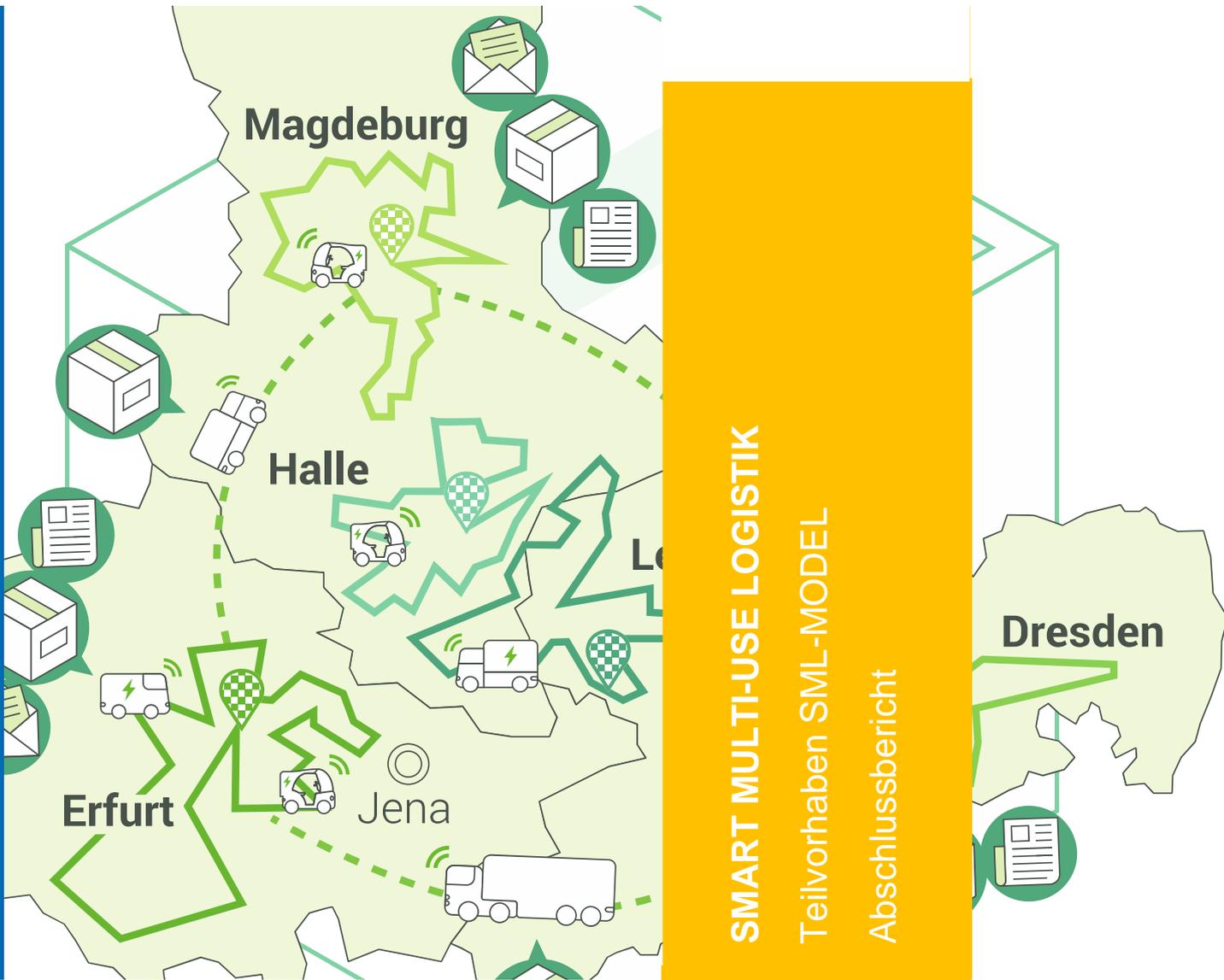


Bernd Nieberding  
Christian Vollrath  
Reiner Bleil  
Uwe Adler



**INSTITUT VERKEHR  
UND RAUM**  
der Fachhochschule Erfurt

## SMART MULTI-USE LOGISTIK

Entwicklung und Erprobung factorspezifischer Bewertungsmodelle mit Fokus auf gewinn- und CO2-orientierten Modellen im Kontext kooperativer Prozessketten (SML MODEL)

Abschlussbericht

Projektlaufzeit: 01.05.2020 - 30.04.2023

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Uwe Adler

Bearbeitung: Bernd Nieberding  
Christian Vollrath  
Reiner Bleil

Unter Mitarbeit: Peter Skupin

Mit freundlicher Unterstützung: Kai Gottschall

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz  
(BMWK)

Förderkennzeichen: 01 ME 19008C

Datum: 18. März 2024

Institut Verkehr und Raum

Fachhochschule Erfurt

Altonaer Straße 25

D - 99085 Erfurt

Telefon: +49 (361) 6700 6776

E-Mail: [verkehr-und-raum@fh-erfurt.de](mailto:verkehr-und-raum@fh-erfurt.de)

Internet: [www.ivr.fh-erfurt.de](http://www.ivr.fh-erfurt.de)

## Inhaltsverzeichnis

1	Das Projekt SMART MULTI-USE LOGISTIK.....	1
2	Teilvorhaben SML-MODEL der FH Erfurt.....	2
2.1	Aufgaben im Teilprojekt.....	2
2.1.1	Kooperative Prozessketten.....	2
2.1.2	Erweitertes Bewertungsmodell.....	3
2.1.3	CO <sub>2</sub> -Erfassungs- und Prognosestool.....	3
3	Stand der Wissenschaft und Technik.....	4
3.1	Mehrfachnutzungsansätze.....	4
3.2	CO <sub>2</sub> -Bilanz von Elektrofahrzeugen.....	5
3.3	Bewertungsmodelle.....	6
4	Zustellprozesse und Kooperationspotentiale in der Medienlogistik.....	6
4.1	Abgrenzung des Betrachtungsraums.....	6
4.2	Relevante prozessuale Abläufe.....	7
4.3	Prozessketten und potentielle Kooperationsschnittstellen.....	7
4.4	Zustellbereiche und Sendungsaufkommen.....	8
4.5	Kooperationspotentiale.....	8
4.6	Matching-Kriterien.....	9
5	Modulare Standardprozesse für kooperative Prozessketten.....	10
5.1	Standardisierung der Prozessmodule.....	10
5.2	SML-Hauptlauf.....	11
5.3	Standardprozess zum kooperativen Paktaustausch.....	13
5.4	Bilaterale Austauschwege.....	14
6	Bewertungs- und Vergütungsmodell.....	15
6.1	Bewertungsmodell zur Ermittlung der Prozesskosten.....	15
6.1.1	Kostenrelevante Prozesse.....	15
6.1.2	Kennzahlenmodell für die Paketkommissionierung.....	16
6.1.3	Kennzahlenmodell für die Paketzustellung.....	17
6.2	Dynamisches Vergütungsmodell.....	19
6.2.1	Analyse bestehender Vergütungsmodelle.....	19
6.2.2	Vergütungsmodell für die kooperative Prozesskette.....	20
7	Erfassung fahrzeugseitiger Energieverbräuche und CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	21
7.1	Fahrzeugspezifische Daten und Schnittstellen.....	21
7.1.1	Umgebungsparameter und Datenerfassung.....	21
7.1.2	Emissionsrelevante Prozesse.....	21
7.1.3	Erfassung fahrzeugspezifischer Informationen und genutzte Schnittstellen.....	22
7.2	Reengineering und Datenerfassung.....	24
8	KI-basiertes Modell zur Prognose von CO <sub>2</sub> -Emissionen in der Transportkette.....	26
8.1	Basismodell.....	26
8.2	Prognosemodell zur Bewertung von einsatzbezogenen CO <sub>2</sub> -Emissionen von Zustellfahrzeugen.....	27
8.2.1	Modellansatz.....	27
8.2.2	Erstellung des Lern-Datensets mittels CO <sub>2</sub> -Erfassungstools.....	28

---

8.2.3	Parametrierung und Kalibrierung des CO <sub>2</sub> -Erfassungstools .....	30
8.2.4	Training und Validierung des CO <sub>2</sub> -Prognosemodells .....	32
9	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	35
10	Literaturverzeichnis .....	37

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachter Prozess der Paketzustellung bei den betrachteten Medienlogistikunternehmen.....	7
Abbildung 2: SML-Zustellgebiet.....	8
Abbildung 3: Sendungsaufkommen im SML-Zustellgebiet, exemplarisch für einen Partner.....	9
Abbildung 4: Vereinfachter Prozess der Paketzustellung bei den betrachteten Medienlogistikern mit SML-Hauptlauf.....	11
Abbildung 5: Hauptlaufvarianten im Überblick.....	12
Abbildung 6: Kooperative Paketlogistik im Projekt SML - stilisierter Hauptlaufprozess.....	13
Abbildung 7: SML-Hauptlauf mit bilateralen Austausch (orange).....	14
Abbildung 8: Relationen innerhalb des SML-Netzwerkes und darüber hinaus.....	15
Abbildung 9: Übersicht der kostenrelevanten Prozesse in der Paketzustellung.....	16
Abbildung 10: Prozesse in der Paketkommissionierung.....	17
Abbildung 11: Ermittlung der Zustellstückkosten im Nachlauf.....	18
Abbildung 12: Preisbildung im kooperativen Paketprozess.....	20
Abbildung 13: Energieverbrauch je 1-prozentiger Änderung des State-of-Charge (SOC) beim Renault Kangoo ZE sowie Durchschnittlicher Energieverbrauch und Konfidenzintervall.....	23
Abbildung 14: Energieverbrauch je 1-prozentiger Änderung des State-of-Charge (SOC) beim BMW i3 sowie Durchschnittlicher Energieverbrauch und Konfidenzintervall.....	24
Abbildung 15: Basismodell zur Prognose sendungsbezogener CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	26
Abbildung 16: Beispielhafte Segmentierung einer Tour mit homogenen Segment-Eigenschaften (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Gebhardt, et al. 2015).....	27
Abbildung 17: Datenverarbeitung im CO <sub>2</sub> -Erfassungstool.....	28
Abbildung 18: Segmentierung für eine Touren (hier: beispielhaft eingefärbt nach Energieverbrauch).....	29
Abbildung 19: Entwicklungsschritte zur Erstellung des KI-basierten Prognosemodells.....	33

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2: Aus den Zustellbestimmungen abgeleitete Matching-Kriterien.....	9
Tabelle 3: Verfügbare Daten für das Prognosemodell. ....	25
Tabelle 4: Übersicht der Parametervariationen zur Kalibrierung und Validierung des CO <sub>2</sub> -Erfassungstools.....	30
Tabelle 5: Strategien zur Behandlung von Extremwerten in den Energieverbrauchsdaten. ....	31
Tabelle 6: Übersicht der im fahrbetrieb und Versuchsfahrten erfassten Fahrzeuge und des Datenbestandes Während der Projektlaufzeit. ....	32
Tabelle 7: Übersicht der betrachteten Features .....	34
Tabelle 8: Regressionsverfahren.....	34

## Abkürzungsverzeichnis

CVRPTW	Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows
ICCT	International Council on Clean Transportation
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IVR	Institut Verkehr und Raum
KEP	Kurier-, Express-, Paketdienst
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
LNT	Logistik Netzwerkes Thüringen e.V.
proTUL	Institut für Produktion, Transport, Umschlag und Lagerung



## 1 Das Projekt SMART MULTI-USE LOGISTIK

Wie viele andere Logistikzweige erlebt auch die Paketlogistik seit Jahren einen kontinuierlichen Anstieg der Sendungsmengen. Mit aktuell über 4,5 Milliarden Sendungen allein in Deutschland stellt das vor allem die Kurier-, Express- und Paketbranche (KEP) vor große Herausforderungen. Im Gegensatz dazu kämpft die Medienlogistik wegen der stetigen Auflagenverluste mit großen Kostensteigerungen in der Zustellung, verfügt gleichzeitig aber auch über eine erhebliche Anzahl an Fahrzeugen und Zustellpersonal. Ziel im Forschungsvorhaben SMART MULTI-USE LOGISTIK war die digitale Unterstützung der Kooperation dieser Logistikbranchen. Die digitale Unterstützung verspricht eine Lösung für die aktuellen Herausforderungen, erfordert aber zugleich eine durchgängige Digitalisierung und Standardisierung innerhalb der Unternehmen und über die Unternehmensgrenzen hinweg. Der Einsatz von Elektrofahrzeugen bei allen Kooperationspartnern und gebündelte Hauptläufe sorgen zusätzlich für eine deutlich verbesserte Umweltbilanz.

Die grundlegende Idee des Forschungsprojektes war die Verbindung von Paket- und Medienlogistik und das simultane Lösen der Herausforderungen beider Branchen. Im Kern wurde sich auf die Kooperation als gemeinsamer Lösungsweg fokussiert. Die durchgängige Digitalisierung und Standardisierung innerhalb und über Unternehmensgrenzen hinweg liefert dafür die entscheidende Basis. Durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen bei allen Kooperationspartnern und durch gebündelte Hauptläufe wird zudem eine deutlich verbesserte Umweltbilanz realisiert. Ein wesentlicher Teil des Projektes war die großflächige Erprobung elektrischer Zustellfahrzeuge und die Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit dieser Fahrzeuge. Es wurden elektrische Kleintransporter sowohl auf der ersten als auch auf der letzten Meile eingesetzt und, unter Nutzung dieser, die elektromobile Paketlogistik im Kooperationsverbund realisiert.

Ein weiterer Aspekt des Vorhabens war die die Verbesserung des ökologischen Fußabdruckes innerhalb der Logistikkette. Eine moderne Logistik kann umweltfreundlich sein – trotz wachsenden Sendungsaufkommens und gesteigener Ansprüche der Kunden. Im Projekt erfolgte die Verringerung von Verkehren durch die Bündelung von Warenströmen und Zustellungen. Eine Senkung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes konnte des Weiteren durch den wechselseitigen Austausch von Sendungen und eine CO<sub>2</sub>-orientierte Tourenoptimierung für die eingesetzten Fahrzeuge erreicht werden. Neben dem Anspruch einer ökologischen Logistikkette galt es im Realbetrieb auch die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Einsatzkonzepte einer kooperativen Transportlogistik zu sichern. So wurde ein Konzept für eine aufwandsgerechte und transparente Vergütung der von den Kooperationspartnern erbrachten Leistungen entwickelt und erprobt.

Zur Sicherstellung einer für alle Beteiligten erfolgreichen Kooperation entstanden innovative Optimierungslösungen für die kosten- und CO<sub>2</sub>-optimale Zustellung von Paketen, die Erstellung unternehmensübergreifender Tourenpläne und die Bündelung unterschiedlicher Zustellstränge.

Das Projektkonsortium bestand aus insgesamt zehn Projektpartnern. Dabei handelte es sich um den IT-Systementwickler DAKO GmbH als Konsortialführer, der, zusammen mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena, für die Entwicklung der SML-Plattformlösung verantwortlich war. Dazu kommen sieben Logistikunternehmen: Fünf Mediengruppen aus den Ländern Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen sowie die Hauptlaufpartner UPS und OPTI-TRANS. Weiterhin die Fachhochschule Erfurt, die die Logistikunternehmen hinsichtlich ihrer praktischen,

prozessualen und modellierenden Arbeit begleitet hat. Ausgehend von wissenschaftlichen Analysen und Konzepten verwirklichten die beteiligten IT-Unternehmen und Forschungseinrichtungen die innovativen Prozess- und Softwaremodule. Die Logistikpartner brachten ihre Erfahrungen und Anforderungen in den Entwicklungsprozess ein und erarbeiten Prozesse sowie kooperative Einsatz- und Geschäftsmodelle mit dem Fokus auf den Einsatz elektrischer Zustellfahrzeuge. Parallel zu den Entwicklungsphasen wurden die neu entwickelten Systemkomponenten kontinuierlich getestet und so in die Praxis überführt und erprobt.

Die im Folgenden dargestellten Inhalte beziehen sich ausschließlich auf das Teilvorhaben SML-MODEL der Fachhochschule Erfurt. Die Ergebnisse des Gesamtvorhabens sind im Abschlussbericht des Konsortiums<sup>1</sup> sowie auf der Projektwebsite<sup>2</sup> verfügbar.

SMART MULTI-USE LOGISTIK war Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Forschungsprogramms „IKT für Elektromobilität: intelligente Anwendungen für Mobilität, Logistik und Energie“, in dem im Zeitraum 2016 - 2022 mehr als 20 Projekte mit ganzheitlichen Lösungskonzepten und beispielhaften Systemlösungen umgesetzt wurden. Im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten des Technologieprogrammes stehen auf IKT basierende Innovationen bei Fahrzeugtechnik, wirtschaftlichen Flotten- und Logistikkonzepten, Lade-, Kommunikations- und Plattformtechnologien sowie die Einbindung von Elektrofahrzeugen in intelligente Energie und Verkehrsnetze.

## 2 Teilvorhaben SML-MODEL der FH Erfurt

### 2.1 Aufgaben im Teilprojekt

Gesamtziele des Teilvorhabens *SML-MODEL - Entwicklung und Erprobung factorspezifischer Bewertungsmodelle mit Fokus auf gewinn- und CO<sub>2</sub>-orientierten Modellen im Kontext kooperativer Prozessketten* waren die Analyse und die Standardisierung von unternehmensübergreifenden kooperativen Prozessketten in der Paketzustellung, die Erweiterung des an der FH Erfurt bereits entwickelten Bewertungsmodells um die zur Preisbildung und Kostendeckung notwendigen Datenstrukturen und Funktionalitäten sowie die Entwicklung eines CO<sub>2</sub>-Erfassungs- und Prognosetools für den Fahrzeugeinsatz im Zustellprozess. Im Folgenden werden die Projektziele detailliert erläutert.

#### 2.1.1 Kooperative Prozessketten

Ziel war es einen detaillierten Überblick über die prozessualen Abläufe der Logistikpartner in den Vor-, Haupt- und -Nachläufen des Sendungstransportes zu gewinnen. Dadurch wurde die FH Erfurt in die Lage versetzt, gemeinsam mit den Logistikpartnern modularisierte und standardisierte Prozesse zu entwickeln und zu erproben, die die Basis für kooperative Prozessketten bildeten. Diese neuartigen Prozessketten wurden durch ein Framework aus bekannten und noch zu entwickelnden Multi-Use-Szenarien beschrieben, die ein unternehmensübergreifendes Teilen und Austauschen von Sendungsmengen zwischen unterschiedlichen Logistikunternehmen ermöglichten. Dies erforderte eine Neuorganisation und

<sup>1</sup> Vgl. (Projektkonsortium SMART MULTI-USE LOGISTIK (Hrsg.) 2024)

<sup>2</sup> Siehe: [www.sml-projekt.de](http://www.sml-projekt.de)

Planung einzelner Prozessbestandteile oder ganzer Sendungsläufe. Im Ergebnis wurden dadurch bisher unerschlossene Potentiale zur Produktivitätssteigerung zugänglich. Dies kann durch längere Einsatzzeiten der Fahrzeuge und durch eine effizientere Nutzung der existierenden Infrastruktur (bspw. effizientere Auslastung der Verteilzentren) positive auf die Produktivität wirken. Insbesondere durch eine Verlagerung der Sendungsverläufe auf Elektrofahrzeuge, deren Wirtschaftlichkeit durch die höhere Auslastung gesteigert wird, werden zusätzliche Potentiale erschlossen. Ziel war es überdies, die modularen Standardprozesse so auszugestalten, dass eine Übertragbarkeit in andere Unternehmen der Medien-, KEP- und Pharmalogistik sowie ggf. in weitere Logistikfelder ermöglicht wird. So können Ladungsverkehre insgesamt effizienter und damit ökologisch verträglicher gestaltet und gleichzeitig, durch Systematisierungsprozesse, Bündelungspotentiale generiert werden.

### **2.1.2 Erweitertes Bewertungsmodell**

Im thematisch vorangegangenen Projekt SMART DISTRIBUTION LOGISTIK wurde durch die FH Erfurt bereits ein Modell zur Kostenbewertung des Faktoreinsatzes auf Tagestourenebene und ein entsprechendes Experimentaldesign zur Erprobung des Bewertungsmodells entwickelt. Im Ergebnis steht ein Modell zur kosten- und leistungsseitigen Bewertung von logistischen Zustellprozessen in Abhängigkeit der verschiedenen Faktorenkombinationen zur Verfügung. Die innerhalb des Vorhabens angestrebte Kooperation in der Sendungszustellung zwischen unterschiedlichen Unternehmen erforderte eine Erweiterung des bestehenden Modells. Diese umfasste die kostentechnische Bewertung weiterer innerhalb der Transportkette bestehender Prozesse, wie den Transport, Kommissionierung und Zustellung der Sendung im Empfängergebiet. Zusätzlich musste ein Vergütungsmodell zwischen den einzelnen Kooperationspartnern entwickelt werden, das die durch den kooperativen Sendungsaustausch anfallenden Mehrkosten im Hauptlauf sowie in der Kommissionierung und Zustellung abbildet und einen Anreiz zur Teilnahme an dem kooperativen Sendungsaustausch schafft.

### **2.1.3 CO<sub>2</sub>-Erfassungs- und Prognosetool**

Ein notwendiger Schritt zur Reduktion der innerhalb der Zustellprozesse anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen ist die Bezifferung entsprechender Emissionen der bei den Logistikpartnern eingesetzten Zustellfahrzeuge und eine entsprechende Klassifikation der Fahrzeuge auf Basis praktischer und theoretischer Untersuchungen. Neben diesem wesentlichen Ziel des Teilvorhabens wurde darüber hinaus ein CO<sub>2</sub>-Prognosetool bzgl. der zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zustellprozess in Abhängigkeit des Fahrzeugeinsatzes entwickelt. Das CO<sub>2</sub>-Prognosetool dient der IKT-basierten Erfassung und Prognose der CO<sub>2</sub>-Emission der Sendungsverläufe (dynamisch) und wurde in enger Abstimmung mit den Logistikpartnern und dem Partner DAKO entwickelt. Ziel war es, eine übertragbare Herangehensweise zu ermitteln, die in Kombination mit den entwickelten kooperativen Prozessketten und dem erweiterten Bewertungsmodell die Optimierung des Fahrzeugeinsatzes im Hinblick auf die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen je Sendung ermöglicht. Gleichzeitig bietet die kombinierte Nutzung dieser Instrumente durch Logistikunternehmen das Potential die Wirtschaftlichkeit des (Elektro-)Fahrzeugeinsatzes zu steigern.

### 3 Stand der Wissenschaft und Technik

#### 3.1 Mehrfachnutzungsansätze

Elektrofahrzeuge spielen im Einsatz der Medien, Pharma- und KEP-Logistik insbesondere vor dem Hintergrund einer möglichen CO<sub>2</sub>-Bepreisung und/oder Einfahrverböten in Innenstädten eine zunehmend größere Rolle. Nachdem den intrinsischen technischen und organisatorischen Besonderheiten der Elektrofahrzeuge durch die Anpassung der logistischen Prozesse begegnet werden kann, besteht die Herausforderung im wirtschaftlichen Einsatz der Fahrzeuge. Die Problemstellung liegt dabei in den höheren Anschaffungskosten gegenüber konventionellen Fahrzeugen und dem davon abgeleiteten Bedarf einer hoch effizienten (mengenmäßigen und zeitlichen) Auslastung der Elektrofahrzeuge.

Die effiziente Auslastung kann mitunter nicht allein durch die Prozessanpassungen im jeweiligen Unternehmen erreicht werden. Eine mögliche Lösung bieten hierbei Mehrfachnutzungsansätze (sogenannte Multi-Use-Konzepte), bspw. durch die Vermittlung freier Transportkapazitäten. Die primäre Zielstellung bei der Weitergabe verfügbarer Kapazitäten ist die Vermeidung von teuren Leerfahrten und Standzeiten.<sup>3</sup> So können nach aktuellem Stand freie Transportkapazitäten einzelner Logistikunternehmen mithilfe von Frachtenbörsen an registrierte Portalmitglieder weitergegeben und zur Buchung angeboten werden. Diese web-basierten innovativen gewerblicher Logistikkonzepte basieren auf der erhöhten Markttransparenz durch online-basierte Dienstleistungen, gehen aber nicht über manuelle Einzelanwendungen (ohne automatische und systematische Abfragen) hinaus. Meist erfolgt dabei die Planung der prozessualen Abläufe durch die Logistikunternehmen statisch und ausschließlich optimiert für interne Zielsetzungen (bspw. pünktliche Lieferung und positive Bilanz des Sendungsversands). Eine dynamische und flexible Abstimmung mit potentiellen Kooperationsunternehmen zur Planung von Logistikprozessen erfolgt ist derzeit nicht bekannt. Die erschwert eine Vermittlung freier Transportkapazitäten. Ein Ansatz findet sich in der Bündelung urbaner Warenströme über einen zentralen Umschlagpunkt.<sup>4</sup> Hierbei bedarf es aber zusätzliche Infrastruktur (Verteilzentren in Innenstadtnähe) und ggf. weitere Unternehmen zur Sortierung und Vertrieb der Sendungen.

Im Projekt SMART DISTRIBUTION LOGISTIK wurden bereits erste Ansätze und zugehörige Geschäftsmodelle für Multi-Use-Szenarien identifiziert, die in die logistischen Prozesse der ausführenden Unternehmen integriert werden sollen. Die FH Erfurt hat diesbezüglich Transportketten der Logistikpartner und zugehörige Informationsflüsse analysiert sowie Matching-Algorithmen zur Verknüpfung von Transportketten entwickelt. Szenarien sind beispielsweise die Abendzustellung von Sendungen (Zustellung in den Abendstunden als ad-hoc-Belieferung von Endkunden in definierten Zeitfenstern) oder die Zustellung von Lebensmitteln unter Nutzung bestehender Elektrofahrzeuge. Es zeigte sich, dass die Vernetzung verschiedener Logistikfelder aufgrund unterschiedlicher Anforderungsprofile herausfordernd ist und die vorhandenen Mengen für den wirtschaftlichen Betrieb oft ungenügend sind. Insbesondere mitunter vollständig voneinander abweichende, prozessuale Abläufe verschiedener Unternehmen stehen einer Kooperation entgegen. Im beantragten Vorhaben ist es daher vorgesehen, eine neuartiges und kooperatives Multi-Use-Szenario zu entwickeln, welches den regionalen kooperativen Austausch von Sendungen zwischen den aus Prozessperspektive kompatiblen Medienlogistikunternehmen untereinander und in Kooperation mit KEP-Unternehmen im Zustellgebiet und auch überregional ermöglicht. Als Basis dienen hier

<sup>3</sup> Vgl. (Haasis, Holdorf und Röder 2015).

<sup>4</sup> Vgl. u.a. (Bauer und Bernecker 2018).

die von der FH Erfurt zu entwickelnden modularen und standardisierten Logistikprozesse, die auf die jeweiligen Bedürfnisse und Rahmenprozesse der Logistikfelder angepasst sind.

### 3.2 CO<sub>2</sub>-Bilanz von Elektrofahrzeugen

Bisher ist keine CO<sub>2</sub>-Bilanzierung einzelner, konkreter Sendungsläufe in Logistikprozessen mithilfe von CO<sub>2</sub>-Erfassungs- bzw. CO<sub>2</sub>-Prognosetools in der praktischen Anwendung bekannt. Dennoch wird die Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen derzeit umfassend diskutiert. Je nach Erhebungsmethodik und getroffenen Annahmen werden unterschiedliche Ergebnisse präsentiert.

Dabei sind bei der Bilanzierung der möglichen Umweltauswirkung verschiedener Antriebstechnologien und nicht nur Emissionen zu betrachten, die beim tatsächlichen Einsatz der Fahrzeuge entstehen. Stattdessen sind für eine vollständige Bilanzierung die Emissionswerte der gesamten Wertschöpfungskette inklusive aller Vorketten zu betrachten.

Den größten Einfluss auf die Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen haben die Batteriekapazität und der über die Betriebszeit verwendete Ladestrom. Insbesondere die Herstellung der Akkumulatoren ist sehr energieintensiv und sorgt für einen erheblich höheren Ausstoß von Treibhausgasen während der Produktion, als es bei vergleichbaren konventionellen Fahrzeugen der Fall ist.<sup>5</sup> Eine positive Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen kann sich daher nur über den minimalen Ausstoß von Emissionen über eine entsprechend lange Lebenszeit bzw. über eine entsprechende Fahrleistung ergeben. Dabei spielen zahlreiche Faktoren eine Rolle: Stromverbrauch pro Kilometer, Halte- bzw. Lebensdauer, Jahres-/Gesamtfahrleistung, Energiequelle des Ladestroms, Klima am Einsatzort etc. So konnte das International Council on Clean Transportation (ICCT) nachweisen, dass Elektrofahrzeuge über ihre Lebenszeit deutlich weniger CO<sub>2</sub> emittieren als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.<sup>6</sup> Die Durchschnittliche angenommene Nutzungsdauer von Elektrofahrzeugen liegt derzeit bei rund 13 Jahren.<sup>7</sup> Gleichzeitig konnte auch das Fraunhofer ISI feststellen, dass Elektrofahrzeuge bis zu 28 % weniger Treibhausgasemissionen ausstoßen als ein Oberklasse-Diesel und bis zu 42 % weniger als ein Kleinwagen-Benziner.<sup>8</sup> Noch stärker zeigt sich der Vorteil, wenn auch die Bereitstellungsvorketten einbezogen werden. In den beiden genannten Studien lag dabei die übliche (private) Nutzung der Fahrzeuge zugrunde. Nach einer endenergiebezogenen Analyse ergibt sich ein Energiebedarf von rund 42 kWh zur Herstellung von 6 l Dieselkraftstoff. Ein Elektrofahrzeug aus dem Segment der Kleinwagen kommt mit dieser Energie rund 200 km weit (Berechnung anhand von Verbrauchsmessungen des ADAC<sup>9</sup>).

Die genannten Studien konzentrieren sich bisher vorwiegend auf theoretische Ansätze und auf den Einsatz der Fahrzeuge außerhalb von Logistikanwendungen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden (theoretisch) erfasst und in ggf. in Studien gemessen. In der Praxis logistischer Prozesse findet dies aber, insbesondere mit Blick auf die Optimierung dieser Prozesse zur Reduzierung des Ausstoßes, keinen Einsatz. So kann einerseits durch die erhöhte Fahrleistung im Logistikeinsatz der Fahrzeuge sowie durch die im beantragten Vorhaben vorgesehene optimierte kooperative Auslastung der Zustellfahrzeuge von einer früher erreichbaren positiven Gesamtbilanz ausgegangen werden. Andererseits können durch den neuartigen Ansatz der dynamischen IKT-

<sup>5</sup> Vgl. u.a. (Agora Verkehrswende (Hrsg.) 2019).

<sup>6</sup> Vgl. (ICCT 2018).

<sup>7</sup> Vgl. u.a. (Wietschel, Kühnbach und Rüdiger 2019).

<sup>8</sup> Vgl. (Wietschel, Kühnbach und Rüdiger 2019).

<sup>9</sup> Vgl. (ADAC e.V (Hrsg.) 2017).

basierten Erfassung und Prognose der CO<sub>2</sub>-Emission der Sendungsverläufe die Emissionen im Zustellprozess in Abhängigkeit des Fahrzeugeinsatzes optimiert und reduziert werden.

### 3.3 Bewertungsmodelle

Das Fundament für Wirtschaftlichkeitsbewertungen bildet eine umfassende Erfassung und Strukturierung der Kosten- und Leistungsmerkmale der eingesetzten Produktionsfaktoren sowie der vorhandenen Eingangsgrößen und Datenquellen. Entsprechende Systematiken wurden auf Basis der im Produktionsmanagement verwendeten Strukturen<sup>10</sup> bereits im Projekt SMART DISTRIBUTION LOGISTIK entwickelt und werden für die neu zu entwickelnden kooperativen Prozesse entsprechend genutzt, bzw. diesbezüglich angepasst und erweitert.

Im zweiten Schritt werden die ermittelten Kosten- und Leistungsmerkmale der jeweiligen Faktoren zur Bewertung der Kosten und der Realisierbarkeit der jeweiligen Prozesse in Abhängigkeit der gewählten Faktorenkombination genutzt. Entsprechende Kostenfunktionen und ein Matching-Modell wurden hierzu bereits im Projekt SMART DISTRIBUTION LOGISTIK auf Basis vorhandener Kosten-Modelle entwickelt.<sup>11</sup> Dieses Modell ist jedoch bisher nur für einen unternehmensinternen Einsatz konzipiert und muss um entsprechende Komponenten, insbesondere im Matching-Modell, für den unternehmensübergreifenden Einsatz erweitert werden.

Auf der dritten Ebene sollen die bisher genutzten Kostenfunktionen zur Bewertung einer Tour mit darauf aufbauende Preisbildungsfunktionen zur gegenseitigen Vergütung ergänzt werden. Diese Betrachtung ist notwendig, da durch den Austausch bzw. die Übernahme externer Transportsendungen zusätzliche Kosten bei den Kooperationspartnern entstehen. Durch eine entsprechende Vergütung der Dienstleistungen kann der Mehrwert, der durch die Kooperation bietet, ermittelt und visualisiert werden, welcher letztendlich auch als Entscheidungsgrundlage für die zu entwickelte kooperative Logistikplattform dient. Auf Basis einer Profit- und Deckungsbeitragsrechnung können zudem notwendige Erlöse für einen preisbasierten Sendungsmarktplatz zum Austausch und Handel von Sendungen ermöglicht werden.

Bewertungsmodelle zur Gütebestimmung der Faktoreneinsätze insbesondere im Kontext kostendeckender kooperativer Prozesse fanden bisher keine Anwendung in Logistikprozessen der KEP-, Pharma- und Medienlogistik.

## 4 Zustellprozesse und Kooperationspotentiale in der Medienlogistik

### 4.1 Abgrenzung des Betrachtungsraums

Die Eingrenzung der relevanten Prozessabläufe erfolgte durch die Abgrenzung des Betrachtungsraums auf die Zustellprozesse der Medienlogistik- und auf den Hauptlaufprozess der Logistikunternehmen. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde eine Bestandsaufnahme der bisherigen Prozessketten durchgeführt, um Potentiale für Kooperationsmöglichkeiten zu identifizieren. Dazu wurden für die Zielstellung des Gesamtprojektes relevante Unternehmensabläufe im Rahmen von Prozessanalysen betrachtet und die Leistungsfähigkeit beurteilt. So konnten einerseits Erkenntnisse über Stärken und Schwächen der Abläufe im Hinblick auf mögliche Kooperationschnittstellen und andererseits ein fundiertes Verständnis

<sup>10</sup> Vgl. (Corsten und Gössinger 2016).

<sup>11</sup> Vgl. u.a. (Fiedler 2007); (Bruhn, Perseke und Vatterodt 2015); (Wittenbrink 2014).

über Prozesshaus, Prozessabgrenzungen, enthaltene Prozesslevel und Prozessbeteiligte aufgebaut werden.

#### 4.2 Relevante prozessuale Abläufe

Aufgrund der Auswirkungen der SARS-CoV-2-Pandemie und der damit verbundenen eingeschränkten Reisemöglichkeiten konnten eine vor Ort Aufnahme der Prozesse nicht wie geplant durchgeführt werden. Stattdessen erfolgte die Durchführung von mehreren Online-Terminen mit jedem Medienlogistikunternehmen sowie mit den Partnern UPS und OPTI-TRANS. Hierbei erfolgte auf Basis einer von der FH Erfurt erstellten Vorlage vorab die Zuarbeit der Prozesse durch die Logistikpartner. Eine detaillierte und gemeinsame Analyse der einzelnen Unternehmensabläufe erfolgte anschließend in den Online-Terminen. Ein vor-Ort-Termin konnte lediglich mit UPS realisiert werden, wobei die grundlegenden Prozessschritte erläutert wurden. Die Detaillierte Auseinandersetzung mit den Abläufen erfolgte auch hier in Online-Terminen. Bei genauer Betrachtung der Prozessbeschreibungen aller Partner zeigen sich potentielle Kooperationschnittstellen vor allem im Übergang der Pakete vom Zustell- bzw. Abholprozess des Medienlogistikunternehmens zum Transport im Hauptlauf durch die Logistikpartner UPS und OPTI-TRANS. Bereits in einer frühen Projektphase zeigte sich der Aufbau eines gemeinsamen Hauptlaufs als sinnvoll.

#### 4.3 Prozessketten und potentielle Kooperationschnittstellen

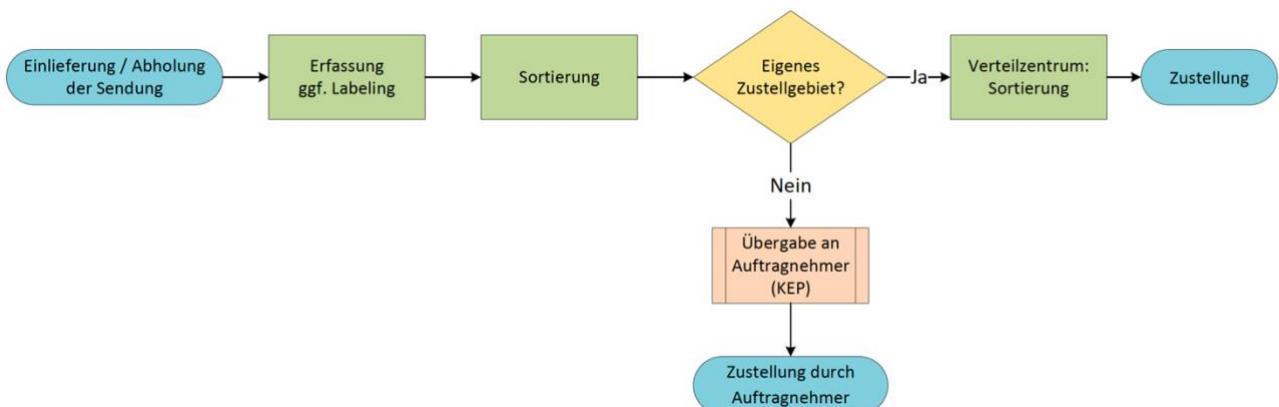


Abbildung 1: Vereinfachter Prozess der Paketzustellung bei den betrachteten Medienlogistikunternehmen.

Der Prozess der Paketzustellung ist bei den betrachteten Medienlogistikunternehmen sehr ähnlich. Grundsätzlich erfolgt in einem ersten Schritt die Einlieferung bzw. Abholung der Paketsendungen. Die Sendungen werden im nächsten Schritt im Sortierzentrum erfasst und, sofern noch nicht durch den Kunden erfolgt, mit einem Transportlabel mit Bar- oder QR-Code versehen. Das Labeling ist dabei nur dann notwendig, wenn das Paket durch den Kunden handschriftliche adressiert wurde. Bereits im Zuge der Erfassung oder nach der Sortierung erfolgt die Feststellung, ob die Zieladresse innerhalb des Zustellgebietes des Medienlogistikunternehmens liegt. Bei einer Zieladresse außerhalb des Zustellgebietes erfolgt die Übergabe des Paktes an einen externen Dienstleister (KEP), welcher die Zustellung übernimmt. Bei einer Paketzustellung innerhalb des Zustellgebietes erfolgt im Verteilzentrum die Sortierung und Disposition der Paket auf entsprechende Zustelltouren. Die Abbildung 1 gibt einen Überblick über den beschriebenen vereinfachten Prozess der Paketzustellung.

#### 4.4 Zustellbereiche und Sendungsaufkommen

In Betrachtung der im Projekt beteiligten Partner konnte für die kooperative Paketzustellung ein Gesamt-Zustellbereich definiert werden. Dabei handelt es sich im Einzelnen um die Zustellbereiche der beteiligten Medienlogistikunternehmen. Im Folgenden wird dieses Gebiet auch als SML-Zustellgebiet bezeichnet und bezieht sich im Wesentlichen auf die Bundesländer Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt. In Erweiterung dieses Gebietes ist durch die deutschlandweit tätigen Partner UPS und FUNKE sowie auch über die hinter weiteren Partnern stehenden Muttergesellschaften auch eine deutschlandweite Zustellung denkbar. Der Fokus des Projektes lag jedoch auf dem SML-Zustellgebiet, welches in Abbildung 2 dargestellt wird.

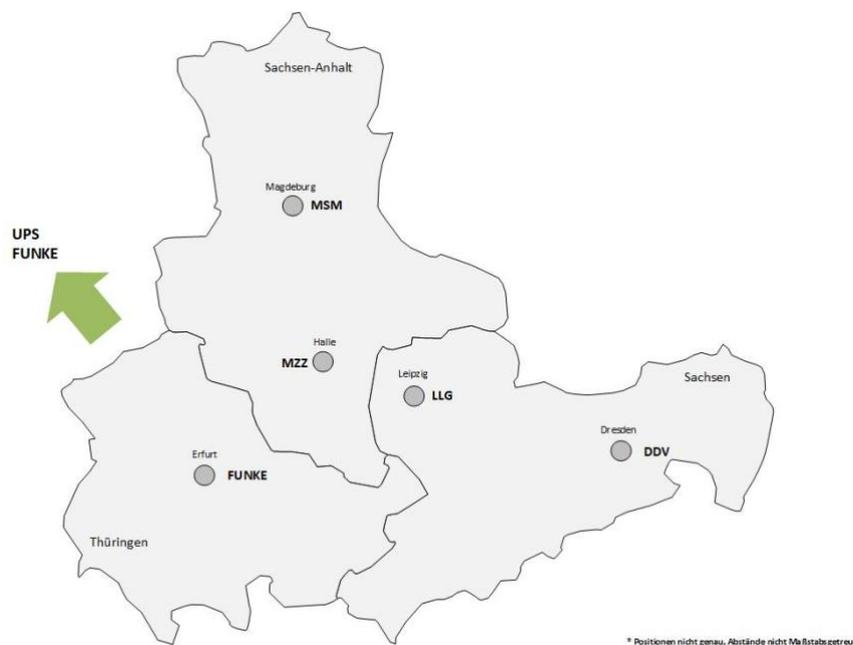


Abbildung 2: SML-Zustellgebiet.

#### 4.5 Kooperationspotentiale

Die Ableitung der untersuchungsrelevanten Potentiale erfolgte auf Basis des Sendungsaufkommens der jeweiligen Partner. Die Abbildung 3 zeigt exemplarisch das Sendungsaufkommen eines beteiligten Medienlogistikunternehmens im Paketbereich innerhalb des SML-Zustellbereiches im Jahr 2019. Dabei wurde jeweils nach Sendungen auf Zieladresse im eigenen Zustellgebiet des entsprechenden Partners und nach Zieladressen im restlichen SML-Zustellgebiet differenziert.

Insgesamt wurde im Jahr 2019 rund ein Drittel des Sendungsaufkommen aller Partner, das im SML-Zustellgebiet angefallen ist, nicht in dem eigenen Zustellgebiet ausgeliefert. Das betraf insgesamt 76.269 Sendungen. Bei allen Medienlogistikunternehmen, die den Paketversand schon länger als ein Jahr durchführen, ist zudem ein Anstieg der Paketmengen zu verzeichnen. Hieraus lässt sich ein hohes Potential für die im Projekt angedachte Kooperative Zustellung ableiten.

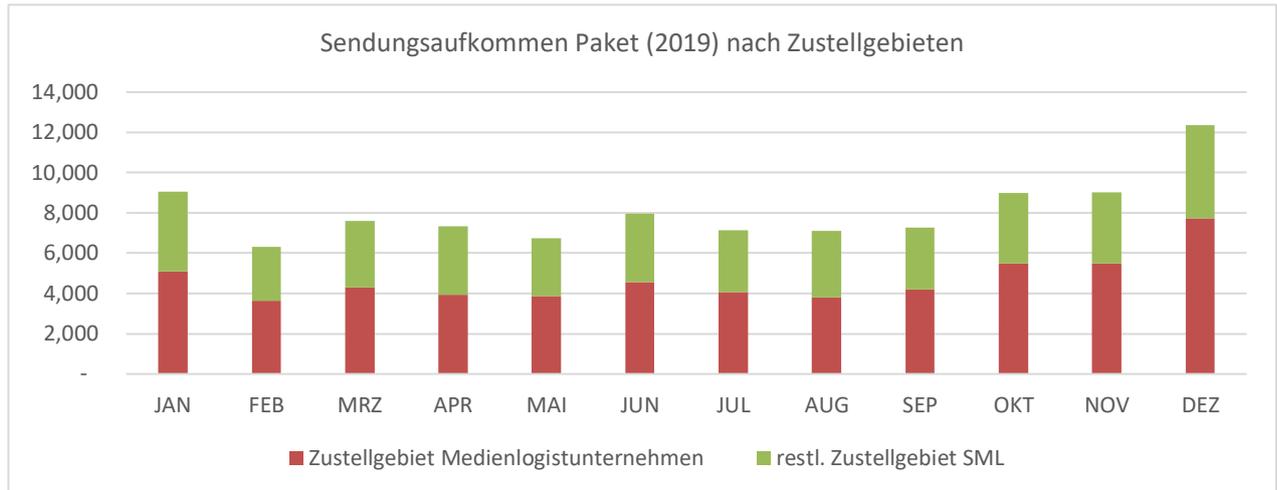


Abbildung 3: Sendungsaufkommen im SML-Zustellgebiet, exemplarisch für einen Partner.

#### 4.6 Matching-Kriterien

Zur Ableitung der Matching-Kriterien für die angedachte Kooperation erfolgte ein Abgleich der AGB sowie sonstiger Bestimmungen für den Transport und die Zustellung von Paketen. Dabei wurden die Anforderungen der jeweiligen Logistikpartner miteinander verglichen und visualisiert. Insgesamt konnten aus den Zustellbestimmungen, unabhängig von den organisatorischen Anforderungen an die Kooperation, wesentliche Kriterien abgeleitet werden (s. Tabelle 1). Hierfür mussten zur Umsetzung des Paketaustausches einheitliche Vorgaben entwickelt werden.

<b>Matching-Kriterien (Allgemein)</b>
Zoll (Zollabfertigung)
Paketgröße
Sonderservice, bspw.: Kühlung, Zustellung am Arbeitsplatz, Expressversand, Nachnahme, Preisbildung, Gefahrgut Kleinstmengen
Zustellung, bspw.: Abstellgenehmigung, Laufzeit, Zweiter Zustellgang
Unzustellbare Sendungen
Haftung, bspw.: bei Verlust oder Beschädigung, Höchstbetrag, Höherhaftung
Zahlung der Leistung durch Absender, bspw.: Rechnung, Zahlungsverzug, Vorauszahlung

Tabelle 1: Aus den Zustellbestimmungen abgeleitete Matching-Kriterien.

Die endgültige Abstimmung zu Vereinheitlichung erfolgte auf konsortialer Ebene unter den entsprechenden Projektpartnern. Hierzu wurde zudem ein Service-Level-Agreement geschlossen. Detaillierte Informationen dazu finden sich in den Berichten der Logistikpartner.

## 5 Modulare Standardprozesse für kooperative Prozessketten

### 5.1 Standardisierung der Prozessmodule

Zur Entwicklung und Erprobung von vorteilsquantifizierbaren modularen Standardprozessen für kooperative Prozessketten mussten zunächst verwandte Prozesssegmente auf Basis der Prozessanalyse abgeglichen und im nächsten Schritt Prozessmodulen bei den untersuchungsrelevanten Prozessen abgeleitet werden. Dies erfolgt in enger Zusammenarbeit mit den Logistikpartnern und auf Basis der in Kapitel **Error! Reference source not found.** dargelegten Projektergebnisse. In einem iterativen und partnerübergreifenden Prozess hat sich der gemeinsame Hauptlaufprozess besonders geeignet herausgestellt.

Der bereits in Kapitel **Error! Reference source not found.** beschriebene vereinfachte Prozess der Paketzustellung wird dabei um einen Prozessschritt erweitert. Nach der Erfassung und Sortierung der Paketsendungen erfolgt die Prüfung und Entscheidung, ob sich die Zieladresse innerhalb des partnerübergreifenden SML-Zustellgebietes befindet. Ist dies nicht der Fall erfolgt die Vergabe der Sendung, wie auch zuvor, an ein Dienstleistungsunternehmen, welches die Zustellung durchführt. Liegt die Zieladresse innerhalb des SML-Zustellgebietes, erfolgt die Prüfung, ob die Zieladresse auch innerhalb des Zustellbereiches des Medienlogistikunternehmens liegt, in dem das Paket Eingang in den Prozess fand. In diesem Fall erfolgt, wie auch zuvor, die entsprechende Zustellung durch den Partner, bei dem die Einlieferung erfolgt ist. Befindet sich die Zieladresse innerhalb des SML-Zustellgebietes aber nicht innerhalb des Zustellgebietes des annehmenden Medienlogistikunternehmens, erfolgt die Übergabe der Sendung in den gemeinsamen SML-Hauptlauf und die anschließende Zustellung im Gebiet eines SML-Partners. Die Abbildung 4 verdeutlicht den erweiterten Prozess der Paketzustellung.

Abhängig vom jeweiligen Medienlogistikunternehmen ergeben sich dabei verschiedene Möglichkeiten des Zugangs zum gemeinsamen Hauptlauf. Die Durchführung des Hauptlaufs erfolgte durch UPS oder durch OPTI-TRANS. Dabei war die Wahl des Hauptlaufs abhängig von verschiedenen Kriterien:

- Standorte der Medienlogistikunternehmen (Quelle und Senke)
- Transportweg der Sendungen zum Logistikpartner UPS und OPTI-TRANS
- Vereinbarkeit der Prozesse der Medien- und der Logistikpartner UPS und OPTI-TRANS, insbesondere Zeitpunkt und Abschluss der Sortierung
- Ein- und Ausgangszeiten der Logistikpartner UPS und OPTI-TRANS
- Geplante und erforderliche Laufzeiten der Sendungen

Insbesondere die zeitliche Vereinbarkeit der Prozesse und die daraus resultierenden Laufzeiten stellen eine Herausforderung dar. Oftmals gibt es im Zuge der Vertriebsstrategie der Medienlogistikunternehmen klare Vorgaben bezüglich der maximalen Laufzeit einer Paketsendung, wodurch Prozessketten mit Laufzeitverlängerung i.d.R. ausgeschlossen wurden.

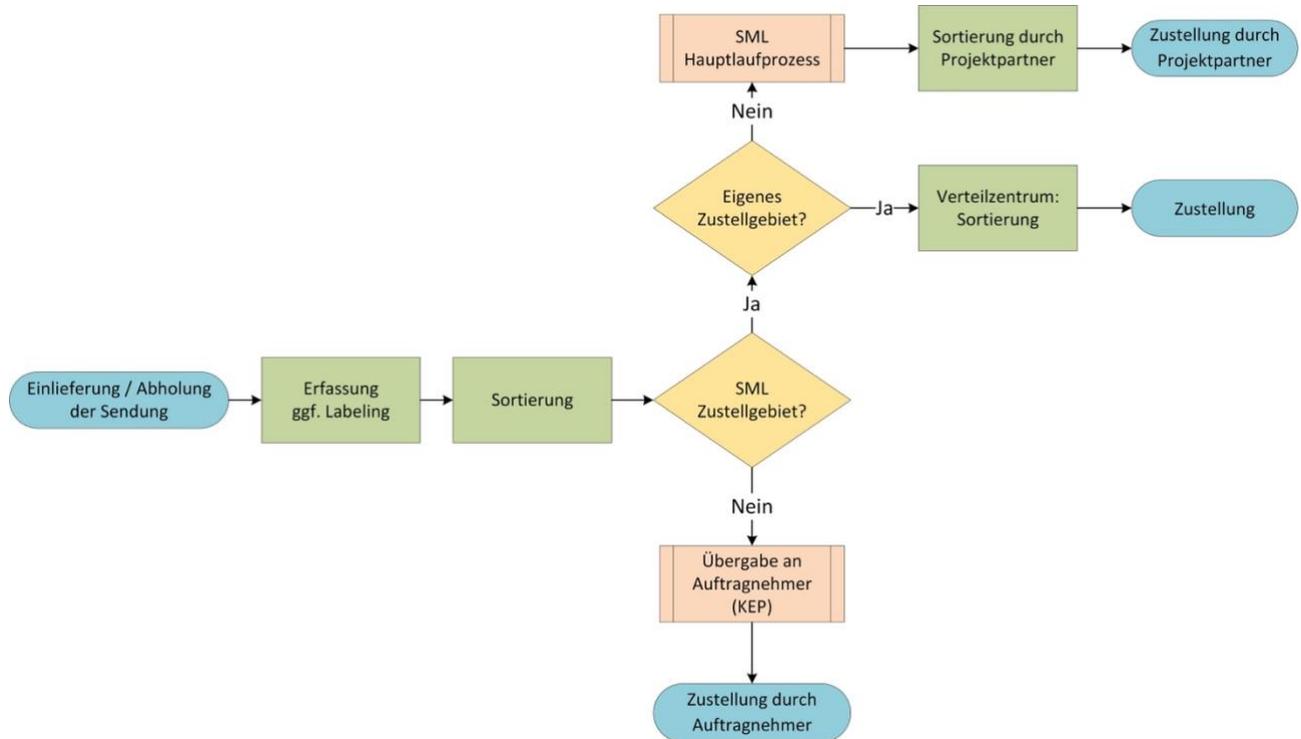


Abbildung 4: Vereinfachter Prozess der Paketzustellung bei den betrachteten Medienlogistikern mit SML-Hauptlauf.

## 5.2 SML-Hauptlauf

Der Hauptteil der SML-Sendungen wurden über die Transportprozesse der Logistikpartner UPS und OPTI-TRANS abgewickelt. Hierbei konnte insbesondere auf die bestehenden Netze von UPS-Centern und die bestehenden Prozesse zurückgegriffen werden. Die SML-Paketsendungen wurden dabei vom jeweiligen Start-Medienlogistikunternehmen an einem der UPS-Center in den Transportprozess eingebracht. Der Transport zum UPS-Center des Zustellgebietes erfolgte dann im Rahmen des Hauptlaufes. Der Transport zwischen Ziel-UPS-Center und Sortierzentrum des Ziel-Medienlogistikunternehmens erfolgte anschließend individuell in Abhängigkeit der spezifischen Prozesse vor Ort.

Die Sortierung der Paketsendungen und der eigentliche Transport wurden in diesem Fall durch UPS durchgeführt. Voraussetzung für den Transport durch UPS war neben der rechtzeitigen Verfügbarkeit der Paketsendungen und der Erfüllungen der Transportbestimmungen von UPS ein einheitliches Label. Die Entwicklung dieses Labels erfolgt federführend durch den Projektpartner DAKO.

Neben einem zeitlichen Vorteil im Gesamtprozess ist durch die Nutzung der UPS-Transportketten auch eine Skalierung des SML-Systems auf weitere (Medien-)Logistikdienstleister denkbar. Bei entsprechend abgestimmten Prozessen ließen sich leicht weitere Medienlogistikunternehmen an den Hauptlauf-Prozess anschließen und damit das SML-Zustellgebiet erweitern.

Eine Besonderheit ergab sich beim Pakettransport zwischen den Standorten der Partner MZZ (Halle) bzw. LLG (Leipzig) und dem Projektpartner FUNKE (Erfurt). Hier konnte auf den Hauptlaufprozess von OPTI-TRANS zurückgegriffen werden. Der Vorteil lag vor allem in der zeitlichen Konformität der Eingangszeiten und der damit kürzeren Laufzeit auf dieser Strecke.

Eine weitere Besonderheit ergab sich beim Sendungstransport zwischen den Partnern MZZ (Halle) und MSM (Magdeburg). Hier wurde aufgrund der räumlichen Nähe ein bilateraler Austausch der Paketsendungen auf bestehenden Touren für den Austausch von Postsendungen erprobt. Dabei wurden Paketsendungen mit Zieladressen im jeweils anderen Zustellgebiet direkt zwischen den Verteilzentren dieser Partner ausgetauscht.

Die Abbildung 5 zeigt die Standorte der Projektpartner und die erprobten Hauptlaufvarianten im Überblick.

Ein Überblick über die Prozessschritte des Hauptlaufes sowie des Vor- und Nachlaufes beim Start- bzw. Ziel- Medienlogistikunternehmen gibt die Abbildung 6 als stilisierte Gesamtdarstellung der Prozesse. Diese bildete die Grundlage für die partnerspezifische kooperative Paketlogistik und stellt damit eines der zentralen Ergebnisse des Teilprojektes dar.

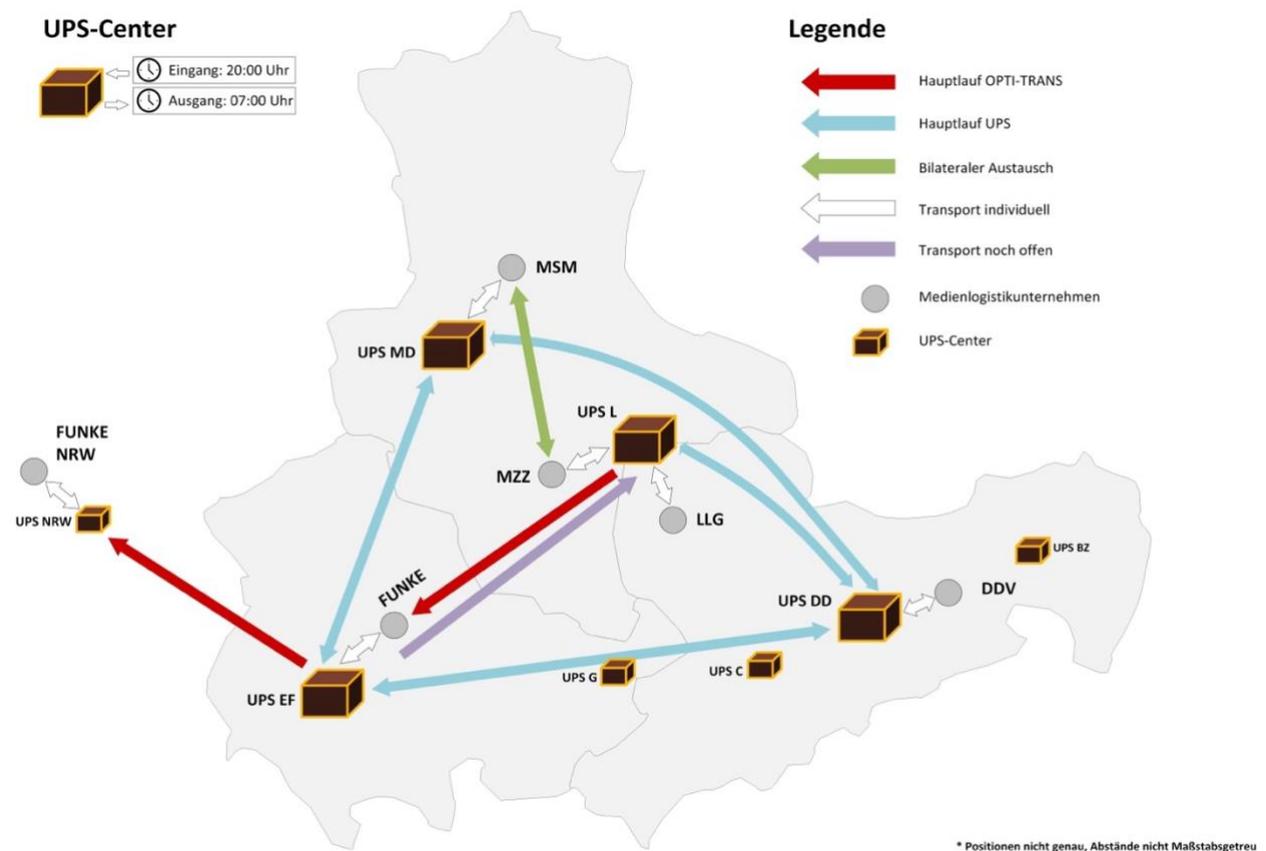


Abbildung 5: Hauptlaufvarianten im Überblick

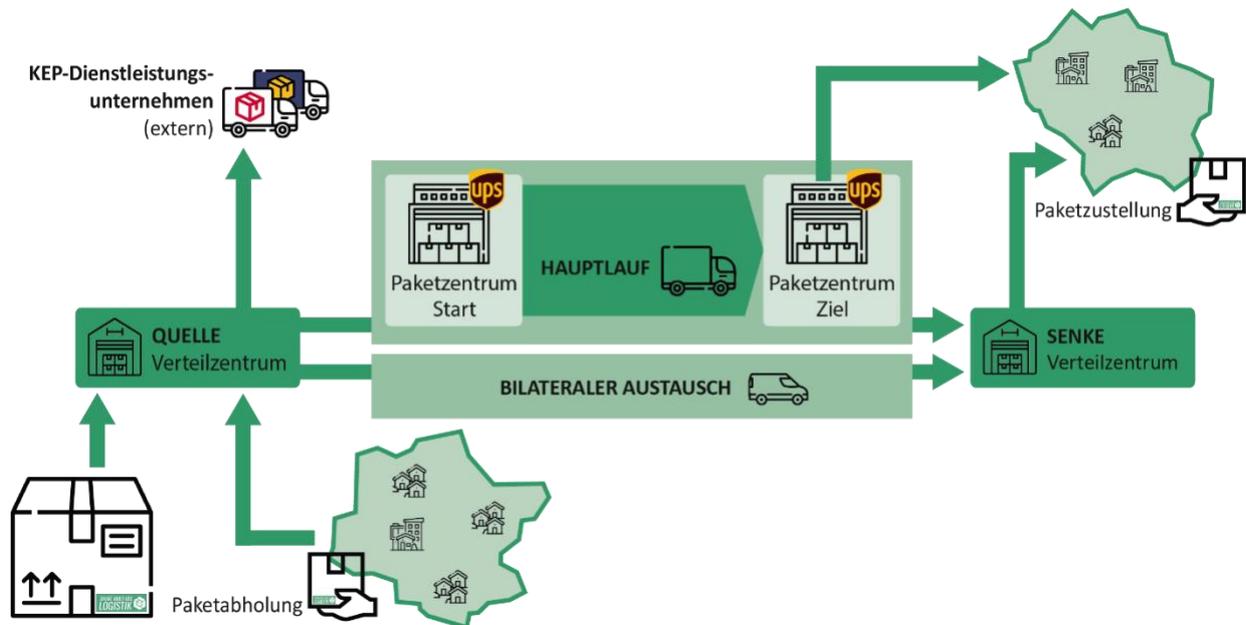


Abbildung 6: Kooperative Paketlogistik im Projekt SML - stilisierter Hauptlaufprozess.

### 5.3 Standardprozess zum kooperativen Paketaustausch

Die individuellen Zustellversprechen der jeweiligen Medienlogistikunternehmen und unternehmensintern festgelegte Prozesse stellten sich als Herausforderung im Projekt dar, die die Umsetzung des im Projekt entwickelten theoretischen Standardprozesses erschweren. Daher wurde innerhalb des Konsortiums mit dem stilisierten Hauptlaufprozess (vgl. Abbildung 6) eine entsprechend kulante Lösung entwickelt, die eine umfassende Implementierung der individuellen Prozesse ermöglicht.

In der Folge ergeben sich bei den jeweiligen Logistikpartnern, die an den Hauptlauf angeschlossen wurden, prozessorale und zeitliche Abweichungen vom theoretischen Standardprozess. Vollständig vereinheitlichte Prozesse bei unterschiedlichen Unternehmen sind ein rein theoretischer Ansatz. Die Unternehmensprozesse gliedern sich in jeweils individuelle Prozessstrukturen mit zahlreichen Vorgängen, unterschiedlichem Vernetzungsgrad und mit spezifischen Abhängigkeiten, bspw. von Kernprozessen. Dennoch konnten jeweils individuelle Lösungen gefunden werden, die eine Prozessstandardisierung weit genug ermöglichen, so dass im Projekt SML eine gemeinsame Paketlogistik abgebildet werden konnte. Der entwickelte Standardprozess zum kooperativen Paketaustausch liefert dafür die entscheidende Grundlage. An dieser Stelle soll die Umsetzung der Eigenzustellung von Paketen beim Logistikpartner FUNKE herausgestellt werden. Das Medienlogistikunternehmen führte zum Projektstart noch kein eigenes Paketangebot im Zustellgebiet Erfurt. Entsprechende Prozesse mussten für die Umsetzung der Projektidee SML erst aufgebaut und unternehmensintern abgestimmt werden. Der Aufbau völlig neuer Abläufe bei Funke wies insbesondere den Vorteil einer direkten und prädisponierten Abstimmung mit den geplanten Folgeprozessen des Hauptlaufes auf. Die Entwicklung der Prozesse zur Eigenzustellung bei Funke erfolgte auf Basis, der im Konsortium entwickelten, theoretischen Standardprozesse und bezieht den künftigen Anschluss an den Hauptlaufprozess bereits mit ein. Weitere Informationen hierzu finden sich im Abschlussbericht des Projektpartners FUNKE. Der Projektpartner wurde zudem bei der Einführung der

Eigenzustellung von der FHE unterstützt. Zudem wurde die Anbindung an den Hauptlaufprozess auch bei anderen Projektpartnern durch die FH Erfurt unterstützt.

Zudem wurde als weiterer Umsetzungsschritt und als erster Test der kooperativen Paketlogistik der bilaterale Paketaustausch mithilfe der vom Projektpartner DAKO entwickelten Systemsoftware zwischen den Projektpartnern MSM und MZZ implementiert und begleitet.

#### 5.4 Bilaterale Austauschwege

Eine Erweiterung des entwickelten Hauptlaufprozesses an geeigneter Stelle um einen individuellen bilateralen Austausch ist aus mehreren Gründen sinnvoll. Damit kann ein direkter Austausch zwischen geografisch angrenzenden Logistikunternehmen realisiert werden, der die Transportwege verkürzt und somit eine vermeidbare Verlängerung der Laufzeit und den Ausstoß von Treibhausgasen pro Sendungen minimiert. Dieser Ansatz wurde im Projekt bereits zwischen den Partnern MSM und MZZ erprobt. Darüber hinaus wird durch einen direkten Austausch von Sendungen eine redundante Rückfallebene geschaffen, die nicht zwingend auf den Hauptlaufprozess angewiesen ist und somit den Transport von Sendungen im Falle von netzwerkübergreifenden Störungen aufrechterhalten kann, vgl. Abbildung 7.

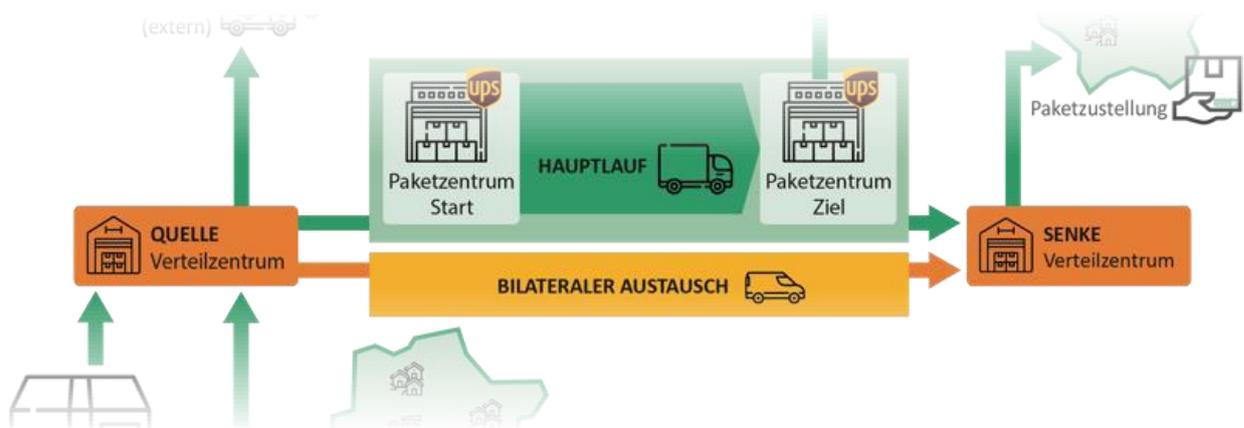


Abbildung 7: SML-Hauptlauf mit bilateralen Austausch (orange)

Zur Feststellung weiterer Relationen mit bilateralem Austauschpotential erfolgte eine iterative Abstimmung mit allen Logistikunternehmen. Dabei wurden konkrete Tourdaten (Start, Ziel, Zeiten), die eingesetzten Fahrzeuge sowie auf diesen Touren ggf. freie Transportkapazitäten erfasst. In einer begleitenden Untersuchung wurde außerdem das entwickelte Bewertungsmodell der FHE eingesetzt, um Einnahme- & Verteilungsmodelle zu identifizieren.

Im Ergebnis haben sich zahlreiche Touren gezeigt, die Potential für einen bilateralen Austausch zwischen den Logistikunternehmen aufweisen und entweder von diesen selbst realisiert oder von externen Unternehmen durchgeführt werden können, vgl. Abbildung 8 links.

Die Ergebnisse dieser Auswertung zeigen jedoch, dass der bilaterale Austausch keine ausschließliche Alternative zum Hauptlauf bietet, da längere Transportwege nicht abgebildet werden können. Auch ein schrittweiser Transport ist nicht praktikabel, da zusätzliche Prozessschritte sowie individuell unterschiedliche Prozesszeiten die Laufzeit deutlich verlängern würden. Hinzu kommt eine fehlende Skalierbarkeit bei größer werdenden Sendungsmengen

aufgrund damit verbundener begrenzter Sortierkapazitäten für Pakete der Logistikunternehmen. In Betrachtung der individuellen Partnerprozesse kann der bilaterale Austausch damit lediglich eine lokale Ergänzung zum Hauptlauf darstellen und muss partnerindividuell geprüft und umgesetzt werden.

Für eine Weiterführung bzw. Skalierung des Netzwerkes und insbesondere für eine Geschäftsmodellentwicklung ist der Ansatz des bilateralen Austausches eher ungeeignet. Hier sind eher die Touren interessant, bei denen Netzwerkpartner der Logistikunternehmen einbezogen sind, die sowohl geografisch und organisatorisch außerhalb des Projektes liegen, vgl. Abbildung 8 rechts. So gibt es bspw. Relationen einiger Partner auch zu Postnetzwerken wie mailalliance und P2, bei denen ebenfalls der entwickelte Standardprozess Anwendung finden

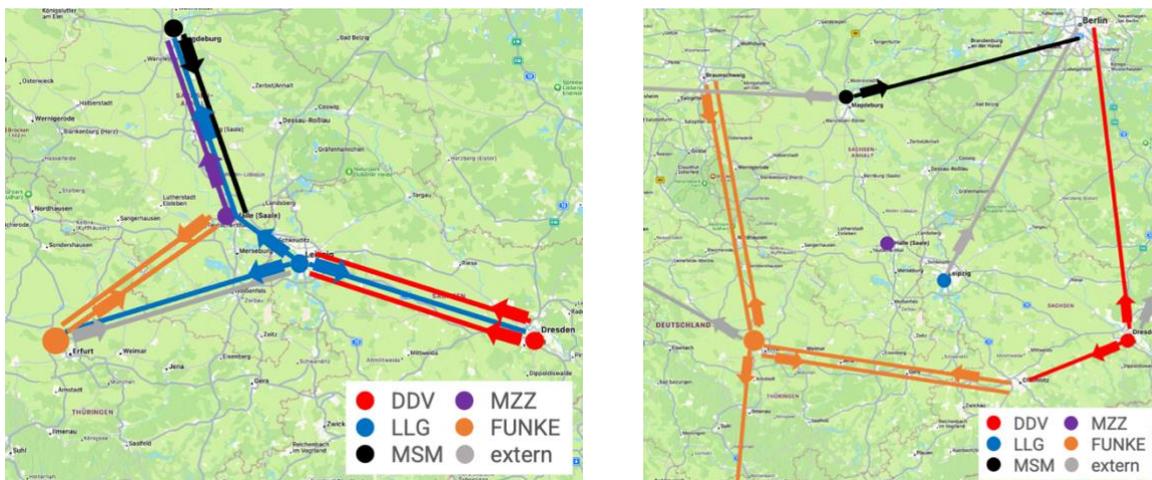


Abbildung 8: Relationen innerhalb des SML-Netzwerkes und darüber hinaus.

kann.

## 6 Bewertungs- und Vergütungsmodell

### 6.1 Bewertungsmodell zur Ermittlung der Prozesskosten

#### 6.1.1 Kostenrelevante Prozesse

Wesentliche Kriterien zur Ermöglichung kooperativer Austauschprozesse in der Paketzustellung sind die hierbei anfallenden Kosten im Haupt- und Nachlauf bei den externen Logistikpartnern und die diesen gegenüberstehenden zu erzielenden Erlöse. Innerhalb der kooperativen Transportkette werden je nach Prozessschritt unterschiedliche Akteure mit den jeweils im Prozessschritt anfallenden Kosten belastet. Zur Ermittlung der Paketkosten vom Versender (Quelle) zum Empfänger (Senke) wurden zunächst alle kostenrelevanten Prozesse innerhalb des in Kapitel 5 entwickelten standardisierten Austauschprozesses erfasst und strukturiert, um entsprechende Kennzahlen abzuleiten. Das Ergebnis ist das in Abbildung 9 dargestellte Prozessdiagramm.

Die Prozessschritte ließen sich hierbei grob in zwei Klassen unterteilen. Zum einen die sogenannten *netzwerkirrelevanten Prozesse* bei jedem Logistikunternehmen, die aus der Abholung von Paketen in der eigenen operativen Region sowie der Übergabe von nicht-netzwerkfähigen Sendungen, d.h. Sendungen, die außerhalb des vom Projektkonsortium abgedeckten Zustellbereichs liegen, an externe KEP-Dienstleister bestanden. Die Kosten der

netzwerkirrelevanten Prozesse haben keinen direkten Einfluss auf die gegenseitige Vergütung der Transportdienstleistungen. Allerdings lieferten die Kosten der Ausspeisung von Paketen an die externen KEP-Dienstleister der Projektpartner eine obere Schranke bzw. Preisbenchmark für das zu entwickelnde Vergütungsmodell, da zu erwarten war, dass Pakete nicht in das Netzwerk eingespeist werden würden, wenn dies mit höheren Kosten einher geht.

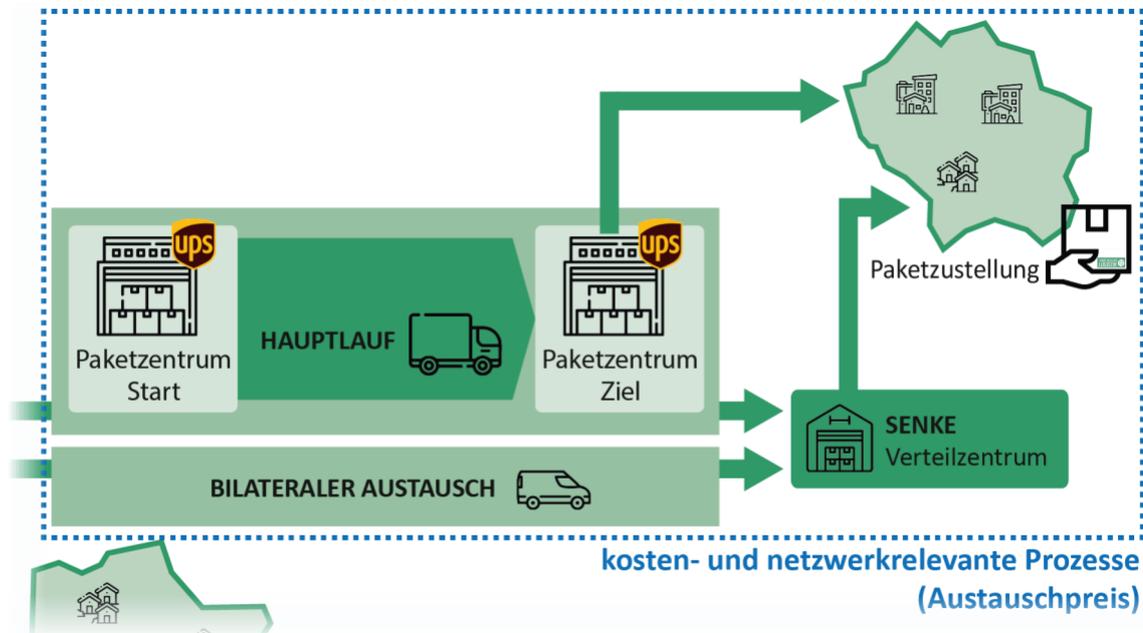


Abbildung 9: Übersicht der kostenrelevanten Prozesse in der Paketzustellung

Die zweite Klasse bildeten die sog. *netzwerkrelevanten Prozesse*, die aus der Paketkommissionierung im Aus- und Eingang, dem Hauptlauf bzw. dem bilateralen Paketaustausch sowie der Paketzustellung bestehen. Eine Besonderheit bildete hierbei die Paketkommissionierung, da diese innerhalb der Transportkette sowohl im Verteilzentrum der Sendungsquelle als auch im Verteilzentrum der Sendungssenke erforderlich war. Für das Vergütungsmodell musste nur letzteres berücksichtigt werden, da dies eine kooperative Dienstleistung darstellte.

Die Kennzahlenmodelle zur Bewertung der netzwerkrelevanten Prozessschritte *Kommissionierung im Verteilzentrum* und *Zustellung* werden im Folgenden näher beschrieben. Für den Hauptlauf wurden seitens der Hauptlaufpartner entsprechende Preismodelle zugearbeitet.

### 6.1.2 Kennzahlenmodell für die Paketkommissionierung

Der Kommissionierungsprozesses im jeweiligen Verteilzentrum besteht bei den untersuchten Medienlogistikern aus den in Abbildung 10 dargestellten vier Schritten, wobei der zweite Schritt *Paket Erfassung und Registrierung*, abhängig davon, ob das Paket bereits im System erfasst ist, unterschiedliche Arbeitsschritte aufwies.



Abbildung 10: Prozesse in der Paketkommissionierung

Für die Ermittlung der Paketstückkosten im Kommissionierungsprozess wurde ein für alle Projektpartner standardisiertes, TCO-basiertes Kostenmodell entwickelt. Dies umfasste alle Eingangsgrößen zur Berechnung der Kommissionierungskosten, insbesondere die Erfassung von Prozesszeiten zur Ermittlung von Personalkosten, Paketmengen sowie die strukturierte Erfassung aller anfallenden Kosten in den einzelnen Arbeitsschritten und entsprechender Gemeinkosten. Als Ergebnis entstand ein Excel-Tool zur Berechnung der durchschnittlichen Paketstückkosten.

Die Paketstückkosten wurden über die gesamte Projektlaufzeit monatlich aktualisiert und verglichen, um entsprechende dynamische Veränderungen sichtbar zu machen und in der Preisbildung berücksichtigen zu können. Zusätzlich wurde eine Analyse der Prozesszeiten bzgl. vorhandener (zeitlicher) Unterschiede an unterschiedlichen Standorten durchgeführt, um ggf. vorhandene Optimierungspotentiale zu evaluieren.

### 6.1.3 Kennzahlenmodell für die Paketzustellung

Zur Ermittlung der jeweiligen Kosten, insbesondere des Mehraufwandes für Austauschpakete, im Nachlauf wurde in enger Zusammenarbeit mit den Logistikpartnern, die in Abbildung 11 dargestellte Methodik entwickelt.

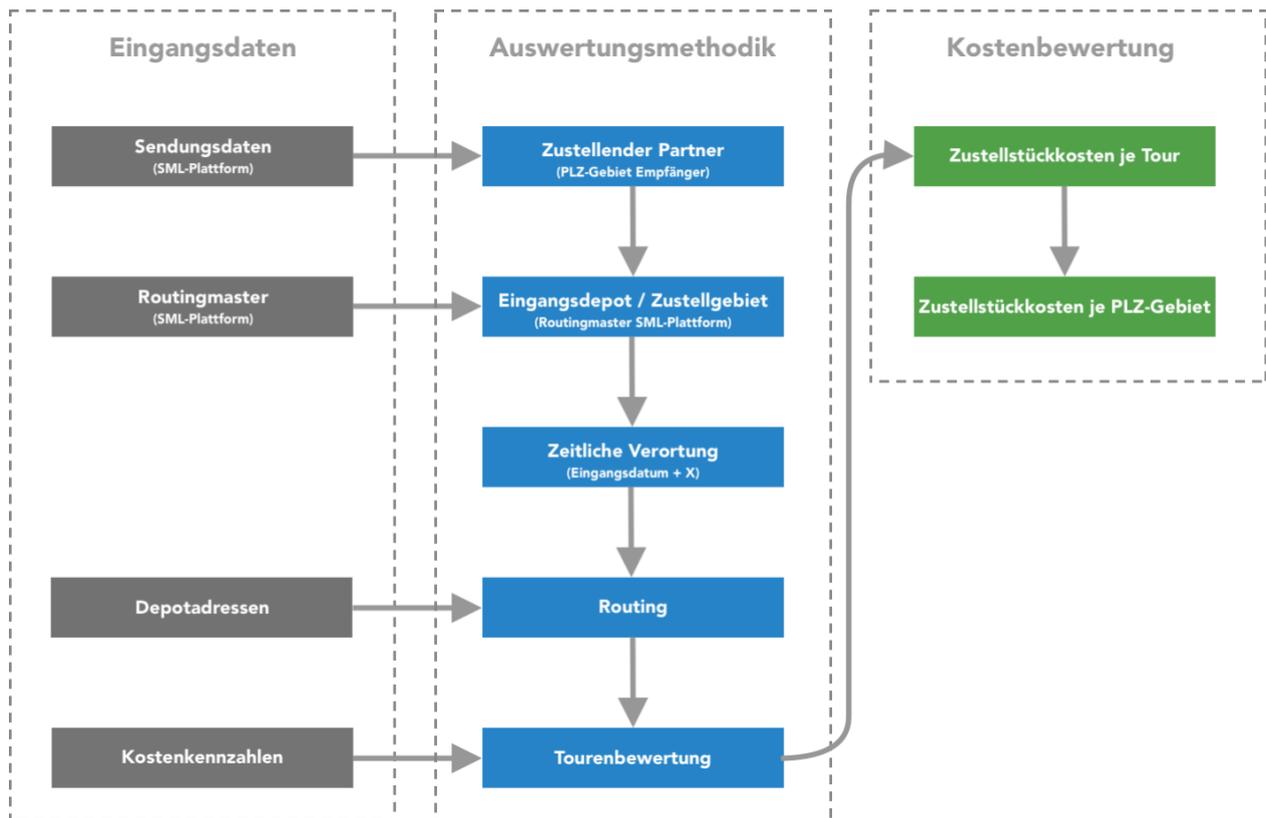


Abbildung 11: Ermittlung der Zustellstückkosten im Nachlauf

Ausgangspunkt bildeten die in der SML-Plattform gesammelten Sendungsdaten der Medienlogistiker für den Zeitraum 01.01.2022 bis 31.12.2022. Die Auswertung erfolgte aufgrund bereits erfolgreich etablierter Zustellprozesse in den Zustellgebieten der Medienlogistiker MSM und MZZ und umfasste insgesamt 155.389 Sendungen, davon 39.705 Austauschpakete.

Die entsprechenden Sendungen wurden zunächst auf Basis der Empfänger-Postleitzahl dem zustellenden Netzwerkpartner zugeordnet und auf Basis der in der SML-Plattform hinterlegten Gebietszuordnungen einem entsprechenden Zustellgebiet zugeordnet. Je Zustellgebiet wurden die entsprechenden Sendungen bzgl. des Eingangsdatums im System und dem daraus resultierenden Zustelldatum, d.h. Eingangsdatum + 1 Tag oder Eingangsdatum + 2 Tage für Austauschpakete, gruppiert und zu insgesamt 21.766 reinen Pakettouren zusammengefasst. Als erstes Ergebnis konnte hierbei festgestellt werden, dass 90% der betrachteten Touren weniger als 21 Pakete und 50% weniger als 5 Pakete aufwiesen. Aufgrund der geringen Menge können so einzelne Pakete durch eine Vergrößerung oder Verringerung der Stoppdichte einen hohen Einfluss auf die Stückkosten in einem Gebiet haben (Stückkostenhyperbel).

Der Zustellprozess wurde als sog. *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows (CVRPTW)* modelliert. Die entsprechende Paketmengen zum jeweiligen Datum und im jeweiligen Gebiet wurden anhand dieses Modells zum einen mit der gesamte Paketmenge (inkl. Austauschpakete) geroutet und zum anderen ohne die enthaltenen Austauschpakete anderer Partner. Eine monetäre Evaluierung der Touren mit und ohne kooperativen Sendungsaustausch erfolgte im Anschluss mit dem angepassten TCO-Modell und entsprechender Kostenkennzahlen der Fahrzeuge und Fahrer der beteiligten Medienlogistiker.

Als Ergebnis wurden so Tour-Gesamtkosten für die Zustellung mit Austauschpaketen  $K_T^A$  und ohne Austauschpakete  $K_T^I$  berechnet. Zusätzlich wurden die Gesamtkosten für beide

Betrachtungen mit  $K_G^A$  und  $K_G^I$  für alle Zustellgebiete  $G$  ermittelt. Daraus konnten durchschnittliche Sendungsstückkosten über alle Touren und je Zustell- bzw. Postleitzahlgebiet abgeleitet werden. Es zeigte sich, dass durch die zusätzlichen Austauschpakete die durchschnittlichen Stückkosten in der Zustellung je nach Netzwerkpartner um 6 bzw. 20 % gesenkt werden. Es zeigte sich zudem, dass die Stückkosten in der Zustellung je nach Gebiet im Bereich von 0,51 EUR (städtisches Zustellgebiet mit hohem Sendungsaufkommen und hoher Stoppdichte) und 20,56 EUR (ländliches Zustellgebiet mit niedrigem Sendungsaufkommen und geringer Stoppdichte) je Sendung lagen.

Zusätzlich konnte der für das Vergütungsmodell in Kapitel 6.2 relevante durchschnittliche Mehraufwand je Austauschpaket  $k_M$  bzw. der gebietsbezogene durchschnittliche Mehraufwand je Austauschpaket  $k_M^G$  als

$$k_M := \frac{K_T^A - K_T^I}{n_A} \quad \text{bzw.} \quad k_M^G := \frac{K_G^A - K_G^I}{n_A^G}$$

Formel 1: Mehraufwand je Zustellgebiet

definiert und berechnet werden, wobei  $n_A$  die gesamte Anzahl der Austauschpakete bzw.  $n_A^G$  die Anzahl an Austauschpaketen je Gebiet ist.

Das beschriebene Vorgehen entspricht einer konservativen Kostenabschätzung ohne Nutzung möglicher Synergieeffekte. In der Praxis wurden Paketzustell Touren je nach täglicher Auslastung mit anderen Transportprozessen als sog. Hybridzustellung, d.h. in Kombination mit der Briefzustellung oder Paketabhol Touren, durchgeführt, so dass die Stückkosten durch Synergieeffekte größtenteils deutlich gesenkt werden konnten. Eine entsprechende Validierung des Mehraufwandes innerhalb der hybriden Prozesse wurde für den städtischen Bereich über einen Zeitraum von zwei Wochen mit hohem Personalaufwand durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass durch die hybride Zustellung hohe Synergieeffekte zu erzielen sind.

## 6.2 Dynamisches Vergütungsmodell

### 6.2.1 Analyse bestehender Vergütungsmodelle

Ziel der Analyse der bestehenden Vergütungsmodelle zwischen den beteiligten Logistikpartner und externen, bundesweit agierenden Paketdienstleistern war die Ermittlung einer Kosten- bzw. Preisbenchmark, an der sich die innerhalb des Projektes entwickelten, kooperativen KEP-Prozesse zukünftig im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit messen lassen sollten.

Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass bei allen Logistikpartnern die Vergütung an den externen Dienstleister in zwei Preiskategorien erfolgte. Die untere Preiskategorie im Bereich bis ca. 10 kg und die obere im Bereich bis etwa 30 kg. Da das Sendungsgewicht der Paketmengen zu ca. 75 % im Bereich von 0 kg bis 3 kg lag wurde als zu unterbietende Preisbenchmark der Preis des günstigsten externen Dienstleisters in diesem Tarifbereich über alle Medienlogistiker gewählt. Darauf aufbauend wurde ein einheitlicher, volumen- und gewichtsabhängiger Austauschpreis während der gesamten Projektlaufzeit vereinbart. Somit konnte eine zügige Implementierung erster Austauschprozesse ermöglichen werden.

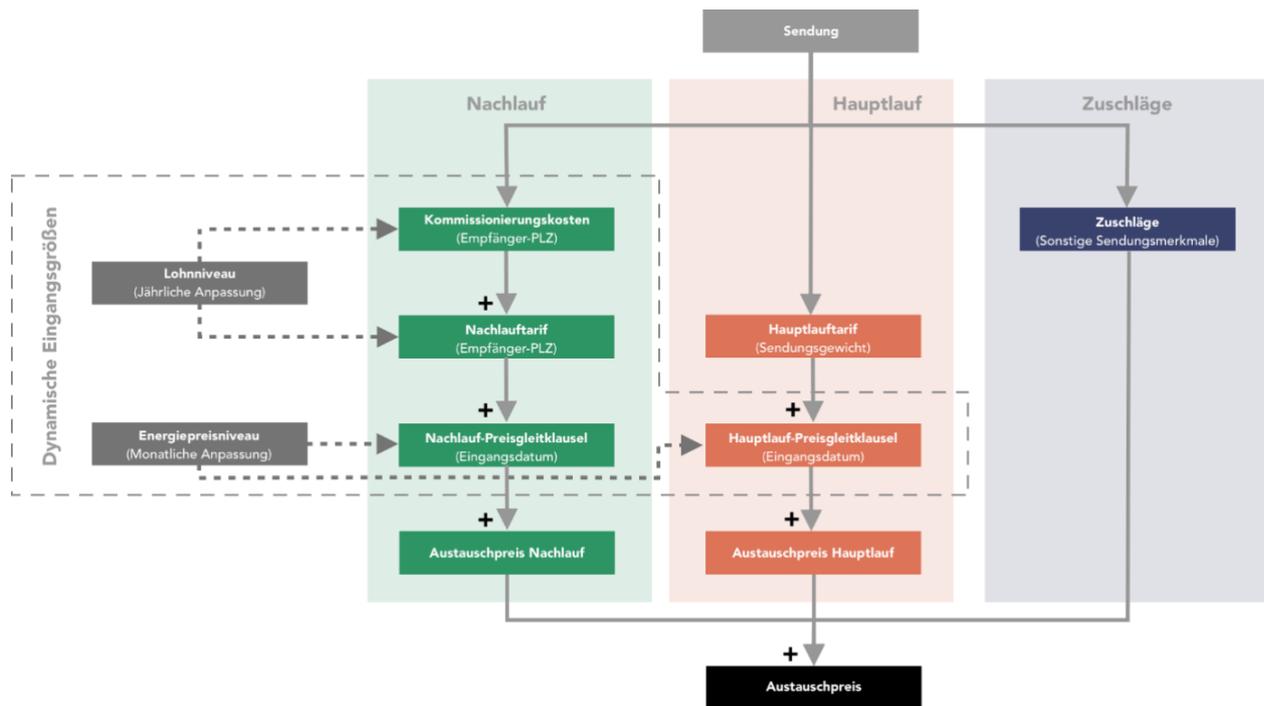


Abbildung 12: Preisbildung im kooperativen Paketprozess.

## 6.2.2 Vergütungsmodell für die kooperative Prozesskette

Die in Kapitel 6.1.3 ermittelten großen Unterschiede bzgl. der Zustellkosten in den einzelnen Gebieten motivierten eine gebietsbezogene Tarifierung als Basis eines dynamischen Austauschpreises, der drüber hinaus um weitere dynamische Einflussgrößen ergänzt wurde. Hierbei bezeichnet der Austauschpreis den Erlös, den ein Logistikpartner für den Transport bzw. Zustellung einer Sendung eines anderen Partners erhält. Der Preisbildungsprozess ist in Abbildung 12 dargestellt und setzt sich in der Summe aus drei Tarifkomponenten zusammen. Die Tarifierung im Hauptlauf erfolgt auf Basis des Sendungsgewichts und wird um eine kraftstoffpreisbezogene Preisgleitklausel, auch als „Dieselfloater“ bezeichnet, zur dynamischen Anpassung der Transportkosten an das aktuelle Kraftstoffpreinsniveau ergänzt.

Im Nachlauf erfolgt die Tarifierung gebietsbezogen nach der Postleitzahl des Zustellgebietes bzw. Postleitzahl des Sendungsempfängers. Dies ermöglicht zum einen die Berücksichtigung individueller Kommissionierungskosten des zustellenden Netzwerkpartners und zum anderen den unterschiedlichen Mehraufwand im jeweiligen Zustellgebiet. Die Berechnung der einzelnen Tarifklassen im Nachlauf erfolgte innerhalb des in Kapitel 6.1.3 untersuchten Mehraufwandes (untere Schranke) und der in Kapitel 6.2.1 ermittelten Preisbenchmark (obere Schranke), wobei die Tarifstruktur so gewählt wurde, dass die Summe aus Haupt- und Nachlauf-tarif unterhalb der jeweiligen Preisbenchmark lag. Analog zum Hauptlauf- wurde auch der Nachlauf-tarif um eine kraftstoffpreisbezogene und, zusätzlich eine lohn-niveaubezogene Preisgleitklausel ergänzt. Sonstige Zuschläge für zusätzliche Serviceleistungen, wie Same-Day-Delivery oder Expresszustellungen wurden, sofern vorhanden, in den Service-Level-Agreements mit entsprechenden zusätzlichen Vergütungssätzen hinterlegt.

## 7 Erfassung fahrzeugseitiger Energieverbräuche und CO<sub>2</sub>-Emissionen

### 7.1 Fahrzeugspezifische Daten und Schnittstellen

Ein wesentliches Ziel des Projektes war es die CO<sub>2</sub>-Emissionen der im Projekt eingesetzten Fahrzeuge zu beziffern und entsprechende Daten für das in Kapitel 8 vorgestellte Erfassungs- und Prognosemodell bereitzustellen. Für eine hohe Prognosegüte war hierbei eine Vielzahl von unterschiedlichen Tour-Segmenten und Fahrzeugen im Praxis-Betrieb zu erfassen, um eine möglichst große Datenbasis zu gewährleisten.

#### 7.1.1 Umgebungsparameter und Datenerfassung

Aufbauend auf dem gewählten Prognoseansatz mittels einer normalisierten Strecken-Segmentierung wurden folgende Umgebungsparameter im CO<sub>2</sub>-Erfassungstool als notwendig erachtet:

- Segmenteigenschaften, d.h. Steigung, Straßenklasse, zul. Höchstgeschwindigkeit, etc.,
- Lokale Temperatur und Witterungsbedingungen,
- Verkehrsaufkommen,
- Zuladungsgewicht,
- Komfortfunktionen bzw. Energieverbräuche ohne Fahrbereitschaft ("Zündung aus") des Fahrzeugs.

Weitere Anforderungen, wie die Berücksichtigung der Fahrweise des Fahrers, die einen sehr hohen Einfluss auf den Energieverbrauch und die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen haben, konnten ebenfalls innerhalb des Modells über entsprechende Kennzahlen, wie bspw. den *Dynamikfaktor*<sup>12</sup> oder die *Relative positive Beschleunigung (RPA)*<sup>13</sup> erhoben werden. Hierfür mussten jedoch personenbezogene Daten im Modell hinterlegt werden, was seitens der Logistikpartner als schwer zu realisieren erachtet wurde. Zudem wurde durch die im Prognosemodell stattfindende Mittelung eine Glättung der unterschiedlichen Fahrstile durchgeführt, so dass eine Erfassung fahrerspezifischer Eigenschaften ohne personenbezogene Daten für das Ergebnis des Prognosemodells langfristig keinen signifikanten Mehrwert erwarten ließ.

Da die zusätzlich zum Energieverbrauch an das CO<sub>2</sub>-Erfassungstool gestellten Anforderungen zur Erfassung von Umgebungsparametern, insbesondere von Witterungsbedingungen und dem Verkehrsaufkommen, nur unzureichend mittels Prüfstandsversuchen nachgebildet werden konnten, sollten entsprechende Messungen in realen Fahrversuchen bzw. Messfahrten vorgenommen werden, die im Vergleich zu Prüfstandsuntersuchungen wesentlich praxistauglichere Ergebnisse bereitstellten.

#### 7.1.2 Emissionsrelevante Prozesse

Die Bewertung der Prozessketten hinsichtlich ihrer CO<sub>2</sub>-relevanten Anteile basierte auf den in Kapitel 5 entwickelten modularen Standardprozessen. Hierbei wurden folgende Prozesse als emissionsrelevant identifiziert:

- Abhol- und Zustellverkehre im jeweiligen Zustellgebiet.

---

<sup>12</sup> Vgl. (Hiesmayr, et al. 2015)

<sup>13</sup> Vgl. (Europäische Kommission 2017)

- Depotverkehre vom Verteilzentrum in die Depots der Zustellgebiete.
- Hauptlauf- und bilaterale Austauschverkehre zwischen den Verteilzentren.

Für alle Anforderungen und Prozesse konnten entsprechende Datenquellen ermittelt und für den zu entwickelnden Software-Prototypen bereitgestellt werden, vgl. Kapitel 8.

### 7.1.3 Erfassung fahrzeugspezifischer Informationen und genutzte Schnittstellen

Die Auswahl fahrzeugspezifischer Informationen erfolgt anhand der im Vor-, Haupt- und Nachlauf eingesetzten Fahrzeuge. Wesentliche Kriterien waren hierbei:

- Quantitative Verteilung der Fahrzeug-Modelle im Projektkonsortium, um eine möglichst hohe Abdeckung im Prognosemodell zu erzielen.
- Erwartete Qualität der nutzbaren CAN-Daten sowie Zeitdauer und abschätzbarer Aufwand für deren Reengineering auch unter Berücksichtigung des vorhandenen Knowhows aus Vorgängerprojekten.
- Aufwand für Datenerfassung und -sicherung im laufenden Betrieb durch Mitarbeiter der FHE, insbesondere Fahrzeugstandort.

Die nach diesen Kriterien ausgewählten Fahrzeugmodelle Renault Kangoo ZE, Renault Kangoo dCi (Diesel), und VW Caddy (Diesel) repräsentierten ca. 74 % der bei den Praxispartnern eingesetzten Fahrzeugmodelle in der gesamten Fahrzeugflotte des Projektes.

Neben den zu erfassenden Parametern bestimmt die zeitliche Länge des Erfassungsintervalls maßgeblich die Qualität der Aussagekraft des Prognosemodells. Der technische Aufwand der Erfassung steigt hierbei mit Verkürzung der Intervalllänge. So ist beispielsweise die Erfassung des Energieverbrauch je gefahrener Tour mit niedrigem technischem Aufwand leistbar. Aussagen zum zu erwarteten Energieverbrauch sind aber auf Basis dieser Erfassung nur für gleiche oder sehr ähnliche Touren möglich. Umgekehrt liefert der im Projekt gewählte Segmentierungsansatz eine hohe tour-unabhängige Prognosegüte. Dies erfordert jedoch eine quasi-sekündliche Erfassung des momentanen Energieverbrauchs über die gesamte Fahrstrecke. Daher war eine automatisierte Erfassung bei hohem technischem Aufwand erforderlich, um Personalaufwand und Erhebungsfehler zu reduzieren. Für das jeweilige Fahrzeugmodell wurden die über die Telematik-Einheit erfassbaren CAN-Daten ermittelt. Dabei wurde nicht nur geprüft, welche Daten erfasst werden, sondern auch in welcher Auflösung diese Daten sowohl im Zeitbereich wie auch im Wertebereich verfügbar waren.

Zusätzlich wurde geprüft, ob die seitens der Telematik-Einheiten erfassbaren Daten auch über die SML-Plattform zur Verfügung standen. Entsprechende Erkenntnisse wurden frühzeitig mit einem konventionellem Dieselfahrzeug (Renault Kangoo dCi) und einem Elektrofahrzeug (Renault Kangoo ZE) unter Praxisbedingungen untersucht. Hierbei konnten wichtige Erkenntnisse bzgl. der Genauigkeit der Erfassung von Daten für das Prognosemodell gewonnen werden. Dies galt insbesondere für die Erfassung von Energieverbräuchen, Ladeverlusten sowie für die Nutzung der Vorklimatisierung des Innenraums (Komfortfunktion). Insbesondere zeigte sich, dass die im Projekt beabsichtigte Erfassung der Daten mittels einer Telematik-Einheit, aufgrund der unzureichenden Erfassungsqualität verworfen werden musste. Der Segmentierungsansatz des Prognosemodells erforderte Energieverbrauchsmessungen auf sehr kurzen Streckenabschnitten, die z.T. deutlich weniger als 100 m betragen. Dies erforderte wiederum eine hohe Abtaste bzw. kurze Erfassungsintervalle bei der Verbrauchsmessung und gleichzeitig eine hohe Auflösung der erfassten Verbrauchswerte, um die geringen

Verbrauchsmengen zu quantifizieren. Beides konnte die vorgesehene Telematik-Einheit nicht leisten.

Die erforderliche Auflösung war bei der Datenerfassung über die Telematik-Einheit nicht gegeben, da beispielsweise die Aufzeichnung des Energieverbrauchs (elektrisch) nur über den State-Of-Charge (SOC) der Batterie in 1%-Schritten möglich war. Mit diesem Verfahren waren keine Verbrauchsänderungen auf kurzen Segmenten, d.h. Segmente mit einer Distanz kleiner als 1 km, messbar. Zudem kann eine Änderung des SOC, z.B. auch temperaturbedingt, erfolgen. Darüber hinaus zeigten Untersuchungen von insgesamt 76 Messfahrten mittels telematik-unabhängiger Datenerfassung durch einen Datenlogger, der eine sehr genaue Erfassung aller relevanten Parameter über die fahrzeuginternen CAN-Datenbusse gewährleistet, dass der über die Telematikeinheit übermittelte SOC-Wert, aufgrund einer hohen Streuung bei dem *Energieverbrauch je Prozent SOC*, keine valide Basis für eine Verbrauchsmessung bei den bisher getesteten Fahrzeugen BMW i3 und Renault Kangoo ZE lieferte, vgl. Abbildung 13 und Abbildung 14.

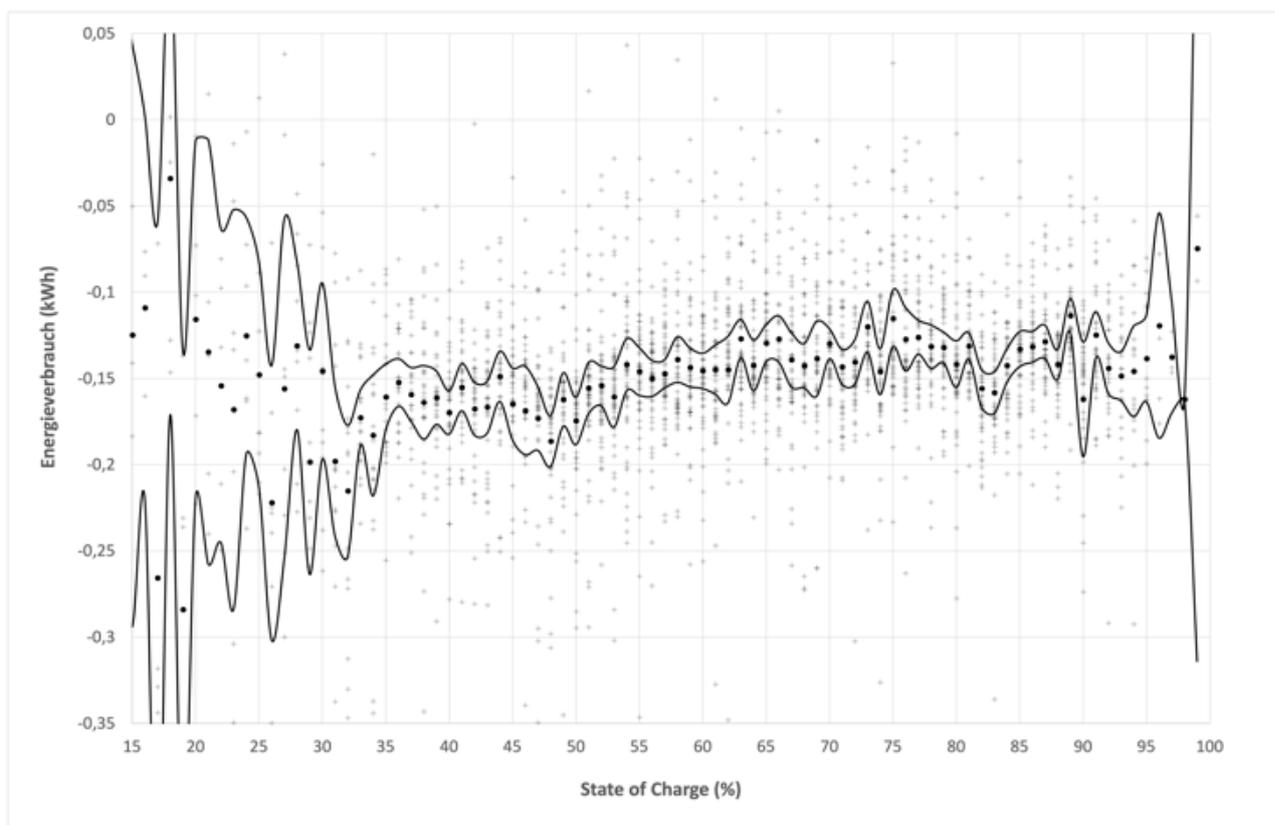


Abbildung 13: Energieverbrauch je 1-prozentiger Änderung des State-of-Charge (SOC) beim Renault Kangoo ZE sowie Durchschnittlicher Energieverbrauch und Konfidenzintervall

In ähnlicher Weise galt dies für die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs konventioneller Fahrzeuge mit Hilfe der Telematik-Einheit. Auch hier standen nur der Gesamtverbrauch (Liter) sowie der Tankfüllstand (Liter) zur Verfügung. Da die Angaben zum Gesamtverbrauch und zum Tankfüllstand jeweils nur eine Nachkommastelle umfassten, konnten damit wiederum keine Verbrauchsänderungen auf kurzen Segmenten ermittelt werden.

Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass der Einsatz der Telematikeinheiten zur Datenerfassung, insbesondere von Energieverbrauchsdaten, für das angestrebte Modell ungeeignet ist.

Ein alternativer Ansatz zur Datenerfassung mittels eines Daten-Loggers wurde seitens der FHE erfolgreich realisiert.

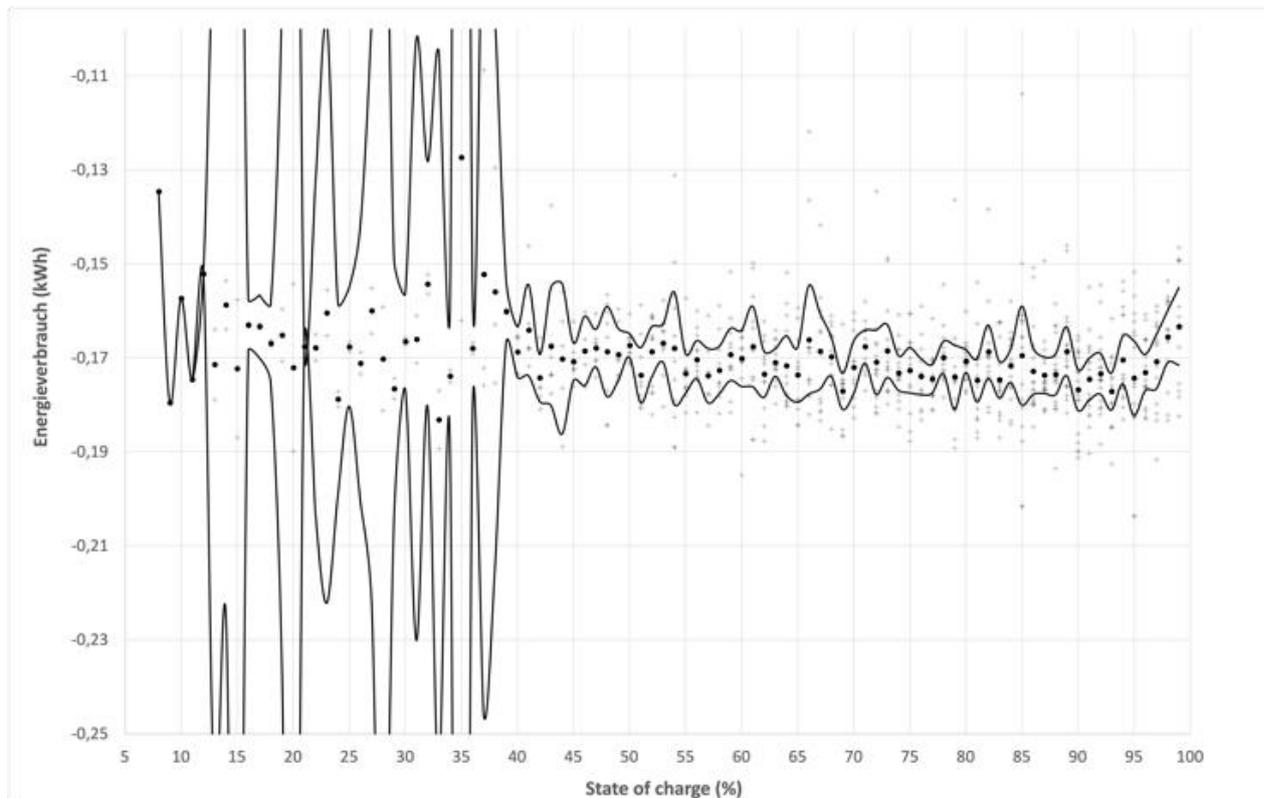


Abbildung 14: Energieverbrauch je 1-prozentiger Änderung des State-of-Charge (SOC) beim BMW i3 sowie Durchschnittlicher Energieverbrauch und Konfidenzintervall

## 7.2 Reengineering und Datenerfassung

Zum Einsatz eines Daten-Loggers war eine fahrzeugmodellspezifische Matrix des verwendeten CAN-Datenbusses notwendig. Diese musste für die im Projekt eingesetzten Fahrzeuge durch Reverse-Engineering gewonnen werden, um die für die Datenerfassung notwendigen, über den CAN-Bus gesendeten Signale identifizieren zu können.

Das bereits im Projekt SDL verwendete Datensignal-Tableau wurde bzgl. ermittelten Anforderungen der für das Prognosemodell notwendigen Fahrdaten erweitert, vgl. Tabelle 2. Die CAN-Matrix zur Ermittlung der für das CO<sub>2</sub>-Erfassungstool notwendigen Daten wurde für die Fahrzeugmodelle Renault Kangoo ZE, Renault Kangoo cDi (Diesel) und VW Caddy (Diesel) erweitert. Hierbei konnte insbesondere auf die bereits vorhandenen fahrzeugspezifischen Informationen und die Kenntnisse zur Identifikation und Nutzung, der für die beiden erstgenannten Modelle fahrzeugseitig vorhandenen Schnittstellen, aus dem Projekt SDL zurückgegriffen werden.

Fahrzeugmodell	Renault Kangoo ZE	Renault Kangoo Diesel	VW Caddy Diesel
Zugangspunkt	CAN-Anschluss an OBD-Buchse	CAN-Anschluss an OBD-Buchse	CAN-Anschluss Diagnose-Interface an für Datenbus (J533)
Übertragungsrate	500 KBit/s	500 KBit/s	500 KBit/s
<b>Notwendige Signale</b>			
GPS Latitude	Erfassung über Datenlogger	Erfassung über Datenlogger	Erfassung über Datenlogger
GPS Longitude			
km Stand	x	x	x
HV-Spannung	x	-	-
HV-Strom	x	-	-
Ist-Verbrauch gesamt	x	x	-
Kraftstoffdurchflussmenge	-	x	-
Außentemperatur	x	x	x
Geschwindigkeit	x	x	x
<b>Zusätzliche Signale</b>			
Drehzahl	x	x	x
Drehmoment	x	x	x
Kühlmittel-Heizkreis Temperatur	x	x	x
Momentanverbrauch	-	-	x
Strom DC/DC Wandler	x	-	-
Beschleunigung	x	x	x
Kilometerstand	x	x	x
Status AC	x	x	x
Status Gebläse	x	x	-
Status Bremse	x	x	-
Status Fahrpedal	x	x	x
Status Türen	x	x	x
Ist Temperatur Kühlmittel	-	-	-
Status Beleuchtung	x	x	x

Legende	
Signal vorhanden	x
Signal nicht vorhanden	-
Nicht relevant / zutreffend	-

Tabelle 2: Verfügbare Daten für das Prognosemodell.

Für die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs musste je nach Modell auf unterschiedliche Fahrzeugdaten zurückgegriffen werden, vgl. Tabelle 2. Während beim Renault Kangoo cDi auf die Kraftstoffdurchflussmenge im CAN-Datenset zur Verfügung stand, musste beim VW Caddy auf den Momentanverbrauchswert zurückgegriffen werden. Bei beiden Fahrzeugen lieferten die erfassten Daten eine hinreichende Genauigkeit für die Verwendung im Prognosemodell.

Auf Grundlage der ermittelten CAN-Matrizen wurden seitens der FHE insgesamt vier Zustellfahrzeuge der Praxispartner sowie das Versuchsfahrzeug der FHE mit Datenloggern ausgerüstet, um die Energieverbräuche und die jeweils vorherrschenden Umgebungsparameter im Test- bzw. Praxisbetrieb zu erfassen und mit Hilfe des CO<sub>2</sub>-Erfassungstools als Basis für das Prognosemodell aufzubereiten (Segmentdatenbank), vgl. Kapitel 8.2.3.

## 8 KI-basiertes Modell zur Prognose von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Transportkette

### 8.1 Basismodell

Ein wesentliches Projektziel war die Entwicklung eines Modells, mit dem die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Sendungen innerhalb der Transportkette in Abhängigkeit des jeweils eingesetzten Fahrzeugs ermittelt bzw. prognostiziert werden sollten.

Als Basismodell für eine fahrzeugabhängige Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emissionen je Sendung bzw. Tour sind die Gesamtemissionen als Summe der einsatzbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen, d.h. anfallende Emissionen im Transportprozess, und produktionsbezogener Emissionen, d.h. anfallende CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Fahrzeug-Herstellung, zu betrachten, vgl. Abbildung 15.

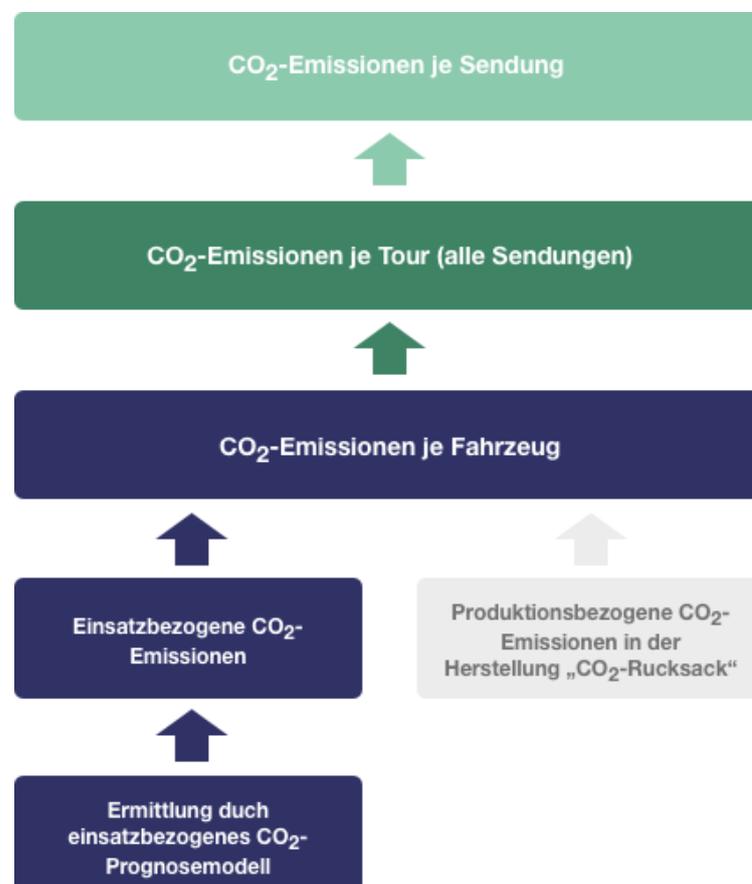


Abbildung 15: Basismodell zur Prognose sendungsbezogener CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die zu erwartenden Emissionen je Tour ergeben sich dann als Summe der einsatzbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie der anteiligen produktionsbezogenen Emissionen. Auf Basis von Sendungs-Charakteristika, wie beispielsweise Maße, Volumen oder Gewicht, können so jeder Sendung eine entsprechende anteilige Emission auf der jeweiligen Tour zugeordnet werden. Zur Prognose der einsatzbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen wurde ein Modell entwickelt, dass auf Basis des zu erwartenden Energieverbrauchs eines Fahrzeugs auf einer Tour die zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt. Das hierzu entwickelte Modell stützte sich auf eine Kombination aus geplanter Route, einzusetzendem Fahrzeugtyp sowie den voraussichtlichen Umgebungsparametern mittels vergleichbarer historischer Mess- bzw. Verbrauchsdaten. Die zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Emissionen konnten auf Basis der Antriebsenergie im Anschluss beispielsweise über die VDA-Emissionsfaktoren oder Well-To-Wheel-Analyse ermittelt werden. Die Berechnung der produktionsbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgte, sofern vorhanden, auf Basis von Herstellerangaben und wurde entsprechend der zeitlichen- und nutzungsbezogenen Anlastung des Fahrzeugs der entsprechenden Tour bzw. Sendung anteilig zugeordnet. Für die untersuchten Fahrzeuge lagen entsprechende Informationen während der Projektlaufzeit nicht vor.

## 8.2 Prognosemodell zur Bewertung von einsatzbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Zustellfahrzeugen

### 8.2.1 Modellansatz

Grundlage für das entwickelte Prognosemodell für die einsatzbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen bildeten bereits existierende Modelle zur Reichweiten-Ermittlung<sup>14</sup>. Die hierbei erstellte Prognose fußte auf dem zu erwartenden Energieverbrauch des Fahrzeugs. Die einsatzbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen ließen sich dann aus dem einsatzbezogenen Energieverbrauch direkt ableiten.

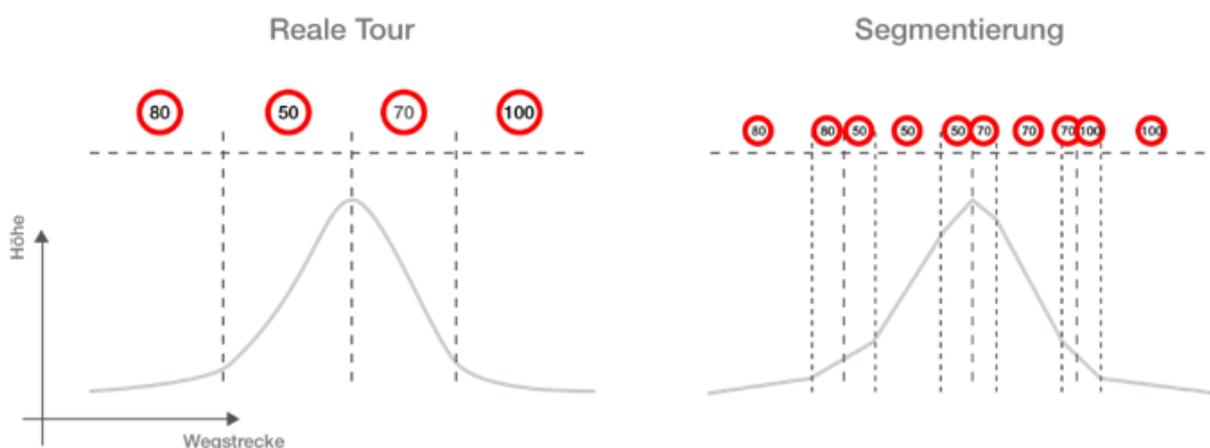


Abbildung 16: Beispielhafte Segmentierung einer Tour mit homogenen Segment-Eigenschaften (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Gebhardt, et al. 2015)).

Grundsätzliche Probleme bei der Prognose des Energieverbrauchs lagen in den schwer zu identifizierenden Einflussgrößen, die zudem teilweise gegenseitig voneinander abhängig waren oder der Parametrierung bestehender (physikalischer) Modelle, die stark vom eingesetzten Fahrzeug - insbesondere der verwendeten Traktionsbatterie - abhingen, welche nur schwer zu verallgemeinern waren.

<sup>14</sup> Vgl. (Gebhardt, et al. 2015)

Als Lösungsansatz wurde daher ein statistisches, multivariates Regressionsmodells gewählt. Dieser Ansatz wurde bereits bei dem Vorgänger-Projekt SMART CITY LOGISTIK zur Reichweiten-Ermittlung eingesetzt. Hierbei wird eine Tour in einzelne Segmente mit möglichst homogenen bzw. konstanten Eigenschaften (Merkmale bzw. Features), wie durchschnittliche Steigung oder maximal erlaubte Geschwindigkeit, unterteilt, vgl. Abbildung 16.

Auf Basis von eigenen Testfahrten sowie den eingesetzten Fahrzeugen der Projektpartner, die für die Erfassung von Daten im Praxisbetrieb mit entsprechender Messtechnik ausgestattet waren, wird ein Lern-Datenset generiert, vgl. Kapitel 8.2.2. Dieses Lern-Datenset dient dann als Grundlage zum sog. Training eines KI-basierten Regressionsmodells. Dieses Modell prognostiziert die Energieverbräuche von Touren mittels ebenfalls durchgeführter

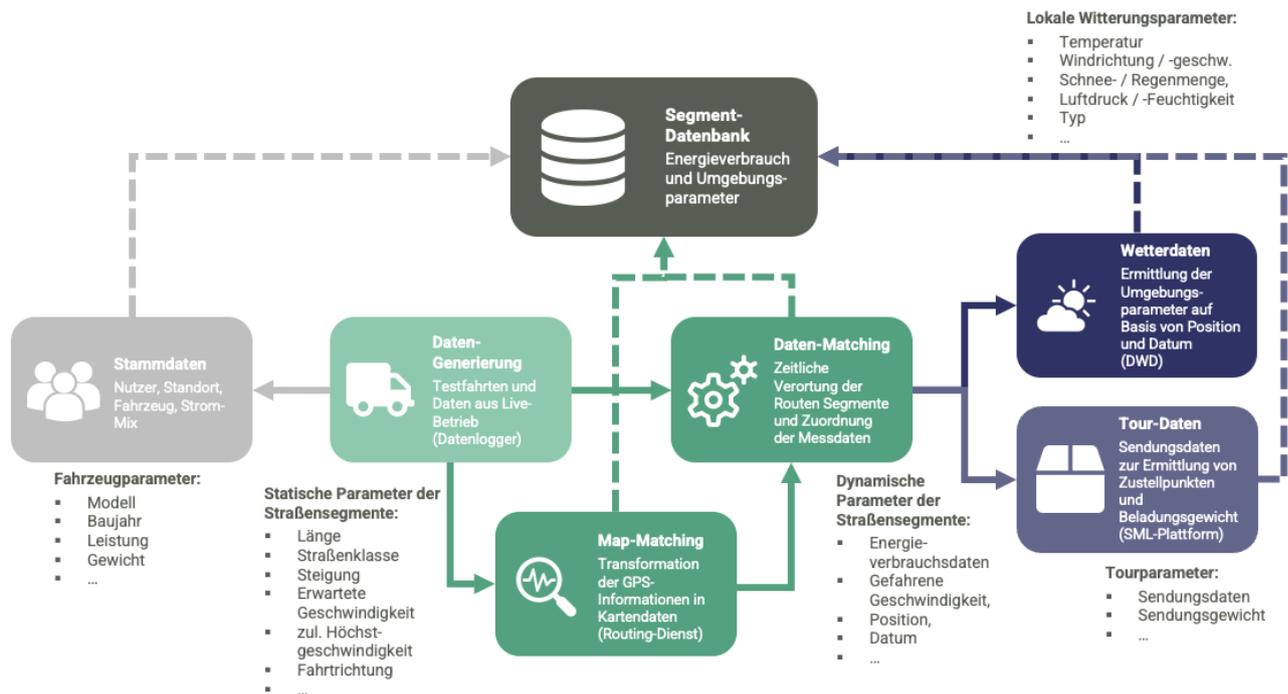


Abbildung 17: Datenverarbeitung im CO<sub>2</sub>-Erfassungstool.

Segmentierung anhand der auf den Segmenten auftretenden Umgebungsparametern. Anschließend wird eine kumulierte Ermittlung des Energieverbrauchs über alle Segmente durchgeführt und in entsprechende Emissionswerte umgerechnet.

### 8.2.2 Erstellung des Lern-Datensets mittels CO<sub>2</sub>-Erfassungstools

Die Erstellung und Speicherung des Lern-Datensets in der „Segment-Datenbank“ erfolgte mittels des „CO<sub>2</sub>-Erfassungstools“. Dieses umfasste neben einer Schnittstelle zur Übertragung der Fahrzeugdaten auch die Algorithmik zur Auswertung und Einordnung der Daten in die, dem Prognosemodell zugrundeliegende, Segment-Datenbank. Diese bestand aus den einzelnen Segmenten der erfassten Touren, für die die Energieverbrauchsdaten zusammen mit den jeweils vorherrschenden homogenen Umgebungsparametern, wie bspw. Straßeninformationen, Wetterdaten oder Fahrzeugbeladung, erfasst wurden, vgl. Abbildung 17.

Im Gegensatz zum bereits bestehenden Ansatz wurde nicht der gefahrene GPS-Track des Fahrzeugs als Grundlage zur Datenerhebung gewählt, sondern die wesentlich exakteren Weg- bzw. Messpunkte der mittels Map-Matching erzeugten Tour-Route. Der Vorteil dieser Methode

besteht darin, dass insbesondere topographische Veränderungen von Segmenten so deutlich genauer abgebildet werden können als bei einer reinen Nutzung von GPS-Punkten. Ausgangspunkt der Datenverarbeitung bildeten die während der üblichen Fahrten bei den Praxispartnern bzw. bei Versuchsfahrten seitens FHE aufgezeichneten Messdaten. Die Verarbeitung eines Datensatzes, d.h. einer gefahrenen Tour, erfolgte in folgenden Schritten:

- Zuordnung der in der Datenbank hinterlegten Fahrzeugdaten, d.h. Fahrzeugmodell mit entsprechenden Parametern, wie Leistung, Gewicht und Antriebsart, sowie weiteren Stammdaten, wie Halter und verwendeter Kraftstoff bzw. Strommix.
- Map-Matching zur Transformation der aufgezeichneten Positionsdaten des Fahrzeugs in reale geografische Kartendaten sowie Zerlegung der Route in einzelne Messsegmente, beispielhaft dargestellt in Abbildung 18.
- Zeitliche Verortung der Messsegmente entlang der Route sowie Zuordnung der jeweils gemessenen Fahrzeugdaten, insbesondere der Verbrauchsdaten, zu den entsprechenden Segmenten.
- Ermittlung der Wetterparameter für jedes Segment auf Basis der jeweiligen geografischen Position, des Datums und der Uhrzeit mittels API des *Deutschen Wetterdienstes (DWD)*.
- Zuordnung von abzuholenden oder zuzustellenden Sendungen auf dem Segment zur Ermittlung des Beladungszustandes bzw. Gesamtgewicht des Fahrzeugs auf dem Segment.
- Schreiben des jeweiligen vollständig beschriebenen Segmentes in die Datenbank.

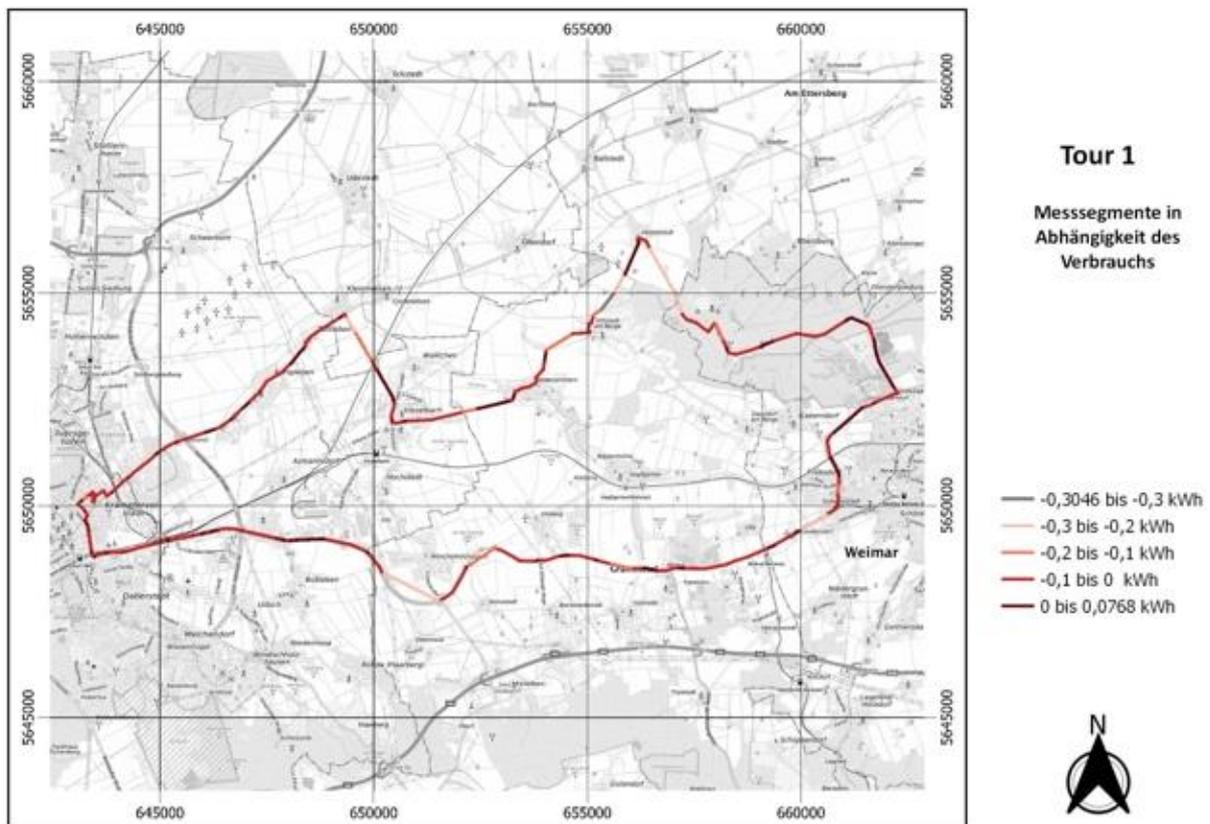


Abbildung 18: Segmentierung für eine Touren (hier: beispielhaft eingefärbt nach Energieverbrauch).

### 8.2.3 Parametrierung und Kalibrierung des CO<sub>2</sub>-Erfassungstools

Zur Parametrierung des CO<sub>2</sub>-Erfassungstools und wurden drei Teststrecken erstellt. Diese bildeten ein weitreichendes Spektrum an unterschiedlichen Topografien und Straßenklassen innerorts und außerorts ab. Zudem wurden innerhalb der Testfahrten Parametervariationen durchgeführt, vgl. Tabelle 3. Wesentlich bei der Variation der einzelnen Parameter waren zum einen einsatzbezogene Größen wie die jeweilige Zuladung und zum anderen die eingeschalteten Nebenverbraucher und die hiermit korrelierenden Umgebungsparameter wie Tages- und Jahreszeit sowie Wetterbedingungen.

Parameterklasse	Parameter	Variation	Schrittweite
<b>Einsatz</b>	Zuladung	0 kg bis 300 kg	100 kg / 50 kg / 25 kg
<b>Neben-Verbraucher</b>	Heizung	Aus / Ein	
	Lüftung	Stufe 0 bis Stufe 5	Stufe 0, 3 und 5
	Klimatisierung	18 Grad bis 24 Grad	3 Grad
	Licht	Tagfahrlicht / Abblendlicht	
	Scheibenwischer	Stufe 0 bis Stufe 2	Stufe 0, 1 und 2
	Sitzheizung Fahrer	Stufe 0 bis Stufe 3	Stufe 0 und 3
<b>Fahrzeug</b>	Reifendruck	konstanter Wert	Nein
<b>Umgebung</b>	Tageszeit	7 - 9 Uhr; 12 - 14 Uhr; 16 - 18 Uhr	Nein
	Wetterbedingungen	sonnig; bedeckt; Regen; Schnee	Nein
	Außentemperatur	0 Grad bis 20 Grad	Nein

Tabelle 3: Übersicht der Parametervariationen zur Kalibrierung und Validierung des CO<sub>2</sub>-Erfassungstools.

#### Positionsdaten (Datenlogger)

Die gemessenen Positionsdaten (GPS) des Datenloggers wiesen je nach Einsatzgebiet unterschiedliche Genauigkeiten auf. Insbesondere im Stadtgebiet zeigten sich in Bereichen mit hoher Bebauung und hoher Gebäudedichte Ungenauigkeiten bei der Fahrzeugpositionierung. Eine Erhöhung der Genauigkeit von Messdaten in diesen Bereichen konnte zumindest teilweise durch eine optimierte Parametrierung des Map-Matching erzielt werden. Dennoch bestehen in innerstädtischen Bereichen, aufgrund der relativ feinen Segmentierung mit Segmentlängen im Bereich von häufig nur wenigen Metern (<50m), weiterhin hohe Verluste bei der Datenerfassung. Durch die Aufzeichnung der Daten im regulären Fahrzeugeinsatz und der dadurch kontinuierlich anfallenden Datenmenge können diese Verluste jedoch ausgeglichen werden, ohne einen Mehraufwand bei den Praxispartnern, d.h. zusätzliche Messfahrten etc., zu verursachen.

Anzumerken ist, dass Positionsdaten, die über ein im Fahrzeug integriertes Navigationsgerät, erhoben wurden, sehr hohe Genauigkeiten aufwiesen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass eine entsprechende Korrektur der Positionswerte, z.B. mittels Kalman-Filter, über weitere Messdaten, wie Geschwindigkeit und Beschleunigung erfolgen.

### Fahrzeugdaten (Datenlogger)

Für die Validierung CO<sub>2</sub>-Prognosemodells ist ein möglichst genaues Trainingsdatenset erforderlich. Bei den gemessenen Fahrzeugdaten ergaben sich unplausible Werte sowohl bei der Fahrzeuggeschwindigkeit als auch bei den Energieverbrauchsdaten.

Das Problem der abweichenden Fahrzeuggeschwindigkeit konnte durch eine berechnete Geschwindigkeit entlang des Segments gelöst werden. Die Identifikation von Ausreißern bzw. Extremwerten in den Energieverbrauchsdaten wurde KI-basiert mittels des *Isolation-Forest*-Algorithmus realisiert. Für die Behandlung der Extremwertdaten wurden vier verschiedene Strategien getestet, siehe Tabelle 4.

Strategie	Vorteile	Nachteile
Entfernung des gesamten Segments aus dem Datensatz.	Datensatz wird nicht verändert.	Verringerung des Datenbestandes.
Substitution des Energieverbrauchswertes mit Mittelwert über alle Segmente.	Datenbestand wird nicht verringert.	Datensatz wird verändert und Mittelwert selbst ist empfindlich gegenüber Extremwerten.
Substitution des Energieverbrauchswertes mit Median über alle Segmente	Datenbestand wird nicht verringert. Median ist unempfindlich bzgl. Extremwerten.	Datensatz wird verändert und Median respektiert nicht die Tendenz bzw. Lage des Extremwertes (Ausreißer nach oben oder unten).
Substitution des Energieverbrauchswertes mit 5 %- bzw. 95 %-Quantil über alle Segmente ( <i>Winsorizing</i> )	Datenbestand wird nicht verringert. Berücksichtigt die Lage des Extremwertes.	Datensatz wird verändert.

Tabelle 4: Strategien zur Behandlung von Extremwerten in den Energieverbrauchsdaten.

Für das Training des Prognosemodells wurde die Strategie der *Ausreißer-Entfernung* verwendet, um ein Modell mit geringem Prognosefehler zu erzielen. Für die Ermittlung der Prognosegüte auf Tour-Ebene wurde die Strategie des *Winsorizing* verwendet, um die gesamte Tour ohne Datenverlust abbilden und vergleichen zu können, so dass Tendenzen von Ausreißern weiter berücksichtigt wurden. Hierdurch konnten Prognosemodelle mit wesentlich höherer Prognosegüte erzeugt werden.

### Wetterdaten (DWD)

Bei den über die DWD-API angefragten Wetterdaten wurde festgestellt, dass für die bzgl. der Fahrzeugposition relevanten Wetterstationen teilweise nicht alle Werte vorlagen. Ursache hierfür war die unterschiedliche sensorische Ausstattung der einzelnen Messstationen. Fehlende Segmentinformationen konnten teilweise durch iteratives Abfragen mehrerer innerhalb eines vordefinierten Radius liegender Wetterstationen ergänzt werden. Hierbei wurden die am nächsten liegenden 10 Wetterstationen in einem Umkreis von 30 km nacheinander abgefragt. Segmente mit weiterhin unvollständigen Informationen wurden dennoch in die Datenbank übernommen, da diese Segmente in Abhängigkeit des gewählten Ansatzes bzw. Algorithmus im Prognosemodell anhand der sonstigen vorhandenen Informationen genutzt werden konnten.

Insgesamt konnten im Projektzeitraum 30.128 km aufgezeichnet werden. Durch das CO<sub>2</sub>-Erfassungstool konnten hierdurch bis zum Ende des Projektes 471.209 Messsegmente für das Prognosemodell als Trainingsdaten generiert werden, vgl. Tabelle 5.

Modell	BMW i3	Renault Kangoo	Renault Kangoo Z.E.	VW Caddy Maxi	Gesamt
Anzahl im Projektfuhrpark	1	420	12	361	794
Anteil am Fuhrpark (%)	0,1	39,0	1,1	33,5	73,8
Anzahl Datenlogger im Live-Betrieb	1	2	1	1	5
Projektpartner	FHE	FUNKE / MZZ	FUNKE	FUNKE	
Standort	Erfurt	Sömmerda / Halle (Saale)	Sömmerda	Erfurt	
Aufzeichnung seit	19.08.2021	07.09.2022 / 26.08.2022	08.09.2022	05.05.2022	
Anzahl aufgezeichneter Touren	72	359	11	164	706
Gesamte Tour-Kilometer (km)	3.226	13.349	5.450	8.103	30.128
Anzahl gemessener Segmente	39.850	169.244	128.188	133.927	471.209
Durchschnittliche Segmentlänge (m)	80	83	43	60	67

Tabelle 5: Übersicht der im fahrbetrieb und Versuchsfahrten erfassten Fahrzeuge und des Datenbestandes Während der Projektlaufzeit.

## 8.2.4 Training und Validierung des CO<sub>2</sub>-Prognosemodells

Das auf Basis der Segment-Datenbank erzeugte Prognosemodell unterscheidet sich deutlich zu dem bisherigen Ansatz zur Reichweitenermittlung.<sup>15</sup>

Ein wesentlicher Unterschied betrifft die Ermittlung des Energieverbrauchs auf einem bestimmten Segment im Prognose-Schritt. Der bisherige Ansatz führt eine Klassifizierung auf Basis Cartesischer Produkte von zusammenhängenden vordefinierten Segment-Eigenschafts-Intervallen durch. Aus den Testfahrten wird jeder Klasse, sofern vorhanden, der durchschnittliche Energieverbrauch zugeordnet. Im Prognoseschritt erhalten Segmente den jeweiligen Energieverbrauch aus der ihnen zugeordneten Klasse (Lookup-Tabelle). Segmente, die keiner Klasse zugeordnet werden können, erhalten den durchschnittlichen Energieverbrauch über alle Segmente. Im Gegensatz hierzu verzichtet der für das Prognosemodell gewählte Ansatz vollständig auf vordefinierte Klassen und nutzt KI-basierte multivariate Regressionsverfahren. Im

<sup>15</sup> Vgl. (Gebhardt, et al. 2015)

Gegensatz zu dem bisherigen Ansatz ist dieses Verfahren deutlich schneller im Prognoseschritt, da die Suche der zugehörigen Segmentklasse entfällt. Zudem kann durch die Nutzung vordefinierter Segmentklassen bestimmten Merkmalen eine zu große Gewichtung eingeräumt werden, die die Prognosegüte negativ beeinflussen kann.

Weitere Unterschiede betrafen die wesentlich umfangreichere Feature-Auswahl, vgl. Tabelle 6, gegenüber der Betrachtung von maximal zulässiger Geschwindigkeit, Tageszeit und durchschnittlicher Steigung.

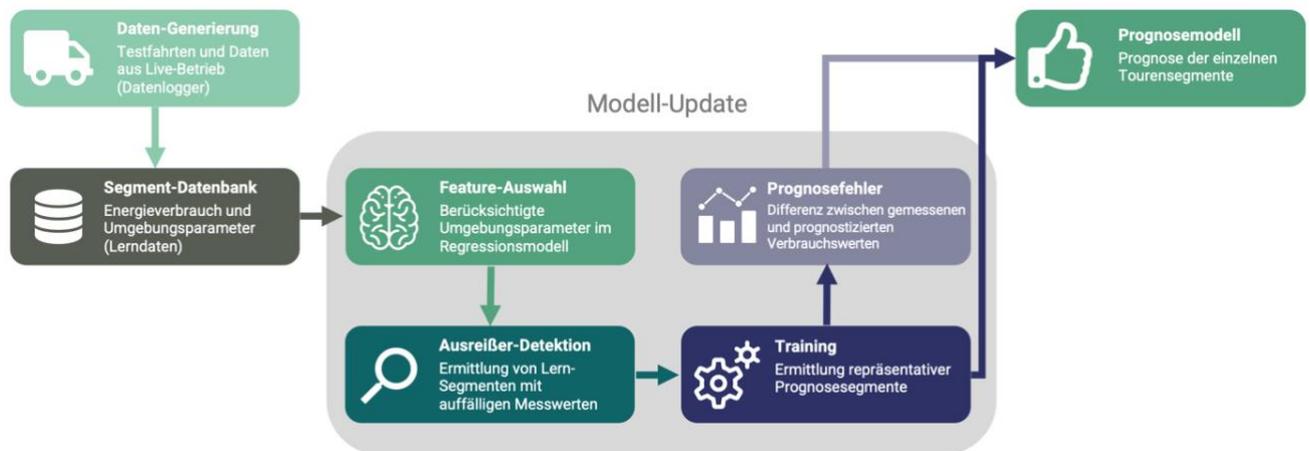


Abbildung 19: Entwicklungsschritte zur Erstellung des KI-basierten Prognosemodells

Die Entwicklung bzw. Aktualisierung eines Prognosemodells, das sog. *Modell-Update* war ein iterativer Prozess und bestand in jeder Iteration aus vier Schritten: Feature-Auswahl, Ausreißer-Detektion, Training und Prognosefehler, s. Abbildung 19.

### Feature-Auswahl

Die Fahrzeug- und Umgebungsparameter umfassten den Einsatz von Nebenverbrauchern und die vorherrschenden Wetterbedingungen. Da das Prognosemodell nur auf zum Prognosezeitpunkt bekannte Parameter, wie Zustellpunkte und somit die Tour-Route und Wetterbedingungen und damit vermutlich eingesetzte Nebenverbraucher, zurückgreifen kann, müssen weitere Einflussgrößen, die nur retrospektiv erfasst werden könnten, vernachlässigt werden. Dies umfasst bspw. den Einsatz der fahrzeugseitigen Geräte zur Temperaturregelung. Die Feature-Auswahl legte die innerhalb des jeweiligen Prognosemodells betrachteten Umgebungsparameter fest. In Abhängigkeit des verwendeten Regressionsansatzes, konnte der Einfluss der Umgebungsparameter innerhalb der Modellgenerierung als Rückgabewert zur Optimierung der getroffenen Auswahl genutzt werden. Aus dem Rückgabewert ließen sich so die Features mit dem größten Einfluss (notwendige Features) auf die Prognosegüte ableiten. Dies war insbesondere dann notwendig, wenn die Anzahl an betrachteten Features keine Berechnung des Prognosemodells in hinreichend kurzer Zeit erlaubte.

Für die weiteren Betrachtungen wurden folgende Features als notwendig und sinnvoll ausgewählt und in der Modellgenerierung berücksichtigt, siehe Tabelle 6.

Art	Datum	Routing	Wetter	Sendung	Fahrzeug
Parameter	Tageszeit	Straßenklasse	Windvektor	Sendungsgewicht	Modell
	Wochentag	zulässige Höchstgeschwindigkeit	Temperatur,	Sendungstyp	Klasse
	Datum	Steigung	Luftdruck		Leergewicht
	Werktag	erwarteter Geschwindigkeitsvektor (Routing)	Luftfeuchtigkeit	Regenvolumen	Antriebsart
			Schneetiefe		Motorleistung
			Wetterlage		

Tabelle 6: Übersicht der betrachteten Features

Da die gemessenen Verbrauchsdaten auf einem Segment abhängig von der Länge des Segmentes waren, wurden diese bzgl. der Straßenlänge des Segmentes normalisiert<sup>16</sup>, d.h. es wurde der Energieverbrauch je Kilometer betrachtet. Eine Normalisierung anderer Werte war nicht notwendig, da ihre Ausprägung unabhängig von der Segmentlänge war. Die Segmentlänge wurde innerhalb des Modelltrainings als Gewichtung verwendet, um längeren Segmente mit einer höheren Messgenauigkeit einen stärkeren Einfluss in der Modellberechnung zu geben. Zusätzlich wurden die Verbrauchsdaten getrennt nach Verbrauch in Litern und Verbrauch in kWh betrachtet, so dass sowohl Fahrzeuge mit Verbrennungs- oder Elektromotor als auch Hybridfahrzeuge im Modell berücksichtigt werden konnten. Fahrdynamische Größen, wie die zu erwartende Geschwindigkeit oder der sog. Dynamikfaktor, die auf Basis von Fahrdaten erhoben wurden, könnten mittels eines vorgeschalteten Prognosemodells, das diese Größen auf Basis der Umgebungsparameter ermittelt, einfließen.

### Sicherstellung valider Trainingsdaten

Die Sicherstellung valider Trainingsdaten erfolgt mit den in Abschnitt 8.2.3 dargestellten Strategien zur Detektion von Ausreißern in den Energieverbrauchsdaten. Als Ausreißer identifizierte Datensätze wurden aus dem Trainingsdatensatz entfernt, um eine möglichst hohe Prognosegüte für das zu berechnende bzw. zu trainierende Modell zu erzielen.

### Implementierung und Training

Als mögliche Kandidaten für das anzulernende Prognosemodell wurden sowohl lineare als auch nicht-lineare Regressionsverfahren aus der *Python*-basierten Machine-Learning-Bibliothek *Sklearn* ausgewählt und implementiert, vgl. Tabelle 7.

Lineare Verfahren	Nicht-lineare Verfahren
Lineare Regression	Decision Tree
Lasso	K-Neighbors
	Random Forest
	Histogram-based Gradient Boosting
	Support Vector Regression

Tabelle 7: Regressionsverfahren.

Eine Besonderheit bildete hierbei das Histogram-based-Gradient-Boosting-Verfahren, da dieses über eine native Implementierung zur Verarbeitung von Datensätzen mit unvollständigen

<sup>16</sup> (Gebhardt, et al. 2015)

Informationen verfügte. Somit lieferte dieses Verfahren einen Lösungsansatz für die in Kapitel 8.2.3 festgestellten teilweise unvollständigen Wetterinformationen auf einzelnen Segmenten.

### **Prognosefehler, Optimierung und Vergleich**

Als Maß für die Prognosegüte wurde das sog. Bestimmtheitsmaß (Determinationskoeffizient)  $R^2$  verwendet. Mit diesem Maß wurde bewertet, wie gut der Gesamtverbrauch je Segment, also der prognostizierte Verbrauch je Kilometer multipliziert mit der Segmentlänge, durch das generierte Modell prognostiziert wird.

Zur Ermittlung der Prognosegüte einer speziellen Modellparametrierung wurde der Gesamtdatensatz je Fahrzeugmodell in fünf disjunkte, gleichgroße Teilmengen aufgeteilt. In fünf Iterationen wurden anschließend jeweils vier Teilmengen als Trainingsdatensatz genutzt und die fünfte Teilmenge mit dem entstandenen Modell prognostiziert und bzgl. der Prognosegüte evaluiert (Kreuzvalidierung). Als Prognosegüte einer speziellen Modellparametrierung, der in Tabelle 7 aufgeführten Verfahren, wurde die durchschnittliche Prognosegüte über alle fünf Iterationen verwendet.

Neben der reinen Implementierung der Verfahren in der Default-Konfigurationen und der Ermittlung der entsprechenden Prognosegüte, wurde für alle Verfahren eine sog. Hyperparameteroptimierung durchgeführt. Hierbei wurden für alle Verfahren die jeweils besten Parameterkonfigurationen ermittelt, mit der das jeweilige Verfahren aus den Trainingsdaten das Modell mit der höchsten Prognosegüte generiert. Hierdurch konnte eine Vergleichbarkeit der Verfahren hergestellt werden, um das beste Verfahren zur Generierung eines Prognosemodells auf Basis identischer Trainingsdaten zu ermitteln.

Als beste Verfahren konnten das sog. Histogramm-based-Gradient-Boosting-Verfahren sowie das Random-Forest-Verfahren mit einer  $R^2$ -Güte von je nach Fahrzeugmodell 0,7 bis 0,9 ermittelt werden. Die weiteren nicht-linearen Verfahren lagen bei Werten zwischen 0,5 und 0,6. Am schlechtesten schnitten die linearen Verfahren mit Werten zwischen 0,15 und 0,3 ab.

### **Berechnung und Anwendung der Prognosemodelle**

Zur Bezifferung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Sendungen im Vor- und Nachlauf entstanden so als Ergebnis zum einen fahrzeugmodellbezogene Prognosemodelle für die Fahrzeuge BMW i3, Renault Kangoo Z.E, Renault Kangoo (Diesel) und VW Caddy Maxi als auch abstraktere Modelle für die Fahrzeugklasse Hochdachkomi (Elektrisch) und Hochdachkombi (Diesel).

Die entwickelten Prognosemodelle wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Konsortialführer DAKO zur Optimierung von Touren bzgl. der anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen genutzt. Hierfür wurden alle 2,5 Millionen Kanten des Straßengraphen in Thüringen mit dem Prognosemodell bzgl. der CO<sub>2</sub>-Emissionen für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (VW Caddy Maxi) und ein Elektrofahrzeug (BMW i3) in beide Fahrtrichtungen bewertet. Die so generierte CO<sub>2</sub>-Matrix bildete die Datenbasis für den Optimierungs-Prototypen, mit dem aus historischen Tour- und Kundendaten der Praxispartner UPS und FUNKE eine CO<sub>2</sub>-minimale kooperative Tourenplanung für die Paketzustellung errechnet werden konnte.

## **9 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Die Ergebnisse des Gesamtvorhabens zeigen, dass eine Kooperation zwischen unterschiedlichen Logistikfeldern erfolgreich realisiert werden konnte und zu den beabsichtigten positiven wirtschaftlichen und ökologischen Effekten führt.

Die innerhalb des Teilprojektes erzielten Ergebnisse lieferten eine wichtige Grundlage zur Erstellung und Bewertung der innerhalb des Konsortiums entwickelten kooperativen Logistikplattform. Hierbei sind vor allem die ermittelten standardisierten Module zur Darstellung und Durchführung der kooperativen Transportprozesse, insbesondere entsprechende Service-Level-Agreements und IT-Infrastruktur, sowie die darauf aufbauende Bewertungsverfahren bzgl. anfallender Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen hervorzuheben. Diese ermöglichten zum einen Vergleiche und Optimierungen im Einsatz der vorhandenen Transportressourcen bzgl. anfallender Emissionen und Kosten und bildeten darüber hinaus die Grundlage für ein Modell zur gegenseitigen Vergütung der kooperativen Dienstleistungen im Sendungsaustausch und damit die Grundlage für ein entsprechendes Geschäftsmodell.

Die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf das Teilvorhaben SML-MODEL der Fachhochschule Erfurt. Die Ergebnisse des Gesamtvorhabens sind im Abschlussbericht des Konsortiums<sup>17</sup> sowie auf der Projektwebsite<sup>18</sup> verfügbar.

---

<sup>17</sup> Vgl. (Projektkonsortium SMART MULTI-USE LOGISTIK (Hrsg.) 2024)

<sup>18</sup> Siehe: [www.sml-projekt.de](http://www.sml-projekt.de)

## 10 Literaturverzeichnis

- ADAC e.V (Hrsg.). 2017. „Autotest: Renault Zoe (41 kWh) Intens.“ Zugriff am 29. Juni 2023.  
[https://www.adac.de/\\_ext/itr/tests/Autotest/AT5633\\_Renault\\_Zoe\\_41\\_kWh\\_Intens\\_mit\\_Batteriemiete\\_/Renault\\_Zoe\\_41\\_kWh\\_Intens\\_mit\\_Batteriemiete\\_.pdf](https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5633_Renault_Zoe_41_kWh_Intens_mit_Batteriemiete_/Renault_Zoe_41_kWh_Intens_mit_Batteriemiete_.pdf).
- Agora Verkehrswende (Hrsg.). 2019. *Klimaschutz auf Kurs bringen - Wie eine CO2-Bepreisung sozial ausgewogen wirkt*. Berlin.
- Bauer, B., und T. Bernecker. 2018. „Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland).“ *FAT-Schriftenreihe*.
- Bruhn, H, J Perseke, und P. Vatterodt. 2015. *Güterverkehr - Spedition - Logistik*. Köln.
- Corsten, H., und R. Gössinger. 2016. *Produktionswirtschaft - Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. Berlin.
- Europäische Kommission. 2017. *Verordnung (EU) 2017/1151, Anlage 7a. 01.. Juni*.
- Fiedler, J. 2007. „Fahrzeugrechnung und Kalkulation.“ In *Praxis des Controllings in Speditionen*, von D. Lohre. Frankfurt am Main. .
- Gebhardt, K., V. Schau, Wilhelm, und W. Rossak. 2015. „Applying stochastic methods for range prediction in e-mobility.“ *15th International Conference on Innovations for Community Services*. Nürnberg. 1-4.
- Haasis, H. D., S. Holdorf, und J. Röder. 2015. *Innovative Konzepte für die Logistikbranche. Chancen und Risiken für Startups in der Transportlogistik* . Berlin.
- Hiesmayr, J., M. Dippold, W. Stadlhofer, C. Zinner, und S. Hausberger. 2015. „Modellentwicklung zur Generierung von Emissionsfaktoren für motorisierte Zweiräder.“ *Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)*. Graz.
- ICCT. 2018. „Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions.“ Zugriff am 29. Juni 2023.  
[https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG\\_ICCT-Briefing\\_09022018\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf).
- Projektkonsortium SMART MULTI-USE LOGISTIK (Hrsg.). 2024. „Abschlussbericht, SMART-MULTI-USE LOGISTIK.“ Jena: Verfügbar unter:  
[http://smartcitylogistik.de/images/SML/SMART\\_MULTI-USE\\_LOGISTIK\\_Abschlussbericht.pdf](http://smartcitylogistik.de/images/SML/SMART_MULTI-USE_LOGISTIK_Abschlussbericht.pdf).
- Wietschel, M., M. Kühnbach, und D. Rüdiger. 2019. *Die aktuelle Treibhausgas-emissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland*. Karlsruhe.
- Wittenbrink, P. 2014. *Transportmanagement - Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen der Schnittstelle Rampe*. Wiesbaden.