	0.65
				1	9.36	1.36
				2	8.18	0.18
				3	8.88	0.88
				4	9.50	1.50
				5	9.43	1.43
				6	-	-
				7	9.72	1.72
				8	-	-
				9	8.92	0.92
				10	9.56	1.56
	11	8.89	0.89			
	teilweise	2	12	0	8.46	0.46
				1	8.87	0.87
				2	8.28	0.28
				3	8.69	0.69
				4	8.33	0.33
				5	8.26	0.26
				6	3.35	0.00
				7	9.03	1.03
				8	3.15	0.00
				9	8.36	0.36
10				8.91	0.91	
11	8.48	0.48				

Tabelle 21 Durchschnittliche Arbeitsbelastung der Touren für zwei komplett bzw. teilweise ausfallenden Touren mit 12 Kerngebieten (mit Strafkosten und Reheat)

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem Ansatz einer flexiblen Tourenplanung mit Kerngebieten eine störfallgerechte Tourenplanung möglich ist. Ob im Notfall ein spezielles Back-up-Kerngebiet oder das ausfallende Kerngebiet aufzulösen sind, sind in der Notfallplanung zu definieren. Eine Entscheidungshilfe, die den Planer bei der Ableitung einer Maßnahme im konkreten Notfall unterstützt, wird in Kapitel 2.5 vorgestellt.

Ressourcengerechte Bezirksplanung

Im Folgenden wollen wir den Vorteil des flexiblen Ansatzes bei einer Steigerung der Nachfragemengen bewerten. Ereignisse mit besonderem Verkehrsmengenwachstum sind an Weihnachten und Ostern zu verzeichnen, wenn von vielen Haushalten (online) Geschenke gekauft und verschickt werden. Wir vergleichen in diesem Abschnitt die statische Planung mit der flexiblen Planung. Bei der statischen Planung erlauben wir keinen Austausch von Zustellabschnitten zwischen den Bezirken. Bei der flexiblen Planung erlauben wir eine freie Zuordnung der „freien“ Zustellabschnitte. Als Referenzwerte für die statische Planung dienen uns die Werte aus Tabelle 16 für die Planung von 12 Kerngebieten und die Werte für die Planung mit 13 Kerngebieten. Die geplanten Zeiten sind in Tabelle 22 der Spalte „geplant“ angezeigt. Wir nehmen nun an, dass die Zeit zur Bedienung eines jeden Abschnitts um 5 % zunimmt, weil mehr Sendungsmengen zugestellt werden müssen. In Spalte „statisch geschätzt“ wird die geschätzte Zeit angegeben, wenn diese statisch geplant wird und sich die zugeordneten Zustellabschnitte nicht verändern dürfen. Weil kein Ausgleich in den Bezirken stattfinden darf, existieren sowohl bei der Planung mit 12 und 13 Kerngebieten Bezirke, die Überstunden und andere die keine Überstunden fahren. Wir vergleichen diese Werte mit einer flexiblen Planung bei der Zustellabschnitte verschoben werden dürfen. Auch hier fallen bei der Planung mit 12 Kerngebieten Überstunden an. Diese werden im Schnitt relativ gleichverteilt auf die Bezirke aufgeteilt. Die gesamte Arbeitszeit ist in beiden Planungen ähnlich, insgesamt sind bei der flexiblen Planung weniger Überstunden (ca. 0.27 Stunden) als bei der Statischen (ca. 1.07 Stunden) zu leisten.

Interessant ist auch die flexible Planung für 12 und 13 Kerngebiete, wenn der Zuwachs in der Zustellzeit so stark ist, dass die Arbeitszeit-Kapazitäten an ihre Grenzen stoßen bzw. wegen der Nichtteilbarkeit der Zustellabschnitte überschritten wird. Wir nehmen daher für 12 KG einen Zuwachs von 4 % und für 13 KG einen Zuwachs von 14 % an. Die Werte werden aus der folgenden Überlegung abgeleitet: Die Zustellabschnitte benötigen rund 80,37 Stunden für die Bedienung. Aus vorhergehenden Analysen werden für die Planung mit 12 und 13 Kerngebieten ca. 92 Stunden eingeplant. Bei 12 Kerngebieten beträgt die maximale Arbeitszeit 96 Stunden und bei 13 Kerngebieten 104 Stunden. Wir erhöhen folglich die Bedienzeit um $4/80,37$ bzw. $12/80,37$. Wir runden das Ergebnis ab. Weil ein Zustellabschnitt nicht teilbar ist und nicht zwei unterschiedlichen Touren zugeordnet werden darf, ist es möglich, dass kein Tourenplan erzielt werden kann, der die Kapazitätsrestriktionen einhält.

<i>Typ</i>	<i>KG</i>	<i>TNr</i>	<i>geplant</i>	<i>statisch geschätzt</i>	<i>Überstunden geschätzt</i>	<i>flexibel</i>	<i>Überstunden flexibel</i>
CVRPKG	12	0	7.73	8.07	0.07	8.04	0.04
		1	7.83	8.17	0.17	8.03	0.03
		2	7.45	7.78	-	8.02	0.02
		3	7.88	8.22	0.22	8.01	0.01
		4	7.68	8.02	0.02	8.02	0.02
		5	7.47	7.80	-	8.02	0.02
		6	7.47	7.80	-	8.01	0.01
		7	7.87	8.22	0.22	8.03	0.03
		8	7.75	8.09	0.09	8.01	0.01
		9	7.39	7.71	-	8.02	0.02
		10	7.85	8.20	0.20	8.02	0.02
	11	7.75	8.09	0.09	8.03	0.03	
	13	0	6.74	7.03	-	7.45	-
		1	6.88	7.18	-	7.11	-
		2	7.71	8.05	0.05	7.73	-
		3	5.49	5.73	-	7.09	-
		4	5.78	6.03	-	5.91	-
		5	7.63	7.97	-	7.84	-
		6	7.06	7.37	-	7.40	-
		7	7.52	7.85	-	7.48	-
		8	7.81	8.16	0.16	7.80	-
		9	7.66	8.00	-	7.63	-
		10	6.86	7.16	-	7.35	-
11		7.79	8.13	0.13	7.84	-	
12	7.17	7.49	-	7.58	-		

Tabelle 22 Vergleich statischer mit flexibler Planung für 12 und 13 Kerngebiete bei wachsender Nachfrage (mit Strafkosten und Reheat)

Tabelle 23 und Tabelle 24 zeigen die Ergebnisse der flexiblen Planung. In die Auswertung fließen wie bisher 10 Berechnungen ein, die Werte geben die durchschnittliche Auslastung der Kerngebiete an. In Tabelle 23 wird die durchschnittliche Gesamtarbeitszeit angegeben. Im Schnitt werden knapp die 96 und die 104 Stunden erreicht. Überstunden können nicht verhindert werden.

Tabelle 24 schlüsselt die Ergebnisse auf Tourenbasis auf. In der Tabelle wird die Hochrechnung der statischen Planung der flexiblen Planung gegenübergestellt. Durch den Austausch von Zustellabschnitten sind die Touren der flexiblen Planung gleichmäßiger ausgelastet als die Touren der statischen Planung.

Typ	KG	GrAZ (ZSP)	Überstunden (ZSP)	Avg(Überstunden) (Tour)	max(Überstunden) (Tour)
CVRPKG	12	95.91	0.02	0.00	0.06
	13	103.99	0.07	0.01	0.05

Tabelle 23 Kennzahlen auf Versorgungsebene für Mengenwachstum von 4 % (KG 12) und 14 % (KG13) (mit Strafkosten und Reheat)

Typ	KG	TNr	Planung	statisch geschätzt 4 bzw. 14 %	Überstunden geschätzt	flexibel	Überstunden flexibel
CVRPKG	12	0	7.73	8.00	0.00	7.99	0.01
		1	7.83	8.10	0.10	7.99	0.00
		2	7.45	7.72	-	7.99	0.00
		3	7.88	8.15	0.15	7.99	0.00
		4	7.68	7.95	-	7.99	0.00
		5	7.47	7.73	-	7.99	0.00
		6	7.47	7.73	-	7.99	0.00
		7	7.87	8.15	0.15	7.99	0.00
		8	7.75	8.02	0.02	7.99	0.00
		9	7.39	7.65	-	8.00	0.00
		10	7.85	8.13	0.13	8.00	0.00
	11	7.75	8.02	0.02	8.00	0.00	
	13	0	6.74	7.56	-	7.99	0.00
		1	6.88	7.72	-	7.99	0.01
		2	7.71	8.65	0.65	7.99	0.00
		3	5.49	6.16	-	8.01	0.01
		4	5.78	6.49	0	8.00	0.00
		5	7.63	8.57	0.57	8.00	0.00
		6	7.06	7.92	-	8.00	0.00
		7	7.52	8.44	0.44	8.00	0.00
		8	7.81	8.77	0.77	8.00	0.01
		9	7.66	8.60	0.60	8.00	0.00
10		6.86	7.70	-	8.00	0.00	
11	7.79	8.74	0.74	8.01	0.01		
12	7.17	8.05	0.05	8.00	0.01		

Tabelle 24 Vergleich statischer mit flexibler Planung für 12 und 13 Kerngebiete bei wachsender Nachfrage (4 und 14 %) (mit Strafkosten und Reheat)

Die Ergebnisse zeigen, dass die flexible Planung geeignet ist, um Veränderungen in den Zustellzeiten abzufangen und Überstunden gleichmäßig auf die Bezirke zu verteilen. Die Ergebnisse können auf weitere Ressourcen (Reichweite) übertragen werden, falls diese ein Engpassfaktor sind. Der Strafkostensatz wird dazu Ressourcen-spezifisch angepasst. Die Funktionsweise des Algorithmus ändert sich dadurch nicht.

In Tabelle 25 betrachten wir zuletzt die Ergebnisse, wenn ein Teil der Zustellabschnitte, hier beispielhaft 5 %, vollständig entfallen und nicht angefahren werden. Wir betrachten die Ergebnisse für die Planung mit 12 Zustellbezirken. Wir vergleichen die Ergebnisse die wir erhalten, wenn wir die Touren mit Kerngebieten planen (CVRPKG) mit der dynamischen Planung (CVRP). Im Schnitt werden im CVRP 87.86 Stunden geplant. Im CVRPKG werden 88.05 Stunden berechnet, dies entspricht einer unwesentlichen Steigerung von lediglich 0,21 % gegenüber der Planung des CVRP. Die Lerneffekte, die bei der flexiblen Planung mit Kerngebieten entstehen, sind hierbei noch nicht berücksichtigt. Die flexible Planung mit Kerngebieten ist daher auch geeignet, um Veränderungen in der Zustellstruktur abzufangen und zugleich von Lerneffekten durch die Bedienung eines bekannten Zustellgebiets zu profitieren.

<i>KG</i>	<i>TNr</i>	<i>CVRPKG: Avg(GrAZ)</i>	<i>CVRP: Avg(GrAZ)</i>
12	0	7.03	7.02
	1	7.67	7.14
	2	6.50	7.12
	3	7.66	7.29
	4	7.61	7.52
	5	7.21	7.34
	6	6.93	6.94
	7	7.80	7.59
	8	7.40	7.31
	9	6.97	7.53
	10	7.69	7.56
	11	7.58	7.50

Tabelle 25 Bezirksübersicht – GrAZ für 12 KG mit 5 % weniger ZAb (Strafkosten und Reheat)

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein metaheuristisches Verfahren für die flexible Tourenplanung mit Kerngebieten in der Paketzustellung entwickelt. Um von Lerneffekten zu profitieren, werden Kerngebiete definiert die stets vom gleichen Zusteller bedient werden. Kerngebiete umfassen im Schnitt rund 60 % der Auslastung eines Regelbezirks (Vollbezirk). Der Auslastungsgrad kann hierbei flexibel gewählt werden. Die Kerngebiete werden täglich mit weiteren Aufträgen aufgefüllt, so dass alle Aufträge verplant sind und ein valider Tourenplan für alle Bezirke hinsichtlich der Kapazitätsbeschränkungen entsteht. Als Zielkriterium werden Verbindungswege gewählt und diese bei der Optimierung minimiert.

Aufgrund der NP-Schwere des Problems wird ein Simulated Annealing-Verfahren entwickelt. Das Simulated Annealing-Verfahren basiert auf Nachbarschaftsoperatoren, die die Lösungen in Nachbarlösungen transformieren. Erlaubt werden nur Austauschschritte, die zulässige Lösungen generieren. Beispielsweise wird über den Austauschschritt „Verschiebe einen Knoten in einer andere Tour“ die Zuordnung von einem zu verplanenden Auftrag zu einem anderen Bezirk geändert und dieser zufällig in die neue Tour eingefügt. Testrechnungen zeigen, dass mit diesem Verfahren gute Lösungen in angemessener Zeit erzeugt werden können.

Ergebnisse der flexiblen Kerngebietsplanung mit integrierter Lokations-Entscheidung

Wir betrachten in diesem Kapitel ein integriertes Location-Routing-Problem. Wir nehmen zusätzlich zur Zuordnungs- und Routingentscheidung der Zustellabschnitte eine Lokationsentscheidung über die Platzierung von dezentralen Depots auf und entscheiden welcher Bezirk von welchem Depot zu bedienen ist. Als potentielle Standorte für die Ladesäulen werden die Anker der Kerngebiete herangezogen. Wir vergleichen zunächst die Lösungen der Probleme mit Lokations- und ohne Lokationsentscheidung. Dazu vergleichen wir paarweise die Lösungswerte beider Probleme. Tabelle 26 gibt für verschiedene Instanzen die durchschnittliche prozentuale Abweichung der Zielfunktionswerte des Location-Routing-Problems zum Routing-Problem an. Negative Werte bedeuten, dass die Zielfunktionswerte des Location-Routing-Problems besser (niedriger) sind als die des Routing-Problems. Im Schnitt sind die Lösungen des Location-Routing-Problem um 5 % besser: Weil das zentrale Depot abseits der Bezirke liegt, können durch dezentrale Depots Wegeleistungen eingespart werden, obwohl eine zusätzliche Versorgungsroute eingeführt wird.

<i>KG</i>	<i>Reheat</i>	<i>Zfw_CVRPLOC:CVRP [%]</i>
11	0	-4.82
	1	-3.99
12	0	-6.17
	1	-5.47
13	0	-5.13
	1	-4.89

Tabelle 26 Sensitivitätsanalyse Zielfunktionswerte des Location-Routing-Problems (ohne Strafkosten)

Insgesamt zeigen die Ergebnisse ohne Strafkosten, dass ein langsamer Abkühlplan mit $\lambda = 0,9$ und $2 \cdot 100 \cdot |N|$ untersuchter zulässigen Lösungen bei konstanter Temperatur über alle Szenarien am robustesten sind. Ein Reheat ist für die Planung mit Kerngebieten von Vorteil.

Im Folgenden betrachten wir die Ergebnisse mit Strafkosten. Eine langsamere Abkühlung mit einem hohen Abkühlfaktor und vielen Schritten bei konstanter Temperatur zeigt sich auch hier als überlegen. Ein Reheat ist für die Planung mit Kerngebieten vorteilhaft. Insbesondere bei der Planung von 11

Kerngebieten trägt es zu einer deutlichen Reduzierung der Zielfunktion, die hier maßgeblich von den Strafkosten bestimmt ist, bei.

Im Folgenden betrachten wir die Arbeitszeiten pro Bezirk. Wir betrachten hierzu die durchschnittlichen Ergebnisse der 10 Durchläufe des Simulated Annealing mit einem Abkühlfaktor = 0,9 und $2 \cdot 100 \cdot |N|$ untersuchter zulässigen Lösungen bei konstanter Temperatur. Wir erlauben Strafkosten und Reheats.

Zunächst betrachten wir in Tabelle 27 die durchschnittliche Arbeitszeit pro Zustellstützpunkt in Abhängigkeit der geplanten Kerngebiete. Die Zeiten schließt die Zeit für die Versorgungstour nicht mit ein. Im Vergleich zur zentralen Planung mit nur einem Versorgungsstützpunkt entfallen ca. 2 Stunden Wege, wenn die Bezirke von näheren dezentralen Depots versorgt werden können. Die Überstunden können drastisch reduziert werden, insbesondere für die Planung mit 11 Kerngebieten. Die maximale Überstundenzahl die in den geplanten Bezirken mit Kerngebieten auftritt kann von zuvor 0,98 Stunden auf 0,72 Stunden reduziert werden. Tabelle 28 gibt die mittlere Arbeitszeit je Kerngebiet an, wenn beispielsweise 11 Kerngebiete geplant werden. Im Vergleich zu Tabelle 18 wird die Reduktion der Überstunden ersichtlich.

<i>Typ</i>	<i>KG</i>	<i>GrAZ [h]</i> <i>(ZSP)</i>	<i>Überstunden [h]</i> <i>(ZSP)</i>	<i>Avg(Überstunden) [h]</i> <i>(Tour)</i>	<i>max(Überstunden) [h]</i> <i>(Tour)</i>
CVRP	11	88.70	0.70	0.06	0.39
	12	89.79	-	-	-
	13	91.05	-	-	-
CVRPKG	11	89.20	1.21	0.11	0.72
	12	89.36	-	-	-
	13	89.71	-	-	-

Tabelle 27 Kennzahlen auf Versorgungsgebietsebene (GrAZ) (mit Strafkosten und Reheat)

<i>KG</i>	<i>TN</i> <i>r</i>	<i>Typ</i>	<i>Avg(GrAZ)</i> <i>[h]</i>	<i>Avg(Überstunden)</i> <i>) [h]</i>	<i>Typ</i>	<i>Avg(GrAZ)</i> <i>[h]</i>	<i>Avg(Überstunden)</i> <i>) [h]</i>
11	0	CVRPKG	8.10	0.10	CVRP	8.02	0.02
	1	CVRPKG	8.17	0.17	CVRP	8.02	0.02
	2	CVRPKG	8.05	0.05	CVRP	8.02	0.02
	3	CVRPKG	8.08	0.08	CVRP	8.07	0.07
	4	CVRPKG	8.05	0.05	CVRP	8.06	0.06
	5	CVRPKG	8.08	0.08	CVRP	8.07	0.07
	6	CVRPKG	8.14	0.14	CVRP	8.07	0.07
	7	CVRPKG	8.04	0.04	CVRP	8.06	0.06
	8	CVRPKG	8.07	0.07	CVRP	8.02	0.02
	9	CVRPKG	8.23	0.23	CVRP	8.16	0.16
10	CVRPKG	8.20	0.20	CVRP	8.13	0.13	

Tabelle 28 Bezirksübersicht – GrAZ für 11 KG mit Lokations-Entscheidung (mit Strafkosten und Reheat)

Analyse der Lösungen mit integrierter Lokations-Entscheidung

In diesem Abschnitt betrachten wir die Lösungen. Tabelle 29 gibt in Spalte 3 die durchschnittliche Anzahl eingerichteter Depots an. Je weniger Touren/Kerngebiete geplant werden, desto mehr Depots werden eingerichtet. Bei der Planung von 11 Kerngebieten werden im Schnitt neun Extra-Depots installiert, bei der Planung von 13 Kerngebieten lediglich fünf. Strafkosten werden nur für die Überstunden der Versorgungstouren der Bezirke berechnet. Durch die Installation von Depots am Anker der Kerngebiete können Wege eingespart werden. Die Planung von 13 Kerngebieten ist ohne Überstunden möglich, deshalb werden hier deutlich weniger dezentrale Depots eingerichtet. Spalte 4 erfasst die zusätzlichen Wegezeiten, die für die Versorgung der dezentralen Extra-Depots vom Versorgungsstützpunkt anfallen. Die zusätzlichen Zeiten für die Versorgungstouren der Depots nehmen mit wachsender Anzahl zu versorgender Depots zu.

<i>Problem</i>	<i>KG</i>	<i>Avg(Anzahl Extra-Depots)</i>	<i>Avg(GrAZ(Depot-Tour)) [h]</i>
CVRPKGLOC	11	9	0.9
	12	7	0.7
	13	5	0.6

Tabelle 29 mittlere Zeiten und mittlere Anzahl Extra-Depots für die Versorgungstour der Depots (mit Strafkosten und Reheat)

Fazit und Ausblick der flexiblen Kerngebietsplanung mit integrierter Lokations-Entscheidung

Über die Aufnahme einer Lokationsentscheidung können zwei Planungsprobleme unterschiedlicher zeitlicher Natur integriert werden. Aufgabe des Location- Problems ist es, Standorte zu platzieren, von denen Fahrzeuge in ihre Touren starten. Im integrierten Location-Routing-Problems werden Entscheidungen darüber getroffen, wo die Standorte platziert werden, welche Fahrzeuge von welchem Standort starten, welche Kunden den Fahrzeugen zu geordnet werden und wie die Anfahreihenfolge der Kunden innerhalb der Touren ist. In diesem Kapitel wurde dieses Problem gelöst. Die Ergebnisse der Case Study zeigen, dass die Arbeitszeiten in den Bezirken reduziert werden können, weil lange Anfahrwege zum Zustellstützpunkt entfallen. Diesen Zeiten ist die Zeit der Tour zur Versorgung der Touren gegenüberzustellen. In dieser Case Study entstand ein Benefit durch die Dezentralisierung der Versorgung – die Ersparnis durch die dezentrale Struktur ist doppelt so hoch wie der Mehraufwand durch die zusätzliche Versorgungstour.

Bei der Problembetrachtung sind stark vereinfachte Aufnahmen getroffen worden. Es ist angenommen worden, dass die Fixkosten der dezentralen Depots in Summe genauso hoch wie die Fixkosten des zentralen Standortes. In der Regel können Größen-Degressionseffekte durch die Einrichtung eines groß-dimensionierten Standortes anstelle vieler klein-dimensionierter Standorte realisiert werden. Durch die Aufnahme von Standort-spezifischen Fixkosten in die Zielfunktion können Größen-Degressionseffekte abgebildet und berücksichtigt werden.

In diesem Kapitel 3.2 haben wir die flexible Tourenplanung betrachtet. Grundlage für die Tourenplanung sind fix definierte Kerngebiete, die Grundstock einer Tour bilden. Flexible Randbereiche werden in einem Zuordnungsverfahren Situations-angepasst den Kerngebieten zugewiesen. Um gute Lösungen in akzeptabler Zeit zu erreichen werden zwei Metaheuristiken, ein memetischer Algorithmus und ein Simulated Annealing, zur Lösung des Tourenproblems eingesetzt. Ergebnis der Planung ist die Zuordnung der flexiblen Zustellabschnitte und die Reihenfolge in der diese angefahren werden. Die Analysen der Rechenergebnisse zeigen, dass eine störfallgerechte Bezirksplanung über die Kerngebiets-basierte Tourenplanung möglich ist. Im nächsten Kapitel wird eine Entscheidungshilfe für den Planer entwickelt, die eingesetzt wird, wenn keine täglich flexible Anpassung möglich ist.

3.3 Ergebnisse Notfallplanung

Allgemeines Vorgehen bei Notfällen

In diesem Abschnitt wird eine Entscheidungshilfe entwickelt, die den Planer bei der Wahl der Maßnahme im Falle einer Störung unterstützt. Abbildung 8 zeigt das allgemeine Vorgehen, um eventuelle Notfälle zu identifizieren und zu beheben. Das Schema ist für alle individuelle Notfallsituationen anwendbar. Wir betrachten die Zustellung von Briefen und Paketen an die Endkunden in der letzten Meile. Die Aufteilung der Kunden auf die Bezirke sowie die Anfahrreihenfolge wird über einen initialen Zustellplan vorgegeben. Um frühzeitig auf Störungen reagieren zu können, werden Routineprüfungen vor Beginn der Zustellung eingeführt. Hier wird getestet, ob die Elektrofahrzeuge fahrtüchtig sind (Akkustand, technische Panne). Idealerweise kann die Zustellung planmäßig beginnen.

Falls ein Notfall vor oder während der Zustellung eintritt, wird geprüft, ob die Behebung möglich ist. Erster Versuch ist immer, den entsprechenden Notfall eigenständig zu beheben. Wenn dies nicht möglich ist, wird externe Hilfe über einen Vertragspartner angefordert. Bei den Elektrofahrzeugen sind das spezielle Werkstätten, die für Reparaturmaßnahmen zertifiziert sind. Ist keine Behebung, weder durch interne noch externe Fachkräfte möglich, wird die Umverteilung der Kundenaufträge geprüft. Beim Umverteilen bzw. Aufteilen der Sendungsmenge wird zwischen Regelzustellung und Verbundzustellung unterschieden. Kann durch keine Maßnahme der Notfall behoben werden, sieht der letzte Schritt einen Zustellabbruch bzw. die Nichtzustellung verbleibender Sendungsmenge vor. Diese Aktion hat allerdings einen negativen Effekt auf den Servicegrad des Dienstleisters.

Im folgenden Abschnitt wird ein exemplarischer Entscheidungsbaum zur Behebung eines Notfalls vorgestellt. Für die Maßnahme „Umverteilen“ wird ein Modell entwickelt, welches einen Back-up Plan kreiert, für den Fall, dass ein Bezirk zu Beginn der Zustellung nicht bedient werden kann. Dieser Fall tritt beispielsweise dann ein, wenn ein Fahrzeug- oder Personalmangel vorliegt.

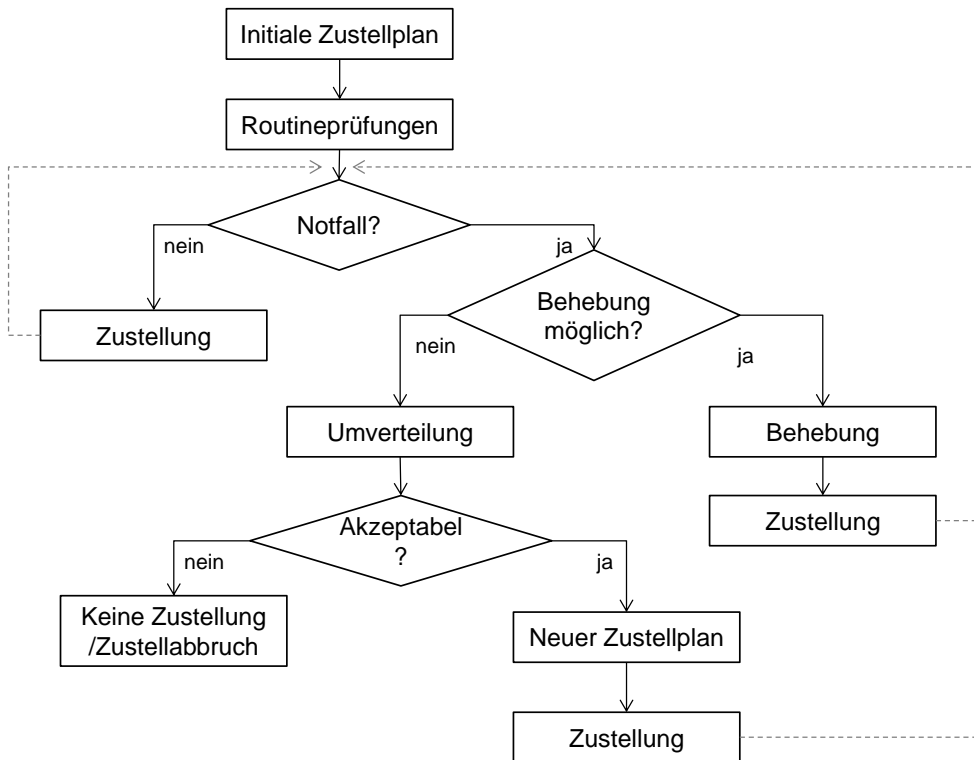


Abbildung 8 Entscheidungsprozess zur Behebung von Notfällen

Entscheidungsbäume

Das allgemeine Vorgehen kann für die einzelnen Notfälle konkretisiert werden. Dazu wurden in Zusammenarbeit mit der Deutsche Post DHL Entscheidungs bäume für die Notfälle

- Fahrerausfall
- Fahrzeugausfall
- Akku vom Fahrzeug nicht genügend geladen (Verbund) (Abbildung 9) Akku vom Fahrzeug nicht genügend geladen (Regel)
- Zu gering werdender Akkuladestand während der Tour

entwickelt.

Zu beachten ist, dass bei den Entscheidungsbäumen bei allen Maßnahmen Arbeitszeiten, Kapazitäten und Reichweiten eingehalten werden müssen. Des Weiteren wird bei der Maßnahme "Bezirk aufteilen" die Sendungsmenge aufgeteilt. Dies geschieht abhängig davon, ob wir die Verbund- oder Regelzustellung betrachten, und ob optional ein Aufteilbezirk vorliegt. In der Regelzustellung wird dabei die Sendungsmenge nur im äußersten Notfall aufgeteilt, wenn keine andere Maßnahme greift. Dadurch entstehen bei dem Notfall „Akku vom Fahrzeug nicht genügend geladen“ zwei verschiedene

Entscheidungsbäume, einer für die Regel- und einer für die Verbundzustellung. In Abbildung 9 wird ein exemplarischer Entscheidungsbaum abgebildet, für die Situation, in der festgestellt wurde, dass der Akku nicht genügend geladen ist, um die gesamte Strecke zurückzulegen.

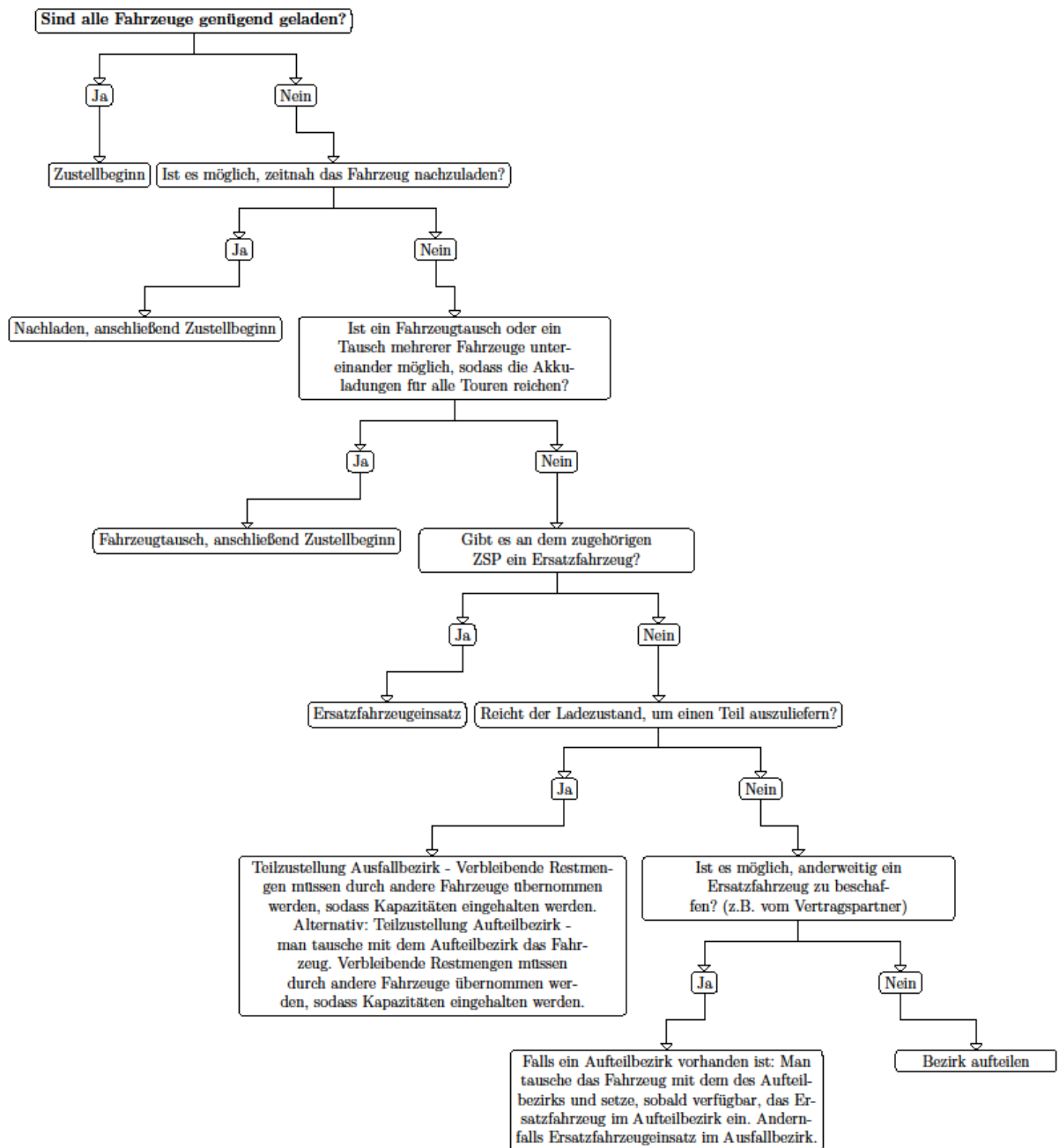


Abbildung 9 Entscheidungsbaum Akku vom Fahrzeug nicht genügend geladen (Verbund)

Bestimmung eines Back-up Bezirks

Wir betrachten im Folgenden konkret den Notfall, wenn zu Beginn der Zustellung eine Ressource (Personal, Fahrzeug) ausfällt, so dass der ursprüngliche Zustellplan nicht realisiert werden kann. Um eine weitgehende Zustellung zu gewährleisten, wird ein Notfallplan ermittelt, der zu bedienende Segmente der Ausfallbezirke neu zuordnet. Ein solcher Plan sieht beispielsweise die Ermittlung von Back-up Bezirken vor, die in einer Notfallsituation aufgeteilt werden und dessen Segmente den übrigen Bezirken zugeordnet werden. Für jedes Versorgungsgebiet wird ein Plan a priori entwickelt, der bei Bedarf eingesetzt wird. In Kapitel wird eine Modellformulierung zur Entwicklung des Notfallplans vorgestellt.

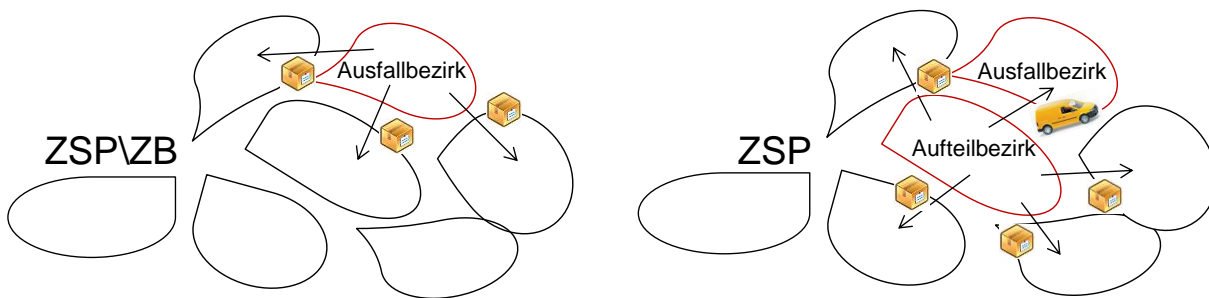


Abbildung 10 Aufteilung eines Back-up Bezirks

Abbildung 10 illustriert das Aufteilen eines Back-up Bezirks, wenn beispielsweise ein Fahrzeug ausfällt. Der Back-up Bezirk kann der Ausfallbezirk sein, der im Notfall aufgeteilt wird, oder es wird ein bestimmter Aufteilbezirk bestimmt, der unabhängig vom ausfallenden Bezirk aufgeteilt wird. Das Fahrzeug des Aufteilbezirks wird dem Ausfallbezirk zur Verfügung gestellt.

Ziel ist die Minimierung zusätzlicher Kosten, wobei alle Segmente der ausfallenden Bezirke beliefern werden müssen. Arbeitszeiten, Fahrzeugkapazitäten sowie Fahrzeugreichweiten werden dabei beachtet. Um weiterhin von Lerneffekten aus dem langfristigen Charakter der Touren zu profitieren, wird versucht die ursprüngliche Reihenfolge der neu zugeordneten Segmente einzuhalten.

Es wird ein Modell zur Planung der Maßnahme "Bezirk aufteilen" von Verbundbezirken entwickelt. Das Modell unterstützt den Planer in der Auswahl des Aufteilbezirks und der Umverteilung der Zustellabschnitte auf die verbleibenden Bezirke.

Rechenergebnisse

Auf eine detaillierte Beschreibung der Rechenergebnisse wird auf die Veröffentlichung „Managing Disruptions in Last Mile Distribution“ verwiesen. Im Folgenden wird illustrativ eine Lösung präsentiert, bei der Bezirk 52 als Aufteilbezirk gewählt wird.

Abbildung 11 bis Abbildung 14 zeigen exemplarisch die Umverteilungen für den Bezirk 52, wenn dieser gewählt wird. Abbildung 11 zeigt zunächst eine Übersichtskarte der Verbund-Kfz-Bezirke eines Versorgungsgebietes. Westlich von den Bezirken liegt das Depot. Vom Depot starten die Zusteller in

ihre Bezirke und kehren dorthin wieder zurück. Die Kanten stellen die Gangfolgebeziehung zwischen den ZAb dar. Ein ZAb wird über einen Punkt repräsentiert, welcher die Grundlage für die Berechnung der Wegezeiten ist. Abbildung 12 zeigt den Aufteilbezirk 52.

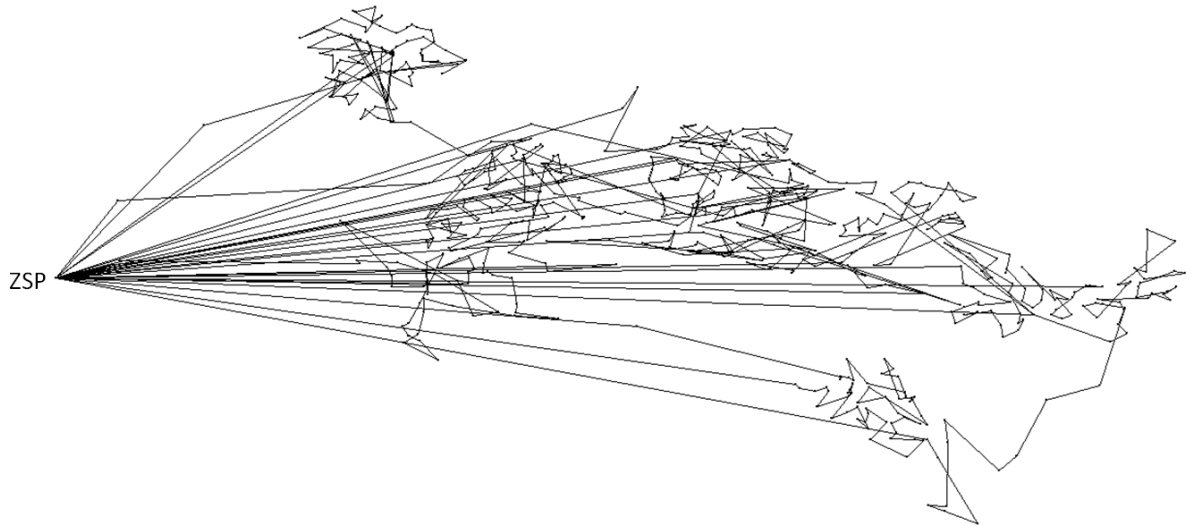


Abbildung 11 Übersicht über alle Verbund-Kfz-Bezirke eines Versorgungsgebietes mit HR-Wegen

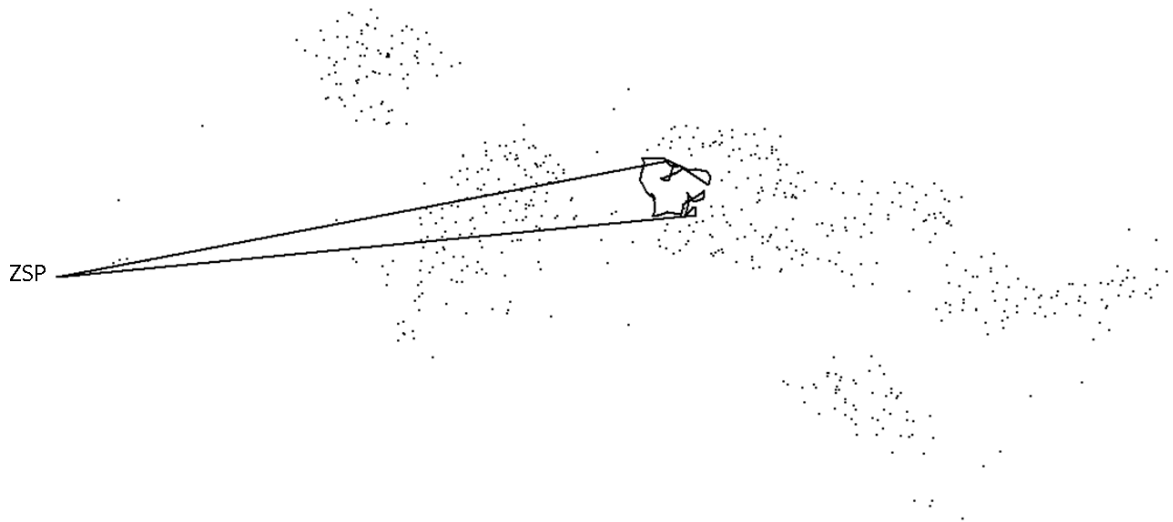


Abbildung 12 Lage des Aufteilbezirks 52

Abbildung 13 zeigt eine Übersicht über die Bezirke, die Teilbezirke aufnehmen. Abbildung 14 zoomt in die Bezirke. Aufteilbezirk 52 wird auf die Bezirke 43, 44, 62 und 64 umverteilt. In den Bezirken 43 und 62 wird der Teilbezirk direkt zu Beginn der Touren eingefügt. Beim Bezirk 64 erfolgt die Eingliederung

des Teilbezirks während der Tour. Bezirk 44 übernimmt lediglich einen ZAb, welcher auf dem Rückweg zum Depot bedient wird.

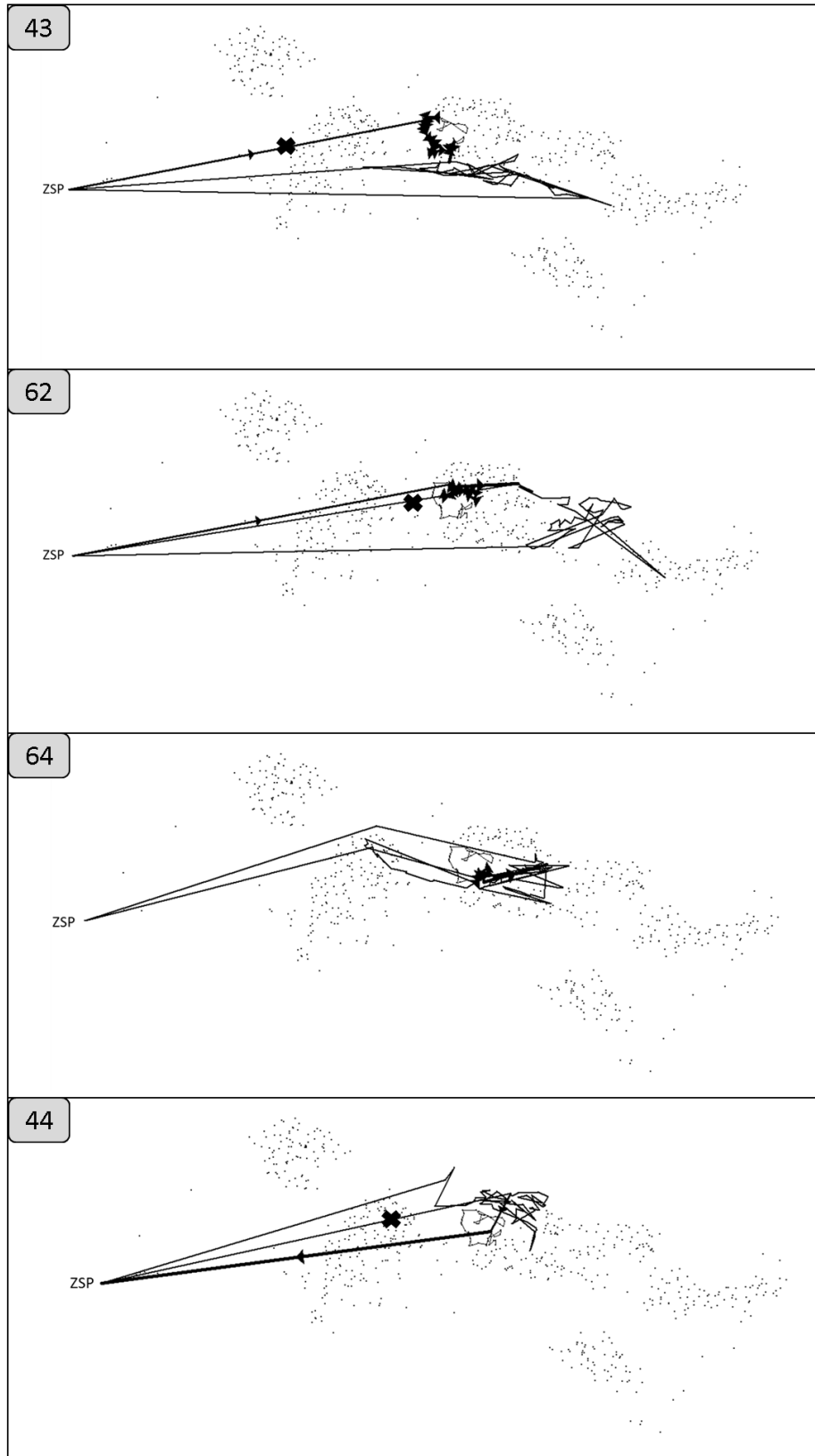


Abbildung 13 Übersicht über die Teilbezirke, die teils auf dem Hinweg zum Bezirk (Bezirk 43 und 62), während der Tour (64) oder auf dem Rückweg zum Depot (Bezirk 44) in die umliegenden Bezirke integriert werden.

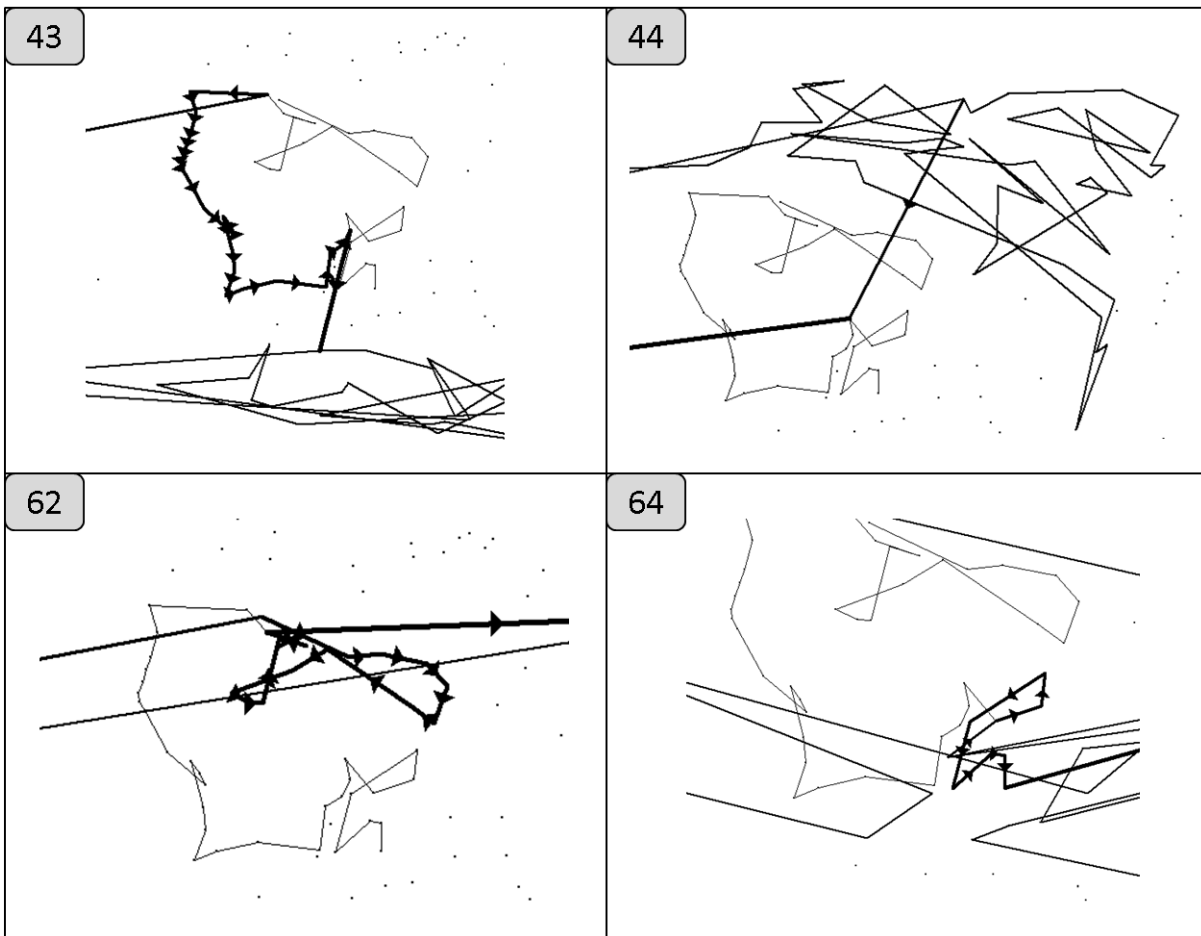


Abbildung 14 Fokus auf die umzuverteilenden Teilbezirke

Zusammenfassung

In diesem Kapitel ist eine standardisierte Entscheidungshilfe für den Planer entwickelt worden, die diesem in Notfallsituationen unterstützt. Die Entscheidungshilfe berücksichtigt dabei neue Einflussfaktoren, die der Einsatz von Elektrofahrzeugen in der postalischen Zustellung mit sich bringt.

Zum einen wurden Entscheidungsbäume für verschiedene relevante Notfälle aufgestellt, welche den Planer bei der Suche nach einer richtigen Maßnahme in einer Notfallsituation anleitet. Zum anderen wurde ein Modell zur Bestimmung eines Aufteilbezirks in der Verbundzustellung sowie zur Zuordnung der Sendungsmenge auf umliegende Bezirke aufgestellt. Das Modell gibt dem Planer einen Zustellplan vor, für den Fall, dass ein Back-up Bezirk aufgeteilt wird. Dieser Plan wird apriori bestimmt und greift dann, wenn ein Bezirk aufgrund mangelnder Alternativen aufgeteilt werden soll.

Werden in der Praxis die Aufteilbezirke langfristig gebildet, so können die langen Rechenzeiten des Modells akzeptiert werden. Wird vom Projektpartner entschieden, dass das Modell kurzfristig im Notfall

eingesetzt wird, mit aktuellen Daten zu Paketmengen und Ladeständen der Fahrzeuge, so müssen Lösungsverfahren angewendet werden, die in kurzer Zeit optimale oder möglichst gute Lösungen finden. Dies gelingt mit den Lösungsansätzen, die in Kapitel 2.4 entwickelt wurden.

3.4 Veröffentlichungen des DPOR

Flexible Bezirksschneidung

Zum Thema Flexible Bezirksschneidung ist im Förderzeitraum ein Konferenzbeitrag entstanden. Eine Veröffentlichung zur flexiblen Bezirksschneidung in der Verbundzustellung ist in Form einer Dissertation Ende 2016 von Sarah Büschgens geplant.

Konferenzbeitrag:

Büschgens, Sarah. "Assigning Non-Fixed Parts of a Delivery Area to Fixed Tours Serviced by Electric Vehicles". INFORMS Annual Meeting. Philadelphia, USA, November 2015.

Notfallplanung

Zum Thema Notfallplanung sind im Förderzeitraum mehrere Konferenzbeiträge und eine Veröffentlichung entstanden.

Konferenzbeiträge und Veröffentlichungen:

Hörhammer, Astrid. „Notfallstrategien bei Störungen im Betriebsablauf der Zustellung mit Elektrofahrzeugen“. Logistikmanagement. Bremen, Deutschland, September 2013. (Konferenzbeitrag)

Dettenbach, Astrid und Ubber, Sarah. "Managing Disruptions in Last Mile Distribution". In 2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences (pp. 1078-1087). IEEE. (Konferenzbeitrag und Veröffentlichung)

Dettenbach, Astrid und Ubber, Sarah. "A Decision Making Process for Managing Disruptions in Last Mile Distribution". IFIP WG7.6 Workshop. Shanghai, China, Mai 2015. (Konferenzbeitrag)

4 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse des DPOR für KMU

Anwendung finden die entwickelten Verfahren in Einsatzbereichen, die einer Tourenplanung bedürfen und deren Parameter stochastischen Charakter aufweisen. Variierende Parameter können sich betriebsbedingt durch die Reichweite der Fahrzeuge ergeben, oder durch exogene Faktoren wie die Standorte der Service-Nachfrager oder Bedienzeiten verursacht sein. Haupteinsatzgebiete der Verfahren sind bei Transportunternehmen und Zustelldienstleistern zu finden. Weitere Branchen, die relevant für eine flexible Bezirksplanung sind:

- Serviceteams
- Vertriebsteams
- Pflegedienste
- Immobilien Vertreter
- Online Shops
- Pharmazeutische Lager
- Nahrungsmittel- und Getränkevertrieb zu Bars, Restaurants und Supermärkten
- Internet-basierte Lebensmittelzustellung an Privathaushalte
- City-Logistik
- Müllabfuhr

In allen Branchen sind häufige Auslieferungs- oder Servicetouren zu planen. Die Aufträge können dabei täglich in ihrem Auftreten und in ihren Bedienzeiten variieren. Falls Elektrofahrzeuge eingesetzt werden, können die Reichweiten schwanken. Um auf die variierenden Faktoren zu reagieren, eine gleichmäßige Auslastung der Touren zu erreichen und zeitgleich von Lerneffekten durch eine Routine zu profitieren, bietet sich der flexible Planungsansatz mit Kerngebieten an.

Die Verfahren können aber auch in Abholanwendungen eingesetzt werden. Auch hier sind die postalischen bzw. Less-Than-Truckload Dienstleister zu nennen, die Pakete bzw. Lieferungen bei Kunden abholen und zu Verteilzentren bringen bzw. von den Verteilzentren die Kunden versorgen.

5 Einleitung und Problemstellung des FCN

5.1 Ausgangssituation und Stand der Wissenschaft: Wirtschaftlichkeitsanalyse und Untersuchung der Ladestrategie: techno- ökonomische Optimierung und Nutzerverhalten

Im Rahmen dieses Vorhabens stärkten die Projektpartner ihre Kompetenzen auf dem Gebiet der technischen, ökonomischen und ökologischen Analyse der Auswirkungen einer großflächigen Elektrifizierung von Fahrzeugflotten bzw. der Planung ihres Einsatzes im gewerblichen Sektor. Der wissenschaftliche Aussagewert der Erkenntnisse ging hierbei, aufgrund der Größe der im Verbundvorhaben eingesetzten Elektrofahrzeugflotte, weit über bisherige Projekte hinaus. Insbesondere die folgenden, für eine Umstellung der Fahrzeugflotte auf elektrische Antriebe kritischen Themenfelder wurden betrachtet: Gestaltung und Auslegung großflottentauglicher Infrastrukturlösungen, ökonomisch und ökologisch optimale Ladestrategien und Fahrrouen, Auswirkungen auf das Stromnetz, Auswirkungen auf betriebliche Prozesse (Praxistauglichkeit, Akzeptanz) sowie Entwicklung der Wirtschaftlichkeit im Zeitverlauf. Da diese kritischen Punkte nicht nur im Verbundprojekt, sondern bei jeder Entscheidung bezüglich einer möglichen Elektrifizierung von Fahrzeugflotten essentiell sind bzw. gegeben sein müssen (z.B. ökonomische Vorteilhaftigkeit), können die Ergebnisse des Vorhabens als Grundlage für allgemeine Richtungsentscheidungen und weitere Forschungsvorhaben im Bereich der Elektromobilität dienen, welche über die Elektrifizierung reiner Logistikfahrzeugflotten hinausgehen. Es besteht somit eine sehr gute wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit des gesamten Vorhabens.

Da ein Projekt hauptsächlich dann realisiert werden sollte, wenn aus seiner Durchführung ein monetär messbarer Nutzen entsteht, ist die Wirtschaftlichkeitsanalyse ein elementarer Baustein der Projektbewertung. Zu diesem Zweck sollten sämtliche bei der Umstellung der Zustellung auf Elektrofahrzeuge anfallenden Aufwände (Kosten) den prognostizierten Erlösen, im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, gegenübergestellt werden. Besonderes Augenmerk bei der ökonomischen Bewertung von Elektrofahrzeugen lag hierbei auf der Batterieladestrategie. Dies gilt in noch größerem Maße für Fahrzeugflotten. Die Ladestrategie bestimmt die Dimensionierung der benötigten Infrastruktur, Leistungselektronik im Fahrzeug sowie die nutzbare Kapazität der Batterie und damit die Investitionskosten, und nicht nur über ihre Auswirkungen auf die Batteriealterung die Betriebskosten der Fahrzeuge und Abschreibungen. Darüber hinaus bestimmt die Ladestrategie aber auch die Gesamtemissionen der Fahrzeugflotte, da eine intelligente Ladesteuerung nicht nur hinsichtlich einer Minimierung der Kosten ausgerichtet werden kann, sondern auch hinsichtlich einer Minimierung der Emissionen, z.B. wenn verstärkt in Starkwindphasen geladen wird. Hauptziel dieses Arbeitspaketes ist deshalb die techno-ökonomische und ökologische Optimierung der Ladestrategien im Speziellen sowie der Elektrofahrzeuge im Allgemeinen. Darüber hinaus wurde ein Bewertungsmodell entwickelt, mittels dem die optimale, schrittweise Umstellung einer Transportfahrzeugflotte auf einen Elektroantrieb analysiert wurde. Neben diesen monetären und umweltpolitischen Aspekten musste aber auch die Nutzerakzeptanz der Fahrer der Elektrofahrzeuge berücksichtigt werden, um zu einem Ergebnis bezüglich der subjektiv wahrgenommenen Vor- und Nachteile der Innovationsanwendung zu gelangen. Dieses vom FCN bearbeitete Arbeitspaket gliedert sich in die folgenden Unterpunkte:

5.1.1 Kriterien zur Beurteilung von Ladestrategien

Ladestrategien für Elektrofahrzeuge können u. a. aus ökonomischer, ökologischer und technischer Sicht bewertet werden. Dabei ist von besonderem Interesse, wie die Fahrzeugflotte wirtschaftlich aufgeladen und eingesetzt werden kann und wie die Ladestrategie die Anzahl und Dimensionierung der Ladeinfrastruktur beeinflusst. Beim Einsatz der Ladesteuerung wurde die Minimierung der Gesamtkosten in einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung angestrebt.

Da bei diesem konkreten Anwendungsfall zahlreiche Rand- und Rahmenbedingungen vor Ort an den Zustellstützpunkten gelten, galt es, die konkreten monetären Kriterien der Ladestrategien herauszufinden. Es musste zunächst analysiert werden, welche Kostenkomponenten, d. h. welche Investitionskosten (z.B. für Ladestationen) und welche variablen Kosten (z.B. im täglichen Betrieb), relevant sind und wie sie in die Bewertung einfließen können und wie andere Bewertungskriterien mit aufgenommen werden (z.B. CO₂-Emissionen) können. Eine Randbedingung für die gewählte Ladestrategie war, dass sie den zuverlässigen Betrieb der Fahrzeuge unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Fahrzeugflotten im Warenverkehr (Fahrt- und Standzeiten, Energieverbrauch) gewährleistet, auch auf Basis der Daten des Flottenversuchs. Zunächst wurden dazu die verschiedenen Kostenkomponenten von Ladesystemen analysiert. Diese bestehen u.a. aus den Kosten für Ladegeräte (on-/off-board), Netzanschlusskosten sowie den Kosten für die Informations- und Kommunikations-(IKT)-Infrastruktur. Betrachtet wurde zudem der Einfluss von verschiedenen Ladekonzepten (Standard- und Schnellladung, induktives vs. konduktives Laden) auf die Batteriedimensionierung. So war es beispielsweise denkbar, die Batterien bei Vorhandensein einer Schnellladeeinrichtung kleiner zu dimensionieren. In diesem Zusammenhang floss auch eine etwaige Verkürzung der Batterielebensdauer mit in die Analyse ein.

5.1.2 Optimierung der Ladestrategien

In diesem Arbeitspaket erfolgte in Abstimmung mit dem PGS die techno-ökonomische und ökologische Analyse verschiedener Ladestrategien der vorhandenen Fahrzeugflotte unter Berücksichtigung von Batterietyp, Gleichzeitigkeit der Ladung und zeitabhängigen Stromkosten unter Modellannahmen (3 exemplarische Batterietypen): Der Verschleiß der Batterie (Batteriealterung) stellt eine Hauptkomponente der Betriebskosten von Elektrofahrzeugen dar. Batterien altern zum einen im Stillstand durch die sogenannte kalendarische Alterung. Diese steigt mit der Zeit an und ist hauptsächlich abhängig von Umgebungstemperatur und Ladezustand. Zum anderen altern Batterien im Betrieb durch sogenannte Zyklenalterung, welche im Wesentlichen von der durchgesetzten Energiemenge, der Tiefe der Ladezyklen, der Betriebstemperatur und damit von der Lade- und Entladeleistung abhängig ist. Insbesondere führen beschleunigtes Laden und hohe Ladezustände zu erhöhtem Verschleiß der Batterie. Eine Reduzierung der Alterung kann zum Beispiel durch niedrige Ladezustände der Batterie während längerer Stillstandszeiten (nachts und an Wochenenden) erreicht werden. Die ökonomische Bewertung verschiedener Ladestrategien erforderte ein Batteriemodell, das die Alterung in Abhängigkeit der Lade- und Stillstandsbedingungen abbildete. Erschwert wurde diese Modellierung allerdings dadurch, dass verschiedene Batterietypen verschieden altern, d.h. verschiedene chemische Formulierungen und Auslegungen von Batteriezellen und Batteriepacks führen zu einem anderem Alterungsverhalten.

Zu Beginn dieses APs erfolgte durch das PGS eine Potenzialabschätzung von Ladeoptimierungsverfahren für verschiedene Batterietypen und Nutzungsannahmen. Dabei wurden auch die unterschiedlichen Potenziale von unidirektionalen und bidirektionalen Verfahren betrachtet.

Im Anschluss daran erfolgte durch das FCN und das PGS die Optimierung der Ladung in beiden Fällen (unidirektionales und bidirektionales Laden) unter den Randbedingungen Nutzerverhalten (u.a. Einsatzprofile der Fahrzeuge), marktbasierter (zeitvariabler) Strompreis, CO₂-Emissionen der Stromerzeugung (Kapitel 5.2) und Batteriealterung. In diesem Arbeitspaket wurde eine Optimierungsmethode zur Bestimmung der optimalen Ladestrategie entsprechend der Ergebnisse von AP 5.1.1 ermittelten Kriterien entwickelt. Da zu dem Zeitpunkt noch keine Informationen zu den in der Flotte verwendeten Batterietypen vorlagen, sollten zunächst für drei typische Batterietypen (Mischoxid NMC, Titanat, Eisenphosphat LiFePO₄) Modellannahmen getroffen werden und je eine optimale Ladestrategie ermittelt werden. Die Varianz der Betriebskosten für verschiedene Zelltypen zeigt exemplarisch den Einfluss der Batteriealterung. Daraus konnten Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Strategien abgeleitet werden. Anzustreben war eine idealtypische Umsetzung von Ladestrategiekonzepten, bei der die Forschung optimale Ziele ermittelt, welche in die Praxis umgesetzt werden können.

5.1.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

In Zeiten beständig hoher Kraftstoffpreise und strenger werdender Gesetzgebungen hinsichtlich CO₂-Emissionen und städtischer Luftqualität steht dem Verkehrssektor, mit seiner fast vollständigen Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, in den kommenden Jahren ein radikaler Wandel bevor. Dies gilt insbesondere für den Logistiksektor (wie z.B. Paketdienste), welcher stark auf Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren beruht. In diesem Zusammenhang ist der Ersatz von konventionell angetriebenen Lieferwagenflotten durch alternativ angetriebene Fahrzeuge unerlässlich. Insbesondere elektrische Antriebstechnologien haben das Potenzial, eine wichtige Rolle in der Reorganisation von Fahrzeugflotten zu spielen, da ihre typischen Nachteile – begrenzte Reichweite und geringe Geschwindigkeit – in städtischen Fahrzyklen nicht ins Gewicht fallen, während die bekannten Vorteile – betriebswirtschaftliche Effizienz und (lokale) Emissionsfreiheit – erhalten bleiben.

Auf Basis projektbezogener Daten der Deutschen Post DHL wurde eine ausführliche Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt, die sämtliche relevanten Kosten für eine Umstellung des Antriebs einer Zustellfahrzeugflotte erfasst. Für die Elektrofahrzeuge wurde eine Nutzungsdauer von 10 Jahren angenommen. Um ein detailliertes Kostenmodell mit allen wesentlichen ökonomischen und technischen Charakteristika herzuleiten, wurden zunächst alle relevanten Kostenelemente identifiziert und sodann eine ausführliche Kapitalwert- (Net Present Value) bzw. Total Cost of Ownership (TCO)-Berechnung durchgeführt. Neben direkten Fahrzeugkosten wurden auch indirekte Kosten, wie z.B. Kosten für den Bau und die Installation der Ladeinfrastruktur, betrachtet. Für die Elektrifizierung der Fahrzeuge werden zwei Batterietechnologien genutzt, die sich u.a. in Kapazität und somit Reichweite, Anschaffungspreis und Lebensdauer unterscheiden.

Hierzu führte das FCN eine Wirtschaftlichkeitsanalyse der Gesamtfahrzeugflotte über die Lebensdauer (Total Cost of Ownership) durch, d.h. es erfolgte ein Vergleich der Kosten und Erlöse von Elektrofahrzeugen und konventionellen Zustellfahrzeugen. Um die ökonomische Vorteilhaftigkeit des

Projekts zu bestimmen, wurden die Elektrofahrzeuge und die konventionellen Zustellfahrzeuge unter der Berücksichtigung und Abdiskontierung aller über die Zeit anfallenden Kosten auf einen Gegenwartswert verglichen.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse basierte dabei auf drei Hauptkostenblöcken, die zu Beginn des AP 6.1.3 quantifiziert werden mussten:

1) Investitionskosten: Anschaffungskosten der Fahrzeuge in Abhängigkeit der Batteriegröße; Anschaffungs- und Installationskosten (Personal- und Materialkosten) für die Ladeinfrastruktur, in Abhängigkeit von Flottengröße und Leistungsmerkmalen der Ladestationen (Schnell-, bidirektionale Ladefähigkeit etc.) bzw. den baulichen Gegebenheiten (vorhandene Stromleitungen, Transformatoren etc.);

2) jährliche Fixkosten: Kosten für Wartung und Reparatur, Versicherungen, KFZ-Steuern etc.; und

3) variable Kosten: Abnutzungskosten der Batterie (Batteriealterung) und Energiekosten für Benzin/Diesel oder Strom. Berechnungen erfolgten aufgrund von empirischen Daten aus dem Flottenbetrieb und dem Modell zur ökonomisch optimalen Ladestrategie und (historischen) Verbrauchsdaten konventionell betriebener Zustellfahrzeuge aus denselben Zustellbezirken, um vergleichbare Verbrauchsdaten zu generieren (gemittelt über Zeit, Fahrer, Routen, Verkehrslage etc.). Die Energiepreise und ihre zukünftige Entwicklung wurden mittels einer eigenen Simulation (geometrische Brown'sche Bewegung) abgebildet. Da Energiepreisentwicklungen mit sehr viel Unsicherheit behaftet sind, wurden zusätzlich verschiedene Szenarien angenommen. Das optimistische und das pessimistische Szenario ergaben sich z.B. jeweils durch Anpassung der Preiswachstumsrate um eine halbe Standardabweichung.

Der Fokus einer ersten Recherche lag entsprechend der drei Hauptkostenblöcke auf der Auswahl und Analyse der wichtigsten Kostenkomponenten der Elektrifizierung von Fahrzeugflotten und umfasste neben einer ausführlichen Literaturrecherche auch zahlreiche Experteninterviews. Die gesammelten Daten zu den Kosten von Fahrzeugen, Batterien (Hochtemperatur- und Li-Ion-Akkumulatoren), Transformatoren, Ladestationen, der Kommunikationstechnologie zum Betrieb der Ladeinfrastruktur, sowie der benötigten baulichen Maßnahmen (z.B. Installation der Infrastruktur und Erdarbeiten) wurden in einer Datenbank zusammengeführt.

Basierend auf der Datenbank wurde ein erstes Modell zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugflotten aufgestellt. Erste Ergebnisse zeigten, dass eine Elektrifizierung von Transportfahrzeugflotten in naher Zukunft nicht rentabel durchzuführen ist (von der Batterietechnologie abhängige Mehrkosten von ca. 1,8-2,4 Mio. Euro im Vergleich zu Dieselfahrzeugen, bei einer Flottengröße von 30 Fahrzeugen), die gewählte Ladestrategie im Fall von Li-Ion-Akkumulatoren diese Mehrkosten jedoch um bis zu 400.000 Euro senken kann. In einem nächsten Schritt wurde dieses Modell verfeinert und die einzelnen Parameter einer Sensitivitätsanalyse unterzogen.

Abschließend ermittelte das FCN die Wirtschaftlichkeit des Projekts für verschiedene Emissionsszenarien (Nichtberücksichtigung von Emissionen, Minimierung der Emissionen, ökonomisch-ökologische Optimierung), basierend auf den Ergebnissen von AP 6.1.2.

5.1.4 Entscheidungsmodell zur Flottenumstellung

Das FCN entwickelte ein komplexes Entscheidungsmodell, welches die Umstellung einer Transportfahrzeugflotte (z.B. für Paketzustellungen, Handwerkerdienstleistungen etc.) im Zeitverlauf ökonomisch und/oder ökologisch, basierend auf den Erkenntnissen der Wirtschaftlichkeitsanalyse für das konkrete Flottenprojekt, optimiert. Neben den in anderen Arbeitspaketen ermittelten Daten, wurden Batteriepreisentwicklungen, Infrastrukturkostenentwicklungen, aber auch die Kostenentwicklungen bei konventionellen und elektrischen Antrieben mit Hilfe von Daten aus der Literatur geschätzt (Verwendung bestehender Lernkostenkurven) oder selbst modelliert (Simulation der Kostenverläufe mittels stochastischer Prozesse).

Dem entwickelten Entscheidungsmodell für eine zeitlich optimale Elektrifizierung einer Fahrzeugflotte liegt die Realloptionentheorie zu Grunde. Wichtige zu berücksichtigende Kriterien und Modellierungsoptionen wurden identifiziert. Des Weiteren wurde, basierend auf historischen Daten, die Entwicklung von Kraftstoff- und Elektrizitätspreisen stochastisch modelliert. In einem nächsten Schritt wurden diese in das zu erstellende komplexe Entscheidungsmodell überführt.

Darüber hinaus können die in Kapitel 6.2.2 ermittelten Emissionen der Stromerzeugung bei der Modellierung der ökologischen Zielvariablen eingesetzt werden. Grundlage des entwickelten ökonomischen und/oder ökologischen Modells bildete die Realloptionentheorie (Schwartz 2004), die Unsicherheiten bei der Investitionsentscheidung stärker berücksichtigt und damit flexibler als die klassische Wirtschaftlichkeitsanalyse ist. Möglichen Erkenntnisgewinnen über Markt-, Emissions- und Preisentwicklungen in der Zukunft wurde ein Wert zugeordnet (Wert des Wartens), der dann in die unternehmerische Entscheidung einfließen kann, sodass z.B. Investitionsentscheidungen noch verschoben oder verändert werden können (monetäre Quantifizierung von Reaktionsmöglichkeiten). Diese Entscheidungsflexibilität ist vor allem in der unternehmerischen Realität bei ständig wiederkehrenden Entscheidungen gegeben (z.B. Anschaffung von Transportfahrzeugen), sodass diese durch die Realloptionentheorie gut abgebildet wurden. Die Konzeption des theoretischen Modells erfolgte in diesem AP.

Auf Basis des Realloptionenmodells und der Daten aus früheren APs wurden die wiederkehrenden Fahrzeuersatzentscheidungen optimiert. Hierbei wurde explizit die Entscheidungssituation unter Unsicherheit berücksichtigt. Dabei fand ein Vergleich der Ergebnisse der Realloptionenberechnung mit Resultaten der klassischen statischen Analyse aufgrund verschiedener hypothetischer Szenarien hinsichtlich z.B. Batterie- und Strompreisentwicklungen mittels Monte-Carlo-Simulation und hinsichtlich verschiedener Gewichtungen von ökologischen Gesichtspunkten (z.B. Minimierung der Kosten vs. Minimierung der CO₂ Emissionen) statt.

5.1.5 Nutzerakzeptanzbefragungen

Es gibt viele Bemühungen zur E-Auto-Akzeptanz privater Nutzer, die u.a. Kaufabsichten in Abhängigkeit zu Eigenschaften wie Reichweite und Preis der E-Autos untersuchen. Allerdings ist es gerade für eine erfolgreiche Markteinführung von E-Autos wichtig zu untersuchen, unter welchen Einflüssen Mitarbeiter im gewerblichen Umfeld (im Gegensatz zum privaten Umfeld) E-Autos akzeptieren. Mit der Einführung neuer Technologien in Unternehmen können Unterinanspruchnahme oder Reaktanzen wie z.B. Widerstand, Nichtannahme, Außerbetriebnahme, Vermeidung und Umgehungen, Aufhebungen und

Sabotage auftreten (Holden und Karsh 2010, S. 159). Um dies zu vermeiden, legen Studienergebnisse fest, welche kritischen Faktoren in einem Unternehmen eine Akzeptanz/Nichtakzeptanz beeinflussen. Dazu wurde das TAM entwickelt. Die vorliegende Studie verbindet das aus der Wirtschaftsinformatik stammendem Technologieakzeptanzmodell (TAM, Abbildung 15) von Davis (1986, 1989) und Davis et al. (1989) mit der Einführung von E-Autos in der Kurier-Express-Paket (KEP)-Branche.

Die vorliegende Studie begründet laut TAM auf der Annahme, dass eine *Nutzungsabsicht* zu einer tatsächlichen Nutzung (Nutzungsverhalten) und somit zur Akzeptanz der Technologie führt (Davis 1986, S. 24, 1989; Davis et al. 1989). Die *Nutzungsabsicht* ist abhängig von den Einflüssen der *wahrgenommenen Nützlichkeit* und der *wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit*.

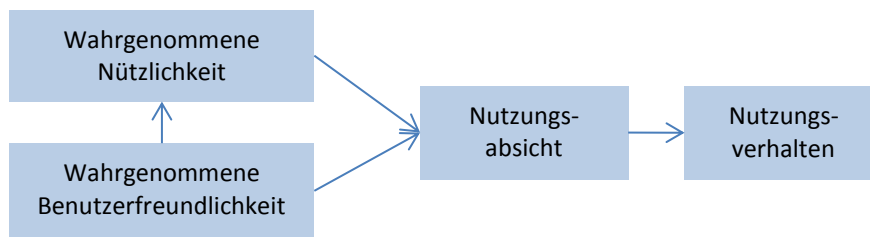


Abbildung 15 Die vier Hauptkonstrukte des Technologieakzeptanzmodell (TAM) und dessen kausale Zusammenhänge

Die *wahrgenommene Nützlichkeit* ist die „[...] subjektiv wahrgenommene Wahrscheinlichkeit, dass die jeweilige Technologie die Leistung im Beruf steigert“ (Davis 1986, S. 136; Übersetzung aus Wissmann 2013, S. 72).

Die *wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit* wird mitunter auch als *wahrgenommene Einfachheit der Nutzung* bezeichnet und „[...] bezieht sich auf den wahrgenommenen Grad einer Technologienutzung ohne Anstrengungen“ (Wissmann 2013, S. 72). Oder mit anderen Worten, inwiefern der „Nutzer das System ohne physische und mentale Anstrengungen benutzen kann“ (freie Übersetzung nach Davis 1986, S. 136).

Prinzipiell wird in dem untersuchten Unternehmen ein Arbeitsmittel/System (Technologie „konventionelles Auto“) durch ein anderes (Technologie „E-Auto“) ersetzt. Die vorliegende Studie untersucht, ob und wie gewerbliche Endnutzer diese neue Technologie „E-Auto“ akzeptieren, d.h. es wird die Mitarbeiter-Akzeptanz gegenüber dem neuen Arbeitsmittel erfasst.

Es gibt einige Studien und Lösungsansätze, weshalb potentielle Nutzer dem E-Auto noch aus dem Wege gehen (vgl. Hidrue et al. 2011). Peters und Hoffmann (2011) wenden für ihre Studie zur Nutzerakzeptanz von E-Autos im privaten wie auch gewerblichen Gebrauch die Fokusgruppen-Methode an und befragen die Fahrzeugbesitzer/Unternehmer. Dudenhöffer (2013) und Fazel (2014) nutzen für ihre Studien im Bereich privater E-Autos das Technologieakzeptanzmodell. In der Literatur werden neben Diffusionsmodellen und den hohen monetären bzw. Umwelt-Kosten von gewerblichen Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen gewerblichen Fahrzeugen (Davis und Figliozzi 2013; Soldado et al. 2015) auch sozio-ökonomische Aspekte betrachtet (Steinhilber et al. 2013, S. 533). Es gibt jedoch nur wenige Studien (Globisch et al. 2013; Globisch und Elisabeth Dütschke 2013), welche die Akzeptanz der gewerblichen Endnutzer, also die letztendlichen Fahrer der EV, untersuchen.

Ziel dieses Fragebogens ist die Technologieakzeptanz der Mitarbeiter gegenüber der neuen Technologie E- durch ein Modell zu erklären und dieses Modell empirisch zu testen.

Im Vergleich zu vorherigen Studien der Technologieakzeptanzforschung in Unternehmen herrscht in der vorliegenden Studie ein ausschlaggebender Unterschied vor: Das Betriebsmittel „Dieselfahrzeug“ wurde durch „Elektrofahrzeug“ ersetzt. Diese Elektrozustellfahrzeuge (E-ZFZ) werden bei der Deutschen Post DHL im Gegensatz zu den meisten Technologiumstellungen (z.B. neue IT-Systeme) in Unternehmen nicht primär dafür eingesetzt, um den Betriebsablauf zu beschleunigen (Automatisierungssysteme) oder um Mitarbeiter zu entlasten (Informations(-logistik-)systeme), sondern um Betriebskosten zu senken und die Umwelt zu schützen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 21.05.2013).

Das vorliegende Modell berücksichtigt Studien zur Nutzerakzeptanz von Elektrofahrzeugen sowohl im Privat- als auch im gewerblichen Gebrauch in Deutschland (Dudenhöffer 2013; Globisch et al. 2013; Peters und Hoffmann 2011; Fazel 2014). Dadurch wird eine größtmögliche Vergleichbarkeit der vorliegenden Studie mit verwandten Studien gewährleistet (Olbrecht 2010, S. 100). Wie die oben erwähnten vorangegangene TAM-Studien ist auch diese TAM GoGreen-Befragung stark an den Kontext E-ZFZ in der Zustellung angepasst, d.h. sie ist wiederholbar und standardisiert für den Kontext Elektromobilität in der Zustellung, jedoch sind für eine Anwendung des TAM GoGreen in anderen Kontexten Anpassungen notwendig (Netemeyer et al. 2003, S. 3–4).

Globisch et al. (2013) untersuchen die Nutzerakzeptanz von E-Autos sowohl im Privat- als auch im Gewerbegebrauch. Da sich in ihrer Stichprobe die Nutzung des E-Autos noch im Anfangsstadium befindet und das E-Auto nicht regelmäßig genutzt werden kann, definieren sie Nutzerakzeptanz als wahrgenommene Nützlichkeit (Globisch et al. 2013, S. 977). Außerdem nutzen Globisch et al. (2013, S. 977) aufgrund des Anfangsstadiums der E-Fahrzeugverbreitung kein Modell (d.h. nicht das TAM bzw. die Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) nach Venkatesh et al. (2003), sondern einen eigens für die Studie entwickelten Fragebogen.

Im Gegensatz zu Globisch et al. (2013) geht die vorliegende Studie zwei Schritte weiter, da die untersuchte Stichprobe (die ZustellerInnen) das E-ZFZ seit mehr als ca. 3 Jahren von Mo-Sa im Arbeitszeitrahmen 06:00-18:00 Uhr nutzt.

Die Erfassung und Umsetzung der Einschätzungen, Erfahrungen und Verbesserungsvorschläge der ZustellerInnen bei der täglichen Nutzung von Fahrzeug und Ladeinfrastruktur erlauben eine Optimierung des Betriebsablaufs und sind somit ein elementarer Baustein für eine erfolgreiche Akzeptanz der neuen Technologie.

Um die nicht beobachtbaren Einstellungen und das Akzeptanzniveau der Mitarbeiter gegenüber den E-ZFZ zu quantifizieren, werden diese mit Hilfe von Konstrukten erfasst. Konstrukte sind nicht beobachtbare Einstellungen, die mit Hilfe von Indikatoren bzw. Fragen und zu bewertende Aussagen (sog. Items) erschlossen werden. Konstrukte erfassen die Zusammenhänge zwischen Antworten der zu beantwortenden Fragen bzw. der zu bewertenden Aussagen. Hinter jedem Konstrukt verbirgt sich eine psychologische Theorie, die „empirisch untersucht und gesichert sein“ muss (Bühner 2011, S. 31). Hypothetische Konstrukte sind verborgen, d.h. nicht direkt beobachtbar (latent) und sind nicht mit einem einzelnen Wert messbar. Daher werden hypothetische Konstrukte in der Fachliteratur als latente

Variablen bezeichnet. Latente Variablen werden über Stellvertretervariablen messbar bzw. durch (beobachtbare) Indikatoren (sog. Items, also Fragen und Aussagen) sichtbar gemacht.

Aufgrund der Neuheit der elektrischen Zustellflotte existierte noch kein Fragebogen für gewerbliche Nutzer von Elektrofahrzeugen. Daher musste für die Nutzerakzeptanzbefragung ein neuartiger Fragebogen entwickelt werden. Der Fragebogen basiert auf dem oben genannten Technologieakzeptanzmodell (TAM), aktuellen Erkenntnissen der Fachliteratur und Erfahrungen aus den deutschen „Modellregionen Elektromobilität“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2017; Globisch und Elisabeth Dütschke 2013; Hacker et al. 2011) und „Schaufenster Elektromobilität“ (VDI/VDE Innovation + Technik GmbH 2017).

Deshalb hat das FCN eine Nutzerakzeptanzbefragung wissenschaftlich vorbereitet und mithilfe des Projektpartners Deutsche Post DHL vor Ort an den Zustellstützpunkten durchgeführt. Die Fragebogenentwicklung umfasste die Auswahl der Skalen und Items zur reliablen und validen Messung der Bewertungskriterien, wie z.B.

- Einfachheit und Komfort der Bedienung des Fahrzeugs und der Ladeinfrastruktur
- Zuverlässigkeit von Fahrzeug und Ladeinfrastruktur
- Verbesserungsvorschläge für den täglichen Betriebsablauf
- Psychologische Faktoren:
 - die Zufriedenheit der ZustellerInnen mit der neuen Technologie (in Abhängigkeit ihrer Technikbegeisterung): wahrgenommener Nutzen und wahrgenommene Einfachheit der Nutzung
 - Veränderungen der Motivation (aufgrund geringerer Lärmemissionen oder höherer Beschleunigung der Fahrzeuge)
- Positive Erfahrungen, wie z.B. Aufmerksamkeit, positive Wahrnehmung durch die Gesellschaft aufgrund der neuen umweltschonenden Technologie

Die Nutzerakzeptanzbefragungen wurden nach Absprache mit dem Projektpartner per anonymem Fragebogen durchgeführt. Zuvor wurde der Fragebogen innerhalb einer Fokusgruppe auf inhaltliche und äußerliche Verständlichkeit getestet.

5.2 Ausgangssituation und Stand der Wissenschaft: Auswirkungen des Flottenbetriebs auf das Stromnetz

Der Betrieb von Elektrofahrzeugen führt unweigerlich zu Auswirkungen auf das Stromnetz, wenn die Fahrzeuge geladen werden müssen. Dies gilt insbesondere für Fahrzeugflotten, die tagsüber für Zustelldienste genutzt werden und deshalb abends zeitgleich zum Aufladen ans Netz gehen. Die Ladestrategie hat deshalb einen entscheidenden Einfluss auf den zeitgleich auftretenden Leistungsbedarf und damit auch auf die Auswirkungen auf das Verteilnetz. Diese können finanzieller Natur sein, d.h. die Ausgestaltung der Netzinfrastruktur muss sich an den potentiellen, gebündelt

auftretenden Spitzenlasten orientieren, sie können aber auch Umweltaspekte berühren, wenn durch zeitlich gesteuertes Laden z.B. das fluktuierende Angebot an Windenergie aufgenommen wird, oder aber im Gegenteil nachts vor allem Kohlestrom geladen wird. Diese Umweltwirkungen dürfen bei der Beurteilung von Elektrofahrzeugen nicht vernachlässigt werden.

Die Zustellfahrzeuge haben im Regelfall eine Standzeit von 13 Stunden (ca. 18-7 Uhr), was sie für die Anwendung eines gesteuerten Ladevorgangs prädestiniert, da der Zeitraum bis zum nächsten Einsatz ausreichend lang ist, um den Ladevorgang flexibel zu gestalten, d.h. z.B. für mehrere Stunden zu verschieben, hinein in die nächtliche Niedriglastphase. Eine weitere Möglichkeit eröffnet sich für Elektrofahrzeuge auf dem Markt der Netzdienstleistungen, die diese mit ihrer Batterie anbieten können. Hierbei spielt wiederum die Leistung des Anschlusses eine entscheidende Rolle und muss somit in die Kalkulationen mit einbezogen werden.

Hauptaugenmerk dieses Arbeitspakets lag deshalb auf den durch verschiedene Ladestrategien induzierten finanziellen und umweltrelevanten Netzauswirkungen.

Die Ladestrategie hat einen entscheidenden Einfluss auf den Leistungsbedarf und damit auf die Kosten des Netzanschlusses. Gleichzeitiges Laden mit hoher Leistung erhöht die Flexibilität der Flotte, aber erhöht auch den leistungsbezogenen Anteil der Strombezugskosten. Geeignete Ladestrategien können die damit verbundenen Kosten minimieren. Ladestrategien beeinflussen somit direkt die Kosten der Aufrechterhaltung der Netzstabilität vor allem im Verteilnetz; dies gilt insbesondere für große Elektrofahrzeugflotten. Des Weiteren beeinflusst die gewählte Ladestrategie aber auch die jeweiligen Emissionen des geladenen Stroms, je nach Situation (z.B. hohes Angebot an Windenergie an stürmischeren Tagen) oder Zeit (Spitzenlast eher durch Gaskraftwerke bereitgestellt, Grundlaststrom hauptsächlich durch Atom- und Kohlekraftwerke). Ziel dieses Arbeitspakets waren deshalb: die Ermittlung der Beeinflussung der Stromnetzstabilität sowie eine Lebenszyklusanalyse.

5.2.1 Ermittlung der Beeinflussung der Stromnetzstabilität

Hier lag das Hauptaugenmerk auf einer ausführlichen Literaturrecherche in verschiedenen thematischen Bereichen, der Sammlung und Generierung von Daten und der Auslegung und Planung der Ladeinfrastruktur und des Netzanschlusses an den geplanten Standorten.

Die Wahl der Steuerungsstrategie für das Laden von Elektrofahrzeugen wirkt sich direkt auf elektrische Verteilnetze aus. Art und Höhe der Auswirkung wurden in diesem AP gemeinsam durch FCN und PGS quantifiziert. Schwerpunkte waren, wie sich die Netzbelastung durch den Einsatz unterschiedlicher Ladestrategien ändert und wie die Netzstabilität bei unterschiedlichen Ladestrategien beeinflusst wird. Untersucht wurde insbesondere, welcher Netzausbaubedarf je nach Ladestrategie erforderlich ist. Folgende vier Aspekte ergaben sich für dieses AP für das FCN in Zusammenarbeit mit dem PGS:

Mögliche Steuerungsstrategien für das Laden können durch verschiedene Zielfunktionen abgebildet werden. Die nachfolgenden Betriebsweisen waren zu Beginn identifiziert:

- 1) Betriebliche Zielfunktion: Maximierung der Reichweite der Elektrofahrzeugflotte;
- 2) Ökonomische Zielfunktion: Minimierung der Strombezugskosten;

- 3) Technische Zielfunktion: Minimierung der Betriebsmittelbelastung im Stromnetz; und
- 4) Ökologische Zielfunktion: Minimierung der CO₂ Emissionen unter Berücksichtigung des Kraftwerkparks.

Anhand der Ergebnisse der Optimierung, die eine Berechnung der Lastflüsse im gegebenen Stromnetz einschloss, konnte der notwendige Netzausbau identifiziert werden.

5.2.2 Lebenszyklusanalyse

Eine Lebenszyklusanalyse bewertet die ökologische Vor- oder Nachteilhaftigkeit der Elektrofahrzeugflotte im Vergleich zu konventionellen Transportfahrzeugen. In einem ersten Schritt wurden die Kriterien ermittelt, hinsichtlich derer die Analyse erfolgen sollte (Einbeziehung weiterer (Luft-) Schadstoffe, neben CO₂), sowie die Detailliertheit der Analyse (ab welcher Produktionsstufe wird analysiert). Im Februar 2015 besuchten der Institutsleiter Herr Professor Madlener und Frau Stefanie Wolff die Produktionsstätte des StreetScooters in Aachen und tauschten sich mit dem Produktionsleiter Herrn Reil über die Fahrzeuge und der zu verwendenden Parameter für die Lebenszyklusanalyse bzgl. der StreetScooter-Fahrzeuge aus.

Auf Basis der ermittelten Kriterien und von Daten aus z.B. Energiebilanzen, Stoffstromanalysen und den in den Kapiteln 5.1.1, 5.1.2 und 5.2.1 und in vom PGS bearbeiteten Teilarbeitspaket *Bewertung der ökologischen Folgen in Abhängigkeit verschiedener Ladestrategien* ermittelten Emissionswerten, wurden die potentiellen CO₂- und anderen Luftschadstoffemissionen über die gesamte Produktlebensdauer bzw. Wertschöpfungskette erfasst und bewertet. Neben der Betrachtung des Energie- und Materialeinsatzes bei der Herstellung bzw. dem Recycling der Fahrzeuge (insbesondere die Batterie und die zusätzlich benötigte Ladeinfrastruktur stehen hier im Fokus) wurde in diesem Projekt ein besonderes Augenmerk auf die Unterschiede während des Betriebs (Emissionen in Abhängigkeit der Ladestrategie) der Fahrzeuge gelegt. Ergebnisse der Ökobilanzierung dienten als Input für Kapitel 5.1.2 bzw. 6.1.2, wurden aber auch rückwirkend durch dieses AP beeinflusst. Des Weiteren wurden neben den bereits genannten Luftschadstoff-Emissionen auch die Unterschiede in den Lärmemissionen während des Betriebs erfasst und analysiert.

5.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Um die Ziele des Projektantrages zu erreichen, wurde folgende Arbeitsteilung vorgenommen:

- Literaturrecherche
- Datenakquisition: Für die Lebenszyklusanalyse und die Entwicklung und Durchführung eines Fragebogens erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit Deutsche Post DHL inkl. persönlicher Treffen und einem Pre-Test des Fragebogens in einem Zustellstützpunkt. Zudem wurden Weiterbildungs-Veranstaltungen in der Form von Summer Schools besucht.
- Zusammenarbeit mit Dritten: Bezüglich Vorhersagen der CO₂ Emissionen des Kraftwerkparks in Deutschland im Jahr 2020 haben sich Mitarbeiter des PGS und des FCN

mit Mitarbeitern des Instituts für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW) der RWTH Aachen getroffen um Kenntnisse auszutauschen.

- Projektpartnertreffen: Im Rahmen von Projektpartnertreffen mit Deutsche Post DHL, Langmatz GmbH, Device Insight GmbH, PGS sowie DPOR in Bonn und RWTH-internen Besprechungen in Aachen wurden die bisherigen Erkenntnisse, der konkrete Projektstatus und der weitere Zeitplan ausgetauscht bzw. abgestimmt.
- Ausschreibung und Durchführung von Abschlussarbeiten, um Teilaspekte der Arbeitspakete abzudecken.

6 Ergebnisse des FCN

6.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse und Untersuchung der Ladestrategie: techno-ökonomische Optimierung und Nutzerverhalten

6.1.1 Kriterien zur Beurteilung von Ladestrategien

Folgende Kriterien lagen der techno-ökonomischen und ökologischen Analyse verschiedener Ladestrategien zu Grunde:

Analyse der verschiedenen Kostenkomponenten von Ladesystemen	= Investitionskosten für verschiedene Ladegeräte (on-/off-board) = Netzanschlusskosten = Transformatorstation = Elektrische Vernetzung des Parkplatzes = Ladesäulen = Kosten für IKT-Infrastruktur
Einfluss von verschiedenen Ladekonzepten auf Batterie-dimensionierung/Batteriealterung	= Standard- und Schnellladung = induktives vs. induktives Laden = Gleichzeitigkeit der Ladung

Abbildung 16 Kriterien zur Beurteilung von Ladestrategien

6.1.2 Optimierung der Ladestrategien

Die Optimierung der Ladung erfolgte unter den **Randbedingungen**:

- Nutzerverhalten (Einsatzprofile/Fahrt- und Standzeiten, Energieverbrauch)
- Marktbasierter (zeitvariabler) Strompreis
- CO₂-Emissionen der Stromerzeugung und Batteriealterung

Die Optimierung der Ladung erfolgte unter den **Annahmen**:

- Betrachtung zweier Batterietechnologien: ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activities) und Li-Ion
- Reduzierung der Batteriekosten
 - Senkt Investitionskosten für E-Fahrzeuge signifikant
 - Verkleinerung der Batterie (führt jedoch zu geringerer Reichweite)
- Li-Ion: Batteriealterung
 - Senkt Speicherfähigkeit

- Ladezustand beeinflusst Lebensdauer
- Betrachtung der Anforderung des Kunden an das E-Fahrzeug
 - 30 E-Fahrzeuge, Lebensdauer 10 Jahre
 - Min./max. Routenlänge

Die Ergebnisse für beide Batterietechnologien (ZEBRA und Li-Ion) lassen sich in einen Standardfall und sechs verschiedene Ladestrategien unterteilen (Abbildung 17):

Für den Standardfall wird angenommen, dass die Fahrzeuge unmittelbar nach dem Eintreffen im Depot mit der Ladestation verbunden werden und die Akkus vollständig geladen werden. Wir haben es hier mit einer ungesteuerten Ladeinfrastruktur zu tun. Die Li-Ionen-Akkus der E-Fahrzeug-Flotte fallen unter diesen Bedingungen nach 6 Jahren aus und müssen neu angeschafft werden.

Für die Ladestrategie 1 werden preisvariable Stromtarife angenommen, bei dem der Nachtтариф 8% günstiger ist als der Tagestarif. In diesem Fall haben wir es mit einer gesteuerten Ladeinfrastruktur zu tun.

Zweck der Ladestrategie 2 ist es, die Akkus erst kurz vor Fahrtbeginn vollständig zu laden. Dahinter steckt die Überlegung, die Akkus während der Standzeiten so lange wie möglich in einem geringen Ladezustand zu halten, um damit deren Lebensdauer zu erhöhen. Davon ist nur die Li-Ionen-Flotte betroffen, sodass für die ZEBRA-Flotte kein Einfluss besteht. In diesem Fall erhöht sich die Lebensdauer von 6 auf 7,3 Jahre. Diese Ersparnis reicht jedoch nicht aus, um die höheren Kosten für die gesteuerte Ladeinfrastruktur zu kompensieren. Somit bietet diese Strategie keinen Mehrwert.

Ladestrategie 3 ist eine Erweiterung der 2. Ladestrategie. So werden die Fahrzeuge ebenfalls erst kurz vor Beginn der Fahrt geladen. Darüber hinaus werden die Akkus nur so voll geladen, wie es maximal notwendig wäre. In diesem Fallbeispiel beträgt die maximale Energiemenge für die längste Fahrtstrecke 30,4 kWh pro Tag. Die Auswirkungen dieser Ladestrategie auf die Lebensdauer der Akkus sind erheblich: Die Akkus fallen statt nach 6 erst nach ca. 13 Jahren aus. Die Lebensdauer wird mehr als verdoppelt.

Ladestrategie 4: Bis jetzt werden alle Fahrzeuge gleichzeitig geladen. Dadurch ergibt sich eine hohe Anschlussleistung, sodass ab 60 kW eine Trafostation errichtet werden muss. Die 4. Ladestrategie minimiert nun diese Anschlussleistung. Die gesamte Flotte verbraucht im Winter durchschnittlich 515,5 kWh/Tag. Während der 12-stündigen Ladephase wird eine konstante Leistung von etwa 43 kW benötigt. Somit entfällt die Trafostation. Jedoch steigen die Strombezugskosten um 20 %. Trotzdem können so die Kosten der Li-Ionen-Flotte im Vergleich zum Standardfall um etwa € 400.000 gesenkt werden.

Die beiden hervorstechenden Ladestrategien sind: Für die Ladestrategie 5 werden vehicle-to-grid-Dienste (V2G) ohne Berücksichtigung der Batteriealterung angenommen, d.h. hier werden die negative Effekte des bidirektionalen Ladens auf die Batteriealterung vernachlässigt. Für die Rückspeisung der in den Akkus gespeicherten Energie während der Ladephase können Erlöse am Energiemarkt erzielt werden. Hier wird ein Mittelwert von € 150 pro Fahrzeug und Monat angenommen, welcher mit großen

Unsicherheiten behaftet ist. Die Einnahmen durch V2G-Dienste überwiegen die Mehrausgaben für eine intelligente Ladeinfrastruktur und spezielle Software, sodass diese Strategie für die ZEBRA-Flotte die geringsten Total Cost of Ownership (TCO) aufweist.

In der Ladestrategie 6 werden nun Alterungseffekte der Batterien berücksichtigt. Ziel ist die Kopplung von Strategie 3 und Strategie 5. Es werden also eine Minimierung der Batterieladung (State-of-charge, SOC) und V2G-Dienste unterstellt, die gleichzeitig die Lebensdauer der Akkus positiv beeinflussen. Für die Li-Ionen-Flotte fallen hier die geringsten TCO an, da die Akkus während der Lebensdauer der Fahrzeuge von 10 Jahren nicht ersetzt werden müssen. Die ZEBRA-Fahrzeuge profitieren hier nur durch die Einnahmen von V2G-Diensten.

Standardfall	= ungesteuerte Ladeinfrastruktur
1. Preisvariable Stromtarife	= gesteuerte Ladeinfrastruktur = Nachttarif 8% günstiger als Tagestarif
2. Zeitverschobenes Laden	= Akkus erst kurz vor Fahrtbeginn vollständig laden
3. Minimierung des State of Charge	= Erweiterung der 2. Ladestrategie = Akkus nur so viel geladen, wie max. notwendig
4. Minimierung der benötigten Anschlussleistung	= Fahrzeuge nicht gleichzeitig laden = Trafostation entfällt = während 12-stündiger Ladephase wird konstante Leistung von 43 kW benötigt
5. V2G-Dienste ohne Berücksichtigung der Batteriealterung	= negative Effekte des bidirektionalen Ladens auf Batteriealterung vernachlässigt = Erlöse am Energiemark: Mittelwert von € 150 pro Fahrzeug und Monat
6. V2G-Dienste unter Berücksichtigung der Batteriealterung	= Erlöse am Energiemark: Mittelwert von € 150 und Fahrzeug pro Monat

Abbildung 17 Optimierung der Ladestrategien: Standardfall und sechs verschiedene Ladestrategien

Unterteilt nach den beiden Batterietechnologien (ZEBRA und Li-Ion) ergeben sich die Endergebnisse in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellten Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership).

Betrachteter Fall	Total Cost of Ownership (TCO) der ZEBRA-Flotte (€)	TCO der Lithium-Flotte (€)
Standardfall	4.083.599	4.448.980
Ladestrategie 1: Preisvariable Stromtarife	4.123.609	4.499.380
Ladestrategie 2: Zeitverschobenes Laden	Kein Einfluss	4.464.372
Ladestrategie 3: Minimierung des State of Charge	Kein Einfluss	4.094.681
Ladestrategie 4: Minimierung der benötigten Anschlussleistung	4.135.295	4.053.247
Ladestrategie 5: V2G-Dienste ohne Berücksichtigung der Batteriealterung	3.750.346	4.115.727
Ladestrategie 6: V2G-Dienste unter Berücksichtigung der Batteriealterung	4.042.434	4.033.765

Abbildung 18 Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership) unterteilt nach Batterietechnologien (ZEBRA und Li-Ion)

ZEBRA-Flotte	= Höchste Kosteneinsparungen durch V2G ohne Berücksichtigung der Batterielebensdauer	= Nutzung der Energiespeicher für V2G-Dienste
Lithium-Flotte	= Höchste Kosteneinsparungen durch V2G unter Berücksichtigung der Batterielebensdauer	= V2G-Dienste & lebensverlängernde Ladealgorithmen

Abbildung 19 Vergleich der Ladestrategien der Batterietechnologien ZEBRA und Li-Ion

Abschließend ist festzuhalten:

- Im Vergleich zum Standardfall (ungesteuertes Laden) sind durch (gesteuerte) Ladestrategien nur geringe Kostensenkungen möglich.
- Eine „intelligente Ladestrategie“ (z.B. zur Maximierung der Batterielebensdauer, Minimierung der Strombezugskosten, Minimierung der Anschlussleistung etc.) kann die TCO der Elektrofahrzeugflotte um ca. 8-9 % senken.
- Einnahmen durch V2G-Dienste (sekundäre Nutzungsmöglichkeit) unter realen Bedingungen unterschiedlich, jedoch könnten sie in Zukunft die TCO weiter senken.
- Vergleich mit TCO der Dieselfahrzeugflotte: Umstellung auf elektrische Antriebe insgesamt noch nicht wirtschaftlich.

Ein weiterer Ansatz hatte das Ziel, anhand des Feldversuches von Deutscher Post DHL in Bonn verschiedene Möglichkeiten, kommerziell genutzte Elektrofahrzeuge zu installieren und zu laden (Netzintegration und Ladestrategien), zu untersuchen.

- Für jede Entscheidungsalternative gilt:
 - Einbeziehung versch. Geschäftsmodelle und Trade-offs,
 - Entwicklung verschiedener Ladestrategien auf Basis der verfügbaren Alternativen,
 - Evaluierung basierend auf neuesten Energiedaten.

Als Methode wurde die multikriterielle Entscheidungsanalyse (Multiple-Criteria Decision Analysis, MCDA) durchgeführt. Die Entscheidungskriterien waren:

- CO₂-Emissionen
- Unbedenklichkeit (externe Effekte)
- Kosten
- Durchführbarkeit
- Umsetzbarkeit

Die untersuchten Ladestrategien waren:

1) Ladestrategien für **konventionelle Verträge**

- Unkontrolliertes Laden („Dummes Laden“)
- Grüner Stromanbieter
- „Mittagspause“-Ladestrategie
- Spitzenleistungssenkungs-Ladestrategie
(Laden, Schnellladen und erweitertes Schnellladen)

2) Ladestrategien für **Verträge mit variablen Preisen**

- Niedrigste Kosten
- Emissionssenkungs-Ladestrategie
- „Rund um die Uhr“-Emissionssenkungs-Ladestrategie
- Selbstversorgung durch Photovoltaik-System („PV-Strategie“)

Ergebnisse hinsichtlich der **Durchführbarkeit**, **Umsetzbarkeit** und der **Unbedenklichkeit** sind:

- Durchführbarkeit
 - Fast alle Ladestrategien sind einfach zu implementieren: Die „Mittagspause“-Ladestrategie lässt sich allerdings nur mit Schwierigkeiten in den Arbeitsablauf von Zustellrouten integrieren. Die „Rund um die Uhr“-Emissionssenkungs-Ladestrategie ist hingegen gar nicht im Arbeitsablauf durchführbar.
- Umsetzbarkeit
 - Alle Ladestrategien, bis auf die Spitzenleistungssenkungs-Lade- und PV-Strategie, wurden mit dem Maximalwert (=10) evaluiert. Die Spitzenleistungssenkungs-Ladestrategie ist aufgrund fehlender technischer Hürden nur mit einem Wert von 3 bewertet, die PV-Strategie ist aufgrund des hohen Komplexitäts- und Planungsaufwandes mit dem Wert 0 nicht umsetzbar.
- Unbedenklichkeit (externe Effekte)
 - Alle Alternativen bis auf Grüner Stromanbieter und PV-Strategie sind mit 0 bewertet. Die Strategie des Grünen Stromanbieters erhält eine Wertung von 7 (Externalitäten wie Netzerweiterung), wohingegen die PV-Strategie (keine bis kaum Externalitäten) mit 10 bewertet wird.

6.1.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Auf Basis projektbezogener Daten der Deutschen Post DHL wurde eine ausführliche Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt, die sämtliche relevanten Kosten für eine Umstellung des Antriebs einer Zustellfahrzeugflotte erfasst. Das Ziel war die Berechnung der Gesamtbetriebskosten (TCO) der Elektrofahrzeugflotte über die Lebensdauer (Kapitalwert, Net Present Value, NPV) und der Vergleich mit konventionellen Zustellfahrzeugen.

Um ein detailliertes Kostenmodell mit allen ökonomischen und technischen Charakteristika herzuleiten, wurden zunächst alle relevanten Kostenelemente beschrieben und identifiziert. Berücksichtigt wurden **direkte und indirekte Fahrzeugkosten**:

- direkte Fahrzeugkosten
 - Anschaffungskosten der Fahrzeuge in Abhängigkeit der Batteriegröße
 - Versicherungen
 - KFZ-Steuern
 - Energiekosten für Benzin/Diesel oder Strom (Abbildung 22)
- indirekte Fahrzeugkosten
 - Anschaffungs- und Installationskosten für die Ladeinfrastruktur (in Abhängigkeit von Flottengröße und Leistungsmerkmalen der Ladestationen bzw. den baulichen Gegebenheiten)

Zuerst werden im Folgenden die Annahmen der **direkten** Fahrzeugkosten erläutert. Die Daten stammen aus der Literatur oder direkt aus dem Projekt. Zu den **Investitions- und Betriebskosten der Fahrzeuge** zählen:

- Kaufpreis der Fahrzeuge
- Batteriepreise (Zebra und Li-Ion, Abbildung 20)
- Kraftstoffverbrauch (SOC-Verlauf bei ungesteuerter Ladung, Abbildung 21)
- Tageskilometer
- KFZ-Steuern
- Versicherungs- und Wartungskosten

Abbildung 20 zeigt die Batteriepreisentwicklung von Li-Ionen-Akkus, die verschiedene Studien prognostizieren. Abbildung 21 zeigt den SOC-Verlauf bei ungesteuerter Ladung. Von 6-18 Uhr sinkt der SOC, dann kommt das Fahrzeug zurück ins Depot und wird geladen.

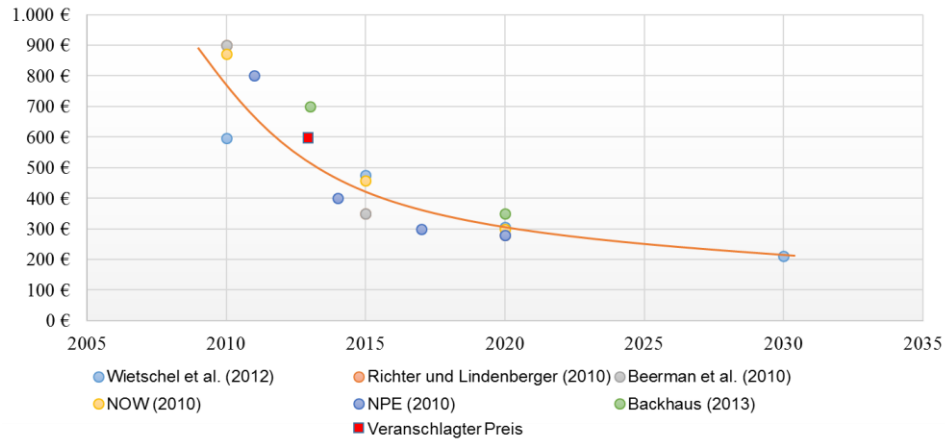


Abbildung 20 Prognostizierte Batteriepreisentwicklung von Li-Ionen-Akkus, verschiedene Studien

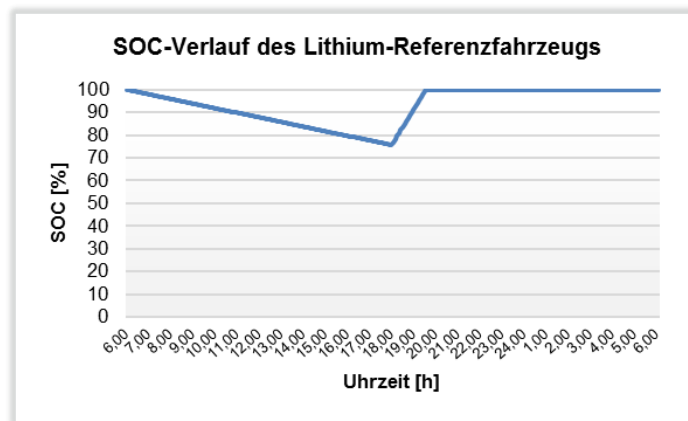


Abbildung 21 SOC-Verlauf bei ungesteuerter Ladung. Von 6-18 Uhr sinkt der SOC, dann kommt das Fahrzeug zurück ins Depot und wird geladen

Die Berechnungen basieren auf empirischen Daten aus dem Flottenbetrieb der konventionell und elektrisch betriebenen Zustellfahrzeuge, unter Berücksichtigung verschiedener Energiepreis- und Emissionsszenarien. Abbildung 22 zeigt die angenommenen Energiepreise:

- Dieselpreis steigt von € 1,50 auf mehr als € 2,20.
- Strompreis steigt von 19 €-Cent/kWh auf 23 €-Cent/kWh.

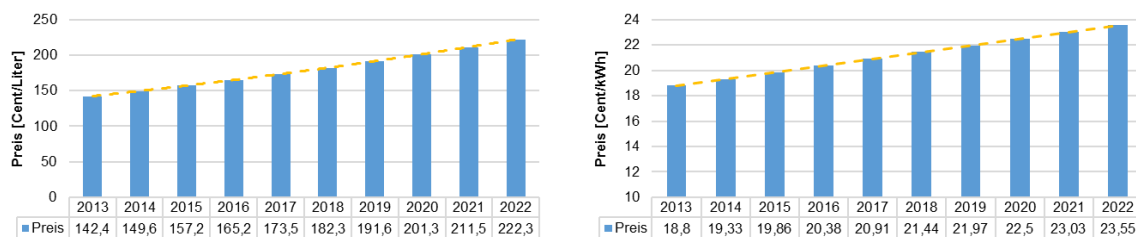


Abbildung 22 Geschätzte Diesel- und Strompreisentwicklung, historische Daten

Abbildung 23 zeigt das Li-Ion-Batteriealterungsmodell nach Lunz et al. (2012). Je höher der SOC, desto geringer die Lebensdauer. Für dieses Projekt ist die gelbe Gerade wichtig, da die durchschnittliche Außentemperatur in Deutschland 10 °C beträgt.

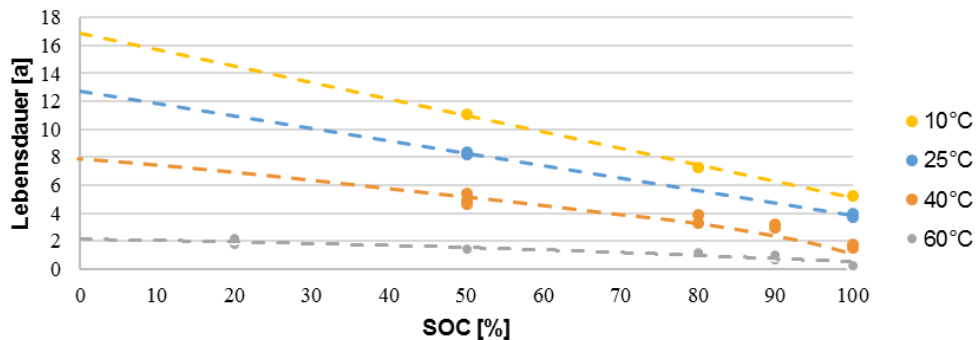


Abbildung 23 Li-Ion-Batteriealterungsmodell nach Lunz et al. (2012)

Im Folgenden werden nun die Annahmen der **indirekten** Fahrzeugkosten erläutert. Zu den **Investitions- und Betriebskosten der Infrastruktur** zählen:

- Transformator
- Netzanschluss
- Ladestationen
- Elektrische Vernetzung des Parkplatzes
- Digitales Netzwerk zur Ladesteuerung

Es wurde sodann eine ausführliche Kapitalwert- (Net Present Value) bzw. Gesamtbetriebskosten- (Total Cost of Ownership-, TCO) Berechnung durchgeführt. Daraufhin erfolgte die Untersuchung des Effekts verschiedener Ladestrategien auf den Barwert, das heißt, ob diese tatsächlich zu möglichen Kostensenkungen und Wirtschaftlichkeit führt. Eine daran anschließende Sensitivitätsanalyse beschreibt die Ergebnisse verschiedener Variablen- und Parameterwerteänderungen. In einer zweiten Untersuchung wurde überdies ein umfangreiches TCO-Modell mit weiteren Untermodellen/-funktionen, zwei Datenbanken sowie einem Flottenerneuerungsalgorithmus entwickelt und mit Hilfe des Softwareprogrammpaketes Matlab implementiert.

Die TCO-Berechnungen auf Grundlage der Projektdaten haben gezeigt, dass aus heutiger Sicht (Stand 2013) eine Elektrifizierung des Antriebsstrangs nicht wirtschaftlich ist (sowohl für die Li-Ionen- als auch alternative ZEBRA-Technologie), die TCO liegen hier höher als die der Dieselflotte. Die TCO einer Elektrofahrzeugflotte liegen um ca. **200 %** höher als die einer vergleichbaren Dieselfahrzeugflotte (abhängig von der Batterietechnologie). Hauptgrund dafür sind vor allem höhere Einzelfertigungs- und Batteriekosten der Flotte, wohingegen sich die Infrastrukturkosten nur auf etwa **4-4,5 %** des Gesamtbetrags belaufen und auch die zugehörigen Versorgungseinrichtungen nicht den Großteil der Investitionen ausmachen. Ladestrategien können die TCO unter den gemachten Annahmen um maximal **9,1 %** senken. Vehicle-to-Grid (V2G) und andere Sekundäranwendungen der Batterie könnten

in Zukunft weitere Kostenvorteile bringen. Je nach betrachteter Batterietechnologie wiesen die V2G-Lösungen mit und ohne Berücksichtigung der Batterielebensdauer im Vergleich zum Standardfall die höchsten Kosteneinsparungen aus.

Eine Sensitivitätsanalyse (Abbildung 24) für die wichtigsten Einflussfaktoren zeigte allerdings, dass nur ein Zusammenspiel aus fallenden Fertigungs- und Batteriekosten, steigenden Dieselpreisen und eine Einführung von V2G-Diensten den Einsatz elektrischer Zustellfahrzeuge wirtschaftlich machen können. Die Weiterentwicklung der Batterietechnologie sowie der genauen kapazitiven Anpassung der Batteriegrößen für die einzelnen Fahrzeuge und deren Fahrprofile kann ebenfalls zur Wirtschaftlichkeit beitragen.

Die Ergebnisse der Sensitivitäts- und Szenarioanalyse zeigen, dass **Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen** gegeben wäre bei:

Batteriepreise	= ~ 100 €/kWh (ZEBRA) bzw. 176 €/kWh (Li-Ion)
Tägliche Fahrstrecke	= ~ 150 km (ZEBRA) bzw. 140 km (Li-Ion)
Dieselpreise	= ~ 19-20 €/l in 2022
Erlöse aus V2G-Diensten	= ~ 3.600-3.800 €/Jahr
Veränderung mehrerer Faktoren	= Fertigungskosten der Dieselfahrzeuge = Batteriepreis von 350 €/kWh = Dieselpreis von 3 €/l in 2022 = 10-20 km Ø tägliche Fahrstrecke

Abbildung 24 Ergebnisse der Sensitivitäts- und Szenarioanalyse

Zur Erläuterung von Abbildung 24: Entweder nimmt der Dieselpreis einen Wert von 20 €/l an, oder zusammen mit anderen Faktoren einen Wert von 3 €/l. Fertigungskosten der Elektrofahrzeuge entsprechen denen der Dieselfahrzeuge.

Die zweite TCO-Analyse unter Berücksichtigung der Simulation von Energiepreisen (geometrische Brown'sche Bewegung) hat ergeben, dass Diesel- bzw. Treibstoffpreise immer noch maßgeblich für die Kalkulation der TCO sind. Die Laufleistung ist der zweitwichtigste Faktor bei der Ermittlung der TCO. Besonders bei einer hohen Laufleistung und einem hohen Verbrauch amortisieren sich die vergleichsweise höheren Anschaffungsausgaben durch niedrigere Betriebskosten. Die betrachteten Preisprognosen deuten jedoch auf höhere Steigerungsraten für Strompreise als für Diesel- bzw. Treibstoffpreise hin, was die Wirtschaftlichkeit elektrischer Fahrzeuge weiter verschlechtert. Auch die derzeit niedrige Marktverbreitung leichter Nutzfahrzeuge führt aktuell nicht bzw. nur zu geringen Skaleneffekten. Weitere Vorteile für elektrische Fahrzeuge könnten sich jedoch in Zukunft ergeben, wenn externe Kosten in die Berechnungen mit einbezogen werden, darüber hinaus ergäben sich ggf. bisher noch nicht quantifizierte Vorteile durch Imagegewinne und PR-Aktionen. Die prognostizierte TCO-Lücke zwischen beiden Antriebstechnologien ist relativ klein und beträgt je nach unterstellten Rahmenbedingungen etwa 5-10 %. Die Batteriekosten machen hierbei etwa 40 % der Anschaffungskosten von Batteriefahrzeugen und etwa 20 % der gesamten Lebenszykluskosten aus. Dabei bleibt vor allem die Entwicklung der Batteriekosten die größte Unbekannte bei den Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Weitere Kostenvorteile könnten sich zukünftig durch eine generelle Marktdiffusion ergeben, welche auch den Bereich der privaten Haushalte umfasst, indem sich ein

Batteriemarkt etabliert und so die Produktionskosten senkt. Damit verbunden lassen sich durch die Integration von Smart Grid-Lösungen und erneuerbaren Energien womöglich auch die Energiebezugskosten langfristig senken. Jedoch ist aus mittelfristiger Sicht eine Marktpenetration von leichten Nutzfahrzeugen ohne Kaufanreize der Anbieter oder zusätzlichen Subventionen der öffentlichen Hand nicht zu erreichen, da die derzeitigen Steuervorteile allein für die Wirtschaftlichkeit in den meisten Fällen noch nicht ausreichen.

Zusammenfassend wurde eine ausführliche Analyse der Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO), die sämtliche relevanten Kosten für eine Umstellung des Antriebs einer Zustellfahrzeugflotte erfasst, durchgeführt. Daraufhin erfolgte die Untersuchung des Effekts verschiedener Ladestrategien auf den erwarteten Kapitalwert der Investition, das heißt, ob diese tatsächlich zu möglichen Kostensenkungen und Wirtschaftlichkeit führt. Daran anschließende Sensitivitätsanalysen und Szenariendefinitionen beschreiben die Ergebnisse verschiedener Variablenveränderungen und Hypothesen. In einer zweiten Untersuchung wurde überdies ein umfangreiches TCO-Modell mit weiteren Untermodellen/-funktionen, zwei Datenbanken sowie einem Flottenerneuerungsalgorithmus entwickelt und mit Hilfe des Softwareprogrammpakets Matlab implementiert. Die TCO-Berechnung ergab, dass die elektrische Zustellfahrzeugflotte etwa 190-210 % teurer ist als die Dieselfahrzeugflotte. Durch intelligente Ladestrategien, intelligente Netze, Ladealgorithmen, welche die Lebenszeit der Batterie verlängern sowie vehicle-to-Grid (V2G)-Technologien könnten diese Kosten um 8-9 % gesenkt werden. Nur bei sinkenden Produktions- und Batteriekosten, steigenden Dieselpreisen und V2G-Geschäftsmodellen werden elektrische Zustellfahrzeuge ökonomisch sinnvoll sein. Weiterentwicklungen der Batterietechnologien und der Batteriegröße werden die Kosten weiter senken.

Die Wirtschaftlichkeit elektrischer Zustellfahrzeuge ist gegeben, wenn die TCO der elektrischen Zustellfahrzeuge auf dem Kosten-Niveau der Dieselfahrzeuge liegen (teilweise sogar darunter), unter der Voraussetzung günstiger ökonomischer Veränderungen mehrerer Faktoren sowie einer passgenauen Auslegung der Akkumulatoren (Abbildung 25).

= Sinkende Fertigungs- und Batteriekosten (größte Kostenfaktoren)
= Geringe Betriebs- und Wartungskosten
= Günstige ökonomische Veränderung mehrerer Faktoren: z.B. Steuervorteile und steigende Dieselpreise
= Einführung von V2G-Diensten
= Präzise Auslegung der Akkus
= Passgenaue Auslegung der Akkumulatoren

Abbildung 25 Bedingungen für eine Wirtschaftlichkeit elektrischer Zustellfahrzeuge

Die TCO-Berechnungen haben gezeigt, dass aus heutiger Sicht eine Elektrifizierung des Antriebsstrangs nicht wirtschaftlich ist – die TCO liegen hier je nach Batterietechnologie um ca. 200 % höher als die der Dieselflotte. Hauptgrund dafür sind vor allem höhere Einzelfertigungs- und Batteriekosten der Elektro-Fahrzeugflotte, wohingegen sich die Infrastrukturkosten nur auf etwa 4-4,5 % des Gesamtbetrags belaufen und auch die zugehörigen Versorgungseinrichtungen nicht den Großteil

der Investitionen ausmachen. Intelligente Ladestrategien können die TCO unter den gemachten Annahmen um maximal 9 % senken, da sich dadurch die Lebensdauer der Batterien von ca. 6 auf 11 Jahre verlängern lässt und diese somit während der Nutzungsdauer der Fahrzeuge nicht ausgetauscht werden müssen. Vehicle-to-grid (V2G) und andere Sekundäranwendungen der Batterie könnten in Zukunft weitere Kostenvorteile bringen. Je nach betrachteter Batterietechnologie weisen die V2G-Lösungen mit und ohne Berücksichtigung der Batterielebensdauer im Vergleich zum Standardfall die höchsten Kosteneinsparungen aus. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt allerdings, dass nur ein Zusammenspiel aus fallenden Fertigungs- und Batteriekosten, steigenden Dieselpreisen und eine Einführung von V2G-Diensten den Einsatz elektrischer Zustellfahrzeuge wirtschaftlich machen können. Die Weiterentwicklung der Batterietechnologie sowie der genauen kapazitiven Anpassung der Batteriegrößen für die einzelnen Fahrzeuge und deren Fahrprofile kann ebenfalls zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit bzw. Konkurrenzfähigkeit gegenüber Dieselfahrzeugen beitragen.

6.1.4 Nutzerakzeptanzbefragungen

Wie schon in Kapitel 5.1.5 beschrieben, beruht die vorliegende Studie laut TAM auf der Annahme, dass eine *Nutzungsabsicht* zu einer tatsächlichen Nutzung (Nutzungsverhalten) und somit zur Akzeptanz der Technologie führt (Davis 1986, S. 24, 1989; Davis et al. 1989). Die *Nutzungsabsicht* ist abhängig von den Einflüssen der *wahrgenommenen Nützlichkeit* und der *wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit*. Dieses Grundmodell hat das FCN zum GoGreen-Akzeptanzmodell erweitert, sodass alle Aspekte der Nutzerakzeptanz elektrisch angetriebener Zustellfahrzeuge (E-ZFZ)⁷ bei der Deutschen Post DHL abgedeckt werden (0). Zudem half die Diffusionstheorie nach Rogers (2003) bei der Erweiterung des Modells.

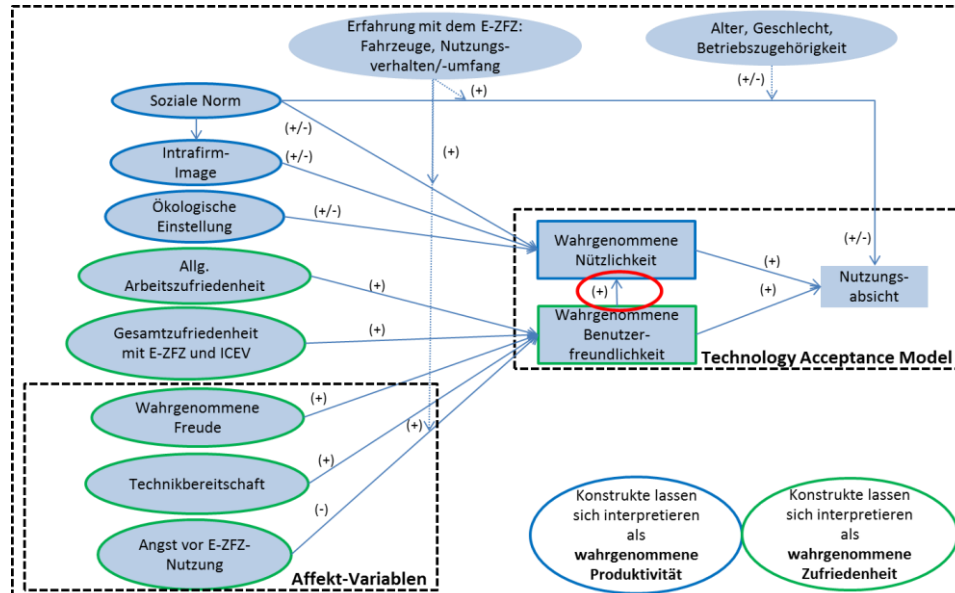


Abbildung 26 GoGreen-Akzeptanzmodell, erweitert auf Basis des TAM nach Davis (1989)

⁷ Der Begriff *elektrisch angetriebenes Zustellfahrzeug (E-ZFZ, Elektrofahrzeug)* bezeichnet die in dieser Studie untersuchten Fahrzeuge. *Elektrofahrzeug, E-Fahrzeug, E-Auto* etc. benennen andere elektrisch angetriebene Fahrzeuge. Mit *konventionellen (Zustell-)Fahrzeugen* sind die herkömmlichen (konventionellen), mit fossilen Brennstoffen (Diesel) angetriebenen (Zustell-)Fahrzeuge gemeint.

Abbildung 27 zeigt bildhaft den Zusammenhang zwischen Fragen und Konstrukten.

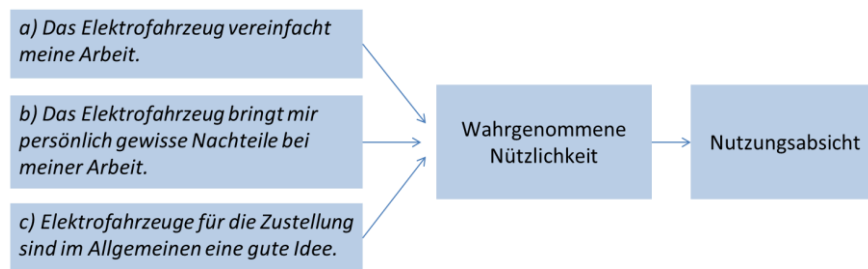


Abbildung 27 Ausgewählte drei Fragen des Konstruktes *wahrgenommene Nützlichkeit*

Zum besseren Verständnis seien an dieser Stelle einige der verwendeten Konstrukte erläutert, aus Platzgründen jedoch nur ein paar wenige:

Wahrgenommene Nützlichkeit und der *wahrgenommene Nutzen* wurden schon in Kapitel 5.1.5 beschrieben. Es ist jedoch festzuhalten, dass diese um die *Rahmenbedingungen des Fahrzeugs* erweitert wurden: Die Theorie des geplanten Verhalten (Theory of Planned Behaviour, Fishbein und Ajzen 2010, 1975; Ajzen und Fishbein 1980; Ajzen 2005) stellt bereits heraus, dass neben ausschließlich psychologischen Faktoren auch weitere externe, objektiv beobachtbare Faktoren zu berücksichtigen sind. Im Kontext der Zustellfahrzeuge sind das also jene Faktoren, welche die Technologie definieren, darunter fallen z.B. das *Erlernen der Bedienung* und das *Handling des Fahrzeuges und der Ladeinfrastruktur*, die *Reichweite*, das *Beschleunigungsverhalten*, der geänderte Laderaum, das *Handling der Ladeinfrastruktur* oder bestimmte *Komfortmerkmale*, wie das *Vorheizen im Winter*, das die Zustellarbeit ebenfalls beeinflusst. Tragen diese Faktoren folglich zu einem entlastenden Umgang oder Arbeitsalltag und einer vereinfachten Bedienung des Fahrzeugs bei, so erhöht sich letztlich auch die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit der Fahrzeuge.

Soziale Norm (wahrgenommener sozialer Druck): besteht aus zwei Komponenten: den Verhaltensvorschriften wichtiger Personen und dem Ausmaß der Motivation, diese Vorschriften zu befolgen. Wir basieren dieses Konstrukt auf Peters et al. (2011, S. 990), wo die soziale Norm im Kontext der E-Mobilität als wahrgenommene Erwartungen relevanter Personen im beruflichen wie auch privaten Umfeld des Zustellers beschrieben bzw. interpretiert wird.

Das Konstrukt *Erfahrung mit dem E-ZFZ* bezieht sich auf den im Betriebsablauf zu berücksichtigenden und relevanten Gewöhnungsfaktor des Zustellers. Das heißt je länger oder öfter das E-ZFZ letztlich in der alltäglichen Zustellarbeit eingesetzt wird, desto größer ist auch der Nutzen, der daraus erwächst. Die Zusteller werden schließlich immer vertrauter im Umgang mit der Technik (Ladevorgang) und bewerten diese auch nützlicher oder sinnvoller. Besonders im Zusammenhang mit der kommerziellen Nutzung der Fahrzeugflotte ist dieses Konstrukt daher von besonderer Relevanz. Venkatesh et al. (2003) haben festgestellt, dass die Systemnutzung, gemessen als Dauer der Nutzung, einen Teil der Varianz des TAM-Grundmodells erklärt. Demgemäß ist die kommerzielle Nutzung von Elektrofahrzeugen im besonderen Maße verbunden mit der Dauer, die ein Zusteller mit dem E-ZFZ verbringt. Das heißt zum einen, da im vorliegenden Untersuchungsrahmen die Zusteller die E-ZFZ somit immer auch im täglichen Gebrauch haben, dass infolgedessen auch der Grad steigt, mit dem Nutzen gestiftet wird. Die Zusteller werden schließlich immer vertrauter im Umgang mit der Technik und

bewerten diese insgesamt auch als nützlicher oder sinnvoller. Besonders im Zusammenhang mit der kommerziellen Nutzung der Fahrzeugflotte ist dieses Konstrukt daher von besonderer Relevanz. Zum anderen steigt mit der längeren Nutzungsdauer auch die Vertrautheit mit dem Fahrzeug, der zu berücksichtigende und relevante Gewöhnungsfaktor des Zustellers also nimmt zu. Je länger oder öfter das E-ZFZ daher in der alltäglichen Zustellarbeit eingesetzt wird, desto einfacher ist auch die Bedienung oder desto größer ist die *wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit*.

Mit *Intrafirm-Image* ist der Status des Zustellers, der E-Fahrzeug fährt, im Kollegium gemeint. Schon im ursprünglichen TAM spielen die wahrgenommenen Meinungen der Kollegen eine Rolle, ähnlich zur *subjektiven bzw. sozialen Norm*.

Ökologische Einstellung: Es könnte sein, dass sich im Falle der befragten ZustellerInnen ein erhöhtes Maß an Umweltbewusstsein zeigt, da in ihrem Fall der Nutzen der Elektrofahrzeuge unabhängig von den Kosten ist. Dadurch werden durch die vorgeschriebene Nutzung der Elektrofahrzeuge Werte und Einstellungen der ZustellerInnen geändert (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2011, S. 168), ganz nach der Theorie des Normaktivierungsmodells von Schwartz (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2011, S. 123). Die ökologische Einstellung oder auch das Umweltbewusstsein hat einen positiven Einfluss auf die wahrgenommene Nützlichkeit des Zustellfahrzeugs. Hintergrund dieser Überlegung ist, dass auch die ZustellerInnen eine ökologische Grundhaltung haben und sich daher möglichst umweltbewusst verhalten wollen, also gerade durch die Nutzung des elektrischen Zustellfahrzeugs ihr Umweltbewusstsein implizit steigern können. Obwohl die ZustellerInnen schon im Voraus auf die Elektrofahrzeuge zugewiesen werden und daher nur bedingt eine Wahl haben, das Fahrzeug zu nutzen oder nicht, können diese aber durch die ökologisch saubere Alternative ihre nachhaltige Lebensweise stärken. Infolgedessen steigert dies auch den Grad der Nützlichkeit des elektrobetriebenen Zustellfahrzeugs, so dass Nutzen gestiftet wird.

Mit diesem theoretischen Modell beantworten wir diese beiden **Forschungsfragen**:

- Sind die ZustellerInnen mit E-ZFZ zufriedener als mit Dieselfahrzeugen?
- Verbessert das E-ZFZ die wahrgenommene Produktivität der ZustellerInnen?

Die **Arbeitshypothese** heißt:

- Je höher die Gesamtzufriedenheit der ZustellerInnen mit E-ZFZ, desto höher ihre wahrgenommene Produktivität

Die empirische Untersuchung gestaltete sich als Querschnittsstudie: Einmalige Befragung von 120 ZustellerInnen durch postalischen Fragebogen in 12/2016 (Erinnerungsschreiben 02/2017 nach dem Starkverkehr der Weihnachtszeit).

Die **deskriptiven Ergebnisse** sind:

- Rücklaufquote 55 % (66 von 120 Fragebögen zurückerhalten, davon 2 komplette Nicht-Antworten)
- Männlich: 88,52 %, Weiblich: 4,92 %, Sonstige: 6,56 %

- Durchschnittliche Erfahrung mit E-ZFZ: Nutzung seit 2,5 Jahren auf 10-55 km/Tag (Mittelwert 24 km/Tag)
- Wahrgenommene Eingewöhnungszeit: 0-14 Tage

Tabelle 30 zeigt, dass wenn ZustellerInnen zwischen E- und Dieselfahrzeug wählen könnten, dann würden sich >70 % (28,57 % „agree“ und 42,86 % „strongly agree“) für das E-Fahrzeug entscheiden.

Intention to use	Freq.	Percent	Cum.
strongly disagree	5	7.94	7.94
disagree	4	6.35	14.29
undecided	9	14.29	28.57
agree	18	28.57	57.14
strongly agree	27	42.86	100.00
Total	63	100.00	

Tabelle 30 Intention zur Nutzung von Elektrofahrzeugen (Intention to use EV)

Tabelle 31 zeigt, dass die ZustellerInnen mit dem ihnen zugeteilten E-ZFZ (EV) tendenziell zufriedener sind als mit dem Dieselfahrzeug (DV).

Satisfaction with the EV used the most in the past 4 weeks	Freq.	Percent	Cum.	Satisfaction with the DV used the most in the past 4 weeks	Freq.	Percent	Cum.
very dissatisfied	4	6.45	6.45	very dissatisfied	1	4.00	4.00
dissatisfied	9	14.52	20.97	dissatisfied	4	16.00	20.00
neither	9	14.52	35.48	neither	6	24.00	44.00
satisfied	19	30.65	66.13	satisfied	5	20.00	64.00
very satisfied	21	33.87	100.00	very satisfied	9	36.00	100.00
Total	62	100.00		Total	25	100.00	

Tabelle 31 Zufriedenheit mit Elektro- (links) und Dieselfahrzeugen (rechts)

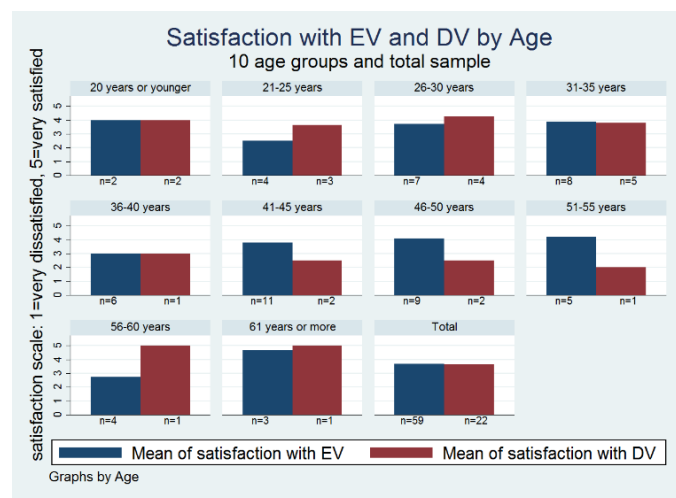


Abbildung 28 Zufriedenheit mit Elektro- (EV) und Dieselfahrzeugen (DV) nach Alter

Entgegen der Annahme, dass ältere MitarbeiterInnen sich schwerer tun mit technischen Neuerungen am Arbeitsplatz, zeigt Abbildung 28, dass ältere ZustellerInnen die Elektrofahrzeuge nicht weniger akzeptieren als jüngere.

Methode der Datenreduktion: Hauptkomponentenanalyse

Das Ziel der Datenreduktion ist die Reduktion von mehrdimensionalen Skalen auf wenige Faktoren (mehrere Fragen werden zu wenigen Faktoren zusammengefasst), um damit Regressionen zu schätzen.

Tabelle 32 zeigt ein Beispiel zur Datenreduktion anhand dreier Fragen zur wahrgenommenen Nützlichkeit. Hier besteht nun die Möglichkeit, die ausgewählten Zahlenwerte (Frage a) 4, Frage b) 1 und Frage c) 5) zu addieren und den Durchschnitt zu berechnen ($4+1+5=10$ und $10/3=3,33$). Diese Methode würde allerdings der vielschichtigen Zusammenhänge der zahlreichen Antworten der ZustellerInnen nicht gerecht. Daher haben wir uns einer anderen Methode zur Datenreduktion bedient, der sog. **Hauptkomponentenanalyse**.

Im Vergleich zum Dieselfahrzeug:	1 = trifft überhaupt nicht zu	trifft wenig zu	trifft teilweise zu	trifft ziemlich zu	5 = trifft voll und ganz zu
a) Das Elektrofahrzeug vereinfacht meine Arbeit.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>
b) Das Elektrofahrzeug bringt mir persönlich gewisse Nachteile bei meiner Arbeit.	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c) Elektrofahrzeuge für die Zustellung sind im Allgemeinen eine gute Idee.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X

Tabelle 32 Beispiel zur Datenreduktion anhand dreier Fragen zur *wahrgenommenen Nützlichkeit*

Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse werden aus den drei Zahlenwerten pro Befragtem/r Linearkombinationen gebildet und dadurch ein einziger Zahlenwert pro Befragtem/r. Aus diesen Werten werden in einem nächsten Schritt die Eigenwerte pro Komponente des Konstruktes gebildet. Es werden nur Komponenten mit Eigenwerten >1 in die nachfolgende Analyse übernommen.

Tabelle 33 zeigt die Eigenwerte der Komponenten des Konstruktes *wahrgenommene Nützlichkeit*. Die erste Komponente hat einen Eigenwert >1 . Der Eigenwert 1,93832 entspricht der Varianz und erklärt damit 64,61 % der gesamten Varianz. Die zweite Komponente erklärt fast 20 %. Alle Eigenwerte addiert ergibt die Summe der Varianzen der Variablen und damit die gesamte Varianz der Variablen.

Component	Eigenvalue	Difference	Proportion	Cumulative
Comp1	1.93832	1.35875	0.6461	0.6461
Comp2	.579565	.0974479	0.1932	0.8393
Comp3	.482117	.	0.1607	1.0000

Tabelle 33 Eigenwerte der Komponenten des Konstruktes *wahrgenommene Nützlichkeit*

Abbildung 29 zeigt eine deutlichere Abgrenzung zwischen Eigenwerten >1 (oberhalb der roten Linie) und <1 (unterhalb der roten Linie) anhand des Konstruktes *wahrgenommene Freude*. Deutlich erkennbar ist ein Knick zwischen der ersten bzw. zweiten Komponente (die zwei obersten Punkte links) und dem dritten Punkt (knapp unterhalb der roten Linie). D.h. das Konstrukt *wahrgenommene Freude* wird anhand zweier Komponenten am besten erklärt. Eine dritte Komponente trägt nicht weiter zum Erklärungsgehalt bei.

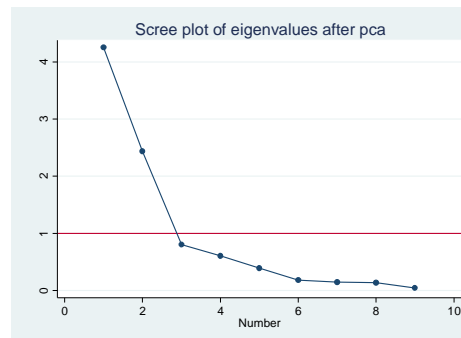


Abbildung 29 Screeplot der Eigenwerte des Konstruktes *wahrgenommene Freude*

Die Prüfung auf Eignung für Hauptkomponentenanalyse erfolgte mit, wenn die genutzten Skalen in der Literatur verfügbar sind, einem Abgleich mit Cronbach's Alpha. Bei neu erstellter Skalen wurde die Güte und die Anzahl der Komponenten mit dem Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium geprüft (wenn Eigenwerte >1 , dann wird die Komponente beibehalten).

Vor der Datenreduktion hatten wir es mit mehr Variablen (98) als Observationen ($N=66$) zu tun, was ein Ausschlusskriterium für eine weitere Datenanalyse war. Nach der Datenreduktion haben wir nun 25 Variablen, mit denen wir Regressionen schätzen können.

Regressionen

Mithilfe von zwei Regressionen erklären wir die Effekte des Grundmodells (wahrgenommene Nützlichkeit, wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit) auf die Nutzungsintention.

Regression 1

Die erste Regression (roter Pfeil in Abbildung 30) erklärt den Effekt von wahrgenommener Nützlichkeit (PU) auf die Nutzungsintention (F20). Die Nutzungsintention ist eine Funktion der wahrgenommenen Nützlichkeit, d.h. Nutzungsintention = $f(\text{wahrgenommene Nützlichkeit})$.

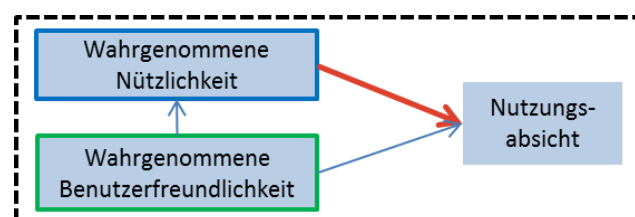


Abbildung 30 Effekt von wahrgenommener Nützlichkeit auf die Nutzungsintention (roter Pfeil)

Source	SS	df	MS	Number of obs =	35
Model	35.9348289	6	5.98913814	F(6, 28)	= 8.92
Residual	18.8080283	28	.671715296	Prob > F	= 0.0000
				R-squared	= 0.6564
				Adj R-squared	= 0.5828
Total	54.7428571	34	1.61008403	Root MSE	= .81958

F20	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
PU_automatic_gear	.236928	.0886085	2.67	0.012	.0554217 .4184343
PU_acceleration	-.0180802	.1015144	-0.18	0.860	-.226023 .1898625
PU_engine_noise	.1678584	.0895103	1.88	0.071	-.0154951 .3512119
PU_environment_recuperation	.2010301	.1054883	1.91	0.067	-.0150528 .417113
PU_recuperation_acceleration	-.0452986	.1130815	-0.40	0.692	-.2769356 .1863383
PU_recuperation_braking	-.2695943	.1164995	-2.31	0.028	-.5082327 -.0309559
_cons	3.928369	.1387611	28.31	0.000	3.64413 4.212608

Abbildung 31 Ergebnisse Regression 1: Effekt von wahrgenommener Nützlichkeit auf die Nutzungsintention

In der ersten Regression haben wir mithilfe von (aus der Hauptkomponentenanalyse resultierenden) sechs Komponenten der wahrgenommenen Nützlichkeit ihren Einfluss auf die Nutzungsintention geschätzt. Unter Anwendung eines p-Wertes von 5 % haben lediglich zwei Komponenten der wahrgenommenen Nützlichkeit einen signifikanten Einfluss auf die Nutzungsintention, nämlich die wahrgenommene Nützlichkeit bzgl. des Automatikgetriebes (PU_automatic_gear, roter Kasten in Abbildung 31) und bzgl. des Rekuperations- und Bremsverhaltens (PU_recuperation_braking):

- Wenn die Zufriedenheit (wahrgenommene Nützlichkeit) mit dem Automatikgetriebe um eine Einheit ansteigt, dann steigt die Nutzungsintention um 0,23 Einheiten.
- Wenn die Zufriedenheit (wahrgenommene Nützlichkeit) mit dem Rekuperations- und Bremsverhaltens um eine Einheit ansteigt, dann sinkt die Nutzungsintention um 0,26 Einheiten.

Der Erklärungsgehalt dieses Modells liegt bei 65 % (roter Kasten oben rechts, R-squared=0,65), allerdings bei einer geringen Stichprobe von N=35.

Regression 2

Die zweite Regression erklärt den Effekt der wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit (PEOU) auf die Nutzungsintention (roter Pfeil in Abbildung 32). Die Nutzungsintention ist eine Funktion der wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit, d.h. Nutzungsintention = f(wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit).

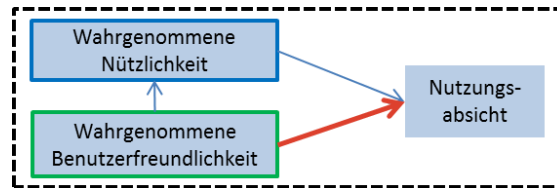


Abbildung 32 Effekt von wahrgenommener Benutzerfreundlichkeit auf die Nutzungsintention (roter Pfeil)

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	61
Model	44.9048364	3	14.9682788	F(3, 57)	=	16.51
Residual	51.6853275	57	.906760132	Prob > F	=	0.0000
Total	96.5901639	60	1.60983607	R-squared	=	0.4649
				Adj R-squared	=	0.4367
				Root MSE	=	.95224

F20	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
PEOU_learning	.140327	.0596881	2.35	0.022	.0208036 .2598504
PEOU_hindrance_all	-.1989108	.0793874	-2.51	0.015	-.3578813 -.0399403
PEOU_cognitive_all	.4307777	.0813968	5.29	0.000	.2677835 .593772
_cons	3.909234	.121975	32.05	0.000	3.664984 4.153485

Abbildung 33 Ergebnisse Regression 2: Effekt der wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit auf die Nutzungsintention

In der zweiten Regression haben wir mithilfe von (aus der Hauptkomponentenanalyse resultierenden) drei Komponenten der wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit ihren Einfluss auf die Nutzungsintention geschätzt. Unter Anwendung eines p-Wertes von 5 % haben alle drei Komponenten der wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit einen signifikanten Einfluss auf die Nutzungsintention, nämlich die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit bzgl. des (Er-)Lernens (PEOU_learning, roter Kasten in Abbildung 33), bzgl. der Barrieren/Schwierigkeiten (PEOU_hindrance_all) und bzgl. der kognitiven Mühen (PEOU_cognitive_all):

- Wenn die Zufriedenheit (wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit) mit dem (Er-)Lernen um eine Einheit steigt, dann steigt die Nutzungsintention um 0,14 Einheiten.
- Wenn die Barrieren/Schwierigkeiten (wahrgenommene Benutzerunfreundlichkeit) bzgl. des (Er-) Lernens um eine Einheit steigen, dann sinkt die Nutzungsintention um 0,19 Einheiten.
- Wenn die Zufriedenheit (wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit) bzgl. der kognitiven Mühen um eine Einheit steigt, dann steigt die Nutzungsintention um 0,43 Einheiten.

Obwohl für die zweite Regression nun fast doppelt so viele Antworten vorliegen (N=61) wie in der ersten, sinkt der Erklärungsgehalt des Modells auf 46 % (roter Kasten oben rechts, R-squared=0,46).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass dies das erste Modell dieser Art in Deutschland ist, welches die Zufriedenheit und Produktivität kommerzieller Nutzer von E-Fahrzeuge erfasst, und zwar

im Rahmen einer langfristigen Nutzung, d.h. es handelt sich nicht mehr um einen Feldversuch, sondern um eine reale Produktionsumgebung.

Daraus lassen sich Implikationen sowohl für Flotten-/Personalverantwortliche (z.B. Mitarbeiterschulungen) als auch Fahrzeugentwickler/-designer ableiten (vgl. Kapitel 7 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse des FCN für KMU).

6.1.5 Entscheidungsmodell zur Flottenumstellung

Es wurde eine Strategie zur zeitlich, wirtschaftlich und/oder ökologisch optimalen Erneuerung einer Fahrzeugflotte (hier: Umstellung auf Elektrofahrzeuge) ermittelt. Dazu trafen wir folgende Annahmen für die stochastische Modellierung der Entwicklung von Rohölpreis, Strompreis, Batteriepreis, Kapitalkosten und Inflationsrate (Abbildung 34 - Abbildung 38). Diese fünf Abbildungen zeigen jeweils einen Korridor, in welchem Bereich sich die Preise/Kapitalkosten/Inflationsraten entwickeln. Berechnungsbasis waren stochastische Modellierungen, umgesetzt mit Matlab-Modellen:

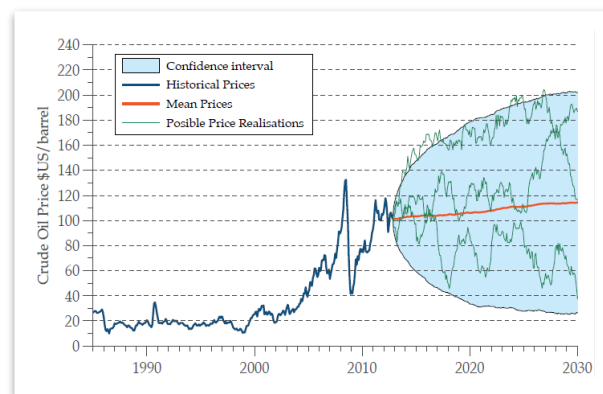


Abbildung 34 Stochastische Modellierung der Entwicklung des Rohölpreises

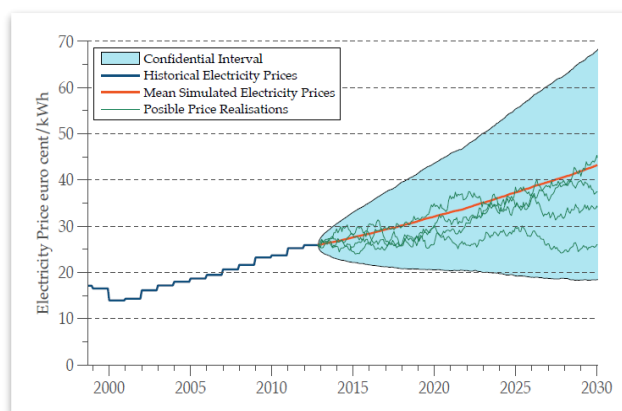


Abbildung 35 Stochastische Modellierung der Entwicklung des Strompreises

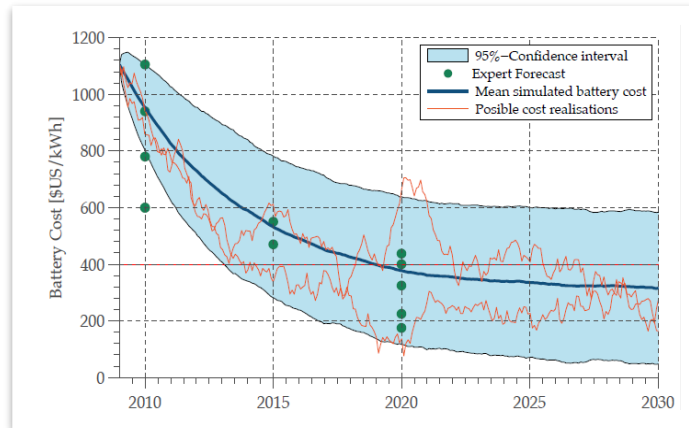


Abbildung 36 Stochastische Modellierung der Entwicklung des Batteriepreises

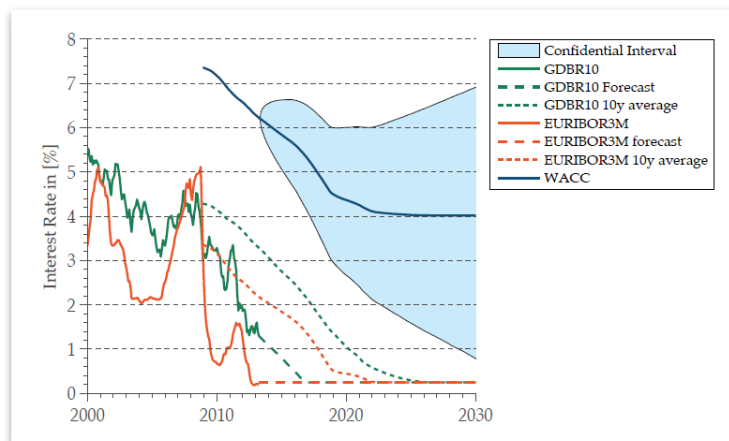


Abbildung 37 Stochastische Modellierung der Entwicklung der Kapitalkosten

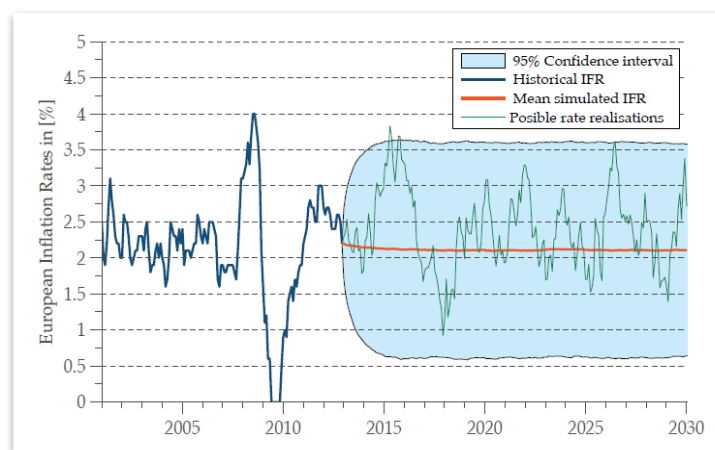


Abbildung 38 Stochastische Modellierung der Entwicklung der Inflationsrate

Weitere Annahmen sind der Literatur entnommen:

Investitions- und Betriebskosten der Fahrzeuge, z.B.	= Entwicklung der Kaufpreisunterschiede zwischen Elektro- und Dieselfahrzeugen = Kraftstoffverbrauch = Tageskilometer = KFZ-Steuern = Versicherungs- und Wartungskosten
Der Abnutzung/Wertverlustentwicklung der Fahrzeuge und Batterien	
Investitions- und Betriebskosten der Infrastruktur	
Kosten für Batterieleasing	

Tabelle 34 Annahmen des Entscheidungsmodells zur Flottenumstellung

Abbildung 39 zeigt ein Beispiel der Abnutzung bzw. des Wertverlustes der Fahrzeuge (links) und Batterien (rechts) und stellt damit exemplarisch die zweite Zeile in Tabelle 34 dar. Die linke Graphik von Abbildung 39 zeigt ein Beispiel der Abschreibung/des Wertverlustes (Depreciation in %) eines mittelgroßen kommerziellen Fahrzeugs über die Zeit (age [year]) und zurückgelegte Distanz (distance [TKM]).

Da Batterien an sich eine für gewöhnlich kürzere Lebensdauer als das restliche Fahrzeug aufweisen, werden die Batterien auch separat dargestellt, und zwar in der rechten Graphik, die exemplarisch die Abnutzung (depreciation in %) eines mittelgroßen Batteriepack zeigt. Die Abnutzung wurde mittels einer Näherung auf Basis einer Batterievermietung approximiert (da es bisher keinen Sekundärmarkt für Batterien gibt), die eine Funktion der Zeit und zurückgelegten Distanz darstellt. Außerdem wurden auch Kosten für Rohstoffe/-materialien (ca. 10 %) mit berücksichtigt. Mittels Regression und Regressionskoeffizienten der aktuellen Marktdaten wurde dann eine Vorhersage des Restwerts der Batterien getroffen.

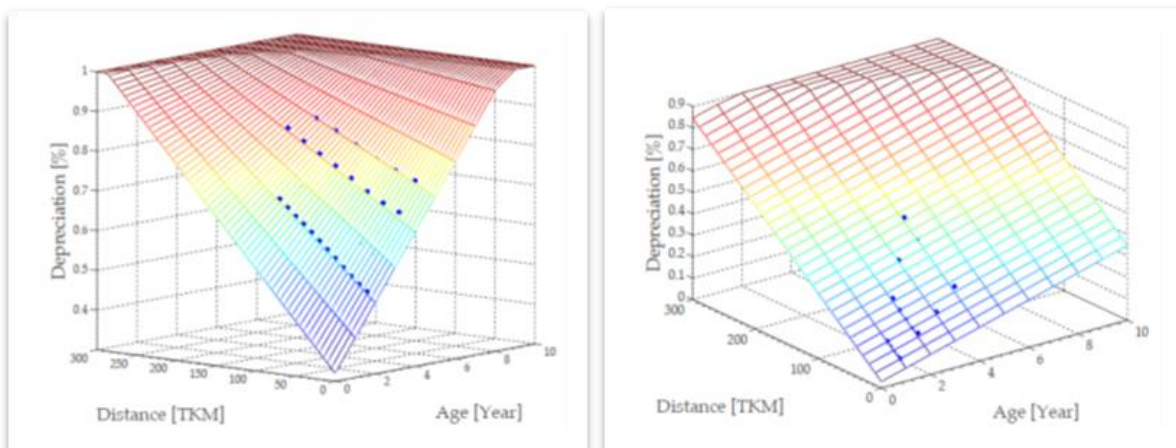


Abbildung 39 Beispiel der Abnutzung/des Wertverlustes der Fahrzeuge und Batterien (zweite Zeile in Tabelle 34)

Abbildung 40 zeigt die TCO-Struktur (Gesamtbetriebskosten) von kleinen, mittleren und großen Leichtnutzfahrzeugen (LDVs = *light duty vehicles*) unterteilt nach Diesel- und Elektroausstattung; die jährliche Laufleistung beträgt 30.000 km und die Lebensdauer 6 Jahre. Der Anschaffungspreis (*purchase costs*) des Fahrzeugs und der Batterie wurde um den entsprechenden Restwert korrigiert. Anmelde- und Transportkosten zum Verkäufer (*registration and destination fees*) wurden zu den gesamten Kosten addiert. Im Durchschnitt machen Treibstoffkosten fast 40 % des ICE-TCO aus, wohingegen es bei der elektrischen Variante nur etwa 10 % sind. Der Preis der Batterien ist einem Kostenanteil durchschnittlich 20 % der größte Unterschied zwischen beiden Technologien. Aufgrund optimistischerer Annahmen für Elektrofahrzeuge im Vergleich zu den Ergebnissen der Wirtschaftlichkeitsanalyse (Kapitel 6.1.3) sind die Unterschiede in den TCO geringer, aber für Elektrofahrzeuge trotzdem höher als für vergleichbare Dieselfahrzeuge.

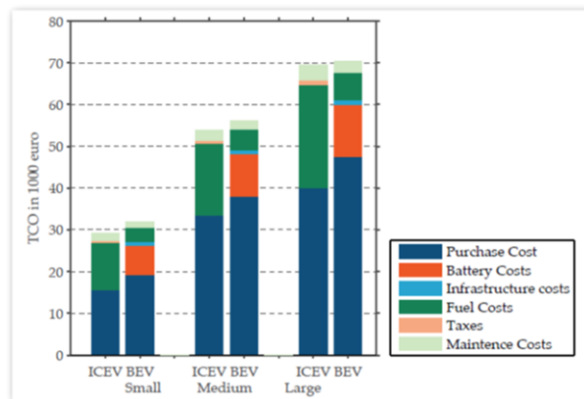


Abbildung 40 Kostenstruktur von kleinen, mittleren und großen Leichtnutzfahrzeugen

Abbildung 41 zeigt eine Sensitivitätsanalyse der TCO eines kleinen Leichtnutzfahrzeuges (LDV) nach elektrischer und Dieselformate für 2013. Je nach Veränderung einer Variable, *ceteris paribus*, kann man den Effekt dieser Änderung am TCO normalisiert zur wirtschaftlichen Nutzungsdauer sehen. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die jährliche Fahrleistung (rote Linie) und die Fahrzeuglebensdauer (blaue Linie) die wichtigsten Einflussfaktoren sind (Differenzbetrachtung) und dass die Entwicklung des Strompreises für die Wirtschaftlichkeit wichtiger ist als die der Batteriepreise.

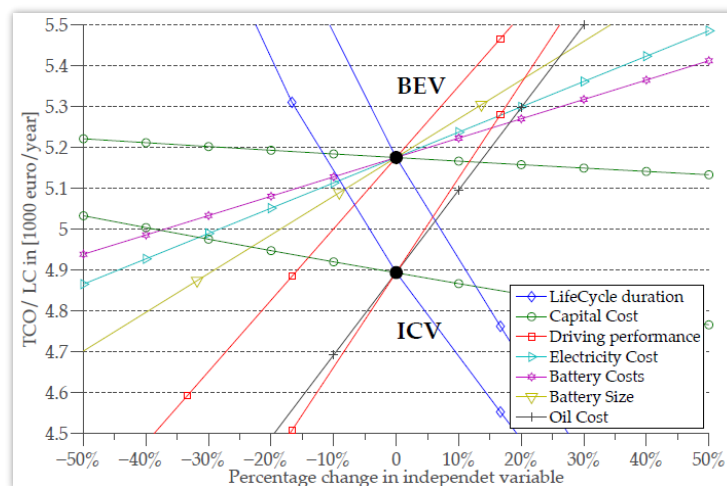


Abbildung 41 Sensitivitätsanalyse der TCO eines kleinen Leichtnutzfahrzeugen

Abbildung 42 zeigt die Sensitivitätsanalyse der Differenzkosten zwischen elektrischer und Dieselvariante für 2013. Der Schnittpunkt von schwarzer *oil cost*-Linie mit roter Nullpunktlinie (Break-even) zeigt, dass die Dieselpreise (*oil cost*) der wichtigste Einflussfaktor sind: Eine 15 %-ige Steigerung des durchschnittlichen Treibstoffpreises kann beispielsweise schon zu einer Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen führen. Ebenfalls würde ein 30 %-ige Batteriepreisreduktion zum selben Ergebnis kommen. Begünstigend für Elektrofahrzeuge wirkt sich vor allem die Steigerung der Anzahl zurückgelegter Kilometer aus, entweder durch eine Erhöhung der Lebensdauer oder durch eine gesteigerte Laufleistung.

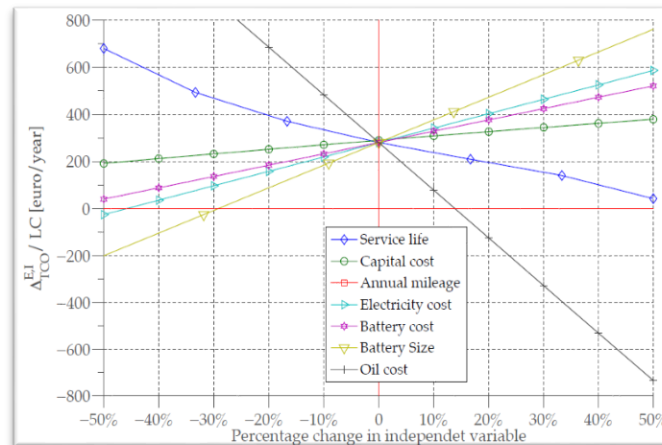


Abbildung 42 Kostendifferenz zwischen Elektro- und Dieselfahrzeugen (*oil cost* = Dieselpreise/ Treibstoffpreise)

Die erreichte Kostensenkung müsste über 50 % betragen, um Wirtschaftlichkeit zu erreichen, diese ist aber aufgrund der derzeitigen Beschränkungen im Bereich der Batterietechnologie eher unrealistisch.

Entscheidend für den Zeitpunkt der Erreichung einer Vollkostengleichheit von Elektro- und Dieselfahrzeug sind die Höhe von staatlicher Förderung, Dieselpreis, Strompreis, Batteriepreis, Kraftstoffverbrauch und Jahresfahrleistung (Abbildung 43 - Abbildung 45).

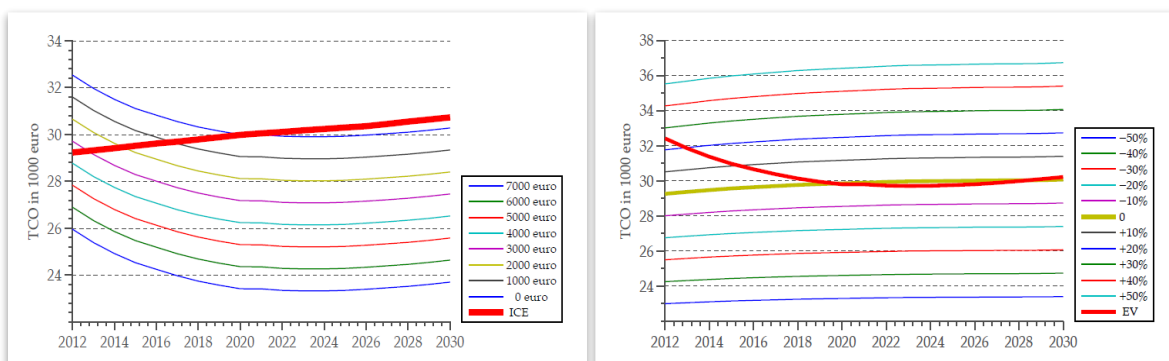


Abbildung 43 TCO-Vergleich zwischen Elektrofahrzeug (EV, electric vehicle) und Verbrennungsmotorfahrzeug (ICE, internal combustion engine) als Funktion direkter Subventionen (links) und des Diesel-/Treibstoffpreises (rechts)

Abbildung 43 (links) zeigt den TCO-Vergleich zwischen Elektrofahrzeug (EV, electric vehicle) und Verbrennungsmotorfahrzeug (ICE, internal combustion engine (vehicle)) als Funktion direkter Subventionen: Je mehr Subventionen, desto weiter verschiebt sich die Kurve nach unten (und somit ist ein EV mit Subventionen günstiger als ein vergleichbares konventionelles (dieselbetriebenes) Fahrzeug).

Abbildung 43 (rechts) zeigt den TCO-Vergleich zwischen EV und ICE als Funktion des Treibstoffpreises: 10 %-iger Treibstoffpreisanstieg führt zur Wirtschaftlichkeit von EVs in 2016 (siehe schwarze Linie, Schnittpunkt mit fatter roter Linie).

Abbildung 44 (links) zeigt den TCO-Vergleich zwischen EV und ICE als Funktion des Strompreises: Ein 10 %-iger Strompreisfall führt zur Wirtschaftlichkeit von EVs in 2019 (siehe lila Linie, Schnittpunkt mit fatter roter Linie). Ein 50 %-iger Preisfall führt zur Wirtschaftlichkeit von EVs in 2014 (blaue Linie & fette rote Linie). Abbildung 44 (rechts) zeigt den TCO-Vergleich zwischen EV und ICE als Funktion des Batteriepreises: Nur große Preissenkungen von 30 % und mehr führen zu Kostengleichheit bzw. der Adoption von EVs (siehe Schnittpunkte der Linien im linken unteren Bereich der Graphik).

Abbildung 45 (links) zeigt den TCO-Vergleich zwischen EV und ICE als Funktion des Kraftstoffverbrauchs (für ICEs und EVs): Der Kraftstoffpreisanstieg hat größere Auswirkungen für ICEs (da er auch stärker in TCO eingeht). Unter gegebenen Annahmen führt ein 40 %-iger Kraftstoffanstieg für beide Technologien schon heute zur Wirtschaftlichkeit von EVs (magenta Linien). Abbildung 45 (rechts) zeigt den TCO-Vergleich zwischen EV und ICE als Funktion der jährlichen Laufleistung: Hier sind EVs mit Batteriegrößen von 10-38 kWh dargestellt (d.h. Reichweiten von 65-196 km). Nur EVs mit Batteriegrößen kleiner als 20 kWh werden wirtschaftlicher als ICEs. Unter gegebenen Annahmen werden große Batterien nie wirtschaftlich im Vergleich zur derzeitigen Technologie.

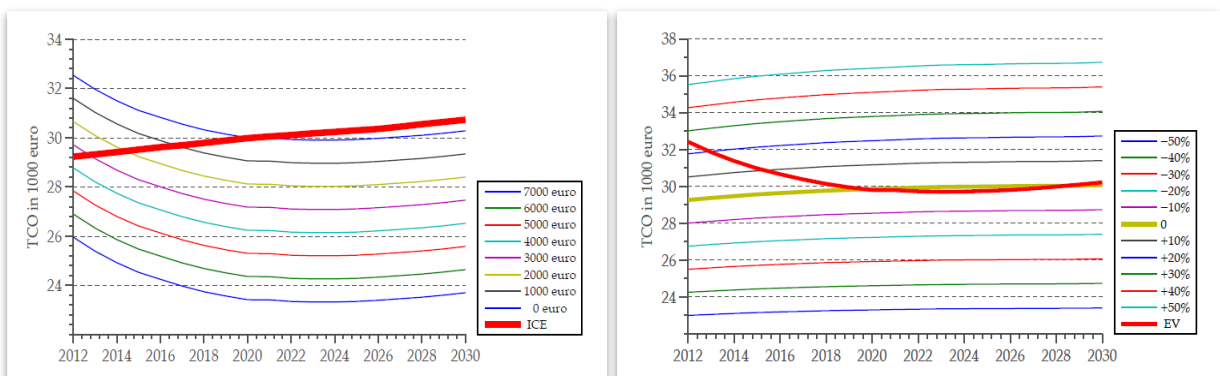


Abbildung 44 TCO-Vergleich zwischen EV und ICE als Funktion des Strompreises (links) und des Batteriepreises (rechts)

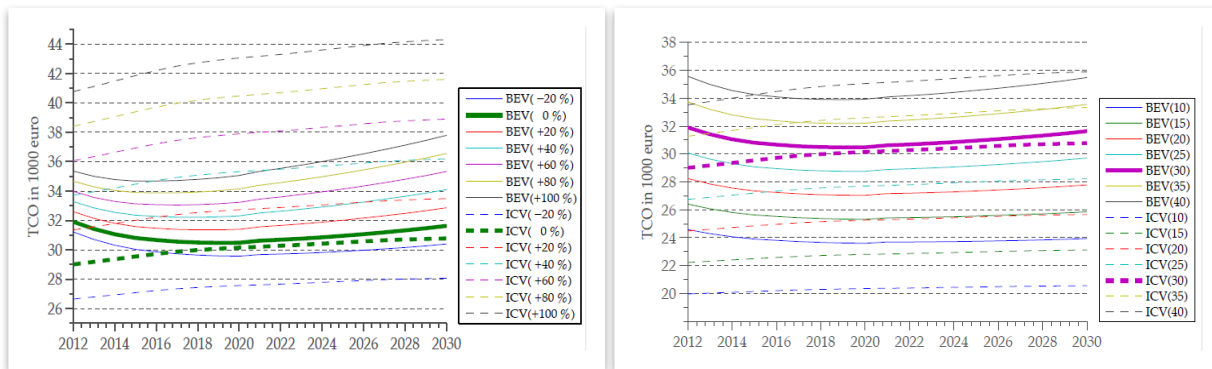


Abbildung 45 TCO-Vergleich zwischen EV und ICE als Funktion des Kraftstoffverbrauchs (für ICEs und EVs). (links) und der jährlichen Laufleistung (rechts)

Eine Szenarioanalyse kommt zum Ergebnis, dass selbst unter den angenommenen optimistischen Rahmenbedingungen für Elektrofahrzeuge diese bei einer täglichen Fahrleistung von unter 100 km unwirtschaftlich bleiben.

Abbildung 46 zeigt den vorhergesagten jährlichen Erwerb von Fahrzeugen (*yearly acquisitions*) und die generelle Flottenstruktur einer kleinen Flotte. Eine kleine Flottenstruktur besteht aus 10 kleinen, 20 mittleren und 30 großen Transportfahrzeugen. Die Zusammensetzung einer Fahrzeugflotte variiert im Zeitverlauf hinsichtlich des Anteils von Elektro- und Dieselfahrzeugen. Zum Vergleich: eine große Flotte besteht aus 100 kleinen, 200 mittleren und 300 großen LDVs.

Eine ökonomisch optimale Umstellung erfolgt kontinuierlich, wobei die Energiekostendifferenz bei kleinen Fahrzeugen zu gering ist, als dass kleine Elektrofahrzeuge (EV) wirtschaftlich werden. Insbesondere werden kleine LDVs in einer kleinen Flotte nie wirtschaftlich werden (siehe Schnittpunkt der EV-Linie mit der ICE-Linie, kein Break-even). Niedrige Strompreise und Kapitalkosten begünstigen den Einsatz von EV in großen Flotten.

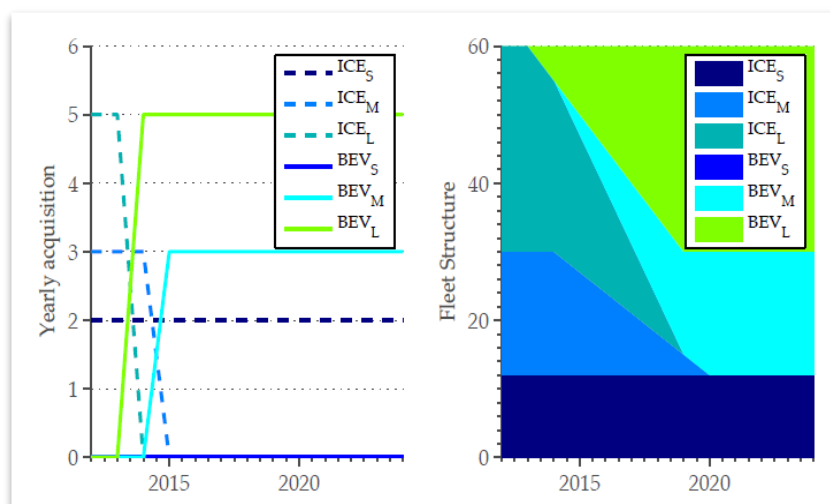


Abbildung 46 Vorhergesagter jährlicher Erwerb von Fahrzeugen (*yearly acquisitions*) und die generelle Flottenstruktur einer kleinen Flotte

Zusammenfassende Ergebnisse:

- **Entscheidende Faktoren** bei der TCO-Berechnung:
 - **Treibstoff-/Dieselpreis:** 40 % der Gesamtkosten bei Verbrennungsfahrzeugen.
 - **Gesamtleistung.**
- **Längere Laufleistungen:** Durch **geringere Betriebskosten** kann die **Kostendifferenz** zwischen Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen **signifikant vermindert werden**.
- Die **Stromkosten steigen relativ gesehen stärker** als die Treibstoffkosten, was die Attraktivität von Elektrofahrzeugen wiederum senkt.
- Die **langsame Marktdurchdringung** ermöglicht derzeit **keine Skalenerträge**.
- **Änderungen bei der Kostenbetrachtung - zugunsten von Elektrofahrzeugen -**, wenn **externe Kosten** berücksichtigt werden (weiterer Forschungsbedarf).
- Die **Batterietechnologie** macht etwa **40 % der Anschaffungskosten** und rund **20 % der totalen Lebenszykluskosten** eines Elektrofahrzeugs aus.
- Die **Batteriepreisentwicklung** bleibt die größte Unbekannte bei der Berechnung der **TCO für Elektrozustellfahrzeuge**.
- Die **momentanen Steuervorteile für Elektrofahrzeuge reichen nicht aus**, um die **Marktdiffusion zu beschleunigen**.
- Vollkostenvergleich mit TCO der Dieselfahrzeugflotte: eine Umstellung auf elektrische Antriebe insgesamt ist **derzeit noch nicht wirtschaftlich** (vgl. Kapitel 6.1.2)

6.2 Auswirkungen des Flottenbetriebs auf das Stromnetz

6.2.1 Ermittlung der Beeinflussung der Stromnetzstabilität

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war eine Entwicklung von Konzepten und Simulationsmodellen zur optimalen Koordinierung der Ladevorgänge von Flottenfahrzeugen (z.B. gestaffelte Beladung der Fahrzeuge).

Anhand der Optimierungsergebnisse, die eine Berechnung der Lastflüsse im gegebenen Stromnetz einschließt, kann der notwendige Netzausbau identifiziert werden.

Die Untersuchung der Ladestrategien aus verschiedenen Blickwinkeln – betrieblich (Maximierung der Reichweite der Elektrofahrzeugflotte, bearbeitet von DPOR und PGS), ökonomisch sowie ökologisch – mit Hilfe der multikriteriellen Entscheidungsanalyse, ergab folgende Ergebnisse. Bezüglich einer Senkung der Betriebskosten (ökonomische Zielfunktion) ist die Wahl einer höheren Ladeleistung wirtschaftlich dann vorteilhaft, wenn es hinreichend viele Phasen niedriger Preise bzw. Emissionen gibt. So kann die Nutzung einer hohen Ladeleistung bei variablen Strompreisen zu Vorteilen führen. Wie

allerdings die gewährten Preisnachlässe bei einer variablen Vergütungsstruktur tatsächlich aussehen, ist noch nicht geklärt.

Ähnlich wie bei den den Entscheidungskriterien zur Optimierung der Ladestrategien (Kapitel 6.1.2), zeigt Tabelle 35 die Kriterien für die multikriterielle Entscheidungsanalyse für Ladestrategien bezüglich der Minimierung von CO₂-Emissionen (ökologische Zielfunktion).

CO₂-Emissionen	= Jährliche Emissionen der Fahrzeugflotte , basierend auf Viertelstunden-Ladeintervallen. Einbezug der Stromerzeugung für Wind- und Solarenergie .
Unbedenklichkeit (externe Effekte)	= Berücksichtigung negativer Externalitäten , die keinen Bezug zum Kriterium der CO₂-Emissionen haben (beispielsweise Auswirkungen auf Anwohner oder das Ökosystem).
Kosten	= Kostenminimierung .
Durchführbarkeit	= Gibt an, in wie weit eine Ladestrategie oder ein Netzintegrationsansatz kompatibel mit den vorhandenen Arbeitsabläufen und Zustellplänen ist.
Machbarkeit	= Bewertung der technischen Hürden oder Schwierigkeiten , die während der Installation des Systems auftreten können.

Tabelle 35 Entscheidungskriterien für die multikriterielle Entscheidungsanalyse für Ladestrategien bezüglich der Minimierung von CO₂-Emissionen (ökologische Zielfunktion)

Abbildung 47 zeigt Ladestrategien bezüglich der Minimierung von CO₂-Emissionen (Verträge mit variablen Preisen), z.B. die Emissionssenkungs-Ladestrategie (*CO₂ minimizing charging*, 5. Zeile) oder „Rund um die Uhr“-Emissionssenkungs-Ladestrategie (*round-the-clock CO₂ minimizing charging*, 6. Zeile).

Rank acceptability indices

Alternative	Rank 1	Rank 2	Rank 3	Rank 4	Rank 5	Rank 6	Rank 7	Rank 8
Uncontrolled Charging	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
Lunch-break Charging	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Peak-power lowering Cha...	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Least-cost Charging	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₂ minimizing Charging	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Round-the-clock CO ₂ mi...	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Green electricity provider	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Photovoltaic System	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Abbildung 47 Ergebnisse der multikriteriellen Entscheidungsanalyse für Ladestrategien bezüglich der Minimierung von CO₂-Emissionen (ökologische Zielfunktion)

Selbst bei einer stärkeren Gewichtung zugunsten der CO₂-Emissionen sind andere Strategien (niedrigste Kosten) der Emissionssenkungs-Ladestrategie überlegen, da die eingesparte Menge von Emissionen nicht ausreicht, um andere Strategien zu dominieren.

Die Optimierung nach einer ökologischen Zielfunktion (Minimierung der CO₂-Emissionen) ergab demnach, dass eine Senkung der Emissionen durch eine höhere Ladeleistung erreicht werden kann (Abbildung 48). Die insgesamt erreichten Einsparungen reichen relativ gesehen allerdings nicht aus, um diese Ladestrategie zu verfolgen. Hinzu kommt, dass Emissionsenkungs-Ladestrategien die Einbettung in Zustellrouten und variable Pausen sowie Arbeitszeiten bedingen, dass so aus praktischen Erwägungen heraus solche Strategien nur schwer umsetzbar sind.

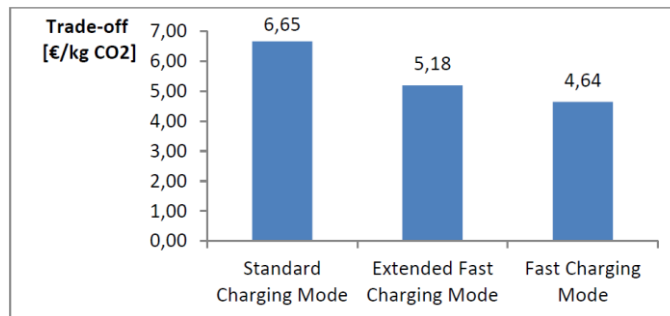


Abbildung 48 Vergleich der Kosten und CO₂-Emissionen (Trade-off) dreier Ladestrategien

Ein Vergleich der beiden Beispiel-Ladestrategien zeigt:

Emissionsenkungs-Ladestrategie

- Senkung der Emissionen durch Nutzung einer höheren Ladeleistung → ↑ Kosten
- Schnelllademodus weist einen besseren Trade-off zwischen den Kosten für die jeweilige Ladestrategie und den jeweiligen CO₂-Emissionen in €/kg aus, daher ist eine höhere Ladeleistung auch effizienter, um Emissionen zu vermeiden. D.h. Schnellladen hat geringere CO₂-Vermeidungskosten.
- Die insgesamt sind erreichbaren Einsparungen relativ gering (bester Trade-off im Sinne von überlegender Kosteneffizienz: € 6.331 werden ausgegeben, um 1,4 t Emissionen zu sparen)
- Andere Ladestrategien sind in Bezug auf kosteneffiziente CO₂-Reduktion besser geeignet (z.B. „Mittagspause“-Ladestrategie)
- Im Vergleich zu EU-Emissionszertifikaten (2,5-9 €/t), Kosten für Emissionsreduktion zu hoch.

„Rund um die Uhr“-Emissionsenkungs-Ladestrategie

- **Ladedauer: 24 h** (nur **Schnellladen** kommt zum Einsatz, da immer überlegen).
- Im Vergleich zur „Mittagspause“-Ladestrategie, eine **weitere Reduktion der Emissionen möglich (ca. 3.060-3.100 t/Jahr)**.
- Aus praktischen Erwägungen schwer umsetzbar:
 - **Einbettung in Zustellrouten** (optimale Ladezeit ändert sich von Tag zu Tag),
 - **Variable Pausen und Arbeitszeiten nötig** (arbeitsrechtliche Bedenken).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass eine hohe Ladeleistung (ökonomische Zielfunktion) bei Phasen niedriger Preise bzw. Emissionen vorteilhaft, jedoch stark abhängig von der tatsächlichen Vergütungsstruktur ist. Emissionssenkungsstrategien (ökologische Zielfunktion) sind kostenseitig insgesamt zu nachteilig und schwierig im Arbeitsablauf zu implementieren.

6.2.2 Lebenszyklusanalyse

Hier wurde der Frage nachgegangen, ob elektrische Zustellfahrzeuge die Schadstoffemissionen tatsächlich reduzieren helfen oder diese nur verschieben (vom Verbrennungsmotor/ Fahrzeugauspuff zu den großen und oftmals noch fossil befeuerten Kraftwerken). Dazu ist es wichtig, zusätzlich zum Betrieb der Fahrzeuge auch die vor- und nachgelagerten Prozesse (z. B. Emissionen bei der Herstellung und Entsorgung der diversen Fahrzeugkomponenten, Diesel und Strom) zu berücksichtigen. Das FCN hat mit Hilfe einer solchen Analyse die Emissionsbilanzen der von der Deutschen Post DHL

eingesetzten Diesel- und Elektrofahrzeuge miteinander verglichen, und zwar in Gramm CO₂ pro gefahrenem km (CO₂g/km).

Zur Bewertung und Analyse von Umweltwirkungen der eingesetzten Elektrofahrzeuge wurde im Berichtszeitraum eine wissenschaftliche Arbeit (auf Masterniveau) bezüglich des AP 6.3.3 Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) bearbeitet und beendet. Die Ergebnisse wurden auf dem internationalen European Electrical Vehicle Congress (EEVC) im Dezember 2015 in Brüssel vorgestellt.

Unter Berücksichtigung des vom Unter-Projektpartners IAEW prognostizierten deutschen Strommixes für 2020, eines Lebenszyklus von 10 Jahren und einer jährlichen Fahrstrecke von 11.000 km wurden die gesamten Emissionen berechnet, die in der Produktion, Nutzung und End-of-Life-Phase (Recycling) des Elektrofahrzeuges StreetScooter entstehen (Abbildung 49). Das Elektrofahrzeug StreetScooter wird hier mit light duty battery electric vehicle (LDBEV) bezeichnet.

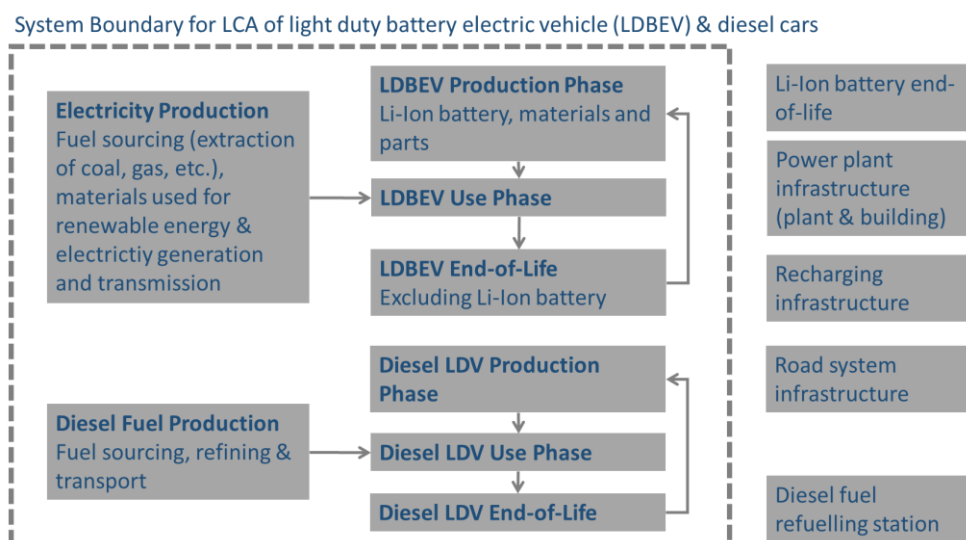


Abbildung 49 LCA Systemgrenze (LDBEV=Light Duty Battery Electric Vehicle)

Die Emissionen des Elektrofahrzeugs StreetScooter wurden mit den Emissionen einer fiktiven Kombination der beiden konventionellen Fahrzeuge VW T5 und VW Caddy verglichen, da die Eigenschaften (Laderaum, Gewicht, etc.) des eigens für die Postzustellung konzipierten StreetScooters nicht durch einen einzigen Fahrzeugmodelltyp mit Verbrennungsmotor widergespiegelt werden konnten (75 % VW T5 und 25 % VW Caddy). Die Emissionen wurden in vier Umweltverträglichkeitskategorien unterteilt: Neben CO₂ Äquivalenten (Erderwärmung) wurde auch die Versäuerung der Umwelt (SO₂ Äquivalente: SO₂ und NO_x), Feinstaubmenge (PM₁₀ Äquivalente: PM₁₀, SO₂ und NO_x) und flüchtige organische Verbindungen (*volatile organic compounds*, VOC), die für troposphärisches Ozon verantwortlich sind, erfasst.

Die LCA zeigt, dass über den gesamten Lebenszyklus hinweg eine Kombination von 75% VW T5 und 25 % VW Caddy mehr als doppelt so viel CO₂ (kg) emittiert als der StreetScooter (Abbildung 50). Die Kombination der konventionellen Fahrzeuge emittiert ca. 65% mehr CO₂ aus. Der StreetScooter emittiert jedoch ca. 18 % mehr SO₂ Äquivalente und ca. 15 % mehr PM₁₀ Äquivalente, aber ca. 40 % weniger VOC. Bei einer Fahrleistung von insgesamt 110.000 km emittiert der StreetScooter 160 gCO₂/km und die Kombination von 75 % VW T5 mit 25 % VW Caddy stößt 460 gCO₂/km aus.

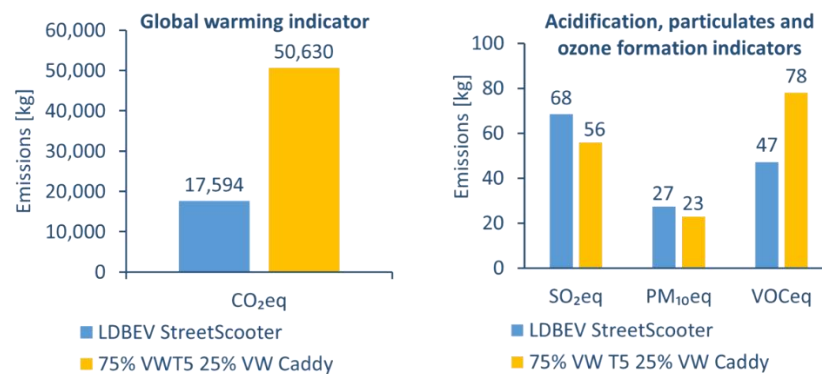


Abbildung 50 Emissionen im gesamten Lebenszyklus, unterteilt in vier Umweltverträglichkeits-Kategorien, StreetScooter vs. Kombination der konventionellen Fahrzeuge VW T5/Caddy

Unterteilt in die zwei Phasen Produktion und Nutzung (enthält End-of-Life-Phase) wird in Abbildung 51 deutlich, wo die meisten CO₂ Emissionen entstehen: In der Produktionsphase sind CO₂-Emissionen fast gleichauf (ca. 6.000 kg), jedoch divergieren sie in der Nutzungsphase stark. In der Nutzungsphase sind die CO₂-Emissionen von 75 % VW T5 und 25 % VW Caddy viermal so groß wie die des StreetScooters (ca. 44.000 kg gegenüber 11.000 kg).

SO₂-, PM₁₀- und VOC-Emissionen des StreetScooters sind verglichen mit den Emissionen der VW T5/Caddy-Kombination in der Produktionsphase fast gleichauf (Abbildung 52, linke Grafik). Die Emissionen des StreetScooters sind aufgrund der aufwändigen Produktion der Batterien nicht geringer (und in zwei Umweltverträglichkeitskategorien sogar höher) als die der Kombination der konventionellen Fahrzeuge VW T5/Caddy. In der Nutzungsphase unterscheiden sie sich vor allem in den VOC-Emissionen eklatant (15 kg gegenüber 46 kg), offensichtlich auf Grund der Abgasemissionen der konventionellen Verbrennungsmotorfahrzeuge. Jedoch emittiert der StreetScooter mehr SO₂ und PM₁₀

als die Kombination der konventionellen Fahrzeuge VW T5/Caddy, da ein Anteil von 26 % Kohle am Strommix angenommen wird.

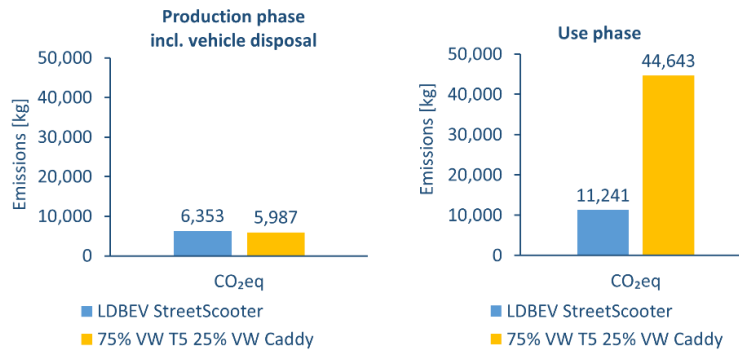


Abbildung 51 CO₂-Emissionen der Produktions- und Nutzungsphase, StreetScooter vs. Kombination der konventionellen Fahrzeuge VW T5/Caddy

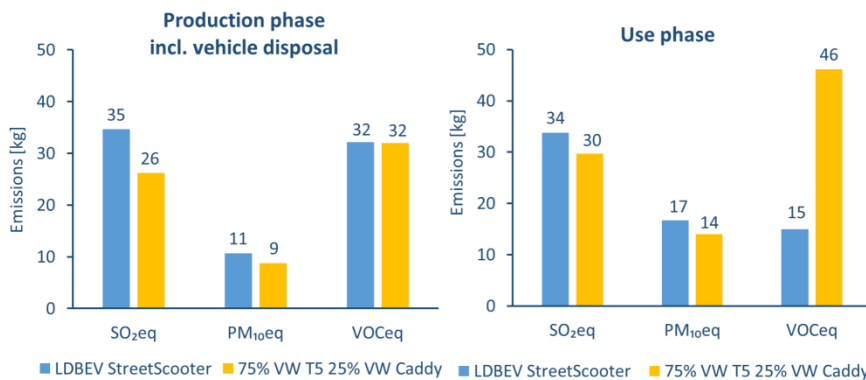


Abbildung 52 SO₂-, PM₁₀- und VOC-Emissionen der Produktions- und Nutzungsphase, StreetScooter vs. Kombination der konventionellen Fahrzeuge VW T5/Caddy

Mögliche Lösungen für die hohen Emissionswerte der Elektrofahrzeuge sind Filtertechnologien an den Stromerzeugungsanlagen, ein höherer Anteil an erneuerbaren Energien im Strommix, eine längere Nutzung der Batterien und eine Ausweitung der Fahrstrecke der Elektrofahrzeuge.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse einer Lebenszyklusanalyse die Umweltwirkungen der eingesetzten Elektrofahrzeuge zeigen. Unter Berücksichtigung des prognostizierten deutschen Strommixes für 2020, eines Lebenszyklus von 10 Jahren und einer jährlichen Fahrstrecke von 11.000 km wurden die gesamten Emissionen berechnet, die in der Produktion, Nutzung und End-of-Life-Phase (Recycling) des Elektrofahrzeuges StreetScooter entstehen. Die Ergebnisse zeigen, dass die indirekten, globalen Emissionen der Elektrofahrzeuge in bestimmten Phasen des Lebenszyklus nicht geringer sind als die der konventionellen Zustellfahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor.

6.3 Veröffentlichungen des FCN

Working Paper

Esteve Soldado J.F., Wolff S., Madlener R. (2015). Environmental Impact of Electrifying Postal Delivery Fleets in Inner-City Districts: A Life-Cycle Assessment of the *StreetScooter*, FCN Working Paper No. 18/2015, Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior, RWTH Aachen University, November.

Beiträge zu Konferenzen und Workshops

In Vorberei.: Wolff S., Madlener R. (2017). Driven by change? EV drivers' acceptance and perceived productivity at Deutsche Post DHL, International Conference on Operations Research 2017 (OR2017) "Decision Analytics for the Digital Economy", 6.–8. September 2017, Berlin.

Wolff, S., Madlener R. (2017). Driven by change? EV drivers' acceptance and perceived productivity at Deutsche Post DHL. 9. Wissenschaftsforums Mobilität "Mobility and Digital Transformation - Challenges and Future Paths", Fraunhofer-inHaus-Zentrum, Duisburg, 29. Juni 2017.

Wolff, S., Madlener Reinhard (2017). Driven by change? EV drivers' acceptance and perceived productivity at Deutsche Post DHL. Doktorand*innen Kolloquium "Postfossile Mobilität - Keine Energiewende ohne Mobilitätswende?" des Leibniz-Forschungsverbunds Energiewende, am Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung (ILS), Dortmund, 20.-21. März 2017.

Esteve Soldado J.F., Wolff S., Madlener R (2015). Environmental Impact of Electrifying Postal Delivery Fleets in Inner-city Districts: A Life-cycle Assessment of the *StreetScooter*, European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress (EEVC 2015), 2.-4. Dezember 2015, Brüssel, Belgien. ISSN: 0774-5036.

Wolff S., Madlener R. (2014). Electrification of Postal Delivery Fleets Considering Competing Battery Technologies and Charging Strategies, International Conference on Operations Research 2014 (OR2014) "Business Analytics and Optimization", 2.-5. September 2014, Aachen, Deutschland.

Posterpräsentation

Am 4. November 2015 präsentierten das PGS (Frau Ilka Bremer und Herr Fabian Rücker) gemeinsam mit dem FCN (Frau Stefanie Wolff) auf dem 4. Kompetenztreffen Elektromobilität NRW in Essen ein Projektposter, das den damaligen Forschungsstand zeigt:

Bremer I., Rücker F., Wolff S. (2015). Testing E-Mobility in Fleet Operations – CO₂-Free Delivery in Bonn – CO₂ GoGreen. Posterpräsentation, Kompetenztreffen Elektromobilität in NRW, Essen, Deutschland, 4. November 2015.

Abschlussarbeiten

Pyrlik, M. (2013). Ökonomische Analyse der Elektrifizierung einer Zustellfahrzeugflotte unter besonderer Berücksichtigung verschiedener Batterietechnologien und -ladestrategien, FCN, RWTH Aachen.

Tejada, R. (2013). Renewal Strategy for Commercial Fleets in Germany, FCN, RWTH Aachen.

Overkott, M. (2013). Netzintegration und Ladestrategien kommerziell genutzter Elektrofahrzeuge – Eine multikriterielle Entscheidungsanalyse, FCN, RWTH Aachen.

Esteve Soldado J.F. (2015). Environmental Impact of Electrifying Postal Delivery Fleets in Inner-city Districts: A Life-cycle Assessment of the StreetScooter, FCN, RWTH Aachen.

7 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse des FCN für KMU

Die Ergebnisse des FCN schlagen einen großen Bogen von der technischen (netzseitig), über die ökonomischen (Wirtschaftlichkeit) und ökologischen (Lebenszyklusanalyse) Aspekte bis hin zu den sozialwissenschaftlichen (Nutzerakzeptanzbefragung) Folgen und Umständen einer Flottenumstellung,

Die hier ermittelten Ergebnisse liefern nicht nur Einblicke in eine Flottenumstellung, sondern auch konkrete monetäre Zahlen zur Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Akzeptanz durch MitarbeiterInnen einer E-Flotte im Vergleich zu einer Diesel-/Verbrennungsmotor-Flotte.

Demnach können die Ergebnisse für zahlreiche Anwender im KMU-Bereich von Nutzen sein.

Die Ergebnisse der **flotten- und netzseitigen Berechnungen** sind bedeutend für Flottenmanager, Investitionsentscheider, Netzbetreiber und Politikgestalter.

Die **Lebenszyklusanalyse** ist unabdingbar für Automobilhersteller und Umweltverbände. Ebenso wie die TCO-Berechnungen könnten sie als Grundlage für den Kaufentscheidungsprozess beim Kunden dienen, z.B. durch Marketing seitens der Automobilhersteller bzw. der Verbraucherschützer in Kampagnen unterstützen, um den Kunden transparent über die Kosten eines konventionellen Verbrennungsmotorfahrzeuges im Vergleich zu einem E-Fahrzeug zu informieren.

Die **Nutzerumfrage** kann oder sollte in anderen Unternehmen durchgeführt werden, die Elektrofahrzeuge für Zustellungen/Abholungen etc. nutzen. Dadurch werden Ineffizienzen auf Nutzerseite aufgedeckt, wenn es z.B. Änderungen des Nutzerverhalten gibt, die man technisch nicht erklären kann. Zusätzlich zu den durch DPOR genannten Unternehmen (Kapitel 4) sind das zum Beispiel:

- Weitere Dienstleister aus dem Kurier-Express-Paket-Sektor (KEP)
- Pflegedienste
- Lebensmittellieferdienste

Aus den Ergebnissen der Nutzerumfrage/Akzeptanzbefragung lassen sich Implikationen für Flotten-/Personalverantwortliche (z.B. Mitarbeiterschulungen) und Fahrzeugentwickler/-designer ableiten.

8 Einleitung und Problemstellung des PGS

Einige Problemstellungen, die beim Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen im Zustellungsbetrieb auftreten, wurden bereits eingehend in den Kapiteln der wissenschaftlichen Beiträge des DPOR und des FCN diskutiert, wie zum Beispiel die Tourenplanung und Betriebskostenanalyse. Über die Einsatzplanung und betriebswirtschaftliche Analyse hinaus ergeben sich weitere technische Herausforderungen bei Planung, Kauf und Einsatz der Fahrzeugflotte und der Ladeinfrastruktur. Technischen Fragestellungen und dazugehörige Lösungsansätze zu Ladekonzepten und Ladeinfrastruktur werden im folgenden Kapitel 5.1.1 diskutiert und die wissenschaftlichen Ergebnisse vorgestellt und die Ausgangssituation beschrieben wird. Die bearbeiteten Themen umschließen dabei eine Beurteilung der Ladeinfrastruktur, Simulation und Optimierung von Fahrten und Ladestrategien der Fahrzeuge sowie eine Betrachtung der netzseitigen Auswirkungen des Flottenbetriebs.

Das Institut

Prof. De Doncker leitet die beiden Institute „Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA)“ und „Power Generation and Storage Systems (PGS)“. Das Lehr- und Forschungsgebiet „Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik“ von Prof. Sauer ist in Teilen ebenfalls in PGS integriert. Die Hauptaktivitäten im Bereich der elektrochemischen Energiespeichersysteme betreffen Batteriemangement, Modellierung, Lebensdauervorhersagen, Diagnose und experimentelle Untersuchung kommerzieller Energiespeicher wie Batteriespeicher (Lithium-Ionen, Blei-Säure, Nickel-XX, Redox-Flow, etc.), Superkondensatoren oder Brennstoffzellen sowie deren Integration in mobile und stationäre Anwendungen. Außerdem werden Batteriediagnosegeräte zur Vermessung und Diagnose von Batteriesystemen entwickelt. Die Bereitstellung von Netzdienstleistungen mit Speichersystemen bildet ein weiteres Forschungsgebiet. Im Bereich der Leistungselektronik liegt der Forschungsschwerpunkt in der effizienten Transformation elektrischer Energie. Schaltungen und Komponenten werden ebenso wie Regelungskonzepte simuliert. Die betrachteten Anwendungen umfassen dabei Photovoltaikanlagen, Umrichter für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Windturbinen und Hochleistungsgleichspannungswandler. Im Bereich der Leistungselektronik wird außerdem zu Gleichspannungsnetzen der Zukunft geforscht, um Windenergieanlagen in einem Windpark effizient miteinander zu verbinden. An den beiden Instituten PGS und ISEA arbeiten derzeit ca. einhundert Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie weitere ca. einhundert Studierende.

8.1 Ausgangssituation

Die Fahrzeugflotte der deutschen Post DHL wurde im Verlauf des Projektes von einer reinen Dieselflotte auf eine batterieelektrische Flotte umgestellt. Für die wissenschaftlichen Arbeiten wurden vier Standorte im Raum Bonn ausgewählt, die die Daten lieferten. Diese Standorte der Zustellfahrzeuge mussten innerhalb des Projekts mit der benötigten Ladeinfrastruktur ausgestattet werden. Die Umstellung wurde dabei wissenschaftlich begleitet, wobei zuvor eine Beurteilung durchgeführt wurde, deren Ergebnisse im Kapitel 9.1 zu finden sind. Das gewählte Ladekonzept für die Fahrzeugflotte bestimmte daraufhin die Dimensionierung der Infrastruktur und somit die Investitionskosten, die zu Beginn der Umstellung auf eine elektrifizierte Flotte anfielen. Darüber hinaus hatte das Ladekonzept unmittelbar Auswirkungen auf die Ladestrategie, mit welcher jedes Fahrzeug, genauer die Fahrzeugbatterie, nach der Fahrt im Zustellbetrieb wieder aufgeladen wird. Dabei kann durch Anpassung von Ladeleistung und

Zielladezustand Einfluss auf die Batteriealterung genommen werde. Das hat wiederum Einfluss auf die Betriebskosten. Auf diese Aspekte werden im Kapitel 9.2 detailliert eingegangen. Durch Datenanalysen und drei Labormessungen wird eine Alterung der Fahrzeugbatterie aufgezeigt, die Ergebnisse werden im Kapitel 9.2 diskutiert.

Ein weiterer Aspekt, der wissenschaftlich betrachtet wird, ist die Belastung des lokalen Stromnetzes. Eine Simulation soll zeigen, wie die Beeinflussung aussieht. Der zeitgleiche Ladevorgang aller Fahrzeuge an einem Standort wird dabei betrachtet, der dann zu einer Beeinflussung des lokalen Stromnetzes führt. Im Kapitel 9.4 wird die Problematik betrachtet, die Ladestrategie für die Fahrzeugflotte im Hinblick auf eine minimale Beeinflussung des lokalen Netzes zu optimieren.

8.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Um die Ziele des Projektantrages zu erreichen, wurde folgende Arbeitsteilung vorgenommen:

- Literaturrecherche
- Datenakquisition: Für die Analyse der Batterielebensdauer wurden Telemetriedaten aus den Fahrzeugen akquiriert. Diese mussten aufbereitet werden, da sie fehlerhafte Datenpunkte beinhalten oder fehlende Datenpunkte mussten ergänzt werden.
- Zusammenarbeit mit Dritten: Bezüglich Vorhersagen der CO₂ Emissionen des Kraftwerkparks in Deutschland im Jahr 2020 haben sich Mitarbeiter des PGS und des FCN mit Mitarbeitern des Instituts für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW) der RWTH Aachen getroffen um Kenntnisse auszutauschen.
- Projektpartnertreffen: Im Rahmen von Projektpartnertreffen mit Deutsche Post DHL, Langmatz GmbH, Device Insight GmbH, PGS sowie DPOR in Bonn und RWTH-internen Besprechungen in Aachen wurden die bisherigen Erkenntnisse, der konkrete Projektstatus und der weitere Zeitplan ausgetauscht bzw. abgestimmt.
- Ausschreibung und Durchführung von Abschlussarbeiten, um Teilaspekte der Arbeitspakete abzudecken.

8.3 Stand der Wissenschaft

Aktuelle wissenschaftliche Ansichten hinsichtlich der folgenden Aspekte sind hier zu finden:

- Kriterien zur Beurteilung der Ladestrategien: siehe Kapitel 5.1.1
- Optimierung von Ladestrategien: siehe Kapitel 5.1.2
- Ermittlung der Beeinflussung der Stromnetzstabilität: siehe Kapitel 5.2.1

9 Ergebnisse des PGS

9.1 Beurteilung der Ladekonzepte

Ladekonzepte für Elektrofahrzeuge können aus Sicht verschiedener Akteure und unter unterschiedlichen Gesichtspunkten beurteilt werden. Im Folgenden wird ein Konzept für einen bestehenden Betriebshof mit gegebenen Randbedingungen ausgearbeitet. Die Betrachtung soll die technischen Möglichkeiten einschließen, welche für eine große Fahrzeugflotte die Betriebs- und Anschaffungskosten optimiert, also eine ökonomische Beurteilung durchführt. Die Kommunikationsmöglichkeiten, welche die Fahrzeuge innehaben, werden dabei erst einmal theoretisch betrachtet. Somit kann abgeschätzt werden, welche Kosten für ein Ladekonzept anfallen, je nach Ausstattung der Fahrzeugflotte. Die Kosten der zusätzlichen Kommunikationsschnittstelle im Fahrzeug fallen dann bei dem Fahrzeughersteller an und werden hier nicht betrachtet.

Hier wird ein spezieller Betriebshof der deutschen Post DHL in Bonn betrachtet. Die elektrische Infrastruktur an diesem Betriebshof des Zustellers muss neben der Energieversorgung für alle Sortieranlagen, Tore, etc. nach der Umstellung zusätzlich die Versorgung der Ladestationen etc. gewährleisten. Vor der Installation von Ladeinfrastruktur muss daher sichergestellt werden, dass die o.g. Funktionen nicht eingeschränkt werden. Daher wurde zuerst geprüft, ob die benötigten Energiemengen für die Fahrzeuge von der Infrastruktur bereitgestellt werden können.

Hierzu wurde der Energiebedarf der einzelnen Zustellfahrzeuge von verschiedenen Herstellern recherchiert oder abgeschätzt. Zusammen mit Routenspezifischen Informationen konnte somit ein streckenspezifischer Energiebedarf berechnet werden. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der Unterscheidung zwischen Sommer- bzw. Winterbetrieb und auf der Berücksichtigung einer zusätzlichen Sicherheitsmarge für mögliche Umwege oder hohe Verkehrsaufkommen und Stau, um eine konservative Abschätzung zu gewährleisten. Auf Basis der Ergebnisse erfolgte eine Auslegung der Ladeinfrastruktur und des Netzanschlusses für alle zu berücksichtigenden Zustellstationen. Dabei wurden unterschiedliche verfügbare Transformatorgrößen auf ihre Eignung hin evaluiert.

Die Ergebnisse für ein Fahrzeug sind in Tabelle 1 dargestellt und die Auswertung von Transformatorleistungen für eine Zustellstation sind in Tabelle 39 dargestellt. Die insgesamt benötigte Energie für alle Zustellfahrzeuge an dem Standort beträgt im schlechtesten Fall (Winterbetrieb und alle Fahrzeuge leer) 841 kWh. Die bestellbaren Transformatorleistungen sind über die Spalten und die möglichen Stillstandzeiten der Fahrzeuge über die Zeilen aufgetragen.

Die Analysen ergaben, dass im operativen Zustellbetrieb mindestens sechs Stunden Ladedauer gewährleistet werden können. Daher sollte der eingesetzte Transformator mindestens 170 kW freie Leistung während der Ladephase aufweisen. Die genauere Analyse des Ladevorgangs zeigt jedoch, dass bei einer Transformatordimensionierung von 170 kW eine gesteuerte Ladung der ca. 30 Fahrzeuge umfassenden Flotte notwendig wird, da die Transformatorleistung bereits

		Energiebedarf Iveco Daily [kWh]			
		Netto		+50% Sicherheitsmarge	
Zustellbezirk	Fahrstrecke [km]	Sommer	Winter	Sommer	Winter
A	16,18	11,16	13,91	16,74	20,87
B	20,62	14,22	17,73	21,34	26,59
C	19,60	13,53	16,86	20,29	25,29
D	25,04	17,28	21,54	25,92	32,31
E	20,04	13,83	17,24	20,74	25,85
F	16,41	11,32	14,11	16,98	21,17

Tabelle 36 Evaluierung unterschiedlicher Transformatorleistungen für die Ladung der Zustellfahrzeuge an einem Standort anhand fehlender bzw. überschüssiger Ladeenergie in kWh

bei 20 ungesteuert geladenen Fahrzeugen überschritten wird, und damit die verfügbare Transformatorleistung nicht dauerhaft überschritten wird bzw. der Transformator in einen kritischen Zustand gerät. Der erste Ansatz für eine gesteuerte Ladung beruht auf einer zeitlichen Staffelung der Ladevorgänge, wobei jedes Fahrzeug ein statisches Ladeintervall erhält. Das konnte auch sehr einfach von dem im Projekt beteiligten Hersteller Langmatz anhand eines hinterlegten „Stundenplans“ für jedes Fahrzeug umgesetzt werden.

Ein anderer Ansatz beinhaltet eine dynamische Ladeplanung, welche Preissignale vom Energieversorger, fahrzeugspezifische Informationen und Batteriealterungscharakteristika berücksichtigt und den Stundenplan optimiert. Darauf wird im Kapitel 9.2 näher eingegangen.

Die gerade genannte Problematik der Transformatorauslastung zeigt deutlich, dass eine grundlegende Entscheidung getroffen werden muss, hinsichtlich der Steuerung der Ladevorgänge. Die Einsparung bei der Auslegung des Transformators bedeutet in diesem Fall zwingend, dass in eine Steuerung der Ladevorgänge investiert werden muss. Die Steuerung kann auf Infrastrukturseite oder auf Fahrzeugseite implementiert werden. Die nachfolgenden drei Szenarienvorstellungen behandeln diese Problematik.

Drei Szenarien stellen diese Infrastruktur-Fahrzeug-Kombinationen dar, welche sich in der Steuerungsmöglichkeit der drei Teilnehmer unterscheiden. Diese sind in Abbildung 53 dargestellt. Ein Teilnehmer, der „Rechner“ oder jede zentrale Steuerungseinheit ist dabei als übergeordnete Kommunikationseinheit zu sehen. Die „Ladesäule“ (LS) oder jede Möglichkeit einer abgesicherten Steckdose, eines Ladepunkts, Ladesäule oder Wallbox steht für die Schnittstelle zwischen dem Fahrzeug und der elektrischen Infrastruktur am Betriebshof. Das Zustellfahrzeug „E-Fzg.“ mit batterieelektrischem Antrieb wird nach jeder durchgeführten Fahrt an einer dieser Ladesäulen angeschlossen. Der Zeitpunkt des Ladebeginns soll dabei vom Zeitpunkt des Ansteckens an die Ladesäule abweichen. Die drei Infrastruktur-Fahrzeug-Kombinationen sind als Szenarien A, B und C der Abbildung 53 zu entnehmen. Die Kommunikationswege sind dabei jeweils als Pfeile zwischen den drei Blöcken „Rechner“,

	Transformatorleistung [kW]					
Ladedauer [h]	85	127,5	170	315	472,5	616
1	-756	-714	-671	-526	-369	-225
2	-671	-586	-501	-211	104	391
3	-586	-459	-331	104	576	1007
4	-501	-331	-161	419	1049	1623
5	-416	-204	9	734	1521	2239
6	-331	-76	179	1049	1994	2855
7	-246	51	349	1364	2466	3471
8	-161	179	519	1679	2939	4087
9	-76	306	689	1994	3411	4703
10	9	434	859	2309	3884	5319

Tabelle 37 Evaluierung unterschiedlicher Transformatorleistungen für die Ladung der Zustellfahrzeuge an einem Standort anhand fehlender bzw. überschüssiger Ladeenergie in kWh

„Ladesäule“ und „E-Fzg“ dargestellt. Es wird im Folgenden näher auf die speziellen Funktionalitäten innerhalb der Szenarien eingegangen.

Szenario A:

Bei Szenario A handelt es sich um das Referenzszenario. Das Fahrzeug, welches geladen werden soll, wird in jedem Fall nach beendeter Zustellung an einer Ladesäule angeschlossen. Im Szenario A ist diese eine mit FI-Schutz abgesicherte Steckdose. Die Ladesäule hat somit keine Informationen über den Zustand des Fahrzeugs. Somit lässt sich mit dieser Ausstattung keine Steuerung durchführen und das Fahrzeug wird im Normalfall sofort nach Einstecken des Steckers geladen.

Die Kosten für dieses Szenario beinhalten nur die Anschaffung von abgesicherten Steckdosen inkl. der elektrischen Verkabelung. Ein Server als Datenbank hat geringe Kosten im Vergleich zu den elektrischen Installationen. Zusammengefasst sind diese die Referenzkosten, die in jedem Fall anfallen, wenn man seine Flotte elektrifizieren möchte.

Wenn eine Datenbank implementiert wird, dann muss über den Fahrer der Ladezustand abgefragt und somit indirekt eine Abschätzung des Fahrzeugzustands ermöglicht werden. In Kombination mit historischen Daten können dann Parameter zur Auslegung der Fahrzeuge gewonnen werden. Diese können für eine kostenoptimale Auslegung der Batteriegröße genutzt werden.

Szenario B:

Dieses Infrastrukturszenario bietet für den Flottenmanager alle Funktionalitäten zur Steuerung des Ladevorgangs durch eine vernetzte Ladesäule. Diese enthält Kommunikationstechnik zur Fahrzeugidentifizierung und zur Kommunikation mit dem zentralen Datenserver. Die Authentifizierung per RFID-Chip steht beispielhaft für jede Technologie, die günstig und mit wenig Aufwand im Fahrzeug

nachgerüstet werden kann. Die Messung von Ladestrom und Spannung lässt Rückschlüsse auf den Batteriezustand zu. Die genauen Informationen bleiben unklar, da es sich bei den gemessenen Größen um Wechselstrom und –spannung handelt, die auf Fahrzeugseite über einen leistungselektronischen Gleichrichter (das „Ladegerät“) für das Laden der Batterie in Gleichstrom und –spannung umgewandelt werden müssen. Daher sind die Batteriepole niemals messtechnisch erfassbar. Über einen Systemcheck wird erfasst, ob das Fahrzeug lädt und darüber hinaus wird erfasst, wie viel Energie nachgeladen wurde. Somit kann ein Fahrzeugstatus prognostiziert werden, wenn zusätzliche Informationen aus der Fahrzeughistorie und zum Beispiel aus weiteren zusätzlichen Telematikdaten vorliegen.

Diese müssen von der Datenbank auf Infrastrukturseite vorgehalten werden, so dass Informationen zu jedem Fahrzeug bereitstehen, ohne dass das Fahrzeug selbst keine Informationen beitragen muss. Energieverbräuche werden über zurückgelegte Distanzen, Umgebungsbedingungen und Fahreigenschaften ermittelt. Das Fahrzeug bietet dabei keine Informationen über den Batterieladezustand, Energieverbrauch, Fahrverhalten etc. an. Daher bildet dieses Szenario die Situation ab, in der ein Fahrzeug vom Hersteller X an eine Ladesäule vom Hersteller Y angeschlossen wird. Hierbei werden keine Informationen vom Fahrzeug an die Ladesäule weitergegeben, was für den Betreiber einen großen Mehraufwand bedeutet, wenn er seine Flotte mit dynamischen Einsatzplänen und optimierten Ladeverfahren betreiben möchte.

Szenario C:

In diesem Szenario ist das Fahrzeug mit allen Funktionalitäten ausgestattet, um eine Steuerung zu implementieren. Dazu gehört eine Kommunikationsinfrastruktur, die speziell für die Weitergabe von Batteriedaten geeignet ist. Vor allem Informationen über Batteriespannung und Batteriestrom, um den Ladezustand möglichst genau bestimmen zu können, müssen an den zentralen Rechner kommuniziert werden. Im Gegensatz zu Szenario B muss der Flottenbetreiber diese Infrastruktur nicht direkt mit in die Kostenanalyse aufnehmen. Die Kosten können indirekt über den Fahrzeugpreis an den Betreiber weitergegeben werden.

Über den zentralen Rechner werden auch Authentifizierungsvorgänge abgewickelt. Zudem werden hier alle Informationen zu den Einsatzplänen und Ladehistorien gesammelt. Das heißt, dass durch die Sammlung aller Informationen eine dynamische Planung von Fahrzeug zu Strecke und Fahrer ermöglicht werden kann. Weiterhin können durch Informationen zu Strompreis und „Grünstrom“-Gehalt oder Informationen zu Trafo- oder Netzauslastung optimierte Ladestrategien umgesetzt werden. Das Fahrzeug erhält im Falle einer geänderten Einsatzplanung die Aufforderung zum Start bzw. Stopp der Ladung oder noch spezifischer einen Leistungswert.

Dieses Szenario bietet dem Flottenbetreiber die größtmögliche Einflussnahme auf die Ladevorgänge der Fahrzeuge. Weiterhin entfallen die Kommunikationsstrukturen, die vielfach in jeder Ladesäule vorhanden sein müssen, da sie in der zentralisierten Form nur einmal abgebildet werden müssen. Ein weiterer Vorteil liegt in den genau erfassten Batteriedaten. Es ist jedoch an dieser Stelle anzumerken, dass die Fahrzeughersteller aktuell nur eingeschränkt Zugriff auf die relevanten Informationen wie den Ladezustand der Batterie zulassen. Hierbei werden hauptsächlich proprietäre Lösungen, z.B. über eine App, angeboten.

Kostenabschätzung:

Die Abschätzung der Kosten erfolgt immer auf Basis spezifischer Informationen, die sich für jede Betriebsart und Betriebsort verändern. Daher wird hier auf die Angabe von Zahlen verzichtet. Der Übersicht in Tabelle 38 sind die Komponenten zu entnehmen, die für die Ausstattung benötigt werden. Weiterhin sind dieser Tabelle folgende Nutzenpotentiale zu entnehmen:

Nutzenpotential Überwachung und Steuerung des Ladevorgangs:

Die Überwachung des Ladevorgangs bringt dem Betreiber die Vorteile des aktiven Wissens über Fehlerfälle. Falls nach einem Fehler (Stromausfall, FI-Schutz löst aus, Vandalismus, etc.) das Fahrzeug den Ladevorgang unterbricht, dann kann ein Fehlermanagement gestartet werden. Für Flotten mit begrenzter Anzahl von Ersatzfahrzeugen ist dieses Fehlerhandling eine wichtige Voraussetzung für den reibungslosen Betrieb, besonders in Hochbetriebszeiten wie Weihnachten.

Die Steuerung des Ladevorgangs ermächtigt den Flottenbetreiber zu aktiven Entscheidung und Eingreifen in den Ladevorgang. Dabei ist für zukünftige Einsatzszenarien interessant, dass gesteuerte Fahrzeugbatterien am Netz auch für sekundäre Einsatzzwecke wie zum Beispiel dem lokalen Lastausgleich oder sogar der Vermarktung von positiver (Ladevorgang starten) und negativer (Ladevorgang beenden oder entladen) Regelleistung genutzt werden könnten.

Nutzenpotential Datenbankbetrieb:

Der Datenbankbetrieb für die Sammlung historischer Fahr- und Ladedaten eröffnet die Möglichkeit anhand von historischen Verläufen die Batteriefüllstände zu schätzen. In Kombination mit Fahrzeugrealdaten lässt sich eine reichweitenoptimierte Ladung prognostizieren. Schnittpunkte der Datenbank, z.B. zum personenbezogenen Daten wie dem Arbeitskalender sind Voraussetzung für die Implementierung der Optimierung.

Nutzenpotential Optimierung der Ladestrategie:

Zusätzlich zu den oben genannten Informationen über Ladezustand, Energieverbräuchen und Dienstplan des Nutzers, die aus der Datenbank entnommen werden können, werden Informationen über den aktuellen Strommix bei der Optimierung der CO₂-Emissionen benötigt. Über den Status der Batterie und das Alterungsverhalten der jeweiligen Technologie werden Informationen über die Alterung der einen Fahrzeugbatterie gewonnen. Das Potential der Reduktion der Gesamtflottenkosten ist groß, wenn alle Informationen zu jedem Zeitpunkt vorhanden sind. Auf diese Problematik wird im Kapitel 9.2 eingegangen.

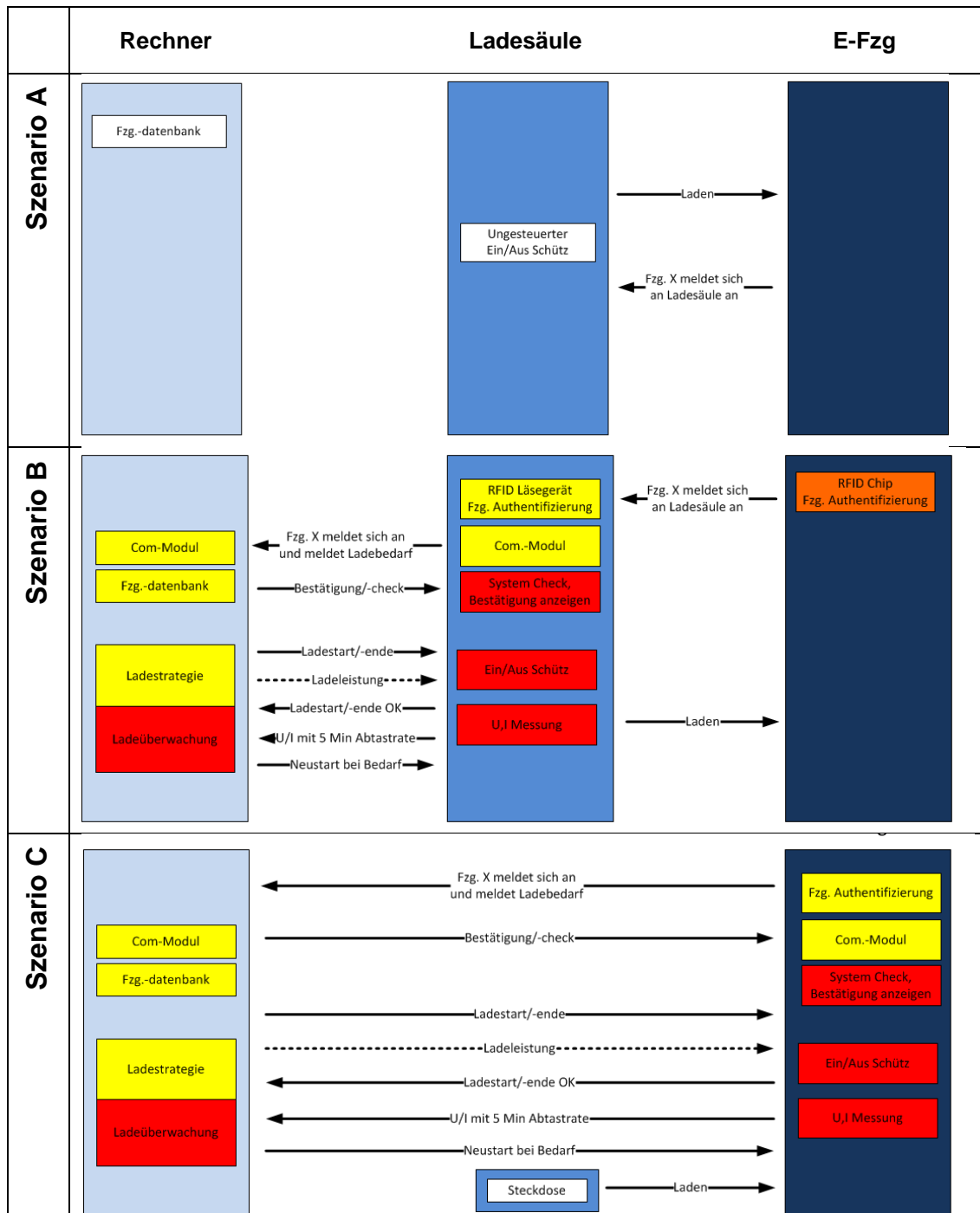


Abbildung 53 Szenarien A bis C verschiedener Fahrzeug-Infrastruktur-Kombinationen

Szenario A	Nutzenpotenziale				
	<p>Ungesteuerte Vollladung nach Einstecken des Fahrzeugs an die Ladesäule</p> <p><u>Datenbankbetrieb:</u> Batteriefüllstand kann anhand von der Tankanzeige zusammen mit historischen Daten abgeschätzt werden Prognose/Simulation kombiniert mit historischen Daten: kostenoptimale Batterieauslegung und reichweitenoptimale Ladung</p>				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemente</th> <th>Kostenpunkte</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Berechnungsserver und Fahrzeugdatenbank Ungesteuerte Ladesäule mit Stromnetzanbindung</td> <td>Zentralserver mit Datenbank Ladesäule mit Schütz</td> </tr> </tbody> </table>	Elemente	Kostenpunkte	Berechnungsserver und Fahrzeugdatenbank Ungesteuerte Ladesäule mit Stromnetzanbindung	Zentralserver mit Datenbank Ladesäule mit Schütz
Elemente	Kostenpunkte				
Berechnungsserver und Fahrzeugdatenbank Ungesteuerte Ladesäule mit Stromnetzanbindung	Zentralserver mit Datenbank Ladesäule mit Schütz				
Szenario B	Nutzenpotenziale				
	<p><u>Steuerung und Überwachung des Ladevorgangs</u> Zentrale Ladeüberwachung Gesteuertes Laden</p> <p><u>Optimierung des Ladevorgangs:</u> Implementierung von intelligenten Ladestrategien z.B. zur Minimierung der Batteriealterung</p> <p><u>Datenbankbetrieb:</u> reichweitenoptimale Ladung und Batteriefüllstand anhand von Realdaten aus der Ladesäule Batteriefüllstand anhand von Realdaten Analyse des Energieverbrauchs</p>				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemente</th> <th>Kostenpunkte</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Anmeldung: RFID, Ethernet, Barcode Zentralrechner und Fahrzeugdatenbank Stromnetz- und Kommunikationsanbindung der Ladesäule Ladesäule mit gesteuerten Ladeschützen Zentraler Server mit Steuerungssoftware und Kommunikationsanbindung</td> <td>Zentralserver mit Datenbank Ladesäule mit Com-Anbindung RFID Lesegerät/RFID Chips Steuerungssoftware Kommunikationseinheit</td> </tr> </tbody> </table>	Elemente	Kostenpunkte	Anmeldung: RFID, Ethernet, Barcode Zentralrechner und Fahrzeugdatenbank Stromnetz- und Kommunikationsanbindung der Ladesäule Ladesäule mit gesteuerten Ladeschützen Zentraler Server mit Steuerungssoftware und Kommunikationsanbindung	Zentralserver mit Datenbank Ladesäule mit Com-Anbindung RFID Lesegerät/RFID Chips Steuerungssoftware Kommunikationseinheit
Elemente	Kostenpunkte				
Anmeldung: RFID, Ethernet, Barcode Zentralrechner und Fahrzeugdatenbank Stromnetz- und Kommunikationsanbindung der Ladesäule Ladesäule mit gesteuerten Ladeschützen Zentraler Server mit Steuerungssoftware und Kommunikationsanbindung	Zentralserver mit Datenbank Ladesäule mit Com-Anbindung RFID Lesegerät/RFID Chips Steuerungssoftware Kommunikationseinheit				
Szenario C	Nutzenpotenziale				
	<p><u>Steuerung und Überwachung des Ladevorgangs:</u> Automatischer Start des Ladevorgangs durch LS Kopplung von Planungssoftware oder Dienstkalender des Fahrers ermöglicht Beenden des Ladevorgangs durch LS bei Erreichen des Ziel-SOC Automatische Fehlererkennung, -behebung und Benachrichtigung</p> <p><u>Optimierung des Ladevorgangs:</u> Ladeverfahren für minimierte Batteriealterung Ladeverfahren zur Vermeidung von Lastspitzen am lokalen Transformator Optimierung des Grünstromverbrauchs Optimierung der Strombezugskosten bei variablen Stromtarifen (z.B.: Tag-/Nachtarife)</p> <p><u>Datenbankbetrieb:</u> kostenoptimale Batterieauslegung der Flottenfahrzeuge anhand von Realdaten aus dem Fahrzeug reichweitenoptimale Ladung und Batteriefüllstand anhand von Realdaten Analyse von Batteriealterung und Energieverbrauch Vergleich mit Prognose/Simulationsdaten</p>				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elemente</th> <th>Kostenpunkte</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Anmeldung: RFID, Ethernet, Barcode Zentralrechner und Fahrzeugdatenbank Stromnetz- und Kommunikationsanbindung der Ladesäule Ladesäule mit gesteuerten Ladeschützen Zentraler Server mit Steuerungssoftware und Kommunikationsanbindung</td> <td>Zentralserver mit Datenbank Ladesäule mit Com-Anbindung RFID Lesegerät/RFID Chips Steuerungssoftware Kommunikationseinheit</td> </tr> </tbody> </table>	Elemente	Kostenpunkte	Anmeldung: RFID, Ethernet, Barcode Zentralrechner und Fahrzeugdatenbank Stromnetz- und Kommunikationsanbindung der Ladesäule Ladesäule mit gesteuerten Ladeschützen Zentraler Server mit Steuerungssoftware und Kommunikationsanbindung	Zentralserver mit Datenbank Ladesäule mit Com-Anbindung RFID Lesegerät/RFID Chips Steuerungssoftware Kommunikationseinheit
Elemente	Kostenpunkte				
Anmeldung: RFID, Ethernet, Barcode Zentralrechner und Fahrzeugdatenbank Stromnetz- und Kommunikationsanbindung der Ladesäule Ladesäule mit gesteuerten Ladeschützen Zentraler Server mit Steuerungssoftware und Kommunikationsanbindung	Zentralserver mit Datenbank Ladesäule mit Com-Anbindung RFID Lesegerät/RFID Chips Steuerungssoftware Kommunikationseinheit				

Tabelle 38 Nutzenpotenziale, Komponenten und Kosten für die Infrastrukturszenarien A bis C

9.2 Optimierung der Ladestrategie/Optimierte Flottenladestrategie

Das Aufladen der Elektrofahrzeuge bietet dem Betreiber bei der Umstellung der Fahrzeugflotte potentiell ökonomische und ökologische Faktoren in sein Betriebskonzept mit aufzunehmen. Die Möglichkeiten, die dem Betreiber dabei zur Verbesserung des Betriebs zur Verfügung stehen, hängen von verschiedenen Aspekten ab. Die Aspekte des flexiblen Streckenrouting wurden besprochen, sowie die Beurteilung der Ladekonzepte in Kapitel 9.1.

Die Optimierung des Ladeverhaltens ermöglicht eine Reduktion der Flottenkosten für den Betreiber. Dazu müssen folgende Informationen bereitstehen:

- Fahrzeuge: Anzahl, Fahrt- und Standzeiten
- Batterie: Ladezustand, Temperatur, Alterungszustand (Jahre seit Betriebsbeginn, individuelle Alterung aufgrund von Nutzung)
- Infrastruktur: Installierte Leistung (pro Ladesäule und der übergeordneten Infrastruktur, wie z.B. ein Transformator)
- Weitere Kosten: Strombezugskosten sowie Arbeits- und Leistungspreis des Energieversorgers
- Anreize und Kostenpotentiale: CO₂-Emissionen, Anteil von erneuerbar erzeugter Energie

Im folgenden Kapitel wird ein Optimierungsverfahren vorgestellt, welches einen Ansatz des *Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)* verwendet. Dieses Lösungsverfahren ermöglicht das Lösen von Optimierungsproblemen, bei denen sowohl kontinuierliche als auch diskrete Eingangsvariablen berücksichtigt werden. Weiterhin können in der Zielfunktion nichtlineare Funktionen eingesetzt werden.

9.2.1 Vorarbeiten

Der erste Ansatz einer Optimierung aus 2013 verfolgte die Definition eines Problems unter Berücksichtigung des Strompreises und der CO₂-Emissionen. Im Anschluss an die Analyse des Strompreisverlaufes und des Anteils an „Grünstrom“ für ein optimiertes Ladeverhalten erfolgte im Jahr 2014 die schrittweise Erweiterung der Optimierung der Ladestrategie im Hinblick auf die Optimierung von Elektrofahrzeugflotten mit bis zu 60 Fahrzeugen und dem Einfluss der Batteriealterung auf die Kosten in Abhängigkeit von Ladestrom und Temperaturerhöhung. Das bis dahin excel-basierte Lösungsverfahren eignete sich jedoch nicht für eine detaillierte Optimierung der kalendarischen Lebensdauer aufgrund des nichtlinearen Verlaufs der batteriespezifischen Alterung. Deshalb wurde die Modellierung in MATLAB neu aufgesetzt. Die neue Berücksichtigung der Alterung wurde nicht anhand eines Straffaktors implementiert, sondern über detaillierte Alterungskennlinien

9.2.2 Nichtlineares Optimierungsproblem

Das Optimierungsproblem soll eine Lösung für das Ladeverhalten jedes Fahrzeugs der Flotte anhand der fahrzeugspezifischen Bedingungen mit besonderem Augenmerk auf der Batteriealterung und weiterhin unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Standorts liefern.

Die häufigste im Fahrzeug eingesetzte Technologie von Batteriezellen sind NMC (Nickel Mangan Cobalt)-basierte Lithium Ionen-Zellen. Alterungskennlinien für die kalendarische Alterung dieser Zellen wurden aus vorhergegangenen Arbeiten am Institut entnommen. Diese wurden mit Hilfe von beschleunigten Alterungstests experimentell ermittelt. Die zur Parametrierung verwendete Zelle war eine 18650 Li-Ionen Hochenergiezelle mit 2.1 Ah und einer NMC Kathode. Zwei charakteristische Verläufe der Batterie-Lebensdauer sind in Abbildung 54, links in Abhängigkeit der Ladezustände und rechts in Abhängigkeit der Temperaturen dargestellt. Zu der sogenannten kalendarischen Alterung in Abhängigkeit von Temperatur und Ladezustand kommt die sogenannte zyklische Alterung hinzu.

Bei NMC-Batteriezellen ist anzunehmen, dass die zyklische Alterung für die Anwendung in einem Fahrzeug vernachlässigbar ist, da die zyklische Lebensdauer der Zellen bis zum Erreichen des „End of Life“ die erwartete Belastung im Fahrzeug weit übersteigt. Daher wird die

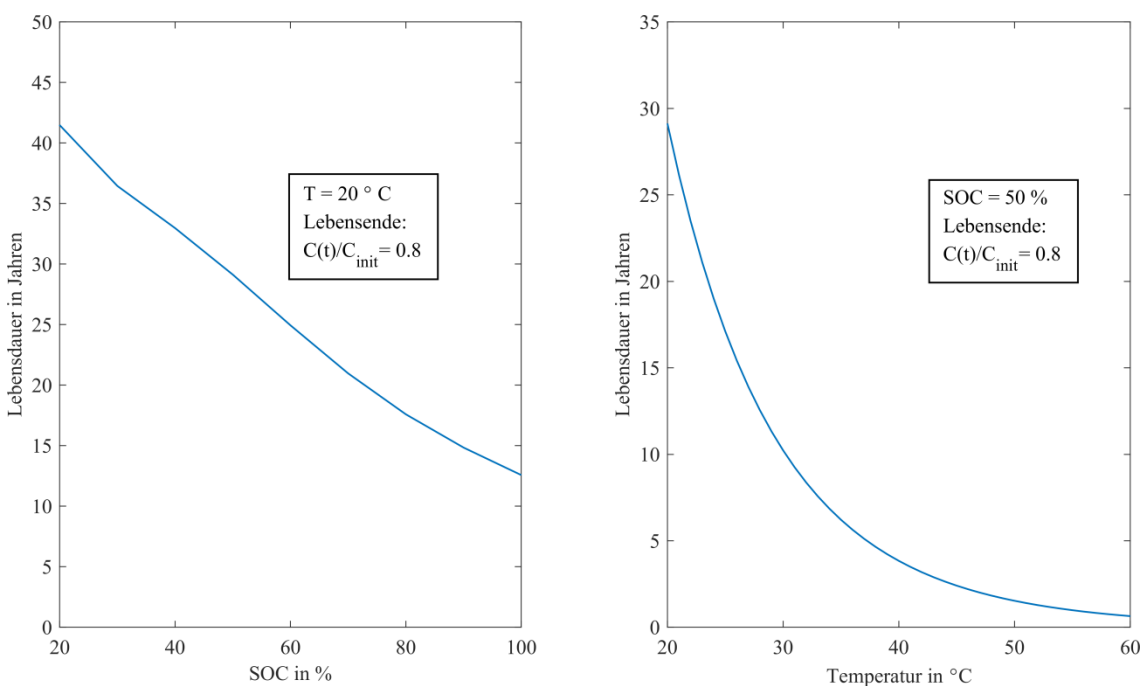


Abbildung 54 Kalendarische Alterungskennlinien einer Li-Ion Hochenergiezelle mit NMC Kathode (Schmalstieg, Käbitz und Ecker 2014)

zyklische Alterung im Folgenden nicht mit in die Zielfunktion aufgenommen, um die Komplexität des Optimierungsproblems nicht weiter zu erhöhen.

Die Berechnung der Alterungskosten $K_{cal.ageing}(V, T, \Delta t)$ für einen Zeitraum Δt bei einer Zellspannung V und Zelltemperatur T erfolgt nach folgender Formel.

$$K_{cal.ageing}(V, T, \Delta t) = K_{invest} \cdot \frac{\Delta t}{L(V, T)}$$

$L(V, T)$: Lebensdauer der Batteriezelle bei der Lagerung mit Spannung V und Temperatur T

K_{invest} : Investitionskosten in € für die Batterie

Zusätzlich zu den Alterungskosten werden in der Optimierung die Stromkosten K_{kWh} für das Laden der Fahrzeuge berücksichtigt. Die Zielfunktion für die Minimierung der Gesamtkosten für die Aufladung von n Fahrzeugen in m Zeitschritten, in die der Ladezeitraum unterteilt wird, ergibt sich zu

$$\min\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K_{kWh}(i,j) + K_{cal.ageing}(i,j)\right)$$

Die Lösung der Optimierung besteht aus der Ladeleistung $P_{i,j}$ jedes einzelnen Autos für jeden Zeitschritt.

Außerdem müssen zwei Randbedingungen durch den Optimierer eingehalten werden. Erstens muss jedes Fahrzeug zu seinem Zielladezustand geladen werden. Für jedes Auto i gilt:

$$\sum_{j=1}^m P_i \cdot t_{step,j} = E_{nom,i} \quad \forall i$$

Zweitens darf die maximal zulässige Gesamtlast am Standort nicht überschritten werden.

$$\sum_{i=1}^n P_i \leq P_{max} \quad \forall j$$

Die Berechnung des SOC und der Temperatur wird rekursiv vorgenommen für jeden Zeitschritt der Länge Δt . Die Temperaturerhöhung in einem Zeitschritt wird folgendermaßen berechnet.

$$\Delta T_i(j) = \frac{N_{cells} \cdot R_{cell} \cdot I_{cell}^2(j) \cdot \Delta t - \alpha \cdot (T(j-1) - T_{amb}) \cdot \Delta t}{c_W}$$

N_{cells} ist die Anzahl der Zellen im Batteriepack, R_{cell} ist der Innenwiderstand einer Zelle, I_{cell} ist der Zellstrom, α ist der spezifische Wärmeleitkoeffizient für die Wärmeleitung von der Zelle bis außerhalb des Batteriepacks, c_W ist die spezifische Wärmekapazität des Batteriepacks, T_{amb} ist die Umgebungstemperatur. Die Wärmeverluste durch den ohmschen Widerstand von Kabeln und Verbindern wird nicht berücksichtigt. Der SOC von Fahrzeug i nach Zeitschritt j ist

$$SOC_i(j) = SOC_i(j-1) + \frac{P_i(j) \cdot \Delta t}{E_{battery pack}}$$

wobei $SOC_i(j-1)$ der SOC des vorherigen Zeitschrittes und $E_{battery pack}$ die Kapazität des Batteriepacks ist.

Die Beschreibung der mathematischen Darstellung des Optimierungsproblem inklusive der Randbedingungen und der Zielfunktion des Modells ist detailliert in der Veröffentlichung (Schmalstieg, Käbitz und Ecker 2014) zu finden.

9.2.3 Eingangsdaten:

Die Eingangsparameter der Fahrzeuge basieren dabei auf statischen Informationen wie Fahrzeuganzahl, theoretischer Abfahrts- und Ankunftszeitpunkt, nominelle Batteriekapazität und installierter Ladeleistung am Ladepunkt. Zusätzlich werden bei der Optimierung die Randbedingungen der maximalen Anschlussleistung des Mittelspannungstransformators und der Vollladung der Fahrzeuge berücksichtigt. Aus den marktreifen Elektrofahrzeugen ist bekannt, dass die Hersteller die nutzbare Kapazität der Batterie auf 90 % der nominellen Batteriekapazität festsetzen. Zudem wird eine Sicherheitsmarge für das Erreichen der Vollladung von einer Stunde vor Abfahrtszeitpunkt bestimmt.

Beispielhaft wurde ein aus dem Projekt motiviertes Szenario mit 22 Fahrzeugen angelehnt an den Standort „Königswinter“ abgebildet und die Ladestrategie optimiert.

Der gewählte Standort verfügt über 10 Ladepunkte mit einer Anschlussleistung von jeweils 7,3 kW und 12 Ladepunkte mit einer Anschlussleistung von jeweils 3,6 kW. Die maximale Anschlussleistung am Standort beträgt 86,25 kW. Im Zeitraum 12.07.2015 12:00 Uhr – 13.07.2015 12:00 Uhr luden an den Ladesäulen verschiedene Fahrzeuge der Fahrzeugtypen Mercedes Vito, Streetscooter und Renault Kangoo. Die nachgeladenen Energiemengen auf Netzseite der Fahrzeuge sind in Tabelle 39 gezeigt.

Die Fahrzeuge wurden zwischen 14:00 Uhr und 18 Uhr am 12.07.2015 angesteckt und am 13.07.2015 zwischen 6:30 Uhr und 9:30 Uhr abgesteckt.

Fahrzeugtyp	Nachgeladene Energiemenge
Streetscooter B14	6 - 10 kWh
Mercedes Vito	6 – 10,5 kWh
Renault Kangoo	7 kWh

Tabelle 39 Nachgeladene Energiemengen auf Netzseite für verschiedene Fahrzeugtypen am Standort Königswinter zwischen dem 12. und 13.07.2015

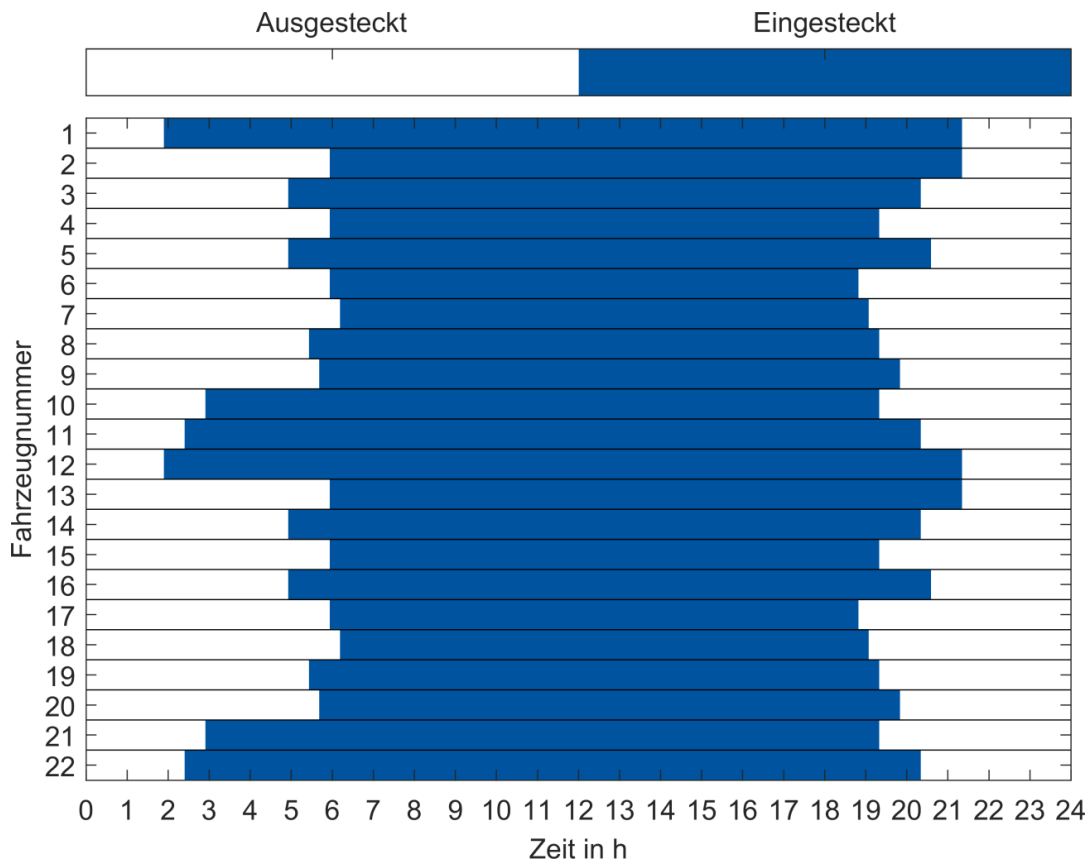


Abbildung 55 Ein- und Absteckzeiten der Fahrzeugflotte

	Kapazität	Gewicht	Ladeleistung	Batteriepreis
Typ 1	22 kWh	300 kg	22 kW	10.000 Euro
Typ 2	36 kWh	490 kg	22 kW	15.000 Euro

Tabelle 40 Fahrzeugparameter

Die Fahrzeugparameter sind in Tabelle 5 aufgelistet. Die Füllstände der Batterien (SOC) wurden entsprechend gewählt, so dass die gemessenen Energiemengen entsprechend Tabelle 4 nachgeladen wurden. Dabei wurde ein Zufallswert generiert, der aus dieser Marge gewählt wurde. Weitere Informationen zum Start-SOC sind den Ergebnissen in Kapitel 2.2.4 zu entnehmen. Der Ziel-SOC bei der Abfahrt der Fahrzeuge beträgt immer 90 % ausgehend von der installierten Kapazität des Batteriepacks.

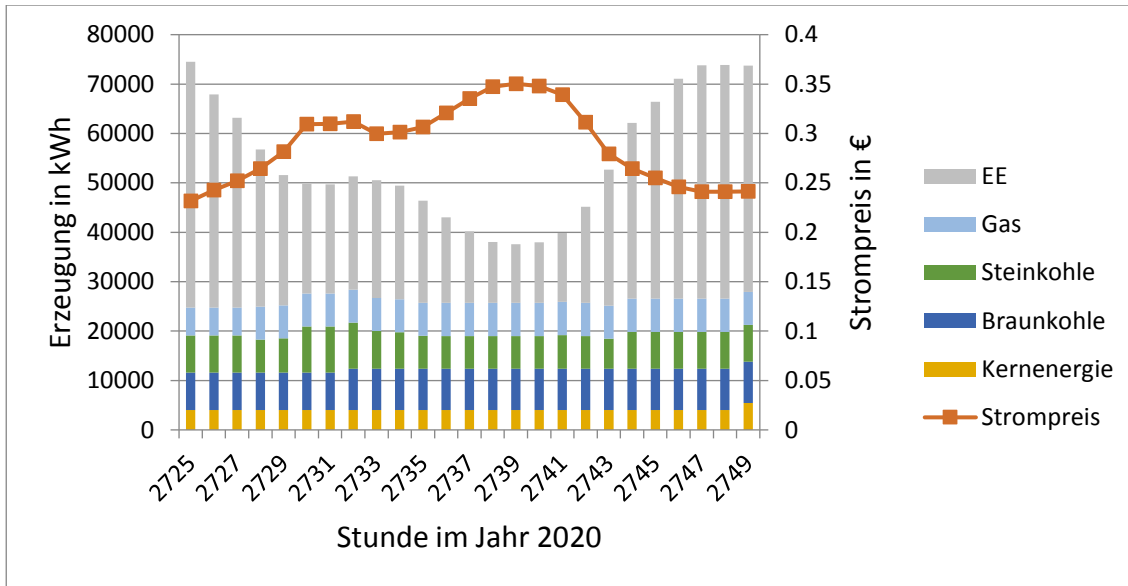


Abbildung 56 Balken: Vorhersage der Stromerzeugung nach Energieträger für einen Tag im April im Jahre 2020. Linie: Konstruierter Strompreis, der von der von Kraftwerken ausgestoßenen Menge an CO₂ abhängt.

9.2.4 Ergebnisse der Optimierung

Drei verschiedene Ladestrategien wurden für die Beispielflotte gelöst. Die Simulationszeiträume starten jeweils um 12:00 Uhr Mittag eines Tages und enden um 12:00 Uhr des Folgetages. Die simulierte Dauer beträgt somit 24 h. Die Lösungsmenge enthält eine Leistungsvorgabe für die Ladeleistung jedes Fahrzeugs und jeden Zeitschritt. Die vorgestellten Ladestrategien beinhalteten folgende Randbedingungen:

- Quick Charge: Bei dieser Strategie werden die Fahrzeuge unter Einhaltung der Randbedingungen (maximale Ladeleistung, maximale Anschlussleistung des Standorts) so schnell wie möglich auf ihren Zielladezustand geladen. Es findet keine Steuerung statt. Dieses Szenario richtet sich nach der Fahrzeug-Infrastruktur-Kombination aus Kapitel 9.1, die keine Ladesteuerung zulässt.
- Calendaric aging only: Das Alterungsverhalten der Fahrzeugbatterie wird durch die kalendarische Alterungskurve aus Abbildung 54 im Modell hinterlegt. Die Zeit, die die Batterie bei hohen Ladezuständen und hohen Temperaturen verweilt, wird minimiert. In diesem Fall bleibt der Strompreis unberücksichtigt
- Calendaric aging and price signal: Das Fahrzeug erhält zusätzlich ein Preissignal. Um den indirekten CO₂-Ausstoß der Fahrzeuge durch die Ladestrategie zu verringern, sollten die Fahrzeuge geladen werden, wenn der Strommix einen hohen Anteil erneuerbarer Energien aufweist. Die Zeitreihe für den CO₂ Ausstoß der deutschen Kraftwerke für einen Tag im April

des Jahres 2020 wurde vom IAEW der RWTH Aachen bereit gestellt. Der Strompreis ergibt sich aus einem Grundpreis von 17 €/ct/kWh bei CO₂ freier Stromerzeugung und zusätzlichen Kosten von 500€/Tonne CO₂ für eine in Deutschland erzeugte kWh im Jahre 2020. (siehe auch Kapitel 9.4)

In Abbildung 57, Abbildung 58 und Abbildung 59 sind verschiedene Ergebnisgraphen für die drei Szenarien dargestellt. In allen drei Szenarien werden die Fahrzeuge auf ihren Ziel-SoC von 90 % aufgeladen ohne Verletzung der maximalen Anschlussleistung des Standorts und der maximalen Ladeleistung der einzelnen Fahrzeuge. Für das Szenario „Quick Charge“ (Abbildung 57) ist zu sehen, dass der durchschnittliche SoC der Batterien über den Ladezeitraum deutlich höher ist als in den beiden anderen Szenarien. Außerdem weist dieses Szenario durch die hohen Ladeleistungen die höchsten Batterietemperaturen auf. Aus diesem Grund sind die Kosten durch die kalendarische Alterung der Batterien in diesem Szenario am Höchsten (78,64 €) (siehe Abbildung 60). Zusätzlich weist dieses Szenario auch die höchsten Stromkosten auf (58,78 €).

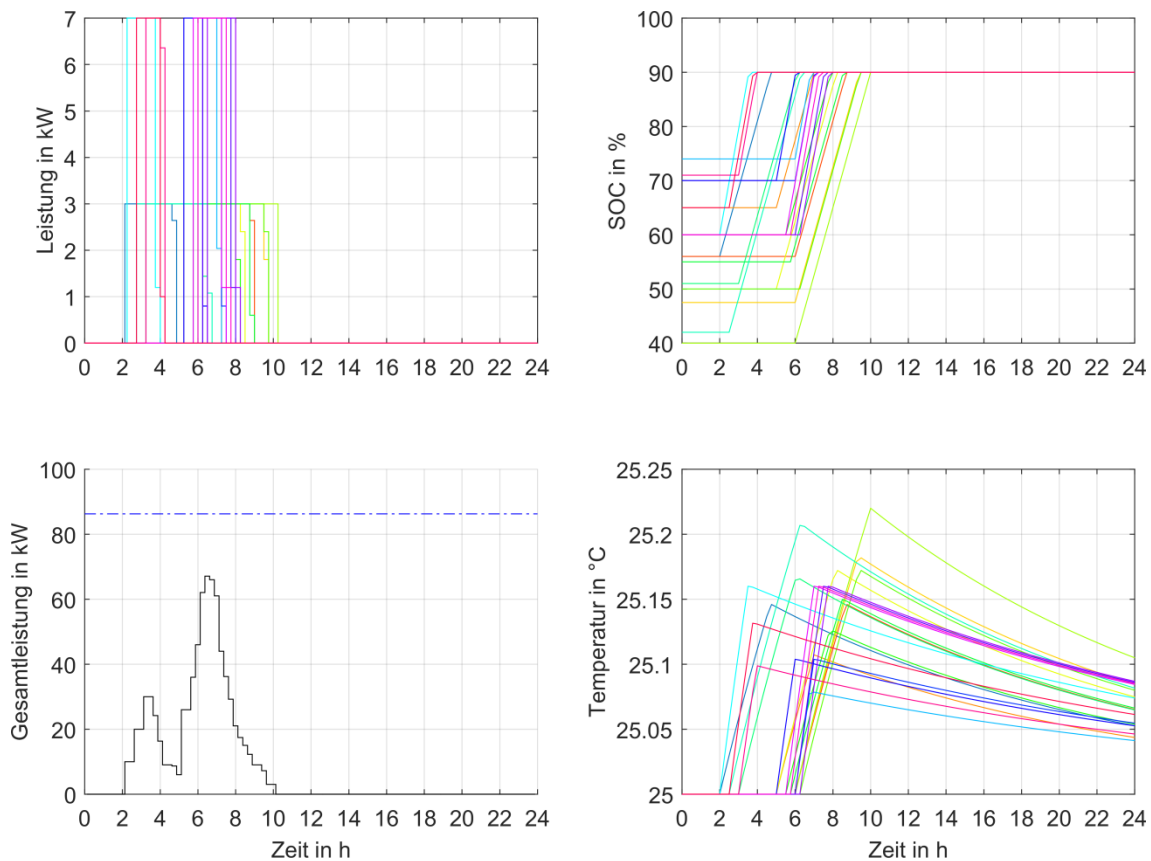


Abbildung 57 Ergebnisse im Szenario „Quick Charge“. Oben links: Ladeleistung der einzelnen Fahrzeuge. Oben rechts: SOC der einzelnen Fahrzeuge. Unten links: Gesamte Last am Standort (schwarz), Maximale Anschlussleistung (blau gestrichelt). Unten rechts: Temperatur der Batteriepacks.

Beide Kosten können im Szenario „Calendaric ageing only“ signifikant reduziert werden. Dies wird insbesondere durch die Verschiebung der Ladung der Fahrzeuge auf einen späteren Zeitpunkt erreicht. Somit wird der durchschnittliche SoC der Fahrzeugbatterien reduziert. Im Szenario „Calendaric ageing and price signal“ werden die geringsten Kosten erreicht, da in diesem Fall der variable Strompreis Eingang in die Zielfunktion findet. Die Verringerung der Stromkosten bedeuten in diesem Fall eine Erhöhung des Anteils von EE Strom und somit eine Reduktion des CO₂ Fußabdruckes. Um den Effekt der Einsparung von CO₂-Emissionen zu verstärken, müssten die Emissionswerte, die indirekt über die Stromkosten in der Zielfunktion berücksichtigt werden, viel stärker berücksichtigt werden. Der Vergleich der Ladeleistungen der einzelnen Fahrzeug für das Szenario „Calendaric Aging only“, Abbildung 58 oben links mit den Ladeleistungen der Fahrzeuge im Szenario „Calendaric Aging and price signal“ in Abbildung 59 oben links, zeigt, dass sechs aus zwanzig Fahrzeugen vor der 12. Stunde für einen kurzen Zeitraum laden. Um diesen Effekt zu verstärken muss der Preis künstlich verzerrt werden.

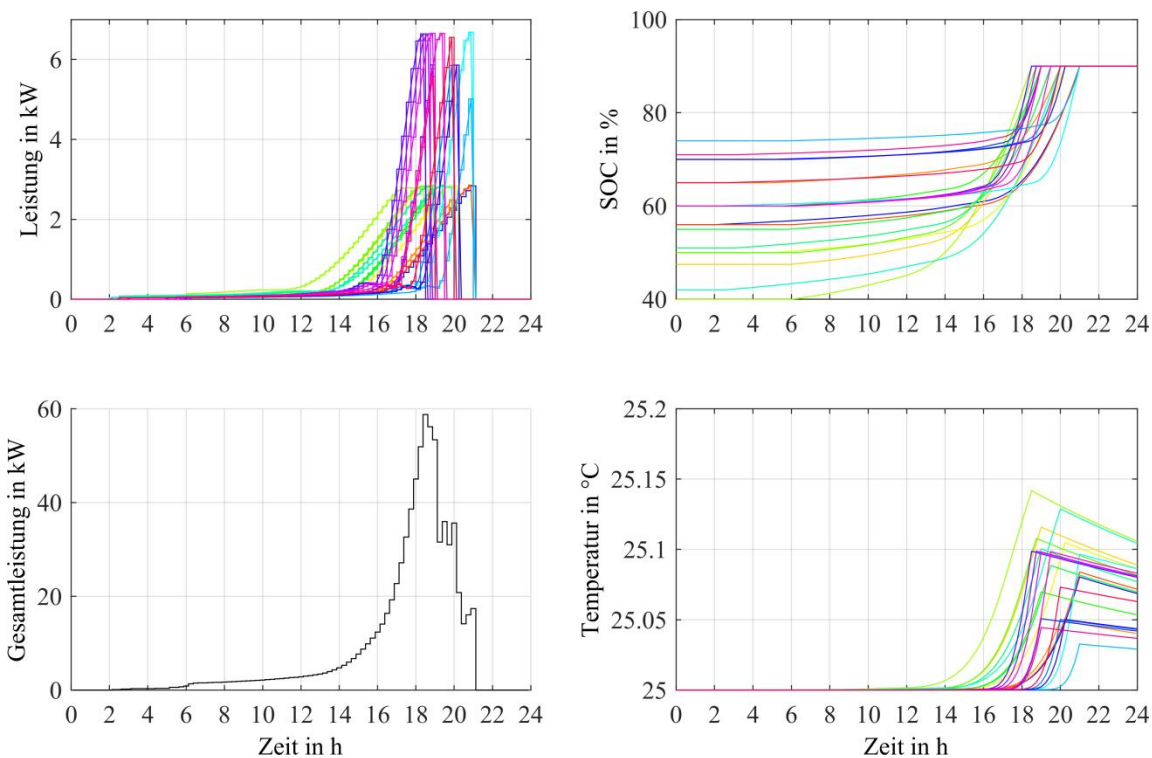


Abbildung 58 Ergebnis der Optimierung „Calendaric ageing only“. Oben links: Ladeleistung der einzelnen Fahrzeuge. Oben rechts: SOC der einzelnen Fahrzeuge. Unten links: Gesamte Last am Standort (schwarz). Unten rechts: Temperatur der Batteriepacks

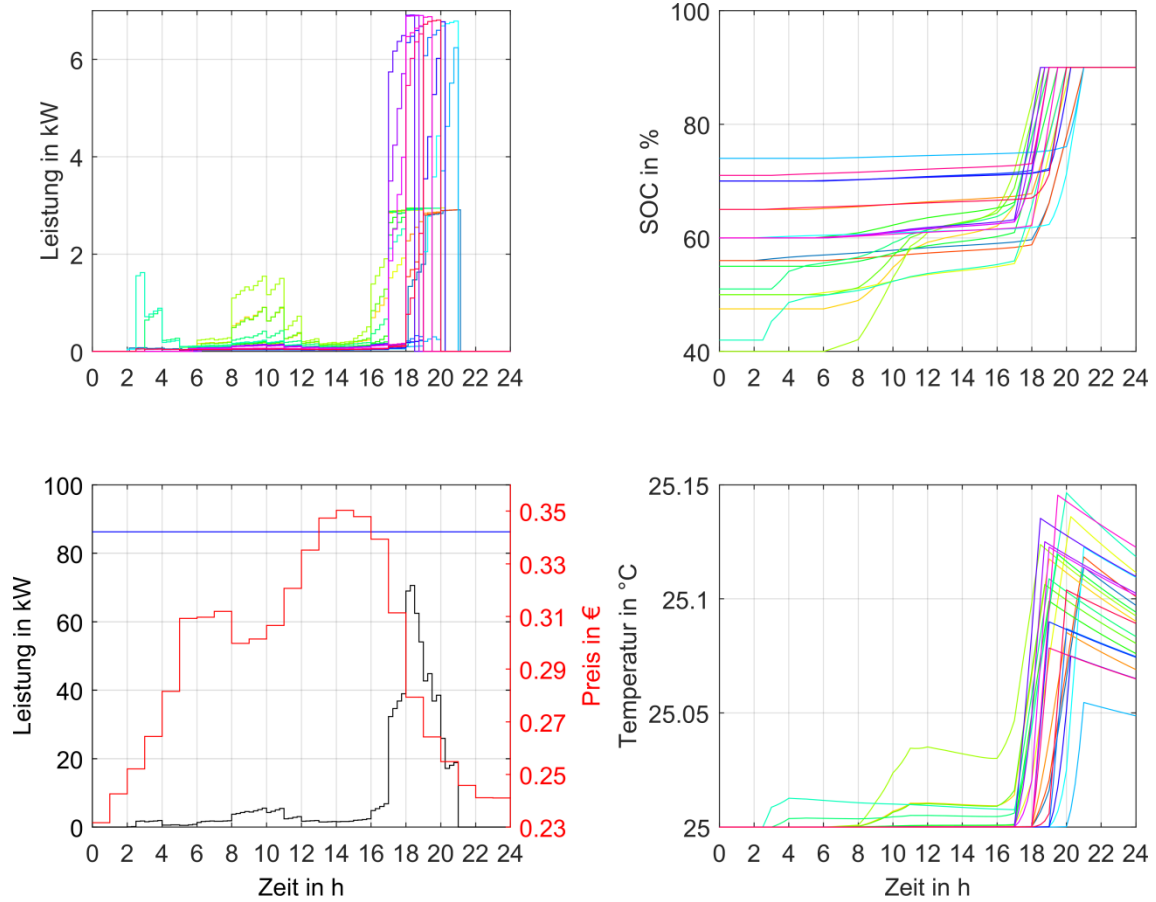


Abbildung 59 Ergebnis der Optimierung „Calendaric ageing and price signal“. Oben links: Ladeleistung der einzelnen Fahrzeuge. Oben rechts: SOC der einzelnen Fahrzeuge. Unten links: Maximale Anschlussleistung (blau), gesamte Last am Standort (schwarz), Strompreis (rot). Unten rechts: Temperatur der Batteriepacks

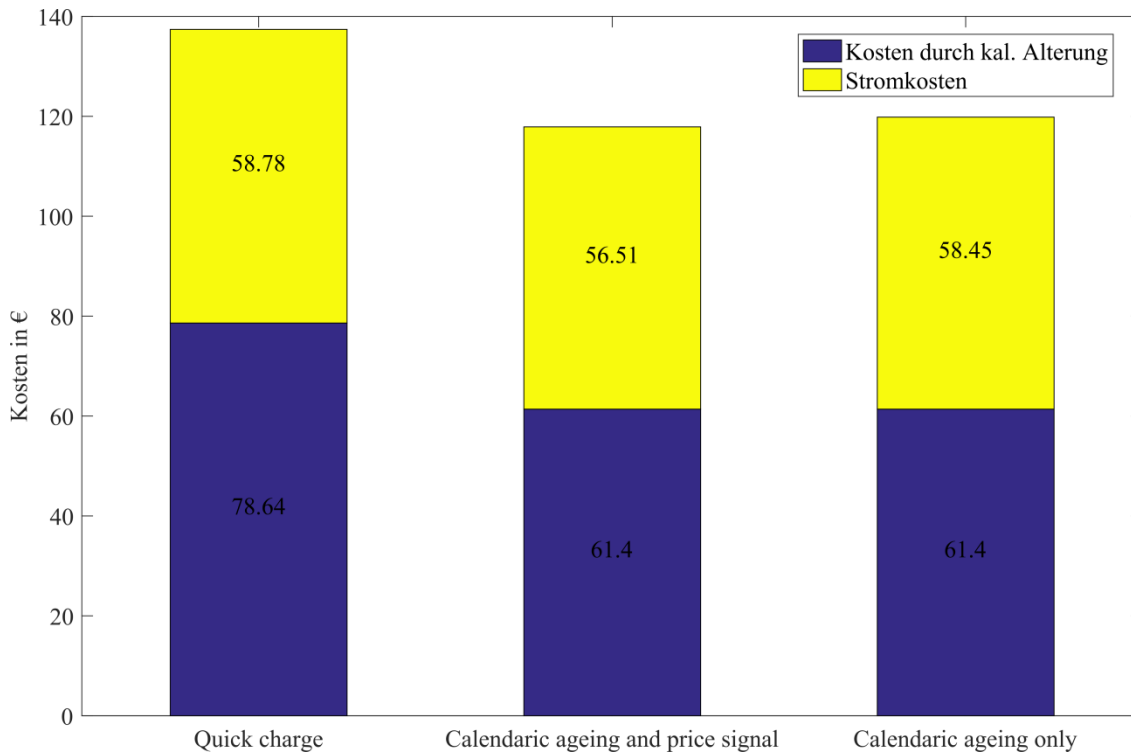


Abbildung 60 Kosten durch die kalendarische Alterung der Fahrzeugbatterien und der Stromkosten während des Ladeprozesses von 22 Fahrzeugen in 3 Optimierungsszenarien

9.2.5 Zusammenfassung

Das Optimierungsproblem wurde in MATLAB anhand der Funktion *fmincon* mit dem Solver „*interior-point*“ implementiert und gelöst. Die Rechenzeit für die gezeigte Beispielflotte liegt bei wenigen Minuten auf einem Rechner mit 8 GB RAM und i7 Prozessor. Für größere Fahrzeugzahlen erhöht sich natürlich die Rechenzeit. Jedoch ist anzunehmen, dass die Berechnung der Lösung für einen Betriebsstandort jederzeit möglich und sogar in Echtzeit an veränderliche Randbedingungen anzupassen wäre.

Für Flottenbetreiber wie die Deutsche Post DHL stellt die Optimierung der Ladevorgänge eine gute Möglichkeit zur Kostenreduktion dar. Die erhöhten Infrastrukturkosten ließen sich durch die Einsparung von Batteriekosten von 6.205 € an 365 dieser beispielhaften Tagen schnell amortisieren. Die Einsparung fällt außerdem signifikant höher aus, falls die Kapazität der Fahrzeuge auf ihre Route ideal zugeschnitten wäre, d.h. dass der SoC bei Ankunft des Fahrzeugs sehr gering ist. Außerdem könnte der CO₂-Fußabdruck einer Elektrofahrzeugflotte, durch Berücksichtigung der Zusammensetzung des Strommixes, reduziert werden.

Die Ergebnisse aus diesem Kapitel beinhalten Ergebnisse der Analyse der Auswirkungen auf die Umwelt aus Kapitel 9.4.

9.3 Batteriealterung

Die Batterien der Zustellfahrzeuge altern im Betrieb, sogar wenn sie nicht benutzt werden. Dieses Verhalten ist typisch für Lithium-Batterien. Beim Alterungsverhalten dieser Zellen wird zwischen kalendarische Alterungsmechanismen und zyklische Alterungsmechanismen unterschieden. Dabei bezieht sich das kalendarische Alterungsverhalten auf die Verweildauern in einem bestimmten Ladezustand und bei einer bestimmten Temperatur, während das zyklische Altern von der Stromstärke und der Entladetiefe abhängt.

Die Ladekurve von Batterien ist ein charakteristisches Merkmal von Batterien und kann für die Analyse des Alterungszustandes herangezogen werden. Im Projekt wurden die Ladekurven von zwei unterschiedlichen Batteriepacks aufgenommen.

Im Projekt wurde ein Fahrzeug aus dem Betrieb genommen, um es einem detaillierten Test zu unterziehen. Da jedoch kein Test vor Betriebsstart durchgeführt wurde und damit die Referenzmessung fehlte, kann es sich bei der Auswertung nur um eine Deutung des Alterungszustands eines speziellen Fahrzeugs. Die Beschreibung und Ergebnisse der Tests sind im Abschnitt Labormessung zu finden.

Um den Betrieb der Fahrzeugbatterie analysieren zu können, wurden die Betriebsdaten von 6 Fahrzeugen herangezogen. Diese Daten enthalten Informationen zu Ladezustand und Fahrverhalten. Die Ergebnisse werden im Abschnitt Betriebsanalyse beschrieben.

9.3.1 Vermessung der Ladekurve

Zu Beginn des Projektes wurden Batteriepacks im Labor vermessen. Diese Messungen lieferten Informationen zu nominellen Angaben der Batteriepacks.

Technische Merkmale des Batteriepacks:

Das Batteriepack besteht aus 5 seriell verschalteten Modulen mit jeweils 14 Zellen, wobei je 2 Zellen parallel verschaltet wurden und 7 dieser Doppelzellen in Serie pro Modul verschaltet wurden. Die Kenndaten sind in der folgenden Tabelle festgehalten und wurden dem Datenblatt des Batteriepacks entnommen.

Informationen zum Batteriepack	Kenndaten
Nominelle Spannung	131,25 V
Kapazität	120 Ah
Energie	15,75 kWh
Maximaler Entladestrom	350 A
Maximale Ladespannung	144,2 V
Temperaturbereich für Entladung	-30 °C bis 75 °C
Temperaturbereich für Ladung	-30 °C bis 75 °C

Tabelle 41 Kenndaten des Batteriepacks nach Datenblatt

Aus der nominellen Spannung sowie der Anzahl an Batteriezellen lässt sich eine nominelle Spannung von 3,75 V pro Zelle berechnen. Die Kapazität pro Zelle beträgt 60 Ah.

Durchführung der Versuche

Das Batteriepack wird an einen Packtester der Firma Digatron angeschlossen. Der Packtester erlaubt das kontrollierte Laden und Entladen des Batteriepacks. Das Batteriemanagementsystem des Batteriepacks ist mit einer CAN-Kommunikationsschnittstelle ausgestattet. Mittels eines geeigneten Befehls wurden die Schütze des Packs geschlossen. Weiterhin konnten einzelne Kennwerte des Batteriepacks ausgelesen und überwacht werden. Weiterhin konnten die CAN-Daten über den Packtester aufgezeichnet werden und der Auswertung zugeführt werden.

Zuerst wurde das Batteriepack auf die minimale Entladespannung von $U_{\min} = 107 \text{ V}$ entladen. Anschließend wurde das Batteriepack mittels Konstantstromladung bis zu einer Spannung von $U_{\max} = 144,2 \text{ V}$ mit einem Strom von $I_{\text{laden1}} =$ geladen. Daraufhin wurde das Batteriepack mittels Konstantspannungsladung weitergeladen, bis der Strom eine minimale Schwelle von $I_{\min} = 3,8 \text{ A}$ unterschritt. Während des Versuchs wurde die Batteriepack-Temperatur manuell überwacht.

Im zweiten Versuch wurde das Batteriepack mit einem konstanten Ladestrom von $I_{\text{entlad}} = -120 \text{ A}$ entladen. Dies entspricht einem Entladestrom von 1C für dieses Batteriepack. Die Entladung wurde bei Erreichen der minimalen Spannung von $U_{\min} = 107,5 \text{ V}$ gestoppt. Die Temperatur wurde diesmal automatisch überwacht und aufgezeichnet.

Versuchsergebnisse: Vollständige Entladung der Batterie

Der Entladevorgang wurde mit einer konstanten Stromentladung von $I_{\text{entlad}} = -120 \text{ A}$ durchgeführt. Die Anfangstemperatur betrug $T_{\text{anfang}} = 20 \text{ °C}$. Die Temperatur erreichte zum Ende des Entladevorganges $T_{\text{ende}} = 29 \text{ °C}$. Das Ergebnis zeigt einen Anstieg der Raumtemperatur in der räumlich Nähe zu den Batteriezellen, entspricht jedoch nicht der Batterietemperatur. Ein Temperaturanstieg und somit die Entstehung von Verlustwärme ist beobachtbar.

Der Entladevorgang wurde mit Erreichen der Entladeschlussspannung von $107,5 \text{ V}$ beendet. Die entnommene Energiemenge betrug $E_{\text{entlad}} = 15,311 \text{ kWh}$. Die Entladedauer betrug 59 Minuten.

Der Quotient aus der entnommenen und eingelagerten Energiemenge erlaubt einen Rückschluss auf den energetischen Wirkungsgrad der Batterie.

$$\eta_{\text{energ}} = \frac{E_{\text{entlad}}}{E_{\text{lad}}} = 91,73 \%$$

Zu beobachten ist außerdem eine Divergenz zwischen der von der Messhardware gemessenen Spannung und Strom und den von den CAN-Daten des Batteriemanagementsystems gelieferten Messdaten. Das CAN-Messsignal enthält Diskretisierungsstufen von $\Delta U = 1 \text{ Volt}$. Diese erklären den Fehler im Spannungssignal. Aufgrund von Diskretisierungsfehlern dürfte auch die Divergenz im Stromsignal zu erklären sein.

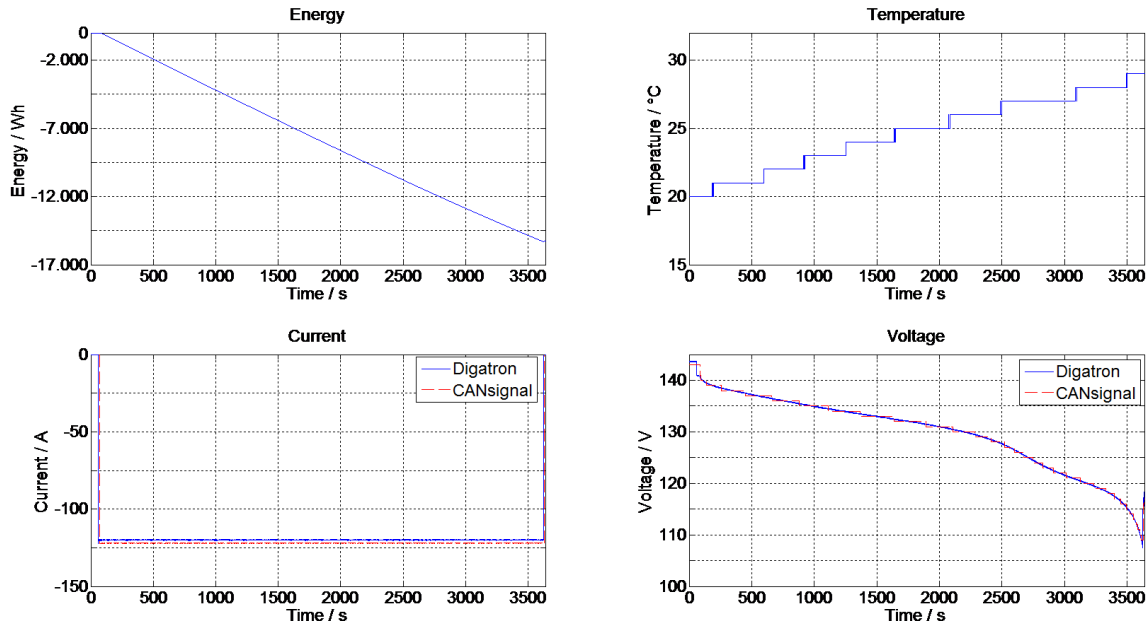


Abbildung 61 Versuchsergebnisse: Vollständige Entladung des Batteriepacks

Zusammenfassung:

Die Versuchsergebnisse, die für ein Batteriepack gewonnen werden konnten, stellen einen speziellen Zustand eines Batteriepacks dar. Der direkte Vergleich mit Ladekurven im Betrieb kann nicht hergestellt werden, da es sich bei einem Ladevorgang an der Ladesäule um viel kleinere Stromraten von ca. 0,33 C oder 20 A handelt. Es war geplant, das gleiche Pack mehrmals zu verschiedenen Zeitpunkten mit gleichbleibenden Tests zu vermessen, was jedoch nicht stattgefunden hat. Weil dieses Batteriepack nur zu einem Zeitpunkt im Labor vermessen werden konnte, können hier keine Aussagen über die Alterung im Einsatz getroffen werden. Durch den Laborversuch konnten jedoch Randbedingungen geprüft werden, die bei den folgenden Analysen als Anhaltspunkt für Alterungserscheinungen herangezogen werden können.

- Gesamtenergiegehalt beim Entladen: 15,31 kWh
- Ladeschlussspannung 144,2 V
- Entladeschlussspannung: 107,5 V

Die Steuerung des Stroms bei diesem Versuch wurde von der Institutseigenen Messhardware übernommen. Im folgenden Kapitel wird das Batteriepack vom Batteriemanagementsystem (BMS) gesteuert.

9.3.2 Betriebsdatenanalyse

Bei der Betriebsanalyse von Ladekurven verschiedener Fahrzeuge fiel auf, dass die Ladekurven mit steigender Einsatzdauer früher beginnen. Die Eingangsdaten, welche bei dieser Analyse ausgewertet

wurden, stehen von 7 Fahrzeugen zur Verfügung. Die Batteriedaten beziehen sich auf das gesamte Batteriepack und bestehen dabei aus Informationen zum Ladezustand (state of charge/SOC, in %), dem Batteriestrom in Ampere und der Batteriespannung in Volt. Diese Informationen werden vom fahrzeugeigenen Batteriemanagementsystem (BMS) generiert. Detaillierte Informationen zum Aufbau und zur Arbeitsweise des BMS liegen hier nicht vor. Der Aufbau der Batteriepacks entspricht dem des Packs, welches in Kapitel 9.3.1 im Labor vermessen wurde.

Folgende Annahmen werden für die weitere Analyse postuliert:

- Das BMS bestimmt den Ladezustand korrekt.
- Änderungen im Ladeverhalten sind auf Alterungseffekte zurückzuführen.

Bei der nachfolgenden Darstellung in Abbildung 62 wird ein Ausschnitt aus einer Ladekurve gezeigt. Dabei wurde als Startzeitpunkt für den Ausschnitt jeweils eine steigende SOC ab dem Schwellwert SOC=72% gewählt. Der Ausschnitt endet nach Beenden der Ladekurve, d.h. die Batterie ist danach voll. Das Verhalten des Batteriestromes zeigt die zwei charakteristischen Phasen des Ladestromes. Die erste Phase, Konstantstrom-Phase, wird solange eingehalten, bis die maximale Batteriespannung erreicht wird. Danach wird die Spannung konstant gehalten (sog. CV-Phase) und der Batteriestrom sukzessiv reduziert, bis die Batterie voll ist.

Die Darstellung der Ladekurven eines Fahrzeugs zeigt deutlich, dass die CV-Phase deutlich früher beginnt und deutlich länger andauert. Für dieses Verhalten können zwei Effekte verantwortlich gemacht werden:

- Die verfügbare Kapazität ist gesunken, so dass die CV-Phase nun bei einem geringeren SOC startet.
- Der Innenwiderstand des Batteriepacks ist gestiegen, so dass die maximale Batteriespannung (die resistive Spannungserhöhung an den Batteriepolen einschließend) schneller erreicht wird und somit die CV-Phase früher beginnt.

Beide Effekte sind gleichermaßen auf eine Alterung des Batteriepacks zurückzuführen. Somit kann die kumulierte Energie in der CV-Phase als Indikator für eine Alterung der Batterie herangezogen werden. Die kumulierte Energiemenge für die drei Ladekurven sind in Abbildung 62-d zusammengefasst. Es ist zu sehen, dass die Energiemenge, die während der CV-Phase umgesetzt wird, sich mehr als verdoppelt und von ca. 1 kWh auf ca. 2,5 kWh ansteigt.

Dieses Verhalten wurde auch bei vier weiteren Fahrzeugen ermittelt. Die Ergebnisse der Auswertung der kumulierten Energiemenge sind in Abbildung 63 zu sehen. Die Alterung findet also bei allen Fahrzeugen gleichermaßen statt.

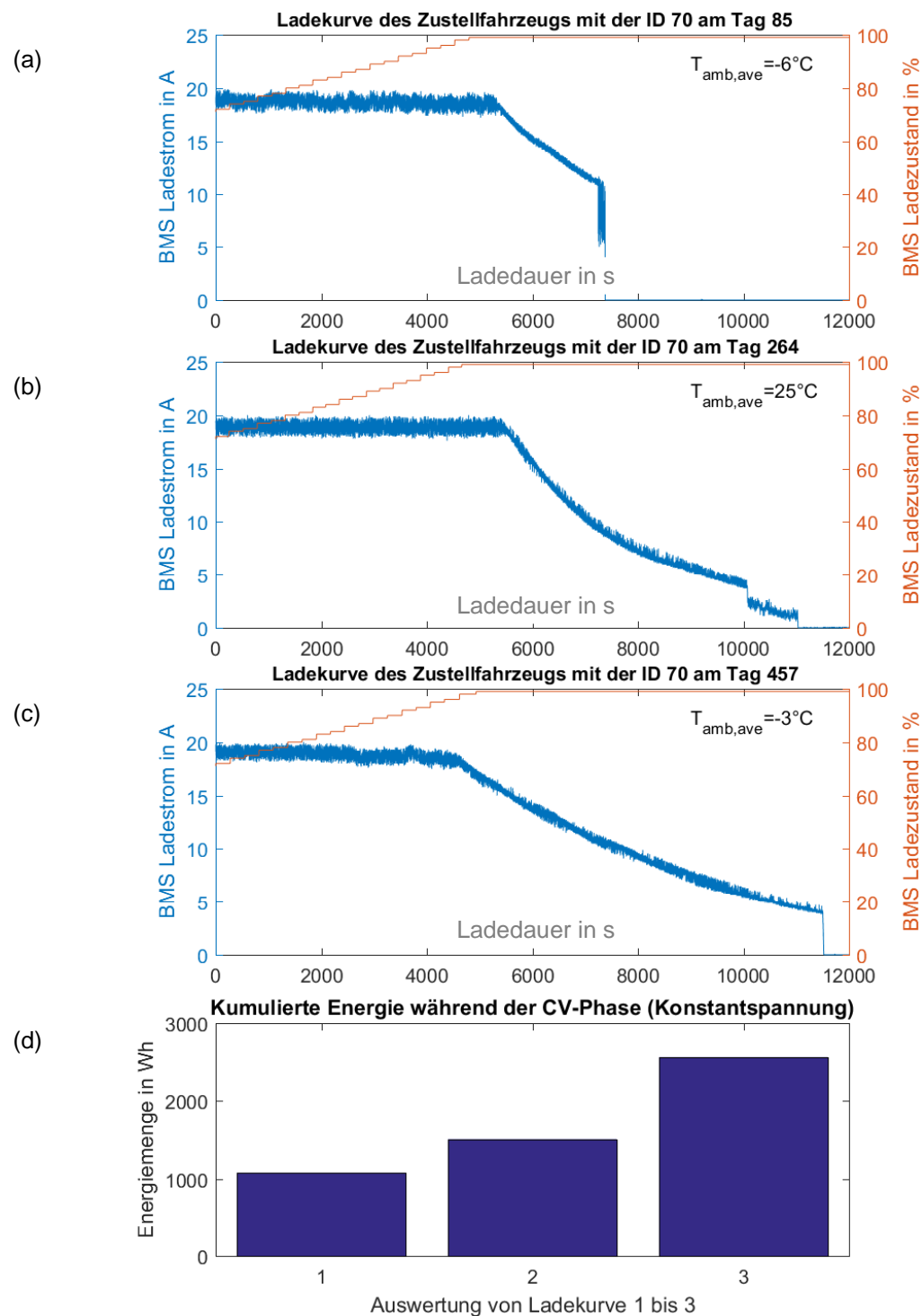


Abbildung 62 Analyse des Ladeverhaltens eines Zustellfahrzeugs mit der ID 70 4-a bis
 4-c: Darstellung der Ladekurven drei verschiedener Tage nach Beginn des
 Zustellbetriebs
 4-d:
 Berechnung der kumulierten Energie während der CV-Phase

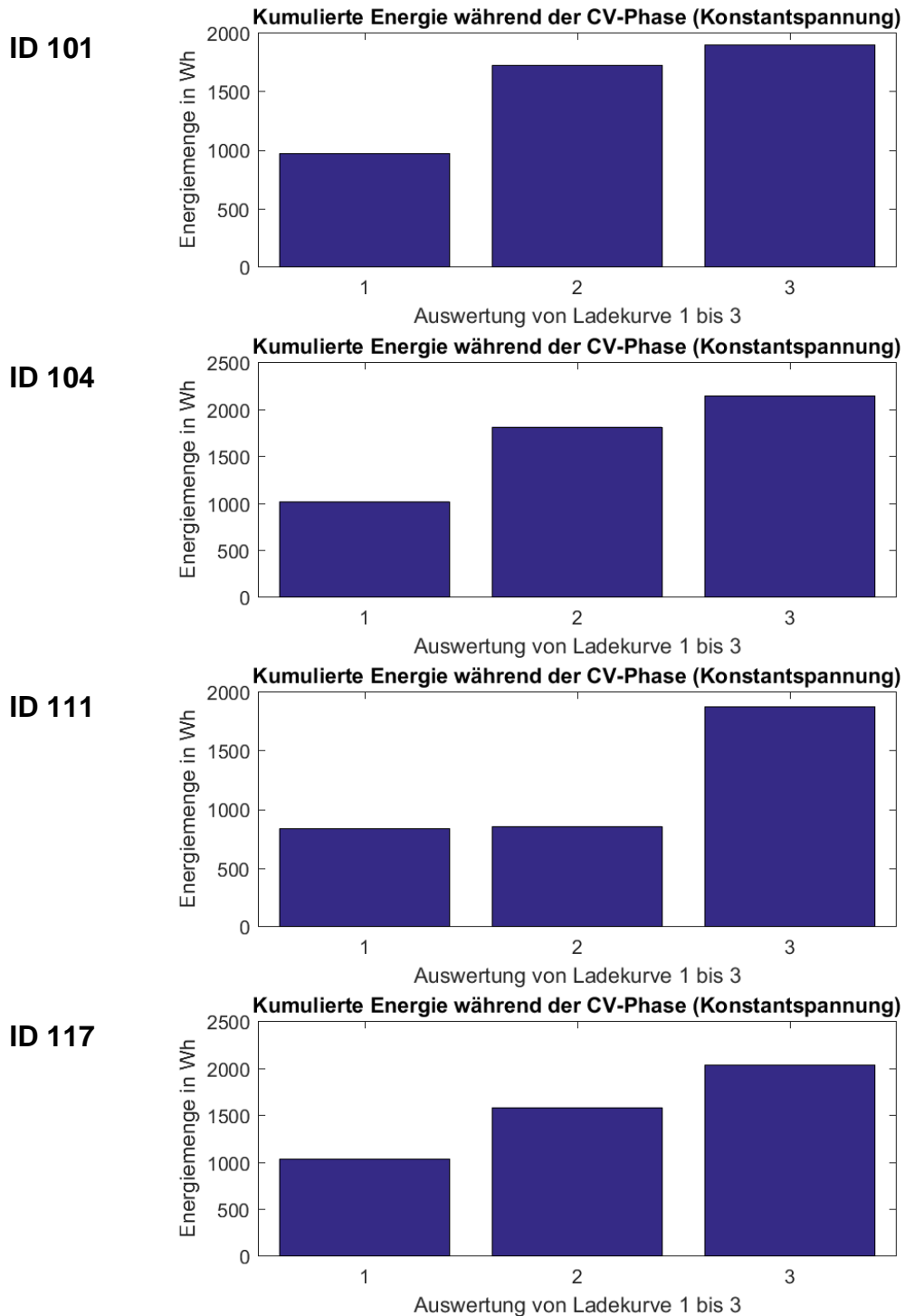


Abbildung 63 Von oben nach unten: Ergebnisse vier verschiedener Fahrzeuge (Kennzeichnung durch IDs), Auswertung der kumulierten Energie für drei Tage in zwei Jahren

9.3.3 Fahrzeug im Labor

Die Ergebnisse aus der Betriebsanalyse sollten in einem Laborversuch verifiziert werden. Dazu sollte die gesamte Ladekurve eines Zustellfahrzeugs aufgenommen werden. Startzustand ist hierzu die komplett entladene Batterie, die mit dem Fahrzeugeigenen Ladekabel wieder aufgeladen wird.

Es ist bei der Deutung der Ergebnisse problematisch, dass der Batteriezustand eines Fahrzeugs nach der Fahrt unbestimmt ist. Für dieses Problem muss mithilfe einer definierten Fahrt des Fahrzeugs auf einem Prüfstand Abhilfe geschaffen werden. Im Gegensatz zur Vermessung der Batterie im Fahrzeug, können Messungen an Batterien außerhalb vom Fahrzeug problemlos durchgeführt werden, da die Batteriepole freiliegen und im Labor kontaktiert werden können.

Das Fahrzeug mit dem Kennzeichen BN-PG-3990 stand zur Verfügung, um nach dessen Einsatz im Flottenbetrieb über einen Zeitraum von ca. 1,5 Jahren die Ladekurve aufzunehmen. Die Telemetriedaten des Fahrzeugs konnten aus einer Telemetriebox entnommen werden, beginnend im August 2015 bis Januar 2017.

Das Fahrzeug wurde auf dem Prüfstand des PGS gefahren, um eine definierten Zustand der Batterie zu erreichen. Dabei sollte der Strom, der über den Antriebsstrang aus dem Fahrzeug entnommen wurde, auf 120 A eingestellt werden. Da die Batterie 120 Ah Nennkapazität haben soll, entsprechen 120 A einer Stromrate von 1C und ist gut für die Charakterisierung von Batteriezellen im Labor geeignet.

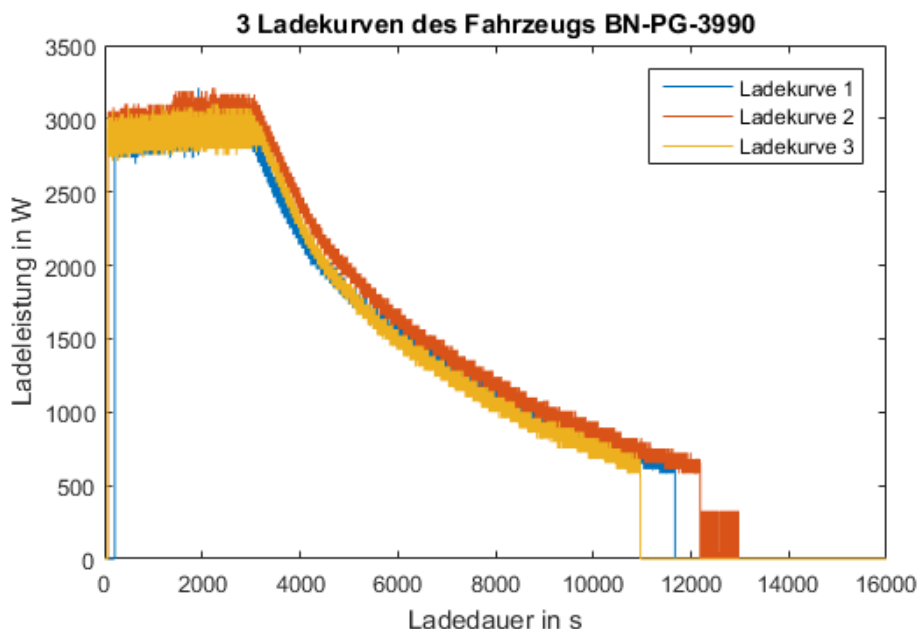


Abbildung 64 Messergebnisse der Labortests am Fahrzeug BN-PG-3990, Ladeleistung dreier Tests

Tabelle 42 Messergebnisse für das Fahrzeug BN-PG-3990

Test	Geladene Gesamtenergiemenge	SOC nach Ladestopp	Kum. Energie während CV
1	5,54 kWh	29 %	3,28 kWh
2	6,09 kWh	35 %	3,65 kWh
3	5,50 kWh	30 %	3,13 kWh

Bei den Fahrten auf dem Prüfstand fiel jedoch direkt auf, dass der Antriebsstrang diesen Strom nicht zuließ. Die Vermutung, dass das Batteriepack sich in einem außergewöhnlichen Zustand befindet, wurde auch beim Laden festgestellt. Um sicherzustellen, dass es sich nicht um einen einmaligen Fehler handelt, wurde das Fahrzeug daraufhin mit einer reduzierten Leistung von 14 kW entladen. Die nachfolgende Ladekurve endete nach weniger als 4 Stunden bei einem Ladezustand von 29 %. Zwei weitere Tests lieferten ähnliche Ergebnisse, die Ladekurven sind in der Abbildung 64 dargestellt. Die Testergebnisse von drei Tests sind in Tabelle 42 zusammengefasst. Die Energiemenge kann aus dem Zeitintegral über der Leistung berechnet werden. Die Leistung des Fahrzeuges wurde aus dem Batteriestrom und der Batteriespannung berechnet. Bei der Auswertung fiel auf, dass die Spannung mit einer Auflösung von 1 V gemessen wird..

Weiterhin zeigt die Auswertung der Energiemengen und des angezeigten SOC, dass die Ladezustände nicht konsistent zu den Energiemengen berechnet werden. Als mögliche Begründung wird die grobe Messauflösung der Batteriespannung herangezogen.

Während der Betriebsanalyse in Kapitel 9.3.1 wurde die kumulierte Energiemenge, die während der CV-Phase der Ladung in die Batterie umgesetzt wird, als Kriterium für die Bewertung der Alterung identifiziert. Die Analyse der drei Ladekurven des Fahrzeugs BN-PG-3990 und die kumulierten Energiemengen sind in Abbildung 65 dargestellt. Die Energiemengen sind auch der Tabelle 42 zu entnehmen und liegen mit mehr als 3 kWh deutlich über dem höchsten Wert von 2,8 kWh, der bei der Betriebsanalyse gemessen wurde. Somit ist die Schlussfolgerung, dass die Fahrzeugbatterie so stark gealtert, dass das Batteriemanagementsystem den Betrieb stark einschränkt.

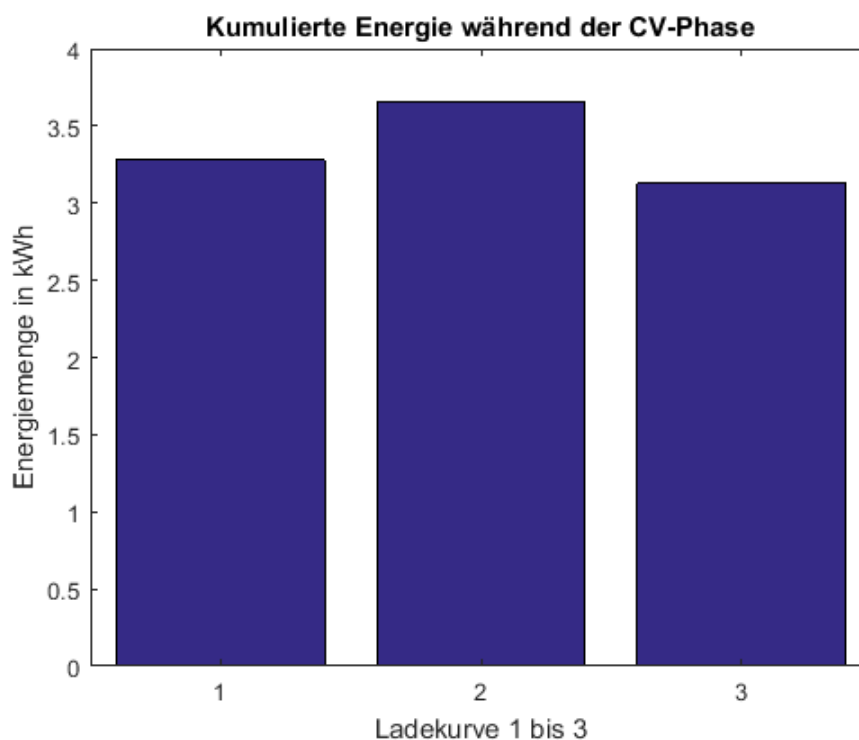


Abbildung 65 Messergebnisse der Labortests am Fahrzeug BN-PG-3990, kumulierte Energiemengen

9.4 Auswirkungen des Flottenbetriebs

Das Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW) der RWTH Aachen beteiligte sich durch Simulationen des Stromnetzes an dem Projekt "CO₂-freie Zustellung" und liefert die Ergebnisse für die Forschung im Bereich der Auswirkungen von Elektromobilität auf die Stromnetze sowie der Auswirkungen auf die Umwelt und stellt die folgenden Ergebnisse zur Verfügung.

9.4.1 Auswirkungen auf die Umwelt

Die Auswirkungen der Elektromobilität auf die Umwelt und insbesondere auf die CO₂-Emissionen, erfordert die Kenntnis über die CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung. Im Rahmen dieser Studie wird vereinfachend angenommen, dass die spezifischen CO₂-Emissionen des von den E-Fahrzeugen bezogenen Stroms den spezifischen CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung des jeweiligen Landes entsprechen. Die CO₂-Emissionen für zukünftige Betrachtungszeitpunkte können dabei über eine Marktsimulation zur Bestimmung des Kraftwerkeinsatzes ermittelt werden. Im Folgenden wird das Vorgehen der Marktsimulation beschrieben, welche genutzt werden kann, um die stündliche Erzeugung der elektrischen Energie zu ermitteln.

Zunächst werden die Eingangsdaten und Ergebnisse sowie der Betrachtungsbereich dargestellt. Anschließend werden das methodische Vorgehen sowie der Optimierungsalgorithmus des Marktsimulationsverfahrens beschrieben.

Das Marktsimulationsverfahren fußt auf Methoden der Kraftwerkseinsatz- und Handloptimierung (Mirbach 2009). Das Verfahren ist praxiserprobt und wurde in verschiedenen Studien mit Übertragungsnetzbetreibern (NEP 2012, NEP 2013, Bedarfsanalysen, etc.), Kraftwerksbetreibern und Regulatoren sowohl aus Deutschland als auch aus dem europäischen Ausland angewendet (Übertragungsnetzbetreiber, Netzentwicklungsplan Strom 2012 2012, Übertragungsnetzbetreiber, Netzentwicklungsplan Strom 2013 2013).

9.4.2 Eingangsdaten, Ergebnisse und Betrachtungsbereich

Das in dieser Studie eingesetzte Marktmodell umfasst eine detaillierte Abbildung eines Großteils der europäischen Marktgebiete. Zur Parametrierung dienen dazu folgende Eingangsdaten:

- Stündliche Zeitreihen der Nachfrage nach elektrischer Energie. Stündliche Zeitreihen liefern die Informationen zur Erzeugung aus Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) sowie anderer Must-run Erzeugung wie Laufwasser, Windkraft, Photovoltaik oder Concentrated-Solar-Power (CSP)
- Primärenergiepreise (einschließlich Transportkosten und Steuern) sowie Preise für CO₂-Emissionszertifikate. Falls notwendig: Einschränkungen in der Bereitstellung von Primärenergieträgern (bspw. maximale Förderungsbegrenzungen von Braunkohlegruben)
- Bereitstellende Regelleistung für jedes Marktgebiet

- Beckengrößen, Zuflüsse, Fallhöhen und Maschinentyp von (Pump-) Speicherkraftwerken sowie Wirkungsgrade für Pumpen und Turbinen.
- Maximale Leistung, eingesetzter Primärenergieträger, Maschinentyp (Gasturbine, Dampfturbine, Gas-und-Dampfturbine), Verfügbarkeit, Wärmeverbrauchskurve, Minimaleistung, minimale Betriebs- und Stillstandszeit und Startkosten aller thermischen Kraftwerke.
- Stündliche Austauschzeitreihen mit Marktgebieten außerhalb des Simulationsbereiches (bspw. Iberische Halbinsel)
- Einschränkung der Austauschkapazitäten zwischen Marktgebieten über NTC oder flussbasierten Restriktionen
- Ergebnis der Simulation sind der stündliche blockscharfe Kraftwerkseinsatz jeder Erzeugungseinheit im Betrachtungsbereich und deren CO₂-Emissionen, die stündliche Handelsflüsse zwischen den Marktgebieten sowie stündliche Marktpreise für elektrische Energie unter der Annahme von perfekter Voraussicht, vollkommener Markttransparenz und unter Vernachlässigung von Gebotsstrategien der einzelnen Marktteilnehmer.

9.4.3 Methodischer Ansatz der Marktsimulation

Das Marktsimulationsverfahren beruht auf Methoden der Kraftwerkseinsatz- und Handloptimierung. Die Simulation des Strommarkts erfolgt dabei auf Basis der oben aufgeführten Eingangsdaten. Unter den getroffenen Annahmen eines vollkommenen Marktes werden dazu die gesamten Kosten der Stromerzeugung unter den modellierten technischen Restriktionen minimiert. Im Folgenden werden die grundlegenden Eigenschaften dieses Ansatzes zusammengefasst:

- Explizite Modellierung der zeitkoppelnden Füllstandsrestriktionen der Becken von (Pump-)Speicherkraftwerken und vernetzten hydraulischen Gruppen
- Optimierung unter perfekter Voraussicht; Berechnung des kostenminimalen Einsatzes der Erzeugungseinheiten unter Vernachlässigung von Unsicherheiten der Last und dargebotsabhängiger Erzeugung
- Simulation von Überspeisung durch Erzeugung auf Basis Erneuerbarer Energien (EE) sowie marktbasierter Abregelung

Unter der Annahme vollkommener Märkte werden Day-Ahead und Intraday Markt nicht separat modelliert, da das Simulationsergebnis das Marktergebnis nahe zum Erfüllungszeitpunkt widerspiegelt.

Regelleistungsbedarf ist als bindende Nebenbedingung in der Optimierung modelliert. Wasserkraftwerke und schnellstartbare Gasturbinen sowie andere thermische Kraftwerke, die sich im regelfähigen Betrieb befinden, können im Rahmen ihres Betriebsbereichs Regelleistung bereitstellen. Negative Regelleistung kann dabei nur durch Kraftwerke, die sich in Betrieb befinden, sowie durch Speicher bereitgestellt werden.

Der Abruf vorgehaltener Regelleistung wird im Rahmen dieser Studie vernachlässigt.

Die Simulation erfolgt in stündlichem Zeitraster.

9.4.4 Optimierungsalgorithmus

Die Ermittlung des europaweiten, kostenminimalen Kraftwerkseinsatzes stellt eine komplexe Aufgabe dar, die nur mittels mathematischer Optimierungsverfahren gelöst werden kann. Insbesondere aufgrund der Ganzzahligkeitsentscheidungen beim Einsatz thermischer Kraftwerke sowie der zeitlichen Kopplungen hydraulischer Erzeugungsanlagen und Gruppen kann das Problem für ein Simulationsjahr nicht mithilfe standardisierter mathematischer Verfahren gelöst werden. Die verwendete Marktsimulation nutzt eine sogenannte Lagrange-Relaxation, wozu die Gesamtaufgabe in Teilprobleme zerlegt wird, die jeweils mit spezialisierten Algorithmen gelöst werden können. An Stelle der Einbindung der Nebenbedingungen als additive Terme der Optimierungsfunktion, werden gewichtete Multiplikatoren, sogenannte Lagrange-Multiplikatoren, verwendet.

Ausgehend von einer Startlösung erfolgt die Koordination der einzelnen Aufgaben mithilfe von Lagrange-Multiplikatoren, die die Einhaltung der systemkoppelnden Nebenbedingungen wie Nachfrage- und Reserverdeckung gewährleisten. Abbildung 66 veranschaulicht das gewählte Vorgehen.

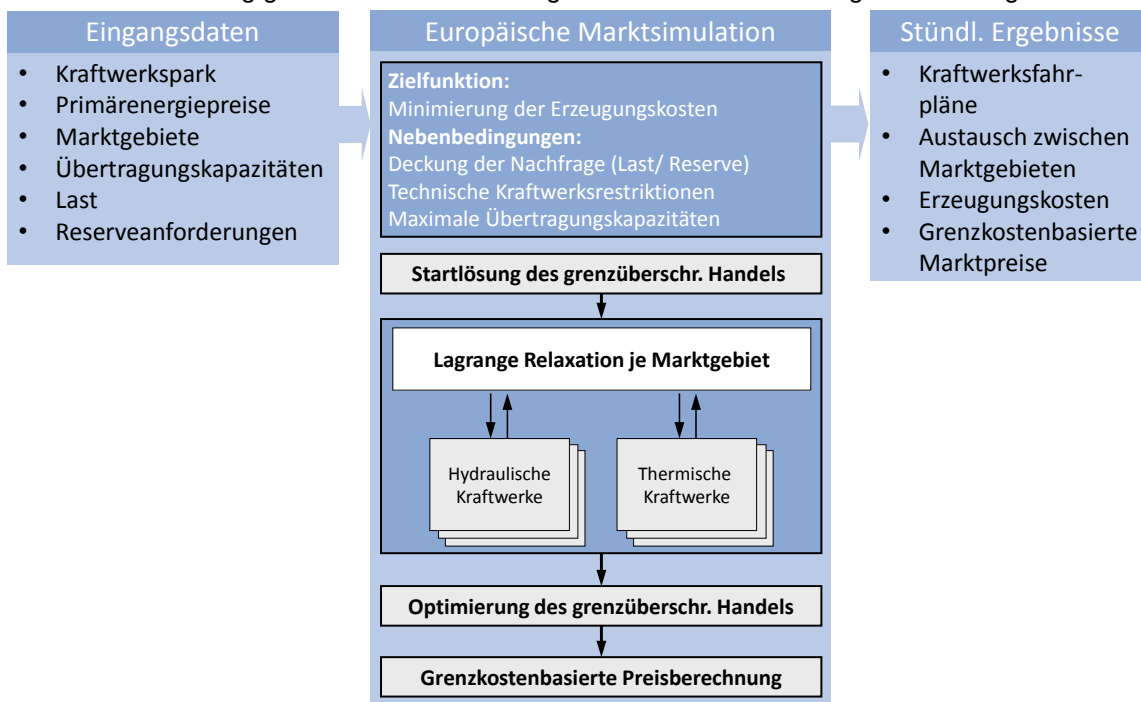


Abbildung 66 Verfahrensübersicht der Marktsimulation

Mit der Übernahme der ermittelten Ganzzahligkeitsentscheidungen als Ergebnis der Lagrange-Relaxation wird in einem weiteren Verfahrensschritt das Restproblem der grenzüberschreitenden Lastaufteilung unter Berücksichtigung des nun bekannten Betriebszustands aller Erzeugungsanlagen gelöst und anschließend eine grenzkostenbasierte Preisberechnung durchgeführt. Wesentliche Ergebnisse der Marktsimulation sind somit der systemweite, blockscharfe und kostenminimale Kraftwerkseinsatz, die resultierenden Gesamtkosten der Stromerzeugung zur Nachfragedeckung, die

CO₂-Emissionen, der grenzüberschreitende Energieaustausch sowie die grenzkostenbasierten Marktpreise der Fahrplanenergie für jedes Marktgebiet.

9.4.5 Untersuchungen

Die Bestimmung der spezifischen CO₂-Emissionen für elektrischen Strom basiert auf einem Erzeugungsszenario, welches an dem Erzeugungsszenario der Studie "Roadmap Speicher" (Stiftung Umweltenergierecht, Fraunhofer IWES und IAEW 2014) angelehnt ist. Die installierten Erzeugungsleistungen, aufgeschlüsselt nach Primärenergieträger, können der folgenden Abbildung 1 entnommen werden.

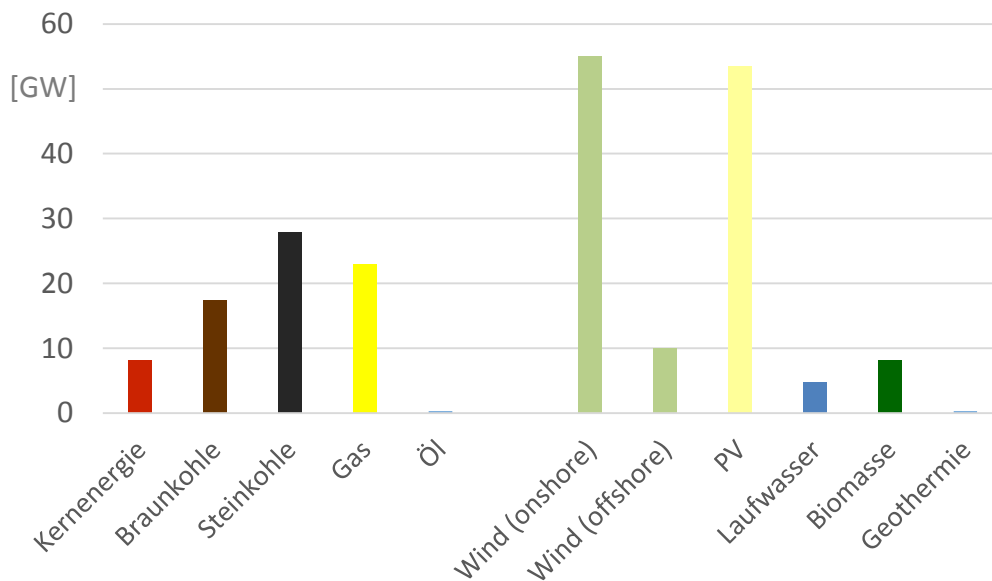


Abbildung 67 Installierte Erzeugungsleistungen in Deutschland

Hierbei handelt es sich um ein prognostiziertes Erzeugungsszenario für das Jahr 2020 mit einem starken Ausbau an Windenergieanlagen. Auf Basis dieses Erzeugungsparks wurde die Marktsimulation durchgeführt, welche die stündliche Erzeugung ermittelt. Anhand der stündlichen Erzeugung wurden die stündlichen CO₂-Emissionen des deutschen Erzeugungsparks ermittelt. In Abbildung 68 sind die stündliche Erzeugungsleistung sowie die stündlichen spezifischen CO₂-Emissionen für eine exemplarische Winterwoche dargestellt.

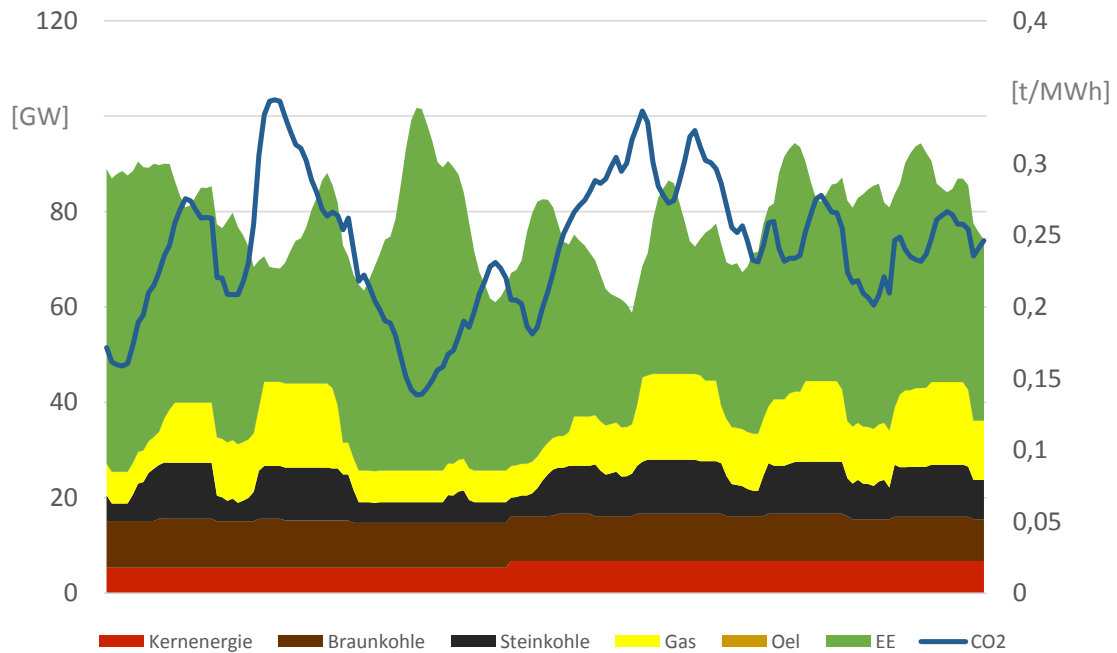


Abbildung 68 Stündliche Erzeugung einer exemplarischen Winterwoche

Auf Basis der Stromerzeugung und der CO₂-Emissionen für jede Stunde werden die spezifischen Emissionen je erzeugter Energie bestimmt. Die für das Jahr 2020 ermittelten Erzeugungs- und CO₂-Zeitreihen wurden im weiteren Verlauf durch das FCN und das PGS für die Ermittlung der CO₂-Bilanz der Elektrofahrzeuge sowie als Eingangsdaten zur Optimierung des Ladeverhaltens der Elektrofahrzeuge genutzt.

9.5 Auswirkungen auf das Stromnetz

In diesem Teil des Projektes galt es, die Rückwirkungen des Flottenbetriebs auf das Stromnetz zu untersuchen. Der vermehrte Einsatz von elektrisch betriebenen Zustellfahrzeugen führt zu einem lokal erhöhten Bedarf an elektrischer Energie, welche durch das öffentliche Stromnetz bereitgestellt wird. Während größere Verteilerzentren direkt an das Mittelspannungsnetz angeschlossen sind, sind insbesondere die kleinen Zustellstützpunkten (ZSP) an das Niederspannungsnetz angeschlossen. Da jedoch Niederspannungsnetze eine deutlich geringere Anschlussleistung als Mittelspannungsnetze haben, kann es zu Stabilitätsproblemen durch den Anschluss mehrerer Elektrofahrzeuge an das Stromnetz kommen. Um Stabilitätsprobleme in den Netzen zu vermeiden, kann neben der Netzverstärkung auch eine Koordination des Ladeverhaltens der einzelnen elektrischen Zustellfahrzeuge erfolgen. Somit gilt es in diesem Arbeitspaket, den Einfluss verschiedener Ladestrategien auf das Stromnetz zu untersuchen. Die untersuchten Ladestrategien entsprechen den verschiedenen Ladestrategien aus Kapitel 9.2.

Die Untersuchung der Stabilität des Stromnetzes erfolgt auf Basis eines synthetischen spannungsebenenübergreifenden Netzmodells anhand der Belastung der einzelnen Betriebsmittel

sowie der Spannungen im Netz. Synthetische Netze erlauben prinzipielle Aussagen zu den Auswirkungen des Ladeverhaltens der Fahrzeugflotte an den jeweiligen Standorten. Im Rahmen verschiedener Studien wurden solche Netze bereits verwendet (IAEW, FGH und EWE AG, Increasing the hosting capacity of RES in distribution grids by active power control 2015, E-Bridge, IAEW und Offis 2014) um generalisierte Aussagen zu ermöglichen.

9.5.1 Eingangsdaten, Ergebnisse und Betrachtungsbereich

Netzstruktur:

Im Rahmen der Studie erfolgt die Abbildung der Mittel- und Niederspannungsnetze mit Hilfe eines Modellnetzansatzes (IAEW, FGH und EWE AG, Increasing the hosting capacity of RES in distribution grids by active power control 2015, IAEW und FGH, Systemstudie zum Einspeisemanagement erneuerbarer Energien kein Datum). Da Niederspannungsnetze in Deutschland hauptsächlich als Strahlennetze und Mittelspannungsnetze vorwiegend als offen betriebene Ring- und Strangnetze aufgebaut werden (VDE 2012), erfolgt deren Abbildung mittels radialer Netzstrukturen. Vermaschungen, die in realen Netzen vorkommen können, werden somit vernachlässigt. Das Vorgehen zur Generierung von Mittel- und Niederspannungsnetzen nach (IAEW, FGH und EWE AG, Increasing the hosting capacity of RES in distribution grids by active power control 2015, IAEW und FGH, Systemstudie zum Einspeisemanagement erneuerbarer Energien kein Datum) ist in Abbildung 69 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** skizziert.

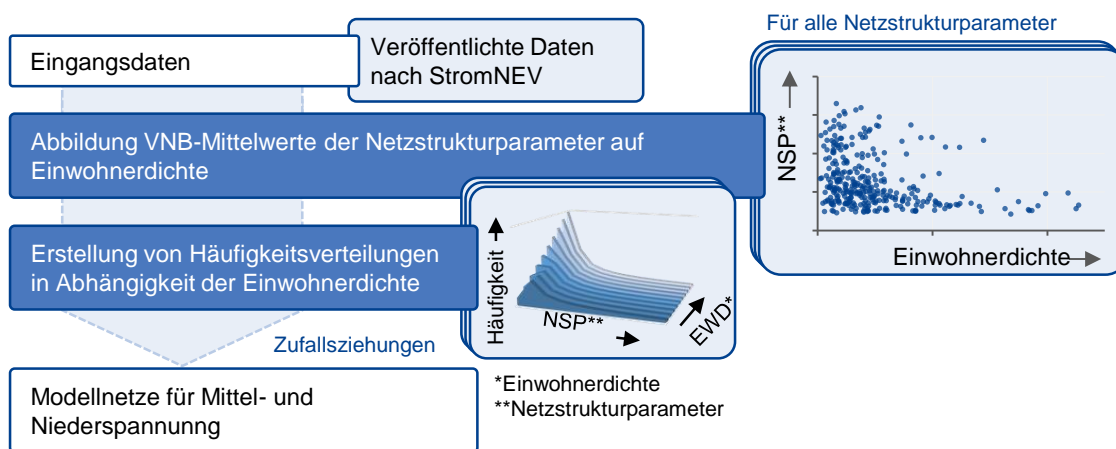


Abbildung 69 Entwicklung von regionalisierten Netzstrukturen nach (IAEW, FGH und EWE AG, Increasing the hosting capacity of RES in distribution grids by active power control 2015, IAEW und FGH, Systemstudie zum Einspeisemanagement erneuerbarer Energien kein Datum)

Beim gewählten Ansatz wird eine bestehende Datenbank realer Netzstrukturparameter (NSP) verwendet. Diese wurde mithilfe von Daten erstellt, die aufgrund gesetzlicher Veröffentlichungspflichten der Netzbetreiber nach der Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) (Justiz 2005) vorliegen. Auf Basis dieser Daten werden Verteilungsfunktionen relevanter Netzstrukturparameter abgeleitet.

Als Eingangsdaten für die Bestimmung der lokalen Netzstrukturparameter werden veröffentlichte Daten zu

- der Stromkreislänge der Kabel- und Freileitungen je Netzebene,
- der Anzahl Entnahmestellen je Netzebene,
- der Einwohnerzahl im Netzgebiet und
- der geographischen Fläche des Netzgebietes

verwendet. Basierend auf den Eingangsdaten werden die für den Aufbau der Modellnetze erforderlichen netzstrukturelevanten Größen für die Mittel- und Niederspannungsnetze ermittelt. Hierzu zählen die Leitungslänge zwischen zwei benachbarten Knoten, der Freileitungsanteil sowie die geografische Fläche der Mittel- und Niederspannungsnetzgebiete. Um regionale Unterschiede zu berücksichtigen, werden für die Parametrierung regionsspezifische Eingangsdaten des jeweiligen Verteilnetzbetreibers verwendet. Vorangegangene Analysen (IAEW, FGH und EWE AG, Increasing the hosting capacity of RES in distribution grids by active power control 2015) haben gezeigt, dass die Einwohnerdichte als Kriterium für die Auswahl der anzuwendenden Verteilungsfunktion der netzstrukturelevanten Größen herangezogen werden kann. Die benötigten Verteilungsfunktionen werden für einzelne Regionen individuell in Abhängigkeit der ortsabhängigen Einwohnerdichte generiert. Über Zufallsziehungen aus den Verteilungsfunktionen werden Variablen, wie bspw. die Leitungslänge zwischen zwei Entnahmestellen oder der Freileitungsanteil, realisiert. Anhand dieser Variablen wird die Netzstruktur eines Mittelspannungsnetzes sowie aller unterlagerten Niederspannungsnetze erstellt.

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts werden anhand eines exemplarisch gewählten spannungsebenenübergreifenden Mittel- und Niederspannungsnetz durchgeführt.

Zeitreihen für Verbraucher und dezentrale Erzeugungsanlagen

Die Last- bzw. Einspeisezeitreihen für Letztverbraucher und EE-Anlagen werden über bestehende Verfahren modelliert, welche die stochastischen Zusammenhänge des Verbraucher- bzw. Einspeiseverhaltens abbilden (IAEW, FGH und EWE AG, Increasing the hosting capacity of RES in distribution grids by active power control 2015, IAEW und FGH, Systemstudie zum Einspeisemanagement erneuerbarer Energien kein Datum, Patzack und Schacht 2016). Das Ergebnis dieser Verfahren sind synthetische Zeitreihen in stundenscharfer Auflösung. Dafür werden zur Verfügung gestellte Messzeitreihen der EE-Einspeisung diskretisiert. Durch die Verwendung abgetasteter Werte zu konkreten Zeitpunkten anstelle einer Verwendung von Stundenmittelwerten wird sichergestellt, dass auch extreme Last- und Einspeisesituationen berücksichtigt werden. Im Folgenden wird auf die entsprechenden Verfahren kurz eingegangen.

Einspeisezeitreihen für EE-Anlagen

Für die Erstellung der Einspeisezeitreihen für EE-Anlagen wird auf eine Vielzahl gemessener Einspeisezeitreihen zurückgegriffen. Um bei der Modellierung der Zeitreihen stochastische Zusammenhänge zu berücksichtigen, wird die Abweichung räumlich benachbarter Einspeisungen mittels einer Copula parametrisiert (Echternacht 2015), die eine Abbildung des Zusammenhangs

zwischen Randverteilungsfunktionen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen ermöglicht. Hierfür werden die gemittelten Abweichungen einer Vielzahl gemessener Zeitreihen benachbarter Anlagen des gleichen Primärenergieträgers von einer Referenzanlage betrachtet. Aufbauend darauf wird für die WEA und PVA jeweils eine Vielzahl abgetasteter Einspeisezeitreihen generiert. Mit diesem Ansatz werden bspw. entfernungsabhängige Korrelationen zwischen Einspeisungen gleichen Typs berücksichtigt. Die Modellierung des Einsatzes von Biomasse- und Laufwasseranlagen erfolgt unter der Annahme, dass jederzeit die volle installierte Leistung eingespeist wird.

Haushaltskunden

Für die Erstellung der Lastzeitreihen werden detaillierte Verbrauchermodelle genutzt, welche Höhe und Stochastik der Last realitätsnah abbilden. Standardlastprofile erfüllen diesen Zweck nur bei Aggregation einer großen Menge an Verbrauchern. Bei einer Modellierung einzelner Kunden, wie sie in NS-Netzen zu finden sind, reichen Standardlastprofile nicht aus, um extreme Netznutzungsfälle geeignet abzubilden. Aus diesem Grund wird für Haushaltskunden ein aus zahlreichen öffentlich verfügbaren Daten parametrisiertes synthetisches Modell zur Erzeugung von Lastzeitreihen verwendet (Patzack und Schacht 2016).

Das verwendete Haushaltskundenmodell bildet das Lastverhalten der Haushaltskunden über eine Aggregation des Lastverhaltens der einzelnen installierten elektrischen Geräte ab. In Abhängigkeit der Anzahl der im Haushalt lebenden Personen werden Geräteausstattung, Nutzungshäufigkeiten und Nutzungszeitpunkte der jeweiligen Geräte stochastisch bestimmt. Über eine Aggregation der Gerätezeitreihen wird die Zeitreihe für den Haushaltskunden synthetisiert.

Industriekunden

Die Erstellung der Lastgänge von Industrie- und Gewerbekunden erfolgt unter Verwendung historischer Messzeitreihen über einen probabilistischen Ansatz.

Aufgrund des grundsätzlich unterschiedlichen Lastverhaltens verschiedener Industrie- und Gewerbekunden erfolgt zunächst eine Einteilung in Kategorien (z. B. Landwirtschaft, Dienstleistung oder Einzelhandel). Für jede Kategorie wird auf eine Datenbasis mit historischen Messzeitreihen zurückgegriffen. Eine synthetische Verbraucherzeitreihe wird berechnet, indem Zeitreihen jeder Kategorie stochastisch gezogen und anschließend aggregiert werden. Für die Abbildung der Probabilistik des Lastverhaltens von Industrie- und Gewerbekunden wird anhand dieses Modells eine Vielzahl synthetischer Zeitreihen generiert.

9.5.2 Methodischer Ansatz

Die Bewertung der Auswirkungen des Ladeverhaltens der Zustellfahrzeuge auf das elektrische Netz erfolgt anhand der Änderung der Spannungen und Ströme im Netz durch den Anschluss und das Ladeverhalten der Zustellfahrzeuge. Verglichen werden drei verschiedene Varianten:

- Ohne Zustellfahrzeuge
- Minimierung der Kosten durch kalendarische Alterung (*Calendaric Aging*)

- Minimierung der Kosten für den Strombezug und die kalendarische Alterung (*Calendaric Aging kWh*)
- Unmittelbare Schnellladung (*Quick Charge*)

Für jede dieser Varianten wird eine Betriebssimulation durchgeführt. Die Betriebssimulation erfolgt für einen Zeitraum von einer Woche, welche in Viertelstunden Zeitschritten diskretisiert wird.

Die Eingangsdaten der Betriebssimulation sind zum einem das zuvor vorgestellte Modellnetz für die Mittel- und Niederspannungsebene sowie Zeitreihen für die angeschlossenen Verbraucher (inklusive der Zustellfahrzeuge) und dezentralen Erzeugungsanlagen. Auf Basis dieser Eingangsdaten erfolgt anschließend für jeden diskreten Zeitschritt eine Lastflussrechnung zur Bestimmung der Spannungen und Ströme im Netz für jeden Zeitschritt.

9.5.3 Untersuchungen

In den Untersuchungen werden die Einflüsse des Fuhrparks auf das elektrische Netz ermittelt. Der betrachtete Fuhrpark besteht aus 23 Zustellfahrzeuge, welche an einem Verteilzentrum stehen. Abbildung 70 zeigt den Verlauf der entnommen Leistung je Viertelstunde für die betrachtete Untersuchungswoche.

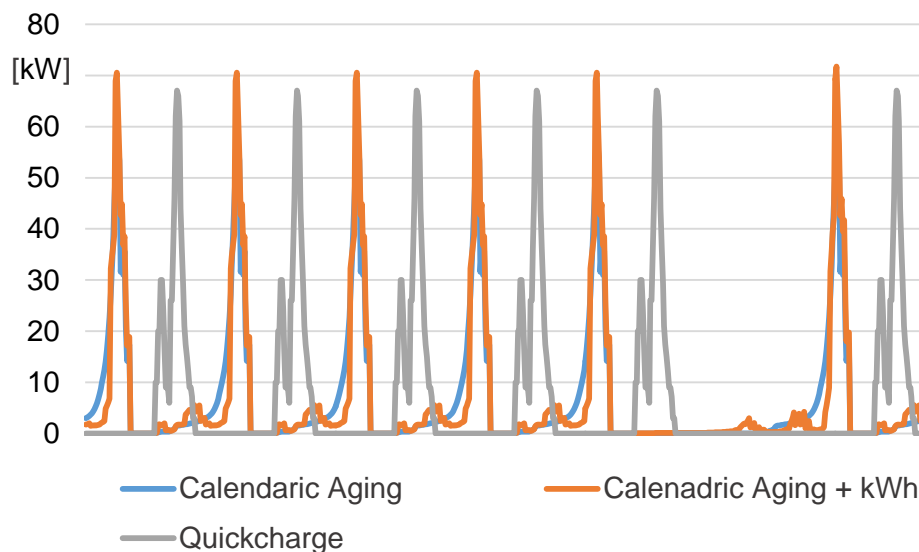


Abbildung 70 Aggregiertes Ladeverhalten von 23 Zustellfahrzeugen an einem Verteilzentrum für die drei verschiedenen Varianten in der exemplarischen Woche

Betrachtet wird ein ländlich geprägtes Modellnetz für die Mittel- und Niederspannungsebene. In dem im Folgenden intensiver betrachteten Mittelspannungsabgang sowie den unterlagerten Niederspannungsnetzen, sind Erzeugungsanlagen mit einer aggregierten installierten Leistung von 2,82 MW und eine Jahreshöchstlast von 0,79 MW angeschlossen. Das Verteilzentrum mit den Zustellfahrzeugen ist am elektrisch entferntesten Punkt vom Umspannwerk angeschlossen. Dies entspricht einem Anschluss am Ende des Niederspannungsabgangs, welcher an der vom Umspannwerk entferntesten Ortsnetzstation angeschlossen ist.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Ausgewertet wurden die Spannungen im Netz, sowie die Belastungen der einzelnen Netzkomponenten.

Die größten Spannungsabweichungen werden am Anschlusspunkt des Verteilzentrums ermittelt. Es ist zu erkennen, dass die Spannung zu jedem Zeitpunkt innerhalb der von der EN 50160 vorgegebenen Spannungsgrenzen von $\pm 10\%$ der Nennspannung (360 V bis 440 V) liegt und somit keine Spannungsbandverletzungen vorliegen (vgl. Abbildung 71).

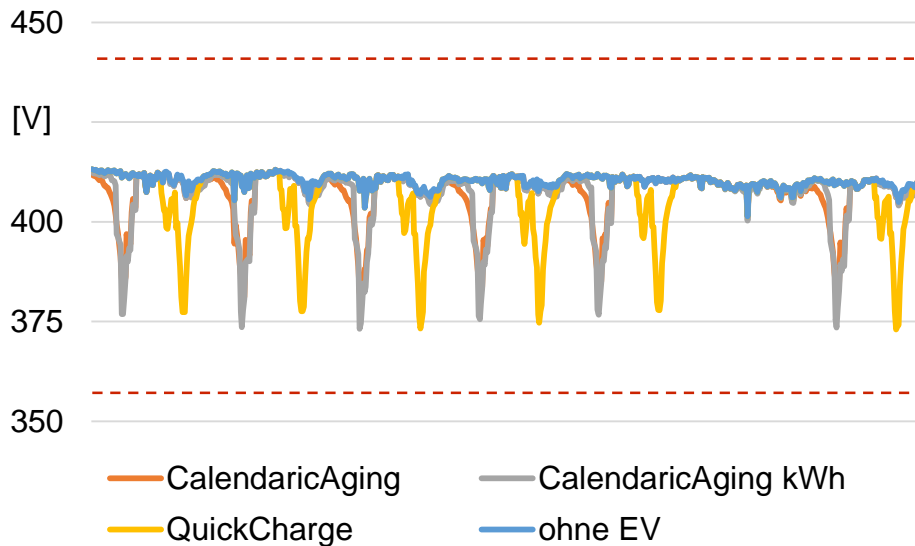


Abbildung 71 Spannungsverlauf am Netzanschlusspunkt des Verteilnetzzentrums für die drei Ladestrategien im Vergleich zu dem Spannungsverlauf ohne Anschluss der Zustellfahrzeuge

Die erhöhte Stromabnahme durch den Ladeprozess der Zustellfahrzeuge ist jedoch deutlich im Spannungsprofil zu erkennen. Durch den Ladeprozess kommt es zu Spannungsreduktionen von Bis zu 9 % gegenüber dem Spannungsprofil für das Szenario ohne Zustellfahrzeuge. Dies lässt den Schluss zu, dass der Anschluss der Elektrofahrzeuge einen signifikanten Einfluss auf das Spannungsprofil hat und somit in der Netzplanung mit berücksichtigt werden muss bzw. beim der Genehmigung des Netzanschlusses geprüft werden muss. Dem Ergebnis ist weiterhin zu entnehmen, dass die verschiedenen Ladestrategien hier keinen signifikanten Einfluss auf die maximalen Spannungsabweichungen haben.

Die Belastung der Betriebsmittel wird über dem Stromfluss ermittelt. Dieser ist in Abbildung 72 dargestellt und wurde auf den thermischen Grenzstrom bezogen. Ähnlich wie beim Spannungsprofil werden im Rahmen dieser Untersuchung keine Überschreitungen des thermischen Grenzstroms festgestellt. Aber auch hier fällt die Belastung des Kabels durch den Ladevorgang signifikant ins Gewicht, so dass dieses im Planungsprozess mit zu berücksichtigen ist. In Abbildung 73 ist die Belastung des Umspannwerktransformators für die Untersuchungswoche für die verschiedenen Ladestrategien dargestellt. Die Auswirkungen der Zustellfahrzeuge auf die Belastung des Transformators sind zu vernachlässigen, so dass man darauf schließen kann, dass nur das Netz in unmittelbarer Umgebung zum Netzanschluss des Verteilerzentrums von der Ladung der Zustellfahrzeuge betroffen ist.

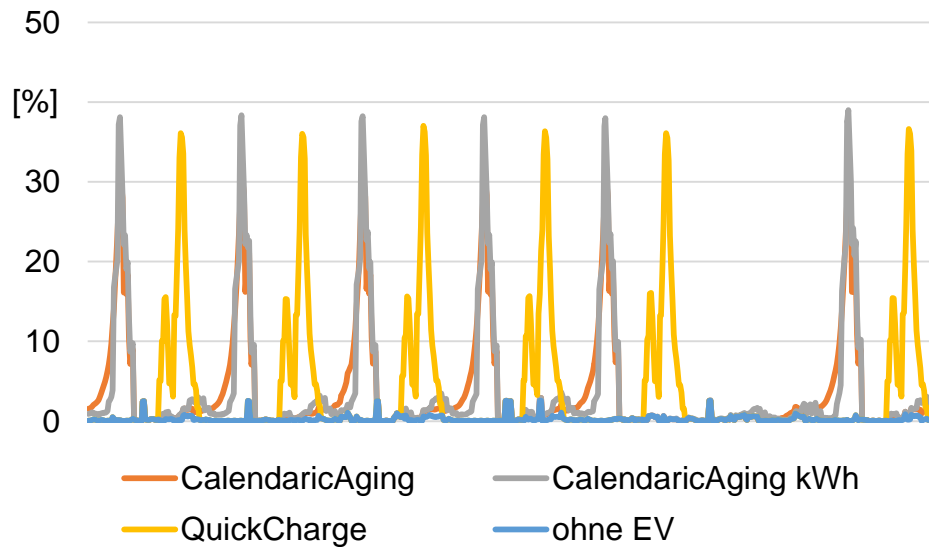


Abbildung 72 Belastungsprofil des Niederspannungskabels unmittelbar am Verteilerzentrum für die verschiedenen Ladestrategien im Vergleich zur Belastung ohne Anschluss der Zustellfahrzeuge

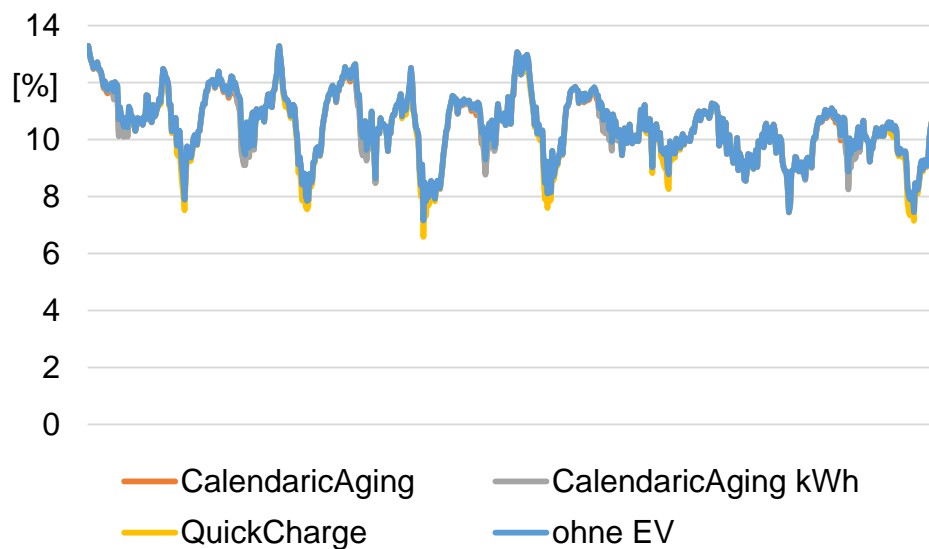


Abbildung 73 Belastungsprofil des Transformators im Umspannwerk für die verschiedenen Ladestrategien im Vergleich zur Belastung ohne Anschluss der Zustellfahrzeuge

9.6 Veröffentlichungen des PGS

- Posterbeitrag "Charging of Large Electric Vehicle Fleets at a Central Depot", European Electric Vehicle Conference (EEVC) 2014, Brüssel, Belgien
- Rücker, Fabian, Ilka Bremer, Sebastian Linden, Julia Badeda, und Dirk Uwe Sauer. 2016. „Development and Evaluation of a Battery Lifetime Extending Charging Algorithm for an Electric Vehicle Fleet.“ IRES. Düsseldorf.

- Bremer I., Rücker F., Wolff S. (2015). Testing E-Mobility in Fleet Operations – CO₂-Free Delivery in Bonn – CO₂ GoGreen. Posterpräsentation, Kompetenztreffen Elektromobilität in NRW, Essen, Deutschland, 4. November 2015.
- In Vorbereitung.: Schoeneberger, I., Rücker, F. (2017): Electric vehicle fleet in delivery service: Analysis of battery lifetime and optimization of charging process, International Conference on Operations Research 2017 (OR2017) “Decision Analytics for the Digital Economy”, 6.–8. September 2017, Berlin.

10 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse des PGS für KMU

Ladekonzepte

Die vorgestellten Konzepte für Ladeinfrastruktur stehen für jeden gewerblich operierenden Nutzer von Elektromobilität zur Verfügung. Es bringt auch für jeden Betreiber einer Flotte Vorteile, wenn in eine Art „Intelligenz“ investiert wird, dabei ist es von Betrieb zu Betrieb unterschiedlich, welche Art das sein sollte. Wenn ein Betrieb keinen Betriebshof nutzt, um seine Fahrzeuge aufzuladen, dann sollte das Ladekonzept trotzdem eine Überwachung des Ladevorgangs ermöglichen sowie die Fahrdaten (anonymisiert) analysieren und zu Optimierungszwecken speichern. Für die Auswahl der Batteriegröße sollte dabei immer die kleinstmögliche Batterie ausgewählt werden. Das macht sich nicht nur im Anschaffungspreis bemerkbar, sondern durch eine Nutzung der gesamten installierten Kapazität wird automatisch der mittlere Ladezustand gesenkt. Genauer sollte der Ladezustand, um den die Batterie zyklisiert wird, möglichst im Bereich von 50 % SOC gehalten werden, was auch durch die Ergebnisse aus Kapitel 9.2 belegt wird.

Batteriealterung

Die Alterung der Batterien im Feld ist deutlich in den ausgewerteten Daten sichtbar, da bei den Fahrzeugen keine Steuerung implementiert worden war. Die Implementierung dieser Ladesteuerung ist somit dringend anzuraten. Der im Projekt erarbeitete Optimierungsalgorithmus kann dabei die Entscheidungsgrundlage für die Steuerung darstellen, das jeweilige Fahrzeug zu laden oder den Ladevorgang auf einen späteren Zeitpunkt zu verschieben.

Auswirkungen des Flottenbetriebs

Die Auswirkungen von elektrisch betriebenen Fahrzeugflotten auf die Umwelt hängt von der „Anpreisung“ der Einsparungen ab. Wie in den Forschungsergebnissen zu sehen ist, müssen große Anreize gesetzt werden, um die Einsparung von CO₂ gegenüber den Batteriealterungskosten rentabel zu machen. Bisher wird bei einer Flotte die Senkung der kalendarischen Alterung der Batterien im Fokus liegen, was sich durch die hohen Batteriepreise begründet ist. Die Auswirkungen, die von der Flotte auf das Stromnetz zurückzuführen sind, liegen im Rahmen von den betrieblichen Schwankungen und führen daher nicht zu außerordentlichen Belastungen der Betriebsmittel an den Standorten.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Ein Bezirk mit Rahmentour und einer realisierter Tour, in der drei Anfahrpunkte entfallen sind	5
Abbildung 2	Gegenüberstellung der Single-Depot- und Multi-Depot-Strategie	6
Abbildung 3	Zuordnung von Zustellabschnitten zu Ankern	11
Abbildung 4	Flexibles Zuordnungsverfahren zu Bezirken.....	14
Abbildung 5	Zustellgebiet (links) und Kerngebiete (rechts) der Instanz Klein_3KG -.....	17
Abbildung 6	Gangfolge in einem Kerngebiet	18
Abbildung 7	Beispiellösung - Zuordnung in Gangfolge.....	18
Abbildung 8	Entscheidungsprozess zur Behebung von Notfällen	46
Abbildung 9	Entscheidungsbaum Akku vom Fahrzeug nicht genügend geladen (Verbund)	47
Abbildung 10	Aufteilung eines Back-up Bezirks	48
Abbildung 11	Übersicht über alle Verbund-Kfz-Bezirke eines Versorgungsgebietes mit HR-Wegen	49
Abbildung 12	Lage des Aufteilbezirks 52.....	49
Abbildung 13	Übersicht über die Teilbezirke, die teils auf dem Hinweg zum Bezirk (Bezirk 43 und 62), während der Tour (64) oder auf dem Rückweg zum Depot (Bezirk 44) in die umliegenden Bezirke integriert werden.....	51
Abbildung 14	Fokus auf die umzuverteilenden Teilbezirke.....	52
Abbildung 15	Die vier Hauptkonstrukte des Technologieakzeptanzmodell (TAM) und dessen kausale Zusammenhänge.....	60
Abbildung 16	Kriterien zur Beurteilung von Ladestrategien.....	66
Abbildung 17	Optimierung der Ladestrategien: Standardfall und sechs verschiedene Ladestrategien	68
Abbildung 18	Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership) unterteilt nach Batterietechnologien (ZEBRA und Li-Ion).....	68
Abbildung 19	Vergleich der Ladestrategien der Batterietechnologien ZEBRA und Li-Ion.....	69
Abbildung 20	Prognostizierte Batteriepreisentwicklung von Li-Ionen-Akkus, verschiedene Studien ...	72
Abbildung 21	SOC-Verlauf bei ungesteuerter Ladung. Von 6-18 Uhr sinkt der SOC, dann kommt das Fahrzeug zurück ins Depot und wird geladen.....	72
Abbildung 22	Geschätzte Diesel- und Strompreisentwicklung, historische Daten	72
Abbildung 23	Li-Ion-Batteriealterungsmodell nach Lunz et al. (2012)	73
Abbildung 24	Ergebnisse der Sensitivitäts- und Szenarioanalyse.....	74
Abbildung 25	Bedingungen für eine Wirtschaftlichkeit elektrischer Zustellfahrzeuge	75

Abbildung 26 GoGreen-Akzeptanzmodell, erweitert auf Basis des TAM nach Davis (1989).....	76
Abbildung 27 Ausgewählte drei Fragen des Konstruktes <i>wahrgenommene Nützlichkeit</i>	77
Abbildung 28 Zufriedenheit mit Elektro- (EV) und Dieselfahrzeugen (DV) nach Alter	79
Abbildung 29 Screeplot der Eigenwerte des Konstruktes <i>wahrgenommene Freude</i>	81
Abbildung 30 Effekt von wahrgenommener Nützlichkeit auf die Nutzungsintention (roter Pfeil)	81
Abbildung 31 Ergebnisse Regression 1: Effekt von wahrgenommener Nützlichkeit auf die Nutzungsintention	82
Abbildung 32 Effekt von wahrgenommener Benutzerfreundlichkeit auf die Nutzungsintention (roter Pfeil).....	83
Abbildung 33 Ergebnisse Regression 2: Effekt der wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit auf die Nutzungsintention	83
Abbildung 34 Stochastische Modellierung der Entwicklung des Rohölpreises	84
Abbildung 35 Stochastische Modellierung der Entwicklung des Strompreises	84
Abbildung 36 Stochastische Modellierung der Entwicklung des Batteriepreises	85
Abbildung 37 Stochastische Modellierung der Entwicklung der Kapitalkosten	85
Abbildung 38 Stochastische Modellierung der Entwicklung der Inflationsrate	85
Abbildung 39 Beispiel der Abnutzung/des Wertverlustes der Fahrzeuge und Batterien (zweite Zeile in Tabelle 34)	86
Abbildung 40 Kostenstruktur von kleinen, mittleren und großen Leichtnutzfahrzeugen	87
Abbildung 41 Sensitivitätsanalyse der TCO eines kleinen Leichtnutzfahrzeugen.....	87
Abbildung 42 Kostendifferenz zwischen Elektro- und Dieselfahrzeugen (<i>oil cost</i> = Dieselpreise/ Treibstoffpreise	88
Abbildung 43 TCO-Vergleich zwischen Elektrofahrzeug (EV, electric vehicle) und Verbrennungsmotorfahrzeug (ICE, internal combustion engine) als Funktion direkter Subventionen (links) und des Diesel-/Treibstoffpreises (rechts).....	88
Abbildung 44 TCO-Vergleich zwischen EV und ICE als Funktion des Strompreises (links) und des Batteriepreises (rechts).....	89
Abbildung 45 TCO-Vergleich zwischen EV und ICE als Funktion des Kraftstoffverbrauchs (für ICEs und EVs). (links) und der jährlichen Laufleistung (rechts)	90
Abbildung 46 Vorhergesagter jährlicher Erwerb von Fahrzeugen (<i>yearly acquisitions</i>) und die generelle Flottenstruktur einer kleinen Flotte	90
Abbildung 47 Ergebnisse der multikriteriellen Entscheidungsanalyse für Ladestrategien bezüglich der Minimierung von CO ₂ -Emissionen (ökologische Zielfunktion)	92
Abbildung 48 Vergleich der Kosten und CO ₂ -Emissionen (Trade-off) dreier Ladestrategien	93
Abbildung 49 LCA Systemgrenze (LDBEV=Light Duty Battery Electric Vehicle)	94

Abbildung 50 Emissionen im gesamten Lebenszyklus, unterteilt in vier Umweltverträglichkeits-Kategorien, StreetScooter vs. Kombination der konventionellen Fahrzeuge VW T5/Caddy.....	95
Abbildung 51 CO ₂ -Emissionen der Produktions- und Nutzungsphase, StreetScooter vs. Kombination der konventionellen Fahrzeuge VW T5/Caddy.....	96
Abbildung 52 SO ₂ -, PM ₁₀ - und VOC-Emissionen der Produktions- und Nutzungsphase, StreetScooter vs. Kombination der konventionellen Fahrzeuge VW T5/Caddy	96
Abbildung 53 Szenarien A bis C verschiedener Fahrzeug-Infrastruktur-Kombinationen	107
Abbildung 54 Kalendarische Alterungskennlinien einer Li-Ion Hochenergiezelle mit NMC Kathode (Schmalstieg, Käbitz und Ecker 2014).....	110
Abbildung 55 Ein- und Absteckzeiten der Fahrzeugflotte	113
Abbildung 56 Balken: Vorhersage der Stromerzeugung nach Energieträger für einen Tag im April im Jahre 2020. Linie: Konstruierter Strompreis, der von der von Kraftwerken ausgestoßenen Menge an CO ₂ abhängt.	114
Abbildung 57 Ergebnisse im Szenario „Quick Charge“. Oben links: Ladeleistung der einzelnen Fahrzeuge. Oben rechts: SOC der einzelnen Fahrzeuge. Unten links: Gesamte Last am Standort (schwarz), Maximale Anschlussleistung (blau gestrichelt). Unten rechts: Temperatur der Batteriepacks.	115
Abbildung 58 Ergebnis der Optimierung „Calendaric ageing only“. Oben links: Ladeleistung der einzelnen Fahrzeuge. Oben rechts: SOC der einzelnen Fahrzeuge. Unten links: Gesamte Last am Standort (schwarz). Unten rechts: Temperatur der Batteriepacks..	116
Abbildung 59 Ergebnis der Optimierung „Calendaric ageing and price signal“. Oben links: Ladeleistung der einzelnen Fahrzeuge. Oben rechts: SOC der einzelnen Fahrzeuge. Unten links: Maximale Anschlussleistung (blau), gesamte Last am Standort (schwarz), Strompreis (rot). Unten rechts: Temperatur der Batteriepacks.....	117
Abbildung 60 Kosten durch die kalendarische Alterung der Fahrzeugbatterien und der Stromkosten während des Ladeprozesses von 22 Fahrzeugen in 3 Optimierungsszenarien	118
Abbildung 61 Versuchsergebnisse: Vollständige Entladung des Batteriepacks.....	121
Abbildung 62 Analyse des Ladeverhaltens eines Zustellfahrzeugs mit der ID 70 4-a bis 4-c: Darstellung der Ladekurven drei verschiedener Tage nach Beginn des Zustellbetriebs 4-d: Berechnung der kumulierten Energie während der CV-Phase.....	123
Abbildung 63 Von oben nach unten: Ergebnisse vier verschiedener Fahrzeuge (Kennzeichnung durch IDs), Auswertung der kumulierten Energie für drei Tage in zwei Jahren	124
Abbildung 64 Messergebnisse der Labortests am Fahrzeug BN-PG-3990, Ladeleistung dreier Tests.....	125
Abbildung 65 Messerbegnisse der Labortests am Fahrzeug BN-PG-3990, kumulierte Energiemengen.....	126

Abbildung 66	Verfahrensübersicht der Marktsimulation	129
Abbildung 67	Installierte Erzeugungsleistungen in Deutschland	130
Abbildung 68	Stündliche Erzeugung einer exemplarischen Winterwoche	131
Abbildung 69	Entwicklung von regionalisierten Netzstrukturen nach (IAEW, FGH und EWE AG, Increasing the hosting capacity of RES in distribution grids by active power control 2015, IAEW und FGH, Systemstudie zum Einspeisemanagement erneuerbarer Energien kein Datum)	132
Abbildung 70	Aggregiertes Ladeverhalten von 23 Zustellfahrzeugen an einem Verteilzentrum für die drei verschiedenen Varianten in der exemplarischen Woche	135
Abbildung 71	Spannungsverlauf am Netzanschlusspunkt des Verteilnetzzentrums für die drei Ladestrategien im Vergleich zu dem Spannungsverlauf ohne Anschluss der Zustellfahrzeuge	136
Abbildung 72	Belastungsprofil des Niederspannungskabels unmittelbar am Verteilerzentrum für die verschiedenen Ladestrategien im Vergleich zur Belastung ohne Anschluss der Zustellfahrzeuge	137
Abbildung 73	Belastungsprofil des Transformators im Umspannwerk für die verschiedenen Ladestrategien im Vergleich zur Belastung ohne Anschluss der Zustellfahrzeuge	137

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Testinstanzen.....	16
Tabelle 2	Testinstanzen nach Kerngebietsbestimmung.....	17
Tabelle 3	Vergleich der Lösungen der Heuristik	20
Tabelle 4	Vergleich der besten Eröffnungslösung mit der durchschnittlichen und der besten Lösung – Instanz: Klein-3KG	21
Tabelle 5	Vergleich der unteren Schranke mit der durchschnittlichen und der besten Lösung – Instanz: Klein-3KG	21
Tabelle 6	Vergleich der flexiblen Planung mit der aktuellen statischen Planung	22
Tabelle 7	Verhalten bei Schwankungen – 1	23
Tabelle 8	Verhalten bei Schwankungen – 2	24
Tabelle 9	Verhalten bei Störungen	25
Tabelle 10	Prozentuale Verbesserung der Anfangslösung und Sensitivitätsanalyse des Zielfunktionswertes	26
Tabelle 11	Kennzahlen auf Versorgungsgebietsebene (GrAZ).....	29
Tabelle 12	Durchschnittliche Meter-Leistung und Anzahl Pakete je Tour.....	30
Tabelle 13	Bezirksübersicht – GrAZ für 11 KG (ohne Reheat)	30
Tabelle 14	Bezirksübersicht – GrAZ für 12 KG (ohne Reheat)	31
Tabelle 15	Bezirksübersicht – GrAZ für 13 KG (ohne Reheat)	31
Tabelle 16	Bezirksübersicht – GrAZ für 12 KG (mit Strafkosten und Reheat)	34
Tabelle 17	Bezirksübersicht – GrAZ für 11 KG (mit Strafkosten und Reheat)	34
Tabelle 18	Kennzahlen auf Versorgungsgebietsebene (GrAZ) mit Strafkosten und Reheat.....	34
Tabelle 19	Notfallplanung: durchschnittliche Arbeitszeiten des Versorgungsgebiets (mit Strafkosten und Reheat).....	36
Tabelle 20	Notfallplanung: durchschnittliche Überstunden je Tour (mit Strafkosten und Reheat)...	37
Tabelle 21	Durchschnittliche Arbeitsbelastung der Touren für zwei komplett bzw. teilweise ausfallenden Touren mit 12 Kerngebieten (mit Strafkosten und Reheat)	37
Tabelle 22	Vergleich statischer mit flexibler Planung für 12 und 13 Kerngebiete bei wachsender Nachfrage (mit Strafkosten und Reheat)	39
Tabelle 23	Kennzahlen auf Versorgungsebene für Mengenwachstum von 4 % (KG 12) und 14 % (KG13) (mit Strafkosten und Reheat)	40
Tabelle 24	Vergleich statischer mit flexibler Planung für 12 und 13 Kerngebiete bei wachsender Nachfrage (4 und 14 %) (mit Strafkosten und Reheat)	40
Tabelle 25	Bezirksübersicht – GrAZ für 12 KG mit 5 % weniger ZAb (Strafkosten und Reheat)	41

Tabelle 26	Sensitivitätsanalyse Zielfunktionswerte des Location-Routing-Problems (ohne Strafkosten).....	42
Tabelle 27	Kennzahlen auf Versorgungsgebietsebene (GrAZ) (mit Strafkosten und Reheat)	43
Tabelle 28	Bezirksübersicht – GrAZ für 11 KG mit Lokations-Entscheidung (mit Strafkosten und Reheat).....	43
Tabelle 29	mittlere Zeiten und mittlere Anzahl Extra-Depots für die Versorgungstour der Depots (mit Strafkosten und Reheat)	44
Tabelle 30	Intention zur Nutzung von Elektrofahrzeugen (Intention to use EV).....	79
Tabelle 31	Zufriedenheit mit Elektro- (links) und Dieselfahrzeugen (rechts).....	79
Tabelle 32	Beispiel zur Datenreduktion anhand dreier Fragen zur <i>wahrgenommenen Nützlichkeit</i>	80
Tabelle 33	Eigenwerte der Komponenten des Konstruktes <i>wahrgenommene Nützlichkeit</i>	80
Tabelle 34	Annahmen des Entscheidungsmodells zur Flottenumstellung	86
Tabelle 35	Entscheidungskriterien für die multikriterielle Entscheidungsanalyse für Ladestrategien bezüglich der Minimierung von CO ₂ -Emissionen (ökologische Zielfunktion).....	92
Tabelle 36	Evaluierung unterschiedlicher Transformatorleistungen für die Ladung der Zustellfahrzeuge an einem Standort anhand fehlender bzw. überschüssiger Ladeenergie in kWh	103
Tabelle 37	Evaluierung unterschiedlicher Transformatorleistungen für die Ladung der Zustellfahrzeuge an einem Standort anhand fehlender bzw. überschüssiger Ladeenergie in kWh	104
Tabelle 38	Nutzenpotentiale, Komponenten und Kosten für die Infrastrukturszenarien A bis C ...	108
Tabelle 39	Nachgeladene Energiemengen auf Netzseite für verschiedene Fahrzeugtypen am Standort Königswinter zwischen dem 12. und 13.07.2015.....	112
Tabelle 40	Fahrzeugparameter.....	113
Tabelle 41	Kenndaten des Batteriepacks nach Datenblatt.....	119
Tabelle 42	Messergebnisse für das Fahrzeug BN-PG-3990.....	125

13 Abkürzungsverzeichnis

ARC	Arc Routing Problem
Avg	Average (Mittelwert)
DPOR	Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken
EV	Electric Vehicle, Elektrofahrzeug
FCN	Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior
GrAZ	Grundarbeitszeits
IAEW	Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen
ICE(V)	internal combustion engine (vehicle), Verbrennungsmotorfahrzeug
KG	Kerngebiet
LDBEV	Light Duty Battery Electric Vehicle
Max	Maximum
NPV	Net Present Value (Kapitalwert)
PGS	Institute for Power Generation and Storage Systems
SOC	State of Charge
TCO	Total Cost of Ownership
TNr	Tour-Nummer
V2G	Vehicle-to-Grid
VRP	Vehicle Routing Problem (CVRP: Capacitated Vehicle Routing Problem)
ZAb	Zustellabschnitt
ZB	Zustellbasis
ZEBRA	Zero Emission Battery Research Activities
Zfw	Zielfunktionswert
ZSP	Zustellstützpunkt

14 Literaturverzeichnis

- Ajzen, Icek (2005): Attitudes, personality, and behavior. 2nd ed. Maidenhead, Berkshire, England, New York: Open University Press (Mapping social psychology).
- Ajzen, Icek; Fishbein, Martin (1980): Understanding attitudes and predicting social behavior. Pbk. ed. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.
- Bautista, J., E. Fernández, und J. Pereira. 2008. „Solving an urban waste collection problem using ants heuristics.“ *Computers & Operations Research*, Vol. 35,9, 3020-3033.
- Beasley, J.E., und N. Christofides. 1997. „Vehicle Routing with ASparxe Feasibility Graph.“ *European Journal of Operational Research*, 98, 499-511.
- Belenguer, J.M., E. Venavent, P. Lacomme, und C. Prins. 2006. „Lower and upper bounds for the mixed capacitated arc routing problem.“ *Computers & Operations Research*, Vol.33,12, 3363-3383.
- Benavent, E., A. Corberán, und J. Sanchis. 2000. „Linear Programming Based Methods for Solving Arc Routing Problems.“ In *Arc Routing: Theory, Solutions and Application*, 231-275. New York: Springer US.
- Bühner, Markus (2011): Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion. 3., aktualisierte und erw. Aufl. München, Boston [u.a.]: Pearson Studium (Psychologie).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (21.05.2013): Postzustellung in Bonn wird CO₂-neutral. Bundesumweltminister Altmaier gibt Startschuss für eine der größten Elektro-Nutzfahrzeugflotten. Nr. 066/13. Berlin. http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderung-von-vorhaben-im-bereich-der-elektromobilitaet-ab-2012/markteinfuehrung-mit-oekologischen-standards/dateien-pressematerial-etc/pm_bmu-co2-go-green.pdf, Zugriff 19.05.2015.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017): Modellregionen Elektromobilität. Online verfügbar unter <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/modellregionen-elektromobilitaet.html>, Zugriff 18.08.2017.
- Campbell, A., L. Clarke, und M.W.P. Savelsbergh. 2002. „Inventory Routing in Practice.“ In *The Vehicle Routing Problem*, 303-330. SIAM Monographs on discrete Mathematics and Applications.
- Davis, Brian A.; Figliozzi, Miguel A. (2013): A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 49 (1), pp. 8–23. DOI: 10.1016/j.tre.2012.07.003.
- Davis, Fred D. (1986): A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems : theory and results. Ph.D. Massachusetts Institute of Technology. Sloan School of Management. Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/1721.1/15192>, Zugriff 06.12.2014.
- Davis, Fred D. (1989): Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. In: *MIS Quart.* 13, pp. 319–339, Zugriff 06.10.2014.
- Davis, Fred D.; Bagozzi, Richard P.; Warshaw, Paul R. (1989): User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models. In: *Management Science* 35 (8), pp. 982–1003. DOI: 10.1287/mnsc.35.8.982.
- Dror, M. 2000. *Arc Routing: Theory, Solutions and Applications*. Kluwer Academic Publishers.
- Dudenhöffer, Kathrin (2013): Why electric vehicles failed. In: *Journal of Management Control* 24 (2), pp. 95–124. DOI: 10.1007/s00187-013-0174-2.
- E-Bridge, IAEW, und Offis. 2014. „BMW-Verteilernetzstudie: Moderne Verteilernetze für Deutschland.“ Berlin.
- Echternacht, D. 2015. „Optimierte Positionierung von Messtechnik zur Zustandsschätzung in Verteilnetzen.“ Aachen.
- Eksioglu, Burak, Arif Volkan Vural, und Arnold Reisman. 2009. „The vehicle routing problem: A taxonomic review.“ *Computers and Industrial Engineering*, 01. 11: 1472-1483.
- Fazel, Ludwig (2014): Akzeptanz von Elektromobilität. Entwicklung und Validierung eines Modells unter Berücksichtigung der Nutzungsform des Carsharing. Wiesbaden: Springer Gabler (Schriften zum europäischen Management).
- Fishbein, Martin; Ajzen, Icek (1975): Belief, attitude, intention, and behavior. An introduction to theory and research. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co. (Addison-Wesley Series in Social Psychology).
- Fishbein, Martin; Ajzen, Icek (2010): Predicting and changing behavior. The reasoned action approach. New York: Psychology Press.

- Globisch, Joachim; Elisabeth Dütschke (2013): Ergebnisse aus den Projekten mit gewerblichen Nutzern von Elektrofahrzeugen im Rahmen des BMVBS-Vorhabens „Modellregionen für Elektromobilität 2009—2011. Anwendersicht auf Elektromobilität in gewerblichen Flotten. Unter Mitarbeit von Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS. Karlsruhe Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme, Fraunhofer ISI. Online verfügbar unter http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-2563301.pdf.
- Globisch, Joachim; Schneider, Uta; Dütschke, Elisabeth (2013): Acceptance of electric vehicles by commercial users in the electric mobility pilot regions in Germany. In: Therese Lindström (Hg.): Rethink, renew, restart. Eceee summer study proceedings ; 3 - 8 June 2013, Belambra Les Criques, Toulon/Hyères, France, Bd. 12. Stockholm: eceee, pp. 973–983. Online verfügbar unter <http://proceedings.eceee.org/visabstrakt.php?event=3&doc=4-093-13>, Zugriff 17.04.2015.
- Gouveia, L., M.C. Mouao, und L.S. Pinto. 2010. „Lower bounds for the mixed capacitated arc routing problem.“ *Computers and Operations Research*, Vol. 37, Issue 4, 692-699.
- Hacker; Florian; Harthan, Ralph; Hermann, Hauke; Kasten, Peter; Loreck, Charlotte et al. (2011): Betrachtung der Umweltentlastungspotenziale durch den verstärkten Einsatz von kleinen, batterieelektrischen Fahrzeugen im Rahmen des Projekts „E-Mobility“. Schlussbericht im Rahmen der Förderung der Modellregionen Elektromobilität des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. Unter Mitarbeit von Stephan Leppler und Alexandra Möck. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/1344/2011-007-de.pdf>, Zugriff 21.06.2016.
- Hidrué, Michael K.; Parsons, George R.; Kempton, Willett; Gardner, Meryl P. (2011): Willingness to pay for electric vehicles and their attributes. In: *Resource and Energy Economics* 33 (3), pp. 686–705. DOI: 10.1016/j.reseneeco.2011.02.002.
- Holden, Richard J.; Karsh, Ben-Tzion (2010): The Technology Acceptance Model: Its past and its future in health care. In: *Journal of biomedical informatics* 43 (1), pp. 159–172. DOI: 10.1016/j.jbi.2009.07.002.
- IAEW, FGH, und EWE AG. 2015. „Increasing the hosting capacity of RES in distribution grids by active power control.“ International ETG Congress.
- IAEW, und FGH. kein Datum. „Systemstudie zum Einspeisemanagement erneuerbarer Energien.“
- Janssens, J., J. Van den Bergh, K. Sörensen, und D. Cattrysse. 2015. „Multi-objective microzone-based vehicle routing for courier companies: from tactical to operational planning.“ *European Journal of Operational Research*, Vol. 242, Issue 1, 222-231.
- Justiz, Bundesministeriums der. 2005. „Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen.“
- Kouvelis, P., und G. Yu. 1997. *Robust Discrete Optimization and Its Applications*. Springer US.
- Laporte, G., R. Musmanno, und F. Vocaturo. 2010. „An Adaptive Large Neighbourhood Search Heuristic for the Capacitated Arc-Routing Problem with Stochastic Demands.“ *Transportation Science*, 02: 125-135.
- Li, J.-Q., D. Borenstein, und P. B. Mirchandani. 2007. „A decision support system for the single-depot vehicle rescheduling problem.“ *Computers & Operations Research*, 04: 1008-1032.
- Li, J.-Q., P. B. Mirchandani, und D. Borenstein. 2009. „Real-time vehicle rerouting problems with time windows.“ *European Journal of Operational Research*, 05: 711-727.
- . 2007. „The vehicle rescheduling problem: Model and algorithms.“ *Networks*, 10: 211-229.
- Li, J.-Q., P. B. Mirchandani, und D. Borenstein. 2008. „Parallel auction algorithm for bus rescheduling.“ In *Computer-aided Systems in Public Transport*, von Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 281-299. Berlin Heidelberg: Springer.
- . 2009. „A Lagrangian heuristic for the real-time vehicle rescheduling problem.“ *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 05: 419-433.
- Lunz, Benedikt; Yan, Zexiong; Gerschler, Jochen Bernhard; Sauer, Dirk Uwe (2012): Influence of plug-in hybrid electric vehicle charging strategies on charging and battery degradation costs. In: *Energy Policy* 46, pp. 511–519. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.04.017.
- Mirbach, T. 2009. *Marktsimulationsverfahren zur Untersuchung der Preisentwicklung im europäischen Strommarkt*. Aachen: Klinkenberg.
- Moscato, P. 1999. „Memetic algorithms: A short introduction.“ In *In Corne D., Dorigo M., Glover F.: New ideas in optimization*, 219-234. McGraw-Hill.
- Mourao, M.C., und L. Amado. 2005. „Heuristic method for a mixed capacitated arc routing problem.“ *European Journal of Operational Research*, 139-153.

- Mu, Q., Z. Fu, J. Lysgaard, und R. Eglese. 2010. „Disruption management of the vehicle routing problem with vehicle breakdown.“ *Journal of the Operational Research Society*, 04: 742-749.
- Netemeyer, Richard G.; Bearden, William O.; Sharma, Subhash (2003): *Scaling procedures. Issues and applications*. Thousand Oaks, Calif.: Sage Publications.
- Olbrecht, Thomas (2010): *Akzeptanz von E-Learning. Eine Auseinandersetzung mit dem Technologieakzeptanzmodell zur Analyse individueller und sozialer Einflussfaktoren*. Doctoral Thesis. Friedrich-Schiller-Universität, Jena. Fakultät für Sozial- und Verhaltenswissenschaften. Online verfügbar unter <http://d-nb.info/1010952757/34>, Zugriff 13.08.2014.
- Patzack, S, und D. Schacht. 2016. „Hochauflösende Modellierung von Haushaltskunden zur Bewertung von DSM-Konzepten in der Niederspannungsebene.“ Berlin.
- Peters, Anja; Hoffmann, Jana (2011): *Nutzerakzeptanz von Elektromobilität. Eine empirische Studie zu attraktiven Nutzungsvarianten, Fahrzeugkonzepten und Geschäftsmodellen aus Sicht potenzieller Nutzer. Ergebnisse aus dem Projekt Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität FSEM*. Fraunhofer ISI. Karlsruhe. Online verfügbar unter <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/zeitschriften/Nutzerakzeptanz-von-Elektromobilitaet.pdf>, Zugriff 04.02.2015.
- Pillac, Victor, Michel Gendreau, Christelle Guéret, und Andrés L. Medaglia. 2013. „A review of dynamic vehicle routing problems.“ *European Journal of Operational Research*, 16. 02: 1-11.
- Rogers, Everett M. (2003): *Diffusion of innovations*. 5. ed. New York, NY [u.a.]: Free Press.
- Rücker, Fabian, Ilka Bremer, Sebastian Linden, Julia Badeda, und Dirk Uwe Sauer. 2016. „Development and Evaluation of a Battery Lifetime Extending Charging Algorithm for an Electric Vehicle Fleet.“ IRES. Düsseldorf.
- Savelsbergh, M., und M. Goetschalckx. 1995. „A comparison of the efficiency of fixed versus variable vehicle.“ *Journal of business logistics*, 16, 163-187.
- Schmalstieg, Johannes, Stefan Käbitz, und Madeleine Ecker. 2014. „A holistic ageing model for Li(NiMnCo)O₂ based 18650 lithium-ion batteries.“ *Journal of Power Sources*, Vol. 257, 01: 325ff.
- Schmidthöfer, A. 2003. „Taktische Bestimmung von Tourgebieten für die expeditionelle Tourenplanung.“
- Schneider, M., A. Stenger, F. Schwahn, und D. Vigo. 2014. „Territory-Based Vehicle Routing in the Presence of Time Window Constraints.“ *Transportation Science*, 732-751.
- Schwartz, Eduardo S. (Hg.) (2004): *Real options and investment under uncertainty. Classical readings and recent contributions*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Spliet, Remy, Adriana F. Gabor, und Rommert Dekker. 2014. „The vehicle rescheduling problem.“ *Computers & Operations Research*, 03: 129-136.
- Soldado; Joan Francesc Esteve; Wolff, Stefanie; Madlener, Reinhard (2015): *Environmental impact of electrifying postal delivery fleets in inner-city districts: A life-cycle assessment of the StreetScooter*. In: *FCN Working Paper, Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior, RWTH Aachen University 18/2015*.
- Steinhilber, Simone; Wells, Peter; Thankappan, Samartha (2013): *Socio-technical inertia: Understanding the barriers to electric vehicles*. In: *Energy Policy* 60, pp. 531–539. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.04.076.
- Stiftung Umweltenergierecht, Fraunhofer IWES, und IAEW. 2014. „Roadmap Speicher Bestimmung des Speicherbedarfs in Deutschland im europäischen Kontext und Ableitung von technisch-ökonomischen sowie rechtlichen Handlungsempfehlungen für die Speicherförderung.“ Berlin. http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_FVEE/14.IWES_Roadmap-Speicher/14_IWES-etat_Roadmap_Speicher_Langfassung.pdf.
- Sungur, I., F. Ordóñez, und M. Dessouky. 2008. „A robust optimization approach for the capacitated vehicle routing problem with demand uncertainty.“ *IIE Transactions*, 03: 509-523.
- Tajik, N., R. Tavakkoli-Moghaddam, B. Vahdani, und S. Meysam Mousavi. 2014. „A robust optimization approach for pollution routing problem with pickup and delivery under uncertainty.“ *Journal of Manufacturing Systems*, 04: 277-286.
- Toth, Paolo, und Danielle Vigo. 2001. *The vehicle routing problem*. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Übertragungsnetzbetreiber. 2012. „Netzentwicklungsplan Strom 2012.“
- Übertragungsnetzbetreiber. 2013. „Netzentwicklungsplan Strom 2013.“
- VDE. 2012. „Die aktuelle Situation der Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH).“ VDE-Verlag.

- VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (2017): Schaufenster Elektromobilität. Online verfügbar unter <http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/index.html>.
- Venkatesh, Viswanath; Morris, Michael G.; Davis, Gordon B.; Davis, Fred D. (2003): User acceptance of information technology. Toward a unified view. In: *MIS Quarterly* 27 (3), pp. 425–478. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=10758835&site=ehost-live>, Zugriff 06.12.2014.
- Wissmann, Johannes (2013): Einwilligungen im Permission Marketing. Empirische Analysen von Determinanten aus der Sicht von Konsumenten. Wiesbaden: Springer Gabler (Kundenmanagement & Electronic Commerce).
- Wøhlk, S. 2008. „A Decade of Capacitated Arc Routing.“ In *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, von B. Golden, S. Raghavan und E. Wasil, 29-48. Boston: Springer US.
- Yu, Gang, und Qi Xiangtong. 2004. *Disruption Management: Framework, Models, and Applications*. World Scientific Pub Co Inc.
- Zhong , H., R.W. Hall, und M. Dessouky. 2007. „Territory Planning and Vehicle Dispatching With Driver Learning.“ *Transportation Science*, 74-89.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel CO ₂ -freie Zustellung in Bonn DPOR: Untersuchungen zur störfallgerechten Bezirksplanung bei der CO ₂ -freien Zustellung in der letzten Meile der Deutsche Post DHL FCN: Wirtschaftlichkeitsanalyse und Untersuchung der Ladestrategie: techno-ökonomische Optimierung und Nutzerverhalten; Auswirkungen des Flottenbetriebs auf das Stromnetz PGS:	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] DPOR: Büschgens, Sarah Dettenbach, Astrid Michaela Christina FCN: Wolff, Stefanie Madlener, Reinhard Hackbarth, André PGS: Schöneberger, Ilka Rücker, Fabian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2016 6. Veröffentlichungsdatum 31.08.2017 7. Form der Publikation Elektronischer Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) DPOR: Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken der RWTH Aachen Kackertstraße 7 D-52072 Aachen FCN: Lehrstuhl für Wirtschaftswissenschaften, insb. Energieökonomik Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN) E.ON Energy Research Center (E.ON ERC) RWTH Aachen University Mathieustrasse 10 D-52074 Aachen PGS: Institute for Power Generation and Storage Systems (PGS) E.ON Energy Research Center (E.ON ERC) RWTH Aachen University Mathieustrasse 10 D-52074 Aachen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution RWTH Aachen 10. Förderkennzeichen 16EM1032 11. Seitenzahl 155 (nummeriert) 161 insgesamt
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) Stresemannstraße 128 - 130 10117 Berlin	13. Literaturangaben 72 14. Tabellen 42 15. Abbildungen 73
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

18. Kurzfassung

DPOR:

Zhong et al. entwickeln als Erstes die Idee eines Verfahrens zur flexiblen Touren- und Tourgebietsplanung, welches statische und dynamische Aspekte kombiniert. Die Idee ist, sogenannte Kerngebiete und flexible Gebiete zu bestimmen. Zhong et al. gehen bei ihrer Planung davon aus, dass die Standorte der Kunden und deren Nachfrage von Tag zu Tag variieren. Diese Situation liegt z.B. bei der Paketzustellung vor. Die Autoren entwickeln eine Tabu Suche (TS) um das Problem zu lösen. Schneider et al. greifen die Idee der Planung mit Hilfe von Kerngebieten von Zhong et al. auf. Auch sie nehmen an, dass die Kundenmenge täglich schwankt. Zusätzlich berücksichtigen sie bei der Planung allerdings noch Zeitfenster und passen das TS-Verfahren zur Kerngebietsbestimmung entsprechend an. Der Ansatz eines flexiblen Verfahrens zur Touren- und Tourgebietsplanung unter Berücksichtigung einer vorgegebenen Gangfolge bei der Verbundzustellung und die Aufnahme der Lokationsentscheidung in der Paketzustellung wurde bislang noch nicht verfolgt und werden in diesem Bericht betrachtet.

Der Einsatz von Elektrofahrzeugen in der Regel- als auch der Verbundzustellung bringt neue Herausforderungen mit sich. Es ist notwendig, die Bezirksschneidung und Tourenplanung an die neue Situation anzupassen. Die größte Herausforderung ist dabei, dass keine Erfahrungswerte bei der Planung einer solchen Zustellung vorhanden sind. Weiter liegt eine variable Reichweite vor. Diese Reichweite hängt von Faktoren wie dem Alter der Batterie, der Witterung aber auch dem Profil der Strecke ab. Andere Punkte sind die Ladeinfrastruktur, die Kapazitätsrestriktionen der Fahrzeuge sowie die stark schwankende Verkehrsmenge. Um besser auf diese Herausforderungen reagieren zu können, werden dynamische und statische Aspekte der Touren- und Tourgebietsplanung kombiniert und ein Verfahren zur flexiblen Bezirksschneidung entwickelt, welches die jeweiligen Vorteile der Verfahren ausnutzt. Des Weiteren wird für den statischen Fall eine Entscheidungshilfe für Notfallsituationen, wie bspw. Fahrzeugausfall, entwickelt.

Ziel ist die Konzeption von innovativen Strategien, um eine zuverlässige Zustellung, auch mit Elektrofahrzeugen, zu gewährleisten. Im Bereich der Zustellung werden dazu Strategien zur Sicherstellung einer ausreichenden Flexibilität bei Zustellmengen- und Reichweiteschwankungen untersucht. Die Idee ist die Bildung von Kerngebieten, die idealerweise Grundstock eines Bezirks bilden. Zur Bildung der Kerngebiete werden zunächst Ankerpunkte im Gebiet festgelegt und über ein Zuordnungsverfahren Straßenabschnitte dem Kerngebiet zugeordnet. Flexible Randbereiche werden täglich neu zugeordnet. Hierfür werden in der Verbundzustellung ein Memetischer Algorithmus entwickelt und in der Paketzustellung ein Simulated Annealing Verfahren, die zeitnah Lösungen für die tagesangepasste Zuordnung der flexiblen Straßenabschnitte liefern.

Die Ergebnisse zeigen, dass der flexible Ansatz wie gefordert dafür geeignet ist, besser als die statische Planung auf die zu Beginn genannten Herausforderungen wie schwankende Paketmengen oder variable Reichweiten zu reagieren. Weiter können durch die Kerngebiete Lerneffekte bei den Zustellern realisiert und im Gegensatz zu einem rein dynamischen Verfahren auch eine realistische Umsetzbarkeit in der Praxis erreicht werden.

In der Notfallplanung wird eine Problemformulierung modelliert, die einen Bezirk bei Bedarf aufteilt und dessen Straßenabschnitte neu zuordnet. Dabei wird die Gangfolge der bestehenden Bezirke weitgehend eingehalten. Das Modell wird in kommerzieller Optimierungssoftware implementiert und gelöst.

Mit den Verfahren sind Grundlagen geschaffen worden, um flexibel auf Nachfragen und Reichenweiten reagieren zu können. Einsatzgebiete der Verfahren sind hauptsächlich bei Zustelldienstleistern und Transportunternehmen zu finden. Die Verfahren können aber auch in Abholanwendungen eingesetzt werden. Auch hier sind die postalischen bzw. Less-Than-Truckload Dienstleister zu nennen, die Pakete bzw. Lieferungen bei Kunden abholen und zu Verteilzentren bringen bzw. von den Verteilzentren die Kunden versorgen.

FCN:

Im Rahmen dieses Vorhabens stärkten die Projektpartner ihre Kompetenzen auf dem Gebiet der technischen, ökonomischen und ökologischen Analyse der Auswirkungen einer großflächigen Elektrifizierung von Fahrzeugflotten bzw. der Planung ihres Einsatzes im gewerblichen Sektor. Der wissenschaftliche Aussagewert der Erkenntnisse ging hierbei, aufgrund der Größe der im Verbundvorhaben eingesetzten Elektrofahrzeugflotte, weit über bisherige Projekte hinaus. Insbesondere die folgenden, für eine Umstellung der Fahrzeugflotte auf elektrische Antriebe kritischen Themenfelder wurden betrachtet: Gestaltung und Auslegung großflottentauglicher Infrastrukturlösungen, ökonomisch und ökologisch optimale Ladestrategien und Fahrtrouten, Auswirkungen auf das Stromnetz, Auswirkungen auf betriebliche Prozesse (Praxistauglichkeit, Akzeptanz) sowie Entwicklung der Wirtschaftlichkeit im Zeitverlauf. Da diese kritischen Punkte nicht nur im Verbundprojekt, sondern bei jeder Entscheidung bezüglich einer möglichen Elektrifizierung von Fahrzeugflotten essentiell sind bzw. gegeben sein müssen (z.B. ökonomische Vorteilhaftigkeit), können die Ergebnisse des Vorhabens als Grundlage für allgemeine Richtungsentscheidungen und weitere Forschungsvorhaben im Bereich der Elektromobilität dienen, welche über die Elektrifizierung reiner Logistikfahrzeugflotten hinausgehen. Es besteht somit eine sehr gute wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit des gesamten Vorhabens.

Das FCN war maßgeblich für zwei Gebiete zuständig: Die Wirtschaftlichkeitsanalyse und die Auswirkungen des Flottenbetriebs auf das Stromnetz.

Da ein Projekt hauptsächlich dann realisiert werden sollte, wenn aus seiner Durchführung ein monetär messbarer Nutzen entsteht, ist die Wirtschaftlichkeitsanalyse ein elementarer Baustein der Projektbewertung.

Der Betrieb von Elektrofahrzeugen führt unweigerlich zu Auswirkungen auf das Stromnetz, wenn die Fahrzeuge geladen werden müssen. Dies gilt insbesondere für Fahrzeugflotten, die tagsüber für Zustelldienste genutzt werden und deshalb abends zeitgleich zum Aufladen ans Netz gehen. Die Ladestrategie hat deshalb einen entscheidenden Einfluss auf den zeitgleich auftretenden Leistungsbedarf und damit auch auf die Auswirkungen auf das Verteilnetz. Diese können finanzieller Natur sein, d.h. die Ausgestaltung der Netzinfrastruktur muss sich an den potentiellen, gebündelt auftretenden Spitzenlasten orientieren, sie können aber auch Umweltaspekte berühren, wenn durch zeitlich gesteuertes Laden z.B. das fluktuierende Angebot an Windenergie aufgenommen wird, oder aber im Gegenteil nachts vor allem Kohlestrom geladen wird. Diese Umweltwirkungen dürfen bei der Beurteilung von Elektrofahrzeugen nicht vernachlässigt werden.

PGS:

Die wissenschaftlichen Ergebnisse der Instituts beinhalten eine technische Analyse der Ladeinfrastruktur. Hier wird gezeigt, welche Komponenten erforderlich sind, um eine intelligente Steuerung an den Standorten zu implementieren. Dabei liegt der Fokus auf der Steuerung der Ladeleistung, die vom Fahrzeug bezogen wird. In nächsten Schritt wird ein Optimierungsproblem erarbeitet, welches die Ladeleistung, die Batteriealterung und die CO₂-Emissionen anhand eines Preissignals berücksichtigt. Der vorgestellte Modellansatz ermöglicht die Lösung des Optimierungsproblems anhand eines Nichtlinearen gemischt-ganzzahligen Solvers in MATLAB®. Um den Bezug zum realen Verlauf der Batteriealterung herzustellen, wurden Tests im Labor durchgeführt, sowie ein Datensatz Fahrzeugtelemetriedaten hinsichtlich der Batteriealterung analysiert.

19. Schlagwörter

DPOR: VRP, ARP, Flexible Bezirksplanung, Notfallplanung

FCN: Wirtschaftlichkeitsanalyse, Ladestrategien, techno-ökonomische Optimierung, Nutzerverhalten, Flottenbetriebs und Stromnetz

PGS: Batteriealterung, Test, Optimierung, CO2-Emissionen, Stromnetz

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Testing E-Mobility in Fleet Operations – CO ₂ -Free Delivery in Bonn – CO ₂ Gogreen	
4. author(s) (family name, first name(s)) DPOR: Büschgens, Sarah Dettenbach, Astrid Michaela Christina FCN: Wolff, Stefanie Madlener, Reinhard Hackbarth, André PGS: Schöneberger, Ilka Rücker, Fabian	5. end of project 31.12.2016 6. publication date 31.08.2017 7. form of publication Final Report
8. performing organization(s) (name, address) DPOR: Deutsche Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken der RWTH Aachen Kackertstraße 7 D-52072 Aachen FCN: Lehrstuhl für Wirtschaftswissenschaften, insb. Energieökonomik Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN) E.ON Energy Research Center (E.ON ERC) RWTH Aachen University Mathieustrasse 10 D-52074 Aachen PGS: Institute for Power Generation and Storage Systems (PGS) E.ON Energy Research Center (E.ON ERC) RWTH Aachen University Mathieustrasse 10 D-52074 Aachen	9. originator's report no. RWTH Aachen 10. reference no. 16EM1032 11. no. of pages 155 (numbered) 161 (in total)
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) Stresemannstraße 128 - 130 10117 Berlin	13. no. of references 72 14. no. of tables 42 15. no. of figures 73
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

DPOR:

Zhong et al. were the first ones to develop the idea of a method for flexible planning of delivery routes and delivery districts, which combines static and dynamic aspects. The idea is to determine core delivery districts (i.e. static districts) and flexible delivery districts. For their planning, Zhong et al. assume that the locations of the customers and their demand vary from day to day as the situation with parcel deliveries shows. The authors develop a Tabu Search (TS) to solve the problem. Schneider et al. take up the idea of planning with the help of static core districts by Zhong et al. They also assume that customer quantity varies daily. Additionally, they consider time frames for the planning and adapt the TS Method according to the idea of core districts.

The approach of using a flexible procedure for the planning of delivery routes and delivery districts - under consideration of a given delivery sequence (combined letter and parcel delivery) and a location decision (parcel delivery only) – is new and will be explained in this final report.

The application of electric vehicles, both in the separated letter and parcel as well as in combined letter and parcel delivery, introduces new challenges. It is necessary to adapt the planning of delivery districts and delivery routes to the new situation.

The prevalent challenge is that there are no empirical data for the planning of such a delivery process. Moreover, a variable vehicle range exists. This range depends on factors like age of the battery, outside temperature and route profile. Other influencing aspects are the charging infrastructure, capacity restrictions of the vehicles as well as strongly fluctuating traffic volumes. To react better to these challenges, dynamic and static aspects of the delivery routes and delivery districts are combined and a method for flexible planning of the delivery districts is developed which uses the advantages of the method.

Moreover, a decision guidance is developed for the static case for emergencies like vehicle breakdowns.

The aim is to plan innovative strategies to ensure a reliable delivery with electric vehicles.

In the area of delivery, strategies for the assurance of sufficient flexibility with fluctuating delivery quantities and ranges are examined.

The idea is to build core districts that ideally build a central delivery area. In order to develop core areas, so-called anchor points are determined. Stretches of roads are assigned to these anchor points with the core areas. Flexible edge regions (marginal areas) are being assigned on a daily basis. For this, in the separated letter and parcel delivery a Memetic Algorithm is used, whereas in the combined letter and parcel delivery a Simulated Annealing Procedure, which gives prompt daily-optimized assignment of flexible road stretches.

The results show that the flexible approach is better suited to the restrictions than the static planning approach. By creating core delivery districts, the delivery personnel accumulates learning effects and a realistic feasibility of the solution is shown in the field. For emergency planning, the developed mathematical problem divides a core district and its road stretches into smaller parts and assigns them to their closest neighboring core district. Here, the given delivery sequence is being held. This mathematical problem is implemented and solved in a commercial optimization software.

This procedure gives the opportunity to react flexible to volatile quantities and ranges. It can be applied to delivery and other logistic services, i.e. also for pick up services and less-than-truckload services that pick up goods from customers and bring them to centralized distribution hubs.

FCN:

In the wake of the enormously growing amount of delivery and parcel services, the logistics sector in particular is faced with the challenge of harmonizing the constant growth of delivery routes with the increasing requirements of environmental protection and the (impending) vehicle restrictions, especially in downtown areas. Vehicles powered by means of alternative fuels provide a solution to this problem. Electric drive technologies in particular have the potential to play an important role in the reorganization of vehicle fleets, as their typical drawbacks – limited travel distance and long charging times – are less significant for urban driving cycles. The well-known advantages – economic efficiency and (local) zero-emission – come, on the contrary, fully to the fore. The aim of this joint research project is to observe and assess the operative suitability of a large fleet of electric small delivery vehicles under numerous operating conditions (season, daily mileage, charging strategies) over a longer period of time.

In particular, FCN aimed at:

- Optimization of battery charging strategies regarding numerous framework conditions, e.g. costs of the charging infrastructure (depending on a fast-charging option), electricity prices (depending on the availability of time-variant tariffs), battery degradation (depending on the charging regime), user behavior, conditions of the electric grid (e.g. CO₂ emissions from power generation), and driving profile (depending on itinerary planning and segmentation of postal zones);
- Calculation of the economically optimal conversion strategy for a vehicle fleet from conventional to electric vehicles over time, taking uncertainty in the future development of battery and electricity prices into account;
- Life-cycle analysis of electric vehicles compared to vehicles with internal combustion engine, also considering the influence of various framework conditions (emission intensity of electricity production, charging regime, daily mileage etc.) on vehicle greenhouse gas emissions; and
- Investigation of the impacts that different charging strategies may exert on grid connection costs, energy supply costs, and power plants emissions.

Thus, the project asked the question, whether electric delivery vehicles actually help to reduce harmful emissions or whether they merely displace them (from the combustion engines/exhaust to the large and frequently still fossil-fuel powered power stations). In this case, it is important, in addition to the operation of the vehicles, to also take the downstream and upstream processes (e.g. emissions in the manufacture and disposal of various vehicle components) into account. With the aid of such an analysis, FCN compared the emission balances of the diesel-powered vehicles used by Deutsche Post and electric vehicles with one another.

By conducting a cross-sectional survey at Deutsche Post DHL, FCN examined the user acceptance of electric vehicles in mail and parcel delivery, i.e. to what extent drivers accept the substitution of diesel cars by electric cars. Moreover, FCN analyzed whether light duty electric vehicles add value to logistics operations, particularly to the drivers.

The concluding focus of the project is to use the results of this comprehensive assessment for scientific policy recommendations and to support businesses in converting their vehicle fleets to electric vehicles.

PGS:

The research include a technical analysis of charging infrastructure to be placed at the depot of Deutsche Post DHL. Different components are used to implement charging strategies that range from quick charge after plug-in to optimized charging.

The research focus lies on control of charging power that is used to recharge the battery. In the next step the optimization is implemented, which besides the power includes battery ageing from lithium-ion battery cells and CO₂ emissions included via a price signal, that is derived from energy production analysis. The model implementation is used to solve the nonlinear, mixed integer optimization problem, using MATLAB®. Furthermore, battery test and data car telemetry data analysis was used to relate the results from optimization to field battery ageing.

19. keywords

DPOR: VRP, ARP, flexible planning of delivery routes and delivery districts, emergency planning

FCN: economic efficiency, battery charging strategies, techno-economical optimization, electric vehicle drivers' acceptance, conversion strategy for a vehicle fleet, impacts on grid connection

PGS: battery ageing, test, optimization, CO₂ emissions, grid

20. publisher

21. price