

Entscheidungsunterstützung zur strategischen Ausrichtung der regionalen Lebensmitteldistribution in Deutschland unter Beachtung ökonomischer und ökologischer Kriterien zur kooperativen Tourenplanung

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades
einer
Doktorin der Wirtschaftswissenschaften
Dr. rer. pol.

genehmigte Dissertation
von
Christina Wüstefeld
geb. Scharpenberg
aus
Gehrden

Erstgutachterin: Prof. Dr. Jutta Geldermann
Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre
und Produktionsmanagement
Universität Duisburg-Essen

Zweitgutachterin: Prof. Dr. Heike Proff
Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre
und Internationales Automobilmanagement
Universität Duisburg-Essen

Mitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Christoph Wieland
Lehrstuhl für Maschinenbau
Universität Duisburg-Essen

Einreichung der Dissertationsschrift: 14. Februar 2024

Datum der Disputation: 08. Juli 2024

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr. Andreas Wömpener

Vorwort

Die Idee dieses Dissertationsthemas entstand bereits im Jahr 2017 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Georg-August Universität Göttingen. Der Ursprung der Idee lag in meiner Neugier und dem Interesse ein komplexes, praxisnahes Problem mithilfe wissenschaftlich anerkannter Methoden zu lösen.

Motiviert durch die vielfältigen, spannenden Arbeiten in einem großartigen Team, folgte ich zum Jahresstart 2020 dem Ruf meiner Doktormutter, Prof. Dr. Jutta Geldermann, gemeinsam mit einem Teil des Teams an die Universität Duisburg-Essen. Die abwechslungsreiche Arbeit für Prof. Dr. Geldermann war angereichert durch interdisziplinäre Teams und praxisnahe Forschungsprojekte. Dies ermöglichte mir, ein breites Wissen anzueignen und gleichzeitig viele hilfreiche Anreize und Perspektiven in meine Forschungsarbeit einfließen zu lassen.

Prof. Dr. Geldermann danke ich herzlich für die gute Zeit an beiden Lehrstühlen, die stetige Unterstützung und Förderung bei der Umsetzung meines Forschungsvorhabens und das konstruktive Feedback das maßgeblich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen hat.

Weiterhin gilt mein Dank den gesamten Teams beider Lehrstühle in Göttingen und Duisburg. Ein besonderer Dank gilt Meike Schmehl als Betreuerin meiner Masterarbeit, Tim Schröder, der mich in seinem Büro aufgenommen hat, und Tobias Lühn für die Übergabe meiner ersten Projektarbeit - Dank euch hatte ich einen leichten Start und von Beginn an Ansprechpartner für meine Fragen.

Am längsten habe ich schließlich mit Beatriz Beyer, Lars Lauven und Tobias Witt in Göttingen sowie schließlich mit dem erweiterten Duisburger-Team bestehend aus Erik Pohl, Marcel Dumeier, Sebastian Schär, Leon Zacharopoulos und Isabell Wiemer zusammengearbeitet. Ihr habt die Promotions-Zeit unvergesslich gemacht.

Obwohl ich wohnhaft in Göttingen blieb, fühlte ich mich als Teil des Duisburger-Teams und freute mich auf jedes Präsenztreffen in Duisburg. Danke euch allen für die zahlreichen Diskussionen und Gespräche auf Konferenzen, in Kaffeepausen und Mittagspausen sowie die stetige Unterstützung und den Austausch aus der Ferne.

Meinen Eltern, Heike und Henning Scharpenberg, meinem Bruder und meiner Schwägerin Thomas und Mira Scharpenberg, danke ich für den Rückhalt und die seelische Unterstützung. Einen großen Beitrag zur Fertigstellung hat mein Mann, Tobias Wüstefeld, geleistet. Er hat mich stets zur Weiterarbeit ermutigt und mir den Rücken freigehalten.

Nicht zuletzt danke ich dem Prüfungsgremium bestehend aus Prof. Dr. Wömpener, Prof. Dr. Proff und Prof. Dr. Wieland für die konstruktiven Anmerkungen und die reibungslose Organisation der Prüfung.

All die genannten Personen haben zum erfolgreichen Abschluss meines Promotionsvorhabens beigetragen.

Zusammenfassung

Zur Deckung des steigenden Bedarfs deutscher Konsumenten an regionalen Lebensmitteln werden in Deutschland zunehmend Produkte kleiner Erzeugerbetriebe in das gängige Sortiment des Lebensmitteleinzelhandels (LEHs) aufgenommen. Die kleinen regionalen Erzeuger fahren ihre Produkte meist selbst und vor allem ohne die Bündelung der Produkte mehrerer Erzeuger in die Märkte des LEHs. Diese Einzelanlieferungen stellen für den LEH die Herausforderung dar, jeden Erzeuger von der Bestellung, über die Anlieferung und die Verräumung der Waren bis hin zur Rechnungstellung einzeln abwickeln zu müssen. Für die Erzeuger entsteht ein Transportaufwand, der sie von der Konzentration auf ihr Kerngeschäft abhält.

In Deutschland werden die kleinen Betriebe von zahlreichen Regionalvermarktungsinitiativen bei der Vermarktung ihrer Produkte unterstützt. Insgesamt fehlt aber eine allgemeine, ganzheitliche Strategie für die Distribution regionaler Lebensmittel zum LEH. Das übergeordnete Ziel dieser Dissertation ist, den Regionalvermarktungsinitiativen eine fundierte Entscheidungsgrundlage zur Entwicklung einer geeigneten Auslieferungsstrategie aus Umwelt- und Kostenperspektive zu geben. Zur Entwicklung einer solchen Entscheidungsgrundlage werden verschiedene Auslieferungsstrategien mit Methoden des Operations Research miteinander verglichen: zwei verschiedene Strategien der eigenen Auslieferung seitens der Erzeuger sowie eine kooperative Auslieferungsstrategie seitens der Regionalvermarktungsinitiativen mit und ohne die Einstellung von Fahr- und Lagerpersonal. Gesucht wird eine Auslieferungsstrategie mit minimalem Kosten-, Emissions- und Zeitaufwand.

Anhand verschiedener Kalkulationen mit Travelling Salesman und Vehicle Routing Modellen wird gezeigt, dass sich eine Umstrukturierung der Transporte regionaler Lebensmittel von einer Streckenbelieferung, aber auch von einer eigenen Auslieferung mittels Rundtouren seitens der Erzeuger hin zu einer kooperativen Tourenplanung aus ökologischer und ökonomischer Sicht in fast allen betrachteten Fällen lohnt. Anhand eines Fallbeispiels sowie einer umfassenden Szenarioanalyse wird dargestellt, wie eine solche kooperative Tourenplanung möglichst optimal ausgestaltet werden kann.

Insgesamt können mit der kooperativen Tourenplanung Kosteneinsparungen von bis zu 80 % und eine Reduzierung der Transport bedingten Emissionen von bis zu 93 % realisiert werden. Im günstigsten Fall wird die Distribution für rund 100 Erzeuger in einem Zwei-Schicht-Betrieb mit einem Kleintransporter durchgeführt. Auf diese Weise kann gegenüber dem Ein-Schicht-Betrieb eine Reduktion des relativen Fahraufwands je Erzeuger von rund 20 % erzielt werden.

Summary

To meet the growing demand of German consumers for regional foods, products from small producers are increasingly being included in the standard range of food retailers (LEHs) in Germany. The small regional producers usually deliver their products to the food retail markets themselves and without bundling the products of several producers. These individual deliveries pose the challenge for food retailers of having to handle each producer individually, from ordering, delivery and stocking of the goods through to invoicing. This results in transportation costs for producers, which prevents them from concentrating on their core business.

In Germany, small businesses are supported by numerous regional initiatives in marketing their products. However, a general, holistic strategy for the distribution of regional foods to food retailers is lacking. The overall aim of this dissertation is to provide regional marketing initiatives with a holistic decision-making basis for the development of a suitable distribution strategy from an environmental and cost perspective. To develop such a basis, different delivery strategies using operations research methods are compared with each other: two different strategies of own delivery on the part of the producers as well as a cooperative delivery strategy on the part of the regional marketing initiatives with and without the employment of driving and storage personnel. The aim is to find a delivery strategy that minimizes costs, emissions and time.

Based on various calculations with Travelling Salesman and Vehicle Routing models, it is shown that a restructuring of the transportation strategy of regional foods from a route delivery, but also from a self-delivery via round trips by the producers, to a cooperative route planning is worthwhile from an ecological and economic point of view in almost all cases considered. A case study and a comprehensive scenario analysis are used to show how such cooperative route planning can be designed the best possible.

Overall, cooperative route planning can achieve cost savings of up to 80% and a reduction in transport-related emissions of up to 93%. In the best-case scenario, distribution for around 100 producers is carried out in a two-shift operation with one van. In this way, a reduction of around 20 % in the relative travel costs per producer can be achieved compared to single-shift operation.

Inhaltsverzeichnis

<i>Zusammenfassung</i>	I
<i>Summary</i>	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Formelverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis.....	X
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
1 Einleitung	12
1.1 Ökologische Betrachtung der regionalen Lebensmitteldistribution	13
1.2 Ökonomische Betrachtung der regionalen Lebensmitteldistribution	13
1.3 Zielsetzung der Dissertation und Beschreibung des Vorgehens	14
2 Status Quo Analyse der regionalen Lebensmittelvermarktung in Deutschland	16
2.1 Definition des Begriffes „Regionalität“ in der deutschen Lebensmittelvermarktung	17
2.2 Absatzkanäle zur Vermarktung regional erzeugter Lebensmittel	19
2.3 Ausgestaltung der Logistiknetzwerke zur regionalen Lebensmittelvermarktung	21
2.3.1 Klassische Belieferungskonzepte des stationären Handels.....	21
2.3.2 Belieferungskonzepte der regionalen Lebensmitteldistribution	22
2.4 Herausforderungen, Perspektiven und Anforderungen der Regionalvermarktung von Lebensmitteln in Deutschland	23
2.4.1 Herausforderungen zur Schaffung eines kooperativen Transportsystems für die Regionalvermarktung von Lebensmitteln	24
2.4.2 Perspektiven und Anforderungen des Lebensmitteleinzelhandels an die Schaffung eines kooperativen Transportsystems für die Regionalvermarktung von Lebensmitteln	25
2.4.3 Perspektive und Anforderungen kleiner, regionaler Erzeuger an die Schaffung eines kooperativen Transportsystems für die Regionalvermarktung von Lebensmitteln	26
2.4.4 Zusammenfassung der Anforderungen an die Tourenplanung zur Schaffung eines kooperativen Transportsystems seitens Regionalvermarktungsinitiativen	28
3 Grundlagen der Fahrzeugkostenrechnung	30
3.1 Hauptkostengruppe A: Variable, kilometerabhängige Kosten	31
3.2 Hauptkostengruppe B: Fahrpersonal	33

3.3 Hauptkostengruppe C: Fixe zeitabhängige Kosten	34
3.4 Hauptkostengruppe D: Gemeinkosten	36
3.5 Verteilung der Kostengruppen und -positionen auf die gesamten Fahrzeugkosten	37
4 Methodischer Ansatz des Vehicle Routing Problems.....	39
4.1 Abgrenzung des Standard-Transportproblems vom klassischen Vehicle Routing Problem	41
4.2 Erweiterungen des Vehicle Routing Problems.....	43
4.2.1 Konventionelle Erweiterungen des Vehicle Routing Modells	43
4.2.2 Erweiterungen des Vehicle Routing Modells zur Minimierung von Fahrzeugemissionen.	45
4.3 Verfahren zur Lösung von Vehicle Routing Problemen	47
4.3.1 Exakte Verfahren zur Lösung von VRPs	48
4.3.2 Heuristiken.....	50
5 Entwicklung einer Auslieferungsstrategie zur regionalen Lebensmitteldistribution	55
5.1 Beispielhafte Fahrzeugkostenrechnung für Fahrzeuge zur regionalen Lebensmitteldistribution	57
5.2 Bestimmung von Emissionsfaktoren für beispielhafte Fahrzeugtypen zur regionalen Lebensmitteldistribution	61
5.3 Mathematische Modellformulierungen zur Lösung der Tourenplanungsprobleme	62
5.3.1 Entwicklung eines geeigneten Travelling Salesman Modells zur Lösung der Rundtouren bei eigener Auslieferung der Erzeuger	62
5.3.2 Entwicklung eines geeigneten Vehicle Routing Modells zur Lösung des kooperativen Tourenplanungsproblems.....	64
5.4 Bestimmung der Bewertungsparameter zur Evaluation der passendsten Auslieferungsstrategie anhand des Fallbeispiels einer Regionalvermarktungsinitiative	66
5.4.1 Eigene Auslieferung seitens der Erzeuger	68
5.4.2 Kooperative Tourenplanung aller Erzeuger.....	70
5.5 Szenarioanalyse mittels einer VeRyPy-Heuristik	81
5.5.1 Lösung des angepassten Basisszenarios für das Fallbeispiel zur kooperativen Tourenplanung mit VeRyPy und Validierung der Heuristik	82
5.5.2 Erstellung der Szenarien	85
5.5.3 Ergebnisse der Szenarioanalyse.....	89
5.6 Zwischenfazit über die Auslieferungsstrategie zur regionalen Lebensmitteldistribution	

6	Ökonomische und ökologische Bewertung der Auslieferungsstrategien	97
6.1	Ökonomische Bewertung der Auslieferungsstrategien	99
6.2	Ökologische Bewertung der Auslieferungsstrategien	103
6.3	Diskussion und Empfehlung über die strategische Ausgestaltung der Transporte bei der regionalen Lebensmitteldistribution	105
7	Fazit und Beantwortung der Forschungsfragen	115
8	Literaturverzeichnis	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9	Anhang.....	126

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Hauptmerkmale für den Kauf regionaler Lebensmittel und die Assoziationen der Verbraucher mit diesen Merkmalen.....	16
Abbildung 2-2: Ergebnisse einer Verbrauchermfrage zur Begriffsdefinition von Regionalität.	18
Abbildung 2-3:Klassische Belieferungskonzepte des stationären Handels	22
Abbildung 2-4: Logistikstrukturen regionaler Lebensmittelvermarktung und die Rolle der Akteure.....	22
Abbildung 3-1: Hauptkostengruppen der Fahrzeugkostenrechnung in Anlehnung an Wittenbrink (2011) und Gries und Zelewski (2015)	30
Abbildung 3-2: Entwicklung der durchschnittlichen Energiepreise für Diesel, Benzin und Strom von 2012 bis 2022 (Statistisches Bundesamt und en2x 2023b, 2023a; Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt 2023b, 2023a).....	32
Abbildung 3-3: Kraftstoffkosten verschiedener Fahrzeugtypen in ct/km für das Jahr 2018 (in Anlehnung an Statistisches Bundesamt und en2x (2023a), Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt (2023a), Schwartz (2017).....	33
Abbildung 4-1: Beispiel eines gemischten Graphen.....	40
Abbildung 4-2. Beispiel eines möglichen Tourenplans für das Netzwerk aus Abbildung 4-1.	40
Abbildung 4-3: Überblick über häufige Varianten des VRP (Irnich et al. 2014; Domschke und Scholl 2010; Fleischmann und Gietz 2008; Vogt 1998)	44
Abbildung 4-4: Faktoren, die den Kraftstoffverbrauch beeinflussen (Demir et al. 2014a)	45
Abbildung 4-5: Überblick über exakte Verfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen...	48
Abbildung 4-6: Beispiel eines Lösungsbaumes mit vier Teilproblemen.....	49
Abbildung 4-7: Überblick über heuristische Verfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen	50
Abbildung 4-8: Fließdiagramm Clarke und Wirght Algorithmus (Robbins und Turner 1979) .	52
Abbildung 4-9: Fließdiagramm Lin 2-Opt-Verfahren (Robbins und Turner 1979)	53
Abbildung 4-10: Swap zweier Kanten innerhalb einer Route des Tourenplans	54
Abbildung 4-11: Swap zweier Kanten zwischen zwei verschiedenen Routen	54
Abbildung 5-1: Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen.....	55
Abbildung 5-2: Kostenverteilung PKW bei 20.000 km Jahresfahrleistung	59
Abbildung 5-3: Kostenverteilung Elektro-Van (3,5 t) bei 6.000 km Jahresfahrleistung	59
Abbildung 5-4: Kostenverteilung Diesel-Van (3,5 t) bei 6.000 km Jahresfahrleistung	60

Abbildung 5-5: Kostenverteilung Kleintransporter-Diesel (5-7,5 t) bei 8.000 km Jahresfahrleistung.....	60
Abbildung 5-6: Kostenverteilung Transporter Diesel (12-18 t).....	60
Abbildung 5-7: Verteilung der Knoten der Regionalvermarktungsinitiative	67
Abbildung 5-8: Kumulierte Streckenbelieferung bei zentraler Lage des Erzeugungsstandortes	68
Abbildung 5-9: Kumulierte Streckenbelieferung bei dezentraler Lage des Erzeugungsstandortes.....	68
Abbildung 5-10: Optimale Rundtour bei zentraler Lage des Erzeugungsstandortes	69
Abbildung 5-11: Optimale Rundtour bei dezentraler Lage des Erzeugungsstandortes	69
Abbildung 5-12: Regionale Zuordnung der Regionalvermarktungsinitiative	71
Abbildung 5-13. Angepasste regionale Zuordnung der Erzeuger.....	71
Abbildung 5-14: Ausgestaltung der kooperativen Tourenplanung.....	73
Abbildung 5-15: Verteilung der Erzeuger mit Frischeprodukten	74
Abbildung 5-16: Verteilung der Erzeuger mit haltbaren Produkten	74
Abbildung 5-17: Einsammlung Frischeprodukte – Min Kosten	75
Abbildung 5-18: Einsammlung Frischeprodukte – Min Emissionen.....	75
Abbildung 5-19: MIPGap für die Einsammlungstouren der haltbaren Produkte über die Rechenzeit von 120 min mit Gurobi.....	76
Abbildung 5-20: Einsammlung haltbare Produkte – Min Kosten	76
Abbildung 5-21: Einsammlung haltbare Produkte – Min Emissionen	76
Abbildung 5-22: Auslieferungstour – Min Kosten	77
Abbildung 5-23: Auslieferungstour – Min Emissionen.....	77
Abbildung 5-24: Kostenverteilung fahrzeugspezifischer Kostensätze bei einer Jahreskilometerleistung von 80.000 km.....	80
Abbildung 5-25: Einsammlungstour Frischeprodukte - VeRyPy.....	83
Abbildung 5-26: Einsammlungstour Frischeprodukte - Gurobi.....	83
Abbildung 5-27: Auslieferungstouren alle Produkte - VeRyPy	84
Abbildung 5-28: Auslieferungstouren alle Produkte - Gurobi	84
Abbildung 5-29: Einsammlungstouren haltbare Produkte - VeRyPy	85
Abbildung 5-30: Zufällig erzeugte Knoten im 100 km Radius um das Depot.....	86
Abbildung 5-31: Anzahl Regionalvermarktungsinitiativen nach Mitgliedergröße in Deutschland	86

Abbildung 5-32: Verteilung von Regionalvermarktungsinitiativen auf Mitgliedergrößen	87
Abbildung 5-33: Verteilung der Erzeuger-Knoten für alle Szenarien	88
Abbildung 5-34: Ergebnisse der Szenarioanalyse hinsichtlich der Fahrzeiten	90
Abbildung 5-35: Ergebnisse der Szenarioanalyse hinsichtlich der zurückgelegten Distanzen	90
Abbildung 6-1: Kooperative Tourenplanung bei mittleren Transportmengen (1-5 Kisten je Erzeuger) mit 3,5 t Van bezogen auf den Planungszeitraum einer Arbeitswoche	98
Abbildung 6-2: Gegenüberstellung der verbrauchsabhängigen Kraftstoffkosten in den Jahren 2018 und 2022 für fünf Fahrzeugtypen.....	99
Abbildung 6-3: Strategie 1 - Kooperative Tourenplanung mit Einstellung eines Fahrers (2018)	101
Abbildung 6-4: Strategie 2 - Kooperative Tourenplanung ohne Einstellung eines Fahrers (2018).....	101
Abbildung 6-5: Szenarien 1 – 3 für 100 Erzeuger im Zwei-Schicht-Betrieb (Erz.H2).....	102
Abbildung 6-6: Gegenüberstellung der Transportkosten im Ein-Schicht-Betrieb.....	103
Abbildung 6-7: Ökologische Bewertung der kooperativen Tourenplanung – Vergleich mit Diesel-PKW.....	104
Abbildung 6-8: Ökologische Bewertung der kooperativen Tourenplanung – Vergleich mit Elektro-PKW.....	104

Formelverzeichnis

Nutzungsabschreibungen.....	35
Zinsbelastung.....	35
Gesamte Fahrzeugkosten	37
Klassisches VRP.....	42
Ladungsabhängiger Energieverbrauch.....	46
Branching.....	49
Clarke-Wright Vorgehen.....	51
Energieverbrauch Elektrofahrzeug	62
Travelling Salesman Problem.....	64
Vehicle Routing Modell zur kooperativen Tourenplanung.....	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vergleich der empfohlenen Vertriebswege kleinerer und größerer Absatzmengen	20
Tabelle 4-1: Zeit-Komplexitätsfunktion für Problemklassen	47
Tabelle 5-1: Annahmen zur Fahrzeugkostenrechnung bei unterschiedlicher Fahrleistung pro Jahr	59
Tabelle 5-2: Summe der Fahrzeugkostenrechnung in €/km bei unterschiedlicher Jahresfahrleistung	61
Tabelle 5-3: Ergebnisse der Fahrzeugkostenrechnung in % bei 130.000 km Jahresfahrleistung	61
Tabelle 5-4: Fahrzeugemissionen für fünf ausgewählte Fahrzeugtypen	62
Tabelle 5-5: Angaben zur Verteilung der Erzeuger [km]	68
Tabelle 5-6: Allgemeine Annahmen für das Basisszenario	72
Tabelle 5-7: Fahrzeugbezogene Basisannahmen.....	72
Tabelle 5-8: Verteilung der Erzeuger um das Depot in km.....	75
Tabelle 5-9: Transportkostensätze bei einer Jahreskilometerleistung von 80.000 km in €/km	79
Tabelle 5-10: Variation der durchschnittlichen Transportmengen je Knoten	88
Tabelle 5-11: Überblick über die Charakteristika der Tourenplanungsergebnisse bei geringen Transportmengen von 1-5 Kisten je Erzeuger	91
Tabelle 5-12: Überblick über die Charakteristika der Tourenplanungsergebnisse bei mittleren Transportmengen von 5-10 Kisten je Erzeuger	92
Tabelle 6-1: Kooperative Tourenplanung mit 5-7,5 t Kleintransporter bei unterschiedlichen Transportmengen bezogen auf den Planungszeitraum einer Arbeitswoche.....	98
Tabelle 6-2: Bewertung der eigenen Auslieferung seitens der Erzeuger (2018) mit wenig Kisten	100
Tabelle 6-3: Notation für Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4.....	101
Tabelle 6-4: Notation für Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8.....	104

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.
API	Application Programming Interface
BuB	Branch-and-Bound-Verfahren
CMEM	Comprehensive Modal Emission Model
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO _{2äq}	Kohlenstoffdioxid Äquivalente
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
HVRP	Heterogeneous Vehicle Routing Problem
LEH	Lebensmitteleinzelhandel
MDVRP	Multi-Depot Vehicle Routing Problem
THG	Treibhausgas
TREMOD	Transport Emission Model
TSP	Travelling Salesman Problem
TTW	Tank-to-Wheel
OSM	OpenStreetMap
PRP	Pollution Routing Problem
PVRP	Periodic Vehicle Routing Problem
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPB	Vehicle Routing Problem with Backhauls
VRPPD	Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
WTW	Well-to-Wheel

1 Einleitung

In Deutschland lag der Anteil ökologisch erzeugter Lebensmittel im Jahr 2021 bei 8 % des gesamten Umsatzes an Lebensmitteln im Einzelhandel (Ahrens, 2022). Für etwa 90 % der Konsumenten stellt die Regionalität eines der wichtigsten Kaufkriterien für ökologisch erzeugte Lebensmittel dar (BMEL, 2022; IfH Köln, 2019). Insgesamt spielt die regionale Herkunft von Lebensmitteln eine große Rolle bei der Kaufentscheidung der Konsumenten (BMEL, 2021, 2022). Bereits seit dem Jahr 2018 steigt das Interesse deutscher Konsumenten an regional erzeugten Lebensmitteln stetig an (Pawlik, 2022). Damit gehören regionale Produkte zusammen mit Bioprodukten zu den am stärksten wachsenden Sortimenten im deutschen Lebensmitteleinzelhandel (LEH) (BMEL, 2021; LZ, 2020). Insbesondere Frischeprodukte wie Fleisch, Obst und Gemüse werden bevorzugt regional eingekauft (BMEL, 2021; Gremmer et al., 2016). Verbraucher assoziieren mit regional erzeugten Lebensmitteln neben einer erhöhten Transparenz über die Herkunft des Produktes gegenüber überregional erzeugten Lebensmitteln u. a. eine Stärkung der regionalen Wirtschaft sowie mehr Umweltfreundlichkeit und Frische durch kurze Transportwege (Buxel, 2017; Nitsche & Figiel, 2016).

Zur Deckung dieses steigenden Bedarfs an regionalen Lebensmitteln werden in Deutschland zunehmend Produkte kleiner Erzeugerbetriebe in das gängige Sortiment des LEHs aufgenommen. In Deutschland werden die kleinen Betriebe von zahlreichen Initiativen bei der Vermarktung ihrer Produkte unterstützt. Unter dem Dachverband, dem Bundesverband Regionalbewegung e. V., sind die zahlreichen Regionalvermarktungsinitiativen in Deutschland vernetzt und gelistet (Bundesverband Regionalbewegung, 2022). Primäres Ziel ist die Stärkung und der Erhalt kleiner und mittelständischer Unternehmen gegenüber großen global agierenden Unternehmen (Bundesverband Regionalbewegung e. V., 2020a).

Die Bestrebungen der Regionalvermarktungsinitiativen gehen mit den im Jahr 2015 verabschiedeten Sustainable Development Goals (SDGs) der 2030-Agenda für Nachhaltige Entwicklung einher (BMUV, 2023). Diese Agenda umfasst 17 Nachhaltigkeitsziele, SDGs, welche weder strikt voneinander getrennt betrachtet noch isoliert umgesetzt werden können (BMUV, 2023; United Nations, 2023).

Regionalvermarktungsinitiativen fördern insbesondere drei SDGs: Nr. 2 „Den Hunger beenden, Ernährungssicherheit und eine bessere Ernährung erreichen und eine nachhaltige Landwirtschaft fördern“. Nr. 11 „Städte und Siedlungen inklusiv, sicher, widerstandsfähig und nachhaltig gestalten“ und Nr. 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“ (BMUV, 2023; United Nations, 2023) zu fördern. Vor allem auf das „Unterziel 2.3 Produktivität und Einkommen von Kleinbauern verdoppeln“ sowie das „Unterziel 11.A Verstärkte nationale und regionale Entwicklungsplanung“ können Regionalvermarktungsinitiativen Einfluss ausüben (BMUV, 2023; United Nations, 2023).

Eine Stärkung regionaler Erzeugerstrukturen stärkt auch die Wirtschaft vor Ort. Regionale Produktionskapazitäten vorzuhalten, erhält Unabhängigkeiten und macht eine Region in Krisenzeiten, z. B. ausgelöst durch Kriege oder die Corona-Pandemie, weniger anfällig. In

Krisenzeiten ist es einfacher, kurze als lange Lieferketten aufrecht zu erhalten. Zudem kennen kleine, in der Region vernetzte Erzeuger die Bedürfnisse einer Region und können ihre Betriebe besser danach ausrichten als größere Konzerne. Allerdings können größere Betriebe Vorteile durch Größendegression gegenüber kleineren Betrieben realisieren. Daher ist gerade die ökologische Nachhaltigkeit bei kleineren Betrieben nicht automatisch besser als bei größeren (Penker & Schlich, 2015). Umso wichtiger ist, im ganzheitlichen Sinne, die bestehenden Transportbedingungen kleiner, regionaler Erzeuger zu verbessern und die Klimabilanz der Transporte zu reduzieren. So kann regionale Erzeugung im ökologischen und sozialen Sinne nachhaltig ausgestaltet werden.

1.1 Ökologische Betrachtung der regionalen Lebensmitteldistribution

Die tatsächlichen Umweltauswirkungen eines Lebensmittels sind von den verschiedenen Lebenswegabschnitten, wie der Produktion, der Verarbeitung, dem Transportweg und dem Einkaufsverhalten der Verbraucher abhängig (Kögl et al., 2009; Scharpenberg, 2016). So kann die Ausgestaltung der Transportwege einen entscheidenden Einfluss auf die Umweltfreundlichkeit eines regional erzeugten Produktes gegenüber einem überregionalen Produkt haben (Kögl et al., 2009). So zeigte sich, dass vor allem der Einkauf der Verbraucher mit dem Auto ab Hof relativ hohe Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) hervorrufen und damit einen signifikanten Einfluss auf die gesamte Umweltbilanz des Produktes haben kann (Kögl et al., 2009; Scharpenberg, 2016). Die Ausgestaltung der Transportprozesse kann die gesamte Umweltfreundlichkeit eines Produktes maßgeblich beeinflussen (Kögl et al., 2009; Scharpenberg, 2016). Um die THG-Emissionen der Transporte regionaler Produkte möglichst gering zu halten und dem Nachhaltigkeitsbestreben der Konsumenten sowie den SDGs als Ganzes bestmöglich nachzukommen, sollte die Auslieferungsstrategie dieser Produkte genau durchdacht werden.

1.2 Ökonomische Betrachtung der regionalen Lebensmitteldistribution

In der Praxis werden die Produkte kleiner regionaler Erzeuger häufig von den Erzeugern selbst und vor allem ohne die Bündelung der Produkte mehrerer Erzeuger in die Märkte des LEHs gefahren (Interview, 2018; kostbares Südniedersachsen e. V., 2019; Marktleitung, 2017; Persönliches Interview mit dem Vorstandsvorsitzenden eines regionalen Erzeugerverbandes, 2017; Reindl Leonard et al., 2012). Diese Einzelanlieferungen stellen für den LEH die Herausforderung dar, jeden Erzeuger von der Bestellung über die Anlieferung und die Verräumung der Waren bis hin zur Rechnungstellung einzeln abwickeln zu müssen. Für die Erzeuger entsteht ein Transportaufwand, der sie von der Konzentration auf ihr Kerngeschäft abhält (Interview, 2018).

Die Transporte kleiner regionaler Erzeuger ähneln aus reiner Tourenplanungssicht dem aus der Literatur bekannten Problem der „letzten Meile“. Als die letzte Meile wird der letzte Logistikabschnitt einer Sendung, meist die so genannte Haustürbelieferung eines Kunden,

bezeichnet. Dieser Abschnitt der Transportprozesse verursacht aufgrund vieler kleinteiliger Lieferungen vergleichsweise hohe Transportkosten und einen hohen Zeitaufwand (Baldi et al., 2019; Gevaers et al., 2014).

1.3 Zielsetzung der Dissertation und Beschreibung des Vorgehens

Wenn die Umweltfreundlichkeit eines Produktes maßgeblich von dessen Transport abhängen kann, wird angenommen, dass auch der Transport regionaler Erzeugnisse zum LEH seitens der kleinen Erzeuger die Umweltbilanz beeinflusst. Bislang existieren jedoch wenige belastbare, quantitative Erkenntnisse zu dieser Frage. ***Insgesamt fehlt eine allgemeine, ganzheitliche Strategie für die Distribution regionaler Lebensmittel zum LEH.***

Der Bundesverband Regionalbewegung e. V. (2020b) hat sich zum Ziel gesetzt ein „umfassendes Konzept für regionale Strukturen“ zu schaffen (Bundesverband Regionalbewegung e. V., 2020b). Bestehende Studien haben gezeigt, dass vor allem die Bewältigung der Logistik eine große Herausforderung für die Erzeuger darstellt (Czech et al., 2002; Figiel, 2016; Gremmer et al., 2016; Hausladen et al., 2010; Nitsche & Figiel, 2016; Reindl Leonard et al., 2012). Eine Umstrukturierung weg von der Streckenbelieferung durch einzelne Erzeuger hin zu einer kooperativen Tourenplanung wird demnach als vielversprechend angesehen.

Die Schaffung einer geeigneten, möglichst optimalen kooperativen Auslieferungsstrategie zur Vermarktung der Lebensmittel ist bislang ungeklärt (Hausladen et al., 2010; Nitsche & Figiel, 2016; Reindl Leonard et al., 2012). Nicht jeder Erzeuger hat ein Interesse an einer kooperativen Tourenplanung, da die möglichen Vorteile nicht gesehen werden (Reindl Leonard et al., 2012). Entweder die Erzeuger fahren selbst und die Auslieferung von Ware wird mit anderen Erledigungen verbunden oder die tatsächlichen Logistikkosten der eigenen Auslieferung sind unbekannt und werden unterschätzt (Hausladen et al., 2010; Interview, 2018; kostbares Südniedersachsen e. V., 2019; Mitarbeiterin für Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit, 2018; Reindl Leonard et al., 2012). Transparenz über die tatsächlichen Kosten und mögliche Ersparnisse durch alternative Logistikkösungen fehlt.

Regionalvermarktungsinitiativen ist das Transparenzproblem bekannt. Sie wollen sowohl die Märkte als auch die Erzeuger entlasten und eine Lösung für die Herausforderungen des Warentransportes finden, haben aber begrenzte Kapazitäten und Möglichkeiten. Aufgrund der oben aufgeführten Erläuterungen sollte ein solcher Warentransport möglichst umweltfreundlich gestaltet werden, um dem Umweltschutzbestreben der Verbraucher beim Kauf regionaler Produkte nachzukommen. Andererseits müssen die Kosten des Warentransportes möglichst geringgehalten werden, damit dieser für die Erzeuger wirtschaftlich ist. Somit stellen sich zwei wesentliche Forschungsfragen:

1. *Wie sollte eine kostengünstige Auslieferungsstrategie für die Erzeuger seitens der Regionalvermarktungsinitiativen gestaltet werden?*
2. *Wie unterscheiden sich verschiedene Strategien hinsichtlich ihrer Umweltfreundlichkeit?*

Aus den vorangegangenen Erläuterungen ergibt sich das ***übergeordnete Ziel dieser Dissertation, den Regionalvermarktungsinitiativen eine fundierte Entscheidungsgrundlage***

zur Entwicklung einer geeigneten Auslieferungsstrategie aus Umwelt- und Kostenperspektive zu geben. Zur Entwicklung einer solchen Entscheidungsgrundlage werden verschiedene Auslieferungsstrategien miteinander verglichen: Zwei verschiedene Strategien der eigenen Auslieferung seitens der Erzeuger sowie eine kooperative Auslieferungsstrategie seitens der Regionalvermarktungsinitiativen mit und ohne die Einstellung von Fahr- und Lagerpersonal. Gesucht wird eine Auslieferungsstrategie mit minimalem Kosten-, Emissions- und Zeitaufwand. Dazu werden verschiedene Kalkulationen mittels Methoden des Operations Research, dem Travelling Salesman Problem und passenden Vehicle Routing Modellen durchgeführt. Alle drei Strategien werden zunächst anhand eines geeigneten Fallbeispiels analysiert und verglichen. An die Analyse des Fallbeispiels schließt eine umfassende Szenarioanalyse mittels zufällig ermittelter Parameter für Fahrzeiten, Distanzen und Transportmengen an. Zudem werden die Betriebsabläufe zwischen Erzeugern und Märkten genauer betrachtet, um eine optimale Transportstrategie im Einklang mit den SDGs zu entwickeln.

Das Vorgehen gliedert sich wie folgt: Im zweiten Kapitel wird der Begriff „Regionalität“ definiert sowie der Status Quo der regionalen Lebensmittelvermarktung analysiert. Im dritten Kapitel werden die verwendete Methode der Fahrzeugkostenrechnung erläutert. Im Anschluss (Kapitel vier) wird die Methodik des so genannten Vehicle Routing Problems zur Simulation von Auslieferungstouren dargelegt. Die speziellen Anforderungen des vorliegenden Problems der regionalen Lebensmitteldistribution werden fokussiert und in den Gesamtkontext der wissenschaftlich verfügbaren Tourenplanungsmethoden eingeordnet.

Kapitel fünf umfasst die detaillierte Analyse der Auslieferungsstrategien. Zuerst werden die genauen Fahrzeugkosten und Emissionsfaktoren bestimmt. Anschließend wird das oben erwähnte Fallbeispiel mittels der Programmiersprache Python in der Optimierungssoftware Gurobi v. 3.6 (Gurobi Optimization, 2022a) implementiert und innerhalb des Programms gelöst. Erste gewonnene Erkenntnisse aus dem Fallbeispiel werden genutzt, um Modellparameter und die Berechnungsmethodik anzupassen. Danach wird eine Szenarioanalyse durchgeführt. Um die Rechenzeit zu verkürzen und das Modell in angemessener Zeit für verschiedene Szenarien lösen zu können, wird mit einer Heuristik der Python-Bibliothek VeRyPy gearbeitet (Rasku et al., 2019). Die Szenarioanalyse dient dem Nachweis der Robustheit der Ergebnisse und der Abschätzung des Risikos bei einer Übertragung der Ergebnisse auf andere Regionalvermarktungsinitiativen. Der Fokus des gesamten Kapitels 5 liegt darauf, Fahrzeiten, Distanzen, geeignete Fahrzeuge und Fahrerbedarfe sowie sinnvolle Mitgliederanzahlen von Regionalvermarktungsinitiativen zu ermitteln. In Abschnitt 5.6 wird zu diesen Aspekten ein kurzes Zwischenfazit gezogen.

In Kapitel sechs werden die Ergebnisse des Zwischenfazits zuerst mit den Kosten- und Emissionsfaktoren bewertet. Anschließend werden die Erkenntnisse und Grenzen der Dissertation sowie weiterer Forschungsbedarf umfassend diskutiert, sodass eine abschließende Empfehlung zur Ausgestaltung der regionalen Lebensmitteltransporte für Regionalvermarktungsinitiativen gegeben werden kann. Im letzten Kapitel sieben wird ein Fazit gezogen und konkret auf die Beantwortung der eingangs gestellten Forschungsfragen eingegangen.

2 Status Quo Analyse der regionalen Lebensmittelvermarktung in Deutschland

In diesem Kapitels wird ein Überblick über die gängigen Definitionsansätze der Regionalität gegeben. Weiterhin werden insbesondere die Absatzkanäle und die aktuellen Logistikstrukturen der deutschen Regionalvermarktung vorgestellt.

Besonders Kleinst- und kleine Lebensmittelbetriebe (maximal 5 bzw. 50 Mitarbeiter) sehen die Regionalität ihrer Produkte als entscheidenden Erfolgsfaktor für die Vermarktung an (Buxel, 2018). Laut BMEL (2018) legen 78 % der Verbraucher Wert auf Regionalität bei der Herkunft von Lebensmitteln.

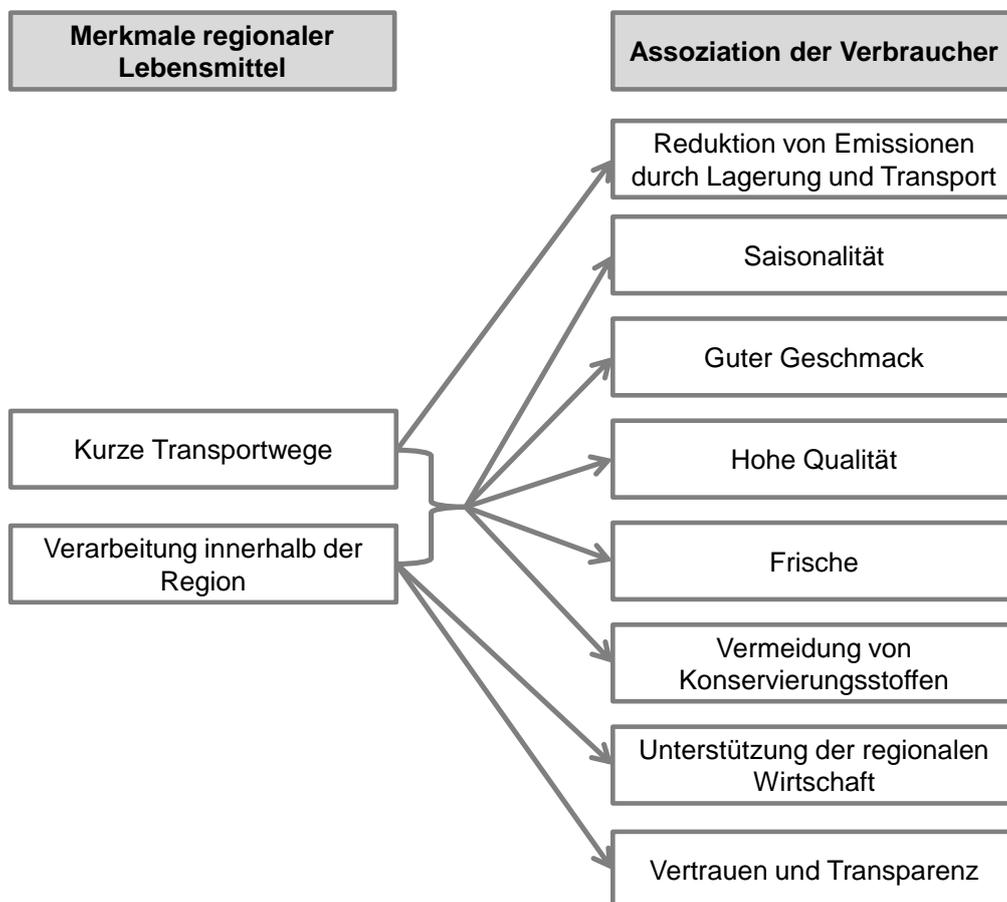


Abbildung 2-1 Hauptmerkmale für den Kauf regionaler Lebensmittel und die Assoziationen der Verbraucher mit diesen Merkmalen

Quellen: Eigene Darstellung nach Erkenntnissen von Statista (2017), Nitsche & Figiel (2016), Gremmer et al. (2016) und Warschun et al. (2013).

Abbildung 2-1 zeigt eine Übersicht der besonderen Merkmale regionaler Produkte, die Verbraucher zum Kauf anregen. Laut einer Studie von Hermanowski et al. (2014, S. 88) gaben über 90 % der Befragten kurze Transportwege als wichtiges Kaufmotiv an. Die Bedeutung der Transportwege bestätigen auch die Umfragen von Nitsche & Figiel (2016, S. 17 f.) und Warschun et al. (2013, S. 4). Mit kurzen Transportwegen assoziierten Verbraucher eine erhöhte

Umweltfreundlichkeit (Nitsche & Figiel, 2016, S. 17/18, 2016; Warschun et al., 2013). Verbraucher glaubten, dass durch kurze Transportwege Emissionen eingespart würden. Auch vermuteten Kunden bei Lebensmitteln, die über kurze Strecken transportiert werden, eine Vermeidung von Konservierungsstoffen zur Erhaltung der Frische (Nitsche & Figiel, 2016, S. 17/18; Statista, 2017). Weiterhin wurden der gute Geschmack, die Frische sowie die Gesamtqualität der Lebensmittel als Kaufmotiv regionaler Produkte genannt (Nitsche & Figiel, 2016; Warschun et al., 2013). Nach einer Umfrage von Statista (2017) ist der häufigste Grund für den Kauf regionaler Lebensmittel die Förderung der regionalen Wirtschaft.

Bislang existiert keine einheitlich anerkannte Definition des Begriffes der Regionalität. Dies hat zur Folge, dass keine rechtsverbindlichen Kriterien zur Einhaltung eines vorgegebenen Qualitätsstandards für die Erzeugung und den Vertrieb regional erzeugter Lebensmittel bestehen (Deutscher Bundestag, 2016). Daher weicht das Verständnis der Regionalität unter deutschen Erzeugern, Händlern und Verbrauchern unter Umständen voneinander ab. Generell kann die Auslegung der Regionalität aber auf einige gängige Definitionsansätze beschränkt werden.

2.1 Definition des Begriffes „Regionalität“ in der deutschen Lebensmittelvermarktung

In der Literatur, wie auch in der Praxis, existieren verschiedene Auslegungen der Regionalität. Die Regionalvermarktung Niedersachsen (2018) unterscheidet zwischen drei Begriffsdefinitionen: *geografische*, *historisch-kulturelle* oder *politisch-administrative* Regionalität (Regionalvermarktung Niedersachsen, 2018). Heinze et al. (2014, S. 2) führen zusätzlich die *ökonomische* Auslegung an. Beispiele für die *geografische* (oder auch *naturräumliche*) Auslegung sind die sich über mehrere Bundesländer erstreckende Röhn oder der Schwarzwald. Einzelne Bundesländer, Landkreise oder Gemeinden fallen unter die *politisch-administrative* Auslegung. Die *kulturelle* Auslegung bezieht sich auf den Heimatgedanken (Weiss, 2007). Die *ökonomische* Auslegung umfasst eine wirtschaftliche Vernetzung innerhalb eines Gebietes (Heinze et al., 2014, S. 2).

Über diese vier Definitionsansätze hinaus ist eine verbreitete Auslegung der Regionalität die *räumliche Distanz*. Unter räumlicher Distanz wird in der Regel die Distanz zwischen dem Erzeugungs- und dem Verkaufsort der Produkte verstanden. Beispielsweise wird ein individueller Radius um den Verkaufsort (z. B. 20, 50 oder 100 km) festgelegt. Buxel (2017) befragte in einer Studie 418 Verbraucher, in welchem Umkreis sie ein Produkt als regional einstufen würden. Rund 34 % bezeichnen ein Produkt, das mindestens ihrem Heimatkreis entstammt, als regional (siehe Abbildung 2-2). Weitere 23 % bezeichnen ein Produkt bis zu einem Umkreis von 100 km als regional und ca. 38 % bis zu 50 km Distanz. Nach einer Umfrage von Warschun et al. (2013) erwarteten 47 % der Befragten, dass regionale Lebensmittel aus einem Umkreis von 100 km entstammen. Lediglich 16 % stimmten einer Erweiterung auf einen Radius von 200 km zu (Warschun et al., 2013).

Das Verständnis von Regionalität hängt unter anderem davon ab, wo der Wohnort der betreffenden Person liegt (Buxel, 2017). So haben Bewohner einer Großstadt (> 25.000 Einwohner) in der Regel ein weiteres Verständnis für Regionalität. Nach Umfrageergebnissen von Buxel

(2017) gaben 49 % der Befragten vom Land (< 25.000 Einwohner) einen Umkreis von 50 km als regional an, während in der Stadt lediglich 28 % dieses Regionalverständnis teilen. 29 % der Befragten aus Großstädten definierten einen Umkreis bis 100 km als regional.

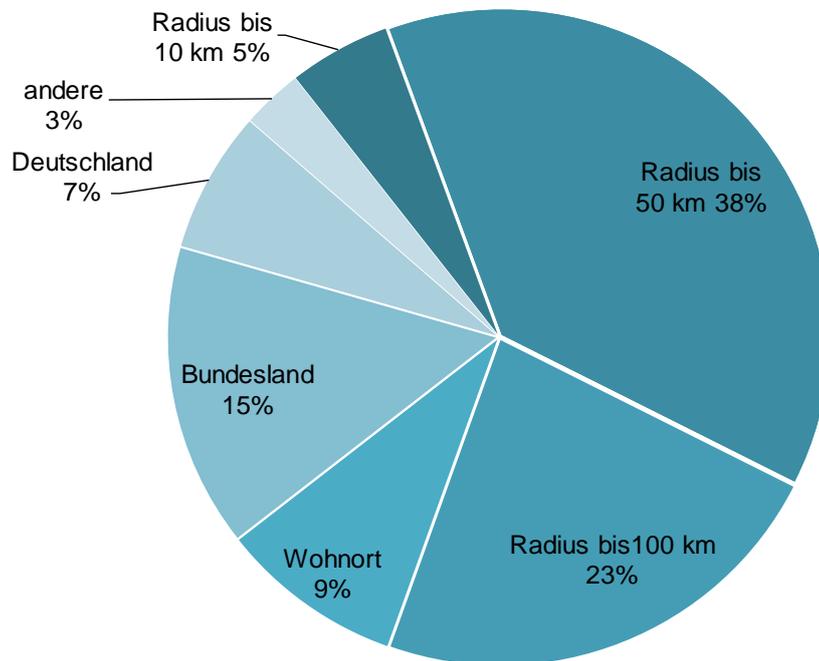


Abbildung 2-2: Ergebnisse einer Verbrauchermfrage zur Begriffsdefinition von Regionalität.
Quelle: In Anlehnung an Buxel (2017).

Je komplexer ein Produkt ist, d. h., je mehr Verarbeitungsschritte es bis zum fertigen Erzeugnis durchlaufen hat, desto schwieriger wird die Einordnung der Herkunft in den Kontext der Regionalität. Roherzeugnisse werden zu Fabriken transportiert, um dort weiter zum Endprodukt verarbeitet zu werden. Laut Buxel (2017) ist es über 80 % der Befragten wichtig, dass alle Verarbeitungsschritte innerhalb der festgelegten Region durchgeführt werden und auch der Sitz der Firma innerhalb der Region liegt. Ob das Produkt nur innerhalb einer Region oder auch außerhalb vermarktet wird, spielt hingegen eine untergeordnete Rolle (Buxel, 2017; Geschmackstage Deutschland e.V., 2017b). Auch eine Studie von Warschun et al. (2013) bestätigt, dass bei verarbeiteten Frischwaren, wie Käse oder Wurst, Wert auf die regionale Herkunft gelegt wird.

Schäfer & Kröger (2010) haben die Standards von Regionalvermarktungsinitiativen untersucht. Unter einem Dachverband, dem Bundesverband der Regionalbewegung e. V., haben sich länderbezogene Regionalvermarktungsinitiativen gegründet. Diese Initiativen setzen sich für die Förderung einer nachhaltigen Nahversorgung mit Lebensmitteln ein (Bundesverband Regionalbewegung e. V., 2020b). Es sollen insbesondere kleine und mittelständische Betriebe bei der Vermarktung ihrer Produkte unterstützt werden. Die Initiative kostbares Südniedersachsen hat zum Beispiel einen eigenen Qualitätsstandard unter der gleichnamigen Marke „kostbares Südniedersachsen“ entwickelt (kostbares Südniedersachsen e. V., 2019).

Nach Schäfer & Kröger (2010) besteht auch bei den Initiativen kein einheitliches Verständnis der Regionalität. Es wird beispielsweise ein Radius von 200 km oder entsprechend dem politisch-administrativen Kriterium ein Bundesland als Region angegeben (Schäfer & Kröger,

2010). Der Bundesverband der Regionalbewegung mit seinem Sitz in Feuchtwangen greift auf das geografische Kriterium zurück und definiert Mittelfranken als seine Region (Interview, 2018).

Seit 2014 besteht mit dem Regionalfenster die Möglichkeit einer freiwilligen, einheitlichen Kennzeichnung regionaler Produkte. Hierbei liegt der Fokus auf dem Nachweis und der transparenten Kommunikation der Herkunft von Produkten. Eine einheitliche Definition von Regionalität existiert daher auch beim Regionalfenster nicht. Hersteller, die an der Kennzeichnung teilnehmen möchten, müssen beim Regionalfenster e. V. eine Lizenz beantragen und sich über eine der 17 Zertifizierungsstellen prüfen lassen. Nach dem Stand von Februar 2018 gibt es 4.000 registrierte Produkte von 760 Lizenznehmern. Hauptproduktgruppen der Lizenznehmer umfassen ‚Obst und Gemüse‘, ‚Fleisch und Wurstwaren‘ sowie ‚Milch- und Molkereiprodukte‘ (Regionalfenster, 2018).

2.2 Absatzkanäle zur Vermarktung regional erzeugter Lebensmittel

Regional erzeugte Lebensmittel werden vorwiegend im Lebensmitteleinzelhandel (LEH) gekauft. Nach Statista (2017) sind es über 60 %. Eine Umfrage des Geschmackstage Deutschland e.V. (2017a) bestätigt dieses Ergebnis. Laut einer Umfrage von Warschun et al. (2014) gaben 48 % der Befragten große Supermärkte als den Haupteinkaufsort regionaler Lebensmittel an. An zweiter Stelle folgen bei Warschun et al. (2014) und dem Geschmackstage Deutschland e.V. (2017a) die Wochenmärkte, während bei Statista (2017) die Discounter an zweiter Position folgen. Nach Warschun et al. (2014) und dem Geschmackstage Deutschland e.V. (2017a) kaufen knapp 30 % der Befragten regionale Lebensmittel in Discountern.

Konsumenten fragen vorwiegend frische, vergängliche Lebensmittel aus regionaler Erzeugung nach. Bei verarbeiteten Produkten und Fertigprodukten wird weniger Wert auf Regionalität gelegt. Am häufigsten werden Fleischprodukte sowie Obst und Gemüse aus regionaler Erzeugung erworben. Aber auch Milchprodukte, Eier und Brot werden von Konsumenten bevorzugt regional gekauft (Gremmer et al., 2016; Warschun et al., 2013).

Neben dem klassischen LEH, wie dem Supermarkt¹ oder dem Discounter, existieren diverse weitere Absatzkanäle für Lebensmittel. Besonders für den Markt an regionalen (und ökologischen) Lebensmitteln wurden z. T. innovative Direktvermarktungs-Konzepte entwickelt, um die Erzeugnisse an den privaten Endverbraucher zu vertreiben (Bundesverband Regionalbewegung, 2017, S. 52). Einige dieser Konzepte werden im Folgenden kurz vorgestellt:

Kleine Lebensmittelgeschäfte, wie Reformhäuser, Bioläden sind häufig auf (ökologische) Lebensmittel spezialisierte Einzelhandelsgeschäfte, deren Sortiment aber auch Non-Food Artikel enthalten kann. Die Ladenfläche ist hier kleiner als bei einem Supermarkt. Im engeren Sinne zählen diese Formen des Lebensmittelabsatzes nicht zur Direktvermarktung. Da kein

¹ Der Supermarkt ist eine Betriebsform des Einzelhandels, dessen Sortiment von Lebensmitteln um ausgewählte Non-Food-Artikel auf einer Mindestverkaufsfläche von 400 m² ergänzt wird (Hennig & Schneider (2018)).

Großhandel zwischengeschaltet ist, wird im Kontext der Regionalvermarktung trotzdem von einer Direktvermarktung gesprochen.

Unter einem **Hofladen** wird ein kleines Geschäft auf dem Betriebshof des Erzeugers, mit der Möglichkeit fremde Waren zuzukaufen und neben eigenen Erzeugnissen anzubieten, verstanden. Andererseits können die Erzeugnisse ab Hof auch ohne einen Laden verkauft werden. Charakteristisch ist in jedem Fall, dass der private Konsument die Produkte direkt beim Erzeuger erwirbt. **Wochenmarkt:** Bei diesem Konzept fährt der Erzeuger selbst oder ein Angestellter zu festgelegten Zeiten mit einem Stand auf den Wochenmarkt und verkauft die Erzeugnisse vor Ort an private Konsumenten.

Bei **Abo-Kisten oder Abo-Systemen** handelt es sich um vorkommissionierte Lebensmittelpakete, welche dem Kunden nach einer Online-Bestellung an die Haustür geliefert werden (Nitsche & Figiel, 2016). Beim **Online-Handel** für den Direktvertrieb an den privaten Endverbraucher über eine Online-Plattform übernehmen Paketzusteller den Versand. Das Konzept der **Marktschwärmer** ähnelt dem Online-Handel. Jedoch bleibt der persönliche Kontakt zu den Erzeugern erhalten. Die Produkte werden über eine Online-Plattform vorbestellt und in der Regel einmal pro Woche an einem physischen Marktplatz vom Konsumenten selbst abgeholt (Marktschwärmer, o. J.).

Lebensmittelautomaten werden vom Erzeuger befüllt. Die Konsumenten können die Erzeugnisse direkt an dem Automaten erwerben. Die Automaten verfügen über eine Kühlfunktion, sodass auch verderbliche Lebensmittel, wie Eier, angeboten werden können (Regiomat, o. J.).

Der Bundesverband der Regionalbewegung unterscheidet zwischen dem Vertrieb von kleineren und größeren Mengen an private Konsumenten sowie dem verarbeitenden Gewerbe und dem Lebensmittelhandel. Generell empfiehlt der Verband dem Erzeuger kleinere Mengen direkt beim Endverbraucher abzusetzen (Bundesverband Regionalbewegung, 2017, S. 50). Für größere Mengen werden vom Bundesverband Regionalbewegung (2017) aufgrund des höheren Organisationsbedarfes abweichende Vertriebswege empfohlen (siehe Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Vergleich der empfohlenen Vertriebswege kleinerer und größerer Absatzmengen

Kleinere Mengen	Größere Mengen
- Direktvermarktung an Konsumenten, wie Wochenmärkte, Hofläden, Abo-Kisten	- Gemeinschaftsverpflegung
- Gastronomie	- Gastronomie
- Wenige Verarbeitungsvertriebe, wie Metzger, Bäcker	- Mehrere Verarbeitungsvertriebe, wie Metzger, Bäcker
- Einzelne Lebensmittelläden, Reformhäuser, Bioläden	- Lebensmitteleinzelhändler und regionale Handelsketten
- Spezialitäten- oder Feinkostgeschäfte	- Mehrere Bioläden, Reformhäuser und Spezialitätengeschäfte
	- Eigene Regionalläden
	- Großhandel
	- Online-Handel

Quelle: eigene Darstellung nach Bundesverband Regionalbewegung (2017, S. 50)

Wie bereits eingangs in diesem Kapitel beschrieben, kaufen Konsumenten regionale Lebensmittel dennoch am häufigsten im LEH (Buxel, 2017; Gremmer et al., 2016, S. 46; Warschun et

al., 2014, S. 5). Der LEH nimmt zunehmend Produkte kleiner Erzeuger auch in kleinerem Umfang in sein Sortiment auf (vgl. Kapitel 1).

Aufgrund der hohen Bedeutung des LEH für die Vermarktung regionaler Lebensmittel wird der Schwerpunkt dieser Dissertation auf den LEH als Absatzkanal regionaler Lebensmittel gelegt.

2.3 Ausgestaltung der Logistiknetzwerke zur regionalen Lebensmittelvermarktung

Neben dem geeigneten Absatzkanal stellt sich für die Vermarktung regionaler Lebensmittel die Frage nach der Ausgestaltung der Logistik. Je nach Absatzort kann die Struktur eines Logistiknetzwerks, das System in dem Waren und Informationen zwischen der Quelle (dem Ursprungsort) und der Senke (dem Zielort) ausgetauscht werden, unterschiedlich ausgestaltet werden (Bloech & Ihde, 1997). Die Struktur eines Netzwerks beeinflusst u. a. die Logistikkosten (Bloech & Ihde, 1997), weshalb die Planung eines Netzwerks gut durchdacht werden sollte. Es hat sich gezeigt, dass bei der Bündelung von Transportprozessen eine Senkung der Transportkosten erzielt werden kann (Arnold et al., 2008). Die Transportkosten werden durch Auftragsbündelungen gesenkt, weil die Fahrzeuge stärker ausgelastet werden können. Aufgrund der hohen Bedeutung der Transportkosten für die Ausgestaltung eines Logistiknetzwerkes werden die verschiedenen Kostengruppen detailliert in Kapitel 3 behandelt. Zunächst wird im Folgenden auf die Belieferungskonzepte für regionale Lebensmittel eingegangen.

2.3.1 Klassische Belieferungskonzepte des stationären Handels

Im stationären LEH wird zwischen drei klassischen Belieferungskonzepten unterschieden (siehe Abbildung 2-3). Diese umfassen die Streckenbelieferung, die Zentral-/Regionallager-Belieferung und die Beschaffungslogistik des Handels.

Bei der **Streckenbelieferung** liegt die Verantwortung der Belieferung beim Erzeuger selbst. Das bedeutet, dass der Erzeuger entweder selbst die Auslieferung vornimmt oder einen Spediteur beauftragt. Die Bestellungen werden nach Eingang beim Erzeuger konsolidiert und direkt an den Handel ausgeliefert (Nitsche & Figiel, 2016).

Bei der Belieferung über ein **Zentral-/Regionallager** hingegen werden die Produkte vom Erzeuger oder einer durch den Erzeuger beauftragten Spedition an ein Zwischenlager geliefert. Dieses Zwischenlager dient der Übergabe der Waren von den Erzeugern an den Handel (Gudehus, 2012). Ein solches Lager kann einerseits zur längeren Lagerung oder lediglich als Umschlagpunkt (Cross-Docking) für die Waren genutzt werden. Im Lager werden die Waren der Erzeuger konsolidiert, kommissioniert und anschließend unter möglichst optimaler Auslastung der Transportmittel an den LEH ausgeliefert (Arnold et al., 2008).

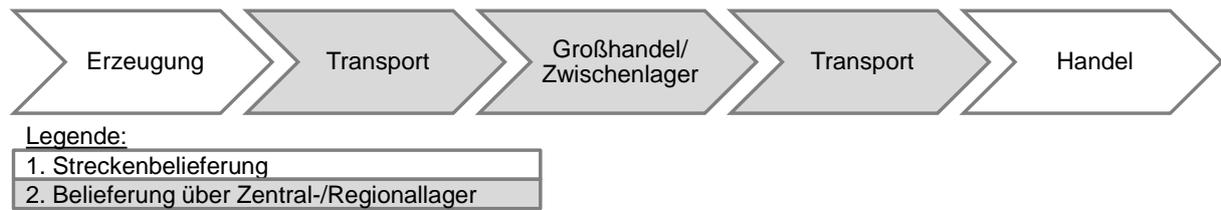


Abbildung 2-3:Klassische Belieferungskonzepte des stationären Handels

Die **Beschaffungslogistik** unterscheidet sich von der Zentral-/Regionallager-Belieferung lediglich in der Organisation der Transporte. Hier gestaltet sich die Organisation innerhalb der Wertschöpfungskette rückwärts (Top Down) vom Handel zum Erzeuger, während die Organisation bei der Zentral-/Regionallager Belieferung durch die Erzeuger (Bottom Up) gestaltet wurde. Der Handel gestaltet folglich die Transportprozesse oder wählt und beauftragt die Spedition (Nitsche & Figiel, 2016).

2.3.2 Belieferungskonzepte der regionalen Lebensmitteldistribution

An der regionalen Vermarktung von Lebensmitteln sind verschiedene und zum Teil andere Akteure als an den etablierten Strukturen des LEHs beteiligt. Die Anzahl dieser beteiligten Akteure schwankt hierbei je nach Vertriebsweg und der damit verbundenen Anzahl an Wertschöpfungsstufen und der Logistikstruktur. In Abbildung 2-4 sind die gängigen Wertschöpfungsstufen mit den beteiligten Akteuren der regionalen Lebensmittelvermarktung dargestellt.

Die Betrachtung beginnt beim fertigen Endprodukt. Hierbei kann es sich um ein Roherzeugnis, wie Getreide oder Gemüse, oder ein verarbeitetes Produkt, wie Brot oder eingelegte Gurken, handeln. Dieses Endprodukt kann direkt vom Landwirt oder dem verarbeitenden Gewerbe kommen. Von dort gibt es drei mögliche Vertriebswege zur Vermarktung.

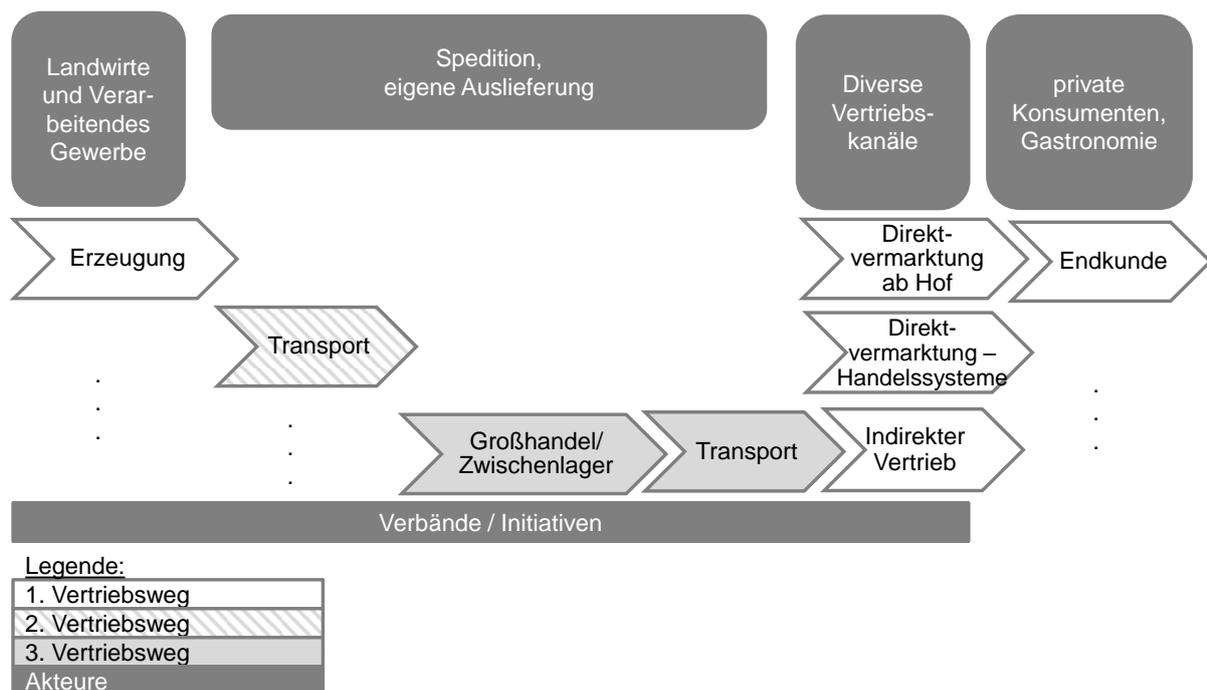


Abbildung 2-4: Logistikstrukturen regionaler Lebensmittelvermarktung und die Rolle der Akteure

Der **erste Vertriebsweg** umfasst die Direktvermarktung ab dem Ort der Erzeugung (ab Hof) ohne weitere Transporte seitens des Erzeugers. Somit muss der Endkunde das Erzeugnis direkt am Erzeugungsort abholen. Der **zweite Vertriebsweg** beinhaltet den direkten Vertrieb über diverse Handelssysteme (z. B. Online-Handel, LEH, Märkte, Abo-Kisten). Den Transport zum Vertriebsort übernimmt der Erzeuger häufig selbst. In diesem Fall handelt es sich um die zuvor beschriebene Streckenbelieferung (siehe Abschnitt 2.3.1). Der **dritte Vertriebsweg** umfasst den indirekten Vertrieb bzw. den klassischen Weg über den Großhandel oder ein Zwischenlager. Somit wird das Erzeugnis zunächst vom Erzeugungsort zum Großhandel bzw. dem Zwischenlager transportiert. Dort wird es gelagert und mit anderen Erzeugnissen kommissioniert. Anschließend transportiert (der Großhandel oder) ein Spediteur das Erzeugnis zum Vertriebsort (Interview, 2018).

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem zweiten Vertriebsweg, dem direkten Vertrieb über den LEH. Interviews mit Experten der Regionalvermarktung haben gezeigt, dass bei kleinen Erzeugern, die den LEH beliefern, am häufigsten bzw. fast ausschließlich die Streckenbelieferung als Vertriebsweg gewählt wird (Interview, 2018; kostbares Südniedersachsen e. V., 2019; Marktleitung, 2017; Persönliches Interview mit dem Vorstandsvorsitzenden eines regionalen Erzeugerverbandes, 2017; Reindl Leonard et al., 2012). Hierbei fährt der Betriebsleiter oft selbst (Reindl Leonard et al., 2012). Je nach Absatzkanal könnte auch eine Spedition beauftragt werden (Interview, 2018; Marktleitung, 2017; Mitarbeiterin für Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit, 2018; Persönliches Interview mit dem Vorstandsvorsitzenden eines regionalen Erzeugerverbandes, 2017). Diese ist für kleine Erzeuger jedoch in der Regel zu teuer, da Speditionen nur ganze Palettenstellplätze in ihren Transportern vergeben. Diese Stellplätze werden von kleinen Erzeugern oft nicht ausgefüllt und müssen dennoch voll bezahlt werden (Interview, 2018; Marktleitung, 2017; Mitarbeiterin für Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit, 2018; Persönliches Interview mit dem Vorstandsvorsitzenden eines regionalen Erzeugerverbandes, 2017).

Verbände und Regionalvermarktungsinitiativen unterstützen Erzeuger bei der Vermarktung und dem Vertrieb ihrer Erzeugnisse. Das Angebot reicht hierbei von der reinen Beratung bis hin zur vollständigen Übernahme der Logistik und der Vermarktung an den Handel. Teilweise werden regionale Erzeugnisse dabei unter einer regionalen Dachmarke vereint, wie in Kapitel 2.1 beschrieben (Bundesverband Regionalbewegung, 2017; kostbares Südniedersachsen e. V., 2019).

2.4 Herausforderungen, Perspektiven und Anforderungen der Regionalvermarktung von Lebensmitteln in Deutschland

Der Bundesverband Regionalbewegung e. V. (2020b) hat sich zum Ziel gesetzt ein „umfassendes Konzept für regionale Strukturen“ zu schaffen (Bundesverband Regionalbewegung e. V., 2020b). Bestehende Studien haben gezeigt, dass vor allem die Bewältigung der Logistik eine große Herausforderung für die Erzeuger darstellt (Czech et al., 2002; Figiel, 2016; Gremmer et al., 2016; Hausladen et al., 2010; Nitsche & Figiel, 2016; Reindl Leonard et al., 2012). Eine Umstrukturierung weg von der Streckenbelieferung durch einzelne Erzeuger hin zu einer kooperativen Tourenplanung wird als vielversprechend angesehen.

2.4.1 Herausforderungen zur Schaffung eines kooperativen Transportsystems für die Regionalvermarktung von Lebensmitteln

Die Schaffung einer geeigneten, möglichst optimalen, kooperativen Auslieferungsstrategie zur Vermarktung der regionalen Lebensmittel ist bislang ungeklärt (Hausladen et al., 2010; Nitsche & Figiel, 2016; Reindl Leonard et al., 2012). Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 erwähnt, kann durch die Bündelung von Transporten eine Kostenersparnis erzielt werden. Allerdings hat nicht jeder Erzeuger ein Interesse an einer kooperativen Tourenplanung, da die möglichen Vorteile nicht gesehen werden (Reindl Leonard et al., 2012). Entweder die Erzeuger fahren selbst und die Auslieferung von Ware wird mit anderen Erledigungen verbunden oder die tatsächlichen Logistikkosten sind unbekannt und werden unterschätzt (Hausladen et al., 2010; Interview, 2018; kostbares Südniedersachsen e. V., 2019; Mitarbeiterin für Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit, 2018; Reindl Leonard et al., 2012). Es fehlt eine Entscheidungsunterstützung zur Quantifizierung der Kosten und möglicher Ersparnisse durch alternative Logistikkösungen.

Daher gilt es einerseits die Kosten verschiedener Auslieferungsvarianten zu ermitteln. Andererseits ist abzuschätzen, welche Anzahl an Erzeugern für die Ausgestaltung einer kostengünstigen, kooperativen Tourenplanung innerhalb einer Region notwendig sind, um die geeignetste Auslieferungsstrategie zu identifizieren. Allein die Bündelung von Aufträgen stellt ein komplexes Problem dar, welches für kleine Erzeuger und Verbände schwer aus eigenen Mitteln zu lösen ist (Interview, 2018; kostbares Südniedersachsen e. V., 2019; Mitarbeiterin für Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit, 2018; Nitsche & Figiel, 2016).

Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der Wahl der geeigneten Transportmittel (kostbares Südniedersachsen e. V., 2019; Nitsche & Figiel, 2016). Diese sollten nicht zu groß sein, um eine möglichst hohe Auslastung zu erzielen, aber auch nicht zu klein, um genügend Ware transportieren zu können (Arnold et al., 2008). Kleine Sendungsgrößen und eine starke Fragmentierung der kleinen regionalen Erzeuger erschweren die Aufgabe, eine passende Transportlösung zu finden (Nitsche & Figiel, 2016). Hinzu kommt eine eingeschränkte Planbarkeit der Transportmengen und der Erzeugungsorte aufgrund starker saisonaler Schwankungen des Angebotes (Marktleitung, 2017; Nitsche & Figiel, 2016).

Die vorliegende Problemstellung ähnelt aus reiner Tourenplanungssicht dem aus der Literatur bekannten Problem der „letzten Meile“. Als die letzte Meile wird der letzte Logistikabschnitt einer Sendung, meist die so genannte Haustürbelieferung eines Kunden, bezeichnet. Dieser Abschnitt der Transportprozesse verursacht, aufgrund vieler kleinteiliger Lieferungen, vergleichsweise hohe Transportkosten und einen hohen Zeitaufwand (Baldi et al., 2019; Gevaers et al., 2014).

Letzte-Meile-Konzepte können aber unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen. Dell'Amico und Hadjidimitriou (2012) untersuchen beispielsweise zwei Auslieferungssysteme für Paketdienste. Sie vergleichen die direkte Haustürbelieferung von Privatkunden mit der Belieferung einer Packstation, von der die Kunden ihre Pakete selbst abholen müssen. Der Fokus wird hier auf eine Senkung der Transportkosten und der Transportemissionen gelegt. Auch Iwan et al. (2016) analysieren in ihrer Arbeit den Einsatz von Schließfächern für Lieferungen zum Endverbraucher. Beide Studien zielen auf eine Änderung der Auslieferungsstrategie und somit auf

eine Vermeidung der letzten Meile bis zum Abnehmer. Schliwa et al. (2015) betrachten Lastenräder als alternative Transportlogistik in Städten. Behrends (2016) zeigt in einem umfassenden Literaturüberblick, dass unter anderem die Interaktion von Sendern und Empfängern weiter untersucht werden sollte, um Transportdienstleistungen bedarfsgerechter zu gestalten. Gevaers et al. (2014) entwickeln ein Modell, um Kosten der letzten Meile für Business-to-Consumer (B2C) Lieferungen zu simulieren. Die Problemstellung der vorliegenden Arbeit konzentriert sich hingegen auf Business-to-Business (B2B) Transportprozesse. Im Unterschied zu den Untersuchungen von Gevaers et al. (2014) ist die räumliche Streuung von kleinen Lebensmittelherstellern größer als die Streuung privater Haushalte. Damit ergibt sich eine andere Ausgangssituation. Des Weiteren ist im vorliegenden Fall nicht mit Rücksendungen zu rechnen.

Regionalvermarktungsinitiativen wollen sowohl die Märkte als auch die Erzeuger entlasten und eine Lösung für die Herausforderungen des Warentransportes finden. Ein denkbarer Lösungsansatz ist, dass die Initiativen selbst die Belieferung des LEH koordinieren sowie durchführen. Diese Arbeit soll den Initiativen dabei eine wichtige Entscheidungsgrundlage liefern.

2.4.2 Perspektiven und Anforderungen des Lebensmitteleinzelhandels an die Schaffung eines kooperativen Transportsystems für die Regionalvermarktung von Lebensmitteln

Um die Perspektive und die Anforderungen des LEHs zur Regionalvermarktung von Lebensmitteln einschätzen zu können, wurden für die vorliegende Arbeit eine Literaturrecherche vorgenommen sowie Experteninterviews geführt. Insbesondere das Interview mit dem Marktleiter eines Inhabergeführten Geschäftes einer deutschen Lebensmittelkette brachte einen tieferen Einblick in das operative Geschäft. Die Erkenntnisse dieses Interviews lassen sich auf die gesamte Supermarktkette und teilweise die gesamte Branche übertragen, da der Filialleiter des Marktes Mitglied in einem Regionalverband für Kaufleute ist und dadurch bestätigen kann, dass andere Märkte dieser Kette dieselben Erfahrungen machen (Marktleitung, 2017). Zudem führte das Gespräch mit der zuständigen Mitarbeiterin für *Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit* einer fränkischen Bauerninitiative zu Erkenntnisgewinnen über eine zweite Supermarktkette (Mitarbeiterin für Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit, 2018). Auch die Erfahrungen des Bundesverbands Regionalbewegung in Deutschland konnten wichtige Erkenntnisse liefern (Interview, 2018).

Insgesamt zeigten die Interviews, dass für die Märkte durch direktvermarktete Produkte kleiner regionaler Erzeuger ein erheblicher Mehraufwand besteht. Dieser Mehraufwand resultiert aus der individuellen Abwicklung aller Geschäftsprozesse mit jedem Erzeuger. Die betroffenen Geschäftsprozesse reichen von der Koordination der Bestellung über die Warenannahme bis hin zur Rechnungstellung. Jeder Erzeuger muss demnach für Bestellungen einzeln kontaktiert werden, da automatisierte Bestellsysteme und Softwarelösungen nicht für die Integration regionaler Produkte ausgelegt sind. Auch die Anlieferung der Ware erfolge einzeln, sodass Mitarbeiter laufend in ihren gewöhnlichen Arbeiten gestört werden, um die Ware anzunehmen. Die Verräumung der Ware kann nur bedingt geplant und in die standardisierten Verräumungsabläufe der übrigen Ware, welche gebündelt durch den Großhandel angeliefert wird, einbezogen

werden. Darüber hinaus muss für jeden Erzeuger einzeln eine Rechnung geschrieben und versendet werden. Diese Punkte führen zu einem erhöhten Personalaufwand, welcher in erhöhten Kosten resultiert. Weiterhin unterliegt die Verfügbarkeit der Produkte kleiner Erzeuger häufig saisonalen Schwankungen, sodass die Ware nicht das gesamte Jahr über verfügbar ist. Somit kann dem Verbraucher kein einheitliches Sortiment garantiert werden. Dies hat ebenfalls Auswirkungen auf die Planung der Regalplätze (Interview, 2018; Marktleitung, 2017; Mitarbeiterin für Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit, 2018).

Als ein positiver Effekt der separaten Anlieferung von Waren wurde der persönliche Kontakt zum Erzeuger erwähnt (Marktleitung, 2017). Dieser Kontakt sei aus Sicht der Märkte wichtig, um über Neuigkeiten der „regionalen Branche“ oder Pläne der Erzeuger informiert zu bleiben. Zusätzlich erhöhe sich die Wertschätzung der Produkte (Persönliches Interview mit dem Vorstandsvorsitzenden eines regionalen Erzeugerverbandes, 2017). Die Märkte lernten etwas über die Produkte und deren Herkunft (Persönliches Interview mit dem Vorstandsvorsitzenden eines regionalen Erzeugerverbandes, 2017). Weiterhin gingen die Märkte davon aus, dass regionale Produkte nachhaltiger produziert werden, die Region gefördert werden könne und u. a. weniger Emissionen durch kürzere Transportwege verursacht werden würden (Hermannowski et al., 2014; Interview, 2018; Nitsche & Figiel, 2016; Persönliches Interview mit dem Vorstandsvorsitzenden eines regionalen Erzeugerverbandes, 2017).

Neben einer Reduktion der Transportkosten durch eine gebündelte Tourenplanung muss die Frage nach einer möglichen Reduktion der Transportemissionen im weiteren Verlauf der Arbeit geklärt werden. Es existieren bereits diverse Arbeiten, die sich mit dem Auffinden emissionsminimaler Touren beschäftigen (z. B. Demir et al. (2014a), Demir et al. (2014b), Franceschetti et al. (2013), Goeke & Schneider (2015)). Die Annahme, dass kürzere Transportwege automatisch zu geringeren Emissionen führten, beruht nicht auf wissenschaftlichen Erkenntnissen. Dennoch ist diese Ansicht bei Märkten und Verbrauchern weit verbreitet (Buxel, 2017; Nitsche & Figiel, 2016). Daher soll im weiteren Verlauf der Arbeit geklärt werden, ob eine kooperative Auslieferung gegenüber einer separaten Streckenbelieferung tatsächlich Transportemissionen reduzieren kann. Der Fokus liegt hierbei auf energiebedingten Kohlenstoffdioxid (CO₂) - Emissionen durch den Kraftstoffverbrauch. Nähere Erläuterungen zu den Transportemissionen folgen in Abschnitt 4.2.2.

2.4.3 Perspektive und Anforderungen kleiner, regionaler Erzeuger an die Schaffung eines kooperativen Transportsystems für die Regionalvermarktung von Lebensmitteln

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Erzeuger und eine Regionalvermarktungsinitiative interviewt (Mitarbeiterin für Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit, 2018; Persönliches Interview mit dem Vorstandsvorsitzenden eines regionalen Erzeugerverbandes, 2017; Regionale Erzeuger, 2017). Diese Befragungen zeigten, dass die Aufgeschlossenheit von Erzeugern gegenüber dem Vertriebsweg ‚Supermarkt‘ divers ist:

Kleine Erzeuger sind teils aufgeschlossen und interessiert an einem Verkauf ihrer Waren im LEH, während andere Vorurteile gegenüber den ‚großen Ketten‘ haben. Es handelt sich

einerseits um Ängste vor einem zu starken Preis- sowie Produktionsdruck, andererseits möchten sich die Erzeuger einen gewissen Grad an Unabhängigkeit bewahren. Kleine Erzeuger haben begrenzte Kapazitäten. Sie möchten sich nicht von einem Händler abhängig machen, der seine Verhandlungsmacht ausnutzen und Preise drücken könnte. Daher sei es wichtig, mehrere Abnehmer für die Produkte zu haben, um das Risiko zu streuen. Gerade den skeptischen Erzeugern sind Tradition und Eigenständigkeit sehr wichtig.

Nachfolgend werden die Kernerkenntnisse aus vier beispielhaften Erzeuger-Gesprächen aufgeführt. Die Erzeuger werden zu diesem Zweck drei grundsätzlichen Stereotypen zugewiesen:

1. Der Eigenständige

Dieser Erzeugertyp kümmert sich selbst um die gesamte Wertschöpfungskette seiner Ware. Er hat genügend Abnehmer für seine Produkte. Gelegentlich kommen Märkte des LEHs auf ihn zu und bieten ihm an, seine Ware dort zu platzieren. Dieser Erzeugertyp kann die Bedingungen des Vertriebs seiner Produkte im LEH selbst bestimmen. Die Vermarktung läuft für ihn von selbst, er unterliegt keinem Preisdruck. Folglich ist keine Eigeninitiative notwendig. Dieser Erzeugertyp hat in der Regel wenig Interesse an einer kooperativer Transportlösung, da er keine Vorteile für sich sieht.

2. Der Traditionelle

Für den traditionellen Erzeugertypen ist der Vertriebsweg über den LEH großer Konzerne keine Option. Er hat viele kleine Abnehmer für seine Ware und verfügt in der Regel bereits über ein eigenes großes Fahrzeug, das innerhalb einer Tour voll ausgelastet wird. Er ist dennoch offen für einen externen Dienstleister, der die speziellen Transportanforderungen kleiner regionaler Erzeuger erfüllt (die Erklärung folgt weiter unten in diesem Abschnitt), da sein Fahrzeug überwiegend ungenutzt herumsteht. Bei ihm gibt es zusätzlich starre Zeitfenster für die Abholung und Auslieferung der Ware. Bei diesem Erzeugertypen handelt es sich beispielsweise um einen Backwaren-Hersteller, dessen Produkte früh morgens in den Filialen sein müssen.

3. Der Aufgeschlossene

Dieser Erzeugertyp sieht eine kooperative Transportlösung als wichtige Aufgabe, die aber schwer zu organisieren ist. Für ihn muss der Preis stimmen. Zu beachten ist, dass Produkte mit einem geringen Warenwert und einer geringeren Gewinnmarge kostengünstiger transportiert werden müssen als Produkte, wie Öl, die eine höhere Marge haben und folglich einen größeren Spielraum für Transportausgaben haben. Er sieht es daher als wichtig an, dass das Netzwerk kleiner, regionaler Erzeuger wächst.

Über diese Stereotypen hinaus haben die Erkenntnisse der oben genannten Gespräche gezeigt, dass ein potenzieller Transportdienstleister für regionale Produkte kleiner Erzeuger weitere Transportanforderungen erfüllen muss, die über die gewöhnlichen Dienstleistungen von Speditionen hinausgehen:

Die regionalen Produkte kleiner Erzeuger müssen im LEH durch die Erzeuger selbst in Regale geräumt werden. Zudem kontrollieren die kleinen Erzeuger bei der Verräumung ihrer Ware regelmäßig den Bestand und wissen, welche Produkte wann nachgeliefert werden müssen. Dies führt einerseits zu der Sicherheit, dass die Ware den Anforderungen des Erzeugers

entsprechend platziert und in ausreichenden Mengen angeboten wird. Andererseits können Märkte des LEH viele kleinteilige Lieferungen der regionalen Erzeuger bislang nicht in ihr bestehendes System einbinden. Daher sind die Erzeuger bei der Warenverräumung und der Überwachung ihres Angebotes häufig selbst gefragt. Im Falle einer kooperativen Tourenplanung müssten die eben aufgeführten Aufgaben der Warenverräumung und der Bestandskontrolle durch den Transportdienstleister übernommen werden. Da für die Übergabe dieser Aufgaben ein hohes Maß an Vertrauen seitens der Erzeuger gefordert ist, erscheint die Übernahme der Tourenplanung und -durchführung durch Regionalvermarktungsinitiativen, die einen engen Kontakt zu den Erzeugern halten und diese verstehen, als beste Option zum Aufbau einer kooperativen Tourenplanung.

Der Fokus dieser Arbeit liegt vor allem auf den Erzeugern, die dem Vertriebsweg LEH abgeschlossen gegenüberstehen und diesen ggf. sogar schon nutzen. Die neu geschaffene Transparenz über mögliche Kosten- und Emissionsreduktionen könnte aber auch zur Überzeugung von Skeptikern genutzt werden.

2.4.4 Zusammenfassung der Anforderungen an die Tourenplanung zur Schaffung eines kooperativen Transportsystems seitens Regionalvermarktungsinitiativen

Zusammenfassend ergeben sich diverse Anforderungen, die bei einer kooperativen Tourenplanung seitens Regionalvermarktungsinitiativen für die Lebensmittel kleiner Erzeuger erfüllt werden müssen. In diesem Kapitel werden alle zuvor beschriebenen Anforderungen an die kooperative Tourenplanung gebündelt und zwei Kategorien zugeordnet: den weichen und den harten Faktoren.

Die weichen Faktoren umfassen alle Schlüsselqualifikationen sowie Rahmenbedingungen, die bei einer kooperativen Tourenplanung idealerweise erfüllt sein sollten. Diese Faktoren könnten aber auch mit den Märkten verhandelt werden oder sich durch eine Änderung der externen Rahmenbedingungen lockern und sind dadurch keine zwingende Voraussetzung für eine funktionierende Logistiklösung. Die harten Faktoren sind hingegen quantifizierbar und betreffen vor allem die tatsächliche Durchführung und Umsetzung der kooperativen Tourenplanung selbst. Dadurch müssen sie in die Planung unbedingt einbezogen werden.

Zu den **weichen Faktoren** kooperativer, regionaler Lebensmitteltransporte zählen die Ausbildung bzw. Schulung des Fahrers für die Ansprüche der Regionalvermarktung. Dies umfasst neben der Behandlung der Produkte während des Transports, die Pflege des Regals im LEH und die Präsentation der Produkte im Regal des LEHs. Eine grundlegende Wertschätzung der Produkte seitens der Initiative und des Fahrers führten zu einem größeren Erfolg. Insgesamt sollte die Regionalvermarktungsinitiative die Pflege des persönlichen Kontakts zwischen Erzeugern und Märkten, die durch eine Abgabe der Transportaufgabe an die Initiative verlorengeht, ersetzen. Nur auf diese Weise bleiben Märkte und Erzeuger über Änderungen in Angebot und Nachfrage der regionalen Produkte informiert und können entsprechend handeln. Langfristig helfen innovative Transportideen der Integration von Produkten mit hohem und geringem Warenwert.

Die **harten Faktoren** beinhalten einerseits die Einhaltung von Anlieferungszeiten beim LEH sowie die Einhaltung von Zeitfenstern zur Abholung der Ware bei den Erzeugern. Andererseits müssen bei der Tourenplanung Pausenzeiten und gesetzliche Bestimmungen für die Fahrer berücksichtigt werden. Hierzu müssen basierend auf Distanzen und Fahrzeiten zwischen den Betrieben der Erzeuger und den LEH-Märkten so genannte Distanz- und Zeitmatrizen ermittelt werden. Bei der gesamten Tourenplanung müssen eine Vielzahl an Abhol- und Auslieferungsorten bedacht werden. Weiterhin ist die Entscheidung für den passendsten Fahrzeugtypen hinsichtlich der Auslastung, Investition sowie laufender Kosten und Emissionen entscheidend (siehe hierzu Kapitel 3 und 4.2.2). Bei der Auswahl des Fahrzeugs spielen außerdem die Bestellmengen eine wichtige Rolle.

Nachdem in diesem Kapitel der Status Quo der regionalen Lebensmitteldistribution analysiert wurde, werden im nächsten Kapitel die Grundlagen der Fahrzeugkostenrechnung, die zur Ermittlung der Transportkosten für Regionalvermarktungsinitiativen benötigt werden, dargelegt.

3 Grundlagen der Fahrzeugkostenrechnung

Mittels einer Fahrzeugkostenrechnung können die Kosten von Transportprozessen ermittelt werden. Um die Kosten bestehender Transportsysteme der regionalen Lebensmitteldistribution analysieren zu können, muss eine Fahrzeugkostenrechnung durchgeführt werden. Diese Rechnung kann für verschiedene Fahrzeugtypen vorgenommen werden, mit denen die Auslieferung seitens der Erzeuger, aber auch die kooperative Tourenplanung seitens einer Regionalvermarktungsinitiative abgebildet werden können. Ein Teilziel dieser Arbeit ist, bestehende Transportkosten kleiner Erzeuger mit den Kosten einer kooperativen Tourenplanung zur Lebensmitteldistribution zu vergleichen.

Daher werden in diesem Kapitel die Grundlagen der Fahrzeugkostenrechnung zur strategischen Planung der regionalen Lebensmitteldistribution dargelegt. Die Methodik der Fahrzeugkostenrechnung wird anschließend in Abschnitt 5.1 genutzt, um die Fahrzeugkosten für fünf beispielhafte Fahrzeugtypen vorzunehmen und die Ergebnisse zu analysieren.

In der Literatur existieren unterschiedliche Ansätze, um die Transportkostenpositionen einzelnen Kostengruppen zuzuordnen. Unabhängig von der Zuordnung der Kosten zu Kostengruppen umfassen die Berechnungsansätze weitgehend dieselben Kostenpositionen (Gries & Zelewski, 2015; Gudehus, 2012; Linke, 2014, S. 53, 54; Weber, 2012, S. 246 ff.; Wittenbrink, 1995). Wittenbrink (2011) hat bestehende Grundlagenliteratur über die Fahrzeugkostenrechnung für den Nah- und Fernverkehr bereits umfassend aufbereitet. Daher können diese Erkenntnisse als Grundlage der Fahrzeugkostenrechnung dieser Arbeit genutzt werden. Ergänzend wird sich an der Arbeit von Gries & Zelewski (2015) über die Fahrzeugkostenkalkulation von Elektronutzfahrzeugen orientiert.

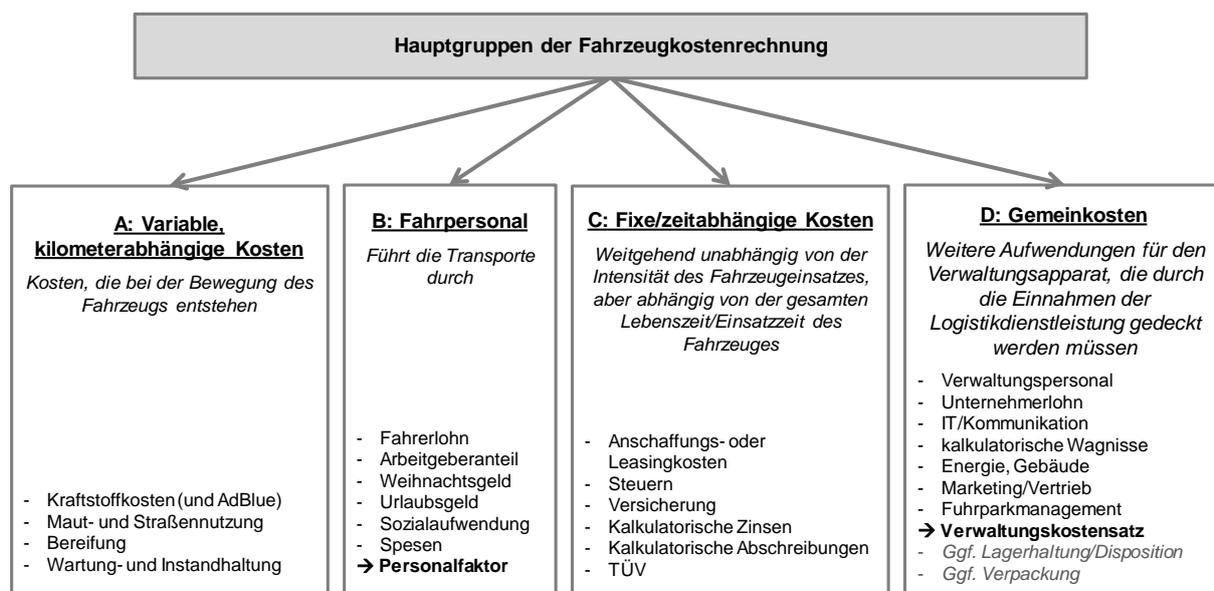


Abbildung 3-1: Hauptkostengruppen der Fahrzeugkostenrechnung in Anlehnung an Wittenbrink (2011) und Gries & Zelewski (2015)

Die Kostenbestandteile der Fahrzeugkostenrechnung können in die vier Hauptkostengruppen aus Abbildung 3-1 untergliedert werden (Wittenbrink, 2011). Diese Hauptkostengruppen

umfassen die variablen/kilometerabhängigen Kosten, Kosten für das Fahrpersonal, fixe/zeitabhängige Kosten und Gemeinkosten. In den ersten vier Abschnitten werden die Bestandteile der vier Hauptkostengruppen der Fahrzeugkostenrechnung näher erläutert. Anschließend werden die Kostengruppen und -positionen auf die gesamten Fahrzeugkosten verteilt.

3.1 Hauptkostengruppe A: Variable, kilometerabhängige Kosten

Die variablen (bzw. kilometerabhängigen) Kosten resultieren aus der direkten Nutzung eines Fahrzeugs und entstehen somit nur, wenn das Fahrzeug bewegt wird. Zu diesen Kosten zählen vor allem die Kraftstoffkosten bzw. die Energiekosten sowie AdBlue für Dieselfahrzeuge. Im Rahmen vorliegender Arbeit werden die drei Energiearten Diesel und Benzin für Verbrennungsmotoren sowie Strom für rein elektrisch betriebene Fahrzeuge berücksichtigt. Die Energiepreise und folglich auch die aus dem Verbrauch resultierenden Kosten unterliegen Marktschwankungen.

Eine Übersicht über die Entwicklung der Energiepreise von 2012 bis 2022 ist Abbildung 3-2 zu entnehmen. Der Betrachtungszeitraum ist besonders von zwei Ereignissen geprägt: Zuerst wurden der globale Handel sowie Reisemöglichkeiten durch die Corona-Pandemie im Jahr 2020 massiv eingeschränkt (Bundesregierung, 2020). Die Kraftstoffnachfrage sowie die Rohölnachfrage gingen zeitweise stark zurück, was zu einem Preisverfall für Diesel und Superbenzin führte (Statistisches Bundesamt & en2x, 2023b, 2023a; Wellenreuther, 2020). Mit dem Nachlassen der Beschränkungen durch die Corona-Pandemie stiegen Nachfrage und somit die Ölpreise wieder an. Zusätzlich begann am 24.02.2022 der russische Angriffskrieg auf die Ukraine. Westliche Länder, die Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU) eingeschlossen, reagierten mit Sanktionen gegen die russische Regierung, um das Land wirtschaftlich und finanziell zu schwächen und in seinen Handlungsmöglichkeiten im Angriffskrieg zu beschränken (Arnold et al., 2008; Bundesregierung, 2022, 2023a). Diese Sanktionen betreffen unter anderem den Import von russischem Öl und Gas (Bundesregierung, 2023a). Ziel der EU ist es, unabhängig von russischer Energie zu werden (Bundesregierung, 2022). Das Zusammenwirken der eben beschriebenen Ereignisse bewirkt, dass der Dieselpreis um 53 % und der Benzinpreis um 32 % gegenüber dem Mittel der Jahre 2012 bis 2019 ansteigt. Dieser Mittelwert liegt in etwa bei dem Niveau von 2018.

Zu beachten ist, dass die Dieselpreise für Großabnehmer einige Cent unter den hier angegebenen Preisen liegen können. Der BGL (2019) hat eine Übersicht über die Großabnehmerpreise für die Jahre 2010 bis 2019 herausgegeben. Die Preise liegen in diesen Jahren durchschnittlich zwischen 91 und 118 ct/l (BGL, 2019). Die Strompreise für Gewerbe- und Industriekunden bleiben zwischen 2014 und 2018 relativ konstant. Die Gewerbekundenpreise unterlagen in den Jahren 2014 bis 2018 Schwankungen von unter 2 % und die Industriekundenpreise unter 8 %.

Die deutschen Strompreise sind hingegen nach einem Anstieg vom Jahr 2012 zu 2013 bis 2019 weitestgehend stabil und steigen im Durchschnitt nur leicht an. Auch hier liegt der Mittelwert der Jahre 2012 bis 2019 bei dem Preisniveau aus dem Jahr 2018. Insbesondere die Erhöhung der Gaspreise, ausgelöst durch Sanktionen wegen des russischen Angriffskriegs,

wirkt sich aus Verbrauchersicht negativ auf die Strompreise in 2022 aus (Bundesregierung, 2022). So steigt der Strompreis für Haushaltskunden mit Grundversorungsvertrag um ca. 36 % gegenüber eben genanntem Mittelwert an.

Im weiteren Verlauf dieser Dissertation wird mit Szenarien gearbeitet, um Auswirkungen von Preisänderungen auf die Fahrzeugkosten und somit die Tourenplanung abschätzen zu können. Im Basis-Szenario wird mit den Energiepreisen von 2018 gearbeitet, da diese den Mittelwert der Jahre 2012 bis 2019 gut repräsentieren. Für ein Worst Case Szenario wird in Abschnitt 6.1 zusätzlich mit den Energiepreisen aus dem Jahr 2022 kalkuliert.

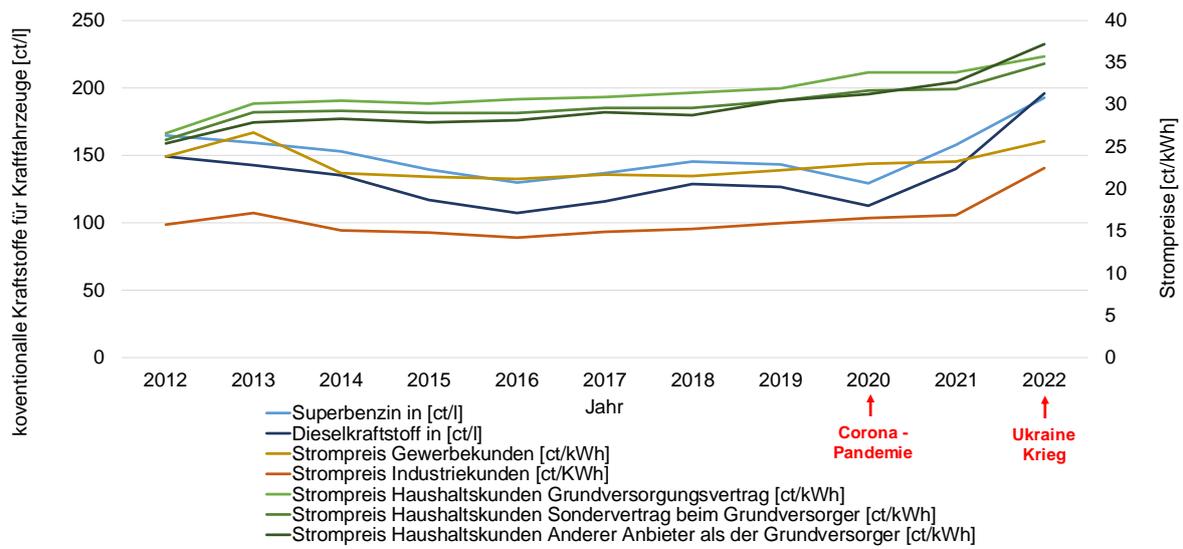


Abbildung 3-2: Entwicklung der durchschnittlichen Energiepreise für Diesel, Benzin und Strom von 2012 bis 2022 (Bundesnetzagentur & Bundeskartellamt, 2023a, 2023b; Statistisches Bundesamt & en2x, 2023b, 2023a)

Der Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs ist unter anderem von dem Fahrzeugtypen, der Fahrzeuggröße und der Auslastung eines Fahrzeugs abhängig (siehe hierzu auch Abschnitt 4.2.2). Daher sollte zur Berechnung der Kraftstoffkosten je Kilometer zwischen unabhängigen-variablen Kosten und ladungsabhängigen variablen Kosten unterschieden werden. Die unabhängigen-variablen Kosten richten sich nach dem Fahrzeugtypen und entsprechen dem Leerverbrauch eines Fahrzeugs. Die ladungsabhängigen variablen Kosten orientieren sich an der Auslastung eines Fahrzeugs.

Bezieht man zusätzlich zu den in Abbildung 3-2 aufgeführten Kosten (Basisjahr 2018) die Verbräuche unterschiedlicher Fahrzeugtypen bei einer durchschnittlichen Fahrzeugauslastung von 50 % mit ein, ergeben sich die variablen Kosten je gefahrenem Kilometer aus Abbildung 3-3. Es zeigt sich, dass bei einer reinen Betrachtung der Kraftstoffpreise das Elektrofahrzeug je gefahrenem Kilometer am günstigsten abschneidet. Die Kosten des 3,5 t Elektro-Vans liegen sogar unter dem Diesel-PKW und bemessen nur 21 % der Kosten eines gleichwertigen Diesel-Transporters. Für einen realistischen Vergleich der variablen Kosten sollten die Kosten je km und Sendung verglichen werden.

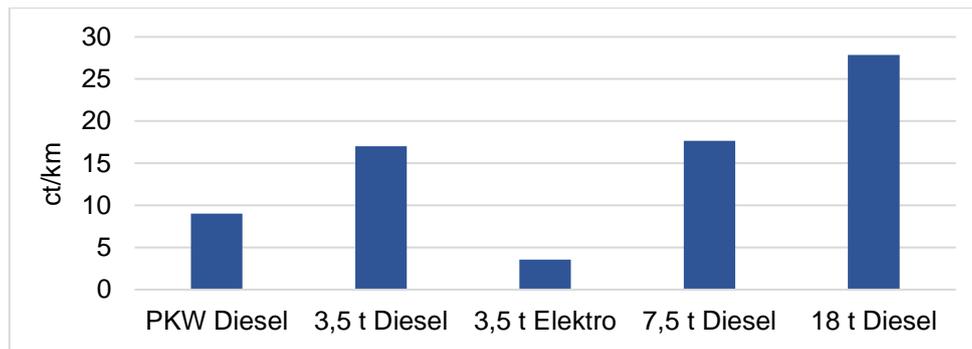


Abbildung 3-3: Kraftstoffkosten verschiedener Fahrzeugtypen in ct/km für das Jahr 2018 (in Anlehnung an Statistisches Bundesamt & en2x (2023a), Bundesnetzagentur & Bundeskartellamt (2023a), Schwartz (2017))

Seit dem 01.10.2015 wird für Fahrzeuge zur Güterbeförderung ab einer Größe von 7,5 t auf ausgezeichneten Bundesstraßen und Autobahnen in Deutschland eine kilometerabhängige Mautgebühr erhoben. Die Zusammensetzung und die Höhe der Mautsätze sind in dem Bundesfernstraßenmautgesetz geregelt. Die Höhe der Mautsätze richtet sich dabei nach der Straßenbelastung durch ein Fahrzeug. Somit steigen die kilometerabhängigen Mautsätze mit zunehmender Fahrzeuggröße. Die Regelung gilt vor allem für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Erdgas betriebene Fahrzeuge sind für 2019 und 2020 von der Maut befreit. Danach gilt eine ermäßigte Gebühr. Elektro- und Hybridfahrzeuge sowie Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle sind bislang gänzlich von der Mautgebühr entbunden (*Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen*, BFStrMG, 2017).

Weiterhin steigt die Abnutzung der Reifen mit der Nutzungsintensität eines Fahrzeugs. Auch Werkstatt- und Instandhaltungskosten sind von dem Einsatzzeit eines Fahrzeugs abhängig. Je häufiger das Fahrzeug im Betrieb ist bzw. je höher die jährliche Kilometerleistung, desto schneller müssen Verschleißteile gewechselt und der Wartungsservice, wie Ölwechsel, durchgeführt werden.

3.2 Hauptkostengruppe B: Fahrpersonal

Das Fahrpersonal ist dafür zuständig, die Fahrten durchzuführen und Ware auszuliefern. Die Kosten für das Personal umfassen den Lohn, die Vertretung für Urlaubstage, ggf. Zuschläge für Wochenend- und Nachtarbeit, Sozialaufwendungen, Spesen und den Arbeitsgeberanteil für Krankenversicherung und Rentenbeiträge (Wittenbrink, 2011). Die tatsächlichen Kosten richten sich nach der Arbeitszeit eines Fahrers. Die Arbeitszeit setzt sich einerseits aus den tatsächlichen Fahrten (Lenkzeit), andererseits aus dem Ein- und Ausladen der Ware zusammen. Je mehr Stopps ein Fahrzeug durchführt bzw. je mehr Kunden besucht werden, desto größer ist die kumulierte Zeit der Ladevorgänge und desto kürzer die Zeit für zu tätige Fahrten. Fahrer unterliegen dem Arbeitszeitgesetz und müssen sich demnach streng an Lenk- und Ruhezeiten halten. Die genauen Lenk- und Ruhezeiten sind in der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 geregelt. Demnach müssen Fahrer folgende Zeiten einhalten:

- Innerhalb von 24 h muss eine Pause von 11 h eingehalten werden

- Die Lenkzeit zwischen zwei täglichen Ruhezeiten darf maximal 9 h betragen, zweimal die Woche darf die Lenkzeit maximal 10 h betragen
- Nach 4,5 h muss eine Pause von 45 Minuten eingehalten werden
- Die 45-minütige Pause kann in zwei Pausen von einer mindestens 15-minütigen und einer mindestens 30-minütigen Pause unterteilt werden.

Diese Lenk- und Ruhezeiten müssen bei der Tourenplanung berücksichtigt werden. Ein Fahrtschreiber dient der Aufzeichnung und Dokumentierung der Lenk- und Ruhezeiten. Dieser ist bei Fahrzeugen ab einer zulässigen Höchstmasse von 3,5 t verpflichtend (*Verordnung (EU) Nr. 165/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates über Fahrtschreiber im Straßenverkehr, zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 3821/85 des Rates über das Kontrollgerät im Straßenverkehr und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Harmonisierung bestimmter Sozialvorschriften im Straßenverkehr*. Verordnung (EU) Nr. 165/2014, 2014).

Um die Abwesenheit eines Fahrers durch Urlaub oder Krankheit auszugleichen, müssen mehr Fahrer eingestellt werden als sich gleichzeitig im Einsatz befindende Fahrzeuge. Zu diesem Zweck kann mit einem Personalfaktor kalkuliert werden, da i. d. R. für jedes Fahrzeug weniger als zwei, aber mehr als ein Fahrer eingestellt werden müssen (Gries & Zelewski, 2015; Wittenbrink, 2011).

Im Jahr 2018 betrug der durchschnittliche Bruttojahresverdienst von Berufskraftfahrern in Deutschland 28.039 € (Statista, 2018). Einschließlich Personalfaktor (1,3) und Arbeitgeberanteil zur Sozialversicherung (ca. 23 %) liegen die Fahrerkosten damit genau im vorgegebenen Kalkulationsrahmen von Wittenbrink (2011) zwischen 40.000 und 50.000 € pro Jahr.

3.3 Hauptkostengruppe C: Fixe zeitabhängige Kosten

Die fixen, zeitabhängigen Kosten betreffen mit dem Fuhrpark in Verbindung stehende Kosten. Die Kosten entstehen unabhängig von der Nutzung eines Fahrzeugs (Gudehus, 2012) und umfassen vorwiegend den Kaufpreis oder die monatlichen Leasing-Gebühren eines Fahrzeugs inklusive eines Fahrtschreibers, die Steuern und die Versicherung, kalkulatorische Zinsen und Abschreibungen, ggf. den Wiederbeschaffungspreis eines Fahrzeugs und den monatlichen Wertverlust des Fahrzeugs (Gries & Zelewski, 2015; Gudehus, 2012; Wittenbrink, 2011).

Die Höhe der Anschaffungs- oder der Leasingkosten eines Fahrzeugs richtet sich nach dessen Ausstattung und Antriebssystem. So sind Elektrofahrzeuge in der Anschaffung beispielsweise teurer als ein Diesel betriebenes Fahrzeug, was vor allem an den relativ hohen Batteriekosten liegt (Gries & Zelewski, 2015). Die Höhe der kalkulatorischen Zinsen und Abschreibungen hängen vom Anschaffungspreis und dem Restwert eines Fahrzeugs ab. Wittenbrink (2011) empfiehlt, statt dem Anschaffungspreis den Wiederbeschaffungspreis zur Kalkulation der Abschreibungen zu berücksichtigen. Somit würde vorausgesetzt werden, dass die Abschreibungen nicht zur Finanzierung des aktuellen Fahrzeugs, sondern zum Ansparen des Kapitals für die Neuinvestition eines Ersatzfahrzeuges genutzt werden (Gudehus, 2012). Auf diese Weise könnten der technische Fortschritt sowie zukünftige Preissteigerungen berücksichtigt werden

(Wittenbrink, 2011). Zudem kann der Restverkaufserlös einbezogen werden (Wittenbrink, 2011).

Für Berechnungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Wiederbeschaffungswert (WW) eines Fahrzeugs, welcher sich aus dem Anschaffungswert zzgl. 15 % Preissteigerung (Wittenbrink, 2011) ergibt, abzüglich dem Restwert eines Fahrzeugs am Ende dessen Nutzungsdauer (RW) berücksichtigt. Zur Kalkulation der Nutzungsabschreibungen muss die Differenz aus WW und RW auf die Fahrleistung (FL) bis zum Ende des Abschreibungszeitraums geteilt werden. Dadurch ergibt sich folgende Formel:

$$\text{Abschreibung} = (WW - RW) / FL \quad (3-1)$$

Die Fahrleistung bis zum Ende des Abschreibungszeitraumes richtet sich nach den Jahren, über die ein Fahrzeug abgeschrieben werden soll. Die tatsächliche Nutzung des Fahrzeugs kann darüber hinaus erfolgen, sodass die Fahrleistung am Ende der Nutzungsdauer eines Fahrzeugs in der Regel höher liegt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Ansparung des Kaufpreises für ein neues Fahrzeug abgeschlossen ist, bevor dieses einen größeren Defekt hat oder die Reparaturkosten unwirtschaftlich werden. Damit wird das Risiko eines Fahrzeugausfalls minimiert. Eine Nutzung des Fahrzeugs über den Abschreibungszeitraum hinaus wirkt sich folglich positiv auf den Ertrag aus der Transportdienstleistung aus.

Über die kalkulatorischen Zinsen wird die Mittelbindung für das Umlaufvermögen berücksichtigt (Wittenbrink, 2011). Die notwendigen finanziellen Mittel müssen beispielsweise für den Tankvorrat, Tauschpaletten oder Ersatzteile aufgebracht werden. Nach Gudehus (2012) sollten die kalkulatorischen Zinsen bei Gütern und Anlagen, deren Wert zum Ende der Nutzungsdauer abnimmt, nach dem Verfahren der Durchschnittsverzinsung berechnet werden. Die Zinsbelastung ergibt sich schließlich aus dem Anschaffungswert (AW), dem RW und dem Zinssatz (z). Nach Wittenbrink (2011) variieren die Gemeinkosten je nach Größe des Unternehmens zwischen 8 und 18 %. Da im Rahmen dieser Arbeit eher kleinere Unternehmen betrachtet werden, wird in Anlehnung an Wittenbrink (2011) mit einem Zinssatz von 8,4 % kalkuliert. Die Zinsbelastung wird demnach mit folgender Formel ermittelt:

$$\text{Zinsbelastung} = z * (AW + RW) / 2 \quad (3-2)$$

Der ADAC (2018) hat für diverse gängige Automodelle aus dem Sommer 2018 eine Kostenübersicht erstellt. Dieser Übersicht können Anschaffungskosten, Fixkosten bestehend aus Versicherung, Steuern und TÜV, durchschnittliche Werkstattkosten und der Wertverlust der jeweiligen Fahrzeugtypen entnommen werden (ADAC, 2018). Diese Kostenaufstellung hilft vor allem bei der Fahrzeugkostenkalkulation von privaten PKW kleiner Erzeuger, die für Auslieferungstouren genutzt werden oder bei Dienstleistungen mit einem Van (3,5 t). Der ADAC (2018) setzt eine Jahreskilometerleistung der Fahrzeuge von 15.000 km voraus. Die Kalkulation des ADAC (2018) wurde zwar für rein privat genutzte PKW durchgeführt, allerdings geben auch Rötter (2017) und eine Datenerhebung bei einem Naturkostgroßhändler kurze jährliche Kilometerleistungen von rund 5.000 - 6.000 km für Vans an (2018). Bei intensiv betrieblich genutzten Fahrzeugen einer größeren Spedition oder einem Großhändler mit eigener Logistik kann die Jahreskilometerleistung gerade für große Fahrzeuge mit längeren Touren oder bei

kleineren intensiv genutzten Fahrzeugen deutlich höher liegen. Wittenbrink (2011) legt seiner Fahrzeugkostenkalkulation mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen 130.000 km pro Jahr zugrunde.

Die Kilometerleistung wirkt sich entsprechend auf die spezifischen Fixkosten je Kilometer aus. Gudehus (2012) bezeichnet diese Auswirkung als das Fixkostendilemma: Ein Fahrzeug verursacht Fixkosten unabhängig von seiner tatsächlichen Nutzung. Legt man die jährlichen Fixkosten auf die gefahrenen Kilometer um, sinken die Kosten pro Kilometer mit steigender Jahreskilometerleistung (Gudehus, 2012). Das bedeutet einerseits, dass ein Fahrzeug möglichst intensiv genutzt werden sollte und andererseits bei der Nutzung möglichst voll beladen werden sollte, um die Kosten je Transportgut und zurückgelegtem Kilometer möglichst gering zu halten. Hier entsteht das Problem der richtigen Dimensionierung. Ist ein Fahrzeug zu klein, können ggf. nicht alle Güter transportiert und die Nachfrage nicht gedeckt werden. Ist ein Fahrzeug zu groß, kann es ggf. nicht stark genug ausgelastet werden und die Fixkosten werden zu hoch.

3.4 Hauptkostengruppe D: Gemeinkosten

Bei den Gemeinkosten handelt es sich um weitere Aufwendungen für die Verwaltung, die durch die Logistikdienstleistung gedeckt werden müssen. Die Aufwendungen umfassen u. a. Kosten für das Verwaltungspersonal, den Unternehmerlohn für den Geschäftsführer, IT- und Kommunikationskosten, kalkulatorische Wagnisse, Gebäude- und Energiekosten, Kosten für Marketing und Vertrieb und ggf. die Lagerhaltung (Bloech & Ihde, 1997; Gudehus, 2012; Wittenbrink, 2011).

Alle Gemeinkosten müssen auf den einzelnen LKW bzw. die Jahreskilometerleistung aufgeschlüsselt werden. Dies wird mittels eines so genannten Gemeinkostenaufschlags auf die Fahrerkosten vorgenommen. Laut Wittenbrink (2011) liegt dieser Gemeinkostenaufschlag in der Regel zwischen 8 und 18 %. Es ist aber ebenfalls möglich einen absoluten Aufschlag festzusetzen.

PersonalMarkt (2011) hat im Jahr 2011 rund 12.000 Datensätze über Jahresbruttoverdienste in der Logistikbranche ausgewertet. Die Statistik enthält unter anderem Angaben über Geschäftsführergehälter sowie die Gehälter von Speditionsleitern Vertriebsmitarbeitern und Fachkräften in der Lagerwirtschaft (PersonalMarkt, 2011).

Die Wagnis- und Risikokosten werden für mögliche Forderungsausfälle, die Eigenbeteiligung bei Schäden durch Umweltweinflüsse, wie z. B. einem Sturm, Arbeitsausfälle durch Streiks o. ä. kalkuliert (Wittenbrink (2011)). Es kann ein gemeinsamer Aufschlag für Wagnis und Risiko von ca. 5 % berücksichtigt werden (Wittenbrink (2008) zit nach Wittenbrink (2011)).

Die Höhe der Gemeinkosten und des Aufschlags richtet sich vor allem nach der Unternehmensgröße. Bei kleineren Unternehmen sind die Gemeinkosten in der Regel geringer als bei Größeren, dennoch sollten sie berücksichtigt werden (Wittenbrink, 2011). Um unabhängig von Lohnsteigerungen zu sein, wurde in dieser Dissertation mit dem von Wittenbrink (2011) vorgeschlagenen Aufschlag für kleine Unternehmen in Höhe von 8,4 % gerechnet.

3.5 Verteilung der Kostengruppen und -positionen auf die gesamten Fahrzeugkosten

Die gesamten Fahrzeugkosten (TC) errechnen sich aus der Summe der fixen variablen Kosten (var_{fix}), den ladungsabhängigen variablen Kosten (var_{lad}), der zurückgelegten Strecke (D_{ges}), den Personalkosten (P), der Auslieferungszeit (Z_{ges}), den Fixkosten (Fix) und den Gemeinkosten (G):

$$TC = (var_{fix} + var_{lad}) \cdot D_{ges} + P \cdot Z_{ges} + Fix + G \quad (3-3)$$

Die Anteile der Kostengruppen und der Kostenpositionen innerhalb der Gruppen an den gesamten Fahrzeugkosten können je nach Auslieferungsart und Fahrzeuggröße stark variieren. Wittenbrink (2011) hat in einer detaillierten Analyse die Kosten des Fern-, Regional- und Nahverkehrs gegenüber gestellt. Diese drei Verkehrsbereiche definiert er über die jährliche Fahrleistung. Den Regionalverkehr grenzt er über eine Fahrleistung von 80.000 km, den Nahverkehr über 40.000 km und den Fernverkehr über eine Leistung von 130.000 km pro Jahr ein (Wittenbrink, 2011).

Als Beispiel eines typischen Nahverkehrsfahrzeugs analysiert Wittenbrink (2011) die Kostenstruktur eines Kastenwagens (3,5 t). Er trifft die Annahme, dass Kastenwagen im Nahverkehr hauptsächlich durch Aushilfsfahrer gefahren werden. Daher legt er mit 20.000 € pro Jahr einen geringen Bruttolohn für die Personalkosten fest. Wobei dieser noch immer über dem seit 2015 geltenden Mindestlohn von 8,50 € pro Stunde liegt (IAQ, 2022). Im Jahr 2018 lag der Bruttomindestlohn nur leicht höher mit 8.84 € pro Stunde. Seit 2022 gilt ein Mindestlohn von 12 € pro Stunde (IAQ, 2022).

Die Maut kann unberücksichtigt bleiben, da erst ab einer Fahrzeuggröße von 7,5 t eine Mautgebühr erhoben wird. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass im Nahverkehr, wie bei Wittenbrink (2011) definiert, kaum Mautstraßen befahren werden. Unter den gegebenen Annahmen bemessen die zeitabhängigen (fixen) Kosten 67 %, die leistungsabhängigen Kosten rund 24 % und die Gemeinkosten lediglich 9 % der Gesamtkosten. Bei einem 7,5 t Fahrzeug für den Nahverkehr sinkt der Fixkostenanteil auf 64 % und die leistungsabhängigen Kosten steigen auf 27 %. Bei einem Regionalfahrzeug sinkt der Fixkostenanteil weiter auf 58 % und die leistungsabhängigen Kosten erhöhen sich auf 33 %. Die Gemeinkosten liegen auch im Regionalverkehr bei 9 % der Gesamtkosten (Wittenbrink, 2011).

Wittenbrink (2011) hat darüber hinaus LKWs verschiedener Größen für den Fernverkehr untersucht. Bei LKWs für den Fernverkehr ist die Verteilung zwischen zeitabhängigen und leistungsabhängigen Fahrzeugkosten fast gleich verteilt. (Wittenbrink, 2011). Es zeigt sich insgesamt, dass die leistungsabhängigen Kosten mit zunehmender Fahrzeuggröße steigen und die zeitabhängigen Kosten sinken. Dies liegt allerdings vor allem an der variierenden Jahreskilometerleistung, die unter den Annahmen von Wittenbrink (2011) bei größeren Fahrzeugen höher als bei kleineren ist. Wittenbrink (2011) hat die Kostenstruktur derselben Fahrzeugtypen bei einer Jahreskilometerleistung von 130.000 km analysiert. In dieser Analyse sind die Unterschiede in der Kostenverteilung zwischen den LKW-Typen und den Nahverkehrs- und Regionalfahrzeugen geringer. Die leistungsabhängigen Kosten sind bei den Regionalfahrzeugen mit

einem Anteil von 37 % am höchsten und beim Nahverkehr (3,5 t) mit 27 % am geringsten. Bei den LKWs sind es zwischen 30,5 und 32 %. Die zeitabhängigen Kosten sind hingegen bei den LKWs mit 57 – 62 % am geringsten und beim Nahverkehr (3,5 t) mit 73 % am höchsten. Zu beachten ist, dass für die Fernverkehrs-LKW zusätzlich Mautgebühren, die zwischen 7 und 11 % der Gesamtkosten ausmachen, anfallen (Wittenbrink, 2011).

Im Rahmen dieser Dissertation wird zusätzlich eine eigene Fahrzeugkostenrechnung für fünf Fahrzeugtypen durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.1 dargestellt und analysiert. Diese Fahrzeugkostenrechnung dient der weiteren Bewertung der Tourenplanungskosten der regionalen Lebensmitteldistribution und ist speziell an die Anforderungen der Fragestellung dieser Arbeit angepasst.

Nachdem in diesem Kapitel die Grundlagen der Fahrzeugkostenrechnung dargelegt wurden, wird im nächsten Kapitel der methodische Ansatz zur kooperativen Tourenplanung der regionalen Lebensmitteldistribution erläutert.

4 Methodischer Ansatz des Vehicle Routing Problems

Bei dem Tourenplanungs- oder Vehicle Routing Problem (VRP) handelt es sich um ein ganzzahliges, kombinatorisches Optimierungsproblem, das mittels Methoden des Operations Research gelöst werden kann (Domschke & Scholl, 2010; Neumann & Morlock, 2004). Bei der Modellierung dieser Art von Problemen sind ganzzahlige und binäre Variablen zugelassen. Auf diese Weise können auch komplexe Wirkungszusammenhänge, wie logische Verbindungen, dargestellt und gelöst werden (Domschke et al., 2015).

Im Allgemeinen ist die Tourenplanung, neben der Lagerung, Teil der Distributionslogistik, dem Bindeglied zwischen produzierenden Unternehmen und den Verbrauchern (Kunden) (Bloech & Ihde, 1997; Gudehus, 2010). Ein typisches Problem kann die Auslieferung von Lebensmitteln an den LEH sein. Dabei stellen sich unter anderem die Fragen nach einer geeigneten Reihenfolge, der passenden Fahrzeuggröße oder welcher Kunde von welchem Fahrzeug beliefert werden soll.

In der Tourenplanung wird generell zwischen kanten- und knotenorientierten Problemen unterschieden (Vahrenkamp & Mattfeld, 2007). Kantenorientiert bedeutet, dass in einem Netzwerk, bestehend aus Kanten (Straßen) und Knoten (Orten/Kunden), bestimmte Kanten, wie beispielsweise bei der Müllabfuhr oder der Briefzustellung, angefahren werden müssen. Knotenorientiert bedeutet hingegen, dass bestimmte Knoten des Netzwerks besucht werden müssen, wie bei der Einsammlung oder Auslieferung von Lebensmitteln. Über welche Kanten die Knoten angefahren werden, spielt bei knotenorientierten Problemen keine oder eine untergeordnete Rolle (Domschke & Scholl, 2010).

Aufgrund des Schwerpunktes der regionalen Tourenplanung für Lebensmitteltransporte wird sich im weiteren Verlauf dieser Dissertation auf knotenorientierte VRPs beschränkt. Im Sinne der knotenorientierten VRPs wird unter einer Tour folglich eine Aneinanderreihung von mehreren Knoten, an denen die Kunden von einem Fahrzeug bedient werden, verstanden. Eine Tour im klassischen Sinne startet und endet immer an einem Depot (Vahrenkamp & Mattfeld, 2007).

Das Netzwerk eines VRPs kann in Form eines gerichteten, ungerichteten oder gemischten Graphen (siehe Abbildung 4-1) dargestellt werden. Von einem gerichteten Graphen oder einem symmetrischen VRP spricht man, wenn Kanten nur in eine bestimmte Richtung befahren werden dürfen. Dies trifft v. a. auf Einbahnstraßen zu. Die Fahrtrichtung bei einem ungerichteten Graphen, dem so genannten asymmetrischen VRP, ist irrelevant. Ein gemischter Graph besteht aus gerichteten und ungerichteten Kanten und ist damit der Realität, in welcher sowohl Einbahnstraßen als auch in beide Richtungen befahrbare Straßen vorkommen, am nächsten (Domschke & Scholl, 2010).

In Abbildung 4-1 ist ein beispielhaftes Netzwerk mit einem gemischten Graphen dargestellt. Der Knoten „0“ symbolisiert das Depot, an dem Touren starten und enden. Sollten die Touren auf zwei Fahrzeuge aufgeteilt werden, könnte sich der in Abbildung 4-2 dargestellte

Tourenplan ergeben. Aufgrund der Einbahnstraße zwischen Knoten „0“ und Knoten „3“ kann die rote Tour nur in eine Richtung abgefahren werden. Dies wird über die gerichteten Kanten dargestellt. Bei der blauen Tour hingegen wäre die Reihenfolge, in der die Kunden besucht werden, ohne weitere Restriktionen irrelevant. Daher sind die Kanten ungerichtet.

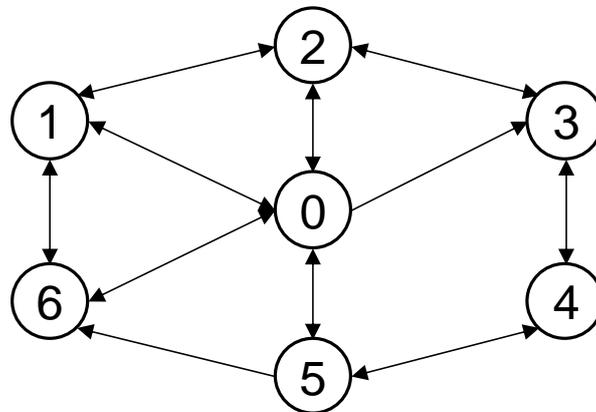


Abbildung 4-1: Beispiel eines gemischten Graphen

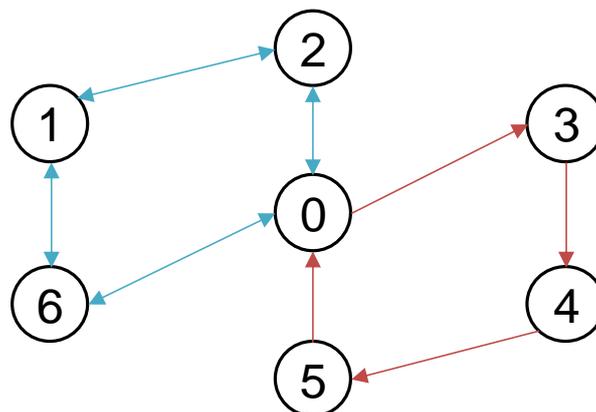


Abbildung 4-2. Beispiel eines möglichen Tourenplans für das Netzwerk aus Abbildung 4-1

In der Praxis findet die Tourenplanung eine breite Anwendung. Auch für die Fragestellung dieser Arbeit eignet sich das VRP. Es dient dazu, die Längen und Zeiten möglicher Touren bei einer kooperativen Tourenplanung kleiner, regionaler Erzeuger durch Regionalvermarktungsinitiativen zu bestimmen. Somit stellt das VRP neben der Fahrzeugkostenrechnung die wichtigste Grundlage zur Entwicklung einer Auslieferungsstrategie der Regionalvermarktungsinitiativen dar.

Dadurch, dass sich die Anforderungen je nach Branche hinsichtlich einer Vielzahl an Unterproblemen stark unterscheiden können, bedarf es passender problemorientierter Lösungsverfahren (Domschke & Scholl, 2010; Gietz, 1994). Zahlreiche solcher Lösungsverfahren wurden für VRPs bereits entwickelt (Domschke & Scholl, 2010). Nachfolgend wird zunächst das klassische Transportproblem vom klassischen VRP abgegrenzt. Während mittels des VRPs Touren für die kooperative Tourenplanung ermittelt werden können, kann das Standard-Transportproblem – das Travelling Salesman Problem (TSP) – zur Bestimmung von Touren der Erzeuger bei eigener Auslieferung genutzt werden. In Abschnitt 4.2 werden mögliche Erweiterungen

des VRPs vorgestellt. Ein Einblick in die gängigen Lösungsverfahren wird in Abschnitt 4.3 gegeben.

4.1 Abgrenzung des Standard-Transportproblems vom klassischen Vehicle Routing Problem

Das Standard-Transportproblem ist das Problem des Handlungsreisenden bzw. das Travelling Salesman Problem (TSP). Dabei besucht ein Handlungsreisender eine gegebene Anzahl von Knoten. Gesucht ist der kürzeste Verbindungsweg zwischen diesen Knoten, bei dem jeder Knoten genau einmal besucht wird (Domschke & Drexl, 1991). Für das Anfahren dieser Knoten soll die Reihenfolge mit minimaler Tourenlänge bestimmt werden (Vahrenkamp & Mattfeld, 2007). Dabei startet und endet eine Tour in der Regel beim Depot, d. h. der Startknoten entspricht i. d. R. dem Endknoten (Gietz, 1994). Auf diese Weise erhält man eine so genannte geschlossene Tour. Sind Start- und Endknoten unterschiedlich, spricht man von einer offenen Tour (Vahrenkamp & Mattfeld, 2007). Beim klassischen TSP sind die Entfernungen symmetrisch, d. h. sie sind richtungsunabhängig (Gietz, 1994). Die Modellierung des Netzwerks erfolgt über ungerichtete Graphen.

Während beim TSP nur ein Fahrzeug benötigt wird, steht beim klassischen VRP eine Fahrzeugflotte identischer (homogener) Fahrzeuge zur Verfügung (Gietz, 1994). Die Menge der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge ist begrenzt. Alle Fahrzeuge sind am Depot stationiert. Zielsetzung des klassischen VRP ist, die Fahrzeuge je einer Rundtour zuzuordnen, sodass die insgesamt zurück gelegte Strecke minimal ist (Gietz, 1994).

Das klassische VRP wurde 1959 erstmals von Dantzig & Ramser mit dem „Truck Dispatching Problem“ eingeführt (Cordea et al., 2002; Dantzig & Ramser, 1959; Gietz, 1994; Koç et al., 2016). Im Gegensatz zum TSP werden beim VRP mehrere Touren gleichzeitig gebildet. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit zwei Teilprobleme zu lösen: Das Zuordnungsproblem, welches die Zuordnung von Knoten zu Touren vornimmt, und das Reihenfolgeproblem, bei dem die Knoten innerhalb einer Tour in eine Reihenfolge gebracht werden (Gietz, 1994). Je nach Lösungsverfahren ergibt sich die Reihenfolge der zu lösenden Teilprobleme. Es wird gängiger Weise zwischen „route first, cluster second“ und „cluster first, route second“ unterschieden (Domschke & Scholl, 2010).

Zusätzlich wird für jeden Kunden beim klassischen VRP eine Nachfragemenge berücksichtigt. Diese Nachfrage muss durch das auszuliefernde Fahrzeug bedient werden. Jedes Fahrzeug verfügt über eine Kapazitätsobergrenze. Wird diese Obergrenze überschritten, muss der nächste Kunde von einem anderen Fahrzeug beliefert werden. Die Zielsetzung des klassischen VRPs besteht demnach in der Planung von Touren unter Einhaltung der Kapazitätsrestriktion und der vollständigen Bedienung der Nachfrage, sodass die insgesamt mit allen Fahrzeugen gefahrene Strecke minimiert wird (Gietz, 1994). Neben der Minimierung der insgesamt zurückgelegten Strecke sind aber auch andere Zielfunktionen, wie die Minimierung von Emissionen, die Minimierung der Fahrzeuge oder die Minimierung der Transportkosten, denkbar.

Das VRP gehört zur Klasse kombinatorischer Optimierungsprobleme. Folglich handelt es sich, wie bereits angesprochen, um ein Reihenfolgeproblem (Gietz, 1994). Sowohl das VRP als

auch das TSP gelten als NP-schwere Probleme (Domschke & Scholl, 2010; Vahrenkamp & Mattfeld, 2007). NP-schwer bedeutet, dass das Problem auf einem sequenziell arbeitenden Rechner nicht in polynomialer Zeit lösbar ist. Beim TSP und VRP wächst die Rechenzeit exponentiell mit der Problemgröße an (Gietz, 1994). Der Rechenaufwand entspricht damit einer Größe von $O(2^n)$ (Gietz, 1994). Bei n verschiedenen Knoten existieren $n-1!$ Alternative Lösungen (Vahrenkamp & Mattfeld, 2007). Auf den Rechenaufwand wird näher in Abschnitt 4.3 eingegangen.

Daher können VRPs in Abhängigkeit von ihrer Komplexität nicht zwingend optimal gelöst werden. Die Komplexität eines Problems wird vor allem durch die Größe der Instanz bzw. der Menge an Parametern, wie der Anzahl zu besuchender Knoten, in dem Netzwerk bestimmt. Aber auch die Restriktionen des Problems, wie beispielsweise Kapazitäts- oder Zeitbeschränkungen, beeinflussen die Komplexität eines VRPs (Domschke & Scholl, 2010).

Bei dem klassischen VRP ist ein asymmetrischer (gerichteter) Graph $G = (E, A)$ gegeben. N entspricht der Menge an Knoten, wobei der Knoten 0 dem Depot und die Knoten 1 bis n den Kunden entsprechen. A ist die Menge der Kanten. Jeder Kante (i, j) $i \neq j$ wird eine positive Distanz $D = (d_{ij})$ zugewiesen. Die Distanz D kann auch durch Emissionen, eine Kosten- oder Zeiteinheit ersetzt werden. V repräsentiert die Menge aller Fahrzeuge (Laporte, 1992).

Laporte (1992) schlägt für das oben beschriebene klassische VRP, das so genannte kapazitierte VRP (CVRP), bei einer Einsammlungstour folgendes mathematisches Modell mit drei Indizes vor:

Notation	Beschreibung
E	Menge aller Knoten i oder $j = 0, \dots, n$ (inkl. Depot)
N	Menge aller Knoten i oder $j = 1, \dots, n$ (exkl. Depot)
V	Menge aller Fahrzeuge von $k = 1, \dots, m$
d_{ij}	Distanz zwischen Knoten i und j
x_{ijk}	Entscheidungsvariable über Fahrt auf einer Kante i, j mit Fahrzeug k
y_{ik}	Entscheidungsvariable über Besuch eines Knoten i mit Fahrzeug k
q_i	Abholmenge an Knoten i
Q	Kapazitätsbeschränkung der Fahrzeuge
S	Teilmenge aus V

$$\sum_{i \in E} \sum_{j \in E} \sum_{k \in V} d_{ij} \cdot x_{ijk} \quad (4-1)$$

u. d. N.

$$\sum_{i \in E} q_i \cdot y_{ik} \leq Q_k \quad \forall k \in V \quad (4-2)$$

$$\sum_{k \in V} y_{0k} \leq m \quad (4-3)$$

$$\sum_{k \in V} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (4-4)$$

$$\sum_{j \in E} x_{ijk} = y_{ik} \quad \forall k \in V, \forall i \in E \quad (4-5)$$

$$\sum_{i \in E} x_{ijk} = y_{jk} \quad \forall k \in V, \forall j \in E \quad (4-6)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad S \subset A, |S| \geq 1, \forall k \in V \quad (4-7)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in E, \forall j \in E, \forall k \in V \quad (4-8)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in E, \forall k \in V \quad (4-9)$$

Die Zielfunktion (4-1) minimiert die gefahrene Distanz aller Fahrzeuge k aus der Menge an m Fahrzeugen über die Kanten (i, j) . Nebenbedingung (4-2) gewährleistet die Einhaltung der Kapazitätsrestriktion C der Fahrzeuge. Die Nebenbedingungen (4-3) und (4-4) stellen sicher, dass das Depot von allen m Fahrzeugen und die Knoten der Kunden nur von jeweils einem Fahrzeug besucht werden. Die Nebenbedingungen (4-5) und (4-6) verbinden die Knoten mit den Kanten einer Tour, während die Subtour-Eliminationsbedingung (Zyklusbedingung) (4-7) verhindert, dass Touren ohne Depot (Kurzyklen) gebildet werden. Nebenbedingung (4-8) und (4-9) sorgen für die Ganzzahligkeit der Entscheidungsvariablen. Die Entscheidungsvariablen sind 0, wenn ein Knoten bzw. eine Kante von Fahrzeug k nicht befahren wird, und 1, wenn der Knoten oder die Kante befahren wird (Laporte, 1992; Neumann & Morlock, 2004).

4.2 Erweiterungen des Vehicle Routing Problems

Neben dem CVRP gibt es weitere Problemvarianten und Erweiterungen des VRPs. Es existieren mittlerweile zahlreiche Publikationen zu den Varianten von Tourenplanungsproblemen und deren Lösung. In Abschnitt 4.1 wird zunächst ein Überblick über gängige Erweiterungsmöglichkeiten des VRPs bei einer konventionellen Fahrzeugflotte bzw. dem Fokus auf einer Kostenreduktion gegeben. In Abschnitt 4.2 werden anschließend neuere Modellerweiterungsmöglichkeiten, die sich auf die Minimierung von Fahrzeugemissionen konzentrieren, vorgestellt.

4.2.1 Konventionelle Erweiterungen des Vehicle Routing Modells

Eine mögliche, für diese Arbeit relevante Erweiterung des in Abschnitt 4.1 vorgestellten CVRP betrifft die Flotte. Beim klassischen CVRP wird von einer homogenen Fahrzeugflotte ausgegangen. In der Praxis kann es jedoch sinnvoll sein einen Fuhrpark, bestehend aus Fahrzeugen verschiedener Größen oder sogar verschiedener Antriebsarten zu haben. Um derartige Flotten in einem VRP abzubilden, wurde das so genannte „Heterogeneous Vehicle Routing Problem“ (HVRP) oder „Mixed Fleet Vehicle Routing Problem“ entwickelt (Golden et al., 1984; Irnich et al., 2014). Koç et al. (2016) haben einen Überblick über Veröffentlichungen im Zusammenhang

mit dem HVRP für den Zeitraum 1985 bis 2015 erstellt. Gängige Erweiterungen neben dem HVRP, beispielsweise von Domschke & Scholl (2010), Fleischmann & Gietz (2008), Irnich et al. (2014) und Vogt (1998), können Abbildung 4-3 entnommen werden.

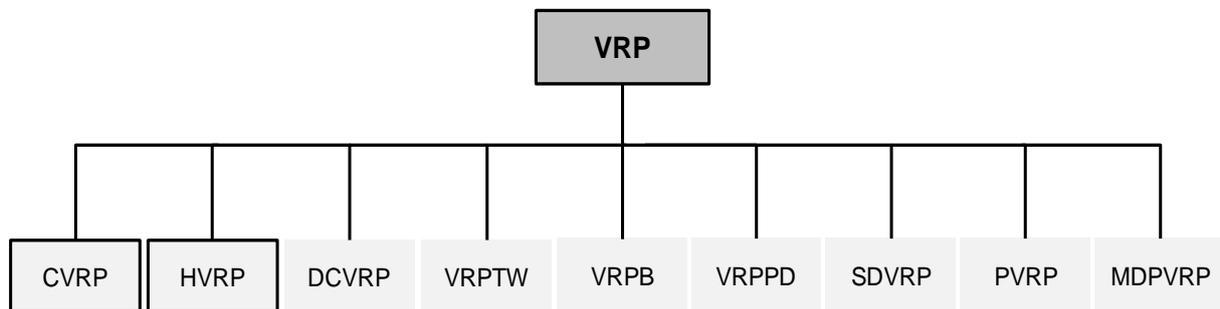


Abbildung 4-3: Überblick über häufige Varianten des VRP (Domschke & Scholl, 2010; Fleischmann & Gietz, 2008; Irnich et al., 2014; Vogt, 1998)

Das Distance-Constraint-VRP (DCVRP) wird von Domschke & Scholl (2010) hinter dem CVRP als zweites Standardproblem der Tourenplanung aufgeführt. Eine derartige Erweiterung stellt sicher, dass eine maximale Tourenlänge nicht überschritten wird. Dies kann je nach Zielfunktion entweder über eine Beschränkung der maximalen Distanz oder der zurückgelegten Zeit je Tour umgesetzt werden (Domschke & Scholl, 2010; Kek et al., 2008).

Beim VRP mit Zeitbeschränkung (VRPTW) wird jedem Kunden bzw. Knoten ein Zeitfenster zugewiesen. Dieses Zeitfenster besagt, wann ein Knoten frühestens besucht und wann er spätestens von dem Fahrzeug verlassen werden muss (Desrochers et al., 1998; Domschke & Scholl, 2010; Fleischmann & Gietz, 2008; Vogt, 1998).

Beim klassischen CVRP wird in der Regel von reinen Einsammlungs- oder Auslieferungstouren ausgegangen. Es ist denkbar, Einsammlungs- und Auslieferungstouren zu kombinieren. In diesem Fall spricht man von einem VRP mit Backhauls (VRPB). Beim VRPB werden manche Kunden beliefert, während bei anderen die Ware eingesammelt wird. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die ausgelieferte Ware vor Tourenbeginn am Depot eingeladen und die eingesammelte Ware nach Tourenende am Depot abgeliefert wird (Fleischmann & Gietz, 2008; Irnich et al., 2014).

Eine andere Variante die Einsammlung und Auslieferung von Waren in einer Tour zu kombinieren, ist das VRP mit Pickup und Delivery (VRPPD). Beim VRPPD wird eingesammelte Ware im Gegensatz zum VRPB direkt auf der Tour an andere Kunden ausgeliefert und muss nicht erst zum Depot gebracht werden. Bei dieser Variante kann das Fahrzeug, je nach Modellanforderungen, sowohl beladen als auch unbeladen am Depot starten (Fleischmann & Gietz, 2008; Vogt, 1998).

Weiterhin kann mit dem Split-Delivery-VRP (SDVRP) eine Auslieferung auf mehrere Touren aufgeteilt werden (Irnich et al., 2014). Das Periodic-VRP (PVRP) ermöglicht, die Auslieferung an einen Kunden auf mehrere Tage zu verteilen (Irnich et al., 2014), und das Multi-Depot-VRP (MDVRP) berücksichtigt statt einem, mehrere Depots bei der Tourenplanung (Fleischmann & Gietz, 2008; Vogt, 1998).

Die Erweiterungsmöglichkeiten von VRP-Modellen unterliegen keinen generellen Beschränkungen. Es können auch mehrere der soeben aufgeführten Erweiterungen des VRP in einem Modell kombiniert werden. Baldacci et al. (2010) und Koç et al. (2016) führen beispielsweise in ihren umfassenden Literaturüberblicken verschiedene Erweiterungen und Veröffentlichungen in Verbindung mit HVRP-Modellen auf.

4.2.2 Erweiterungen des Vehicle Routing Modells zur Minimierung von Fahrzeugemissionen

Neben den konventionellen Erweiterungsmöglichkeiten gibt es in der Literatur einen neueren Bereich der VRP-Modelle, der sich bei der Routenoptimierung konkret auf die Minimierung von Fahrzeugemissionen konzentriert. Modelle dieser Art sind in der Literatur vorwiegend als das „Pollution Routing Problem“ (PRP) (Bektaş & Laporte, 2011) oder unter dem Oberbegriff „Green Logistics“ (Cullinane & Edwards, 2010; Wittenbrink, 2011) zu finden.

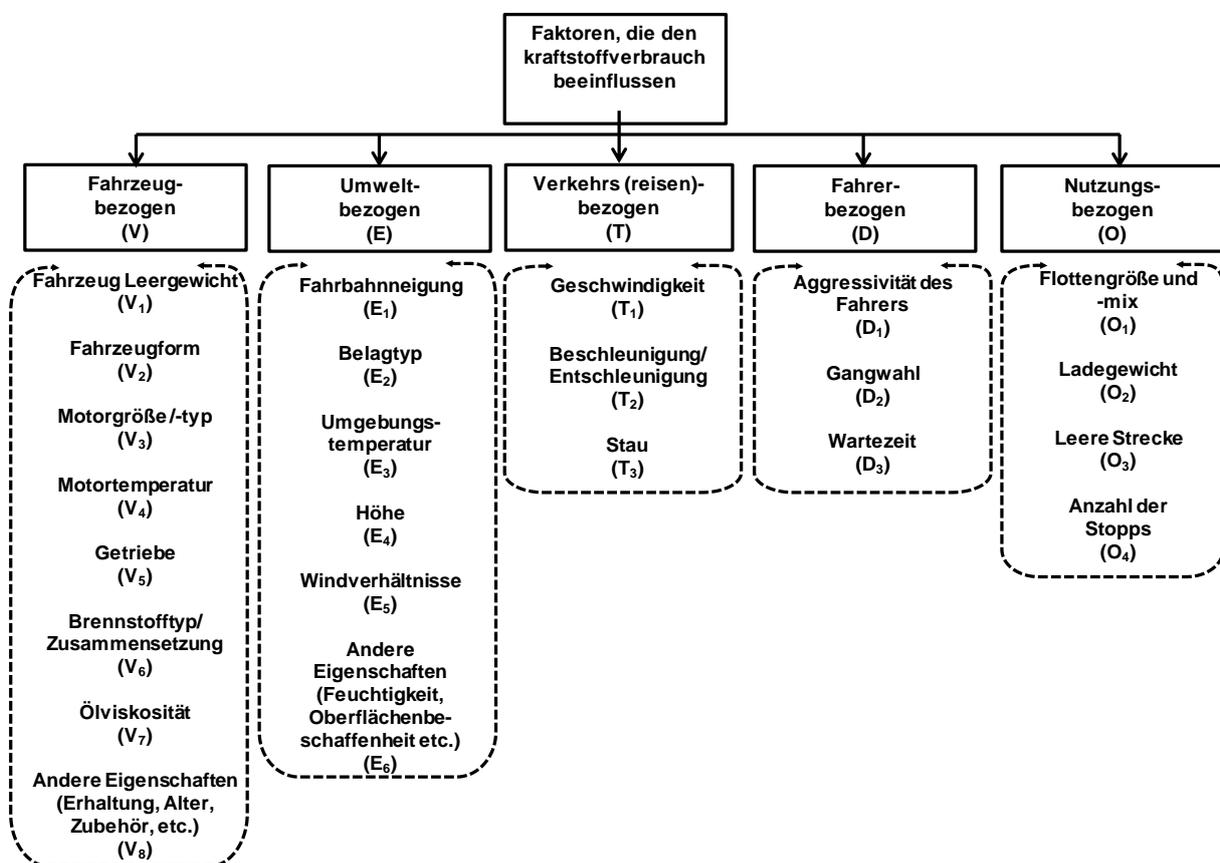


Abbildung 4-4: Faktoren, die den Kraftstoffverbrauch beeinflussen (Demir et al., 2014a)

Die veröffentlichten Modelle unterscheiden sich in der Struktur, dem Datenbedarf und im Detailgrad der Berechnung von Fahrzeugemissionen. Die Fahrzeugemissionen entstehen vorwiegend durch den Verbrauch an Kraftstoff während der Nutzung eines Fahrzeugs (EWI, 2014; Siebel, 2021). Demir et al. (2014a) geben einen umfassenden Literaturüberblick über die verschiedenen Faktoren, welche den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs beeinflussen. In Abbildung 4-4 ist ein Überblick über die den Kraftstoffverbrauch beeinflussenden Faktoren

dargestellt. Die Faktoren betreffen die fünf Bereiche Fahrzeug bezogene, Umwelt bezogene, Verkehrs bezogene, Fahrer bezogene und Nutzungsbezogene Faktoren (Demir et al., 2014a).

Demir et al. (2014a) unterscheiden zwischen drei Modellkategorien zur Berechnung von Fahrzeugemissionen: den Faktormodellen, makroskopischen und mikroskopischen Modellen. Bei den Faktormodellen werden Fahrzeugemissionen über einfache Kraftstoffverbrauchsmethoden ermittelt (Demir et al., 2014a). In makroskopischen Modellen werden Durchschnittsparameter eines regionalen oder nationalen Netzwerks genutzt, um netzwerkweite Emissionswerte zu schätzen (Demir et al., 2014a). Beispiele für europäische Modelle sind das Ecological Transport Information Tool (EcoTransIT) (EWI, 2014) oder das Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035 (Transport Emission Model - TREMOD) (Knörr et al., 2016). Cullinane & Edwards (2010) unterscheiden zusätzlich zwischen makroskopischen Top-down und Bottom-up Ansätzen. Unter einem Top-down Ansatz wird hier die Nutzung von Standard Umrechnungsfaktoren, wie z. B. der gesamte Energieverbrauch der Fahrzeuge einer Spedition geteilt durch die gefahrenen Kilometer aller Fahrzeuge, verstanden (Cullinane & Edwards, 2010). Beim Bottom-up Ansatz werden aus einer großen Stichprobe von Lastkraftwagen die zurückgelegte Fahrstrecke und der Kraftstoffverbrauch über die Strecke je Fahrzeuge erhoben. Aus diesen individuellen Verbräuchen wird der Durchschnitt ermittelt und auf die gesamte Flotte hochgerechnet. Über Kraftstoff spezifische Emissionsfaktoren können anschließend die Emissionen ermittelt werden (Cullinane & Edwards, 2010).

Mithilfe mikroskopischer Modelle wird hingegen der aktuelle, tatsächliche Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs ermittelt (Cullinane & Edwards, 2010; Demir et al., 2014a). Für Berechnungen mit mikroskopischen Modellen werden sehr spezifische Fahrzeugkenntnisse und Kenntnisse über die Fahrstrecke benötigt. Ein beispielhaftes mikroskopisches Modell ist das Pollution Routing Modell von Bektaş & Laporte (2011). Dieses Modell stellt eine Vereinfachung des Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM) von Scora & Barth (2006) dar.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs mit einem makroskopischen Modell gearbeitet. Die Emissionsberechnungen für konventionelle Kraftstoffe sind angelehnt an das Vorgehen des EcoTransIT Berichts (EWI, 2014) in Verbindung mit den Standard Umrechnungsfaktoren für Kraftstoffverbräuche und -emissionen der Norm EN 16258:

$$ECF_{Auslastung} = ECF_{leer}/EF + ((ECF_{voll} - ECF_{leer})/EF) \cdot CU \quad (4-10)$$

Nach Formel (4-10) wird der ladungsabhängige Energieverbrauch, *engl. Energy Consumption Factor*, ($ECF_{Auslastung}$) mithilfe des Leerverbrauchs (ECF_{leer}) in MJ/km, dem Umrechnungsfaktor, *engl. Energy Factor*, (EF), dem Verbrauch bei voller Auslastung (ECF_{voll}) und der Auslastung, *engl. Capacity Utilization*, (CU) ermittelt. Um die Fahrzeugemissionen in Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten ($CO_{2\ddot{a}q}$) (Klöpffer & Grahl, 2009; Tarakji & Gniffke, 2023), zur Berücksichtigung der Treibhausgas-Emissionen zu kalkulieren, wird der ladungsabhängige Energieverbrauch mit dem Kraftstoff spezifischen Emissionsfaktor nach EN 16258 (siehe Anhang 6) multipliziert.

Die Einheit $CO_{2\ddot{a}q}$ drückt die Klimawirkung durch die Freisetzung der unterschiedlichen Treibhausgase im Vergleich zu der Wirkung von Kohlenstoffdioxid aus. Wie auch bei den hier

verwendeten Emissionsfaktoren, wird in der Regel die Wirkung in einem Zeithorizont von 100 Jahren betrachtet (Lee et al., 2023; UBA, 2023).

4.3 Verfahren zur Lösung von Vehicle Routing Problemen

Wie in Abschnitt 4 bereits erläutert, gehört das VRP zu den ganzzahligen kombinatorischen Optimierungsproblemen, welche komplexe Wirkungszusammenhänge darstellen können. Je komplexer ein Problem, desto (Zeit-)aufwändiger ist dessen Lösung. In anderen Worten: Die Rechenzeit, welche ein Computer zur Lösung eines Algorithmus benötigt, hängt maßgeblich von dessen Komplexität ab. Man spricht in diesem Zusammenhang von der Zeitkomplexität des Algorithmus. Die Zeitkomplexität ergibt sich aus dem Verhältnis der Laufzeit eines Algorithmus zur Größe der Inputdaten (Vahrenkamp & Mattfeld, 2007). Man unterscheidet zwischen zwei Problemklassen: 1. Probleme, die mit polynomialem Aufwand lösbar sind (P) und 2. Probleme, die schwer mit polynomialem Aufwand lösbar sind (NP-schwer).

Bereits beim TSP wird eine Nebenbedingung zur Vermeidung von Kurzzyklen benötigt. Diese sorgt für eine hohe Anzahl an Gleichungen und folglich für eine stark steigende Rechenzeit mit zunehmendem n (n = Anzahl an Knoten) (Domschke et al., 2015, S. 133). Wie in Abschnitt 4.1 erläutert, benötigt ein funktionierendes VRP i. d. R. ebenfalls eine solche Nebenbedingung zum Ausschluss so genannter Subtouren bzw. Kurzzyklen (z.B. mit Formel (4-7)). Aus diesem Grund ist das VRP besonders bei einer Ausführung mit drei Indizes, die die Zuordnung zu verschiedenen Fahrzeugtypen ermöglicht, noch komplexer oder mindestens so zeitkomplex wie das TSP. Sowohl das TSP als auch das VRP gehören folglich zur Gruppe der NP-schweren Probleme. Tabelle 4-1 zeigt, dass die Rechenzeiten mit zunehmender Komplexität des Algorithmus enorm ansteigen. NP-schwere Probleme sind bereits für Probleme mit der Größe $n=40$ nicht mehr an einem Tag lösbar (Vahrenkamp & Mattfeld, 2007, S. 47).

Tabelle 4-1: Zeit-Komplexitätsfunktion für Problemklassen

Problem-Klasse	Rechen-aufwand	Problemgröße					
		n=10	n=20	n=30	n=40	n=50	n=60
P	n	0.00001 Sekunde	0.00002 Sekunden	0.00003 Sekunden	0.00004 Sekunden	0.00005 Sekunden	0.00006 Sekunden
	n^2	0.0001 Sekunde	0.0004 Sekunden	0.0009 Sekunden	0.0016 Sekunden	0.0025 Sekunden	0.0036 Sekunden
	n^3	0.001 Sekunde	0.008 Sekunden	0.027 Sekunden	0.064 Sekunden	0.125 Sekunden	0.216 Sekunden
	n^5	0.1 Sekunde	3.2 Sekunden	24.3 Sekunden	1.7 Minuten	5.2 Minuten	13 Minuten
NP	2^n	0.001 Sekunde	1.0 Sekunde	17.9 Minuten	12.7 Tage	35.7 Jahre	386 Jahrhund.
	3^n	0.059 Sekunden	58 Minuten	6.5 Jahre	3855 Jahrhund.	2×10^8 Jahrhund.	1.3×10^{13} Jahrhund.

Quelle: Vahrenkamp & Mattfeld (2007, S. 47)

VRPs können je nach Komplexität mit exakten oder heuristischen Verfahren gelöst werden. Diese beiden Verfahrensgruppen unterscheiden sich in der Lösungsgüte. Während exakte Verfahren das optimale Ergebnis ermitteln und dessen Existenz beweisen, führen heuristische Verfahren nur zu einer näherungsweise optimalen Lösung. Bei besonders komplexen Problemen mit sehr hohem Rechenaufwand, d.h. mit zeitkomplexen Nebenbedingungen und relativ großem n , können Heuristiken eingesetzt werden. Diese liefern gute Lösungen bei einem deutlich reduzierten und akzeptablen Rechenaufwand (Domschke et al., 2015; Vahrenkamp & Mattfeld, 2007). In den nachfolgenden Unterkapiteln werden beispielhafte exakte und heuristische Lösungsverfahren für VRPs vorgestellt, um einen geeigneten Ansatz für die vorliegende Fragestellung zu identifizieren.

4.3.1 Exakte Verfahren zur Lösung von VRPs

Es gibt verschiedene exakte Verfahren zur Lösung von VRPs. Diese können grundsätzlich in drei Kategorien unterteilt werden: Entscheidungsbaumverfahren, Schnittebenenverfahren oder eine Kombination aus beiden. Eine Übersicht wird in Abbildung 4-5 gegeben. Nachfolgend wird das Branch-and-Bound-Verfahren (BuB) als ein verbreitetes Beispiel für Entscheidungsbaumverfahren vorgestellt (Domschke et al., 2015, S. 140). Dieses wurde ausgewählt, weil es unter anderem Grundlage des Lösungsalgorithmus der nachfolgend genutzten Gurobi-Software für gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme ist (Gurobi Optimization, 2022a).

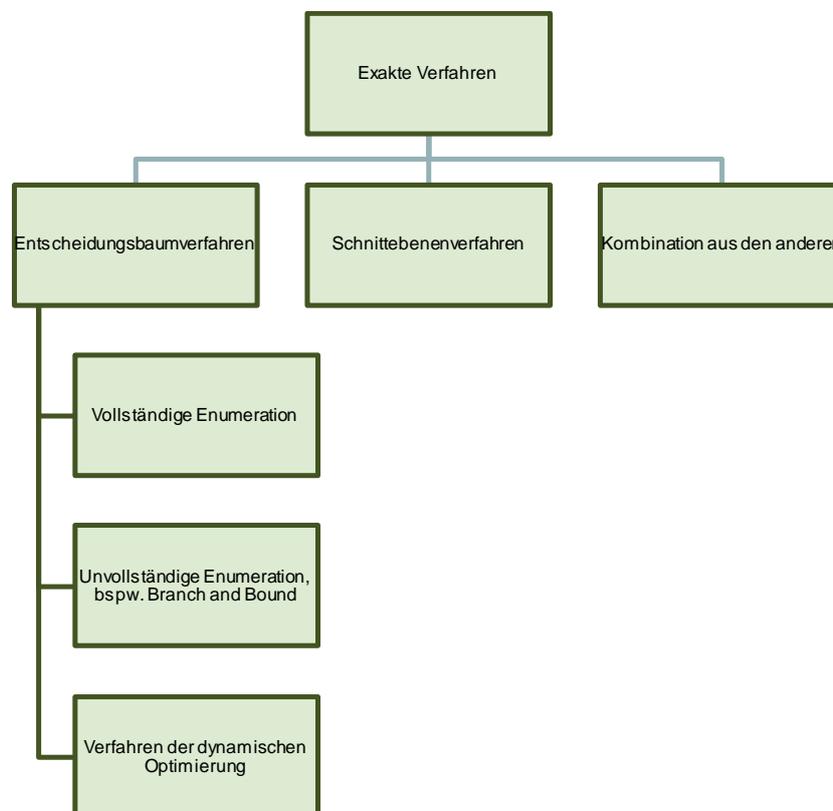


Abbildung 4-5: Überblick über exakte Verfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen

Quelle: Domschke et al. (2015, S. 135)

Das BuB wird in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt erfolgt das so genannte *Branching*. Dabei wird das zu lösende Ausgangsproblem P_0 in k Teilprobleme P_1, \dots, P_k zerlegt. Die Menge $X(P_i)$ umfasst alle zulässigen Lösungen von Problem P_i . Wobei die Vereinigung der Lösungsmengen aller k Probleme der Lösungsmenge von P_0 entspricht. Die paarweisen Durchschnitte der Teilprobleme sollten nach Möglichkeit leer sein. Mathematisch gilt daher folgendes:

$$X(P_0) = \bigcup_{i=1}^k X(P_i) \text{ und möglichst } X(P_i) \cap X(P_j) = \emptyset \text{ für alle } i \neq j \quad (4-11)$$

Alle Probleme P_1, \dots, P_k werden analog weiter verzweigt, sodass ein Lösungsbaum mit P_0 als so genannte Wurzel entsteht. Abbildung 4-6 zeigt ein Beispiel für einen Lösungsbaum mit vier Teilproblemen.

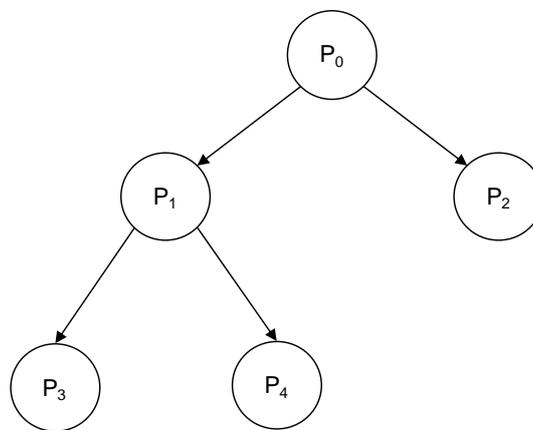


Abbildung 4-6: Beispiel eines Lösungsbaumes mit vier Teilproblemen

Der zweite Schritt umfasst das *Bounding*. Hier werden Beschränkungen, so genannte Schranken, für Zielfunktionswerte berechnet. Diese dienen dazu, zu entscheiden, welche Probleme weiter verzweigt werden müssen und welche nicht. Bei den in dieser Arbeit relevanten Minimierungsproblemen zum Auffinden des kürzesten Weges wird zunächst eine (globale) **obere Schranke** \bar{F} definiert. Dafür kann man $\bar{F} = \infty$ setzen oder ein zuvor heuristisch bestimmtes \bar{F} nutzen. An jeder neuen Verzweigung des Lösungsbaumes wird geprüft, ob eine bessere – beim hier vorliegenden Minimierungsproblem kleinere Lösung – als die bereits bekannte Lösung gefunden wurde. Wird eine kleinere Lösung gefunden, ersetzt diese die bestehende obere Schranke und es wird weiter nach noch kleineren Lösungen gesucht.

Darüber hinaus kann eine **untere Schranke** \underline{F} für den Zielfunktionswert von P_i ermittelt werden. Zur Bildung dieser unteren Schranke muss die Relaxation P'_i von P_i gebildet werden. Diese erhält man durch Lockerung oder das Weglassen von Nebenbedingungen. Im hier vorliegenden Problem könnte man bspw. die Ganzzahligkeits-Bedingung bzw. die Zyklusbedingung weglassen, um ein polynomial lösbares Problem zu erhalten.

Die Verzweigung eines Teilproblems wird nicht weiterverfolgt, wenn einer der folgenden drei Fälle zutrifft:

1. $\bar{F}_i \geq \underline{F}$: Die optimale Lösung des Teilproblems kann nicht besser als die beste bekannte Lösung sein.

2. $\underline{F}_i < \overline{F}$ und die optimale Lösung von P'_i ist zulässig für P_i und damit auch für P_0 : Es wurde eine neue beste, zulässige Lösung des Problems P_0 gefunden. Man speichert sie und setzt $\overline{F} = \underline{F}_i$.
3. $X(P'_i) = \emptyset$: P'_i besitzt keine zulässige Lösung. Folglich ist auch $X(P_i) = \emptyset$.

Trifft einer der eben genannten drei Fälle zu, ist das Problem P_i ausgelotet, d. h. die bestmögliche Lösung wurde gefunden (Domschke et al., 2015, 140 ff.).

Für das Lösen großer, komplexer linearer Optimierungsprobleme wurden verschiedene Solver entwickelt. Die Programmsysteme CPLEX (IMB Deutschland GmbH, 2023) oder Gurobi (Gurobi Optimization, 2022a) bieten beispielsweise solche Solver an. Diese Solver verfügen über einen vorprogrammierten Lösungsalgorithmus, der auf einem exakten Lösungsverfahren (z. B. BuB) basieren kann. Auf einer Nutzeroberfläche müssen das zu lösende mathematische Modell aufgestellt sowie alle Parameter in einer passenden Programmiersprache definiert werden. Im Hintergrund lösen die Solver anschließend das Modell.

Wie bereits angesprochen wird im Rahmen dieser Arbeit zunächst mit der Gurobi-Software für gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme (exaktes Verfahren) gearbeitet (Gurobi Optimization, 2022a). Zur Abschätzung der Kosten bzw. Emissionen bei einer Bündelung von Touren mehrerer Erzeuger zur regionalen Lebensmitteldistribution wird das in Abschnitt 5.2 vorgestellte VRP-Modell mittels der Programmiersprache Python in die Optimierungssoftware Gurobi Version 3.6 implementiert. Distanz- und Zeitmatrizen werden mit dem Routing Algorithmus des OpenrouteService vom Heidelberg Institut für Geoinformationstechnologie generiert (Heidelberg Institut für Geoinformationstechnologie, 2020).

4.3.2 Heuristiken

Aufgrund der zuvor erläuterten Zeitkomplexität von VRPs kommen exakte Verfahren schnell an ihre Grenzen. Mit vertretbarem Rechenaufwand lassen sich komplexe Optimierungsprobleme nur mittels Heuristiken lösen. Die sogenannten heuristischen Verfahren können in vier Kategorien gegliedert werden: 1. Eröffnungsverfahren, 2. Lokale Such- und Verbesserungsverfahren, 3. Unvollständig exakte Verfahren und 4. eine Kombination aus den vorangegangenen Verfahren.

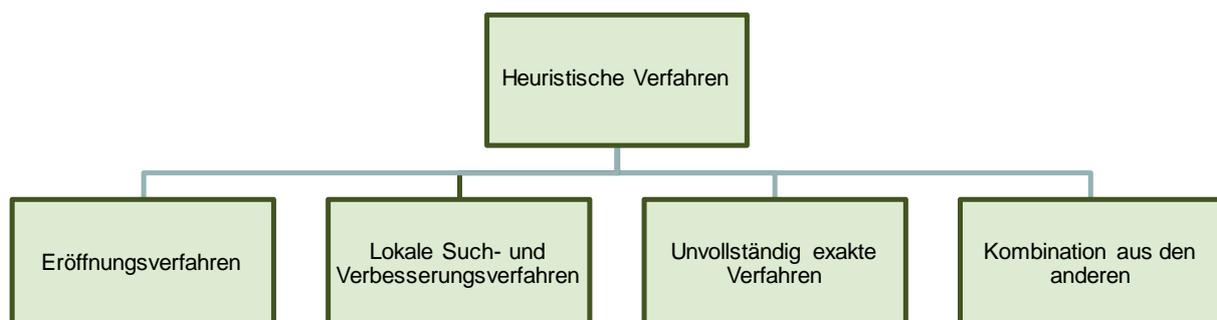


Abbildung 4-7: Überblick über heuristische Verfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen

Eröffnungsverfahren dienen lediglich dem Auffinden einer ersten zulässigen Lösung, die dann mittels eines zweiten Verfahrens verbessert werden kann. Die Lösungsgüte der Eröffnungsverfahren variiert abhängig vom Rechenaufwand sehr stark. Es gibt Verfahren, wie die Vogel'sche Approximation, die bereits sehr gute, nahezu optimale Lösungen finden können. Weniger aufwendige Verfahren, wie die Nord-West-Ecken-Regel finden hingegen i. d. R. deutlich schlechtere Lösungen (Domschke et al., 2015, S. 136).

Lokale Such- und Verbesserungsverfahren bauen hingegen auf einer vorgegebenen Lösung auf. Diese Lösung kann entweder mittels eines Eröffnungsverfahrens oder zufällig bestimmt worden sein. Je besser die Startlösung, desto schneller findet die zweite Heuristik eine gute Lösung. Auch hängt die Güte der Such- und Verbesserungsverfahren von der Ausgangslösung ab. Die Auswahl an Such- und Verbesserungsverfahren ist sehr vielfältig (Domschke et al., 2015, S. 136). Bei unvollständig exakten Verfahren handelt es sich zum Beispiel um vorzeitig abgebrochene BuB Verfahren.

Auch zur Lösung von Heuristiken existieren Softwarelösungen. Je komplexer das Problem, desto komplexer ist die Implementierung der Heuristik und die Integration relevanter Nebenbedingungen. Im Rahmen dieser Dissertation wurde der CAWLIP - Algorithmus (Clarke and Wright-Lin Interchange Program for Vehicle Routing Problems) genutzt (Robbins & Turner, 1979). Rasku et al. (2019) haben diesen zusammen mit weiteren Algorithmen zur Lösung von TSPs und VRPs in der Programmiersprache Python im Rahmen einer Dissertation zur freien Nutzung implementiert (siehe Abschnitt 5.5 für nähere Erläuterungen zur Anwendungsbreite).

Der CAWLIP-Algorithmus konstruiert im ersten Schritt Touren nach dem so genannten Clarke-Wright Vorgehen und verbessert diese in einem zweiten Schritt mittels der Lin 2-Opt-Verfahren. Beide Schritte werden nachfolgend erläutert:

1. Clarke-Wright Vorgehen

Am Anfang wird davon ausgegangen, dass jeder Knoten ($i=1, \dots, N$) von nur einem Fahrzeug besucht wird. Somit würden N Fahrzeuge benötigt werden. Die Gesamtkosten bzw. -distanzen aller Touren ergeben sich dann aus der Summe der Sternfahrten:

$$TC = 2 \sum_{j=1}^n C_{0j} \quad (4-12)$$

<i>Notation</i>	<i>Beschreibung</i>
TC	Gesamtkosten bzw. Länge aller Touren
C_{ij}	Kosten/Distanz zwischen Knoten i und Knoten j und $i = j = 0 = \text{Depot}$
S_{ij}	Savings (Attraktivitäts-Wert) zwischen zwei Knoten i und j

Dieses Vorgehen arbeitet mit Attraktivitäts-Werten für die Verbindung zweier Knoten, den so genannten *Savings*. Die *Savings* werden nach folgender Formel für alle Knotenpaare bestimmt:

$$S_{ij} = C_{i0} + C_{j0} - C_{ij} \quad (4-13)$$

Wenn alle *Savings* bestimmt wurden, werden diese in absteigender Reihenfolge geordnet. Je höher ein Savingswert zweier Knoten ausfällt, desto attraktiver gilt die Verbindung dieser beiden Knoten. Das Knotenpaar mit dem höchsten Savingswert bildet die erste Tour. Dann wird das nächste Paar in den Tourenplan integriert. Die Knoten können je nach Möglichkeit direkt in bestehende Routen integriert werden bzw. zwei Touren verbinden oder neue Touren bilden. Würde eine Subtour (Touren Abfahrt und Ankunft am Depot) erstellt werden, wird ein Knotenpaar übersprungen und es geht weiter zum nächsten Paar (Vergleiche Abbildung 4-8).

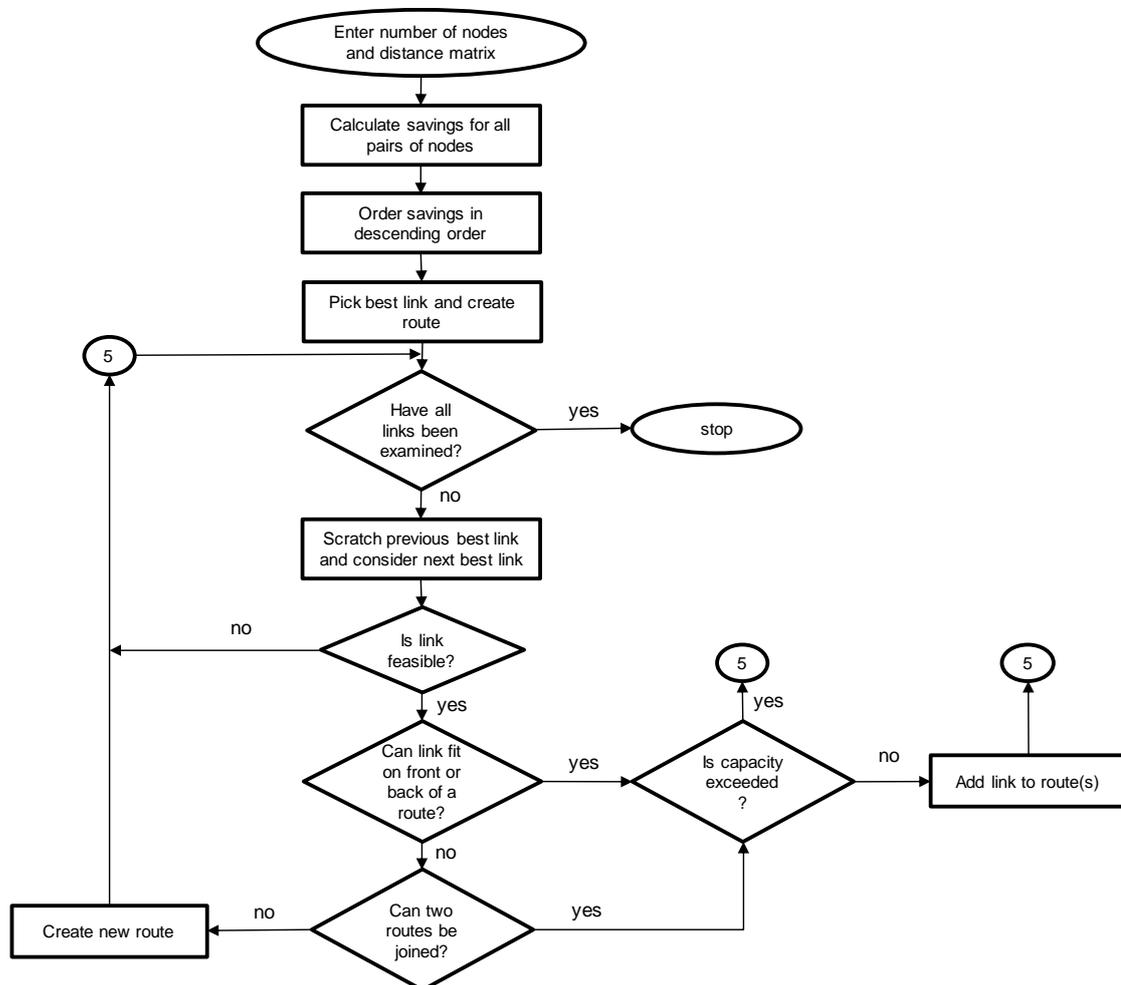


Abbildung 4-8: Fließdiagramm Clarke und Wirght Algorithmus (Robbins & Turner, 1979)

2. Lin 2-Opt-Verfahren

In diesem Schritt werden Kanten aus den Touren entfernt und Anpassungen, die das Ergebnis verbessern, gesucht. Wird eine bessere Kombination gefunden, erfolgt der so genannte *swap* – der Tausch zweier Kanten. Bleibt die Suche erfolglos werden zwei Kanten entfernt und es wird weitergesucht (Vergleiche Abbildung 4-9).

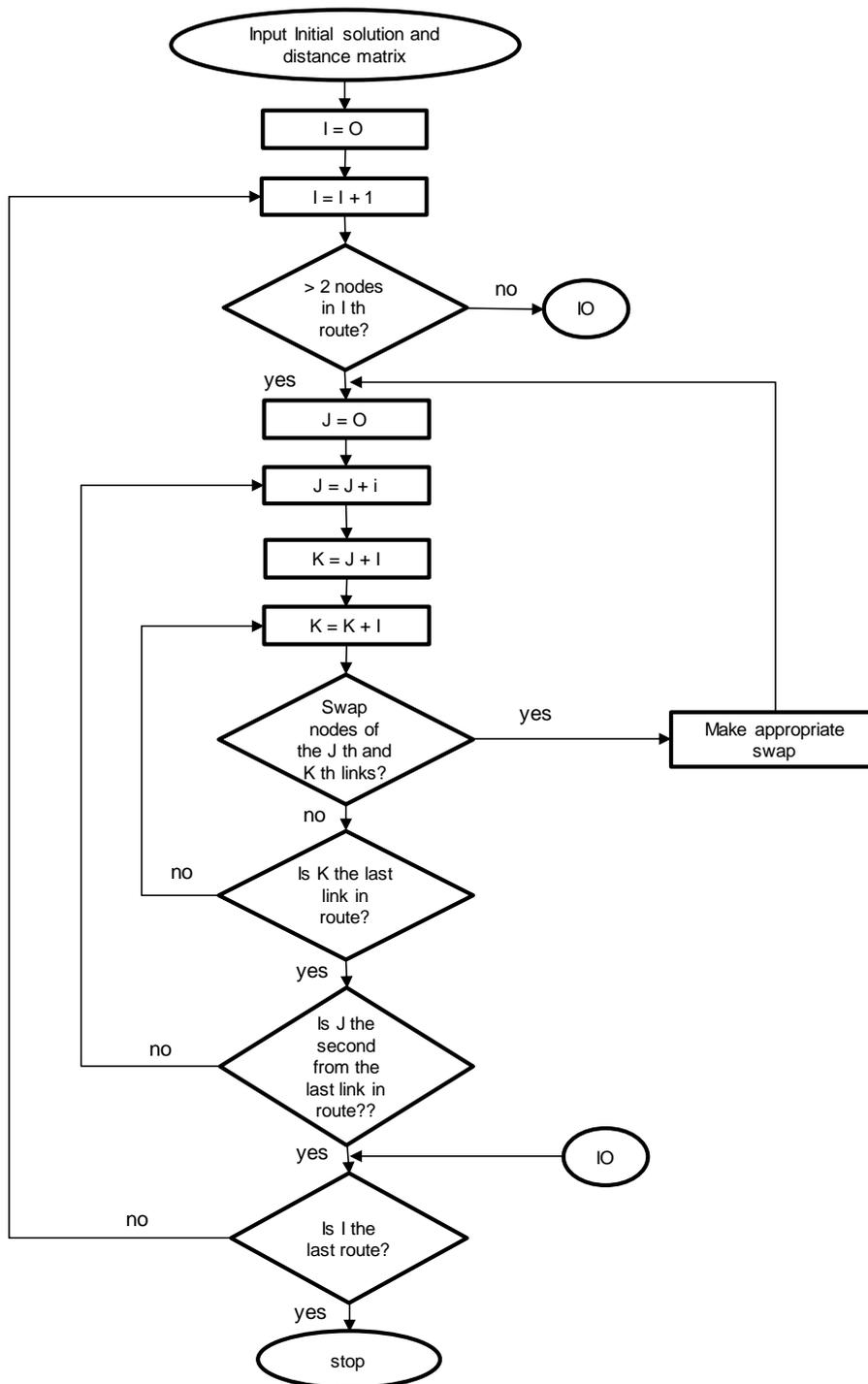


Abbildung 4-9: Fließdiagramm Lin 2-Opt-Verfahren (Robbins & Turner, 1979)

Bei der hier verwendeten 2-Opt-Verfahren werden immer zwei Kanten zur selben Zeit untersucht, wobei nur ein *swap* innerhalb einer Tour möglich ist. Theoretisch kann ein swap entweder zwischen zwei Kanten innerhalb einer Route (siehe Abbildung 4-10) oder zwischen zwei Kanten aus zwei verschiedenen Routen des Tourenplans (siehe Abbildung 4-11) erfolgen. Allerdings ist letzteres sehr schwer zu implementieren und führt nicht immer zu besseren Ergebnissen. Daher erlaubt das vorliegende Modell lediglich einen swap innerhalb einer Route (Robbins & Turner, 1979).

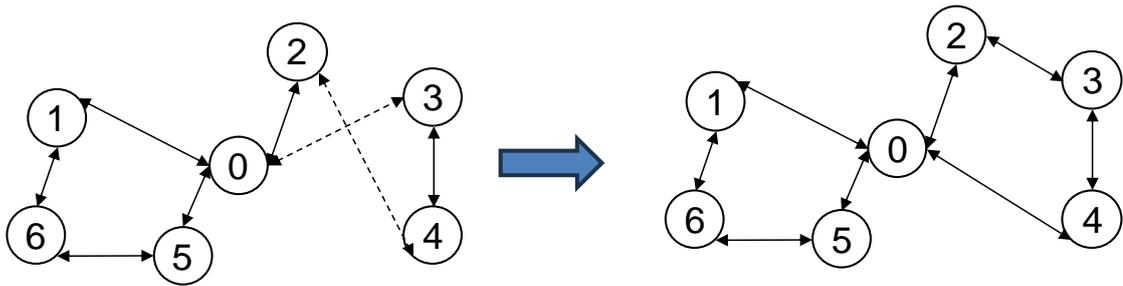


Abbildung 4-10: Swap zweier Kanten innerhalb einer Route des Tourenplans

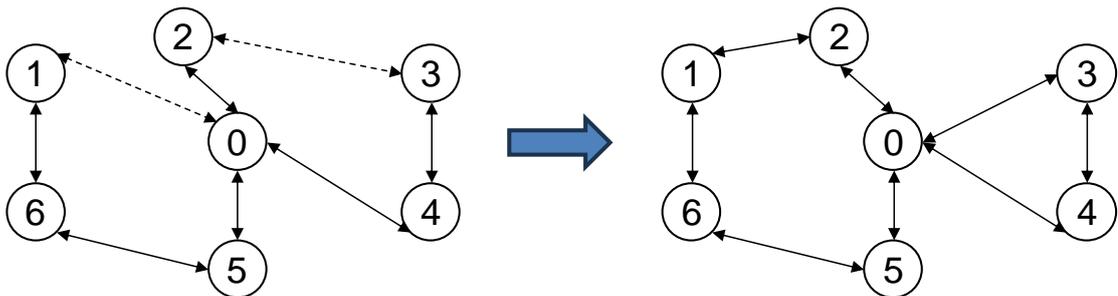


Abbildung 4-11: Swap zweier Kanten zwischen zwei verschiedenen Routen

Zusammenfassend wird das TSP genutzt, um die Touren bei eigener Auslieferung seitens der Erzeuger darzustellen. Mit dem VRP werden Routen für die kooperative Tourenplanung aller Erzeuger seitens der Regionalvermarktungsinitiativen gebildet. Während für die Lösung des vorliegenden TSP ein exaktes Verfahren, der Branch and Bound - Algorithmus, genutzt werden kann, muss das VRP mittels einer Heuristik gelöst werden. Zu diesem Zweck wurde sich für den CAWLIP - Algorithmus entschieden.

5 Entwicklung einer Auslieferungsstrategie zur regionalen Lebensmitteldistribution

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist, regionale Lebensmittelerzeuger und Regionalvermarktungsinitiativen bei der Entscheidung über die strategische Ausgestaltung der Lebensmitteldistribution zu unterstützen. Im Vordergrund der Untersuchung steht, die Transportkosten sowie die Transportemissionen zu minimieren und die geeignetste Auslieferungsstrategie für kleine, regionale Erzeuger zu identifizieren. Zu diesem Zweck wird geprüft, inwiefern sich eine durch Regionalvermarktungsinitiativen organisierte, kooperative Tourenplanung dafür eignet, die eigenständige Auslieferung der Produkte kleiner Erzeuger zu ersetzen. Es werden drei Auslieferungsstrategien miteinander verglichen: die kooperative Tourenplanung, die Streckenbelieferung und eine eigene Auslieferung der Erzeuger mittels individueller Rundtouren. Ferner sollen die übergeordneten Forschungsfragen beantwortet werden (siehe auch Einleitung):

1. *Wie sollte eine kostengünstige Auslieferungsstrategie für die Erzeuger seitens der Regionalvermarktungsinitiativen gestaltet werden?*
2. *Wie unterscheiden sich verschiedene Strategien hinsichtlich ihrer Umweltfreundlichkeit?*

Das Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen wird in Abbildung 5-1 dargestellt. Zunächst werden Kostenfaktoren je gefahrenem km für fünf ausgewählte Fahrzeugtypen mittels einer umfangreichen Fahrzeugkostenrechnung bestimmt (siehe Kapitel 3).

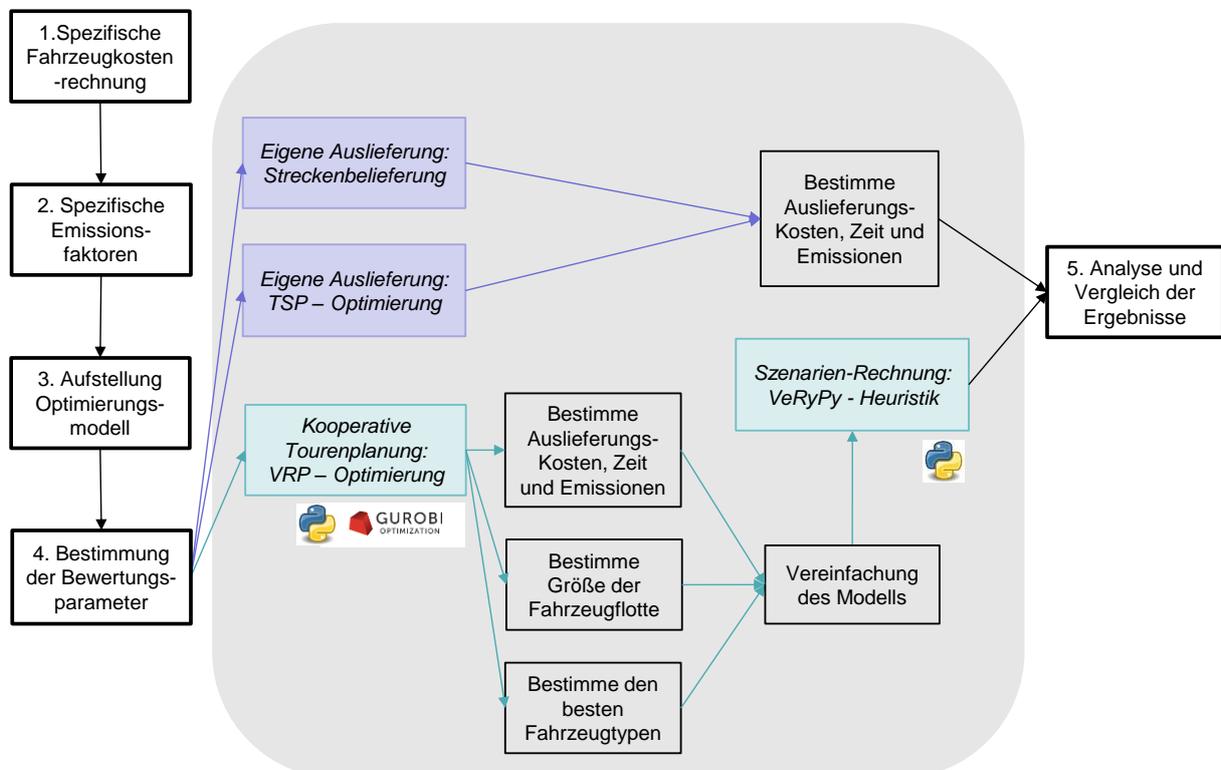


Abbildung 5-1: Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen

Im zweiten Schritt werden für diese Fahrzeugtypen Emissionsfaktoren, entsprechend des in Kapitel 4.2.2 (Formel (4-10)) vorgestellten makroskopischen Modells, berechnet. Anschließend wird im dritten Schritt ein zur Problemstellung passendes Optimierungsmodell für eine kooperative Tourenplanung aufgestellt. Bei dem Optimierungsmodell handelt es sich um eine Erweiterung des klassischen VRP-Modells (siehe Kapitel 4). Dieses Optimierungsmodell dient als Grundlage der Bestimmung von Bewertungsparametern zur Evaluation der passendsten Auslieferungsstrategie.

Die Bewertungsparameter beinhalten die Berechnung der gesamten Auslieferungszeit, Kosten und Emissionen aller Touren der drei oben genannten Auslieferungsstrategien. Hierzu müssen die Ergebnisse der Schritte 1 und 2 in das VRP-Modell für die kooperative Tourenplanung, ein TSP-Modell für jeden Erzeuger bei eigener Auslieferung mittels Rundtours und das Modell zur Streckenbelieferung eines jeden Erzeugers integriert und die Modelle gelöst werden.

Während die Bestimmung des Bewertungsparameters der Streckenbelieferung relativ einfach mittels der Distanz- und Zeitmatrizen in Excel erfolgen kann, ist der Rechenaufwand für das TSP- und das VRP-Modell, wie in Kapitel 4.1 erläutert, deutlich komplexer. Daher werden diese beiden Modelle mittels der Programmiersprache Python in die Optimierungssoftware Gurobi implementiert und innerhalb des Programms gelöst. Die Lösung des TSP-Modells dauert in Gurobi wenige Sekunden. Das VRP-Modell hat hingegen deutlich mehr Nebenbedingungen als das TSP-Modell und ist dadurch komplexer und zeitaufwendiger zu lösen. Deshalb benötigt der Gurobi-Algorithmus bereits bei einer geringen Knotenzahl eine lange Rechenzeit.

Alle drei Strategien werden zunächst anhand eines geeigneten Fallbeispiels analysiert und verglichen. In Abschnitt 5.5 folgt eine Szenarioanalyse. Diese Analyse dient der Untersuchung der Robustheit der Ergebnisse und der Abschätzung des Risikos bei einer Übertragung der Ergebnisse auf andere Regionalvermarktungsinitiativen. Um die Rechenzeit zu verkürzen und das Modell in angemessener Zeit für verschiedene Szenarien lösen zu können, wird nur das Fallbeispiel zur kooperativen Tourenplanung mittels des Optimierungsmodells in Gurobi gelöst. Anschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um die Problemstellung zu vereinfachen. Die Szenarien werden unter Einbezug dieser Erkenntnisse mithilfe einer Heuristik der Python-Bibliothek VeRyPy näherungsweise optimal gelöst (siehe Abschnitt 5.5).

Wie in Kapitel 4 dargelegt, existiert in der Literatur bereits eine Vielzahl an Varianten von VRP-Modellen, die sich aufgrund ihrer Komplexität teilweise nur mittels Heuristiken näherungsweise-optimal lösen lassen. Heuristiken werden vor allem genutzt, um Programme leistungsfähiger und schneller zu machen. Da der Fokus dieser Arbeit darin liegt, generelle, sinnvolle Handlungsempfehlungen für die Praxis zu generieren, reicht ein näherungsweise-optimales Ergebnis für die Szenarioanalyse aus.

Die Ergebnisse der Szenarioanalyse werden ausgewertet, verglichen und analysiert (Abschnitt 5.5.3). Der Fokus des gesamten Kapitels 5 liegt darauf, Fahrzeiten, Distanzen, geeignete Fahrzeuge und Fahrerbedarfe sowie sinnvolle Größen von Initiativen zu ermitteln. In Abschnitt 5.6 wird zu diesen Aspekten ein kurzes Zwischenfazit gezogen.

Zusammenfassend könnte eine kleine Initiative bei wöchentlicher Distribution der haltbaren Produkte und täglicher Distribution der Frischeprodukte ca. 67 Erzeuger

umfassen, wovon ca. 50 Erzeuger auf die haltbaren Produkte und 17 auf Frischeprodukte entfallen. Wächst eine Initiative, sollten im Ein-Schicht-Betrieb immer ca. 50 Erzeuger mit haltbarer Ware bzw. ca. 17 Erzeuger im Zwei-Schicht-Betrieb mit Frischeprodukten gebündelt werden. Für die Einsammlungstouren erweist sich der 3.5 t Van als das passendste Fahrzeug. Bei den Auslieferungstouren hingegen ist der Van nicht immer ideal. Mit wachsender Erzeugeranzahl kann ein größeres Fahrzeug den Zeitaufwand für die Belieferung der Märkte deutlich reduzieren.

5.1 Beispielhafte Fahrzeugkostenrechnung für Fahrzeuge zur regionalen Lebensmitteldistribution

Grundlage der Fahrzeugkostenrechnung ist die Auswahl passender Transportmittel. Für den Transport der Ware kleiner, regionaler Erzeuger eignen sich aufgrund der geringen Transportmengen vor allem Vans. Als mögliche Auslieferungsfahrzeuge werden demnach ein 3,5 t Diesel-Van, ein 3,5 t Elektro-Van, ein 5 - 7,5 t Diesel-Kleintransporter und ein 12-18 t Diesel-LKW in Betracht gezogen. Da Lieferfahrzeuge in der Regel längere Strecken unterwegs sind, wird angenommen, dass alle Fahrzeuge über einen Dieselmotor verfügen.

Neben einer Minimierung der Auslieferungskosten steht die Minimierung der Transportemissionen im Vordergrund. Am 29. Juni 2022 gab der Europäische Rat das geplante Paket „Fit für 55“ bekannt. Im Rahmen dieses Paketes wurden diverse neue Rechtsvorschriften beschlossen, um die Emissionen in der EU bis 2030 um mindestens 55 % zu senken (Europäischer Rat, 2020). Teil dieses Paketes ist eine „Verordnung über CO₂-Normen für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge“ (Europäischer Rat, 2020). Die Verordnung untersagt die Neuzulassung von PKW und leichten Nutzfahrzeugen (bis 3,5 t) mit Verbrennungsmotoren ab dem Jahr 2035. Bis dahin zugelassene Fahrzeuge dürfen weiterhin, auch mit Verbrennungsmotor, gefahren werden. Auch schwere Nutzfahrzeuge (über 3,5 t) dürfen weiterhin mit Diesel betrieben werden.

Als Alternative gelten mit erneuerbaren Energien erzeugte Kraftstoffe, so genannte eFuels, oder Elektromotoren (Bundesregierung, 2023b). Die Praxistauglichkeit und Realisierungsmöglichkeiten von eFuels werden noch kontrovers diskutiert, obwohl globale Erzeugungspotentiale grundsätzlich vorhanden sind (ADAC, 2023; Böff, 2023; Pfennig et al., 2021). Aus soeben angeführten Gründen werden eFuels im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Allerdings wird zusätzlich zu den Dieselfahrzeugen für schwere Nutzfahrzeuge ein 3,5 t voll-elektrisch betriebener Van in die Analyse einbezogen.

Zur Festsetzung der Fahrzeugkosten wurden weitestgehend die Erkenntnisse der methodischen Grundlagen aus Kapitel 3 herangezogen. Darüber hinaus wurde zur Ermittlung der Fahrzeug-Fixkosten für die 3,5-Tonner und die privaten PKW eine grobe Marktanalyse durchgeführt. Insbesondere Senger Management GmbH (2022) geben einen guten Überblick über mögliche Modelle verschiedener Hersteller. Der Fokus lag auf den Modellen VW T6 (Multivan und Transporter Kombi), Mercedes Benz Vito, Mercedes Benz Sprinter und Peugeot Expert. Zusätzlich wurde die Marktanalyse des ADAC (2018) einbezogen. Für die Kalkulation privater PKW zur eigenen Auslieferung seitens der Erzeuger wurde sich an den durchschnittlichen

Größen und Kosten der Modelle Caddy, Passat Variant und Octavia Combi orientiert (ADAC, 2018). Für den 5 - 7,5 t Transporter und den 18 t LKW wurden ergänzend die Daten (Anschaffungspreis, Maut, Steuern und Versicherung) eines Naturkostgroßhandels genutzt (2018).

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Fahrzeugkostenrechnung für die fünf durchschnittlichen Fahrzeugtypen verglichen. Die Berechnungen basieren auf Formel (3-3) (siehe Abschnitt 3.5). Die zugrunde liegenden Annahmen sind in Tabelle 5-1 (und Anhang 7) zusammengefasst. Um eine vollständige Vergleichbarkeit herzustellen, wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge selbst angeschafft werden und jeweils durchschnittlich zu 50 % ausgelastet werden. Weiterhin werden die vier Transporter ausschließlich für dienstliche Auslieferungszwecke eingesetzt, während der PKW ebenfalls für Privatfahrten genutzt wird. Daher liegt die Jahreskilometerleistung des PKWs höher als bei den kleineren Transportern. Die Grundannahme ist: Je größer der Transporter, desto weiter die Strecken zur Auslieferung bzw., desto größer ist das Liefergebiet, in dem das Fahrzeug eingesetzt wird. Dadurch steigt die Fahrleistung pro Jahr. Zudem werden die Auslieferungen mit dem privaten PKW von dem Erzeuger selbst vorgenommen, während im Falle einer Auslieferung mit einem der Transporter ein Fahrer auf einer vollen Stelle eingestellt wird, der auch die Organisation des Lagers übernimmt. Zudem beinhalten die Personalkosten der Transporter mit einem Faktor von 1,3 auch die Kosten für einen Ersatzfahrer während Urlaubs- und Krankheitszeiten (Wittenbrink, 2011). Diese Annahmen führen dazu, dass die Personalkosten des privaten PKWs deutlich geringer sind als bei den Transportern. Hier muss lediglich für Hilfe im Lager oder Urlaub- bzw. Krankheitsvertretung ein Aushilfsfahrer beschäftigt werden.

	PKW	3,5 t Elektro	3,5 t Diesel	5-7,5 t Diesel	12-18 t Diesel
Kraftstoffverbrauch bei 50 % Auslastung [l/pro 100 km]	7 l ¹	16,5 kWh ²	13,2 l ¹	13,7 l ¹	2,16 l ¹
Maut [€/m] ³	-	-	-	-	350
Jahresfahrleistung [km] ⁴	20.000	6.000	6.000	8.000	80.000
Fahrleistung bis zur Abschreibung [km] ⁵	120.000	60.000	60.000	80.000	320.000
Abschreibungszeitraum [a] ⁶	6	10	10	10	4
Einsatztage pro Jahr [d] ⁷	248				

Tabelle 5-1: Annahmen zur Fahrzeugkostenrechnung bei unterschiedlicher Fahrleistung pro Jahr

¹ EWI (2014).

² Schwartz (2017).

³ Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen. BFStrMG, 2017 (2017), Eigene Datenerhebung: Durchschnittliche Mautgebühren eines Lebensmittelgroßhändlers im Raum Bremen.

⁴ Eigene Annahme: angelehnt an Rötter (2017) und Wittenbrink (2011).

⁵ Ergibt sich aus dem Abschreibungszeitraum und der jährlichen Fahrleistung.

⁶ Angelehnt an Bundesministerium der Finanzen (2000) und [Der Titel "Praxisdaten 2018 – Datenerhebung bei zwei Naturkostgroßhändlern" kann nicht dargestellt werden. Die Vorlage "Kurznachweis im Text - Interviewmaterial - (Standardvorlage)" beinhaltet nur Felder, welche bei diesem Titel leer sind.] (2018).

⁷ Mittelwert aus: Wittenbrink (2011) und Kalenderpedia (2018).

Die Fahrzeugkosten der vorliegenden Rechnung werden in Tabelle 5-2 aufgeführt. Die Kostenverteilungen der verschiedenen Fahrzeugtypen (Abbildung 5-2 bis Abbildung 5-6) zeigen, dass die Personalkosten unabhängig vom Fahrzeugtypen den größten Anteil der Kostenverteilung (74 % beim Elektro-Van bis 89 % beim Transporter (12-18 t)) ausmachen.

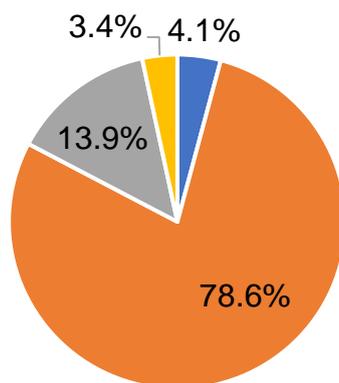


Abbildung 5-2: Kostenverteilung PKW bei 20.000 km Jahresfahrleistung

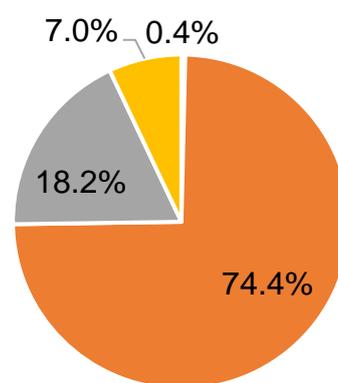


Abbildung 5-3: Kostenverteilung Elektro-Van (3,5 t) bei 6.000 km Jahresfahrleistung

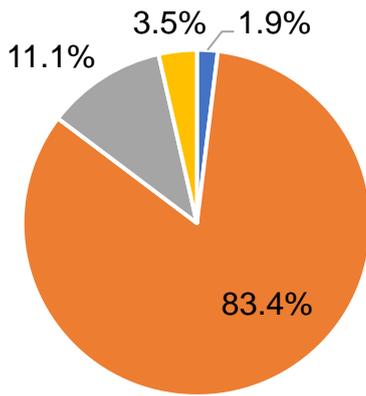


Abbildung 5-4: Kostenverteilung Diesel-Van (3,5 t) bei 6.000 km Jahresfahrleistung

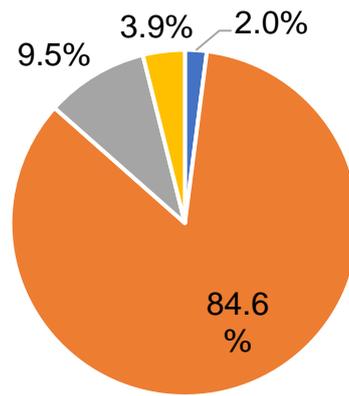
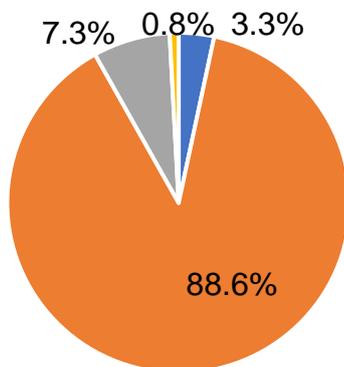


Abbildung 5-5: Kostenverteilung Kleintransporter-Diesel (5-7,5 t) bei 8.000 km Jahresfahrleistung



- Anteil variable Kosten
- Anteil Personalkosten
- Anteil Fixkosten
- Anteil Gemeinkosten

Abbildung 5-6: Kostenverteilung Transporter Diesel (12-18 t)

Der Fixkostenanteil bemisst den zweitgrößten Kostenteil. Bei dem Elektro-Van ist er mit rund 18 % am höchsten, während die Fixkosten bei dem Transporter (12-18 t) im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen mit 7 % den geringsten Anteil bemessen. Absolut gesehen sind die Fixkosten je km bei den Vans und dem Kleintransporter (5-7,5 t) relativ hoch, da für diese Fahrzeuge im regionalen Lebensmitteltransport mit 6.000 - 8.000 km pro Jahr voraussichtlich nur eine relativ geringe Fahrleistung erzielt werden kann. Beim privaten PKW sind die Fixkosten pro Kilometer aufgrund der privaten Nutzung im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen niedrig. Die variablen Kosten liegen beim Elektro-Van aufgrund des im Vergleich zum Diesel geringen Strompreises unter 0,5 % und sind damit von geringer Relevanz. Beim privaten PKW fallen die variablen Kosten mit ca. 4 % am stärksten ins Gewicht. Die absoluten Gemeinkosten je km sinken mit zunehmender Fahrzeuggröße. Der Gemeinkostenanteil des Elektro-Vans ist mit 7 % relativ hoch, da vorausgesetzt wird, dass ggf. der Kauf einer Ersatzbatterie vor Ende der Nutzungsdauer notwendig ist.

	PKW	3,5 t Elektro	3,5 t Diesel	5-7,5 t Diesel	12-18 t Diesel
A: variable Kosten	0,09	0,04	0,17	0,18	0,28
B: Personalkosten	1,72	7,44	7,44	7,44	7,44
C: Fixkosten	0,30	1,82	0,99	0,84	0,61
D: Gemeinkosten	0,07	0,70	0,32	0,34	0,07

Tabelle 5-2: Summe der Fahrzeugkostenrechnung in €/km bei unterschiedlicher Jahresfahrleistung

Ersetzt man die in Tabelle 5-1 angenommenen Jahreskilometerleistungen durch die von Wittenbrink (2011) in seinem Fahrzeugkostenvergleich angenommene Jahreskilometerleistung von 130.000 km (siehe Abschnitt 3.5), kommt man zu einer ähnlichen Verteilung der Kostenanteile unter den Kostengruppen (siehe Tabelle 5-3 und Anhang 1 bis Anhang 5). Insgesamt würde der Anteil der variablen Kosten je km an den gesamten Fahrzeugkosten bei jedem Fahrzeugtypen steigen. Die Personalkosten fielen unter sonst gleichbleibenden Bedingungen weniger ins Gewicht als bei oben durchgeführter Rechnung. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde hier angenommen, dass auch beim privaten PKW die Personalaufwände bedacht werden. Hierbei kann im Gegensatz zum ersten Beispiel ein Fahrer eingestellt oder die entsprechende Eigenleistung des Landwirten vergütet werden.

	PKW	3,5 t Elektro	3,5 t Diesel	5-7,5 t Diesel	12-18 t Diesel
A: variable Kosten	22,0%	6,7%	28,7%	29,0%	35,6%
B: Personalkosten	64,0%	63,1%	57,6%	56,2%	43,7%
C: Fixkosten	11,3%	24,3%	11,2%	11,3%	15,2%
D: Gemeinkosten	2,7%	5,9%	2,4%	3,4%	5,5%

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Fahrzeugkostenrechnung in % bei 130.000 km Jahresfahrleistung

In Abschnitt 5.4.2.3 werden die passende Jahreskilometerleistung und die Fahrzeugkostensätze für diese Dissertation hergeleitet.

5.2 Bestimmung von Emissionsfaktoren für beispielhafte Fahrzeugtypen zur regionalen Lebensmitteldistribution

Entsprechend des in Kapitel 4.2.2 Formel (4-10) vorgestellten makroskopischen Modells werden Treibhausgas-Emissionsfaktoren für die fünf Fahrzeugtypen aus Kapitel 5.1 berechnet. Entsprechend der angeführten Berechnungen ergeben sich die in Tabelle 5-4 aufgeführten THG-Emissionen je gefahrenem km in g CO_{2äq}. Es wurde ein Tank-to-Wheel (TTW) Emissionsfaktor gewählt. Dieser beinhaltet alle THG-Emissionen aus der Verbrennung des Kraftstoffes im Fahrzeug. Eine andere Möglichkeit wäre, einen Well-to-Wheel (WTW) Faktor zu nutzen. Solche Faktoren umfassen den gesamten Lebensweg des Kraftstoffes von der Extraktion des Rohöls bis zur Verbrennung im Motor (EWI, 2014). Da der Anteil der Vorketten also der Differenz aus WTW und TTW sehr gering ist, ist der TTW-Faktor zum Zwecke dieser Arbeit ausreichend.

Für das Elektrofahrzeug wird der Energieverbrauch entsprechend der Angaben zur Batteriekapazität in kWh (Bat) und der Reichweite in km (R) aus Schwartz (2017) errechnet und mit dem Emissionsfaktor (Emf) multipliziert (siehe Formel (5-1)).

$$ECF_{Elektro} = Emf \cdot \frac{Bat}{R} \quad (5-1)$$

Der Emissionsfaktor entspricht dem des verwendeten Strommix. In Tabelle 5-4 ist der Faktor zur Bereitstellung des deutschen Strommix entsprechend der Datenbank ProBas mit dem Datensatz EI-KW-Park-DE-2020 gegeben (ProBas, 2023). Hier werden die Emissionen der Vorketten (Scope 3) sowie die direkten Emissionen (Scope 1) mit einbezogen, da die THG-Emissionen der erneuerbaren Energien Erzeugung ausschließlich im Scope 3 anfallen und andernfalls unberücksichtigt blieben. Der Scope 1 umfasst alle direkten THG-Emissionen aus der Verbrennung der Rohstoffe zur Erzeugung von Strom (WBCSD & WRI, 2011).

	PKW Diesel	3,5 t Elektro	3,5 t Diesel	5-7,5 t Diesel	12-18 t Diesel
Emissionen bei 50 % Auslastung [g CO_{2äq}/km]	187	65	353	365	577

Tabelle 5-4: Fahrzeugemissionen für fünf ausgewählte Fahrzeugtypen

5.3 Mathematische Modellformulierungen zur Lösung der Tourenplanungsprobleme

In Abschnitt 4.1 wurde das Standard-Transportproblem, Travelling Salesman Problem (TSP) vom Vehicle Routing Problem (VRP) abgegrenzt. Dieses Kapitel erläutert die Spezifika der hier verwendeten TSP und VRP-Modelle zur Modellierung von Touren. Das TSP wird genutzt, um die Touren bei eigener Auslieferung seitens der Erzeuger darzustellen. Mit dem VRP werden Routen für die kooperative Tourenplanung aller Erzeuger seitens der Regionalvermarktungsinitiativen gebildet.

5.3.1 Entwicklung eines geeigneten Travelling Salesman Modells zur Lösung der Rundtouren bei eigener Auslieferung der Erzeuger

Vom Erzeuger bei eigener Auslieferung gefahrene Rundtouren entsprechen dem aus der Literatur des Operations Reserach bekannten Travelling Salesman Problem (TSP). Generell sucht das Standard TSP-Modell ausgehend von einem Depot (hier der Erzeugungsort) die kürzeste Verbindung zwischen einer gegebenen Menge an Knoten (hier die Märkte) zum Ausgangsort (hier der Erzeugungsort) (Domschke & Scholl, 2010; Vahrenkamp & Mattfeld, 2007). Im vorliegenden Fall, der eigenen Auslieferung seitens der Erzeuger, fahren die Erzeuger geschlossene Touren. Die Touren starten und enden am Betrieb der Erzeuger. Gesucht ist, ausgehend vom Betrieb, die kürzeste Verbindung aller Märkte des LEHs. Den Erzeugern wird unterstellt, keinen professionellen Routenplaner für die gesamte Ausgestaltung ihrer Touren

zu nutzen. Sie nutzen möglicherweise lediglich ein Navigationsgerät, das sie beim Auffinden der besten Verbindung zweier Knoten einer Tour unterstützt. Generell wird ihnen unterstellt sich für die Rundwege, die ihrer Erfahrung nach am kürzesten sind, zu entscheiden.

Demnach ist das übergeordnete Ziel des TSP-Modells, lediglich sinnvolle Touren ausfindig zu machen. Das Optimierungsziel (bspw. kürzeste Route, schnellste Route) ist daher von sekundärer Bedeutung. Es geht vielmehr darum, den zeitlichen und finanziellen Transportaufwand bei einer eigenen Auslieferung einschätzen zu können.

Die Erzeuger fahren mit ihrem eigenen Fahrzeug, weshalb hier im Gegensatz zum VRP (siehe Abschnitt 5.3.2) keine Unterscheidung getroffen werden muss. Auch eine Bewertung mit Kosten- bzw. Emissionsfaktoren findet erst später statt. Im ersten Schritt sollen lediglich Tourenlängen und Fahrzeiten ermittelt werden.

Nachfolgend wird das verwendete TSP-Modell dargestellt. Grundlage bilden asymmetrische Distanz- und Zeitmatrizen, die anhand von realen Knoten generiert wurden. So wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Ergebnissen des VRP-Modells (vgl. Abschnitt 5.3.2) gewährleistet.

Das TSP-Modell ist aus oben genannten Gründen bewusst einfach gehalten. Als Zielfunktion (siehe Formel (5-2)) wird die insgesamt zurückgelegte Distanz zwischen den Knoten minimiert. Die Nebenbedingungen (5-3) und (5-4) sagen aus, dass in einem Knoten i bzw. j nur eine Kante der Tour eintreffen bzw. fortgehen darf. Nebenbedingung (5-5) regelt die Elimination von Subtours (Vahrenkamp & Mattfeld, 2007), wobei die Miller-Tucker-Zemling Bedingung implementiert wurde (Miller et al., 1960). Die Schlupfvariable z ordnet die Knoten, indem jedem Knoten ein Index zugeordnet wird, der größer ist als der Index des Vorgängerknotens (Miller et al., 1960). Die Nebenbedingungen (5-8) und (5-9) dienen der Begrenzung der Tourenlänge auf einen Arbeitstag und der nachträglichen Ermittlung der Fahrzeit einer Tour.

$$\text{Min} \sum_{i \in E} d_{ij} x_{ij} \quad (5-2)$$

$$\sum_{i \in E} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (5-3)$$

$$\sum_{j \in E} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (5-4)$$

$$\sum_{i, j \in N} z_i - z_j + n \cdot x_{ij} \leq n - 1 \quad \forall i \neq j \in \mathbb{R} \quad (5-5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in E, \forall j \in E \quad (5-6)$$

$$z_i \in E, \quad \forall i \in E, \forall j \in E \quad (5-7)$$

$$\sum_{i \in E} \left(\frac{t_{ij}}{60} \right) \cdot x_{ij} + s_t \cdot x_{ij} \leq T \quad \forall j \in E \quad (5-8)$$

$$\sum_{i \in E} \left(\frac{t_{ij}}{60} \right) \cdot x_{ij} + s_t \cdot x_{ij} = \text{Time} \quad \forall j \in E \quad (5-9)$$

Notation	Beschreibung
E	Menge aller Knoten i oder $j = 0, \dots, n$ (inkl. Betrieb)
N	Menge aller Knoten i oder $j = 1, \dots, n$ (exkl. Betrieb)
n	Anzahl aller Knoten des Modells (inkl. Betrieb)
d_{ij}	Distanz zwischen Knoten i und j
x_{ij}	Entscheidungsvariable über Fahrt auf einer Kante i, j mit Fahrzeug k
z_i	Schlupfvariable zum Ordnen der Knoten
t_{ij}	Fahrzeit zwischen Knoten i und j
s_t	Be- bzw. Endladezeit von Fahrzeugen
T	Maximale Arbeitszeit je Fahrer

5.3.2 Entwicklung eines geeigneten Vehicle Routing Modells zur Lösung des kooperativen Tourenplanungsproblems

Zur Beantwortung der Fragestellungen dieser Arbeit muss das klassische VRP-Modell (siehe Abschnitt 4.1) erweitert werden. Im klassischen VRP-Modell wird eine homogene Fahrzeugflotte angenommen. Im Zuge dieser Arbeit soll jedoch ein für Regionalvermarktungsinitiativen passender Fahrzeugtyp ermittelt werden. Aus diesem Grund wird ein HVRP – ein VRP mit heterogener Fahrzeugflotte – benötigt. Weiterhin werden aufbauend auf dem klassischen VRP die Kanten der Distanzmatrix mit einem fahrzeugspezifischen Kosten- bzw. Emissionsfaktor je zurückgelegtem Fahrzeugkilometer gewichtet. Somit ergibt sich für die Identifikation von Routen und der passenden Fahrzeugflotte bei kostenminimaler Auslieferung bzw. Einsammlung gegenüber dem Standardproblem die in Formel (5-10) dargestellte Änderung der Zielfunktion.

Zur Minimierung der Emissionen aller Touren wird der Kostenfaktor durch den Emissionsfaktor in der Zielfunktion ersetzt (siehe Formel (5-11)).

Ferner werden zwei neue Nebenbedingungen eingeführt: Erstens wird die Reichweite für Elektrofahrzeuge auf 200 km begrenzt (Schwartz, 2017), bevor das Fahrzeug aufgeladen werden muss (siehe Formel (5-12)). Zweitens wird die Fahrzeit je Tour auf die Dauer eines Arbeitstages von 8 h bzw. die maximal vorgesehene (und erlaubte) Lenkzeit eines Fahrers beschränkt. Hierzu werden die in einer Tour befahrenen Kanten mit einer Zeitmatrix gewichtet und eine End- bzw. Beladezeit der Fahrzeuge je Kunde addiert (siehe Formel (5-13)). Wie beim TSP wird auch hier die Miller-Tucker-Zemling Subtour-Eliminationsbedingung genutzt (Miller et al., 1960). Die übrigen Nebenbedingungen (siehe Formel (5-14) bis (5-21)) gleichen denen des klassischen VRPs.

$$\text{Min} \sum_{i \in E} \sum_{j \in E} \sum_{k \in V} d_{ij} \cdot cf_k \cdot x_{ijk} \quad (5-10)$$

$$\text{Min} \sum_{i \in E} \sum_{j \in E} \sum_{k \in V} d_{ij} \cdot ef_k \cdot x_{ijk} \quad (5-11)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{i \in E} d_{ij} \cdot x_{ijk} \leq 200 \quad \forall_{k=1 \in V} \quad (5-12)$$

$$\sum_{j \in E} \sum_{i \in E} t_{ij} \cdot x_{ijk} + s_t \cdot y_{ik} \leq T \quad \forall_{k \in V} \quad (5-13)$$

$$\sum_{i \in E} q_i \cdot y_{ik} \leq Q_k \quad \forall_{k \in V} \quad (5-14)$$

$$\sum_{k \in V} y_{0k} \leq m \quad (5-15)$$

$$\sum_{k \in V} y_{ik} = 1 \quad \forall_i \in N \quad (5-16)$$

$$\sum_{j \in E} x_{ijk} = y_{ik} \quad \forall_{k \in V}, \forall_i \in E \quad (5-17)$$

$$\sum_{i \in E} x_{ijk} = y_{jk} \quad \forall_{k \in V}, \forall_j \in E \quad (5-18)$$

$$\sum_{i,j \in N} z_i - z_j + n \cdot x_{ij} \leq n - 1 \quad \forall_{i \neq j \in \mathbb{R}} \quad (5-19)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall_i \in E, \forall_j \in E, \forall_k \in V \quad (5-20)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad \forall_i \in E, \forall_k \in V \quad (5-21)$$

$$z_i \in E, \quad \forall_i \in E, \forall_j \in E \quad (5-22)$$

Notation	Beschreibung
E	Menge aller Knoten i oder $j = 0, \dots, n$ (inkl. Depot)
N	Menge aller Knoten i oder $j = 1, \dots, n$ (exkl. Depot)
V	Menge aller Fahrzeuge von $k = 1, \dots, m$
n	Anzahl aller Knoten des Modells (inkl. Betrieb)
cf_k	Fahrzeugspezifischer Kostenfaktor
ef_k	Fahrzeugspezifischer Emissionsfaktor
d_{ij}	Distanz zwischen Knoten i und j
x_{ijk}	Entscheidungsvariable über Fahrt auf einer Kante i, j mit Fahrzeug k
y_{ik}	Entscheidungsvariable über Besuch eines Knoten i mit Fahrzeug k
z_i	Schlupfvariable zum Ordnen der Knoten
t_{ij}	Fahrzeit zwischen Knoten i und j
s_t	Be- bzw. Endladezeit von Fahrzeugen
T	Maximale Arbeitszeit je Fahrer
q_i	Abholmenge an Knoten i
C	Kapazitätsbeschränkung der Fahrzeuge

Das dargestellte VRP-Modell kann für verschiedene Transportsituationen genutzt werden. Es besteht die Möglichkeit, sowohl Einsammlungstouren als auch Auslieferungstouren abzubilden. Über die Nebenbedingung (5-14) werden entweder Transportmengen, die eingesammelt oder am Supermarkt ausgeliefert werden, abgebildet. Da in dem vorliegenden Tourenplanungsmodell keine schwankenden Transportmengen bedacht werden müssen, kann der Parameter q_i sowohl Mengen zur Einsammlung als auch zur Auslieferung repräsentieren. Schlussendlich gewährleistet die Nebenbedingung in beiden Fällen, dass die Fahrzeugkapazität in keinem Fall überschritten wird.

5.4 Bestimmung der Bewertungsparameter zur Evaluation der passendsten Auslieferungsstrategie anhand des Fallbeispiels einer Regionalvermarktungsinitiative

Um die Effekte auf Fahrzeugkosten und Emissionen durch eine kooperative Tourenplanung evaluieren zu können, werden die Bewertungsparameter Auslieferungszeit, Kosten und Emissionen für die drei Auslieferungsstrategien kooperative Tourenplanung, Streckenbelieferung und eigene Auslieferung der Erzeuger mittels individueller Rundtouren anhand einer beispielhaften Regionalvermarktungsinitiative aus Niedersachsen abgeschätzt. In Abschnitt 5.5 erfolgt eine Szenarioanalyse, um die Ergebnisse dieser Arbeit auf andere Initiativen übertragen zu können.

Die aktuellen Erzeuger des vorliegenden Beispiels (Stand Februar 2020) werden auf der Homepage der Initiative gelistet. Alle 58 Erzeuger können ihre Produkte unter der Dachmarke der Initiative u. a. in so genannten Regionallagern (Regalen) im LEH an neun Standorten (Stand Februar 2020) verkaufen. Die Standorte der Märkte sind ebenfalls bekannt. Es wird für alle Szenarien vorausgesetzt, dass die neun Märkte von allen Erzeugern beliefert werden. Weitere Absatzorte wie Hofläden werden nicht betrachtet, da die Datengrundlage zu unsicher

ist und die Schlussfolgerungen der Berechnungen auch auf Hofläden übertragen werden können.

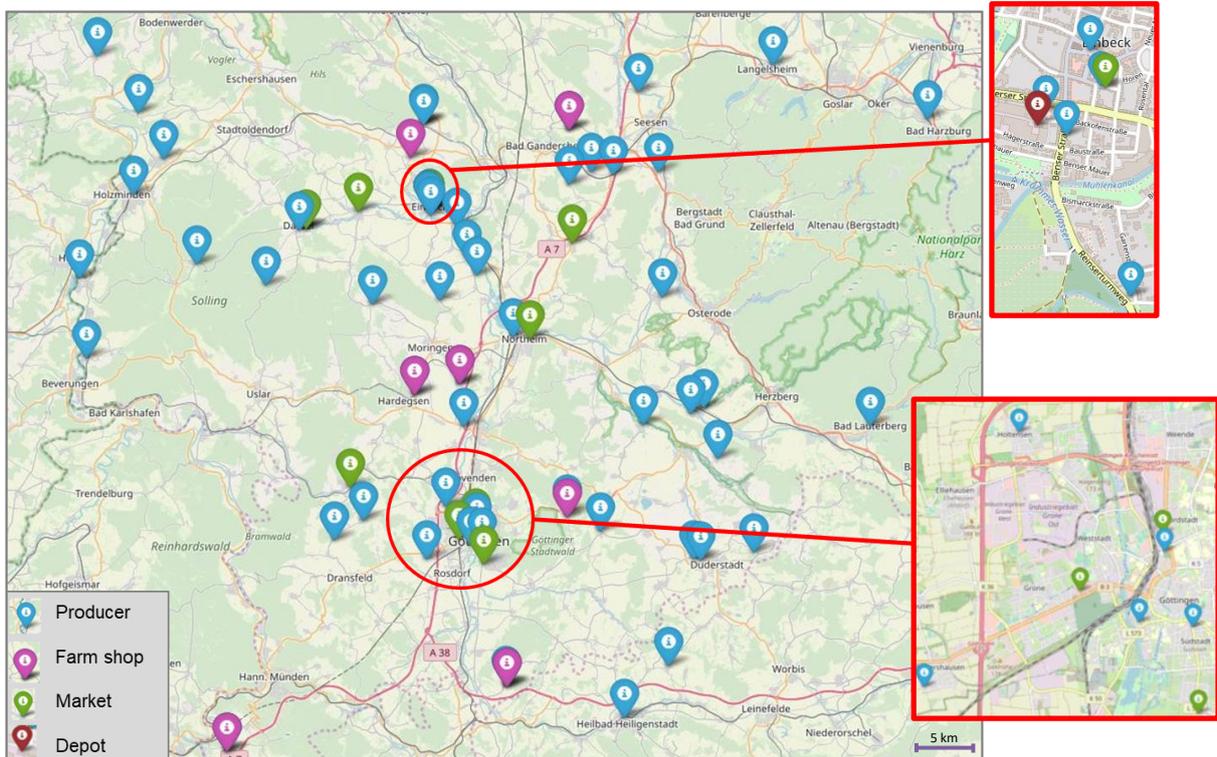


Abbildung 5-7: Verteilung der Knoten der Regionalvermarktungsinitiative

In Abbildung 5-7 ist die Verteilung aller Knoten (Märkte, Erzeuger, (Hofläden) und ein Depot) im südlichen Niedersachsen dargestellt. Als Depot wird der Sitz der Initiative definiert. Da die Erzeugerverbände in der Regel klein sind und nur über begrenzte finanzielle Mittel verfügen, wird angenommen, dass für eine Zwischenlagerung nur haltbare Produkte, die keiner Kühlung bedürfen, infrage kommen. Neben zwei städtischen Einzugsgebieten verteilen sich die Erzeuger und Märkte auf insgesamt vier weitere Einzugsgebiete im ländlichen Raum bzw. insgesamt sechs Regionen.

Eine Übersicht über die genaue Verteilung der Erzeuger und Märkte um das Depot kann Tabelle 5-5 entnommen werden. Die Märkte befinden sich mit maximal 47 km Distanz etwas dichter als die Erzeuger mit durchschnittlich 33 km und maximal 77 km Distanz um das Depot verteilt. Da insgesamt 6 Einzugsgebiete betrachtet werden, ist die Spannweite der Entfernungen der Erzeuger untereinander mit 0,2 bis 125 km weit, während die Märkte aufgrund ihrer engeren Streuung um das Depot untereinander mit 3,1 km bis 53 km deutlich dichter als die Erzeuger beieinander liegen.

	Entfernung der Erzeuger zum Depot	Entfernung der Märkte zum Depot	Entfernung der Erzeuger untereinander	Entfernung der Märkte untereinander
Ø	33	25	44	29
Min	0,1	1,3	0,2	3,1
Max	77	47	125	53

Tabelle 5-5: Angaben zur Verteilung der Erzeuger [km]

5.4.1 Eigene Auslieferung seitens der Erzeuger

Bei der eigenen Auslieferung seitens der Erzeuger handelt es sich in der Regel um den Status Quo. Unter einer eigenen Auslieferung wird verstanden, dass die Erzeuger, einer ihrer Angestellten oder ein Familienmitglied mit einem Fahrzeug des Betriebes jeden Supermarkt anfahren und einzeln beliefern. Dabei werden zwei Strategien betrachtet:

Erstens, ein Erzeuger beliefert jeden Markt über so genannte Streckenbelieferungen, d. h. der Erzeuger fährt von seinem Betrieb (Erzeugungsort) aus zu jedem Markt einzeln hin und zurück. Zweitens, ein Erzeuger fasst die Belieferung der Märkte in einer eigenen Rundtour zusammen, ohne jedoch andere Erzeuger einzubeziehen.

Im Fall der Rundtour wird davon ausgegangen, dass die gesamte Ware des Erzeugers in sein Fahrzeug passt und alle Märkte beliefert werden können, bevor das Fahrzeug wieder zurück zum Depot fährt. Als Transportfahrzeug dient ein großer Diesel betriebener PKW (vergleichbar mit einem VW Caddy oder einem Kombi-Wagen). Dieser wird entsprechend der Annahmen aus der vorangegangenen Fahrzeugkostenrechnung (siehe Abschnitt 3.5) neben der Auslieferung regionaler Produkte, auch für private bzw. für weitere betriebliche Zwecke genutzt und ist demzufolge bereits vorhanden.

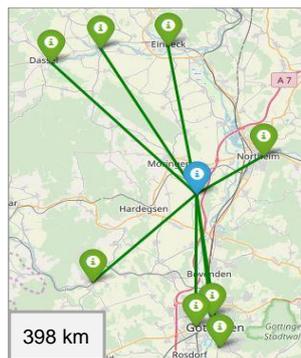


Abbildung 5-8: Kumulierte Streckenbelieferung bei zentraler Lage des Erzeugungsstandortes

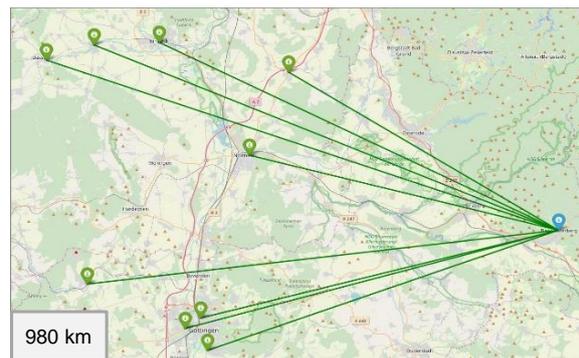


Abbildung 5-9: Kumulierte Streckenbelieferung bei dezentraler Lage des Erzeugungsstandortes

Für die Ermittlung von **Strecken (Strategie eins)** reicht es aus, eine Distanz- und eine Zeitmatrix zu generieren und die einzelnen Distanzen der Höfe je Erzeuger zu den einzelnen Märkten zu kumulieren. In Abbildung 5-8 ist die beispielhafte Streckenbelieferung eines Erzeugers (blauer Marker), dessen Standort sich zentral zwischen den Märkten (grüne Marker)

befindet, dargestellt. Abbildung 5-9 zeigt die Streckenbelieferung eines Erzeugers (blauer Marker), der dezentral zu den Märkten (grüne Marker) liegt.

Bereits aus diesen beiden Abbildungen geht hervor, dass eine Streckenbelieferung aufwendig und zeitraubend zu sein scheint. Bedenkt man den hohen Anteil der Personalkosten an den gesamten Transportkosten, sind für die Streckenbelieferung hohe Kosten zu erwarten (siehe Abschnitt 5.1). Die Kumulation der Streckenbelieferung aller 58 Erzeuger ergab eine durchschnittliche Distanz von 649 km. Die kürzeste Distanz aller kumulierten Streckenbelieferungen liegt bei 388 km und die Weitesten bei 1.459 km. Im Durchschnitt dauert die reine Fahrzeit einzeln zu allen Märkten und zurück für jeden Erzeuger 11 h 40 min. Es handelt sich dabei lediglich um das einmalige Anfahren der Märkte ohne Be- und Endladezeiten des Fahrzeugs.

Rundtouren (Strategie zwei) hingegen werden mittels einer Erweiterung des Standard Travelling Salesman Problems (TSP) (siehe Kapitel 5.3.1) berechnet. Generell sucht das Standard TSP-Modell ausgehend von einem Depot (hier der Erzeugungsort) die kürzeste Verbindung zwischen einer gegebenen Menge an Knoten (hier die Märkte) zum Ausgangsort (hier der Betrieb) (Domschke & Scholl, 2010; Vahrenkamp & Mattfeld, 2007). Wie eingangs erläutert, wird das TSP aufgrund seiner aufwendigen Berechnung mittels der Programmiersprache Python in den Gurobi Solver der Version 3.6 implementiert. Gurobi löst das Modell mit dem Branch and Bound Algorithmus.

Werden die Streckenbelieferungen der beiden beispielhaften Erzeuger mittels dieses TSPs in optimalen Rundtouren zusammengefasst, ergeben sich die Touren aus Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11.

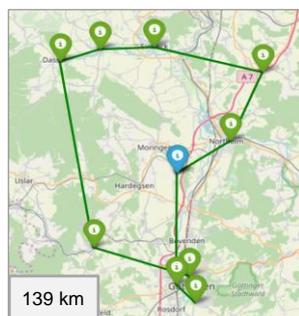


Abbildung 5-10: Optimale Rundtour bei zentraler Lage des Erzeugungsstandortes

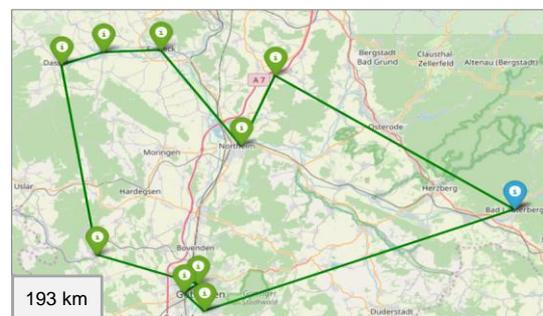


Abbildung 5-11: Optimale Rundtour bei dezentraler Lage des Erzeugungsstandortes

Durch die Implementierung des TSP-Modells mittels Python kann das TSP in kurzer Rechenzeit von wenigen Sekunden für alle 58 Erzeuger gelöst werden. Die kürzeste Rundtour umfasst ca. 130 km mit einer Fahrzeit von 2 h 54 min. Sie unterscheidet sich nur leicht von der schnellsten Tour mit 2 h 52 min und 131 km. Die längste Tour bemisst 235 km und dauert 4 h 27 min. Im Durchschnitt benötigen die Erzeuger für die kalkulierten Rundtouren 3 h 15 min. Die Touren weisen dabei eine durchschnittliche Länge von 152 km auf.

Es wird bereits deutlich, dass sowohl die Tourenlängen als auch die Auslieferungszeiten in jedem Fall bei einem Wechsel von der Streckenbelieferung zu der Auslieferung mittels Rundtouren stark reduziert werden können. Aus diesem Grund lohnt es sich die

Möglichkeiten einer kooperativen Tourenplanung weiter zu betrachten und eingehend zu analysieren. Auf eine weitere Betrachtung der Streckenbelieferung wird verzichtet, da diese eindeutig nachteilig ist. Die Ergebnisse der Rundtouren werden im weiteren Verlauf der Arbeit erneut aufgegriffen und in den Kontext der übrigen Analysen gesetzt sowie bewertet.

5.4.2 Kooperative Tourenplanung aller Erzeuger

Unter einer kooperativen Tourenplanung wird im Rahmen dieser Dissertation eine gemeinschaftliche Auslieferung der Lebensmittel aller Erzeuger einer Regionalvermarktungsinitiative an den LEH verstanden. Theoretisch wären folgende zwei Umsetzungsvarianten möglich: 1. Die Ware wird nacheinander von jedem Erzeuger eingesammelt und direkt zum LEH gebracht. 2. Die Ware wird in einem Depot gesammelt, ggf. zwischengelagert und dann gemeinschaftlich ausgefahren. Die Anlieferung zum Depot könnte dabei einzeln durch die Erzeuger selbst oder ebenfalls gemeinschaftlich durchgeführt werden. In beiden Fällen (1. und 2.) würde ein Fahrer benötigt werden.

Aufgrund des eingangs erläuterten Zustands der hohen Fragmentierung der Erzeuger in Verbindung mit kleinen Sendungsgrößen (siehe Abschnitt 2.4.1), wird Variante Eins ausgeschlossen, da anzunehmen ist, dass Fahrzeuge nicht ausgelastet werden können, ohne die Arbeitszeiten der Fahrer massiv zu überschreiten. Eine möglichst kostengünstige Auslieferung der Ware kann hingegen nur mit möglichst stark ausgelasteten Fahrzeugen erreicht werden. Zudem müssen haltbare Produkte nicht täglich ausgeliefert werden. Sie können gut in einem Depot zwischengelagert werden, wodurch bei saisonalen Schwankungen nicht immer alle Erzeuger in die Planung der Wareneinsammlung einbezogen werden müssen. Variante Zwei gilt als deutlich vielversprechender, was die Fahrzeugauslastung betrifft. Als Zwischenlager/Depot/Umschlagsort, wäre der Sitz der Initiative, die die Transportdienstleistung koordiniert und überwacht, denkbar. Die Anlieferung zum Depot sollte dabei ebenfalls gemeinschaftlich organisiert werden. Basierend auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 5.4.1, würde auch eine Teilstreckenbelieferung (vom Erzeuger zum Depot) zu längeren Distanzen und einem höheren Zeitaufwand als nötig führen.

Daher wird folgende Strategie für die Untersuchung der kooperativen Tourenplanung innerhalb dieser Dissertation festgelegt: Alle Produkte werden beim Erzeuger eingesammelt (Einsammlungstouren) und zunächst ins Depot gebracht. Im Depot wird die Ware nach Bedarf neu kommissioniert. Anschließend starten die Auslieferungstouren zu den Märkten ab dem Depot.

Nachfolgend wird das in Abschnitt 5.3.2 vorgestellte VRP-Modell genutzt, um die Bewertungsparameter einer kooperativen Tourenplanung regionaler Erzeuger zu ermitteln. Die Fahrzeugparameter der beispielhaften Fahrzeugkostenrechnung (vergleiche Abschnitt 5.1) sowie die makroskopischen Emissionsfaktoren (siehe Abschnitt 5.2) dienen dabei als entscheidende Inputparameter der Zielfunktion.

Die Berechnungen zur kooperativen Tourenplanung teilen sich in zwei Abschnitte. Zuerst wird die Lösung des Fallbeispiels zur kooperativen Tourenplanung mittels des Optimierungsmodells in Gurobi vorgenommen. Zweitens wird das Optimierungsmodell unter Einbezug der

zuvor gewonnenen Erkenntnisse in eine Heuristik übertragen und mithilfe der Python-Bibliothek VeRyPy für verschiedene Szenarien gelöst (vergleiche Abschnitt 5.5). Auf diese Weise können die Ergebnisse auf andere Initiativen übertragen werden.

5.4.2.1 Gestaltung der kooperativen Touren für das Fallbeispiel

Die Erzeuger der Regionalvermarktungsinitiative dieses Fallbeispiels werden sechs Regionen zugeordnet. Auf der Homepage der Regionalvermarktungsinitiative wurden die Erzeuger teilweise Regionen zugeordnet, die nicht ihrem geografischen Ort entsprechen (Abbildung 5-12). Die Gründe dafür sind unbekannt. Um eine sinnvolle Tourenplanung zu gestalten, wurden daher einige Erzeuger passenderen Regionen zugewiesen. So entsteht ein homogeneres Abbild der Regionen (siehe Abbildung 5-13). Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13 wurden mithilfe des Python-Paketes Folium und OpenStreetMap (OSM) erstellt (OpenStreetMap, 2020; python-vizualization, 2020). Die geografischen Grenzen der Regionen wurden entsprechend der Landkreis-Identifikationsnummern von OSM festgesetzt. Die Grenzen laut OSM schließen nicht immer alle Erzeuger ein, die den jeweiligen Regionen zugeordnet wurden. Dies liegt, wie gerade angeführt, daran, dass sich die regionale Zuordnung seitens der Initiative nicht konsequent an den geografischen Grenzen orientiert.

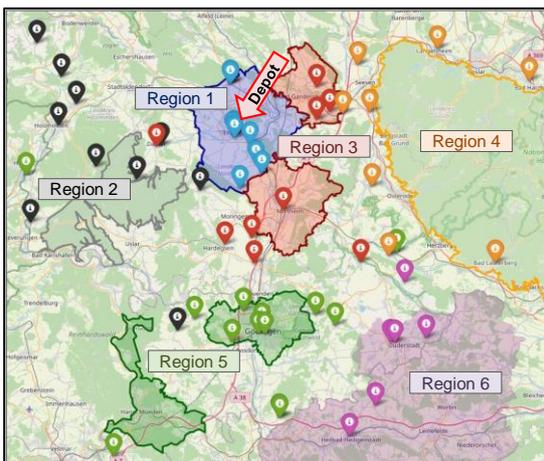


Abbildung 5-12: Regionale Zuordnung der Regionalvermarktungsinitiative

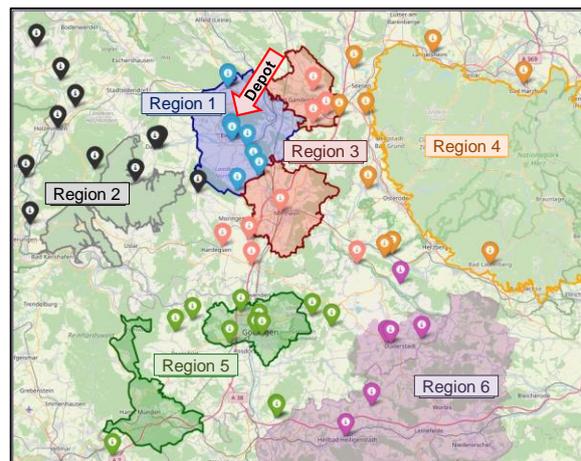


Abbildung 5-13. Angepasste regionale Zuordnung der Erzeuger

Abbildung 5-13 zeigt, dass die Verteilung der Erzeuger innerhalb der Regionen sehr unterschiedlich dicht ist. Es gibt viele Erzeuger, die dicht um das Depot verteilt liegen, aber auch Erzeuger am Rande der Regionsgrenzen von Region 2, 5 und 6. Region 4 verteilt sich um ein Mittelgebirge herum, wodurch ebenfalls große Entfernungen zwischen den Erzeugern dieser Region liegen.

Für alle vorgenommenen Berechnungen in diesem Abschnitt (5.4.2) – nachfolgend als Basiszenario bezeichnet – gilt, dass die Beladung eines Fahrzeugs beim Erzeuger 5 min Zeit beansprucht, während für die Be- oder Entladung eines Fahrzeugs je LEH-Markt oder am Depot 20 min veranschlagt werden (siehe Tabelle 5-6). Die maximale Tourenlänge entspricht einem Arbeitstag von 8 h zzgl. Pausen. Somit darf das Fahrzeug maximal 8 h pro Tour fahren. Die Pausen werden nicht in die Fahrzeit einberechnet. Auf diese Weise können die maximalen Lenk- und Ruhezeiten eingehalten werden. Zusätzlich gilt für den Elektro-Van, dass nach

200 km geladen werden muss (Schwartz, 2017). Im Basisszenario wird zunächst davon ausgegangen, dass eine Ladung des E-Vans nur am Depot möglich ist.

Reichweite Elektro-Van 3,5 t	200 km
Fahrzeugbeladung beim Erzeuger	5 min
Fahrzeugentladung an den Märkten	20 min
Fahrzeugbeladung bzw. -entladung am Depot	20 min
Maximale Dauer einer Tour ohne Pausen	480 min [= ein Arbeitstag]

Tabelle 5-6: Allgemeine Annahmen für das Basisszenario

In Tabelle 5-7 werden die fahrzeugbezogenen Inputparameter für die kooperative Tourenplanung aufgeführt. Grundsätzlich wird zwischen den in Abschnitt 5.1 vorgestellten Fahrzeugtypen Elektro-Van, Diesel-Van, Diesel-Kleintransporter und einem kleinen Diesel-LKW unterschieden. Der private PKW ist für die kooperative Tourenplanung irrelevant. Die fahrzeugbezogenen Basisannahmen entsprechen den durchschnittlichen Kapazitäten der Fahrzeugmodelle, die im Rahmen der Fahrzeugkostenrechnung (Kapitel 5.1) analysiert wurden. Die Kapazität, gemessen in der Anzahl an Kisten, richtet sich nach der Kistengröße entsprechend der Euronorm E2. Für das Basisszenario wird davon ausgegangen, dass die Kisten auf Gitter-Rollwagen gestapelt werden, sodass sie einfacher am LEH ausgeladen und verteilt werden können. Je Rollwagen wird mit einer maximalen Anzahl von 18 Kisten kalkuliert. Da es sich bei den Mitgliedern der Regionalvermarktungsinitiativen um Erzeuger mit kleinen Produktionsvolumina handelt, die nach Erkenntnissen eines Interviews in der Regel nur einen Bruchteil einer Europalette mit ihrer Ware bedecken (Mitarbeiterin für Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit, 2018), wird für das Basisszenario die Annahme getroffen, dass im Jahresdurchschnitt 2 Kisten je Erzeuger und Auslieferung abgeholt werden. Der Rollwagen soll durch die Nutzung von Ebenen, ermöglichen, dass die Waren mehrerer Erzeuger gestapelt werden können. Dies wäre mit Paletten nicht immer möglich.

	3,5 t Elektro	3,5 t Diesel	5-7,5 t Diesel	12-18 t Diesel
Kapazität [Anzahl Kisten]	54	54	144	324
Fahrzeugflotte [Anzahl Fahrzeuge]	2	2	1	0

Tabelle 5-7: Fahrzeugbezogene Basisannahmen

Aus Tabelle 5-7 wird ersichtlich, dass unter den gegebenen Annahmen ein 5 - 7,5 t Diesel Transporter bereits den gesamten Transportbedarf deckt. Demnach wird der 12 - 18 t LKW vorerst nicht in die Analyse einbezogen. Im Rahmen der Szenarioanalyse (siehe Kapitel 5.5) wird die passende Fahrzeuggröße erneut evaluiert. **Die Frage, ob besser mehr Touren mit kleineren Fahrzeugen oder eine Tour mit einem größeren Fahrzeug gefahren werden sollen, bleibt bestehen.** Zur Optimierung wird dem Modell eine Fahrzeugflotte, bestehend aus vier 3,5 t Vans (je zwei Elektro und zwei Diesel) und einem Transporter der Größe 5-7,5 t

zur Verfügung gestellt, sodass mit jeder Fahrzeuggröße der Kapazitätsbedarf von insgesamt 116 Kisten gedeckt werden kann.

Nachfolgend wird das Vorgehen zur Modellierung der kooperativen Tourenplanung genauer erläutert. Zudem werden die Ergebnisse der Berechnungen dargelegt.

Aus Tourenplanungssicht ist es sinnvoller, seltener größere Mengen bei den Erzeugern abzuholen und diese im Depot zwischenzulagern, als häufiger Touren zu fahren und weniger Produkte einzusammeln. Da der Transportbedarf je Erzeuger, wie zuvor beschrieben, gering ist, ist die Bedeutung der Zwischenlagerung für haltbare, lagerfähige Produkte umso höher. Zur Lösung der kooperativen Tourenplanung müssen daher zwei Arten von Touren berechnet werden. Erstens die Einsammlungstouren und zweitens die Auslieferungstouren.

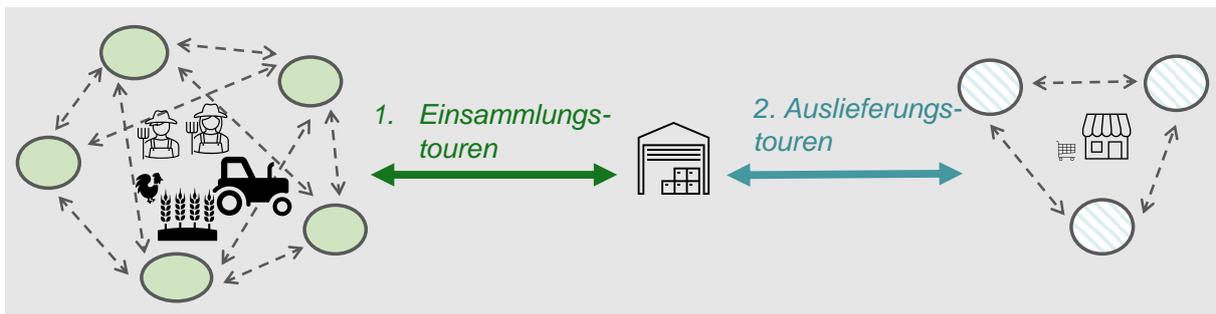


Abbildung 5-14: Ausgestaltung der kooperativen Tourenplanung

Wie in Abbildung 5-14 dargestellt, finden die Einsammlungstouren zwischen den Erzeugern und dem Depot statt, während die Auslieferungstouren zwischen dem Depot und den Märkten vorgenommen werden. Die grünen, einfarbigen Kreise stellen die Erzeuger-Knoten und die blauen, schraffierten Kreise die Knoten der Märkte dar. In der Mitte der beiden Pfeile befindet sich das Depot. Um alle Produkte von den Erzeugern in die Märkte zu bringen, müssen die Strecken beider Tourenarten miteinander addiert werden.

5.4.2.2 Lösung des Fallbeispiels zur kooperativen Tourenplanung mittels des Optimierungsmodells im Basisszenario

Das VRP-Modell wird mit der Programmiersprache Python Version 3.6 implementiert und mit dem Gurobi-Solver gelöst. Das VRP-Modell berechnet für beide Zielfunktionen (Minimierung der Kosten bzw. Minimierung der Emissionen) separat die optimalen Tourenlängen und Auslieferungszeiten. Außerdem wird je nach Optimierungsziel aus der heterogenen Flotte das passendste Fahrzeug für die Tourenplanung ausgewählt (vgl. Abschnitt 5.4.2.1).

Die 58 Erzeuger-Knoten beinhalten 41 Erzeuger mit haltbaren Produkten, die im Depot über mehrere Wochen zwischengelagert werden können, und 17 Erzeuger mit Frischeprodukten, die nicht zwischengelagert werden können. Entsprechend der Faustzahlen für Lieferrhythmen aus dem Handbuch zur Regionalvermarktung des Bundesverband Regionalbewegung (2017) gilt, dass Frischwaren, wie Fleisch, Milchprodukte, Obst und Gemüse (nachfolgend als Frischeprodukte bezeichnet) dreimal wöchentlich bis täglich angeliefert werden müssen. Haltbare Produkte hingegen muss nur zweimal monatlich bis wöchentlich zu den Märkten gebracht werden (Bundesverband Regionalbewegung 2017).

Aufgrund der unterschiedlichen Lieferrhythmen und der Tatsache, dass Frischeprodukte nicht im Depot zwischengelagert werden können, wird die Einsammlung der haltbaren und der Frischeprodukte in zwei separate Touren unterteilt:

1. Einsammlungstouren:

- Einsammlung 1: Alle Erzeuger mit frischen/verderblichen Produkten (17 Erzeuger, Depot)
- Einsammlung 2: Alle Erzeuger mit haltbaren Produkten (41 Erzeuger, Depot)

2. Auslieferungstouren:

- Depot zu allen Märkten

Auch die Frischeprodukte werden zuerst zum Depot transportiert, da dort die Vorkommissionierung der Produkte für die Märkte stattfindet. Zusätzlich können haltbare Produkte gemeinsam mit den Frischeprodukten ausgeliefert werden.

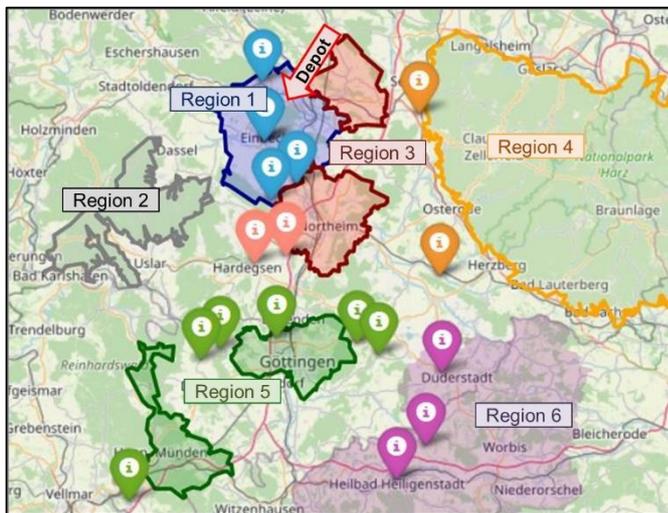


Abbildung 5-15: Verteilung der Erzeuger mit Frischeprodukten

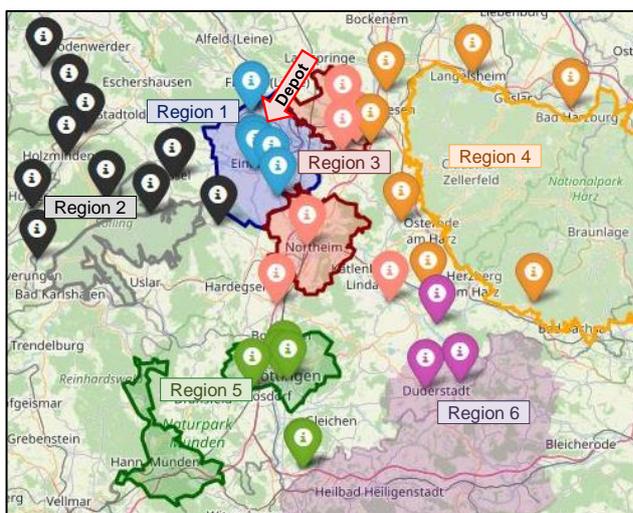


Abbildung 5-16: Verteilung der Erzeuger mit haltbaren Produkten

Die Erzeuger mit frischen Produkten verteilen sich über die Regionen 1, 3, 4, 5 und 6. Erzeuger mit haltbaren Produkten liegen in allen sechs Regionen. Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 zeigen die Verteilung beider Erzeugergruppen über die Regionen des Einzugsgebietes der Regionalvermarktungsinitiative. Die durchschnittliche Distanz der Erzeuger mit haltbaren Produkten zu dem Depot ist geringer als die der Erzeuger mit frischen Produkten (siehe Tabelle 5-8). Da es zudem im Einzugsgebiet der Initiative mehr Erzeuger mit haltbaren Produkten als mit Frischeprodukten gibt, liegen die Erzeuger mit haltbaren Produkten insgesamt dichter beieinander.

Diese Verteilung der Erzeuger hat im Basisszenario Auswirkungen auf die Tourenplanung, wie aus den Ergebnissen der Optimierung ersichtlich ist. So sind beispielsweise die Fahrzeiten je Erzeuger bei den Einsammlungstouren der Frischeprodukte länger als bei denen der haltbaren Produkte.

	1. Frischeprodukte	2. haltbare Produkte
Ø	38,0	30,5
Min	0,1	0,06
Max	77,3	69,6

Tabelle 5-8: Verteilung der Erzeuger um das Depot in km

Die einmalige Einsammlung aller Frischeprodukte kann innerhalb einer Tour erfolgen (siehe Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18). Diese Tour umfasst im Durchschnitt 286 km und dauert 7 h. Dabei unterscheidet sich die emissionsminimale, abgesehen vom Fahrzeugtypen, nicht von der kostenminimalen Tour.

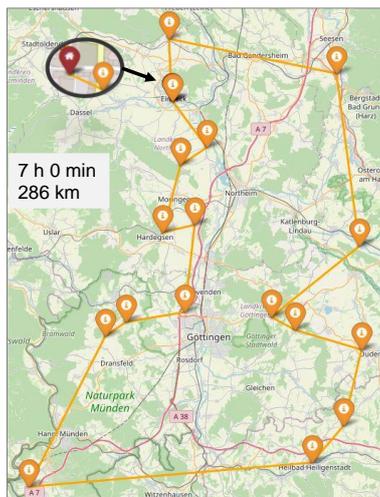


Abbildung 5-17: Einsammlung Frischeprodukte – Min Kosten

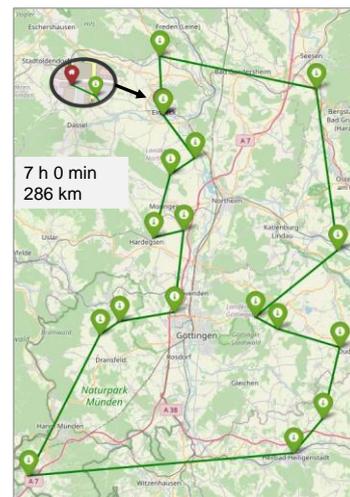


Abbildung 5-18: Einsammlung Frischeprodukte – Min Emissionen

Das Gurobi-Optimierungsmodell kann die Einsammlungstouren für die haltbaren Produkte (41 Knoten) nicht in angemessener Rechenzeit lösen. Die Modellberechnungen wurden über 12 h laufen gelassen, und der Algorithmus hat nicht terminiert. Der Gurobi Solver verfügt in solchen Fällen über die Möglichkeit die Lösungssuche abzubrechen, wenn eine bestimmte Lösungsgüte erreicht oder Rechenzeit überschritten wurde. Zu diesem Zweck kann man Parameter festlegen. Da eine Laufzeit-Beschränkung das Ermitteln einer ausreichend guten Lösung nicht garantiert, wird auf diesen Parameter verzichtet. Stattdessen wird der Parameter „MIPGap“ genutzt. Der Anwender kann mit diesem Parameter die mindestens zu erreichende Lösungsgüte definieren (Gurobi Optimization, 2022b). Das MIPGap bezeichnet den Abstand zwischen der oberen und der unteren Schranke (siehe Abschnitt 4.3.1) für gemischt ganzzahlige Optimierungsprobleme (Gurobi Optimization, 2022b). Wird das definierte MIPGap unterschritten, bricht der Algorithmus die Berechnungen ab und gibt das, bis dahin, beste gefundene Ergebnis aus (Gurobi Optimization, 2022b).

Abbildung 5-19 zeigt den Verlauf der MIPGaps über eine Rechenzeit von 120 min. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass mit zunehmender Rechenzeit immer langsamer bessere Ergebnisse gefunden werden. Die Lösungssuche wurde mehrmals gestartet und nach diversen Stunden abgebrochen. Der Algorithmus fand immer nach wenigen Sekunden eine zulässige Lösung. Bereits nach ca. 2 min Rechenzeit kann die Ausgangslösung stark verbessert werden.

In dem Beispiel von Abbildung 5-19 kann die Lösung nach 2 min Rechenzeit um 80 % verbessert werden. Nach 10 min Rechenzeit liegt das MIPGap bei 10,7 % und nach 30 min bei 9,1 %. Nach 2 h beträgt das MIPGap noch immer über 8 %. Die Berechnungen wurden mit einem DELL Latitude 3490 Rechner durchgeführt. Er verfügt über einen Intel Core i5 Prozessor.

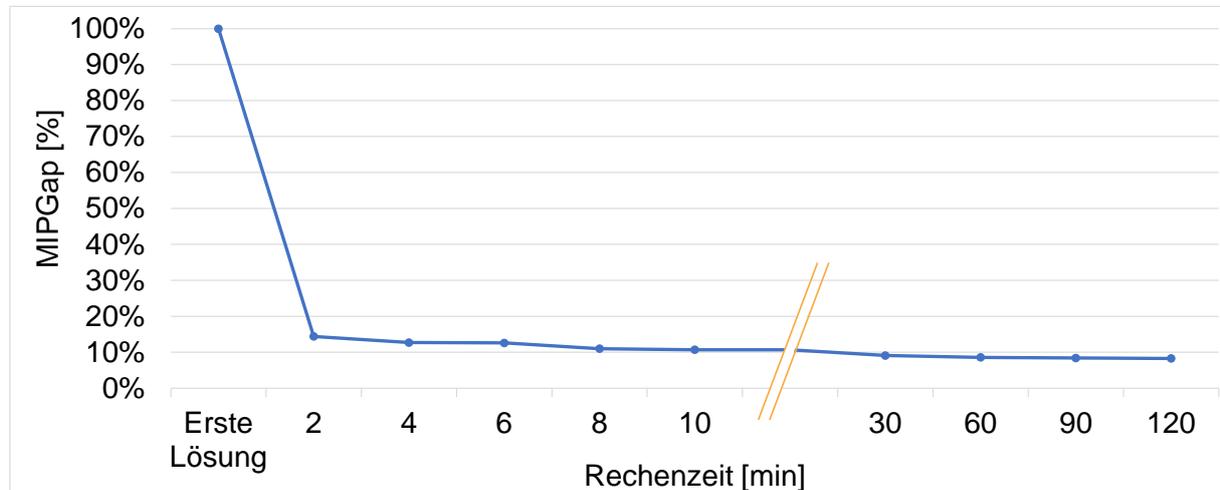


Abbildung 5-19: MIPGap für die Einsammlungstouren der haltbaren Produkte über die Rechenzeit von 120 min mit Gurobi

Die gefundenen Lösungen verbessern sich ab einem MIPGap von ca. 10 % nur noch sehr langsam. Ein MIPGap von 8,5 % konnte in allen Testläufen in unter einer Stunde Rechenlaufzeit erreicht werden. Daher wird die Berechnung nach Erreichen des MIPGaps von 8,5 % abgebrochen. So kann die Rechenzeit für die Einsammlungstouren der haltbaren Produkte erheblich verkürzt bzw. das Modell auch sicher gelöst werden.

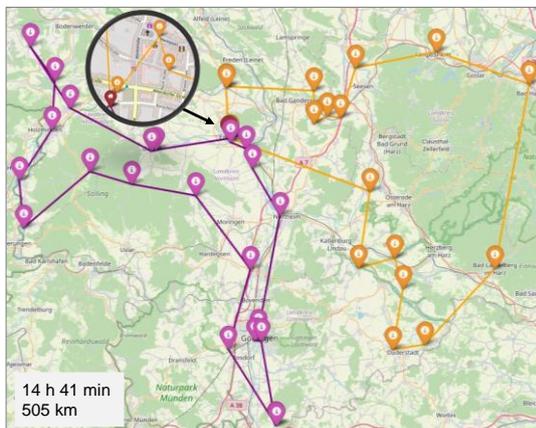


Abbildung 5-20: Einsammlung haltbare Produkte – Min Kosten

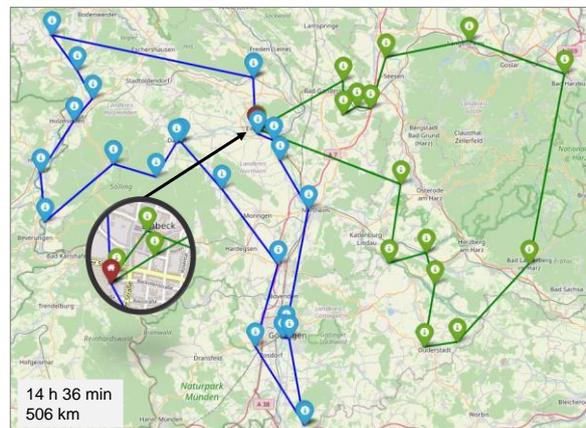


Abbildung 5-21: Einsammlung haltbare Produkte – Min Emissionen

Nach dem Lösen des Optimierungsmodells mit einem „MIPGap“ von 8,5 % ergibt sich eine durchschnittliche Tourenlänge von 506 km und eine durchschnittliche Fahrzeit von 14 h 39 min. Sowohl bei kostenminimaler als auch bei emissionsminimaler Tourenplanung müssen zur Einsammlung der haltbaren Produkte zwei Touren gefahren werden. In Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21 ist erkennbar, dass nur noch wenige Überkreuzungen von Kanten vorliegen. Dies weist darauf hin, dass die Touren für beide Optimierungsziele voraussichtlich zwar noch nicht optimal sind, aber dicht am Optimum liegen. Folglich reichen diese Ergebnisse

aus, um erste Erkenntnisse über die Ausgestaltung der Tourenplanung zu gewinnen. Wie bei der Einsammlung der Frischeprodukte, liegen auch bei den haltbaren Produkten die Unterschiede der kosten- bzw. emissionsminimalen Touren vor allem in der Fahrzeugwahl des Algorithmus.

Für die Auslieferung an die neun Märkte sind je nach Fahrzeugwahl eine bis drei Touren notwendig. Auf die einmalige Auslieferung aller Produkte vom Depot an die Märkte entfällt ein durchschnittlicher Zeitumfang von 6 h 55 min (inkl. Be- und Entladung des Fahrzeugs). Die Länge umfasst dabei im Durchschnitt 157 km.

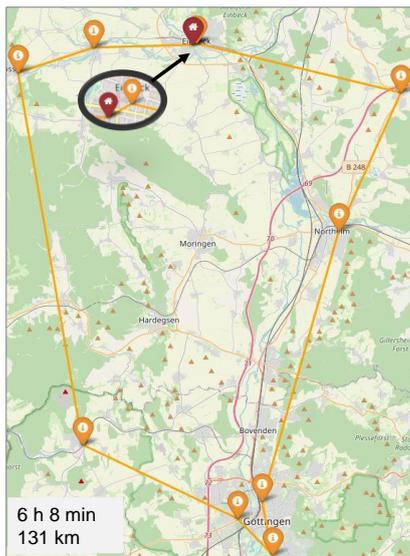


Abbildung 5-22: Auslieferungstour
– Min Kosten

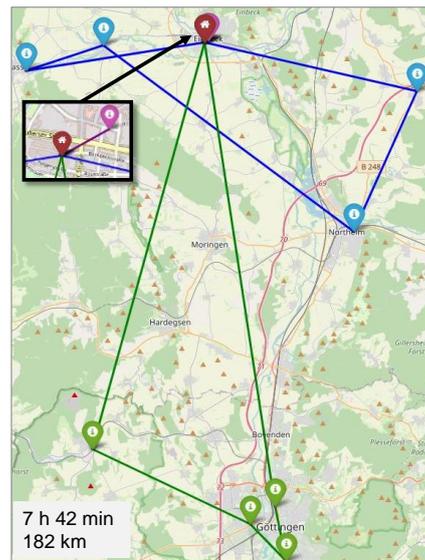


Abbildung 5-23: Auslieferungstour
– Min Emissionen

In der Visualisierung der Optimierungsergebnisse (Abbildung 5-17 bis Abbildung 5-23) erscheint die emissionsminimale Auslieferungstour (Abbildung 5-23) nicht optimal, obwohl kein Abbruchkriterium im Optimierungsmodell definiert wurde. Hier überkreuzen sich zwei Kanten der blauen Tour. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Distanz- und die Zeitmatrizen auf realen Entfernungen basieren. Bei der Erstellung einer realen Entfernungsmatrix werden Umwege durch einseitig oder nicht mit dem PKW befahrbare Straßen, wie z. B. Einbahnstraßen, Spielstraßen in Wohngebieten, Fahrradstraßen, Fußgängerzonen oder ungünstige Überlandstraßen bzw. Autobahnen mit bedacht. Diese Straßenverkehrsnetz bedingten Umwege spiegeln sich in den Längen bzw. Fahrzeiten zwischen zwei Knoten wider. Die verwendete Visualisierung der Ergebnisse mit der Python Bibliothek *Folium*² basiert hingegen auf Luftlinien-Verbindungen zwischen den Knoten. Dadurch können Knotenverbindungen suboptimal erscheinen, obwohl sie mathematisch und entsprechend dem Straßenverkehrsnetz gesehen optimal sind.

² Folium ist eine Python Bibliothek. Sie nutzt u. a. geografische Informationen, um Routen auf einer Karte zu visualisieren. (<https://python-visualization.github.io/folium/latest/>, zuletzt abgerufen am 09.12.2023).

Ferner wirken sich zwei Restriktionen maßgeblich auf die Ergebnisse der Optimierung aus: Die Zeitbegrenzung einer Tour (inkl. Be- und Entladung des Fahrzeugs) und die Längenrestriktion eines E-Vans. Durch diese Restriktionen kann es sein, dass ein Knoten, der entsprechend der Visualisierung suboptimal erscheint, in eine Tour mit aufgenommen wird. Ein Knoten, der hingegen passend zu sein scheint, wird möglicherweise nicht mit in eine Tour aufgenommen, da durch ihn die Zeit- oder Längenrestriktion überschritten werden würde. Hier spielen auch wieder die Gegebenheiten des Straßenverkehrsnetzes eine Rolle.

Im Allgemeinen wählt der Gurobi-Algorithmus je nach Optimierungsziel (Minimierung der Kosten oder Minimierung der Emissionen) in allen Berechnungen dieses Fallbeispiels das günstigste Fahrzeug bzw. das Fahrzeug mit den geringsten Emissionen je gefahrenem km. Bevor eine der beiden genannten Restriktionen überschritten wird, wird das nächstbeste Fahrzeug gewählt. Dieses Ergebnis klingt nicht überraschend. Allerdings zielt die Optimierung darauf ab, die, dem Optimierungsziel entsprechend, passendste Verbindung zwischen allen Knoten in Routen zusammenzufassen. Es hätte demzufolge auch günstiger sein können, mehrere kleinere Fahrzeuge mit höherem Kostensatz als weniger größere mit geringerem Kostensatz einzusetzen. Bei einer Rundtour muss immer auch der Rückweg vom letzten Knoten zum Depot bedacht werden, was die Routen je nach Konstellation der Flotte länger oder kürzer machen kann. ***Damit handelt es sich bei der Erkenntnis, dass das günstigste bzw. emissionsärmste Fahrzeug das Beste ist, um ein erstes wichtiges Zwischenergebnis der Optimierung.***

Nach den Berechnungen der Kapitel 5.1 und 5.2 unterscheidet sich das günstigste Fahrzeug vom emissionsärmsten Fahrzeug. Die Gesamtlänge der Auslieferung hängt jedoch davon ab, ob eine Tour mit einem großen Fahrzeug (7,5 t) oder mehrere kleinere Touren mit Vans (3,5 t) gefahren werden. Daher unterscheiden sich die Touren je nach Optimierungsziel *Minimierung der Kosten* oder *Minimierung der Emissionen*.

5.4.2.3 Anpassung des Modellierungsansatzes entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse

Entsprechend der Ergebnisse aus der Lösung des Fallbeispiels zur kooperativen Tourenplanung (5.4.2.2) wird der Modellierungsansatz der kooperativen Tourenplanung angepasst. Das Ziel dieser Anpassung ist, einerseits möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu generieren, und andererseits Regionalvermarktungsinitiativen bestmöglich zur Auswahl einer geeigneten Transportstrategie beraten zu können. Die Anpassungen werden für die Szenarioanalyse in Abschnitt 5.5 genutzt.

1. Aktualisierung der Fahrzeugkostensätze

Auf Basis der oben vorgestellten Ergebnisse des Fallbeispiels der kooperativen Tourenplanung mittels des Optimierungsmodells, kann die voraussichtliche Jahreskilometerleistung des Fahrzeugs der Initiative ermittelt werden. Zu diesem Zweck werden die Tourenlängen des Basiszenarios auf die voraussichtlichen Auslieferungsrhythmen (siehe am Anfang dieses Abschnitts) hochgerechnet. Es ergibt sich eine Jahreskilometerleistung von rund 106.000 km. Damit wird deutlich, dass die ursprünglichen Annahmen bezüglich der Jahreskilometerleistung aus der Fahrzeugkostenrechnung (siehe Kapitel 5.1) deutlich unterschätzt wurden. Auch mit

kleineren Fahrzeugen fällt bei dieser Regionalvermarktungsinitiative eine hohe Jahreskilometerleistung für die Lebensmitteldistribution an. Dies liegt an der Struktur der Initiative mit vielen Erzeugern, die über eine breite Fläche gestreut sind und nur kleine Mengen produzieren.

Die Berechnung der Jahreskilometerleistung im Fallbeispiel erfolgte anhand der Kapazitätsgrenze. Das heißt, dass diese Kilometerleistung nur erreicht wird, wenn bei jeder Einsammlungstour alle Erzeuger bzw. bei jeder Auslieferungstour alle Märkte angefahren werden müssen. Da die Produktionsmengen unter anderem saisonalen Schwankungen unterliegen, ist eine Überschätzung der Jahreskilometerleistung nicht unwahrscheinlich. Insbesondere Frischeprodukte, wie Obst und Gemüse sind von diesen Schwankungen betroffen. Zudem können haltbare Produkte, wie Öl oder Senf lange zwischengelagert werden, sodass auch größere Mengen als bislang angenommen zwischengelagert werden können. Bei der Planung einer kooperativen Auslieferungsstrategie müssen die maximal notwendigen Fahrzeugkapazitäten in der Hochsaison eingeplant werden.

Zudem sind die Unsicherheiten durch den Abbruch der Optimierung der Einsammlungstouren für die haltbaren Produkte zu berücksichtigen. Die Jahreskilometerleistung hat jedoch einen direkten Einfluss auf die Höhe des Kostensatzes je km. **Um eine Überschätzung der Jahreskilometerleistung und folglich eine Unterschätzung des Kostensatzes zu verhindern, wird die Fahrzeugkostenrechnung konservativ mit einer Leistung von 80.000 km für alle Fahrzeugtypen aktualisiert** (siehe Anhang 8 und Anhang 9).

Weiterhin wird für alle Fahrzeugtypen ein **einheitlicher Abschreibungszeitraum** nach den Empfehlungen des Bundesministeriums der Finanzen von 6 Jahren festgesetzt (Bundesministerium der Finanzen, 2000). Mit diesen beiden neuen Inputparametern ergeben sich nach bekannter Berechnungsmethodik (siehe Kapitel 3 und Abschnitt 5.1) die, in Tabelle 5-9 aufgeführten, Transportkostensätze für die vier Fahrzeugtypen.

	3,5 t Elektro	3,5 t Diesel	5-7,5 t Diesel	12-18 t Diesel
A: variable Kosten	0,04	0,17	0,18	0,28
B: Personalkosten	0,56	0,56	0,56	0,56
C: Fixkosten	0,21	0,11	0,11	0,19
D: Gemeinkosten	0,05	0,02	0,03	0,07
Fahrzeugkosten gesamt [€/km]	0,86	0,86	0,88	1,10

Tabelle 5-9: Transportkostensätze bei einer Jahreskilometerleistung von 80.000 km in €/km

Der **Personalkostenfaktor verringert sich deutlich um 93 % gegenüber den Basisannahmen**. Dennoch behält er den größten Anteil an den Gesamtkosten je gefahrenem Kilometer. Diese Verringerung kommt durch eine ursprüngliche Überschätzung des Zeitaufwands für die Fahrten zustande. Nach den Ergebnissen der Optimierung können mit einer vollen Fahrerstelle deutlich mehr Kilometer zurückgelegt und damit auch mehr Erzeuger bedient werden als ursprünglich angenommen.

Insgesamt reduzieren sich die Transportkosten aller Fahrzeuge. Die Transportkostensätze des Elektro- und Diesel-Vans liegen dicht beieinander. Die neuen Kostensätze dieser beiden Fahrzeugtypen unterscheiden sich erst ab der dritten Nachkommastelle (€/km) und damit im Cent-Bereich. Wobei die Fixkosten je km für den Elektro-Van höher sind. Die variablen Kosten je km liegen hingegen beim Diesel-Van höher als beim Elektro-Van. Für die Vans fällt im Vergleich zu den anderen beiden Fahrzeugtypen der günstigste Kostensatz pro km an. Der teuerste Kostensatz entsteht für den 12-18 t Transporter. Die Kostenverteilung innerhalb der fahrzeugspezifischen Kostensätze kann Abbildung 5-24 entnommen werden.

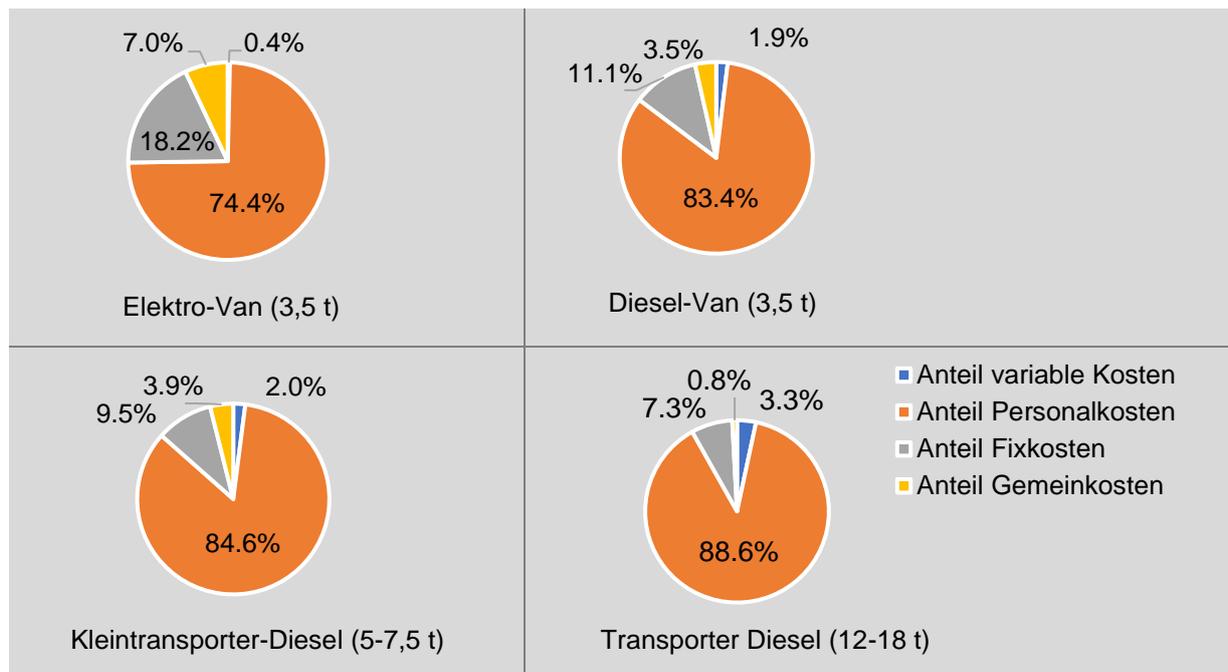


Abbildung 5-24: Kostenverteilung fahrzeugspezifischer Kostensätze bei einer Jahreskilometerleistung von 80.000 km

2. Reduzierung der Fahrzeugflotte

Ferner stellt sich die Frage, welches und wie viele Fahrzeuge die Regionalvermarktungsinitiative anschaffen sollte. Wird der 7,5 t Kleintransporter für die Einsammlungstouren genutzt, kann er im Fallbeispiel nur zu maximal 29 % ausgelastet werden. Maßgebend dafür ist die breitflächige Verteilung der Erzeuger in Zusammenhang mit den geringen Transportmengen je Erzeuger. Dadurch wird die maximale Fahrzeit überschritten, bevor das Fahrzeug innerhalb der Einsammlungstouren annähernd voll ausgelastet werden kann. Würden die Produkte aller 58 Erzeuger in einer Tour ausgeliefert werden, könnte der Kleintransporter hingegen zu 81 % ausgelastet werden. Die haltbaren Produkte werden allerdings nur dreimal pro Monat an die Märkte geliefert. Bei einem reinen Transport der Frischeprodukte, welcher hingegen viermal pro Woche bzw. ca. sechzehnmal im Monat erfolgt, kann der 7,5 t Kleintransporter ebenfalls nur zu 24 % ausgelastet werden. Die Differenz der Auslieferungszeit zwischen der einmaligen Tour mit einem großen Transporter und der Unterteilung in drei Touren mit E-Vans beträgt lediglich eine Stunde (vier statt drei Stunden).

Berücksichtigt man zusätzlich die oben angeführten neuen Berechnungen zu den Kostenfaktoren, ist der Kauf eines 3,5 t Van mit Diesel oder Elektromotor dem Kauf eines

Kleintransporters gegenüber zu bevorzugen. Es zeichnet sich ab, dass der 12-18 t Transporter für das vorliegende Optimierungsproblem ungeeignet ist. Für die weiteren Berechnungen im Optimierungsmodell werden lediglich die Fahrzeugkapazitäten benötigt. Da die Kapazitäten des Elektro- und des Diesel-Vans identisch sind, ist an dieser Stelle keine weitere Eingrenzung erforderlich. Über Anzahl der anzuschaffenden Fahrzeuge und die Art des Antriebs wird weiter in Kapitel 6 diskutiert.

Unterschiede in der Modellierung des E-Vans und des Diesel-Vans können vermieden werden, wenn die Annahme bezüglich der Längenrestriktion des E-Vans auf 350 km erweitert wird. Wie in Kapitel 3.2 herausgearbeitet, muss ein Fahrer ab einer Fahrt von 4,5 h ein bis zwei Pausen von insgesamt 45 min einlegen. Bei den Einsammlungstouren aller Produkte wird die Fahrzeit von 4,5 h in der Regel überschritten, sodass ein Fahrer mindestens eine Pause einlegen muss. Diese Pause kann direkt mit der Ladung des E-Vans verbunden werden, sodass der Van zum Laden nicht zum Depot zurückkehren muss. Je nach Beladungsgewicht des Vans wird die Tourenlänge von 350 km im Fallbeispiel gar nicht erreicht, sodass voraussichtlich sowieso keine Zwischenladung auf einer Tour erforderlich ist.

3. Änderung der Zielfunktion

Die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Abschnitt (5.4.2.2) haben gezeigt, dass der Gurobi-Algorithmus immer zuerst das günstigste bzw. emissionsärmste Fahrzeug wählt. Darüber hinaus wird nur ein Fahrzeugtyp vorgeschlagen. Aus diesen Gründen muss der Algorithmus nicht mehr das passendste Fahrzeug zu den minimalen Kosten auswählen. Stattdessen wurde **vorab eine Fahrzeugtypenwahl für die Optimierung getroffen.**

Demzufolge kann auch die Zielfunktion des Optimierungsmodells angepasst werden. Der Kosten- bzw. Emissionsfaktor cf_k bzw. ef_k kann aus der Zielfunktion entfernt werden. Da die fahrzeugspezifischen Kosten- und Emissionsfaktoren von der Distanz abhängig sind, würde die Zielfunktion nun Touren mit der minimalen Gesamtdistanz bestimmen.

Ziel dieser Dissertation ist, den Regionalvermarktungsinitiativen eine fundierte Entscheidungsgrundlage zur Entwicklung einer geeigneten Auslieferungsstrategie aus Umwelt- und Kostenperspektive zu geben. Gesucht wird eine Auslieferungsstrategie mit minimalem Kosten-, Emissions- und Zeitaufwand. Wie auch die aktualisierten Fahrzeugkostensätze zeigen, haben die Personalkosten, welche maßgeblich von der Auslieferungszeit abhängen, den größten Anteil an den Fahrzeugkosten. Daher wird die Distanzmatrix in der Zielfunktion durch die Zeitmatrix ersetzt und **das Modell hinsichtlich des minimalen Gesamtzeitaufwands aller Touren optimiert.** Im TSP-Modell zur Berechnung der Tourenplanung der Erzeuger bei eigener Auslieferung wurde angenommen, dass die Touren bereits nach minimaler Fahrzeit von den Erzeugern geplant wurden (siehe Kapitel 5.3.1).

5.5 Szenarioanalyse mittels einer VeRyPy-Heuristik

Das Ziel der Szenarioanalyse liegt darin, unsichere Parameter zu identifizieren und zu variieren. Auf diese Weise können Unsicherheiten in den Ergebnissen der Tourenplanung sowie daraus resultierende Fehlinterpretationen und falsche Schlussfolgerungen vermieden werden.

Bislang wurde das kooperative Tourenplanungsmodell für ein spezifisches Fallbeispiel angewendet. Um die Ergebnisse dieses Fallbeispiels auch auf andere kleinere oder größere Initiativen mit einer anderen Verteilung der Erzeuger und Märkte übertragen zu können, werden die **Inputparameter: Transportmengen sowie Zeit- und Distanzmatrizen verändert**. Zur Veränderung der Parameter werden mithilfe verschiedener Python-Bibliotheken³ **zufällige** Knoten und Mengen in einem definierten Rahmen erzeugt (siehe Abschnitt 5.5.2).

Bereits bei den Berechnungen der Einsammlungstouren für die haltbaren Produkte ist der Gurobi Solver sehr langsam bzw. findet auch nach langer Rechenzeit von mehreren Stunden kein optimales Ergebnis. Die in Abschnitt 5.4.2.3 erläuterten Modellanpassungen vereinfachen das Optimierungsmodell nicht wesentlich. Somit kann auch nach Umsetzung dieser Anpassungen mit Gurobi für die 41 Knoten in angemessener Rechenzeit keine optimale Lösung gefunden werden. Um flexibel schnelle und vergleichbare Ergebnisse nicht nur für die Einsammlungstouren der haltbaren Produkte, sondern für alle Szenarien zu generieren, wird daher zur Szenarioanalyse auf eine **Heuristik der Python Bibliothek VeRyPy** zurückgegriffen.

VeRyPy wurde von Rasku et al. (2019) im Rahmen einer Dissertation entwickelt. Die Bibliothek beinhaltet verschiedene Algorithmen zur Lösung des klassischen Capacitated Vehicle Routing Problems (CVRP) mit symmetrischer Distanzmatrix. Der Code ist vollständig einsehbar, reproduzierbar und unter der MIT Lizenz kostenfrei zugänglich (Rasku et al., 2022). Insbesondere die Transparenz des Python Codes ist ein entscheidender Vorteil gegenüber anderen Programmen, wie z. B. den Google OR Tools (Google Developers, 2022).

Rasku et al. (2019) stellen dem Anwender mit VeRyPy eine Auswahl an über 15 einfachen, klassischen Heuristiken zur schnellen Lösung von Optimierungsproblemen zur Verfügung. Alle Heuristiken werden innerhalb des Projektes zitiert und wurden laut Entwickler mit über 454 bekannten Benchmark-Indizes für VRPs mit symmetrischen Distanzmatrizen getestet (Rasku et al., 2019).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit asymmetrischen, realen Distanzmatrizen gearbeitet. Unter anderem sollen die bestehenden Matrizen nach Möglichkeit auch für VeRyPy genutzt werden. Daher wird die ausgewählte VeRyPy-Heuristik zuerst validiert und anschließend für die Szenarioanalyse genutzt.

5.5.1 Lösung des angepassten Basisszenarios für das Fallbeispiel zur kooperativen Tourenplanung mit VeRyPy und Validierung der Heuristik

Der erste Punkt der Modell-Anpassungen aus Abschnitt 5.4.2.3, die Aktualisierung der Fahrzeugkostensätze, ist erst für die ökonomische und ökologische Auswertung in Kapitel 6 relevant. Die anderen beiden Punkte zwei und drei werden hingegen in die Modellierung der Einsammlungs- und Auslieferungstouren eingearbeitet. Die Punkte umfassen:

³ Python-Bibliotheken zur Erzeugung zufälliger Knoten und Mengen: shapely.geometry – Point, Polygon; random; requests; geog.

- die Reduzierung der Fahrzeugflotte auf einen Fahrzeugtypen: Van mit 54 Kisten Kapazität und
- die Änderung der Zielfunktion: Minimierung der Fahrzeit.

Im Folgenden wird vom **angepassten Basisszenario** gesprochen.

Zur Auswahl und Validierung einer passenden VeRyPy-Heuristik wird die Berechnung des Fallbeispiels für die Einsammlung der Frischeprodukte sowie die Auslieferung der Produkte an die Märkte im angepassten Basisszenario mit dem Optimierungsmodell in Gurobi wiederholt. Anschließend wird die Tourenplanung für dieselben Parameter mittels VeRyPy durchgeführt.

Innerhalb von VeRyPy wurden im ersten Schritt verschiedene Heuristiken der Bibliothek zur Lösung von VRPs ausprobiert. Mit dem Cawlip-Savings-Algorithmus von Robbins & Turner (1979) konnten die besten Lösungen (kürzeste Gesamt-Auslieferungszeit) für das Fallbeispiel generiert werden. Bei dem Cawlip-Algorithmus handelt es sich um eine Erweiterung des Savings-Algorithmus in Verbindung mit dem 2-Opt-Verfahren (siehe Näheres in Abschnitt 4.3.2).

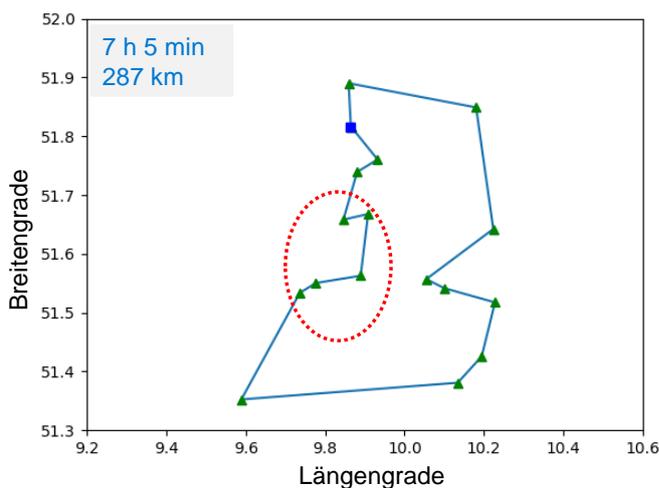


Abbildung 5-25: Einsammlungstour Frischeprodukte - VeRyPy

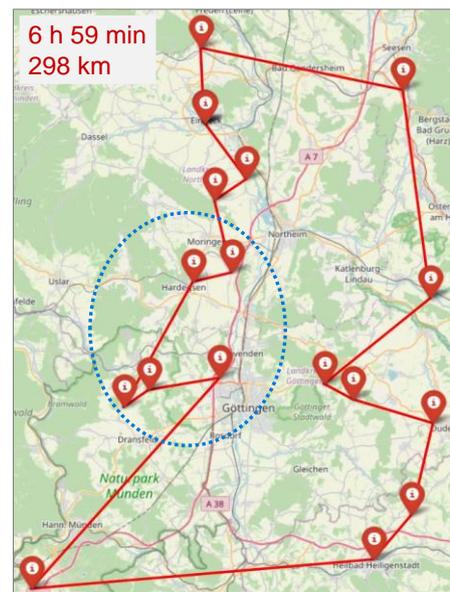


Abbildung 5-26: Einsammlungstour Frischeprodukte - Gurobi

In Abbildung 5-25 und Abbildung 5-26 sind die Einsammlungstouren für die Frischeprodukte des angepassten Basisszenarios mit VeRyPy und Gurobi abgebildet. Bislang wurden die Touren dieser Arbeit mit Folium visualisiert. Zur Visualisierung der VeRyPy-Ergebnisse wurde sich im Rahmen dieser Arbeit für den vereinfachten Modellierungsansatz mit der Python Bibliothek Matplotlib entschieden, da dies eine weniger aufwendige Aufbereitung der Ergebnisse erforderte (Python Software Foundation, 2016).

Es ist ersichtlich, dass der Cawlip-Algorithmus von VeRyPy eine kürzere Route als der Gurobi-Algorithmus findet. Der Cawlip-Algorithmus verändert die Reihenfolge der fünf markierten Knoten auf der linken Tourenhälfte gegenüber Gurobi. Der Gurobi-Algorithmus erfüllt allerdings das Optimierungsziel, die zeitminimale Routenkonstellation auszuwählen, besser als der

Cawlip-Algorithmus. Obwohl die Gurobi Route länger als die Cawlip-Route ist, können durch die Gurobi Optimierung 6 min Zeit eingespart werden. Bezieht man die Ergebnisse der ersten Optimierung des Basisszenarios ohne Anpassung (Abschnitt 5.4.2.2) mit in die Bewertung ein, zeigt sich, dass selbst mit geändertem Optimierungsziel keine gravierenden Unterschiede der VeRyPy-Lösung gegenüber Gurobi erkennbar sind.

In Abbildung 5-27 und Abbildung 5-28 werden die Auslieferungstouren jeweils nach der Lösung mit dem Cawlip-Algorithmus in VeRyPy und der Gurobi-Optimierung dargestellt. Hier kommen beide Algorithmen sogar zu exakt demselben Ergebnis. Im Vergleich zur ersten Optimierung (Abschnitt 5.4.2.2) muss bedacht werden, dass der heterogene Fuhrpark in einen homogenen Fuhrpark mit ausschließlich kleineren Fahrzeugen von 3,5 t geändert wurde. Dadurch kann die Belieferung der Märkte mit allen Produkten nicht mehr in einer Route vorgenommen werden und ist automatisch länger und zeitaufwendiger als die kostenminimale Tour im Basisszenario. Dieser Aspekt wurde aber bereits in Abschnitt 5.4.2.2 diskutiert.

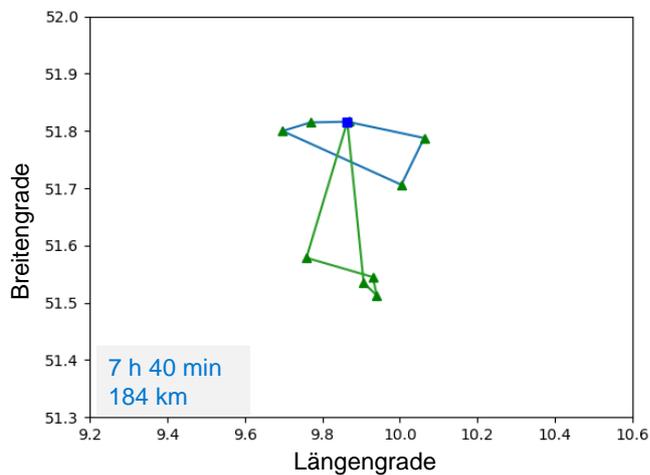


Abbildung 5-27: Auslieferungstouren alle Produkte - VeRyPy

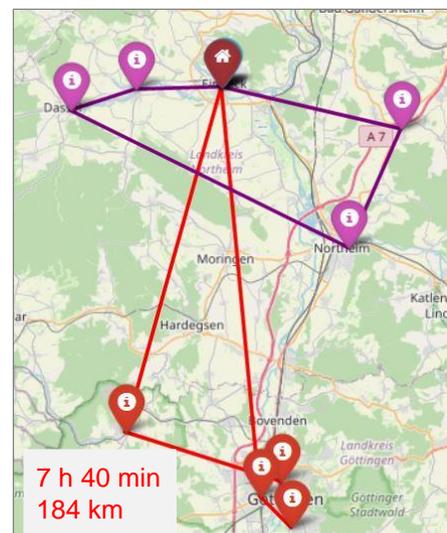


Abbildung 5-28: Auslieferungstouren alle Produkte - Gurobi

Insgesamt lässt sich sagen, dass der Cawlip-Algorithmus von VeRyPy ausreichend gute Ergebnisse liefert, um den Forschungsfragen dieser Arbeit nachzugehen. Daher gilt die Implementierung des Cawlip-Algorithmus von VeRyPy als geeignet für die Szenarioanalyse dieser Arbeit und wird im Folgenden weiterverwendet.

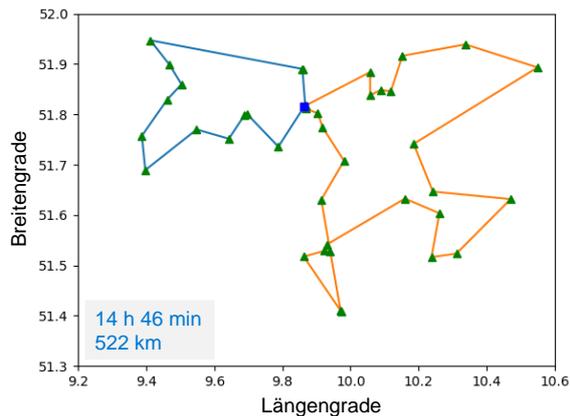


Abbildung 5-29: Einsammlungstouren haltbare Produkte - VeRyPy

Ferner wurden die Modellanpassungen auch für die Einsammlungstouren der haltbaren Produkte vorgenommen und mit dem Cawlip-Algorithmus in VeRyPy gelöst. Auf eine Gegenüberstellung der VeRyPy- mit der Gurobi-Lösung im angepassten Basisszenario wird verzichtet. Da sich das Modell mit Gurobi nicht optimal lösen lässt, hat ein Vergleich der Ergebnisse wenig Aussagekraft. Für die Einsammlungstouren im angepassten Basisszenario ergibt sich eine Gesamttourenlänge von 522 km bei einer Gesamtzeit von 14 h 46 min (siehe Abbildung 5-29).

5.5.2 Erstellung der Szenarien

Um sinnvolle Szenarien erstellen zu können, stellt sich zunächst die Frage, in welchen Parametern die größten Unsicherheiten liegen. Das übergeordnete Ziel dieser Dissertation ist, den Regionalvermarktungsinitiativen eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die geeignetste Auslieferungsstrategie zu geben. Regionalvermarktungsinitiativen unterscheiden sich in der Größe und räumlichen Struktur. Sowohl die Größe (Anzahl an Erzeuger und Märkte) als auch die räumliche Struktur (Verteilung der Erzeuger über das Einzugsgebiet der Initiative) bilden die Grundlage der Tourenplanung. Daher liegt ein besonderer Fokus auf der Variation der Zeit- und Distanzmatrizen durch die Generierung zufälliger Knoten.

Auch hier werden die Distanzmatrizen mithilfe des Openroute Service (Heidelberg Institut für Geoinformationstechnologie, 2020) erzeugt. Openroute Service stellt dem Anwender eine Web API (Application Programming Interface) zur Verfügung. Mit dieser Web-API ist die Größe zu generierender Matrizen auf maximal 3.500 Orte bzw. maximal 59 x 59 Knoten begrenzt. Um größere Distanz- und Zeitmatrizen, wie hier benötigt, erzeugen zu können, muss die Openroute Service-Anwendung lokal auf einem eigenen Rechner installiert werden. Des Weiteren wird eine Landkarte zur Erzeugung der Matrizen benötigt. Die Rechenzeit steigt mit zunehmender Kartengröße. Je größer die Karte, desto größer sollten der Prozessor und der Arbeitsspeicher des Rechners sein. Um flexibel, große Matrizen generieren zu können, werden alle Szenarien mithilfe der Karte Niedersachsens (Deutschland) erstellt. Als Depotstandort wird die Stadt Hannover gewählt, da auf diese Weise alle Knoten innerhalb des gewählten Radius in einem Bundeslandes liegen und nur eine Karte benötigt wird.

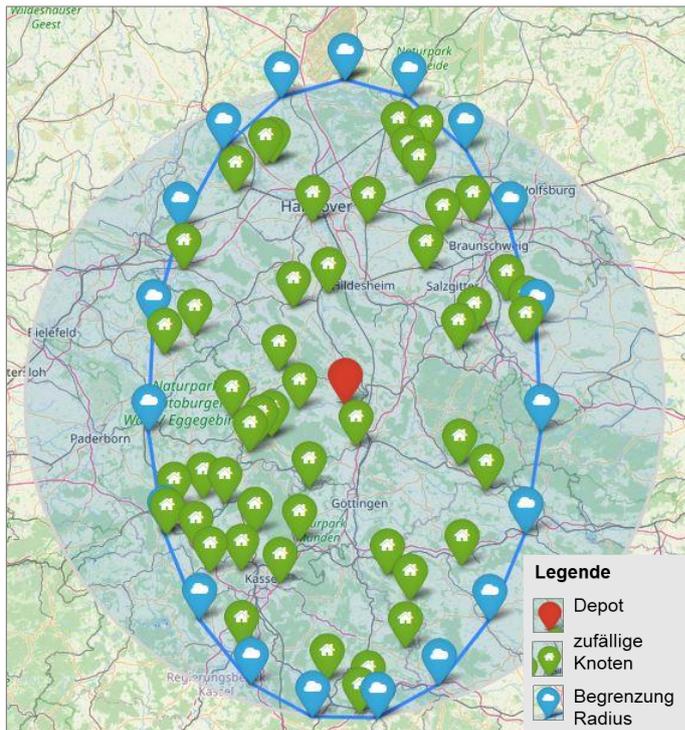


Abbildung 5-30: Zufällig erzeugte Knoten im 100 km Radius um das Depot

Die Knoten werden innerhalb eines **Radius von 100 km um das Depot** zufällig mit den Python Bibliotheken „random“ und „shapely.geometry“ erzeugt (Python Software Foundation, 2016). 100 km wurden entsprechend der Erkenntnisse aus Kapitel 2.1 als passender Radius identifiziert. Abbildung 5-30 zeigt ein Beispiel für 50 zufällig erzeugte Knoten (grüne Marker) um ein Depot (roter Marker). Der hellblaue Kreis zeigt den 100 km Radius ohne Einbezug der Erdkrümmung. Die blauen Marker begrenzen den 100 km Radius unter Einbezug der Erdkrümmung. Die zufälligen Knoten wurden entsprechend der Grenzen der blauen Marker unter Einbezug der Erdkrümmung erzeugt.

Mit dem gerade beschriebenen Vorgehen werden Luftliniendistanzen zur Generierung der Knoten berücksichtigt. Erzeugt man innerhalb des vorgegebenen Radius um das Depot Matrizen in einem reellen Straßennetz, können die Entfernungen größer als die definierten 100 km ausfallen. Daher werden größere Matrizen erzeugt, als benötigt werden, und Knoten mit zu großer Entfernung zum Depot entfernt.

Zur Auswahl geeigneter Knotenmengen wurde das Netzwerk deutscher Regionalvermarktungsinitiativen (Bundesverband Regionalbewegung, 2022) hinsichtlich der Mitgliederanzahl untersucht. Dabei wurden nur Initiativen mit einem Fokus auf der Vernetzung von Lebensmittelherzeugern und Betrieben zur Weiterverarbeitung von Lebensmitteln einbezogen.

Aus Abbildung 5-31 geht hervor, dass die meisten deutschen Regionalvermarktungsinitiativen über maximal 50 Mitglieder verfügen. Insgesamt wurden 30 Initiativen betrachtet (Bundesverband Regionalbewegung, 2022). Von diesen 30 Initiativen verfügen zehn über 50 – 100 Mitglieder und lediglich fünf über mehr als 100 Mitglieder.

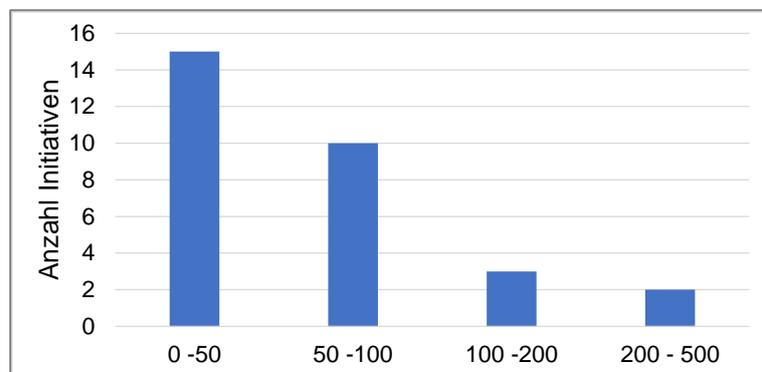


Abbildung 5-31: Anzahl Regionalvermarktungsinitiativen nach Mitgliedergröße in Deutschland

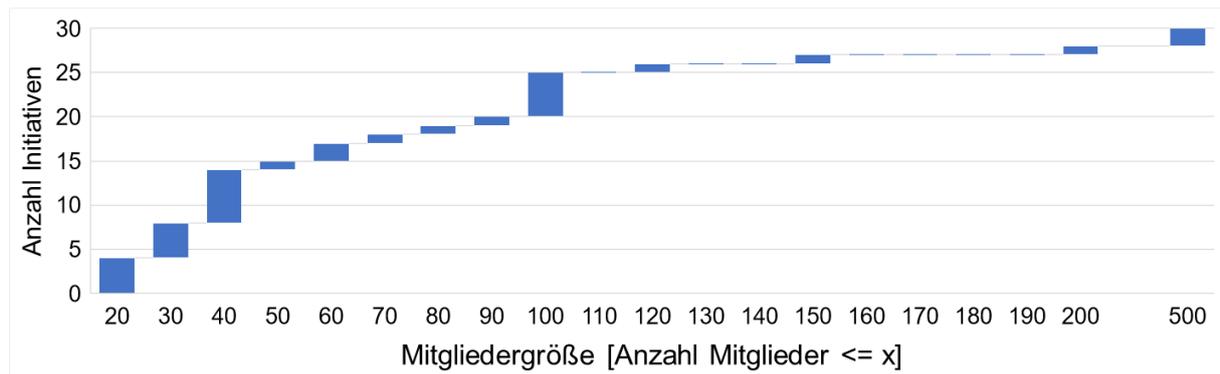


Abbildung 5-32: Verteilung von Regionalvermarktungsinitiativen auf Mitgliedergrößen

In Abbildung 5-32 ist die Verteilung der Regionalvermarktungsinitiativen auf Mitgliedergrößen detaillierter als in Abbildung 5-31 dargestellt. Der Verlauf der dargestellten Kurve ist progressiv: Es gibt 4 Initiativen mit ≤ 20 Mitgliedern und 8 mit ≤ 30 , wohingegen nur eine Initiative zwischen 70 und 80 bzw. 80 und 90 Mitgliedern hat. Während die kleineren Initiativen stark gebündelt sind, sind die größeren Initiativen deutlich breiter gestreut bzw. mit zunehmender Größe weniger vorhanden. Die größte in Deutschland verzeichnete Initiative hat über 500 und die Zweitgrößte 300 Mitglieder. Es gibt jedoch keine Initiative mit einer Mitgliedergröße zwischen 150 und 190 Mitgliedern. Insgesamt gibt es, wie bereits in Abbildung 5-31 dargestellt, wenige Initiativen mit mehr als 100 Mitgliedern. Folgend dieser Mitgliederanalyse wurde die Knotenanzahl für die Szenarien entsprechend den Größen von Regionalvermarktungsinitiativen festgelegt: **50, 100 und 200 Erzeuger**.

Zuerst wurden 200 ungefähr gleichmäßig im Gebiet verteilte Knoten erzeugt. Die finalen Distanz- und Zeitmatrizen für diese fiktiven Erzeugerknoten wurde anschließend verkleinert, sodass sich aus derselben Knotenmenge kleinere fiktive Initiativen mit 100 bzw. 50 Mitgliedern ergaben.

Die meisten Initiativen haben rund 50 Mitglieder. Daher wird der Fokus der Szenarioanalyse auf diesen kleinen Initiativen liegen und neben der gleichmäßigen Verteilung der Erzeuger um das Depot - eine dichte, depotnahe Verteilung betrachtet. Die definierten Verteilungen sind in Abbildung 5-33 dargestellt. Die unterste Entfernungsgrenze von 30 km entspricht der durchschnittlichen Entfernung der beispielhaften Initiative aus dem Basisszenario (siehe Abschnitt 5.4). Für die große Initiative von 200 Mitgliedern wurde die Grenze auf 45 km erweitert. Die Anpassung der Entfernungsabstufungen wurde vorgenommen, da angenommen wird, dass mit steigender Anzahl an Mitgliedern auch die durchschnittliche Entfernung der Mitglieder zum Depot steigt.

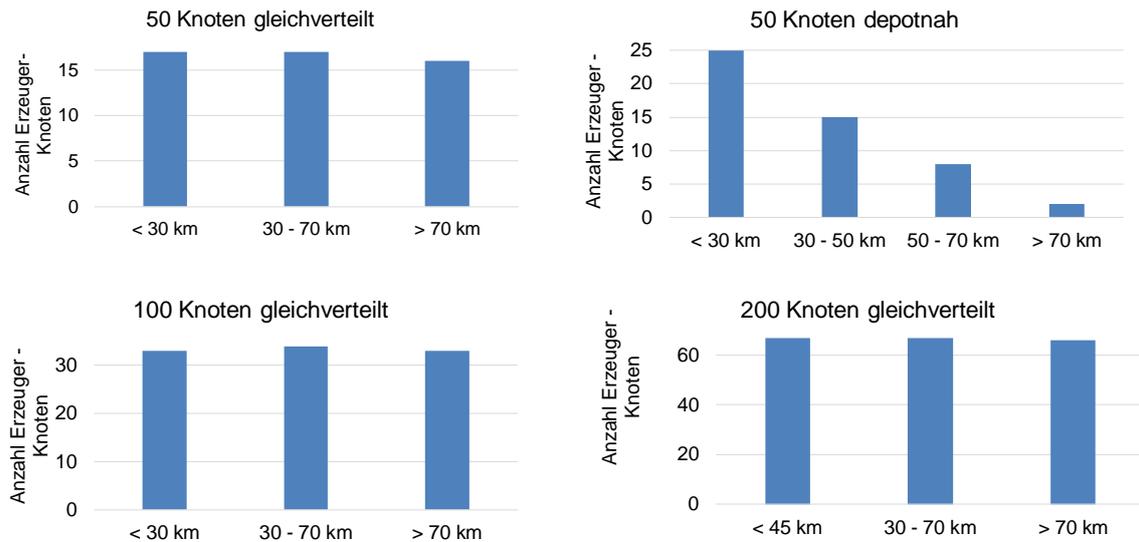


Abbildung 5-33: Verteilung der Erzeuger-Knoten für alle Szenarien

Die Anzahl von **neun zu beliefernden Märkten** wird gegenüber dem Basisszenario beibehalten. Es handelt sich um kleine Erzeuger mit geringen Produktionsmengen. Selbst wenn die Anzahl zu bedienender Märkte einer Initiative wachsen sollte, können aufgrund der geringen Produktionsmengen möglicherweise gar nicht alle Märkte von allen Erzeugern bedient werden.

Die Zwischenergebnisse aus Abschnitt 5.4.2.2 weisen darauf hin, dass die Fahrzeiten zwischen den Erzeugern einen stärkeren Einfluss auf die Tourenplanungsergebnisse haben als die Abholmengen. Insbesondere Frischeprodukte unterliegen jedoch saisonalen Schwankungen, die je nach Produkt größer oder kleiner sein können (Beispiel: Äpfel als Lagerobst vs. Erdbeeren). Daher sollen die Transportmengen ebenfalls mittels Zufallszahlen variiert werden.

Die **Transportmengen** werden in die Kategorien: **gering und mittel** (zur Abbildung einer Hochsaison) eingeteilt (siehe Tabelle 5-10). Im Basisszenario wurde mit einer durchschnittlichen Anzahl von 2 Kisten pro Erzeuger kalkuliert. Diese Menge ergab sich aus den Erkenntnissen eines Interviews (Mitarbeiterin für Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit, 2018). Da es sich bei den Basisannahmen bereits um eine sehr geringe Transportmenge handelt, kann eine Variation nur nach oben erfolgen. Diese wird aufgrund saisonaler Schwankungen als sinnvoll erachtet.

gering	mittel
1 - 5 Kisten	5 – 10 Kisten

Tabelle 5-10: Variation der durchschnittlichen Transportmengen je Knoten

Insgesamt ergeben sich **acht Szenarien für die kooperative Tourenplanung**: drei verschiedene Initiativen-Größen zzgl. der zweiten Verteilung bei 50 Erzeugern (4 Varianten) für je zwei Transportmengen. Als Referenzwert zum Vergleich dieser acht Szenarien dient die **Durchführung eigener Rundtouren** seitens der Erzeuger.

Die eingangs dieser Arbeit diskutierte Streckenbelieferung hat sich bereits im Basisszenario eindeutig als nachteilig für die Erzeuger herausgestellt, weshalb von dieser

Auslieferungsstrategie klar abgeraten werden kann (siehe Abschnitt 5.4.1). Demnach wird diese Strategie in der Szenarioanalyse nicht weiter betrachtet. Dennoch werden drei Strategien nach dem folgenden Konzept in der Szenarioanalyse untersucht:

- Kooperative Tourenplanung aller Erzeuger für je 4 Varianten und zwei Transportmengen
 1. Kooperative Tourenplanung mit Einstellung eines Fahrers
 2. Kooperative Tourenplanung ohne Einstellung eines Fahrers
- Referenztouren: Eigene Auslieferung seitens der Erzeuger für vier Varianten
 3. Eigene Rundtouren

Die kooperative Tourenplanung und die Referenztouren wurden in den vorherigen Abschnitten von Abschnitt 5.4 bereits eingehend hergeleitet. Lediglich die Unterscheidung der kooperativen Tourenplanung zwischen der Einstellung eines Fahrers oder ohne Einstellung eines Fahrers ist neu und unterscheidet sich darin, ob Personalkosten anfallen oder nicht. Wird kein Fahrer eingestellt, müssten die Erzeuger abwechselnd die Auslieferung der Produkte übernehmen. Alle anderen Annahmen bleiben bestehen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, das Transportfahrzeug unter den Erzeugern weiterzugeben. Beispielsweise könnten die Erzeuger vor Tourenantritt jedes Mal zum Depot fahren und das Fahrzeug dort abholen. Eine andere Option wäre, dass immer der letzte Erzeuger das Fahrzeug mit nach Hause nimmt und der am nächsten gelegene Erzeuger die nachfolgende Tour übernimmt. Da es nicht möglich ist, alle Optionen im Modell abzubilden, wird die genaue Organisation der **kooperativen Tourenplanung ohne Fahrer lediglich in der ökonomischen Analyse** in Abschnitt 6.1 berücksichtigt sowie in Abschnitt 6.2 diskutiert. Die Tourenplanung (inkl. der Berechnung von Fahrzeiten und zurückgelegten Distanzen) ist identisch zur kooperativen Tourenplanung mit Einstellung eines Fahrers.

Weiterhin muss bedacht werden, dass die Fahrzeugflotte für die kooperative Tourenplanung im angepassten Basisszenario auf einen passenden Fahrzeugtypen reduziert wurde. Innerhalb der Szenarioanalyse gilt es zu prüfen, ob dieser Fahrzeugtyp robust gegenüber Veränderungen der Strategie ist. Bei der eigenen Auslieferung seitens der Erzeuger (Referenztouren) wird auf eine Differenzierung der Transportmengen verzichtet. Es wird davon ausgegangen, dass die Erzeuger über ein ausreichend großes Fahrzeug verfügen, um eine Rundtour mit ihrer eigenen Ware bewältigen zu können, während die anzuschaffende Fahrzeuggröße im Falle einer kooperativen Tourenplanung noch weiter diskutiert werden muss.

Die Szenarien werden zunächst hinsichtlich einer möglichen Strecken- und Zeitersparnis verglichen. Darüber hinaus sollen die Tourenanzahl und die ggf. benötigte Anzahl an Fahrern zur Durchführung der kooperativen Tourenplanung analysiert werden.

5.5.3 Ergebnisse der Szenarioanalyse

Die Ergebnisse der Szenarioanalyse zeigen bei einem Wechsel von der Auslieferung eigener Rundtouren zur kooperativen Tourenplanung - unabhängig der Größe der Initiativen - eine

deutliche Ersparnis von rund 90 % sowohl in der kumulierten Fahrzeit als auch in den kumulierten Distanzen. In Abbildung 5-34 und Abbildung 5-35 werden die Ergebnisse der acht Szenarien für die kooperative Tourenplanung (grün) dem Referenzwert (grau) gegenübergestellt. Alle Ergebnisse dieses Kapitels beziehen sich auf die **einmalige Abholung und Auslieferung** der gesamten Ware aller Erzeuger. Im eingangs berechneten Basismodell konnten die kumulierten Transport-Aufwendungen in ähnlichem Umfang bei einem Wechsel der Auslieferungsstrategie reduziert werden. Daher bestätigt die Szenarioanalyse die bislang gewonnenen Erkenntnisse.

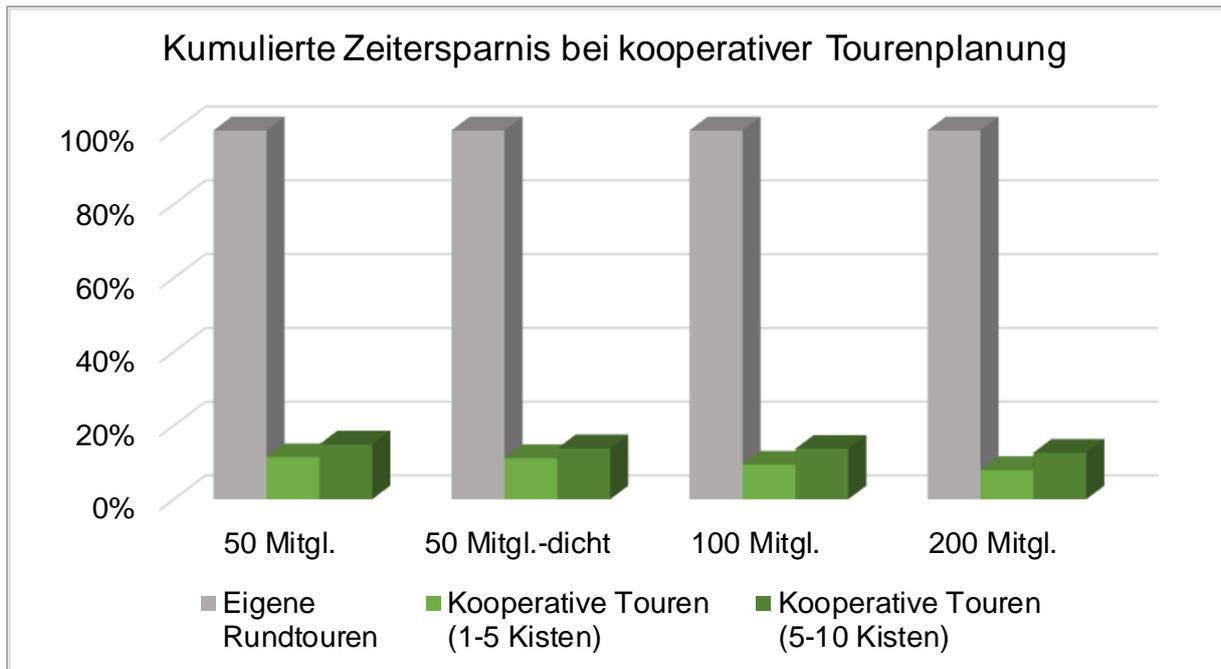


Abbildung 5-34: Ergebnisse der Szenarioanalyse hinsichtlich der Fahrzeiten

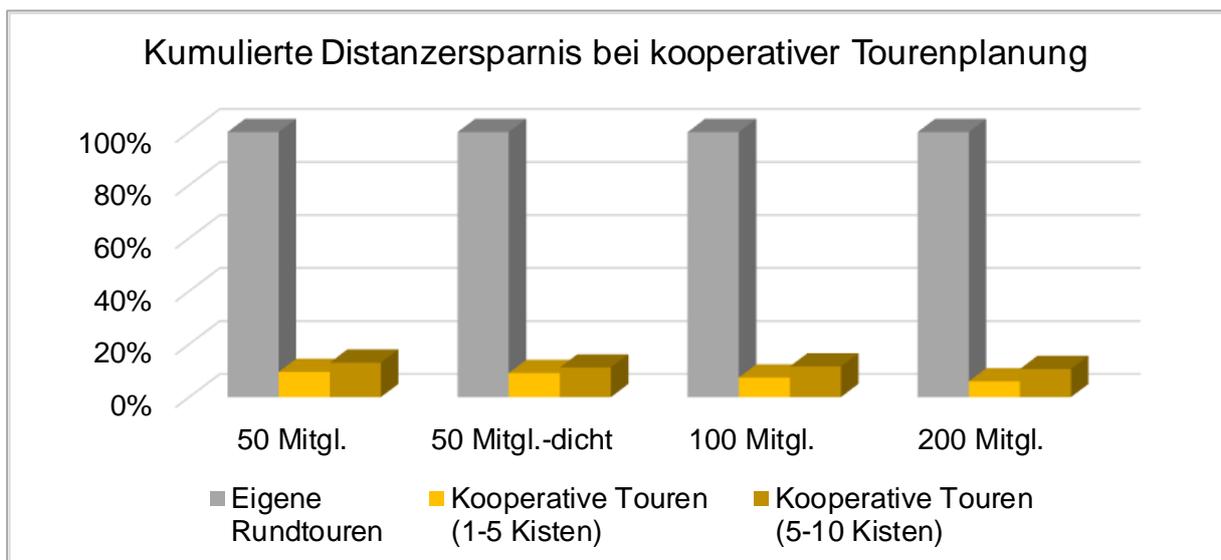


Abbildung 5-35: Ergebnisse der Szenarioanalyse hinsichtlich der zurückgelegten Distanzen

Es gilt zu bedenken, dass dieser Analyse die angepassten Annahmen, welche in Abschnitt 5.4.2.3 getroffen wurden, zugrunde liegen. Demzufolge wurden Touren mit einem

3,5 t Van gebildet. Die Zielfunktion umfasst die **Minimierung der Fahrzeit**. Alle weiteren Annahmen wurden im vorangegangenen Abschnitt 5.5.2 erläutert.

Nachfolgend wird ein Überblick über die Charakteristika der Tourenplanungsergebnisse bei kooperativer Tourenplanung gegeben. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse kann Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12 entnommen werden. Bei dem Referenzwert wird keine Unterscheidung der Auslieferungsmenge getroffen, da die Ware direkt von den Erzeugern in einer Rundtour zu den Märkten gebracht wird. Außerdem wird in diesem Fall davon ausgegangen, dass die Erzeuger über ein ausreichend großes Fahrzeug zur Tourenbewältigung verfügen. Demnach ist es nicht notwendig neben den oben dargestellten Strecken- und Zeitersparnissen (Abbildung 5-34 und Abbildung 5-35) weitere Charakteristika der Tourenplanung zu analysieren.

Tabelle 5-11: Überblick über die Charakteristika der Tourenplanungsergebnisse bei geringen Transportmengen von 1-5 Kisten je Erzeuger

Charakteristika	Kooperative Tourenplanung			
	50 Mitgl. dicht	50 Mitgl.	100 Mitgl.	200 Mitgl.
Anzahl Einsammlungstouren	3	3	6	10
Ø Dauer Einsammlungstour	8 h	9 h	7 h 45 min	8 h
Anzahl Auslieferungstouren	5	5	9	14
Ø Dauer Auslieferungstour	2 h	2 h	1 h 45 min	4 h
Anzahl Arbeitstage für alle Touren	4,3 Tage	5,6 Tage	8 Tage	17 Tage
Benötigte Anzahl an Fahrzeugen und Fahrern im Ein-Schicht-Betrieb	1 Fahrzeug 1-2 Fahrer	1 Fahrzeug 1-2 Fahrer	2 Fahrzeuge 2 Fahrer	4 Fahrzeuge 4 Fahrer
Benötigte Anzahl an Fahrzeugen und Fahrern im Zwei-Schicht-Betrieb	unnötig	unnötig	1 Fahrzeug 2 Fahrer	2 Fahrzeuge 4 Fahrer
Begrenzender Faktor	Fahrzeit	Fahrzeit	Fahrzeit	Fahrzeit
Eignung des Vans	ja	ja	ja	ja

Tabelle 5-12: Überblick über die Charakteristika der Tourenplanungsergebnisse bei mittleren Transportmengen von 5-10 Kisten je Erzeuger

Charakteristika	Kooperative Tourenplanung			
	50 Mitgl. dicht	50 Mitgl.	100 Mitgl.	200 Mitgl.
Anzahl Einsammlungstouren	7	7	14	27
Ø Dauer Einsammlungstour	4 h	5 h	4 h 15 min	4 h 15 min
Anzahl Auslieferungstouren	9	9	18	30
Ø Dauer Auslieferungstour	1 h 45 min	1 h 45 min	3 h 45 min	8 h 15 min
Anzahl Arbeitstage für alle Touren	5,5 Tage	6,5 Tage	16 Tage	45 Tage
Benötigte Anzahl an Fahrzeugen und Fahrern im Ein-Schicht-Betrieb	1-2 Fahrzeuge 2 Fahrer	1-2 Fahrzeuge 2 Fahrer	4 Fahrzeuge 4 Fahrer	<= 10 Fahrzeuge 10 Fahrer (inkl. Lagerpersonal)
Benötigte Anzahl an Fahrzeugen und Fahrern im Zwei-Schicht-Betrieb	unnötig	unnötig	2 Fahrzeuge 4 Fahrer	<= 5 Fahrzeuge 10 Fahrer (inkl. Lagerpersonal)
Begrenzender Faktor	Kapazität	Kapazität	Kapazität	Kapazität/Zeit
Eignung des Vans	ja	ja	nein	nein

Variante 1 und 2:

Ergebnisse der kooperativen Tourenplanung bei kleinen Initiativen mit 50 Erzeugern

Zur Analyse der kleinen Initiativen werden *zwei Verteilungen* der Erzeuger um das Depot betrachtet: Bei der *ersten Verteilung* liegen die meisten Erzeuger nah bzw. dicht um das Depot verteilt (siehe Abbildung 5-33). Die durchschnittliche Entfernung zum Depot beträgt rund 33 km. Bei der *zweiten Verteilung* hingegen sind die Erzeuger gleichmäßig im betrachteten Gebiet verteilt. Hier ist die durchschnittliche Entfernung der Erzeuger zum Depot mit rund 50 km etwas größer als bei der ersten Verteilung.

Müssen nur *geringe Mengen von 1-5 Kisten* je Erzeuger eingesammelt werden, kann die Ware aller Erzeuger bei beiden Verteilungen in drei Touren mit einer Fahrzeit von 8 (dicht) bzw. 9 h je Tour abgeholt werden. Je weiter die Erzeuger im Durchschnitt auseinander liegen, desto stärker beeinflusst die Zeitrestriktion die Tourenplanung. Drei Arbeitstage reichen gerade so aus, um alle Produkte einzusammeln. Für die einmalige Auslieferung der gesamten Ware würden hingegen 5 Touren, aber nur eine Fahrzeit von ca. 2 h je Tour benötigt werden. Daher beträgt die Gesamtfahrzeit der Auslieferungstouren nur ca. 10 h und könnte an zwei halben Arbeitstagen durchgeführt werden. Der Zeitaufwand der Auslieferung wäre demzufolge deutlich kürzer als der Aufwand der Waren-Einsammlung.

Das Fahrzeug ist mit 72 % bei den Auslieferungstouren und über 90 % bei den Einsammlungstouren gut ausgelastet. Insgesamt ist die Fahrzeuggröße mit einem 3,5 t Van ideal für diese Variante. Alle Touren könnten mit einem Fahrzeug innerhalb einer Woche gefahren werden.

Somit würde theoretisch auch die Einstellung eines Fahrers genügen. Beachtet man, Urlaubstage und Krankheitsbedingte Ausfälle, sollten besser zwei Fahrer in Teilzeit eingestellt werden. Diese könnten ggf. zusätzlich zu den Touren Lagerarbeiten übernehmen und bei Bedarf Vollzeit arbeiten.

Sollen hingegen *mittlere Mengen von 5-10 Kisten* je Erzeuger transportiert werden, ist - im Vergleich zu oben (geringe Mengen von 1-5 Kisten) - weniger die Fahrzeit zwischen den Erzeugern als die Kapazität des Fahrzeugs der begrenzende Faktor für den Umfang der Touren. Der Van kann nur 6-8 Erzeuger pro Tour anfahren. Dies führt dazu, dass bei gleichmäßig im Gebiet verteilten Erzeugern sieben Einsammlungstouren mit einer durchschnittlichen Länge von knapp 5 h gefahren werden müssen. Für die Auslieferung muss jeder der neun Märkte einzeln angefahren werden, wobei die durchschnittliche Tourenlänge nur ca. 1 $\frac{3}{4}$ h beträgt.

Auch hier kann die gesamte Transportleistung mit dem Van bewältigt werden. Bei mittleren Mengen und einer kleinen Erzeugerzahl von 50 Mitgliedern reichen ebenfalls zwei Fahrer und ein Fahrzeug für die Abwicklung der Tourenplanung aus. Die durchschnittliche Auslastung des Fahrzeugs kann auf gut 80 % bei den Auslieferungstouren gesteigert werden.

Insgesamt ist bei beiden Verteilungen noch etwas freie Kapazität, um wenige weitere Erzeuger aufzunehmen. Der Fokus sollte unter Berücksichtigung der Zeitrestriktion auf dicht am Depot liegende Erzeuger oder solche, die keine Umwege zu den bestehenden Erzeugern erfordern, liegen.

Variante 3:

Ergebnisse der kooperativen Tourenplanung bei mittlerer Initiativen-Größe mit 100 Erzeugern

Bei den größeren Initiativen wird nur eine gleichmäßige Verteilung der Erzeuger im Gebiet betrachtet. Aufgrund eines fortschreitenden Rückgangs landwirtschaftlicher Betriebe (Statistisches Bundesamt, 2021) ist davon auszugehen, dass eine dichte Verteilung um ein Depot bei wachsender Mitgliederzahl immer unwahrscheinlicher wird. In dieser Variante beträgt die durchschnittliche Entfernung der Erzeuger zum Depot rund 52 km.

Wie oben erläutert, wird auch hier eine Unterscheidung in geringe und mittlere Mengen vorgenommen. Bei *geringen Mengen von 1-5 Kisten* kann die Ware in 6 Touren mit einer durchschnittlichen Fahrdauer von 7 h 45 min abgeholt werden. Die Auslieferung dauert mit dem 3,5 t Van ca. 1 h 45 min und erfolgt in 9 Touren. Die Fahrzeugauslastung je Tour unterscheidet sich kaum von der Auslastung mit nur 50 Mitgliedern. Begrenzender Faktor der Tourenplanung ist hier wieder die Zeit bei den Einsammlungstouren. Die Einsammelungszeit der Ware entspricht fast der maximal rechtlich erlaubten Fahrzeit pro Arbeitstag und Fahrer, sodass die Fahrzeuggröße weiterhin angemessen ist. Im Vergleich zu der kleineren Initiative mit 50 Erzeugern sind hier bessere Tourenkombinationen möglich, sodass die **Fahrzeit bei gleichmäßiger Erzeugerverteilung um über eine Stunde gegenüber dem oben beschriebenen Fall mit weniger Erzeugern bei ebenfalls gleichmäßiger Erzeugerverteilung reduziert** werden kann. Allerdings ist zu beachten, dass in diesem Szenario mit 100 Erzeugern **ggf. zwei Fahrzeuge und mit Sicherheit zwei Fahrer** für die Einsammlungstouren benötigt werden. Andernfalls kann eine 5-Tage Arbeits-Woche nicht gewährleistet werden. Mit einem Fahrzeug ist die

Wareneinsammlung nur möglich, wenn die Abholzeiten so flexibel sind, dass an einem Wochentag zwei Touren gefahren werden oder an einem Wochenendtag gearbeitet wird. Bei zwei Touren an einem Tag muss ein Fahrer besonders früh starten und der Zweite an demselben Tag seine Tour spät starten und spät beenden.

Werden hingegen *mittlere Mengen von 5-10 Kisten* je Erzeuger abgeholt, reicht ein Fahrzeug bei weitem nicht aus. Allein für die Einsammlung der Ware aller Erzeuger müssen 14 Touren mit je ca. 4 h 15 min gefahren werden. Die Auslieferung der Ware ist noch aufwändiger. Jeder Markt müsste zweimal angefahren werden. Hier ist, im Gegensatz zu den oben beschriebenen Erkenntnissen, nicht die Zeit, sondern die Fahrzeuggröße die begrenzende Restriktion. Bei größeren Initiativen mit rund 100 Erzeugern, einem Depot und mittleren Transportmengen von 5-10 Kisten je Erzeuger sollte demzufolge auf ein größeres Fahrzeug als ein 3,5 t Van zurückgegriffen werden. Eine Alternative wäre, das Gebiet in zwei kleinere Teilgebiete zu clustern, zwei Depot einzurichten und zwei Fahrzeuge anzuschaffen. Diese Option wird in Kapitel 6.3 noch einmal aufgegriffen und diskutiert.

Variante 4:

Ergebnisse der kooperativen Tourenplanung bei großen Initiativen mit 200 Erzeugern

Auch bei den großen Initiativen mit 200 Erzeuger-Mitgliedern wird nur die gleichmäßige Verteilung der Erzeuger im Gebiet betrachtet. Bei den zufällig erzeugten Distanzen beträgt die durchschnittliche Entfernung rund 57 km von den Erzeugern zum Depot.

In dieser Variante wird schnell deutlich, dass die Touren nur mit mehreren Fahrzeugen und mehreren Fahrern zu bewältigen sind. Es müssen schon bei *geringen Mengen von 1-5 Kisten* je Erzeuger 10 Einsammlungstouren mit einer durchschnittlichen Dauer von rund 8 h gefahren werden. Aufgrund des größeren Gebietes nimmt die zu fahrende Strecke zu, sodass die Fahrzeit noch stärker zum begrenzenden Faktor wird als in den zuvor analysierten Szenarien. Das Fahrzeug kann allerdings noch immer gut ausgelastet werden. Aufgrund der hohen Erzeugerzahl können viele Erzeuger mit weniger Abholmengen in einer Tour und wenig Erzeuger mit mehr Kisten in einer anderen Tour gebündelt werden. Die Auslieferung verteilt sich auf 14 Touren mit je ca. 4 h Fahrzeit. Folglich würden manche Märkte doppelt angefahren werden, andere nicht. Ob dies immer in der Realität umsetzbar ist oder bei schwankenden Mengen ggf. sogar alle Märkte doppelt angefahren werden müssen, ist unklar. Insgesamt erstreckt sich die Einsammlung- und Auslieferung der Ware im vorliegenden Szenario auf mindestens 24 Touren für, deren Bewältigung mindestens 17 volle Arbeitstage benötigt werden. **Es ist ersichtlich, dass selbst bei geringen Mengen mindestens vier Fahrer eingestellt werden müssen. Diese können entweder in zwei Schichten pro Tag arbeiten oder es werden ebenfalls vier Fahrzeuge angeschafft. Alternativ kann im Zweischichtsystem ein größeres Fahrzeug die Auslieferung an die Märkte übernehmen. So muss jeder Markt nur einmal angefahren werden, was den Zeitaufwand für die Auslieferung von sieben auf einen Tag verkürzen würde.**

Bei mittleren Mengen von 5-10 Kisten je Erzeuger müssen in jedem Fall für die Einsammlungs- und die Auslieferungstouren größere Fahrzeuge angeschafft werden. Die Länge der Einsammlungstouren halbiert sich auf ca. 4 h, wobei sich die Anzahl der Touren auf

27 erhöht. Die gerade beschriebenen Probleme, welche bei den Auslieferungstouren mit geringen Mengen, aufgetreten sind, verstärken sich erwartungsgemäß bei mittleren Mengen. So müssen die Märkte in insgesamt 30 Touren sogar drei- bis viermal beliefert werden, um die gesamte Ware einmalig auszuliefern. Hinzukommen die langen Be- und Entladezeiten der Fahrzeuge. **Diese Zeiten erfordern die Einstellung von Personal für das Lager.** Das Lagerpersonal muss für die Be- und Entladung der Fahrzeuge am Depot sorgen. Andernfalls ist es nicht möglich Auslieferungstouren innerhalb eines Arbeitstages zu absolvieren.

5.6 Zwischenfazit über die Auslieferungsstrategie zur regionalen Lebensmitteldistribution

Führt man die Erkenntnisse des vorangegangenen Abschnittes (5.5.3) mit den Erkenntnissen des Basisszenarios zusammen (vergleiche Abschnitt 5.4.2), zeigt sich, dass die Fahrzeit zwischen den Erzeugern bei geringen Abholmengen immer der restriktive Faktor ist. Bei geringen Abholmengen und ca. 50 Erzeugern lassen sich die Touren mit einem sehr gut ausgelasteten 3,5 t Van innerhalb arbeitsrechtlicher Fahrzeitbeschränkungen optimal innerhalb einer Woche durchführen. Die Abholung der Ware verteilt sich auf drei Touren, die je einen Arbeitstag von ca. 8 h umfassen. Auch bei größeren Initiativen von 100 oder 200 Erzeuger-Mitgliedern wird **pro 50 Erzeuger im Ein-Schicht-Betrieb ein Van und dementsprechend ein Fahrer zur einmaligen Abholung der Ware benötigt.** Alle Einsammlungstouren betragen unabhängig der Initiativen-Größe rund 8 h. Auch der Van kann in jedem Fall gut ausgelastet werden.

Steigen die Mengen pro Erzeuger von durchschnittlich 3 auf mittlere Mengen von 7-8 Kisten, steigt die Anzahl an Einsammlungstouren, während sich die Länge ungefähr halbiert. Die Gesamtdistanz aller Touren durch häufigeres Anfahren des Depots sowie der zeitliche Aufwand des Ein- und Ausladens des Fahrzeugs steigen. Da das Fahrzeug bei den o. g. Touren mit geringen Mengen (durchschnittlich 3 Kisten je Erzeuger) bereits sehr gut ausgelastet war, ist es nicht überraschend, dass dasselbe Fahrzeug bei unveränderter Erzeugerstruktur, aber gestiegenen Abholmengen nicht ausreicht. In der Konsequenz muss entweder ein **zweiter Fahrer eingestellt werden, sodass mehr Touren pro Tag gefahren werden können, oder es muss auf ein größeres Fahrzeug ausgewichen werden.** Wird ein größeres Fahrzeug angeschafft, können die Touren wieder in derselben Konstellation wie bei den geringen Transportmengen ausgeführt werden.

Insgesamt zeigt sich, dass die Einsammlungstouren aufgrund der Fragmentierung der Erzeuger idealerweise rund 8 h betragen. Bei geringen Transportmengen ist der 3,5 t Van das passendste Fahrzeug, da auch mit steigender Erzeugerzahl **keine weiteren Stopps in die Touren integriert werden können und somit keine weitere Optimierung der Einsammlungstouren aufgrund der Zeitrestriktion möglich** ist. Werden die Touren häufiger und kleiner, bei gleicher Erzeugerzahl, liegt dies an einem zu kleinen Fahrzeug.

Bei den Auslieferungstouren hingegen ist das Optimierungspotenzial durch ein größeres Fahrzeug höher. So kann die Auslieferungszeit bei 200 Erzeugern z.B. bei einem Umstieg vom 3,5 t Van auf einen größeren 5 oder 7 t Kleintransporter von sieben auf eine Schicht

reduziert werden, während der 3,5 t Van für eine kleinere Initiative von 50 Erzeugern auch bei der Auslieferung das passendste Fahrzeug ist.

Für Krankheits- und Urlaubszeiten, ist es nützlich, einen Ersatz- bzw. Zweitfahrer zu haben. Daher wird bei der kooperativen Tourenplanung mit Einstellung eines Fahrers empfohlen, mehr als einen Fahrer pro Fahrzeug zu beschäftigen. Soll kein Fahrer eingestellt werden, ist dieses Problem nicht vorhanden, da die Erzeuger sich gegenseitig vertreten können.

Weiterhin gilt es zu bedenken, dass sich die Ergebnisse der Szenarioanalyse (Abschnitt 5.5.3) ausschließlich auf die einmalige Abholung und Auslieferung der gesamten Ware aller Erzeuger beziehen. In Abschnitt 5.4.2.2 wurden die Faustzahlen für Lieferrhythmen aus dem Handbuch zur Regionalvermarktung des Bundesverband Regionalbewegung (2017) angeführt. Demnach muss eine Unterscheidung zwischen Frischeprodukten und haltbaren Produkten getroffen werden. Während Frischeprodukte dreimal wöchentlich bis täglich zu den Märkten gebracht werden müssen, muss haltbare Ware nur zweimal monatlich bis wöchentlich ausgeliefert werden (Bundesverband Regionalbewegung 2017).

Die Lieferrhythmen spielen bei der Tourenplanung inklusive der Planung und Einstellung von Fahrern sowie der Anschaffung von Fahrzeugen eine entscheidende Rolle. Daher sollten Erzeuger nach haltbaren Produkten und Frischware bei der Tourenplanung kategorisiert werden. Ggf. kann eine dritte Kategorie für kurze Lagerzeiten hinzugefügt werden.

Bei haltbaren Produkten ist die Organisation der Touren durch die Lagerfähigkeit der Produkte einfach. Die gesamte Ware kann zunächst eingesammelt, dann für mehrere Tage gelagert und später ausgeliefert werden. Folgend eingangs beschriebener Ergebnisse, sollte eine Initiative je nach Dichte der Erzeuger in einem 100 km Radius um das Depot ca. 50 Erzeuger bündeln. Die Ware dieser 50 Erzeuger kann von einem Fahrer mit einem Van im Einschicht-Betrieb an drei Werktagen abgeholt und an zwei Werktagen ausgeliefert werden.

Die Planung für Frischeprodukte ist aufgrund der begrenzten Lagerfähigkeit deutlich komplexer. Die Ware muss schnell in den LEH gebracht werden, damit sie dort möglichst lange angeboten werden kann. D.h. die gesamte Ware muss im besten Fall an einem Tag abgeholt und ausgeliefert werden. Ein Blick zurück auf das Basisszenario zeigt (siehe Abschnitt 5.4.2.2), dass alle 17 Erzeuger in einer siebenstündigen Tour gebündelt werden konnten. Auch in der Szenarioanalyse hat der VeRyPy-Algorithmus durchschnittlich 17 Erzeuger (mit geringen Mengen von durchschnittlich 3 Kisten je Erzeuger) zu einer Einsammlungstour von ca. 8 h gebündelt. Die Frischeprodukte müssen aufgrund ihrer Verderblichkeit noch am selben Tag in einer zweiten Tour, deren Länge ca. 6 h zzgl. Warenverräumung beträgt, zu den Märkten gebracht werden. Demzufolge muss nach der Wareneinsammlung ein Fahrerwechsel stattfinden. Die Frischeprodukte können nur im Zwei-Schicht-Betrieb in die kooperative Tourenplanung integriert werden. Somit müssen für rund 17 Erzeuger mit Frischeprodukten zwei Fahrer beschäftigt werden. Bei mittleren Distributionsmengen (7-8 Kisten je Erzeuger) würde, wie bei den haltbaren Produkten, der Van nicht mehr ausreichen und es würde ein größeres Fahrzeug benötigt werden. An der Fahrerkonstellation müsste sich voraussichtlich nichts ändern.

6 Ökonomische und ökologische Bewertung der Auslieferungsstrategien

Der Fokus von Kapitel 5 lag darauf Fahrzeiten, Distanzen, geeignete Fahrzeuge und Fahrerbedarfe sowie sinnvolle Größen von Regionalvermarktungsinitiativen (gemessen an der Mitgliederzahl) zu ermitteln. In diesem Kapitel sollen abschließende Schlussfolgerungen und finale Empfehlungen zur Ausgestaltung der regionalen Lebensmitteldistribution für Regionalvermarktungsinitiativen gegeben werden.

Dazu werden in einem ersten Schritt die Ergebnisse des Zwischenfazits mit Kosten- und Emissionsfaktoren bewertet. Diese wurden ebenfalls in Kapitel 5 hergeleitet. Die Ergebnisse werden dabei auf die drei bekannten Strategien (siehe Abschnitt 5.5.2) übertragen: Die kooperative Tourenplanung mit (Strategie 1) bzw. ohne (Strategie 2) die Einstellung eines Fahrers und die eigene Auslieferung seitens der Erzeuger (Strategie 3). Im zweiten Schritt werden die Vor- und Nachteile der Auslieferungsstrategien sowie die Planungsrisiken für Initiativen und Erzeuger umfassend diskutiert.

Die Ergebnisse der Szenarioanalyse zu Tourenlängen (Distanzen und Zeitaufwand) aus Abschnitt 5.5 und 5.6 wurden in Abbildung 6-1 und Tabelle 6-1 für die nachfolgende ökonomische und ökologische Bewertung der kooperativen Tourenplanung aufgearbeitet und zusammengefasst. Es ist zu beachten, dass zur Vereinfachung der Mittelwert aus den Ergebnissen der kleinen Initiativen mit 50 Erzeugern genutzt wird. Folglich wird nicht weiter zwischen dichter und gleichmäßiger Erzeugerverteilung unterschieden. Ferner wurde der Zeitaufwand gerundet, um benötigte Lagerarbeiten berücksichtigen zu können.

Die Zusammenfassungen zeigen die Anzahl an Erzeugern, die an der kooperativen Tourenplanung teilnehmen können. Dabei wird einerseits zwischen Erzeugern mit haltbaren Produkten bzw. Erzeugern mit Frischeprodukten sowie andererseits zwischen dem Ein- und dem Zwei-Schicht-System unterschieden. Der kumulierte Aufwand aller Erzeuger, der relative Aufwand je Erzeuger und Lieferung sowie der absolute Aufwand je Erzeuger an Zeit und Fahrt (Distanz) werden aufgelistet.

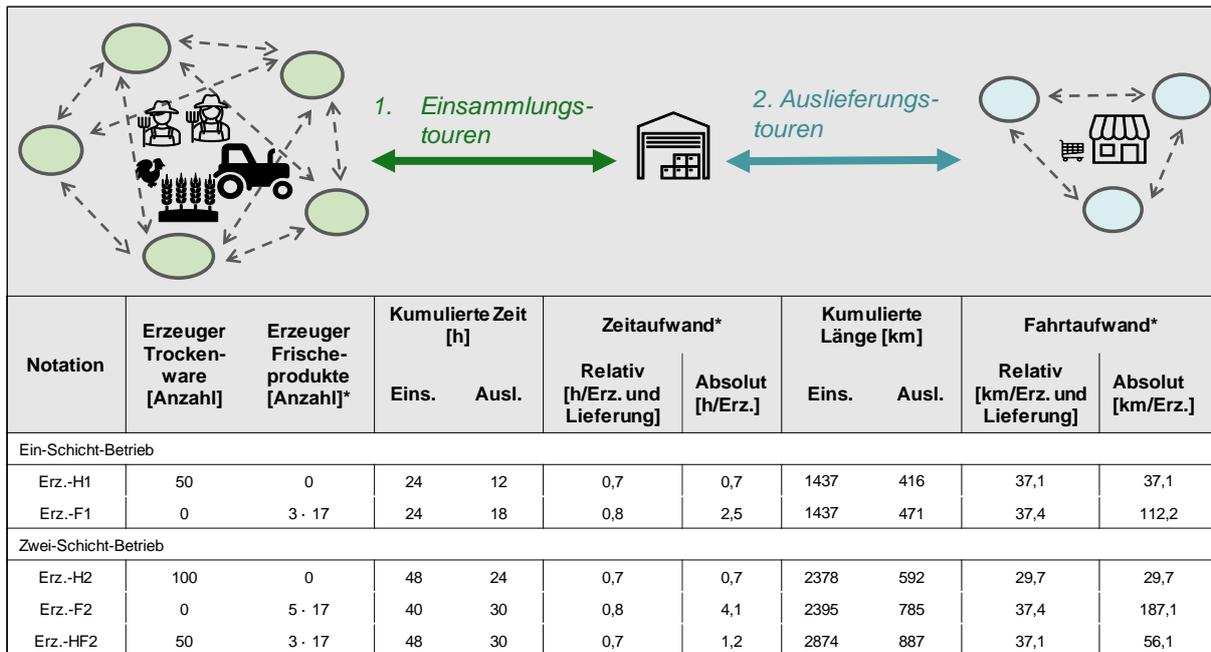


Abbildung 6-1: Kooperative Tourenplanung bei mittleren Transportmengen (1-5 Kisten je Erzeuger) mit 3,5 t Van bezogen auf den Planungszeitraum einer Arbeitswoche

* Pro Tour können Frischeprodukte von 17 Erzeugern ausgeliefert werden. Pro Woche sind 3-5 Liefertage notwendig. Die erreichbare Tourenanzahl pro Woche wurde beim relativen Zeitaufwand bzw. dem relativen Fahrtaufwand bedacht.

Tabelle 6-1: Kooperative Tourenplanung mit 5-7,5 t Kleintransporter bei unterschiedlichen Transportmengen bezogen auf den Planungszeitraum einer Arbeitswoche

Notation	Kisten [Anzahl]	Erzeuger Trockenware [Anzahl]	Erzeuger Frischeprodukte [Anzahl]*	Kumulierte Zeit [h]		Zeitaufwand*		Kumulierte Länge [km]		Fahrtaufwand*	
				Eins.	Ausl.	Relativ [h/Erz. und Lieferung]	Absolut [h/Erz.]	Eins.	Ausl.	Relativ [km/Erz. und Lieferung]	Absolut [km/Erz.]
Ein-Schicht-Betrieb											
Erz.-H1/7	5-10	50	0	24	12	0,7	0,7	1437	416	37,1	37,1
Erz.-F1/7	5-10	0	3 · 17	24	18	0,8	2,5	1437	471	37,4	112,2
Erz.-H1	1-5	50	0	24	8	0,6	0,6	1437	223	33,2	33,2
Zwei-Schicht-Betrieb											
Erz.-H2/7	5-10	100	0	48	24	0,7	0,7	2378	592	29,7	29,7
Erz.-F2/7	5-10	0	5 · 17	40	30	0,8	4,1	2395	785	37,4	187,1
Erz.-HF2/7	5-10	50	3 · 17	48	30	0,7	1,2	2874	887	37,1	56,1
Erz.-H2	1-5	100	0	24	14	0,4	0,4	2378	380	27,6	27,6

Hinweis: Die grüne Markierung zeigt die Unterschiede zu Abbildung 6-1

* Pro Tour können Frischeprodukte von 17 Erzeugern ausgeliefert werden. Pro Woche sind 3-5 Liefertage notwendig. Die erreichbare Tourenanzahl pro Woche wurde beim relativen Zeitaufwand bzw. dem relativen Fahrtaufwand bedacht.

Bei 50 Erzeugern mit haltbarer Ware (Erz.-H1) bzw. 17 Erzeugern mit Frischeprodukten (Erz.-F1) sowie einer gemischten Initiative im Zwei-Schicht-Betrieb bestehen kaum Unterschiede in dem relativen Zeitaufwand bzw. dem relativen Fahrtaufwand je Erzeuger. Eine Lieferung umfasst bei geringen Mengen im Durchschnitt drei und bei mittleren Mengen sieben Kisten. Erst bei einer größeren Regionalvermarktungsinitiative mit ca. 100 Erzeugern im Zwei-Schicht-Betrieb (Erz.-H2) kann der relative Fahrtaufwand deutlich - um ca. 20 % - reduziert werden. Dies

liegt an den besseren Bedingungen, Erzeuger in Touren zu bündeln. Sind mehr Erzeuger in demselben Radius verfügbar, können diese vorteilhafter geclustert werden. Dennoch muss bei der Planung bedacht werden, dass bei 100 Erzeugern im Zwei-Schicht-Betrieb Lagerpersonal benötigt wird. Daher unterscheidet sich der relative Zeitaufwand kaum.

Die zuvor ermittelten Fahrzeugkostensätze beziehen sich auf €/km (vergleiche Abschnitt 5.1 und 5.4.2.3). Um den Personalaufwand, welcher den größten Anteil an den Fahrzeugkosten ausmacht (vergleiche Abschnitt 5.1 und 5.4.2.3), nicht zu unterschätzen, werden die Personalkosten aus dem Kostenfaktor extrahiert. Infolgedessen wird der Fahraufwand mit einer Kilometerpauschale bewertet und der Personalaufwand, welcher mit dem entsprechenden Personalkostenfaktor in €/h bewertet wird, addiert. Der Personalkostenfaktor beinhaltet bereits eine Pauschale für Ersatzpersonal zum Ausgleich von Urlaubs- und Krankheitstagen. So können alle drei Strategien mit denselben Faktoren bewertet und verglichen werden.

Bei der Bewertung der Touren mit den ermittelten Emissionsfaktoren ist keine Unterscheidung notwendig. Die Emissionen fallen durch die zurückgelegte Fahrstrecke und den damit verbundenen Kraftstoffverbrauch an (vergleiche Abschnitt 5.2).

6.1 Ökonomische Bewertung der Auslieferungsstrategien

In Kapitel 3 wurde die Methodik der Fahrzeugkostenrechnung erläutert. Diese Methodik bietet zusammen mit den Annahmen aus den Abschnitten 5.1 und 5.4.2.3 die Grundlage für nachfolgende ökonomische Bewertungen.

Seit 2018 sind die Kraftstoffpreise enorm angestiegen (vergleiche Abschnitt 3.1). Der gestiegene Dieselpreis führt zu 52 % höheren Dieselposten je Kilometer im Jahr 2022 gegenüber dem Jahr 2018. Die Strompreise sind zwar ebenfalls stark gestiegen, dennoch führen diese nur zu einer Erhöhung der Kosten um 19 %. Eine Gegenüberstellung der Kraftstoffkosten je gefahrene Kilometer für die Jahre 2018 und 2022 wurde zu allen in dieser Dissertation diskutierten Fahrzeugtypen in Abbildung 6-2 vorgenommen.

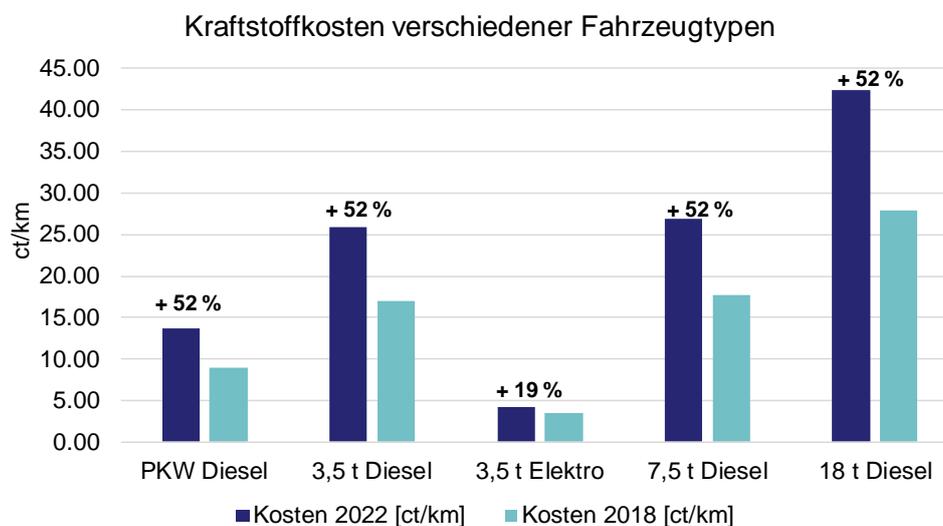


Abbildung 6-2: Gegenüberstellung der verbrauchsabhängigen Kraftstoffkosten in den Jahren 2018 und 2022 für fünf Fahrzeugtypen

Aufgrund des geringen Anteils der variablen Kosten an den gesamten Kraftstoffkosten des Elektro-Vans von 4-5 % wirkt sich die Strompreiserhöhung mit nur 1 ct/km kaum auf die kilometerabhängigen Fahrzeugkosten aus. Im Vergleich dazu beträgt der Anteil der variablen Kosten an den gesamten Fahrzeugkosten für den Diesel-Van 20 % im Jahr 2018 bzw. 27 % im Jahr 2022. Damit erhöhen sich die kilometerabhängigen Fahrzeugkosten um 9 ct/km im Jahr 2022. Die kumulierten Fahrzeugkosten für den Van steigen um über 7.000 € pro Jahr. Bei einer kooperativen Tourenplanung mit 50 Erzeugern entfallen davon 140 € auf jeden Erzeuger. Diese einfache Rechnung weist bereits darauf hin, dass Kraftstoffeinsparungen und die damit verbundenen Streckenreduzierungen von hoher Bedeutung sind, um Fahrzeugkosten zu reduzieren.

Bei der Bewertung der Szenarien werden zwei Perspektiven berücksichtigt: Erstens die Perspektive der Erzeuger, die ihre eigenen Personalkosten mitberücksichtigen, und zweitens Erzeuger, die ohne den Einbezug von Personalkosten kalkulieren. Auf die Problematik, dass selbstfahrende Erzeuger ihre Logistikkosten häufig nicht bedenken oder gar nicht kennen, wurde in Abschnitt 2.4.1 hingewiesen. Um eine Entscheidungsunterstützung zur Quantifizierung der Kosten und möglicher Ersparnisse durch alternative Logistiklösungen, wie die hier vorgestellte kooperative Tourenplanung, anbieten zu können, müssen beide Blickwinkel in die Kostenbewertung einfließen.

Tabelle 6-2 zeigt die Kosten je Erzeuger und Kiste bei einer eigenen Auslieferung mit und ohne Berücksichtigung der Personalkosten mit den verbrauchsabhängigen Kosten von 2018 (Strategie 3). Ohne Einbezug der Personalkosten sinken die Auslieferungskosten erheblich. Die Differenz liegt bei ca. 70 %. Die Tourenlängen und Zeiten wurden in Abschnitt 5.4.1 berechnet.

Tabelle 6-2: Bewertung der eigenen Auslieferung seitens der Erzeuger (2018) mit wenig Kisten

	Länge/Tour [km]	Zeit/Tour [h]	Kosten mit Personal [€/Kiste]	Kosten ohne Personal [€/Kiste]
Ø	152	3 h 15 min	31.93	9.38
Min	131	2 h 50 min	27.72	8.08
Max	235	4 h 30 min	45.72	14.50

Die durchschnittlichen Kosten der eigenen Auslieferung (Referenzwert - Strategie 3) werden in Abbildung 6-3 (Strategie 1) und Abbildung 6-4 (Strategie 2) mit den Kosten der kooperativen Tourenplanung verglichen. In den Abbildungen wurden die in der Kapiteleinleitung beschriebenen Schicht-Systeme und Strategien der Regionalvermarktungsinitiativen, einander gegenübergestellt. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die Kosten zur Distribution einer Kiste, wobei sich die Tourenplanung immer auf den Distributionsumfang einer Arbeitswoche bezieht. Auf diese Weise können die unterschiedlichen Lieferrhythmen der haltbaren Produkte und der Frischeprodukte berücksichtigt werden. Die Distribution umfasst dabei die Einsammlung und Auslieferung, wobei in der Auslieferung neben den Kosten der eigentlichen Fahrt auch Personalkosten für die Warenverräumung, welche ebenfalls vom Fahrer übernommen werden muss (siehe Abschnitt 2.4.4), enthalten sind. Die verwendete Notation wird in nachfolgender Tabelle 6-3 erläutert.

Tabelle 6-3: Notation für Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4

Notation	Beschreibung
Erz.-H1	50 Erzeuger mit haltbaren Produkten – eine Schicht
Erz.-F1	17 Erzeuger mit Frischeprodukten – eine Schicht (3 Touren pro Woche)
Erz.-H2	100 Erzeuger mit haltbaren Produkten – zwei Schichten
Erz.-F2	17 Erzeuger mit Frischeprodukten – zwei Schichten (5 Touren pro Woche)
Erz.-HF2	50 Erzeuger mit haltbaren und 17 mit Frischeprodukten – zwei Schichten (3 Touren pro Woche)
Erz.-H1/7	50 Erzeuger mit haltbaren Produkten – eine Schicht / mittlere Mengen
Erz.-F1/7	17 Erzeuger mit Frischeprodukten – eine Schicht / mittlere Mengen (3 Touren pro Woche)
Erz.-H2/7	100 Erzeuger mit haltbaren Produkten – zwei Schichten / mittlere Mengen
Erz.-F2/7	17 Erzeuger mit Frischeprodukten – zwei Schichten / mittlere Mengen (5 Touren pro Woche)
Erz.HF2/7	50 Erzeuger mit haltbaren und 17 mit Frischeprodukten – eine Schicht / mittlere Mengen (3 Touren pro Woche)

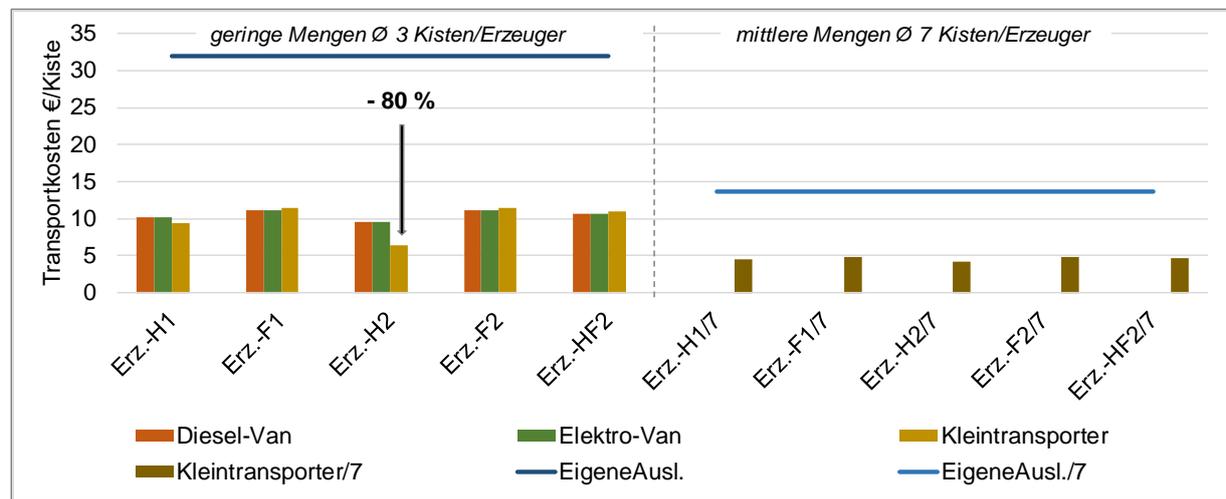


Abbildung 6-3: Strategie 1 - Kooperative Tourenplanung mit Einstellung eines Fahrers (2018)

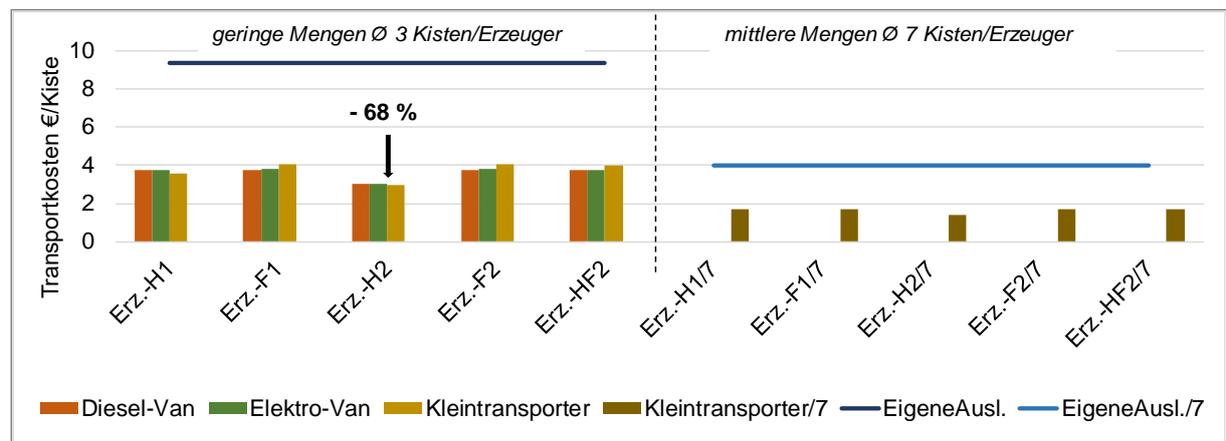


Abbildung 6-4: Strategie 2 - Kooperative Tourenplanung ohne Einstellung eines Fahrers (2018)

Aus den Abbildungen geht hervor, dass die kooperative Tourenplanung sowohl in Strategie 1 als auch in Strategie 2 in allen Ausgestaltungsvarianten günstiger ist als die eigene Auslieferung seitens der Erzeuger (Strategie 3). **Im günstigsten Fall (Erz.-H2 bzw. Erz.H2/7) wird**

die Distribution für rund 100 Erzeuger in einem Zwei-Schicht-Betrieb mit einem Kleintransporter durchgeführt.

Bei geringen Distributionsmengen können die Transportkosten um bis zu 80 % gegenüber der eigenen Auslieferung reduziert werden. Der Kleintransporter wäre in diesem Fall vor allem bei den Einsammlungstouren nicht ausgelastet, allerdings kann die Ware durch die Nutzung des größeren Fahrzeugs in weniger Touren ausgeliefert werden. Dies reduziert den Zeitaufwand gegenüber dem Transport mit einem Van, sodass die höheren Anschaffungskosten des Kleintransporters ausgeglichen werden. Ferner wurde festgelegt, dass die Initiativen-Größe im Zwei-Schicht-Betrieb 100 statt 50 Erzeuger beträgt. Dies spiegelt sich bereits in den dargestellten Ergebnissen wider. Bei einer größeren Initiative können die Touren innerhalb des vorgegebenen 100 km Radius effizienter ausgestaltet werden, da die Erzeuger in einem solchen Fall dichter beieinander liegen. Demzufolge sind die kooperativen Einsammlungstouren im Durchschnitt kürzer und günstiger als bei einer kleineren Initiative mit nur 50 Erzeugern.

Werden im Durchschnitt nur geringe Mengen je Erzeuger transportiert, ist die Distribution der Frischeprodukte ca. 10 % teurer als die Distribution der haltbaren Produkte. Dies liegt an der zeitlichen Begrenzung einer Tour und dem daraus hervorgehenden Problem, nur ca. 17 Erzeuger pro Tour anzufahren. Werden hingegen mittlere Mengen je Erzeuger abgeholt, ist der Kostenunterschied je Kiste deutlich geringer.

Generell gilt, je größer die Initiative, desto flexibler ist die Tourenplanung. Eine hohe Flexibilität resultiert in niedrigeren Transportkosten. Weiterhin ist die Distribution günstiger, je mehr Mengen bei einem Erzeuger abgeholt werden.

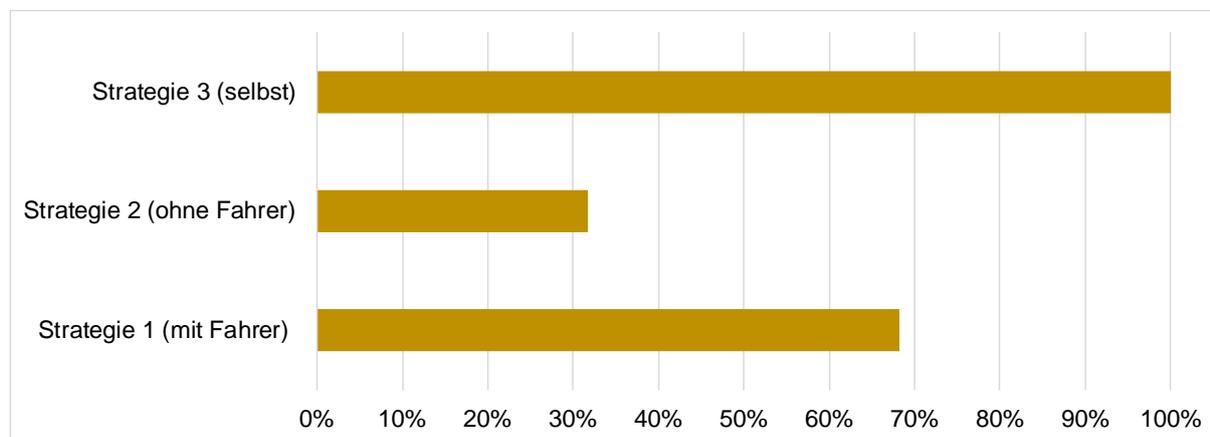


Abbildung 6-5: Szenarien 1 – 3 für 100 Erzeuger im Zwei-Schicht-Betrieb (Erz.H2)

In Abbildung 6-5 sind die Kostenreduktionsmöglichkeiten vom Wechsel der eigenen Auslieferung zu einer kooperativen Auslieferung (Strategie 1 und 2) in der priorisierten Variante Erz.H2 gegenübergestellt. Die Datenpunkte von Strategie 3 und 2 enthalten keine Personalkosten, wobei Strategie 3 immer vom Erzeuger selbst ausgeführt werden würde. In Strategie 2 würden sich die teilnehmenden Erzeuger mit dem Transport abwechseln.

In Strategie 2 können die Kosten gegenüber Strategie 3 um 2/3 reduziert werden. Strategie 1 kann die Kosten um 1/3 gegenüber Strategie 3 reduzieren. Strategie 2 stellt zwar die günstigste Distributionsstrategie bei geringen Mengen dar, allerdings erfordert sie auch den größten

Abstimmungsaufwand. Die Vor- und Nachteile dieser Strategie werden in Abschnitt 6.3 näher diskutiert.

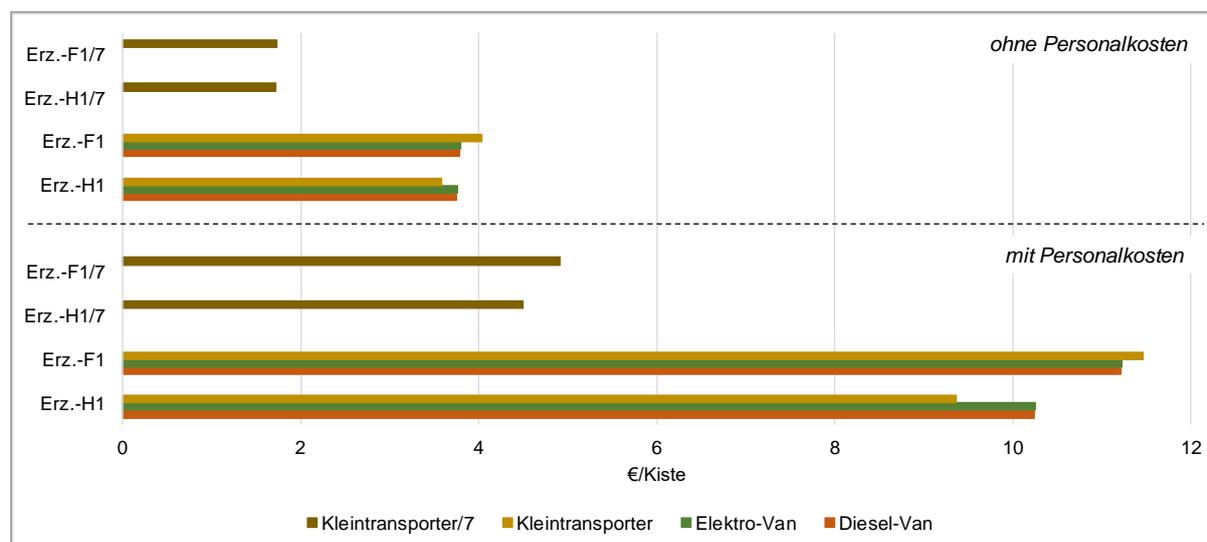


Abbildung 6-6: Gegenüberstellung der Transportkosten im Ein-Schicht-Betrieb

Ist kein Zwei-Schicht-Betrieb durchführbar, muss die Ware im Ein-Schicht-Betrieb ausgeliefert werden. Auch in diesem Fall ist die Distribution der haltbaren Produkte günstiger als die Distribution der Frischeprodukte (siehe Abbildung 6-6). Unter Einbezug der Personalkosten beträgt die Differenz mit 12 % im Mittel über 1 € pro Kiste, wohingegen der Unterschied nur rund 20 Cent/Kiste beträgt, wenn die Personalkosten nicht berücksichtigt werden. Das passendste Fahrzeug ist für die haltbaren Produkte der Kleintransporter und für die Frischeprodukte der Elektro-Van mit leichtem Vorteil gegenüber dem Diesel-Van.

6.2 Ökologische Bewertung der Auslieferungsstrategien

In Abschnitt 4.2.2 wurden Erweiterungen des Vehicle Routing Modells zur Minimierung von Fahrzeugemissionen sowie die Herkunft des Emissionsfaktors erläutert. In Abschnitt 5.2 wurden die fahrzeugspezifischen Emissionsfaktoren bestimmt. Die Erkenntnisse dieser beiden Abschnitte dienen als Grundlage der ökologischen Bewertung der Touren.

Da die Emissionen durch die zurück gelegte Fahrstrecke und den damit verbundenen Kraftstoffverbrauch entstehen, gibt es keine Unterscheidung zwischen den Strategien 1 und 2. Somit werden in diesem Abschnitt lediglich die kooperative Tourenplanung allgemein und die eigene Auslieferung einander gegenübergestellt. In Abbildung 6-7 wird die kooperative Tourenplanung der eigenen Auslieferung mittels eines Diesel-PKW vorgestellt. Abbildung 6-8 zeigt die Differenzen in den Emissionen (kg CO_{2äq}/Kiste) im Vergleich zu einem elektrisch betriebenen PKW für die eigene Auslieferung. Hier wurde derselbe Emissionsfaktor wie für den elektrisch betriebenen Van genutzt. Damit werden die Emissionen des PKWs aufgrund des höheren Kraftstoffverbrauchs eines Vans leicht überschätzt. Tabelle 6-4 zeigt die in den Abbildungen verwendete Notation. Diese ist identisch zu der Notation in der ökonomischen Bewertung im vorangegangenen Abschnitt.

Tabelle 6-4: Notation für Abbildung 6-7 und Abbildung 6-8

Notation	Beschreibung
Erz.-H1	50 Erzeuger mit haltbaren Produkten – eine Schicht
Erz.-F1	17 Erzeuger mit Frischeprodukten – eine Schicht (3 Touren pro Woche)
Erz.-H2	100 Erzeuger mit haltbaren Produkten – zwei Schichten
Erz.-F2	17 Erzeuger mit Frischeprodukten – zwei Schichten (5 Touren pro Woche)
Erz.-HF2	50 Erzeuger mit haltbaren und 17 mit Frischeprodukten – zwei Schichten (3 Touren pro Woche)
Erz.-H1/7	50 Erzeuger mit haltbaren Produkten – eine Schicht / mittlere Mengen
Erz.-F1/7	17 Erzeuger mit Frischeprodukten – eine Schicht / mittlere Mengen (3 Touren pro Woche)
Erz.-H2/7	100 Erzeuger mit haltbaren Produkten – zwei Schichten / mittlere Mengen
Erz.-F2/7	17 Erzeuger mit Frischeprodukten – zwei Schichten / mittlere Mengen (5 Touren pro Woche)
Erz.HF2/7	50 Erzeuger mit haltbaren und 17 mit Frischeprodukten – eine Schicht / mittlere Mengen (3 Touren pro Woche)

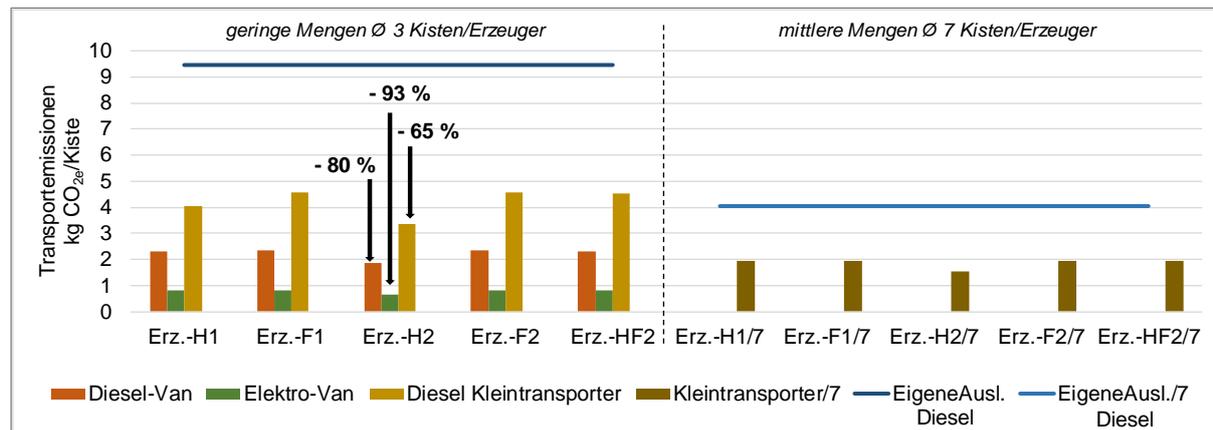


Abbildung 6-7: Ökologische Bewertung der kooperativen Tourenplanung – Vergleich mit Diesel-PKW
Hinweis: siehe Tabelle 6-4 für die Notation

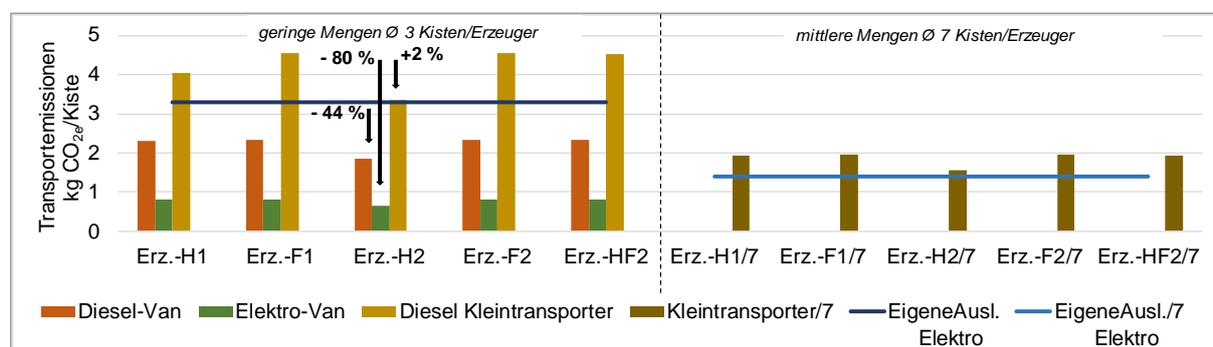


Abbildung 6-8: Ökologische Bewertung der kooperativen Tourenplanung – Vergleich mit Elektro-PKW
Hinweis: siehe Tabelle 6-4 für die Notation

Fährt der Erzeuger mit einem Diesel-PKW (Abbildung 6-7), ist die kooperative Tourenplanung, wie in der ökonomischen Bewertung, in jedem Fall vorteilhafter als die eigene Auslieferung. Die beste Variante ist auch emissionsseitig, 100 Erzeuger mit haltbaren Produkten in zwei

Schichten (Erz.-H2 bzw. Erz.-H2/7) zu koordinieren. So können die Emissionen bei einem Umstieg von der eigenen Auslieferung zur kooperativen Tourenplanung um 80 – 93 % gesenkt werden.

Verfügt der Erzeuger bereits über ein Elektrofahrzeug zur eigenen Auslieferung, ist die kooperative Tourenplanung unter den Annahmen, die dieser Arbeit zugrunde gelegt wurden, nicht immer emissionsärmer (siehe Abbildung 6-8). Werden geringe Mengen transportiert, sollte der Erzeuger auf jeden Fall einen Van zur Distribution der Ware nutzen. Die kooperative Tourenplanung mittels eines Kleintransporters verursacht in jeder betrachteten Ausgestaltungsvariante höhere Emissionen als bei der eigenen Auslieferung mittels eines Elektro-PKWs. Lediglich in der bislang präferierten Variante „Erz.-H2“ sind die Transportemissionen fast identisch.

Folglich ist einem Erzeuger mit Elektro-PKW zur eigenen Auslieferung aus Umweltsicht davon abzuraten, der kooperativen Tourenplanung einer größeren Regionalvermarktungsinitiative mit Kleintransporter beizutreten. Im vorangegangenen Teil dieser Dissertation wurde erläutert, dass bei mittleren Distributionsmengen aus organisatorischen Gründen auf ein größeres Fahrzeug umgestiegen werden sollte (siehe Abschnitt 5.5.3 und 5.6). Die Optimierung enthielt bislang keine ökologische Bewertung. Da die Emissionen des Kleintransporters ungefähr das fünffache der Transportemissionen des voll-elektrischen Vans betragen, wird dieser Punkt in Abschnitt 6.3 noch einmal aufgegriffen und eingehender diskutiert. Es ist in jedem Fall ersichtlich, dass bei größeren Mengen der Einsatz eines Elektro-Kleintransporters oder eines anderen ökologischeren Antriebs geprüft werden sollte.

6.3 Diskussion und Empfehlung über die strategische Ausgestaltung der Transporte bei der regionalen Lebensmitteldistribution

Wie in der Einleitung erwähnt, wurde im Jahr 2015 die 2030-Agenda für Nachhaltige Entwicklung verabschiedet (BMUV, 2023). Diese Agenda umfasst 17 Nachhaltigkeitsziele, die Sustainable Development Goals (SDGs), welche weder strikt voneinander getrennt betrachtet noch isoliert umgesetzt werden können (BMUV, 2023; United Nations, 2023). Dennoch gibt es Maßnahmen, die die Erreichung eines Zieles stärker vorantreiben als andere.

Mit dem Ziel Regionalvermarktungsinitiativen eine fundierte Entscheidungsgrundlage zur Entwicklung einer geeigneten Auslieferungsstrategie aus Umwelt- und Kostenperspektive zu geben, werden insbesondere drei SDGs und zwei Unterziele dieser SDGs gefördert:

Die Erreichung der SDGs Nr. 2 „Den Hunger beenden, Ernährungssicherheit und eine bessere Ernährung erreichen und eine nachhaltige Landwirtschaft fördern“, Nr. 11 „Städte und Siedlungen inklusiv, sicher, widerstandsfähig und nachhaltig gestalten“ sowie Nr. 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“ (BMUV, 2023; United Nations, 2023). Insbesondere das „Unterziel 2.3 Produktivität und Einkommen von Kleinbauern verdoppeln“ sowie das „Unterziel 11.A Verstärkte nationale und regionale Entwicklungsplanung“ können mit dieser Arbeit unterstützt werden (BMUV, 2023; United Nations, 2023).

In den SDGs der Vereinten Nationen ist die Bedeutung der Wirtschaft und Gesellschaft kleiner, landwirtschaftlicher Betriebe fest verankert. Diese Bedeutung wurde auch von den Regionalvermarktungsinitiativen erkannt.

In den vorangegangenen Abschnitten 6.1 und 6.2 zeigten sich **klare Vorteile einer kooperativen Auslieferungsstrategie**, wie sie im Rahmen dieser Dissertation untersucht wurde, gegenüber der eigenen Auslieferung seitens der Erzeuger. Den Regionalvermarktungsinitiativen wird dementsprechend klar dazu geraten, Erzeuger dazu zu motivieren, sich einer kooperativen Tourenplanung anzuschließen.

Dennoch muss abgewogen werden, welche Umsetzungsmöglichkeiten zur gegebenen Erzeugerstruktur passen. Nicht für alle Erzeuger ist die kooperative Tourenplanung eindeutig von Vorteil. Es muss vor dem Start der Tourenplanung in engem Austausch mit den Erzeugern eine Strategie ermittelt werden, die zu den Begebenheiten der Region und allen Teilnehmern (Märkte und Erzeuger) passt.

Andernfalls muss die Erzeugerstruktur der Ausgestaltung der kooperativen Tourenplanung angepasst werden. Letzteres würde bedeuten, dass gegebenenfalls unpassende Erzeuger oder Märkte von vornherein aus einer Kooperation ausgeschlossen werden müssen. Zudem stimmen die Voraussetzungen der ökologischsten und der ökonomischsten Ausgestaltung nicht immer überein.

Hofläden wurden eingangs aufgrund unzureichender Datengrundlage von der Analyse dieser Dissertation ausgeschlossen. Dennoch können die gewonnenen Erkenntnisse auch auf die Belieferung von Hofläden übertragen werden. Ob der Absatzort der Lebensmittel der LEH oder ein Hofladen ist, ist für die technische Tourenplanung von untergeordneter Bedeutung. Allerdings könnte die Belieferung von Hofläden möglicherweise zeitlich flexibler ausgestaltet werden als die Belieferung des LEHs, da die Hofladeninhaber vermutlich direkt bei ihrem Laden wohnen oder eine jederzeit zugängliche Scheune haben, in der Ware zu jeder Tageszeit für den Laden abgestellt werden kann. Würde Ware lediglich abgestellt werden, müsste sich allerdings der Hofladeninhaber dazu bereit erklären, die Ware anschaulich zu verräumen.

Nachfolgend werden wichtige Charakteristika bei der Ausgestaltung der kooperativen Tourenplanung diskutiert. Dabei wird auch aufgezeigt, welche Entscheidungen beim Aufbau einer kooperativen Tourenplanung getroffen werden müssen:

Größe der Regionalvermarktungsinitiative

Die Größe der Regionalvermarktungsinitiative wird in dieser Dissertation an der Mitgliederzahl von Erzeugern, die an der kooperativen Tourenplanung partizipieren können, gemessen. Generell gilt zwar, je größer die Initiative, desto flexibler ist die Tourenplanung. Eine hohe Flexibilität resultiert in niedrigeren Transportkosten durch eine bessere Tourenkonstellation. **Bei Erzeugern mit haltbaren Produkten sollten immer ungefähr 50 Erzeuger gebündelt werden.** Ist eine Initiative größer, werden wiederum 50 Erzeuger gebündelt. **Im Ein-Schicht-Betrieb sollten sich 50 Erzeuger ein Depot teilen, im Zwei-Schicht-Betrieb 100 Erzeuger.** Bilden mehr als diese 50 bzw. 100 Erzeuger eine Kooperation, kann angedacht werden, ein zweites Depot an einem zentralen Standort zu errichten. Es kann unter Umständen besser sein, für die nächsten 50 bzw. 100 Erzeuger ein neues zentrales Depot zu eröffnen, als die

gesamte Ware in einem Depot zu kommissionieren. Erzeuger können auch neu gebündelt und dem neuen Depot zugeordnet werden. Vor der Errichtung neuer Depots wird die Anwendung eines Optimierungsmodells zur Standortplanung empfohlen. Dies schafft Klarheit über die Vorteilhaftigkeit eines zweiten Depots und über die Zuordnung der Erzeuger zu diesen Depots. Ein Nachteil wäre allerdings, dass zwei Depots die Teilung des Fahrzeugs erschweren. Es müsste an einem Depot gestartet und die Schicht an dem zweiten beendet werden. Dabei muss sichergestellt werden, dass der Fahrer der ersten Tour wieder nach Hause kommt.

Weiterhin sollte sich bezüglich einer optimalen Standort- sowie Tourenplanung mit mehreren Regionalvermarktungsinitiativen abgesprochen und ggf. Erzeuger einer anderen Initiative zugewiesen werden. Auf diese Weise können im Gesamtsystem der regionalen Lebensmitteldistribution die besten Bedingungen geschaffen werden. Die Szenarioanalyse hat gezeigt, dass die Fahrzeit bei gleichmäßiger, dichter Erzeugerverteilung gegenüber einer weiteren Streuung mit größeren Entfernungen zwischen den Erzeugern um über eine Stunde reduziert werden kann.

Werden im Durchschnitt nur geringe Mengen mit 3 Kisten je Erzeuger transportiert, ist der Transport der Frischeprodukte ca. 10 % teurer als der Transport der haltbaren Produkte. Dies liegt an der zeitlichen Begrenzung einer Tour und dem daraus hervorgehenden Problem, dass nur ca. 17 Erzeuger pro Tour angefahren werden können. Somit kann eine Regionalvermarktungsinitiative, die Frischeprodukte in einer kooperativen Tourenplanung bündeln möchte, nur 17 Erzeuger aufnehmen bzw. sich immer um ca. 17 Erzeuger vergrößern. Der Transport der Frischeprodukte im Rahmen der kooperativen Tourenplanung ist teurer als der Transport der haltbaren Produkte. Unter Einbezug der Personalkosten beträgt die Differenz zwischen dem Transport der haltbaren Produkte und den Frischeprodukten mit 12 % im Mittel über 1 € pro Kiste. Hingegen beträgt der Unterschied nur rund 20 Cent/Kiste, wenn die Personalkosten nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund sollte auf die Einstellung eines Fahrers vorzugsweise verzichtet werden (Strategie 2). In jedem Fall muss entsprechend der Zahlungskraft der Erzeuger und dem Warenwert abgewogen werden, ob eine kooperative Tourenplanung für die Frischeprodukte wirtschaftlich angeboten werden kann. Möglicherweise sind andere Vertriebswege als der LEH zu bevorzugen.

Schichtbetrieb

Die Distribution der Ware kann im Zwei-Schicht-Betrieb durch eine bessere Ressourcennutzung deutlich günstiger ausgestaltet werden als im Ein-Schicht-Betrieb. Allerdings müssen gewisse Voraussetzungen erfüllt sein, damit die Distribution im Zwei-Schicht-Betrieb erfolgen kann. Diese Option wird daher ggf. nicht für jede Initiative umsetzbar sein oder, wie oben beschrieben, manche Erzeuger und Märkte von der Teilnahme an der kooperativen Tourenplanung ausschließen. Nachfolgende Faktoren beeinträchtigen die Wahl für den Ein- oder Zwei-Schicht-Betrieb und können als Grundlage für Empfehlungen herangezogen werden.

Ein-Schicht-Betrieb

- Es muss ein „Puffer-Fahrer“ für Urlaubs- bzw. Krankheitstage eingestellt werden, da der zeitliche Aufwand der Touren bei soeben angeführter Initiativen-Größe ungefähr den Arbeitsaufwand einer vollen Stelle umfasst.
 - Der „Puffer-Fahrer“ kann ggf. Lagerarbeiten übernehmen. Oder beide Fahrer arbeiten in Teilzeit.
- Das Fahrzeug wäre zeitlich nicht voll ausgelastet und würde eine Schicht stehen.
 - Schicht-Start und -Ende sind hingegen flexibel zu gestalten.

Zwei-Schicht-Betrieb

- Starre und unflexible Schichtzeiten müssen vorgegeben werden.
- Die Distribution der Ware muss sehr früh am Morgen (ab spätestens 5:00 Uhr) starten und bis in den späten Abend (22:00 Uhr) erfolgen, dazu müssen
 - die Erzeuger zeitlich flexibel sein oder die Ware für die eigenständige Abholung des Fahrers bereitstellen.
 - die Märkte frühe bzw. lange Öffnungszeiten haben oder den Fahrern außerhalb der Öffnungszeiten Zugang zum Markt gewähren.
- Es müssen zwei Fahrer je Arbeitstag unter den oben genannten weichen Kriterien (siehe Abschnitt 2.4.4) bereitstehen. Daraus folgt, dass mindestens drei Fahrer zur Abdeckung von Urlaubs- und Krankheitstagen im Wechsel benötigt werden.
 - Der dritte Fahrer kann auch hier als Lagerist eingesetzt werden und nur bei Bedarf fahren.
 - Es muss in jedem Fall jemand Drittes die schnelle Beladung des Fahrzeugs sowie das Warenmanagement am Depot sicherstellen. Im Zwei-Schicht-Betrieb haben die Fahrer keine Zeit dafür, da die Fahrzeuge das Depot nach dem Schichtwechsel möglichst schnell wieder verlassen müssen.
- Im Falle einer Kombination von Erzeugern mit haltbarer Ware und Frischeprodukten (je eine Schicht pro Tag), muss samstags eine Schicht gearbeitet werden.

Personalbedarf: Selbst vs. Fahrer und Lager

Auf die Problematik, dass selbstfahrende Erzeuger ihre Logistikkosten häufig nicht bedenken oder gar nicht kennen, wurde in Abschnitt 2.4.1 hingewiesen. Bei Einstellung von Fahrpersonal würden nicht nur die Fahrer für die reine Fahrzeit, sondern auch für die Warenverräumung und ggf. für Lagerarbeiten bezahlt werden müssen. Wird der Zeitaufwand bei der eigenen Auslieferung seitens der Fahrer nicht wertgeschätzt, ist anzunehmen, dass auch die Zahlungsbereitschaft für einen Fahrer sowie Lageristen bei der kooperativen Tourenplanung gering ist. In diesem Fall bestünde die Möglichkeit, dass die Erzeuger abwechselnd als Fahrer/Lagerist eingesetzt werden und so auf die Einstellung von Personal verzichtet wird.

Der Vorteil an einer solchen Aufteilung des Zeitaufwandes ist, dass genügend Fahrer zur Verfügung stehen, die sich in Urlaubs- und Krankheitsfällen gegenseitig vertreten können. Dem steht der hohe organisatorische Aufwand zur Einteilung in Schichten sowie der Weitergabe des Fahrzeugs entgegen. Im Zwei-Schicht-Betrieb ist der Aufwand noch höher als im Ein-Schicht-Betrieb. Es müsste geklärt werden, ob die Regionalvermarktungsinitiative diese

Aufgabe übernehmen kann. Andernfalls müsste zu diesem Zweck jemand eingestellt werden oder ein bis zwei Fahrer übernehmen diese Aufgabe anstelle der Fahrleistung. **Bei 50 Erzeugern mit haltbaren Produkten und einem einwöchigen Lieferrhythmus müsste jeder Erzeuger nur 1,1 Wochen bzw. 5,5 Schichten pro Jahr fahren. Dies entspricht einem Arbeitsaufwand von 8 h in ungefähr zweimonatigen Abständen.** Im Zwei-Schicht-Betrieb wären zwar mehr Erzeuger Mitglied der Initiative, aber es würde auch Lagerpersonal benötigt, sodass sich bei Verzicht auf die Einstellung von Lagerarbeitern der Zeitaufwand je Erzeuger leicht erhöhen würde.

Bei den Frischeprodukten muss durch die engeren Lieferrhythmen von 3-5 Tagen und kleineren Gruppen zur Bündelung (17 Erzeuger), jeder Erzeuger häufiger die kooperativen Touren übernehmen als bei der Trockenware. Statt drei- bis fünfmal pro Woche selbst zu fahren, müsste jeder Erzeuger insgesamt 3,3 Wochen bzw. 19,8 Schichten pro Jahr übernehmen. Wie in Abschnitt 5.5.3 gezeigt, ist die durchschnittliche Zeitersparnis dennoch erheblich.

Problematisch könnte sein, dass die Erzeuger nur außerhalb der Erntesaison Urlaub machen können. Haben die Erzeuger ähnliche Produkte bzw. eine ähnliche Haupt- und Nebensaison, könnte es zu **Schwierigkeiten und Konflikten** bei der (Urlaubs-) Planung kommen. Sind manche Erzeuger ggf. nicht so verlässlich wie andere, was verabredete Zeiten betrifft, oder ihre Betriebsabläufe sind mit den Anforderungen der kooperativen Tourenplanung ohne Einstellung eines Fahrers nicht vereinbar, ist diese Form der Tourenaussgestaltung für sie nicht realisierbar. Da eine gewisse Größe für eine Initiative benötigt wird, müssen Erzeuger frühzeitig in die Planung für die Ausgestaltung der Touren einbezogen werden.

Auch muss genügend Vertrauen zwischen den Erzeugern bestehen, die fremden Produkte so gut wie die eigenen zu behandeln. Die Vorgaben entsprechen allerdings denselben weichen Faktoren (Abschnitt 2.4.4), die auch für einen eingestellten Fahrer bestünden. Da es auch um den Transport der eigenen Ware geht, ist anzunehmen, dass Erzeuger die weichen Faktoren verlässlicher erfüllen als ein Fahrer, der fremde Ware ausliefert. Übernehmen Erzeuger die Transporte selbst, kommen sie regelmäßiger in den Austausch und könnten von einem größeren Zusammenhalt profitieren.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, das **Transportfahrzeug unter den Erzeugern weiterzugeben**, wenn kein Fahrer eingestellt wird. Beispielsweise könnten die Erzeuger vor Tourenantritt jedes Mal zum Depot fahren und das Fahrzeug dort abholen. Eine andere Option wäre, dass immer der letzte Erzeuger das Fahrzeug mit nach Hause nimmt und der am nächsten gelegene Erzeuger die nachfolgende Tour übernimmt. Dass jeder Erzeuger bereits über einen Kleintransporter oder Van verfügt, wird als unwahrscheinlich erachtet, weshalb die gemeinsame Anschaffung eines geeigneten Transportfahrzeugs über die Regionalvermarktungsinitiative in jedem Fall eingeplant werden sollte.

Fahrzeugwahl: Größe und Antriebsart

Die Wahl des passendsten Fahrzeugs hängt stark von der Größe der Initiative ab. Der Van oder ein 5-7,5 t Kleintransporter haben sich im Rahmen der vorliegenden Dissertation als die besten Fahrzeuge erwiesen. In den kilometerabhängigen Kosten unterscheiden sie sich kaum. Wie bereits oben angesprochen (siehe Abschnitt 5.5.3 und 5.6) eignet sich der Van nicht für

den Transport größerer Mengen. Auf der anderen Seite führt der Umstieg auf ein größeres Fahrzeug aufgrund der Zeitrestriktion nicht zu einem größeren Transportvolumen bzw. zu größeren Touren bei der Wareneinsammlung. Der Kleintransporter wäre vor allem bei den Einsammlungstouren nicht ausgelastet, allerdings kann die Ware durch die Nutzung des größeren Fahrzeugs in weniger Touren ausgeliefert werden. Die Differenz der Auslieferungszeit zwischen der einmaligen Tour mit einem großen Transporter und der Unterteilung in drei Touren mit E-Vans beträgt eine Stunde (vier statt drei Stunden). Diese Zeitersparnis genügt, um die höheren Anschaffungskosten des Kleintransporters langfristig auszugleichen.

Der 7,5 t Kleintransporter wird generell bei den Einsammlungstouren nur zu maximal 29 % ausgelastet. Maßgebend dafür ist die breitflächige Verteilung der Erzeuger in Zusammenhang mit den angenommenen geringen Transportmengen je Erzeuger. Dadurch wird die maximale Fahrzeit überschritten, bevor das Fahrzeug innerhalb der Einsammlungstouren annähernd voll ausgelastet werden kann. Somit ist bei den Einsammlungstouren genügend Kapazität für größere Lieferungen frei. Würden die Produkte aller 58 Erzeuger in einer Tour ausgeliefert werden, könnte der Kleintransporter hingegen zu 81 % ausgelastet werden. Die haltbaren Produkte werden allerdings nur dreimal pro Monat an die Märkte geliefert. Bei einem reinen Transport der Frischeprodukte, welcher hingegen viermal pro Woche bzw. ca. sechzehnmal im Monat erfolgt, wird der 7,5 t Kleintransporter ebenfalls nur zu 24 % ausgelastet. Der Van ist hingegen mit 72 % bei den Auslieferungstouren und über 90 % bei den Einsammlungstouren bereits bei geringen Transportmengen gut ausgelastet und bietet wenig Flexibilität.

Daher sprechen die saisonalen Schwankungen für ein größeres Fahrzeug. Wie zu Beginn dieser Arbeit erklärt (vgl. Kapitel 1), werden zur Deckung des steigenden Bedarfs an regionalen Lebensmitteln in Deutschland zunehmend Produkte kleiner Erzeugerbetriebe in das gängige Sortiment des LEHs aufgenommen. Das impliziert, dass bei besonders guter Ernte oder einer Steigerung des Produktionsvolumens verarbeiteter Produkte, auch größere Mengen vom LEH abgenommen werden können. Mit einem größeren Fahrzeug kann eine Regionalvermarktungsinitiative einerseits deutlich flexibler auf langfristige Produktionszunahmen, saisonale Schwankungen und kurzfristige ungeplante Produktionsspitzen reagieren.

Andererseits sind die Emissionen des Kleintransporters deutlich höher als beim Van. Durch die größere Masse hat der Transporter durchschnittlich einen höheren Dieselverbrauch. Fährt der Erzeuger mit einem Diesel-PKW, ist die kooperative Tourenplanung, wie in der ökonomischen Bewertung, in jedem Fall vorteilhafter als die eigene Auslieferung. Bei einem Umstieg von der eigenen Auslieferung auf die kooperative Tourenplanung mit einem Elektro-Van können die Transport-Emissionen um 93 % reduziert werden. Mit dem Kleintransporter ist immerhin noch eine Verringerung von 65 % der fahrtbedingten Emissionen möglich.

Verfügt der Erzeuger allerdings bereits über ein Elektrofahrzeug zur eigenen Auslieferung, ist die kooperative Tourenplanung nicht immer emissionsärmer. Werden geringe Mengen transportiert, sollte die Initiative auf jeden Fall einen (Elektro-) Van zur Distribution der Ware nutzen. Die kooperative Tourenplanung mittels eines Diesel-Kleintransporters verursacht in jeder betrachteten Ausgestaltungsvariante höhere Emissionen als bei der eigenen Auslieferung mittels eines Elektro-PKWs. Lediglich in der oben präferierten Variante „Erz.-H2“ (100 Erzeuger mit haltbaren Produkten – zwei Schichten) sind die Transportemissionen fast

identisch (vergleiche Abschnitt 6.2). Allerdings kommt diese Ausgestaltungsvariante möglicherweise nicht für alle Regionalvermarktungsinitiativen infrage, da ein Zwei-Schicht-Betrieb ermöglicht werden muss.

Um die deutschen Klimaziele zu erreichen, müssen auch Emissionen im Verkehrs- und Transportsektor reduziert werden. Wie in Abschnitt 5.1 erläutert, soll dies vor allem durch eine Elektrifizierung des Verkehrssektors erreicht werden. Daher dürfen nur noch bis zum Jahr 2035 zugelassene PKW und leichte Nutzfahrzeuge (bis 3,5 t) sowie alle schweren Nutzfahrzeuge langfristig mit Verbrennungsmotoren fahren. Danach gilt die „Verordnung über CO₂-Normen für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge“ (Europäischer Rat, 2020). Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass die Erzeuger mittelfristig über PKW mit Elektroantrieb verfügen. Ob auch Kleintransporter aufgrund ihres höheren Verbrauchs voll-elektrisch praktikabel eingesetzt werden können, ist noch nicht umfassend geklärt.

Wie oben angesprochen, gelten mit erneuerbaren Energien erzeugte Kraftstoffe, so genannte eFuels, als Alternative für den Dieselantrieb (Bundesregierung, 2023b). Die Praxistauglichkeit und Realisierungsmöglichkeiten von eFuels werden noch kontrovers diskutiert, obwohl globale Erzeugungspotentiale grundsätzlich vorhanden sind (ADAC, 2023; Böff, 2023; Pfennig et al., 2021). Siebel (2021) stellt Ökobilanzen synthetischer Kraftstoffe und Brennstoffzellen vor. Der Artikel zeigt auf, unter welchen Bedingungen alternative Antriebsarten ökologisch vorteilhaft gegenüber konventionellen, fossilen Kraftstoffen eingesetzt werden können. Somit bieten sich zukünftig möglicherweise auch ökologische Alternativen zu dem Diesel-Kleintransporter.

Die Anschaffungskosten des Elektro-Vans sind zwar deutlich höher als die Anschaffungskosten des Diesel-Vans. Allerdings gleichen die aktuell hohen Dieselpreise diesen Nachteil wieder aus, sodass die Kostenfaktoren der beiden Fahrzeugtypen fast identisch sind. Der Anteil der variablen Kosten an den gesamten Fahrzeugkosten für den Diesel-Van betrug 20 % im Jahr 2018 und 27 % im Jahr 2022. Damit erhöhen sich die kilometerabhängigen Fahrzeugkosten um 9 ct/km im Jahr 2022. Die kumulierten Fahrzeugkosten für den Van steigen um über 7.000 € pro Jahr an. Bei einer kooperativen Tourenplanung mit 50 Erzeugern entfallen davon 140 € auf jeden Erzeuger. Durch die Verteuerung des Diesels schneidet der Elektro-Van im Jahr 2022 folglich aus Kostensicht besser ab als der Diesel-Van. Der Elektro-Van ist rund 8 ct/km günstiger als der Diesel-Van.

Um den oben beschriebenen Vorteilen der Flexibilität nachzukommen, werden möglicherweise größere Kapazitäten, als ein Van bieten kann, benötigt. Dem gegenüber stehen die Anforderungen der deutschen Klimaziele und die Erfüllung der SDGs, ohne die ein langfristiger Erfolg in den Nachhaltigkeitsbestrebungen der Regionalvermarktungsinitiative nicht gewährleistet werden kann.

Um alle Anforderungen an die Distribution der regionalen Lebensmitteldistribution erfüllen zu können, wird kleinen Regionalvermarktungsinitiativen von 50 bis 100 Erzeugern mit geringen Mengen klar dazu geraten, Elektro-Vans anzuschaffen. Es gibt zwei Möglichkeiten, um gewinnbringend arbeiten zu können:

Die erste Möglichkeit ist ein Verzicht auf die Einstellung von Fahrern und Lageristen. Auf diese Weise können Zeitersparnisse für die Erzeuger erzielt und Personalkosten, welche den

größten Anteil an den Transportkosten ausmachen, reduziert werden. **Die große Chance der Initiativen** besteht in diesem Fall darin, die **Erzeuger zu vereinen und Touren mit den vorhandenen Erzeugern als Fahrer und Lageristen zu koordinieren**. Wird kein Personal benötigt, weil sich die Erzeuger den Arbeitsaufwand teilen, können bei Bedarf mehrere Fahrzeuge angeschafft werden. Diese Fahrzeuge müssten nicht zwangsläufig dauerhaft am Depot parken. Sie könnten stattdessen im Einzugsgebiet der Initiative verteilt werden, sodass die Erzeuger vor dem Start einer Einsammlungstour nicht erst zum Depot fahren und das Fahrzeug abholen müssten, sondern zum näher gelegenen Standort des Lieferfahrzeugs fahren könnten. Die Voraussetzung ist, dass das Fahrzeug am Standort geladen werden kann. Zudem werden Zwischenladungen auf den Touren benötigt. Diese Zwischenladungen können mit Pausen verbunden werden.

Die zweite Möglichkeit umfasst die **Anschaffung eines Anhängers** für den Ausgleich von Kapazitätsspitzen. Ein Anhänger ist günstiger in der Anschaffung und im Unterhalt als ein zweiter oder dritter Van und liefert die notwendige Flexibilität zum Ausgleich von kurzfristigen und kurzzeitigen Kapazitätsschwankungen. Zudem erfordert diese Möglichkeit weniger Planungsaufwand als die erste Möglichkeit. Übernimmt ein eingestellter Fahrer die Transporte, muss dieser ab einer Fahrt von 4,5 h ein bis zwei Pausen von insgesamt mind. 45 min einlegen. Bei den Einsammlungstouren aller Produkte wird diese Zeit in der Regel überschritten, sodass ein Fahrer mindestens eine Pause einlegen muss. Diese Pause kann direkt mit der Ladung des E-Vans verbunden werden, sodass der Van zum Laden nicht zum Depot zurückkehren muss.

Im Vergleich ist Möglichkeit Eins am besten mit einer guten technischen Anwendung für die Fahrzeugnutzung, Standortkoordination sowie die Arbeitspläne zu praktizieren. Gerade ältere Personen sind möglicherweise mit zu fortschrittlicher Technik, die zudem teuer in der Anschaffung sein kann, überfordert. Daher könnte für viele kleine Initiativen die zweite Möglichkeit - zumindest für eine Übergangszeit - praktikabler sein als die Erste.

Grenzen der Dissertation

Die Grenzen dieser Dissertation liegen in den getroffenen Annahmen. Zu Beginn der Arbeit wurden Gespräche mit Stakeholdern und Experten aus der Praxis geführt, um die Anforderungen der Erzeuger, Märkte und Regionalvermarktungsinitiativen einschätzen zu können. Aus diesen Gesprächen konnten sinnvolle Transportmengen abgeleitet werden. Diese Transportmengen wurden im Rahmen der Szenarioanalyse variiert. So konnten auch die Effekte bei einer anderen Ausgangssituation aufgezeigt werden.

Die Fahrzeugkosten beziehen sich sehr stark auf die Jahreskilometerleistung. Dieser liegt die Definition der Regionalität von einem 100 km Radius zugrunde (siehe Abschnitt 2.1). Definiert eine Regionalvermarktungsinitiative den Radius enger oder weiter, liegen Erzeuger möglicherweise dichter beieinander oder weiter entfernt voneinander. Die Folge ist, dass sich Fahrwege verlängern. Aufgrund des Zeitaufwands zum Be- und Entladen an jedem Stopp ist die Variabilität in der Anzahl zu besuchender Knoten pro Tour begrenzt. **Dennoch hat der Vergleich der dichten und der weiten Erzeugerstruktur gezeigt, dass allein in einem 100 km Radius Zeitersparnisse von einer Stunde erzielt werden konnten**. Mit dieser Zeitersparnis

gehen auch Einsparungen in den Personalkosten einher. Durch die geänderte Erzeugerstruktur (dicht oder weit) kann sich auch die Jahreskilometerleistung ändern. Die Kilometersätze wurden konservativ angenommen. Die Jahreskilometerleistung, welche diesen Kostensätzen zugrunde liegt, wurde nach dem Lösen des Basisszenarios überarbeitet und angepasst. Im Anschluss an die Szenarioanalyse wurden die Annahmen nochmals überprüft und bestätigt.

Attraktivität der Teilnahme an der kooperativen Tourenplanung

Für Erzeuger, die nicht alle Märkte beliefern und dicht an einem Markt liegen, ist die Teilnahme ggf. weniger interessant als für andere. Will und kann ein Erzeuger aber alle Märkte, die mit der Regionalvermarktungsinitiative kooperieren, bedienen, ist die Teilnahme deutlich attraktiver. Zu einem einzelnen Markt fährt ein Erzeuger ggf. in jedem Fall mehrere Male in der Woche, um private Einkäufe zu erledigen. Dass in neun verschiedenen Märkten eingekauft wird, erscheint sehr unwahrscheinlich. Für diesen Fall konnte im Rahmen dieser Dissertation eine deutliche Zeit- und Kostenersparnis bewiesen werden.

In jedem Fall muss sich eine Regionalvermarktungsinitiative Gedanken über die **Kostendeckung der kooperativen Tourenplanung** machen. Die Kosten können auf verschiedene Weise unter den Erzeugern aufgeteilt werden. Es ist denkbar, dass die Distanzen zum Depot berücksichtigt werden. Je weiter ein Erzeuger vom Depot entfernt liegt, desto höher ist der Kostenanteil. Eine andere Möglichkeit wäre, diese Erzeuger zu mehr Schichten zu verpflichten als Erzeuger, die näher am Depot liegen. Man kann die Kosten auch an das Transportvolumen [Anzahl Kisten] oder den Warenwert der Produkte koppeln. Oder die Kosten werden nicht gewichtet und schlicht durch die Anzahl der Erzeuger geteilt. In jedem Fall sollte eine Option gefunden werden, die möglichst viele Erzeuger dazu motiviert an der kooperativen Tourenplanung mitzuwirken. Denn, wie bereits mehrfach erwähnt, sinken die Kosten (hier angenommen in Kosten je Kiste) je mehr Erzeuger teilnehmen.

Ausblick

An die eben beschriebene Problematik der Kostenverteilung sollte in einer zukünftigen Arbeit angeknüpft werden. Transparenz sowie eine faire Kostenverteilung sind besonders für die Motivation zur Teilnahme von Erzeugern mit geringer Zahlungsbereitschaft bedeutsam.

Wie bereits angesprochen, wird Initiativen aus Optimierungssicht dazu geraten, sich auszutauschen und ggf. Erzeuger-Mitglieder auszutauschen. Des Weiteren kann ein Zusammenschluss sinnvoll sein, um bestmöglich planen und oben diskutierte Anforderungen erfüllen zu können. Umfasst eine Initiative mindestens 100 Mitglieder, wird die kooperative Tourenplanung günstiger. Um möglichst viel Flexibilität zu schaffen, kann in weiteren Arbeiten der Einsatz von Mikro-Hubs geprüft werden. Je nach Art der Lagerware und Lagerdauer, müssten diese Hubs ggf. gekühlt werden und benötigen einen Stromanschluss. Ein großer Vorteil der Hubs ist, dass sie flexibel zu jeder Tageszeit angefahren werden können. Es ist denkbar, dass durch ihren Einsatz weitere Optimierungspotenziale zur Routengestaltung gefunden werden können.

Gerade bei der Belieferung des LEHs in Städten kann es sinnvoller sein, kleinere Depots am Stadtrand zu haben und von dort aus mit nur einem größeren Fahrzeug in die Stadt zu fahren. Aufgrund des möglicherweise stockenden Verkehrs in Städten wird nicht empfohlen, die

Gebiete von Initiativen um eine zentrale Großstadt herum zu definieren. Ein Depot müsste dann ggf. ebenfalls in dieser Großstadt liegen, was für die Anfahrt, Miete und Lagerbedingungen unvorteilhaft erscheint. Dieser letzte Aspekt könnte ebenfalls in einer weiteren Arbeit aufgegriffen werden.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde für die Szenarioanalyse nur die Karte von Niedersachsen verwendet. Da die Analyse die Ergebnisse des Fallbeispiels stützt, scheinen die Ergebnisse robust. Dennoch könnten in einer weiteren Arbeit noch andere Karten bzw. Regionen untersucht werden.

7 Fazit und Beantwortung der Forschungsfragen

Das übergeordnete Ziel dieser Dissertation war, den Regionalvermarktungsinitiativen eine fundierte Entscheidungsgrundlage zur Entwicklung einer geeigneten Auslieferungsstrategie aus Umwelt- und Kostenperspektive zu geben. Dabei sollte einerseits dem Umweltschutzbestreben der Verbraucher beim Kauf regionaler Produkte nachgekommen werden. Andererseits müssen die Kosten des Warentransportes möglichst geringgehalten werden, damit dieser für die Erzeuger wirtschaftlich ist. Somit stellten sich zwei wesentliche Forschungsfragen:

1. *Wie sollte eine kostengünstige Auslieferungsstrategie für die Erzeuger seitens der Regionalvermarktungsinitiativen gestaltet werden?*
2. *Wie unterscheiden sich die Strategien hinsichtlich ihrer Umweltfreundlichkeit?*

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden geeignete OR-Modelle ausgewählt, implementiert und für eine umfangreiche reale Fallstudie angewendet. Es konnte gezeigt werden, dass sich eine Umstrukturierung der Transporte regionaler Lebensmittel von einer Streckenbelieferung durch einzelne Erzeuger hin zu einer kooperativen Tourenplanung aus ökologischer und ökonomischer Sicht lohnt. Weiterhin wurde anhand eines Fallbeispiels sowie einer umfassenden Szenarioanalyse gezeigt, wie eine solche kooperative Tourenplanung möglichst optimal ausgestaltet werden kann.

Insgesamt können mit der kooperativen Tourenplanung Kosteneinsparungen von bis zu 80 % und eine Reduzierung der Transport bedingten Emissionen von bis zu 93 % realisiert werden. Werden im Durchschnitt nur geringe Mengen je Erzeuger transportiert, ist die Distribution der Frischeprodukte ca. 10 % teurer als die Distribution der haltbaren Produkte. Werden hingegen mittlere Mengen je Erzeuger abgeholt, ist der Kostenunterschied je Kiste deutlich geringer. Generell gilt, je größer die Initiative, desto flexibler ist die Tourenplanung. Eine hohe Flexibilität resultiert in niedrigeren Transportkosten. Weiterhin ist die Distribution günstiger, je mehr Mengen bei einem Erzeuger abgeholt werden.

Die Fahrzeit zwischen den Erzeugern ist bei geringen Abholmengen immer der restriktive Faktor. Auch mit steigender Erzeugerzahl können keine weiteren Stopps in die Touren integriert werden und somit ist keine weitere Optimierung der Einsammlungstouren aufgrund der Zeitrestriktion möglich. Alle Einsammlungstouren betragen unter gegebenen Annahmen unabhängig der Initiativen-Größe rund 8 h. Werden die Touren häufiger und kleiner, bei gleicher Erzeugerzahl, liegt dies an einem zu kleinen Fahrzeug.

Im Allgemeinen kann eine kleine Initiative bei wöchentlicher Auslieferung der haltbaren Produkte und täglicher Distribution der Frischeprodukte ca. 67 Erzeuger umfassen. Davon entfallen ca. 50 Erzeuger auf die haltbaren Produkte und 17 auf Frischeprodukte. Wächst eine Initiative, sollten im Ein-Schicht-Betrieb immer ca. 50 Erzeuger mit haltbarer Ware bzw. ca. 17 Erzeuger im Zwei-Schicht-Betrieb mit Frischeprodukten gebündelt werden. Für die Einsammlungstouren erweist sich der 3.5 t Van als das passendste Fahrzeug. Er kann in jedem Fall gut ausgelastet werden, bietet dadurch aber wenig Flexibilität um auf (saisonale) Schwankungen reagieren zu können. Bei den Auslieferungstouren hingegen ist der Van nicht immer ideal. Die

Anzahl benötigter Schichten pro einmalige Belieferung aller Märkte mit der gesamten Ware kann ggf. deutlich reduziert werden.

Würde der Erzeuger die Touren selbst mit einem Diesel-PKW fahren, ist die kooperative Tourenplanung in jedem Fall vorteilhafter als die eigene Auslieferung. Verfügt der Erzeuger bereits über ein Elektrofahrzeug zur eigenen Auslieferung, ist die kooperative Tourenplanung unter den Annahmen nicht immer emissionsärmer. Die Regionalvermarktungsinitiative sollte aus Umweltsicht anstreben, sofern möglich, (Elektro-) Vans zur Distribution der Ware zu nutzen. Die kooperative Tourenplanung mittels eines Kleintransporters verursacht in jeder betrachteten Strategie höhere Emissionen als bei der eigenen Auslieferung mittels eines Elektro-PKWs.

Im günstigsten Fall wird die Distribution für rund 100 Erzeuger in einem Zwei-Schicht-Betrieb mit einem Kleintransporter durchgeführt. Auf diese Weise kann gegenüber dem Ein-Schicht-Betrieb eine Reduktion des relativen Fahrtaufwands je Erzeuger von rund 20 % erzielt werden. Um Krankheits- und Urlaubszeiten zu überbrücken, müssen mindestens zwei Fahrer oder mehrere Erzeuger mit dem Transport beschäftigt werden. Diese können bei Bedarf zusätzlich Lagerarbeiten übernehmen.

Insgesamt wurde eine belastbare Entscheidungs- und Argumentationsgrundlage für Regionalvermarktungsinitiativen zur Umstrukturierung einzelner Warentransporte hin zu einer kooperativen Tourenplanung geschaffen. Für die Märkte können Prozesse vereinfacht und attraktiver gestaltet werden. Erzeuger profitieren von fachlicher Begleitung, Zeitersparnis durch Arbeitsteilung oder Arbeitsabgabe an gemeinschaftlich eingestelltes Personal und der Möglichkeit sich auf ihr Kerngeschäft zu konzentrieren. Damit wurden in dieser Arbeit erstmals passende OR-Modelle ausgewählt und so implementiert, dass sie auch von anderen Regionalvermarktungsinitiativen für ihre lokalen Bedingungen und Anforderungen genutzt werden können.

8 Literaturverzeichnis

- ADAC (2018) "Autokostenübersicht".
- ADAC (2023) *Synthetische Kraftstoffe: Sind E-Fuels die Zukunft der Mobilität?* [Online]. Verfügbar unter <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>.
- Ahrens, S. (2022) *Umsatzanteil von Konsumgütern mit Aspekten der Nachhaltigkeit im Lebensmittelhandel in Deutschland im Jahr 2021* [Online], Statista. Verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1041957/umfrage/umsatzanteil-nachhaltiger-konsumgueter-in-deutschland/>.
- Arnold, D, Isermann, H, Kuhn, A, Tempelmeier, H & Furmans, K (Hg.) (2008) *Handbuch Logistik*, 3. Aufl., Berlin [etc.], Springer.
- Baldacci, R., Toth, P. & Vigo, D. (2010) "Exact algorithms for routing problems under vehicle capacity constraints", *Annals of Operations Research*, Vol. 175, No. 1, S. 213–245.
- Baldi, M. M., Manerba, D., Perboli, G. & Tadei, R. (2019) "A Generalized Bin Packing Problem for parcel delivery in last-mile logistics", *European Journal of Operational Research*, Vol. 274, No. 3, S. 990–999.
- Bektaş, T. & Laporte, G. (2011) "The Pollution-Routing Problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, No. 8, S. 1232–1250.
- BFStrMG (2017) *Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen* (Bundesfernstraßenmautgesetz).
- BGL (2019) "Diselpreis-Information (Großverbraucher): Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung".
- Bloech, J. & Ihde, G. B. (1997) *Vahlens Großes Logistiklexikon*, München, Vahlen.
- BMEL (2018) *Deutschland, wie es isst – Der BMEL-Ernährungsreport 2018*.
- BMEL (2021) *Deutschland, wie es isst: Der BMEL-Ernährungsreport 2021* (auf Basis einer repräsentativen Befragung des Meinungsforschungsinstituts forsa).
- BMEL (2022) *Trend zur Steigerung der Nachfrage nach Bio-Produkten hält weiter an: Bundeslandwirtschaftsministerium veröffentlicht Ergebnisse des "Öko-Barometer 2021"* [Online], Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.
- BMUV (2023) "17 Nachhaltigkeitsziele – SDGs" [Online]. Verfügbar unter <https://www.bmuv.de/WS5613> (Abgerufen am 4 September 2023).
- Böff, M. (2023) "Wie sinnvoll sind E-Fuels?", *Tagesschau*, 13. März [Online]. Verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/efuels-kraftstoff-verbrennungsmotor-101.html>.
- Bundesministerium der Finanzen (2000) *AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AfA-Tabelle "AV")*, AKtenzeichen: IV D 2-S 1551-188/00, B/2-2-337/2000-S 1551 A, S 1551-88/00, Normen: § 193ff AO, § 7 Abs 1 EStG: *Juris* (Fassung vom 15.12.2000).
- Bundesnetzagentur & Bundeskartellamt (2023a) *Strompreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2022 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde): Strompreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland bis 2022*.

- Bundesnetzagentur & Bundeskartellamt (2023b) *Strompreise für Haushaltskunden in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2022 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde): Haushalte - Strompreise in Deutschland bis 2022*.
- Bundesregierung (2020) *Maßnahmen der Bundesregierung zur Bewältigung der COVID-19-Pandemie und zur Bewältigung ihrer Folgen: Maßnahmenpapier* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1747726/cf74bee34916f58545e0395c87d904fe/2020-04-27-zwbilanz-corona-data.pdf?download=1> (Abgerufen am 7 Juni 2023).
- Bundesregierung (2022) *Interview mit Dr. Janis Kluge: „Russland wird technologisch rückständiger werden“* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa/interview-janis-kluge-2073560>.
- Bundesregierung (2023a) *Einigung auf neue Sanktionen, Zehntes EU-Sanktionspaket gegen Russland* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/krieg-in-der-ukraine/eu-sanktionen-2007964> (Abgerufen am 6 Juni 2023).
- Bundesregierung (2023b) *Neuzugelassene Pkw ab 2035: EU-Umweltrat: Nur noch CO2-freifahren* [Online]. Verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa/verbrennermotoren-2058450> (Abgerufen am 9 Juni 2023).
- Bundesverband Regionalbewegung (2017) "Handbuch zur Regionalvermarktung: Praxisleitfaden für Regionalinitiativen: Strategien und Konzepte zur Vermarktung regionaler Lebensmittel".
- Bundesverband Regionalbewegung (2022) *Was ist Regional? DAS ist Regional! Regionalvermarktungsinitiativen: Netzwerk* [Online]. Verfügbar unter <https://www.regionalbewegung.de/index.php?id=netzwerk#c200> (Abgerufen am 8 März 2022).
- Bundesverband Regionalbewegung e. V. (2020a) *Leitbild: Die Arbeit der Regionalbewegung vor dem Hintergrund aktueller Herausforderungen* [Online]. Verfügbar unter <https://www.regionalbewegung.de/bewegung/leitbild/> (Abgerufen am 21 Juni 2020).
- Bundesverband Regionalbewegung e. V. (2020b) *Unsere Ziele: Umfassendes Konzept für regionale Strukturen* [Online]. Verfügbar unter <https://www.regionalbewegung.de/bewegung/ziele/> (Abgerufen am 6 Februar 2020).
- Buxel, H. (2017) *Schmeckt die Region?: Verbrauchererwartungen im Hinblick auf regionale Lebensmittel*.
- Buxel, H. (2018) *Regionalität aus Erzeugersicht: Vermarktung von regionalen Lebensmitteln durch Erzeuger und Verarbeiter: Ergebnisse einer Befragung* [Online], Frankfurt am Main. Verfügbar unter https://www.regionalbewegung.de/fileadmin/user_upload/2017/Bundestreffen/Vortraege/Plenum/Buxel__Regionalitaet_aus_Erzeugersicht.pdf (Abgerufen am 21 September 2018).
- Cordea, J.-F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.-Y. & Semet, F. (2002) "A Guide to Vehicle Routing Heuristics", *Journal of the Operational Research Society*, No. 53, S. 512–522.
- Cullinane, S. & Edwards, J. (2010) "Assessing the environmental impacts of freight transport", in Mc Kinnon, A., Cullinane, S., Browne, M. & Whiteing, A. (Hg.) *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*, London, Philadelphia, Kogan Page.

- Czech, D., Fahning, I. & Jürgens, K. (2002) "Ansatzpunkte für eine regionale Nahrungsmittelversorgung: Gutachten".
- Dantzig, G. B. & Ramser, J. H. (1959) "The Truck Dispatching Problem", *Management Science*, Vol. 6, No. 1, S. 80–91.
- (2018) Unveröffentlichtes Interview geführt von Praxisdaten, 2018.
- Demir, E., Bektaş, T. & Laporte, G. (2014a) "A review of recent research on green road freight transportation", *European Journal of Operational Research*, Vol. 237, No. 3, S. 775–793.
- Demir, E., Bektaş, T. & Laporte, G. (2014b) "The bi-objective Pollution-Routing Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 232, No. 3, S. 464–478.
- Desrochers, M, Lenstra, JK, Savelsbergh, MWP & Soumis, F (Hg.) (1998) *Vehicle Rrouting with Time Windows Optimization and Approximation*, North-Holland, Amsterdam, Elsevier Science Publisher B. V.
- Deutscher Bundestag (2016) *Dokumentation, Zum Begriff der Regionalität bei der Lebensmittelherzeugung* (Wissenschaftliche Dienste), 23. Aufl.
- Domschke, W. & Drexl, A. (1991) *Einführung in Operations Research*, 2. Aufl., Berlin, Springer.
- Domschke, W., Drexl, A., Klein, R. & Scholl, A. (2015) *Einführung in Operations Research* [Online], 9. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer Gabler. Verfügbar unter <http://www.springer.com/>.
- Domschke, W. & Scholl, A. (2010) *Logistik: Rundreisen und Touren*, 5. Aufl., München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Europäischer Rat (2020) "Fit für 55" [Online]. Verfügbar unter <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (Abgerufen am 9 Juni 2023).
- EWI (2014) "Ecological Transport, Information Tool for Worlwide Transports, Methodoloy and Data Update".
- Figiel, A. (2016) "Transportmanagement in der schnelldrehenden Konsumgüterindustrie. Entwicklung eines Gestaltungsansatzes zur Integration von Transport und Logistik", *Schriftenreihe Logistik der Technischen Universität Berlin, Band 32*.
- Fleischmann, B. & Gietz, M. (2008) "Transport- und Tourenplanung", in Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H. & Furmans, K. (Hg.) *Handbuch Logistik*, 3. Aufl., Berlin [etc.], Springer.
- Franceschetti, A., Honhon, D., van Woensel, T., Bektaş, T. & Laporte, G. (2013) "The time-dependent pollution-routing problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 56, S. 265–293.
- Geschmackstage Deutschland e.V. (2017a) "Umfrage zu bevorzugten Einkaufsstätten für regionale Lebensmittel in Deutschland".
- Geschmackstage Deutschland e.V. (2017b) "Umfrage zum Entfernungskriterium für regionale Produkte in Deutschland".
- Gevaers, R., van de Voorde, E. & Vanellander, T. (2014) "Cost Modelling and Simulation of Last-mile Characteristics in an Innovative B2C Supply Chain Environment with Implications on Urban Areas and Cities", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 125, S. 398–411.

- Gietz, M. (1994) *Computergestützte Tourenplanung mit zeitkritischen Restriktionen* [Online], Heidelberg, Physica-Verlag HD. Verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-11359-2>.
- Goeke, D. & Schneider, M. (2015) "Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles", *European Journal of Operational Research*, Vol. 245, No. 1, S. 81–99.
- Golden, B., Assad, A., Levy, L. & Gheysens, F. (1984) "The fleet size and mix vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 11, No. 1, S. 49–66.
- Google Developers (2022) *Google's Operations Research tools:: Route. Schedule. Plan. Assign. Pack. Solve. OR-Tools is fast and portable software for combinatorial optimization.* [Online]. Verfügbar unter <https://developers.google.com/optimization/> (Abgerufen am 17 März 2022).
- Gremmer, P., Hempel, C., Hamm, U. & Busch, C. (2016) "Zielkonflikt beim Lebensmitteleinkauf: Konventionell regional, ökologisch regional oder ökologisch aus entfernteren Regionen?".
- Gries, S. & Zelewski, S. (2015) "Wirtschaftlichkeit von E-Mobility für gewerbliche Güterverkehre der City Logistics: Verbundprojekt E-Route: Prozess-, Dispositions- und Routinganpassung für den Einsatz von Elektrofahrzeugen in Last-Mile-Verkehren von Logistik- und Handelsunternehmen in NRW, Förderkennzeichen: 300 223 802".
- Gudehus, T. (2010) *Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen*, 4. Aufl., Heidelberg, Springer.
- Gudehus, T. (2012) *Logistik 1: Grundlagen, Verfahren und Strategien*, 4. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer.
- Gurobi Optimization, L. L. (2022a) "Gurobi Optimizer Reference Manual" [Online]. Verfügbar unter <https://www.gurobi.com/> (Abgerufen am 4 September 2023).
- Gurobi Optimization, L. L. (2022b) "Gurobi Optimizer Reference Manual: MIPGap, Version 8.1, Language Python" [Online]. Verfügbar unter <https://www.gurobi.com/documentation/8.1/ref-man/mipgap2.html>.
- Hausladen, I., Porzig, N. & Reichert, M. (2010) "Nachhaltige Handels- und Logistikstrukturen für die Bereitstellung regionaler Produkte: Situation und Perspektiven", *HHL-Arbeitspapier Nr. 93, Leipzig Graduate School of Management*.
- Heidelberg Institut für Geoinformationstechnologie (2020) *Openroute Service: Matrix Service* [Online]. Verfügbar unter <https://openrouteservice.org/dev/#/api-docs/v2/matrix/{profile}/post> (Abgerufen am 1 April 2020).
- Heinze, K., Xouridas, S., Gebhardt, B. & Becker, T. (2014) "Verbraucherpräferenzen gegenüber regionalen Produkten: Ein Vergleich von West- und Ostdeutschland", *Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*, Band 92, Ausgabe 1.
- Hennig, A. & Schneider, W. (2018) *Supermarkt, Definition* [Online], Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim, Studiengang BWI Handel. Verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/supermarkt-48455/version-271708> (Abgerufen am 31 August 2018).
- Hermanowski, R., Liebl, B., Wirz, A., Klingmann, P., Mäder, R., Busch, C., Gider, D., Hamm, U., Janssen, M., Kilian, D. & Korn, A. (2014) *Regionalfenster: Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft (BÖLN)*, FiBL Deutschland e.V.

- IAQ (2022) "Entwicklung des gesetzlichen Mindestlohns 2015 - 2022: Institut für Arbeit und Qualifikation Universität Duisburg-Essen" [Online]. Verfügbar unter https://www.sozialpolitik-aktuell.de/files/sozialpolitik-aktuell/_Politikfelder/Einkommen-Armut/Datensammlung/PDF-Dateien/abblll4b.pdf (Abgerufen am 19 November 2023).
- IfH Köln (2019) "Einkauf und Konsum von Lebensmitteln -: Umsatzanteil von Konsumgütern mit Aspekten der Nachhaltigkeit im Lebensmittelhandel in Deutschland im Jahr 2018".
- IMB Deutschland GmbH (2023) *IBM CPLEX Optimizer: Die Vorteile von CPLEX Optimizer für Ihr Unternehmen* [Online]. Verfügbar unter <https://www.ibm.com/de-de/analytics/cplex-optimizer> (Abgerufen am 1 Oktober 2023).
- Interview (2018) C. Scharpenberg, 2018.
- Irnich, S., Schneider, M. & Vigo, D. (2014) "Four Variants of the Vehicle Routing Problem", in Toth, P. & Vigo, D. (Hg.) *Vehicle Routing: Methods, Problems, and Applications*, Philadelphia, PA, Society for Industrial and Applied Mathematics, S. 241–271.
- Kalenderpedia (2018) "Arbeitstage 2018".
- Kek, A. G., Cheu, R. L. & Meng, Q. (2008) "Distance-constrained capacitated vehicle routing problems with flexible assignment of start and end depots", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 47, 1-2, S. 140–152.
- Klöpffer, W. & Grahl, B. (2009) *Ökobilanz (LCA)*, Wiley.
- Knörr, W., Heidt, C., Gores, S. & Bergk, F. (2016) *Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014)* (Im Auftrag des Umweltbundesamtes).
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O. & Laporte, G. (2016) "Thirty years of heterogeneous vehicle routing", *European Journal of Operational Research*, Vol. 249, No. 1, S. 1–21.
- Kögl, H., Tietze, J., Möller, C., Reinhardt, G. & Mann, S. (2009) *Regionale Erzeugung, Verarbeitung und Vermarktung von Lebensmitteln: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Verbraucherschutz*.
- Kostbares Südniedersachsen e. V. (2019) *Unsere Regionalmarke "Kostbares Südniedersachsen"* [Online]. Verfügbar unter <https://www.kostbares-suedniedersachsen.de/regionalmarke/> (Abgerufen am 28 Oktober 2019).
- Laporte, G. (1992) "The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms", *European Journal of Operational Research*, No. 59, S. 345–358.
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., Jotzo, F., Krug, T., Lasco, R., Lee, Y.-Y., Masson-Delmotte, V., Meinshausen, M., Mintenbeck, K., Mokssit, A., Otto, F. E., Pathak, M., Pirani, A., Poloczanska, E., Pörtner, H.-O., Revi, A., Roberts, D. C., Roy, J., Ruane, A. C., Skea, J., Shukla, P. R., Slade, R., Slangen, A., Sokona, Y., Sörensson, A. A., Tignor, M., van Vuuren, D., Wei, Y.-M., Winkler, H., Zhai, P., Zommers, Z., Hourcade, J.-C., Johnson, F. X., Pachauri, S., Simpson, N. P., Singh, C., Thomas, A., Totin, E., Arias, P., Bustamante, M., Elgizouli, I., Flato, G., Howden, M., Méndez-Vallejo, C., Pereira, J. J., Pichs-Madruga, R., Rose, S. K., Saheb, Y., Sánchez Rodríguez, R., Ürge-

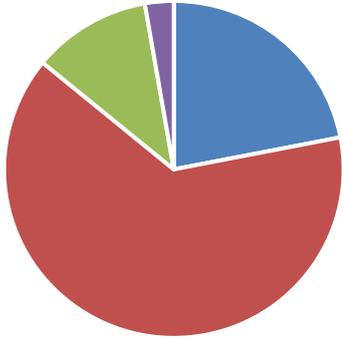
- Vorsatz, D., Xiao, C., Yassaa, N., Alegría, A., Armour, K., Bednar-Friedl, B., Blok, K., Cissé, G., Dentener, F., Eriksen, S., Fischer, E., Garner, G., Guivarch, C., Haasnoot, M., Hansen, G., Hauser, M., Hawkins, E., Hermans, T., Kopp, R., Leprince-Ringuet, N., Lewis, J., Ley, D., Ludden, C., Niamir, L., Nicholls, Z., Some, S., Szopa, S., Trewin, B., van der Wijst, K.-I., Winter, G., Witting, M., Birt, A., Ha, M., Kim, J., Haites, E. F., Jung, Y., Stavins, R., Orendain, D. J. A., Ignon, L., Park, S., Park, Y., Reisinger, A., Cammaramo, D., Fischlin, A., Fuglestvedt, J. S., Matthews, J. R., Péan, C., Barret, K. & Connors, S. L. (2023) *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.*
- Linke, R. (2014) *Optimierung der externen Transportkosten: Methoden zur Kosteneinsparung in der Distributionslogistik* [Online], Hamburg, Diplomica-Verlag. Verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=794841>.
- LZ (2020) "Stark wachsende Sortimente im Lebensmitteleinzelhandel in Deutschland im Jahr 2019: Statista Id 1114322".
- Marktleitung (2017) Unveröffentlichtes Interview geführt von Interview, 2017.
- Marktschwärmer (o. J.) *Marktschwärmer - Spielregeln* [Online]. Verfügbar unter <https://marktschwaermer.de/de-DE/p/network-convention> (Abgerufen am 31 August 2018).
- Miller, C. E., Tucker, A. W. & Zemlin, R. A. (1960) "Integer programming formulations and traveling salesman problems", *Journal of Association for Computing Machinery*, No. 7, S. 326–329.
- Mitarbeiterin für Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit (2018) Unveröffentlichtes Interview geführt von Interview, 2018.
- Neumann, K. & Morlock, M. (2004) *Operations Research*, 2. Aufl., München, Hanser.
- Nitsche, B. & Figiel, A. (2016) *Zukunftstrends der Lebensmittellogistik, Herausforderungen und Lösungsimpulse*, Technische Universität Berlin.
- OpenStreetMap (2020) *OpenStreetMap data license is ODbL* [Online]. Verfügbar unter <https://blog.openstreetmap.org/2012/09/12/openstreetmap-data-license-is-odbl/> (Abgerufen am 13 Juni 2023).
- Pawlik, V. (2022) *Anzahl der Personen in Deutschland, die beim Einkauf regionale Produkte aus der Heimat bevorzugen, von 2018 bis 2022: Umfrage in Deutschland zur Bevorzugung von Produkten aus der Region bis 2022* [Online], Statista. Verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/264557/umfrage/kaeufertypen-bevorzugung-von-produkten-aus-der-region/> (Abgerufen am 1 Juni 2023).
- Penker, M. & Schlich, E. (2015) "Nachhaltigkeit durch Regionalität? Pro und Contra", No. 2 [Online]. Verfügbar unter <https://www.forum-wirtschaftsethik.de/nachhaltigkeit-durch-regionalitaet-pro-und-contra/> (Abgerufen am 24 September 2023).
- PersonalMarkt (2011) *Jahresbruttoverdienste in der Logistik nach Tätigkeit und Unternehmensgröße im Jahr 2011 (in Tausend Euro): Datei zugänglich über Statista: ID 184773*, Deutschland.
- Persönliches Interview mit dem Vorstandsvorsitzenden eines regionalen Erzeugerverbandes (2017) Unveröffentlichtes Interview geführt von Interview, 2017.

- Pfennig, M., Bonin, M. von & Gerhardt, N. (2021) *Ptx-Atlas: Weltweite Potenziale für die Erzeugung von grünem Wasserstoff und klimaneutralen sythetischen Kraft- und Brennstoffen* (gefördert durch: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit; Förderkennzeichen: 16EM4005-1 | Förderprogramm Erneuerbar Mobil) [Online]. Verfügbar unter https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/FraunhoferIEE-PtX-Atlas_Hintergrundpapier_final.pdf (Abgerufen am 9 Juni 2023).
- ProBas (2023) *Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme* [Online] (Abgerufen am 31 Juli 2023).
- Python Software Foundation (2016) *Python: Python Language Reference (3.6)* [Computerprogramm]. Verfügbar unter <https://www.python.org/> (Abgerufen am 5 Juni 2022).
- Python-Vizualization (2020) *Folium* [Online]. Verfügbar unter <https://python-visualization.github.io/folium/> (Abgerufen am 13 Juni 2023).
- Rasku, Kärkkäinen & Musliu (2019) *Meta-Survey and Implementations of Classical Capacitated Vehicle Routing Heuristics with Reproduced Results In J. Rasku, Toward Automatic Customization of Vehicle Routing Systems (pp. 133-260). JYU Dissertations 113*, University of Jyväskylä, Finland.
- Rasku, Kärkkäinen & Musliu (2022) *yorak VeRyPy: Github-Code* [Online]. Verfügbar unter <https://github.com/yorak/VeRyPy> (Abgerufen am 5 Juni 2022).
- Regiomat (o. J.) *Regionale Produkte direkt vom Erzeuger – ohne Umwege und Zwischenverkauf!* [Online]. Verfügbar unter <https://www.regiomat.de/das-prinzip/> (Abgerufen am 31 August 2017).
- Regionale Erzeuger (2017) Unveröffentlichtes Interview geführt von Interview, 2017.
- Regionalfenster (2018) *Wo stehen wir und wie geht es weiter?* [Online]. Verfügbar unter <http://www.regionalfenster.de/traegerverein.html> (Abgerufen am 19 Februar 2018).
- Regionalvermarktung Niedersachsen (2018) *Definition von Regionalität* [Online], Beauftragt durch Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Verfügbar unter <http://www.regionalvermarktung-niedersachsen.de/was-ist-regionalitaet/was-ist-regionalitaet/definition-von-regionalitaet/> (Abgerufen am 31 August 2018).
- Reindl Leonard, Weckenbrock, P., Volz, P., van Midwoud, P. & Vohrer, M. (2012) "Logistik für nachhaltig erzeugte Lebensmittel in der Region Freiburg - Überblick und Optimierungsvorschläge".
- Robbins, J. A. & Turner, W. C. (1979) "CAWLIP - Clak and Wright-LIN Interchange Program for Vehicle Routing Problems", *Comput. and Indus. Engng*, No. 3, S. 89–100.
- Rötter, H. (2017) *Direkte Logistik für direkte Handelsbeziehungen*.
- Schäfer, M. & Kröger, M. (2010) "Between 'back to the roots' and marketing orientation – an overview of organic 'fair-regional' initiatives in Germany", *9th European IFSA Symposium, 4-7 July 2010, Vienna (Austria)*, S. 1749–1759.
- Scharpenberg, C. (2016) *Ökobilanzielle Bewertung von Produkten eines verpackungsfreien Supermarktes: Masterarbeit*.
- Schwartz, E. (2017) "Marktübersicht: Elektrotransporter", *handwerk-magazin*.

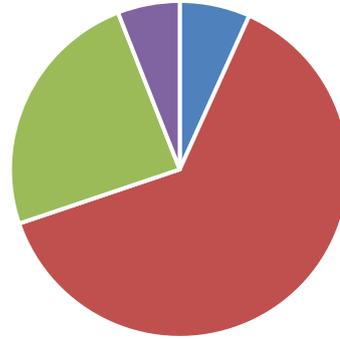
- Scora, G. & Barth, M. (2006) *Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM): version 3.0: User's guide* (Technical report).
- Senger Management GmbH (2022) *Senger Kühltransporter. Qualität. Einfach. Günstig. Obst & Gemüse das ganze Jahr sicher transportieren* [Online]. Verfügbar unter <https://www.sengerkuehltransporter.de/branchenloesungen/obst-und-gemuesetransport/> (Abgerufen am 7 März 2022).
- Siebel, T. (2021) "Ökobilanzen - Strittig, aber alternativlos", *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Vol. 123, No. 4, S. 8–13.
- Statista (2017) "Regionale Lebensmittel in Deutschland: Umfrage in dem Erhebungszeitraum 23. Juni bis 27. Juni 2017".
- Statista (2018) *Durchschnittlicher Bruttojahresverdienst von Berufskraftfahrern in Deutschland im Jahr 2018 (in Euro): Deutschland*.
- Statistisches Bundesamt (2021) *Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe und Bauernhöfe in Deutschland bis 2020 (in 1.000): Erhebungszeitraum 1975 bis 2020* [Online]. Verfügbar unter www.destatis.de.
- Statistisches Bundesamt & en2x (2023a) *INDUSTRIEN & MÄRKTE Strom- und Energiepreise in Deutschland: Durchschnittlicher Preis für Dieselkraftstoff in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2023 (Cent pro Liter)* (Durchschnittlicher Dieselpreis in Deutschland bis 2023).
- Statistisches Bundesamt & en2x (2023b) *INDUSTRIEN & MÄRKTE Strom- und Energiepreise in Deutschland: Durchschnittlicher Preis für Superbenzin in Deutschland in den Jahren 1972 bis 2023 (Cent pro Liter)* (Erhebungszeitraum 1972 bis 2023).
- Tarakji, Y. & Gniffke, P. (2023) "Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2021".
- UBA (2023) *Indikator: Emission von Treibhausgasen* [Online]. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-emission-von-treibhausgasen#wie-ist-die-entwicklung-zu-bewerten> (Abgerufen am 19 Dezember 2023).
- United Nations (2023) *The 17 Goals* [Online]. Verfügbar unter <https://sdgs.un.org/goals> (Abgerufen am 4 September 2023).
- Vahrenkamp, R. & Mattfeld, D. C. (2007) *Logistiknetzwerke: Modelle für Standortwahl und Tourenplanung*, Wiesbaden, Gabler Verlag.
- Verordnung (EU) Nr. 165/2014 (2014) *Verordnung (EU) Nr. 165/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates über Fahrtenschreiber im Straßenverkehr, zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 3821/85 des Rates über das Kontrollgerät im Straßenverkehr und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Harmonisierung bestimmter Sozialvorschriften im Straßenverkehr*.
- Vogt, M. (1998) *Tourenplanung in Ballungsgebieten: Entwicklung eines PC-gestützten Verfahrens* [Online], Wiesbaden, s.l., Deutscher Universitätsverlag. Verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-09047-2>.
- Warschun, M., Glusac, S., Rucker, M. & Günther, D. (2013) "Lebensmittel: Regional ist gefragter als bio: Ob Obst, Gemüse oder Fleisch: Konsumenten legen zunehmend Wert auf regionale Produkte. Eine Studie von A.T. Kearney belegt den Trend, analysiert das Kaufverhalten und zeigt Lebensmittelhändlern Strategien auf."

- Warschun, M., Liedtke, A., Glusac, S. & Günther, D. (2014) "Lebensmittel: Regional ist keine Eintagsfliege: Verbraucher legen weiterhin großen Wert auf regionale Lebensmittel. Die Neuauflage der A.T. Kearney-Studie gibt einen Marktüberblick und zeigt auf, wie Einzelhändler profitieren können."
- WBCSD & WRI (2011) *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard: Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard*.
- Weber, J. (2012) *Logistikkostenrechnung: Kosten-, Leistungs- und Erlösinformationen zur erfolgsorientierten Steuerung der Logistik*, 3. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer.
- Weiss, W. (2007) "Regionalität und regionale Lebensmittel", in *Ernährungsalltag im Wandel*, Vienna, Springer Vienna, S. 187–197.
- Wellenreuther, C. (2020) "Der Einfluss von COVID-19 auf die Rohstoffmärkte", *Wirtschaftsdienst, Zeitschrift für Wirtschaftspolitik*, Vol. 100, No. 8, S. 643–644 [Online]. Verfügbar unter <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2020/heft/8/beitrag/der-einfluss-von-covid-19-auf-die-rohstoffmaerkte.html> (Abgerufen am 7 Juni 2023).
- Wittenbrink, P. (1995) *Bündelungsstrategien der Speditionen im Bereich der City Logistik* (Eine ökonomische Analyse).
- Wittenbrink, P. (2008) Unveröffentlichtes Interview geführt von VVWL, 2008.
- Wittenbrink, P. (2011) *Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr: Grundlagen, Optimierungspotenziale, Green Logistics*, Wiesbaden, Gabler Verlag.

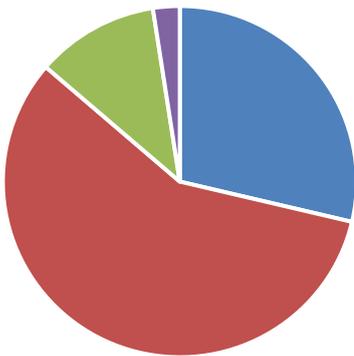
9 Anhang



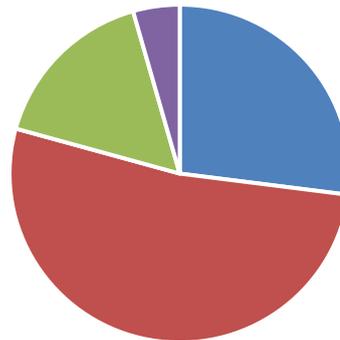
Anhang 1: Kostenverteilung PKW mit 130.000 km Fahrleistung pro Jahr



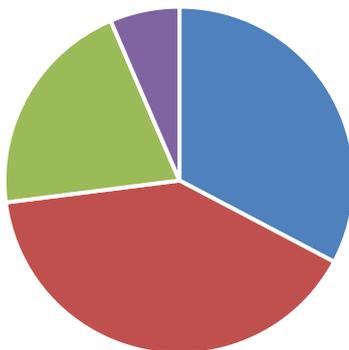
Anhang 2: Kostenverteilung Elektro-Van (3,5 t) mit 130.000 km Fahrleistung pro Jahr



Anhang 3: Kostenverteilung Diesel-Van (3,5 t) mit 130.000 km Fahrleistung pro Jahr



Anhang 4: Kostenverteilung Kleintransporter-Diesel (7,5 t) mit 130.000 km Fahrleistung pro Jahr



Anhang 5: Kostenverteilung Transporter Diesel (18 t)

- Anteil variable Kosten
- Anteil Personalkosten
- Anteil Fixkosten
- Anteil Gemeinkosten

	Dichte	Energiebedingte Faktoren		CO_{2äq}-Faktoren	
		TTW	WTW	TTW	WTW
Einheit	kg/l	MJ/kg	MJ/kg	kg CO_{2äq}/kg	kg CO_{2äq}/kg
Diesel	0.832	43.1	51.3	3.21	3.90
Benzin	0.745	43.2	50.5	3.25	3.86

Anhang 6: EN 16258 Standard-Umrechnungsfaktoren für Kraftstoffe

Anhang 7: Annahmen zur Fahrzeugkostenrechnung bei unterschiedlicher Jahresfahrleistung und Kraftstoffpreisen aus dem Jahr 2018

Kostengruppen und -positionen	PKW diesel (Caddy)	3.5 t elektro	3.5 t diesel	5-7.5 t diesel	12-18 t diesel	Einheit
Rollwagenstellplätze	35	54	54	144	324	
jährliche Fahrleistung	20 000	6 000	6 000	8 000	80 000	km/a
monatliche Fahrleistung	1 667	500	500	500	500	km/Monat
Fahrleistung bis zur Abschreibung	120 000	60 000	60 000	80 000	320 000	km
Einsatztage	248	248	248	248	248	d/a
Kraftstoffverbrauch, 50 % [l/km] bzw. [kWh/km]	0.070	0.165	0.132	0.137	0.216	l/km
Abschreibungszeitraum Fahrzeug	6	10	10	10	4	a
A: variable Kosten:	0.09	0.04	0.17	0.18	0.28	€/km
Kraftstoffpreis 2018 bzw. Strom	128.90	21.56	128.90	128.90	128.90	ct/l
Ad Blue	0.60	-	0.60	0.60	0.60	ct/l
Werkstatt- und Reifenkosten	73.78	31.63	31.63	500.00	500.00	€/Monat
Maut	-	-	-	-	350.00	€/Monat
B: Fahrpersonal:	1.72	7.44	7.44	7.44	7.44	€/km
	34 347.78	44 652.11	44 652.11	44 652.11	44 652.11	€/a
C: Fixe Kosten:	0.30	1.82	0.99	0.84	0.61	€/km
	6 082.67	10 940.00	5 960.00	6 110.00	22 235.00	€/a
Kaufpreis mit Kühlung ohne MwSt geschätzter	30 000.00	90 000.00	40 000.00	50 000.00	100 000.00	€
Wiederbeschaffungspreis geschätzter Verkaufserlös nach 200.000-400.000 km	34 500.00	103 500.00	46 000.00	57 500.00	115 000.00	€
5 000.00	10 000.00	5 000.00	15 000.00	35 000.00	€	
kalkulierte Abschreibungen (Nutzungsbaschreibungen)	0.25	1.56	0.69	0.54	0.25	€/km
Kalk. Abschr. Je Monat	409.72	781.67	344.17	356.67	1 672.92	€/Monat
Wertverlust nach ADAC			580.58		-	€/Monat
Steuern und Versicherung	97.17	130.00	152.50	152.50	180.00	€/Monat
Fahrtenschreiber	0	300.00	300.00	300.00	300.00	€
D: Gemeinkosten:	0.07	0.70	0.32	0.34	0.07	€/km
kalk. Zinsen	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%	%
Zinskosten	1 470.00	4 200.00	1 890.00	2 730.00	5 670.00	€/a
variable Kosten:	0.09	0.04	0.17	0.18	0.28	€/km
Personalkosten:	1.72	7.44	7.44	7.44	7.44	€/km
Fixkosten:	0.30	1.82	0.99	0.84	0.61	€/km
Gemeinkosten:	0.07	0.70	0.32	0.34	0.07	€/km
Fahrzeugkosten gesamt:	2.19	10.00	8.92	8.80	8.40	€/km

Anhang 8: Annahmen zur Fahrzeugkostenrechnung bei 80.000 km Jahresfahrleistung und Kraftstoffpreisen aus dem Jahr 2018

Kostengruppen und -positionen	PKW diesel (Caddy)	3.5 t elektro	3.5 t diesel	5 - 7.5 t diesel	12 -18 t diesel	Einheit
Rollwagenstellplätze	35	54	54	144	324	
jährliche Fahrleistung	80 000	80 000	80 000	80 000	80 000	km/a
monatliche Fahrleistung	6 667	6 667	6 667	6 667	6 667	km/Monat
Fahrleistung bis zur Abschreibung	480 000	480 000	480 000	480 000	480 000	km
Einsatztage	248	248	248	248	248	d/a
Kraftstoffverbrauch, 50 % [l/km] bzw. [kWh/km]	0.070	0.165	0.132	0.137	0.216	l/km
Abschreibungszeitraum Fahrzeug	6	6	6	6	6	a
A: variable Kosten:	0.09	0.037	0.17	0.18	0.28	€/km
Kraftstoffpreis Diesel 2018	128.90	21.56	128.90	128.90	128.90	ct/l
Ad Blue	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	ct/l
Werkstatt- und Reifenkosten	295.11	421.78	421.78	500.00	500.00	€/Monat
Maut	-	-	-	-	350.00	€/Monat
B: Fahrpersonal:	0.43	0.56	0.56	0.56	0.56	€/km
	34 347.78	44 652.11	44 652.11	44 652.11	44 652.11	€/a
	20.82	27.06	27.06	27.06	27.06	€/h
C: Fixe Kosten:	0.08	0.21	0.11	0.11	0.19	€/km
	6 082.67	17 193.33	8 713.33	8 963.33	15 543.33	€/a
Kaufpreis mit Kühlung ohne MwSt:	30 000.00	90 000.00	40 000.00	50 000.00	100 000.00	€
geschätzter Wiederbeschaffungspreis	34 500.00	103 500.00	46 000.00	57 500.00	115 000.00	€
geschätzter Verkaufserlös nach 200.000-400.000 km	5 000.00	10 000.00	5 000.00	15 000.00	35 000.00	€
kalkulierte Abschreibungen (Nutzungsabschreibungen)	0.06	0.20	0.09	0.09	0.17	€/km
Kalk. Abschr. Je Monat	409.72	1 302.78	573.61	594.44	1 115.28	€/Monat
Wertverlust nach ADAC (=Abschreibung)			580.58		-	€/Monat
Steuern und Versicherung:	97.17	130.00	152.50	152.50	180.00	€/Monat
Fahrtenschreiber:	0	300.00	300.00	300.00	300.00	€
D: Gemeinkosten:	0.02	0.05	0.02	0.03	0.07	€/km
kalk. Zinsen	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%	%
Zinskosten	1 470.00	4 200.00	1 890.00	2 730.00	5 670.00	€/a
variable Kosten:	0.09	0.04	0.17	0.18	0.28	€/km
Personalkosten:	0.43	0.56	0.56	0.56	0.56	€/km
Fixkosten:	0.08	0.21	0.11	0.11	0.19	€/km
Gemeinkosten:	0.02	0.05	0.02	0.03	0.07	€/km
Fahrzeugkosten gesamt:	0.61	0.86	0.86	0.88	1.10	€/km
Anteil variable Kosten	14.8%	4.2%	19.8%	20.1%	25.4%	
Anteil Personalkosten	69.9%	64.7%	64.8%	63.3%	50.6%	
Anteil Fixkosten	12.4%	24.9%	12.6%	12.7%	17.6%	
Anteil Gemeinkosten	3.0%	6.1%	2.7%	3.9%	6.4%	
Fahrzeugkosten gesamt ohne Personal:	0.19	0.30	0.30	0.32	0.54	€/km

Anhang 9: Annahmen zur Fahrzeugkostenrechnung bei 80.000 km Jahresfahrleistung und Kraftstoffpreisen aus dem Jahr 2022

Kostengruppen und -positionen	PKW diesel (Caddy)	3.5 t elektro	3.5 t diesel	5 - 7.5 t diesel	12 -18 t diesel	Einheit
Rollwagenstellplätze	35	54	54	144	324	
jährliche Fahrleistung	80 000	80 000	80 000	80 000	80 000	km/a
monatliche Fahrleistung	6 667	6 667	6 667	6 667	6 667	km/Monat
Fahrleistung bis zur Abschreibung	480 000	480 000	480 000	480 000	480 000	km
Einsatztage	248	248	248	248	248	d/a
Kraftstoffverbrauch, 50 % [l/km] bzw. [kWh/km]	0.070	0.165	0.132	0.137	0.216	l/km
Abschreibungszeitraum Fahrzeug	6	6	6	6	6	a
A: variable Kosten:	0.14	0.043	0.26	0.27	0.42	€/km
Kraftstoffpreis 2018	196.00	25.65	196.00	196.00	196.00	ct/l bzw. ct/kWh
Ad Blue	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	ct/l
Werkstatt- und Reifenkosten	295.11	421.78	421.78	500.00	500.00	€/Monat
Maut	-	-	-	-	350.00	€/Monat
B: Fahrpersonal:	0.43	0.56	0.56	0.56	0.56	€/km
	34 347.78	44 652.11	44 652.11	44 652.11	44 652.11	€/a
	20.82	27.06	27.06	27.06	27.06	€/h
C: Fixe Kosten:	0.08	0.21	0.11	0.11	0.19	€/km
	6 082.67	17 193.33	8 713.33	8 963.33	15 543.33	€/a
Kaufpreis mit Kühlung ohne MwSt geschätzter	30 000.00	90 000.00	40 000.00	50 000.00	100 000.00	€
Wiederbeschaffungspreis geschätzter Verkaufserlös nach 200.000-400.000 km	34 500.00	103 500.00	46 000.00	57 500.00	115 000.00	€
kalkulierte Abschreibungen (Nutzungsabschreibungen)	5 000.00	10 000.00	5 000.00	15 000.00	35 000.00	€
(Nutzungsabschreibungen)	0.06	0.20	0.09	0.09	0.17	€/km
Kalk. Abschr. Je Monat	409.72	1 302.78	573.61	594.44	1 115.28	€/Monat
Wertverlust nach ADAC			580.58		-	€/Monat
Steuern und Versicherung	97.17	130.00	152.50	152.50	180.00	€/Monat
Fahrtenschreiber	0	300.00	300.00	300.00	300.00	€
D: Gemeinkosten:	0.02	0.05	0.02	0.03	0.07	€/km
kalk. Zinsen	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%	%
Zinskosten	1 470.00	4 200.00	1 890.00	2 730.00	5 670.00	€/a
variable Kosten:	0.14	0.04	0.26	0.27	0.42	€/km
Personalkosten:	0.43	0.56	0.56	0.56	0.56	€/km
Fixkosten:	0.08	0.21	0.11	0.11	0.19	€/km
Gemeinkosten:	0.02	0.05	0.02	0.03	0.07	€/km
Fahrzeugkosten gesamt:	0.66	0.87	0.95	0.97	1.25	€/km
Anteil variable Kosten	20.8%	5.0%	27.3%	27.7%	34.0%	
Anteil Personalkosten	64.9%	64.2%	58.7%	57.3%	44.7%	
Anteil Fixkosten	11.5%	24.7%	11.5%	11.5%	15.6%	
Anteil Gemeinkosten	2.8%	6.0%	2.5%	3.5%	5.7%	
Fahrzeugkosten gesamt ohne Personal:	0.23	0.31	0.39	0.42	0.69	€/km

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Diese Dissertation wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

DOI: 10.17185/duepublico/82210

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20240819-145622-2

Alle Rechte vorbehalten.