

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Green Routing: Vehicle Routing mit gemischten Flotten und innerstädtlichen
Mautzonen - Kosten vs. Emissionen

verfasst von | submitted by

Maja Gajda BSc

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien | Vienna, 2025

Studienkennzahl lt. Studienblatt |
Degree programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 066 915

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree
programme as it appears on the student
record sheet:

Masterstudium Betriebswirtschaft

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Jan Fabian Ehmke

Abstract

By 2050, the European Union wants to be climate neutral. The sale of new passenger automobiles and light commercial vehicles with internal combustion engines will be prohibited started in 2035 as part of this goal. To facilitate the transition to zero-emission vehicles for both private individuals and businesses, the European Parliament and member states have introduced a range of supportive measures, including tax incentives and subsidies for the purchase of electric vehicles for both personal and commercial use (European Commission, 2024).

With increasing urbanization and growing demands for low-emission logistics solutions, the composition of vehicle fleets is undergoing a transformation. Against this backdrop, the present thesis addresses several central research questions. First, it investigates whether the operating costs of a fully electric fleet in an urban environment, assuming the implementation of a congestion charge, are indeed lower than those of a conventional diesel fleet. Second, it evaluates the economically most efficient fleet composition under urban conditions, assessing whether a homogeneous fleet (consisting exclusively of diesel or electric vehicles) or a mixed fleet offers greater cost-efficiency. Third, it examines the extent to which selecting an economically optimal fleet configuration can also lead to a significant reduction in CO₂ emissions compared to a scenario without urban tolls.

A Mixed Fleet Vehicle Routing Problem, based on the models developed by Goecke & Schneider (2015) and Mohammadbagher & Torabi (2022), was adapted and extended to incorporate urban congestion charges. This modified version, termed the Mixed Fleet Vehicle Routing Problem with Congestion Prices (MFVRPCP), was implemented using the FICO Xpress Mosel Solver. The model includes hypothetical congestion fees for the city of Vienna and uses real-world data from 46 customers located across different districts of the city. Various scenarios were simulated and comparatively analyzed within the modeling framework. The results indicate that mixed fleets can be advantageous both economically and ecologically, especially when vehicle allocation and charging infrastructure are strategically optimized. Furthermore, the findings suggest that urban congestion pricing can serve as an effective policy instrument to promote more sustainable fleet structures.

Kurzfassung

Das Ziel der Europäischen Union ist es, bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen. Um diesem Ziel näherzukommen, wird ab 2035 ein Verkaufsverbot für neue Pkw und leichte Nutzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor in Kraft treten. Um den Übergang zu emissionsfreien Fahrzeugen sowohl für Privatpersonen als auch für Unternehmen zu erleichtern, haben das Europäische Parlament und die Mitgliedstaaten eine Reihe von Maßnahmen eingeführt – darunter Steuererleichterungen und Förderprogramme für den Erwerb von Elektrofahrzeugen im privaten wie auch im gewerblichen Bereich (European Commission, 2024).

Mit dem fortschreitenden Urbanisierungsgrad und den steigenden Anforderungen an emissionsarme Logistiklösungen verändert sich die Zusammensetzung von Fahrzeugflotten zunehmend. Vor diesem Hintergrund geht die vorliegende Arbeit mehreren zentralen Fragestellungen nach. Erstens wird untersucht, ob die Betriebskosten einer rein elektrischen Flotte im städtischen Raum – unter der Annahme eines innerstädtischen Mautsystems – tatsächlich niedriger ausfallen als bei einer konventionellen Dieselflotte. Zweitens steht die Analyse der ökonomisch effizientesten Flottenzusammensetzung im Vordergrund: Es wird bewertet, ob eine homogene Flotte (bestehend ausschließlich aus Diesel- oder Elektrofahrzeugen) oder eine gemischte Flotte unter städtischen Rahmenbedingungen kostengünstiger ist. Drittens wird der Frage nachgegangen, inwieweit sich durch die Wahl einer wirtschaftlich optimalen Flottenkonfiguration auch eine signifikante Reduktion der CO₂-Emissionen im Vergleich zu einem Szenario ohne urbane Maut erzielen lässt.

Ein Mixed Fleet Vehicle Routing Problem, das auf den Arbeiten von Goecke & Schneider (2015) sowie Mohammadbagher & Torabi (2022) basiert, wurde modifiziert und um einen neuen Variantenansatz erweitert, der die Einführung urbaner Mautgebühren berücksichtigt. Dieses Mixed Fleet Vehicle Routing Problem with Congestion Prices (MFVRPCP) wurde im FICO Xpress Mosel Solver implementiert. Dabei wurden fiktive innerstädtische Mautkosten für Wien modelliert und reale Daten von 46 Kunden, die in verschiedenen Wiener Bezirken ansässig sind, verwendet. Im Rahmen dieser Modellierung wurden verschiedene Szenarien simuliert und vergleichend analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass gemischte Flotten – insbesondere bei gezielter Optimierung der Fahrzeugdisposition und

Ladeinfrastruktur – sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Perspektive vorteilhaft sein können. Darüber hinaus lässt sich feststellen, dass urbane Mautsysteme einen relevanten steuernden Einfluss ausüben und als wirkungsvolles Instrument zur Förderung nachhaltigerer Flottenstrukturen dienen können.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
Kurzfassung.....	3
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
1. Einleitung	10
2. Tendenz des Flottenwachstums	13
3. Vehicle Routing Problem	18
3.1 Literaturübersicht.....	19
3.2 Formulierung des VRP-Problems	21
3.3 Gemischte Flotte	23
4. Innerstädtische Verkehrskonzepte.....	25
4.1. Stadtmaut	26
4.2. Umweltzonen.....	28
4.3. Zufahrtsbeschränkungen	34
5. Beschreibung des verwendeten Models	36
6. Case Study	42
6.1 Untersuchungsaufbau	45
6.2 Ergebnisse der Untersuchung	47
6.2.1 Vergleich der täglichen Betriebskosten und Emissionen bei unterschiedlichen Flottenzusammensetzungen.....	50
6.2.2 Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Gewichtungen von Zielparametern auf die Routenplanung	53
6.2.3 Modellvariante mit angepassten Mautgebühren	57
6.2.4 Auswirkungen einer erhöhten Ladekapazität von Elektrofahrzeugen auf Routenplanung und Flottenkosten.....	60
6.2.5 Homogene Fahrzeugflotte	62
6.2.6 Auswirkung städtischer Gebühren auf Emissionen und Kostenstruktur in gemischten Flottenmodellen.....	70
7. Zusammenfassung	74
Literaturverzeichnis	76
Anhänge	84
Anhang A: Kfz-Neuzulassungen.....	84
Anhang B: E-Ladestationen	85

• In Österreich	85
• In Wien	87
Anhang C: Standortlisten der Instanzen	88
Anhang D: Vollständiger Code des MFVRPCP in Fico Xpress Mosel	91

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Anzahl der Neuzulassungen von Lastkraftwagen je nach Klasse und Jahr, anhand von Daten der Statistik Austria (Statistik Austria, 2025).....	15
Abbildung 2 Traveling Salesman Problem vs Vehicle Routing Problem (Herdianti, et al., 2021).....	19
Abbildung 3 Sanierungsgebiet der Niederösterreich (Amt der NÖ Landesregierung, 2023)	31
Abbildung 4 Sanierungsgebiete in Steiermark, LGBl. Nr. 2/2012	32
Abbildung 5 Sanierungsgebiete in Burgenland, LGBl Nr. 2/2017	33
Abbildung 6 Mautzonen in Wien	43
Abbildung 7 Anzahl der Kunden pro Bezirk, basierend auf Daten von hofer.at (Hofer, 2023)	44
Abbildung 8 Gesamtkosten der gemischten Flotte bei fester Anzahl von Dieselfahrzeugen.....	52
Abbildung 9 Gesamtemissionen der gemischten Flotte bei fester Anzahl von Dieselfahrzeugen.....	53
Abbildung 10 Routenplanung für die homogene Elektroflotte.....	67
Abbildung 11 Routenplanung für die homogene Dieselflotte	69
Abbildung 12 Optimierte Routen Nr. 4 und 5 für Dieselfahrzeuge	70
Abbildung 13 Vergleich der Anzahl an E-Ladepunkten 2023 und 2025 (Bundesverband Elektromobilität Österreich, 2025)	86
Abbildung 14 Anzahl der E-Ladepunkten in Wien (Stadt Wien, 2025).....	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich der Gewichtungsszenarien hinsichtlich CO ₂ -Emissionen, Betriebskosten und städtischer Gebühren im Mix Fleet Vehicle Routing Problem Modell	57
Tabelle 2 Vergleich zweier städtischer Gebührensysteme	59
Tabelle 3 Modelllösung nach Anpassung der Ladekapazität von Elektrofahrzeugen	62
Tabelle 4 Vergleich der Lösungen des Mix Fleet Vehicle Routing Problems mit und ohne städtische Gebühren.....	73
Tabelle 5 Vergleich der Anzahl der Kfz-Neuzulassungen in den Jahren 2020–2024 (Statistik Austria, 2025).....	84
Tabelle 6 Adresslisten der getesteten Instanzen	89
Tabelle 7 Kundenaufteilung nach Wiener Mautzonen	90

Abkürzungsverzeichnis

CO₂ – Carbon Dioxide

CVRP- Capacitated Vehicle Routing Problem

DARP- Dial-a-Ride-Problem

EV- Elektrofahrzeuge

E-FSMFTW- Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations

ETL- Express Toll Lane

E-VRPTW- Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows

HOT-Spur – High Occupancy Toll Lane

HOV-Spur- High Occupancy Vehicle Lane

HFVRP- Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem

LEZ- Low Emission Zone

LKW- Lastkraftwagen

MFVRPCP- Mixed Fleet Vehicle Routing Problem with Congestion Prices

MTSP- Multi-Traveling Salesman Problem

PDP- Pickup and Delivery Problem

PKW- Personenkraftwagen

TSP- Traveling Salesman Problem

VRP- Vehicle Routing Problem

1. Einleitung

Die Problematik der Luftverschmutzung und fortschreitende Klimawandel stellt seit mehreren Jahren ein zentrales umweltpolitisches Thema in Europa dar. Insbesondere in städtischen Räumen tragen motorisierte Fahrzeuge erheblich zur Luftbelastung bei. Neben Feinstaub und Ruß, die als sichtbare Partikel auftreten, spielen gasförmige Schadstoffe wie Stickoxide (NO_x) eine zentrale Rolle. Diese stehen in direktem Zusammenhang mit chronischen Atemwegserkrankungen und gelten als mitverantwortlich für die Entstehung bestimmter Krebsarten (European Environment Agency, 2022). Darüber hinaus trägt der Straßenverkehr in erheblichem Maße zur Emission von Kohlendioxid (CO_2) bei – einem Treibhausgas, das wesentlich zur Erderwärmung und somit zur langfristigen Veränderung des globalen Klimas beiträgt. Der Ausbau nachhaltiger Mobilitätskonzepte sowie die Förderung emissionsarmer Technologien sind daher essenzielle Bestandteile kommunaler und nationaler Klimaschutzstrategien. Die Langzeitstrategie der Europäischen Union sieht vor, dass Europa bis 2050 klimaneutral wird. Dieses Ziel ist im „Zero Pollution Action Plan“ der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2021 dargelegt (Europäische Kommission, 2021). Bereits im Dezember 2019 wurde ein grundlegender Wandel im europäischen Klimarecht eingeleitet, der im Rahmen des Legislativpakets „Fit for 55“ eine Anhebung des Emissionsreduktionsziels bis 2030 von ursprünglich 40 % auf mindestens 55 % vorsieht. Besonders hervorzuheben ist, dass Pkw und leichte Nutzfahrzeuge derzeit etwa 15 % der gesamten CO_2 -Emissionen in Europa verursachen. Vor diesem Hintergrund veröffentlichte die Europäische Kommission im Juli 2025 einen neuen Vorschlag zur weiteren Emissionsminderung, der eine Reduktion der CO_2 -Emissionen bis 2040 um bis zu 90 % anstrebt (Europäische Kommission in Polen, 2025).

Das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie hat die "Österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie" erarbeitet, und gemäß dieser Strategie hat sich Österreich das Jahr 2040 als Ziel gesetzt, um eine umweltneutrale Position zu erreichen (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, 2022). Der Verkehrssektor ist für über die Hälfte der weltweiten Nachfrage nach Erdöl verantwortlich und trägt etwa ein Viertel der globalen CO_2 -Emissionen aus der Verbrennung von Kraftstoff bei (Eurostat Statistics Explained, 2023), (Europäisches Parlament, 2023). Die Veränderungen im Verkehrsbereich sind daher

von entscheidender Bedeutung für den globalen Transformationsprozess des Energiesektors. Die Reduzierung von Emissionen hängt nicht nur von der Art des Fahrzeugs ab, sondern vor allem auch von der Energiequelle, aus der die Energie gewonnen und für den Antrieb von Fahrzeugen verwendet wird. Sie hängt daher wesentlich von dem Anteil erneuerbarer Energiequellen an der Energieerzeugung im jeweiligen Land ab. Aus diesem Grund fokussiert sich meine Arbeit auf die Darstellung der Trends bei der Erweiterung der Flotte im Bereich nachhaltiger Verkehrsmittel. Der Übergang zu nachhaltigem Verkehr ist aus einer Vielzahl überzeugender Gründe von herausragender Bedeutung. Fahrzeuge, die auf umweltfreundlichen Antriebstechnologien basieren, wie beispielsweise Elektrofahrzeuge, verursachen im Betrieb keine direkten Emissionen klimarelevanter Gase. Ihr Einsatz gilt insbesondere dann als umweltschonend, wenn sie mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrieben werden (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz (BMUV), 2022). Damit tragen sie maßgeblich zur Verbesserung der Luftqualität in urbanen Räumen bei und verringern zugleich den Ausstoß von Treibhausgasen, insbesondere von Kohlendioxid, was wiederum eine zentrale Rolle bei der Bekämpfung sowohl des Klimawandels als auch der zunehmenden Luftverschmutzung spielt.

Basierend auf dem zunehmenden Bedarf an nachhaltigen und wirtschaftlich tragfähigen Logistiklösungen in urbanen Räumen, ergeben sich für diese Masterarbeit mehrere zentrale Forschungsfragen. Zunächst wird untersucht, ob die Betriebskosten einer rein elektrischen Fahrzeugflotte im Vergleich zu einer konventionellen Dieselflotte unter der Annahme eines innerstädtischen Mautsystems – wie es hypothetisch für Wien modelliert wurde – tatsächlich geringer ausfallen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Analyse der optimalen Flottenzusammensetzung unter gegebenen städtischen Rahmenbedingungen: Es wird evaluiert, ob eine homogene Flotte (nur Diesel oder nur Elektrofahrzeuge) oder eine gemischte Flotte hinsichtlich der Gesamtkosten die effizienteste Variante darstellt. Schließlich wird der Frage nachgegangen, inwieweit durch die Wahl der wirtschaftlich sinnvollsten Flottenkonfiguration auch eine signifikante Reduktion von CO₂ Emissionen gegenüber einem Szenario ohne städtische Maut erreicht werden kann. Ziel ist es, einen Beitrag zur Diskussion über mögliche verkehrs- und umweltpolitische Steuerungsmaßnahmen im urbanen Lieferverkehr zu leisten.

Die Arbeit gliedert sich in acht Kapitel:

Kapitel 2 analysiert die Tendenzen des Flottenwachstums in Österreich anhand statistischer Daten. Es werden aktuelle Entwicklungen in der Zusammensetzung und Elektrifizierung der Fahrzeugflotten dargestellt.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit dem Vehicle Routing Problem (VRP). Neben einer Literaturübersicht werden verschiedene Modellvarianten – einschließlich heterogener Flotten – vorgestellt und mathematisch formuliert.

Kapitel 4 beleuchtet aktuelle innerstädtische Verkehrskonzepte, die Einfluss auf die Routenwahl und Flottenstrategie haben. Dazu zählen unter anderem Stadtmaut, Umweltzonen und Zufahrtsbeschränkungen.

Kapitel 5 beschreibt die verwendete Modellstruktur, die für die nachfolgende Analyse zum Einsatz kommt. Hier werden die Modellannahmen, Parameter sowie methodischen Grundlagen dargelegt.

Kapitel 6 befasst sich mit einer praxisnahen Fallstudie, deren Ergebnisse anschließend ausführlich ausgewertet und besprochen werden. Dabei stehen unterschiedliche Zusammensetzungen von Fahrzeugflotten und deren Auswirkungen im Fokus. Auch der Einfluss städtischer Gebühren auf Emissionen und Kosten wird untersucht. Darüber hinaus werden weitere relevante Aspekte berücksichtigt, um ein ganzheitliches Bild der Fragestellung zu erhalten.

Kapitel 7 fasst die zentralen Aussagen der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen.

Mit dieser Struktur verfolgt die Arbeit das Ziel, ein umfassendes Verständnis für die Potenziale und Herausforderungen nachhaltiger Flottenstrategien im städtischen Raum zu entwickeln.

2. Tendenz des Flottenwachstums

Staus wirken sich insbesondere negativ auf die Luftqualität und Energieverbrauch aus, daher soll in städtischen Bereichen den Ausstoß von Treibhausgasen einschließlich CO₂ reduziert werden. Städtischer Verkehr kann unter anderem durch Parkraumbewirtschaftung, Lösungen für öffentlicher Personennahverkehr und Zufahrtmanagement gesteuert werden (Leih, et al., 2014). Die Art und Weise wie das Straßennetz geregelt wird, hängt von örtlicher Verkehrspolitik sowie nationalen und internationalen Gesetzen ab. Regulierungen und deren Vollziehung steuern in Städten die Verkehrsnachfrage. Solche Maßnahmen können in statische und dynamische Maßnahmen aufgeteilt werden. Zu den statischen Maßnahmen zählen Zeitabhängige Regulierungen, die nur an bestimmten Tagen (z.B. Werkstage), zu bestimmten Tageszeiten (z.B. in der Rushhour) und zu bestimmten Jahreszeiten (z.B. in den Wintermonaten) gelten. Dynamische Maßnahmen im Gegensatz zu statischen, sind von den aktuellen Stand der Emissionen oder der Verkehrsaufkommen abhängig, wie in Wien die Aufenthaltsdauer (Parkdauer) ist zeitlich begrenzt (De Palma & Lindsey, 2011). Die Einführung von Mautzonen kann auch eine von vielen Möglichkeiten sein, die schädlichen Emissionen zu reduzieren und gleichzeitig einen Anreiz für Unternehmen schaffen, auf andere Verbrennungsmotoren in ihrer Flotte umzusteigen.

Laut Daten von Statistik Austria (Abbildung 1) ist im Jahr 2022 der Anzahl von neu angemeldeten Lastkraftzeugen von 62 561 im Jahr 2021 auf 25 200 gesenkt, das heißt um rund 60% weniger LKWs wurden im Jahr 2022 neu angemeldet. Eine wesentliche Ursache für diesen Rückgang liegt in den Entwicklungen der vorangegangenen Jahre, insbesondere im Zusammenhang mit der Covid-19-Pandemie, die ab März 2020 das öffentliche und wirtschaftliche Leben in Europa erheblich beeinflusste. Die pandemiebedingten Schließungen zahlreicher stationärer Geschäfte führten zu einer stark gestiegenen Nachfrage im Onlinehandel, da der E-Commerce in vielen Fällen die einzige Möglichkeit bot, Produkte zu erwerben. Dies hat dazu beigetragen, dass einige Unternehmen ihren LKW-Bestand aufgestockt haben, um die wachsende Nachfrage nach Lieferungen zu befriedigen. Besonders deutlich wurde dieser Trend im Jahr 2021, das durch einen außergewöhnlich hohen Anstieg an Neuzulassungen von Lieferfahrzeugen gekennzeichnet war. (Duszczyk, 2021)

In den Jahren 2022 und 2023 ist ein Rückgang der Zulassungen in dieser Kategorie zu beobachten, was auf eine temporäre Marktsättigung oder wirtschaftliche Unsicherheiten (z. B. Lieferkettenprobleme, steigende Energiekosten) hinweisen könnte. Der erneute Anstieg im Jahr 2024 auf 33.088 Fahrzeuge könnte auf eine beginnende Markterholung sowie auf staatliche Fördermaßnahmen zur Unterstützung der Flottenumstellung hinweisen. Seit dem Jahr 2015 ist in Österreich das Anbringen von Umweltplaketten für alle Lastkraftwagen der Klassen N1 bis N3 gesetzlich vorgeschrieben. Detaillierte Informationen zu den geltenden Umweltzonen und den entsprechenden Regelungen finden sich in Kapitel 4.2.

Die Klasse N2 weist in allen Jahren vergleichsweise geringe Zulassungszahlen auf - zwischen 365 und 645 Fahrzeuge jährlich. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass Fahrzeuge in diesem Gewichtssegment in der städtischen Logistik oft nicht die optimale Lösung darstellen – sie sind für Innenstadtbereiche häufig zu groß, bieten jedoch keinen signifikanten Kapazitätsvorteil gegenüber Fahrzeugen der Klasse N3.

Die Zahl der Neuzulassungen in der Klasse N3 (über 12 t) bleibt relativ konstant, mit leichten Steigerungen in den letzten Jahren. Diese Fahrzeugklasse wird vorrangig im internationalen oder Langstreckentransport eingesetzt. Der kontinuierliche Bedarf an Schwertransporten könnte eine stabile Nachfrage begründen.

Es ist ebenfalls erwähnenswert, wie sich die Anzahl der neu zugelassenen Elektro-Lastkraftwagen in den letzten Jahren entwickelt hat. Im Jahr 2020 wurden lediglich 233 Fahrzeuge dieser Art registriert. 2021 stieg die Zahl deutlich auf 1.041 an, sank jedoch im Jahr 2022 leicht auf 1.009. In den darauffolgenden zwei Jahren wurde ein kontinuierlicher Anstieg verzeichnet: 2023 lag die Anzahl bei 1.445, und im Jahr 2024 wurden bereits 1.660 Elektro-LKWs neu zugelassen. Obwohl die Entwicklung insgesamt einen positiven Trend aufweist, bleibt der Anteil dieser Fahrzeuge im Verhältnis zur Gesamtzahl aller neu zugelassenen Lastkraftwagen weiterhin gering. Elektrofahrzeuge sind in der Anschaffung oft teurer als Diesel- oder Hybridfahrzeuge, was zu höheren anfänglichen Investitionskosten führt (Yilmaz, 2019). Langfristig können jedoch geringere Wartungs- und Betriebskosten diese Mehrkosten ausgleichen (Volvo Trucks Deutschland, 2023). Während sich einige Betriebskosten – etwa für Versicherung, Inspektion oder Reifen – bei beiden Antriebsarten ähneln, entfallen bei Elektrofahrzeugen viele wartungsintensive Komponenten wie Öl, Filter oder Zahnriemen. Demgegenüber steht der mögliche Verschleiß der Batterie, deren

Austausch bei PKW ab etwa 8.000 Euro kostet (Stahl, 2022). Der Volvo FL Electric stellt ein aktuelles Beispiel für die Weiterentwicklung der Elektromobilität im Bereich des Schwerlastverkehrs dar. Das Fahrzeug ist mit drei bis sechs Batterien ausgestattet und erreicht dadurch eine Reichweite von bis zu 450 Kilometern, was insbesondere für den Einsatz im städtischen und regionalen Lieferverkehr ausreichend ist. Abhängig vom Achsstand liegt die Nutzlastkapazität zwischen 9.000 kg und 9.500 kg, wodurch das Modell eine realistische Alternative zu konventionellen Diesel-LKW im urbanen Verteilerverkehr bietet (Volvo Trucks, 2025).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Gewichtsklasse N1 nicht nur den größten Anteil der Neuzulassungen stellt, sondern auch das größte Potenzial für die Elektrifizierung der urbanen Logistik bietet. Diese Fahrzeugtypen, häufig als Lieferwagen oder Minivans bezeichnet, werden überwiegend für die sogenannte Letzte-Meile-Zustellung eingesetzt, also für den Transport von Waren aus Logistikzentren bis zum Endverbraucher.

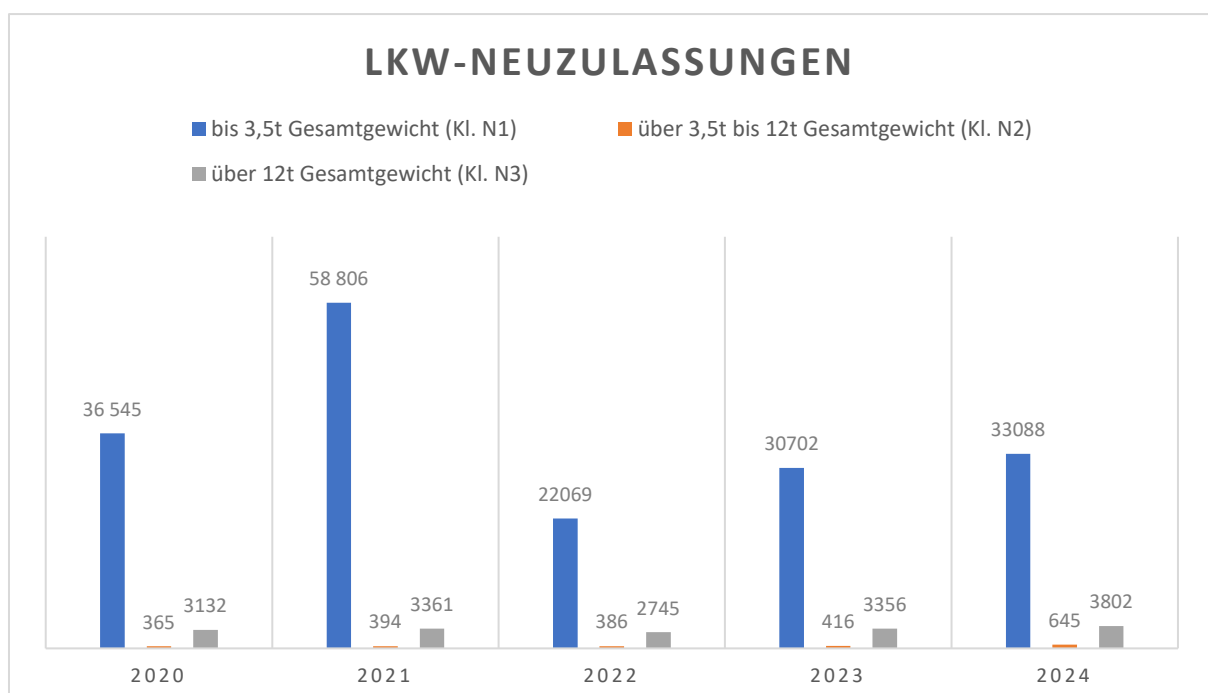


Abbildung 1 Anzahl der Neuzulassungen von Lastkraftwagen je nach Klasse und Jahr, anhand von Daten der Statistik Austria (Statistik Austria, 2025)

Die Einführung von städtischen Mautsystemen sowie die wachsende Verfügbarkeit leistungsfähiger Elektrotransporter verstärken diesen Wandel hin zu nachhaltigeren und emissionsärmeren Fahrzeugflotten im urbanen Raum. Externe Einflüsse, wie politische Maßnahmen, wirtschaftliche Rahmenbedingungen oder gesellschaftliche

Trends, können erheblichen Einfluss auf die Zusammensetzung und Entwicklung von Fahrzeugflotten haben. Schneller Ausbau der Infrastruktur für Elektromobilität wirkt ermutigend und fördert die Nutzung von Elektrofahrzeugen. Laut den Informationen auf der Website von Bundesverband Elektromobilität Österreich gibt es derzeit in Wien 2.769 Ladestationen, und ihre Anzahl steigt stetig an (Bundesverband Elektromobilität Österreich, 2025). Die Installation der E-Ladepunkte in Wien ist neben dem Ausbau des öffentlichen Verkehrs ein bedeutender Beitrag zur umweltfreundlichen Mobilität in der Stadt.

Auch die Unternehmen wie IKEA Austria GmbH und Österreichische Post AG haben sich zum Ziel gesetzt emissionsfrei zuzustellen. Gemäß der Pressemitteilung vom August 2021 geht hervor, dass IKEA Österreich bis 2025 alle Lieferungen in ganz Österreich emissionsfrei gestalten wird. Seit zwei Jahren werden die Waren aus dem Logistikzentrum Strebersdorf umweltfreundlich mit Elektrofahrzeugen in alle 23 Wiener Gemeindebezirke sowie in das umliegende Gebiet bis zu 30 Kilometern transportiert. Ab Oktober 2023 erweitert IKEA Österreich seine emissionsfreie Lieferflotte um wasserstoffbetriebene Fahrzeuge, und somit ist IKEA der weltweit erste Markt, der Wasserstoff-LKW in seine Lieferflotte integriert. Diese Technologie ermöglicht die Zustellung in entlegeneren Gebieten Österreichs, da die LKW im Vergleich zu Elektrofahrzeugen eine größere Reichweite aufweisen. Derzeit werden 56 wasserstoffbetriebene Lieferfahrzeuge angeschafft, von denen 45 ausschließlich im Großraum Wien eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu verfügt IKEA Österreich derzeit über 36 Elektrofahrzeuge mit einer durchschnittlichen Reichweite von 170 Kilometern (IKEA Österreich, 2023).

Die österreichische Post ist das nächste Unternehmen, das im Jahr 2021 angekündigt hat, dass sie ab 2030 ihre Zustellungen komplett CO₂-frei durchführen wird. Seitdem hat die Post ihre E-Flotte ausgebaut und derzeit sind über 3.000 Elektrofahrzeuge im Einsatz. Noch in diesem Jahr wird die gesamte Lieferflotte in Innsbruck emissionsfrei sein, da 70 weitere Elektroautos angeschafft werden. In Bezug auf Elektrofahrzeuge ist es ebenfalls wichtig zu bedenken, wie sie aufgeladen werden. Die nächste Maßnahme der Post im Rahmen ihres Engagements für den Klimaschutz umfasst die Installation von Photovoltaikanlagen in Kombination mit Ladestationen in all ihren Zustellzentren, um einen Teil des benötigten Stroms selbst

zu erzeugen und damit ihre Elektroautos vor Ort aufzuladen (Österreichische Post Aktiengesellschaft, 2023).

Wie aus den obigen Beispielen ersichtlich ist, versuchen bereits einige große Unternehmen, den Richtlinien der Europäischen Union zu folgen, indem sie immer mehr Elektrofahrzeuge in ihre Flotten integrieren oder sogar Fahrzeuge mit Diesel- oder Benzinantrieb vollständig eliminieren. Dies ist notwendig, da ohne diesen Schritt Österreich bis 2040 nicht umweltneutral sein kann (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, 2022).

3. Vehicle Routing Problem

Eine der bekanntesten Herausforderungen in der Transportlogistik ist das sogenannte Traveling Salesman Problem (TSP), bei dem eine Person – klassisch ein Handelsvertreter oder Außendienstmitarbeiter – von einem Startpunkt aus mehrere Städte oder Kunden besuchen muss, wobei jeder Ort genau einmal aufgesucht werden darf und die Gesamtreisezeit bzw. -strecke zu minimieren ist. Eine Erweiterung dieses Problems stellt das Multi-Traveling Salesmen Problem (MTSP) dar, bei dem mehrere Handelsvertreter oder Fahrzeuge gleichzeitig eingesetzt werden. Alle Zielorte müssen dabei eindeutig einem bestimmten Akteur zugeordnet werden, und es gilt, für jeden eine optimale Besuchsreihenfolge zu finden, sodass die Gesamtdistanz oder die Gesamtkosten aller Touren minimiert wird. Die Aufgaben von Handelsvertreter beschränken sich in der Realität jedoch häufig nicht nur auf das bloße Besuchen mehrerer Orte. In der Praxis müssen sie oftmals eine bestimmte Menge an Waren ausliefern oder weitere logistische Randbedingungen wie die Einhaltung von Arbeitszeiten oder vorgegebenen Lieferzeitfenstern erfüllen. In diesem Zusammenhang lässt sich das MTSP als eine vereinfachte Vorstufe des Vehicle Routing Problems (VRP) verstehen, bei dem zusätzlich Faktoren wie Fahrzeugkapazitäten, Kundenbedarfe oder Servicezeiten berücksichtigt werden (Cheikhrouhou & Khoufi, 2021).

Bereits an dieser Stelle ist es von Bedeutung, die Unterschiede zwischen den beiden Problemstellungen, dem TSP und dem VRP, klar zu benennen. Beim klassischen TSP wird eine einzige Route für einen Lieferanten oder Verkäufer geplant, der alle Kundenstandorte einmalig besuchen und anschließend zum Ausgangspunkt, dem Depot, zurückkehren muss. Dabei werden keine Einschränkungen hinsichtlich der Fahrzeugkapazität oder der Kundennachfrage berücksichtigt. Ziel ist es, die kürzeste bzw. kosteneffizienteste Rundtour zu ermitteln. Im Gegensatz dazu erlaubt das VRP die Planung mehrerer Routen für eine Flotte von Fahrzeugen. Hierbei ist die Nachfrage jedes Kunden sowie dessen Standort im Vorfeld bekannt. Zusätzlich können eine Vielzahl betrieblicher Restriktionen berücksichtigt werden – etwa Kapazitätsgrenzen der Fahrzeuge oder spezifische Zeitfenster für Anlieferungen. Ziel des VRP ist es, die optimale Zuteilung und Besuchsreihenfolge aller Kunden so festzulegen, dass die Gesamtkosten der Lieferung minimiert werden. Das VRP stellt somit eine Erweiterung des TSP dar und im Kontext dieser Masterarbeit ist das VRP

von besonderer Relevanz, da es ermöglicht, verschiedene Flottenkonfigurationen, beispielsweise bestehend aus Diesel- und Elektrofahrzeugen, unter Einbeziehung von Mautgebühren, Emissionszielen und betrieblichen Kosten zu modellieren und zu bewerten (Herdianti, et al., 2021).

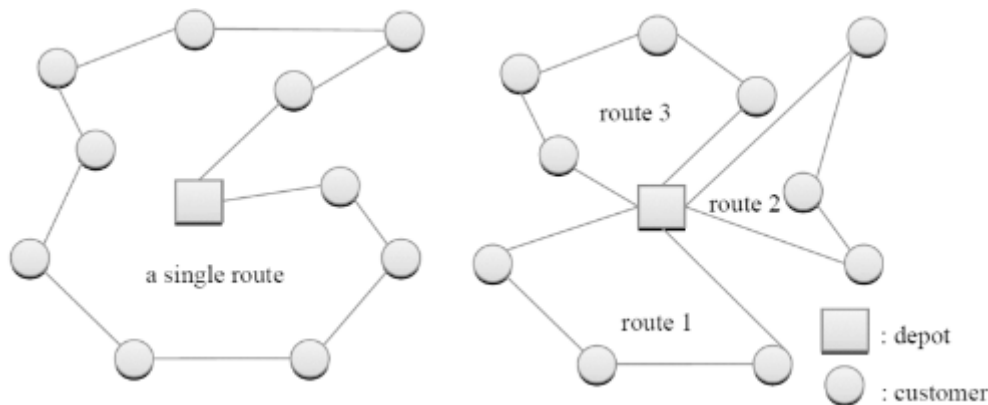


Abbildung 2 Traveling Salesman Problem vs Vehicle Routing Problem (Herdianti, et al., 2021)

3.1 Literaturübersicht

Im Jahr 1959 wurde das VRP erstmals in der Literatur erwähnt, als Dantzig und Ramser an der Optimierung der Routenplanung für eine homogene Fahrzeugflotte mit fester Kapazität zur Belieferung von Tankstellen mit Kraftstoff arbeiteten. Ihr Ziel war es, ein Modell zu entwickeln, das die Gesamtstrecke minimiert, die von der Flotte zurückgelegt wird, um den benötigten Kraftstoff an die Tankstellen zu liefern. Nach Ablauf von fünf Jahren veröffentlichten Clarke & Wright im Jahr 1964 den sogenannten Savings-Algorithmus, der heute eine der bekanntesten Heuristiken für das VRP ist. In dieser Heuristik geht es darum, optimale Routen zu bestimmen, auf denen die Belieferung der größten Anzahl von Empfängern durch einen einzigen Lieferanten erfolgt. Da das VRP ein NP-schweres Problem ist, ist es bisher noch niemandem gelungen, es in polynomialer Zeit mit einem deterministischen Algorithmus zu lösen. Heuristiken, Metaheuristiken und andere Optimierungstechniken verwenden Algorithmen, um gute Lösungen zu finden oder zufriedenstellende Ergebnisse für NP-schwere Probleme zu erzielen, auch wenn es nicht möglich ist, eine optimale Lösung in angemessener Zeit zu finden.

Seit 1959 wurde dieses Problem mehrmals um die aktuellen Bedingungen und Einschränkungen des Unternehmens erweitert, was zu einer großen Anzahl von Varianten des VRP geführt hat. In der Praxis erfordern die tatsächlichen

Anwendungen des VRPs in der Regel fortgeschrittenere Variante, um den komplexen Anforderungen eines Logistikunternehmens gerecht zu werden und eine effiziente Lösung zu finden.

Erste, sehr bekannte Erweiterung des VRP ist das Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), bei dem jedes Fahrzeug eine feste Kapazität besitzt. In diesem Vorgang wird die beste Route für eine Flotte von Fahrzeugen zur Auslieferung von Waren an Kunden unter Berücksichtigung verschiedener Beschränkungen ermittelt. Die Einführung der Kapazitätsbeschränkung reduziert die Anzahl der zulässigen Lösungen erheblich. Im CVRP wird jeder Kunde durch eine Nachfrage $q_i, i = 1, \dots, n$ an Waren am i - Standort repräsentiert. Die Fahrzeuge haben eine Kapazität a_k , wobei $k \in V$ in einer homogenen Flotte für alle Fahrzeuge identisch ist, $a_k = a$ für $k \in V$ (Patel, 2023).

Die Kapazitäten der Fahrzeuge können auch variieren, was zum Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem (HFVRP) führt - auch bekannt als Mixed Fleet VRP. Nähere Informationen zur heterogenen Flottenstruktur finden sich im Kapitel 3.3.

Das Green Capacitated Vehicle Routing Problem (GCVRP) ist eine zusätzliche Erweiterung des VRPs, das darauf abzielt, den Kraftstoffverbrauch oder die CO₂ Emissionen anstelle der Gesamtdistanz zu minimieren (Dekhici, et al., 2020). Erdoğan & Miller-Hooks (2012) haben sich in ihrer Studie mit einem VRP befasst, das alternative Kraftfahrzeuge (einschließlich Elektrofahrzeuge) mit begrenzter Reichweite einbezog, was während des Routings ein Aufladen erforderlich machte. Im Kontext des GVRPs war das Hauptziel die Minimierung der Gesamtdistanz, die von alternativen Kraftfahrzeugen zurückgelegt wurde, ähnlich dem klassischen Fahrzeugroutenproblem, bei dem jeder Kunde genau einmal besucht wurde. In Bezug auf den Umgang mit Ladestationen unterscheidet sich das GVRP wesentlich vom klassischen VRP. Im GVRP dürfen die Ladestationen der Fahrzeuge bei Bedarf mehrfach angefahren werden – oder auch gar nicht, sofern dies für die Routenplanung nicht erforderlich ist. Diese Flexibilität ist besonders relevant für elektrisch betriebene Fahrzeuge, deren begrenzte Reichweite eine gezielte Ladeplanung erfordert. Diese Möglichkeit wurde von Lin, et al. (2016) in der Modellformulierung berücksichtigt. Zur Abbildung der Ladestruktur erweiterten sie das VRP-Modell, indem sie mehrere Kopien der Knotenpunkte einführten, die die Ladestationen – einschließlich jener am Depot – repräsentieren. Die Anzahl der

erstellten Kopien entspricht der potenziellen Anzahl an Besuchen einer Ladestation. Im Fall des Depots richtet sich diese Zahl nach der Größe der Flotte. Durch diese Modellierungstechnik lässt sich die klassische Formulierung des VRPs mit nur geringfügigen Anpassungen auch auf das EVRP übertragen. Lediglich eine zusätzliche Nebenbedingung ist erforderlich, die sicherstellt, dass jede Ladestation höchstens einmal besucht wird. Das zugrunde liegende Modell berücksichtigt weder energiekostenbezogene Aspekte noch Einschränkungen in Bezug auf Fahrzeugkapazitäten oder Zeitfenster im Rahmen des Routingproblems.

Das Problem der Abholung und Zustellung von Waren (Pickup and Delivery Problem) optimiert die Routenplanung, um sowohl die Lieferung als auch die Abholung von Waren effizient zu gestalten. Dabei spielt die Fahrzeugkapazität eine wichtige Rolle, da sie bestimmt, wie viele Waren ein Fahrzeug gleichzeitig transportieren kann. Das Pickup and Delivery Problem findet auch Anwendung im Personenverkehr, woraus das Dial-a-Ride-Problem (DARP) entstanden ist. Dabei möchten Passagiere zwischen vordefinierten Abhol- und Zielorten transportiert werden und einer begrenzten Anzahl von Fahrzeugen zugewiesen werden (Savelsbergh, 1995).

Das Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) erweitert das klassische VRP um zeitliche Einschränkungen bei der Belieferung der Kunden. Jedem Kunden $i \in N$ wird ein Zeitfenster zugewiesen, das als Intervall $[e_i, l_i]$ definiert ist, wobei $e_i \leq l_i$ die frühest- bzw. spätmöglichste Startzeit den Lieferzeitpunkt beim i -ten Kunden festlegt. Diese Zeitfenster können entweder als harte oder weiche Restriktionen modelliert werden. Harte Zeitfenster bedeuten, dass eine Anlieferung ausschließlich innerhalb des vorgegebenen Zeitraums erfolgen darf, dabei bleibt die Servicezeit beim Kunden ohne Einfluss auf das Zeitintervall. Weiche Zeitfenster hingegen erlauben eine Überschreitung des Zeitrahmens, ziehen jedoch eine entsprechende Strafgebühr nach sich. Während harte Zeitfenster die Lösungsmenge deutlich einschränken, ermöglichen weiche Zeitfenster die Integration eines zusätzlichen Optimierungskriteriums in die Zielfunktion, was eine flexiblere Routenplanung erlaubt (El-Sherbeny, 2010).

3.2 Formulierung des VRP-Problems

Das Routenplanungsproblem besteht unter anderem aus einer Gruppe von Kunden $N = \{1, \dots, n\}$, die sich an n - verschiedenen Standorten befinden, einer Flotte von

Lieferfahrzeugen und einem zentralen Versandpunkt. Jedes Paar von Standorten (i, j), wobei $i, j \in N$ und $i \neq j$ sind, ist eine Fahrzeit $t_{i,j}$ und/oder eine Streckenlänge $d_{i,j}$ zugeordnet. Bei symmetrischen Problemen sind die Werte $t_{i,j} = t_{j,i}$ und $d_{i,j} = d_{j,i}$ symmetrisch, unabhängig von der Fahrtrichtung. Es kommt häufig vor, dass die zurückzulegende Entfernung oder die Zeit, die für eine geplante Route benötigt wird, nicht immer gleich ist. Dies liegt an unterschiedlichen Verkehrsdichten, abhängig von der Tageszeit und der aktuellen Situation auf der festgelegten Route, die sich jederzeit ändern kann. Zum Beispiel können zufällige Ereignisse wie Unfälle oder Staus zu solchen Veränderungen führen. In dicht besiedelten Stadtzentren kann der Fahrer auf kurzen Abschnitten der Route auf Einbahnstraßen, Sperrungen oder Baustellen stoßen. Dies erfordert dann die Wahl eines völlig anderen Rückwegs zum Depot, was sowohl zu einer Verlängerung der benötigten Zeit als auch der zurückzulegenden Entfernung führen kann.

Im klassischen VRP werden die Kunden von einer Fahrzeugflotte $V = \{1, \dots, m\}$ bedient, die an einem zentralen Versandpunkt sind, von dem aus die Fahrzeuge ihre Touren starten und beenden. Die Fahrzeugflotte eines Unternehmens kann entweder homogen oder heterogen sein. Von einer homogenen Flotte spricht man, wenn alle Fahrzeuge gleichartig sind, das heißt sie gehören derselben Marke, demselben Typ und Modell an und werden mit der gleichen Art von Treibstoff betrieben. Eine heterogene Flotte liegt hingegen vor, wenn unterschiedliche Fahrzeugarten im Einsatz sind. In bestimmten Situationen kann die Vielfalt einer heterogenen Flotte dazu beitragen, die operativen Betriebskosten effizient zu senken. So eignen sich Fahrzeuge mit größerer Ladekapazität und Dieselmotor besonders für den Transport größerer Mengen über längere Distanzen. Im Gegensatz dazu sind Hybrid- oder Elektrofahrzeuge ideal für den innerstädtischen Verkehr und leisten einen Beitrag zur Reduktion der Luftverschmutzung in urbanen Gebieten (Kopfer, et al., 2014).

3.3 Gemischte Flotte

Die Elektroautos stoßen beim Fahren kein CO₂ aus und sind daher eine gute Alternative zu Autos mit Verbrennungsmotoren. Im Hinblick auf die gemischten Flotten erweiterten Hiermann et al. (2016) die E-VRPTW durch die Berücksichtigung einer heterogenen Flotte von Elektrofahrzeugen. Sie stellen das Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations (E-FSMFTW) Modell vor, um Entscheidungen zu modellieren, die in Bezug auf die Flottenzusammensetzung und die tatsächlichen Fahrzeugrouten, einschließlich der Wahl der Ladezeiten und -orte getroffen werden müssen.

Demir, Bektaş and Laporte (2012) entwickelten ein Energieverbrauchsmodell für Nutzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Aufbauend darauf erweiterten Goeke und Schneider im Jahr 2015 dieses Modell um den Batterieenergieverbrauch elektrischer Nutzfahrzeuge. Sie untersuchten eine Variante des Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Mixed Fleet (E-VRPTWMF). In dem betrachteten Modell wurde eine gemischte Flotte angenommen, bestehend aus einem Fahrzeugtyp mit Verbrennungsmotor und einem Typ von Elektrofahrzeug, dessen Energieverbrauch in Abhängigkeit von der transportierten Last variiert. Dabei kam ein realitätsnahes Energieverbrauchsmodell zur Anwendung, das neben der Geschwindigkeit auch topografische Faktoren wie Steigung sowie die Lastverteilung berücksichtigt. Diese Aspekte sind insbesondere im Kontext des Einsatzes von Elektrofahrzeugen von zentraler Bedeutung, da der Energieverbrauch sowohl die maximal erreichbare Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge als auch die erforderlichen Ladezeiten unmittelbar beeinflusst.

Lebeau et al. (2015) untersuchten den Einsatz konventioneller, hybrider und elektrischer Antriebstechnologien im Kontext eines urbanen Distributionszentrums. Die Autoren analysierten dabei unterschiedliche Szenarien und berücksichtigten sowohl betriebliche Anforderungen als auch technische Leistungsparameter der Fahrzeuge. Ihre Ergebnisse verdeutlichen, dass eine Fahrzeugflotte mit unterschiedlichen Antriebstechnologien die Vertriebskosten senken kann. Bei kleinen Fahrzeugklassen wie Kleintransportern sind Elektrofahrzeuge oft die wirtschaftlichste Wahl, während bei großen Transportern der Dieselantrieb finanziell vorteilhaft bleibt. Im Segment der LKW schneiden Hybridfahrzeuge besser ab als Diesel, da sie geringere Fix- und Betriebskosten aufweisen und steuerliche Vorteile nutzen können.

In einem kleinen Szenario mit fünf zu beliefernden Geschäften reicht ein Kleintransporter aus, weshalb ein Dieselfahrzeug bevorzugt wird. Bei einer mittleren Fallstudie mit zehn Geschäften zeigt sich eine Präferenz für Hybridfahrzeuge, da zur Belieferung aller Geschäfte ein Lkw benötigt wird, wodurch die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge minimiert wird. Für die große Fallstudie mit fünfundzwanzig Geschäften werden sowohl Hybrid- als auch Elektrofahrzeuge in der optimalen Flottenzusammensetzung berücksichtigt, da ein Lastwagen und ein Kleintransporter gemeinsam die notwendige Kapazität zur Belieferung aller Geschäfte bieten.

Ein weiterer Beitrag von Mohammadbagher und Torabi (2022) beschäftigt sich mit der Tourenplanung einer heterogenen Fahrzeugflotte bestehend aus Elektro- und konventionellen Fahrzeugen. Ihr Modell berücksichtigt mehrere Zielsetzungen, darunter die Minimierung der Kosten, die Reduzierung von Emissionen sowie die Verkürzung der Bedienzeiten der Kunden. Dabei werden Zeitfenster für die Lieferungen und die Verfügbarkeit von Ladestationen für Elektrofahrzeuge einbezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein verstärkter Einsatz von Elektrofahrzeugen zu geringeren Emissionen führt, jedoch mit höheren Gesamtkosten verbunden ist. Umgekehrt verursachen Flotten mit einem höheren Anteil an Verbrennungsmotoren niedrigere Kosten, gehen aber mit höheren Emissionen einher.

Kapitel 5 enthält eine ausführliche theoretische und mathematische Darstellung des Mixed Fleet Vehicle Routing Problems with Congestion Prices.

4. Innerstädtische Verkehrskonzepte

Zur Reduzierung von Verkehrsüberlastung, zur Verbesserung der Effizienz sowie zur Förderung umweltfreundlicher Mobilitätslösungen, wurden in verschiedenen Ländern unterschiedliche Strategien zur Steuerung der Verkehrsnachfrage entwickelt.

Zu den frühesten Maßnahmen, die in den USA eingeführt wurden, zählen mautpflichtige Projekte wie sogenannte High-Occupancy Toll Lanes (HOT-Lanes), Expressmautstraßen, streckenbasierte Preisgestaltung, zonenbezogene Mautsysteme sowie regionale Bepreisungsmodelle (U. S. Administration, Februar 2022).

Nach Angaben des US-Verkehrsministeriums wurde im Jahr 1969 in Nord-Virginia die erste High-Occupancy Vehicle Lane (HOV-Spur) eingerichtet – als Reaktion auf die zunehmenden Kraftstoffverbräuche und die Luftverschmutzung während der Ölkrise. Diese speziellen Fahrspuren sind für Fahrzeuge mit mehreren Insassen reserviert, darunter Fahrgemeinschaften in Privatfahrzeugen, Taxis und Busse. HOV-Spuren verlaufen parallel zu den regulären Fahrspuren und sind meist durch eigene Markierungen gekennzeichnet. Im Gegensatz zu anderen verkehrslenkenden Maßnahmen fällt für ihre Nutzung keine Maut an. Laut einer aktuellen Studie wurden in den USA bisher 31 solcher HOV-Spuren eingerichtet (Wood, et al., Februar 2021). Auch in Europa wurden ähnliche Systeme implementiert – etwa in Städten wie Leeds (Großbritannien), Madrid (Spanien) oder Linz (Österreich). In Norwegen dürfen HOV-Spuren nur von Fahrzeugen mit mindestens zwei Insassen genutzt werden; zudem ist dort auch die Nutzung durch Elektrofahrzeuge erlaubt. In Wien hingegen wurden keine Fahrgemeinschaftsspuren eingerichtet. Um jedoch den öffentlichen Personennahverkehr zu beschleunigen, wurden spezielle Busspuren geschaffen, die auch für Taxis, teilweise für Motorräder sowie für Radfahrer freigegeben sind (Stadt Wien Verkehrsorganisation und technische Verkehrsangelegenheiten, 2022).

Die Idee hinter dem HOT-Lane-Konzept ist, stark befahrene Straßen durch gebührenpflichtige Fahrspuren zu entlasten, entweder durch den Umbau bestehender HOV-Spuren oder durch den Bau zusätzlicher HOT-Spuren. Die erste HOT-Spur wurde 1995 in Kalifornien eingerichtet (Wood, et al., Februar 2021). Ein Beispiel ist Minnesota: Dort wurde 2005 auf der I-394 die bestehende HOV-Spur in eine HOT-Spur umgewandelt (MnPASS). Eine zuvor durchgeführte Studie kam zu

dem Schluss, dass diese Lösung die kosteneffizienteste Möglichkeit ist, um die vorhandene Infrastruktur besser auszulasten und gleichzeitig die Effizienz im Fernstraßenverkehr zu steigern.

Fahrs Spuren mit dynamischer Preisgestaltung (wie die sogenannten HOT-Lanes) sind während der Hauptverkehrszeiten nur für bestimmte Nutzergruppen kostenlos, darunter Fahrgemeinschaften, Motorradfahrer sowie teilweise der öffentliche Verkehr. In den Nebenverkehrszeiten sind diese Spuren hingegen häufig für alle Verkehrsteilnehmer gebührenfrei nutzbar. Im Gegensatz zu den High-Occupancy Vehicle Lanes (HOV-Lanes), die kostenlos bleiben, sind HOT-Spuren in der Regel mit einer Maut verbunden. Registrierte Nutzer erhalten einen Transponder, welcher an der Windschutzscheibe befestigt wird. Dieser kommuniziert elektronisch mit einem zentralen Computersystem über Mauterfassungsgeräte, die auf Portalen über der HOT-Spur montiert sind.

4.1. Stadtmaut

Zu den zentralen verkehrspolitischen Zielen bei der Einführung einer City-Maut zählen die Entlastung des Straßenverkehrs, die Verbesserung der städtischen Lebensqualität, sowie die Förderung umweltfreundlicherer Antriebsarten. Durch finanzielle Anreize lassen sich sowohl private als auch öffentliche Flotten auf emissionsarme Fahrzeuge umstellen. Ein zunehmender Anteil sauberer Fahrzeuge kann zur Verringerung von Lärm- und Schadstoffemissionen beitragen und damit das städtische Klima sowie die allgemeine Lebensqualität verbessern.

In verschiedenen Städten wurden unterschiedliche Modelle der Preisgestaltung eingeführt, um den lokalen Anforderungen gerecht zu werden:

- Feste Preisgestaltung:

Ein Beispiel für eine zeitunabhängige, pauschale Stadtmaut ist das Area C-System in Mailand. Dabei handelt es sich um eine gleichbleibende Gebühr, die werktags innerhalb eines festgelegten Zeitfensters erhoben wird – unabhängig von der Tageszeit.

Mailand zählt zu den Vorreitern in Italien bei der Einführung städtischer Mautsysteme. Das derzeit gültige Modell Area C wurde im Januar 2012 eingeführt und ersetzte das zuvor geltende, emissionsbasierte Ecopass-System. Die

Mautzone umfasst das historische Stadtzentrum (Cerchia dei Bastioni) mit einer Fläche von rund 8,2 km². Die Gebühr gilt von Montag bis Freitag zwischen 7:30 Uhr und 19:30 Uhr und beträgt pauschal 5 € pro Einfahrt. Für Anwohnerinnen und Anwohner gelten reduzierte Tarife, während bestimmte Fahrzeugtypen – darunter emissionsfreie Fahrzeuge, Fahrzeuge von Personen mit Behinderungen sowie Einsatzfahrzeuge – vollständig von der Gebühr ausgenommen sind. Besonders emissionsintensive Fahrzeuge, wie ältere Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter, sind dauerhaft von der Einfahrt in die Zone ausgeschlossen.

Bereits in den ersten Monaten nach der Einführung des Area C-Systems konnte das Verkehrsaufkommen im betroffenen Bereich um etwa 30 % gesenkt werden. Gleichzeitig wurde eine verstärkte Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs und des Fahrradverkehrs beobachtet. Auch die Emissionen von Stickoxiden und Feinstaub gingen deutlich zurück. Die Einnahmen aus der Maut werden gezielt zur Förderung nachhaltiger Mobilitätsmaßnahmen eingesetzt, insbesondere zum Ausbau des öffentlichen Verkehrs und der Radinfrastruktur (Comune di Milano, 2015).

- Zeitabhängige Preisgestaltung:

In diesem Modell richtet sich die Gebühr nach der Uhrzeit oder dem Wochentag. London war eine der ersten großen europäischen Städte, die 2003 eine Stadtmaut einführte. Das Hauptziel bestand darin, den Verkehr im Stadtzentrum zu verringern, den öffentlichen Nahverkehr zu entlasten und die Luftqualität zu verbessern. Die Gebühr gilt werktags von 7 bis 18 Uhr innerhalb der sogenannten „Congestion Charge Zone“ (CCZ). Fahrzeuge, die diese Zone befahren, müssen eine Gebühr zahlen, wobei emissionsfreie Fahrzeuge, wie Taxis und Busse von der Zahlung ausgenommen sind. Bereits im ersten Jahr führte die Maßnahme zu einem Rückgang des Verkehrsaufkommens um etwa 18 % und einer Verringerung der Stauzeiten um rund 30 % (Leape, 2006). Gleichzeitig konnten messbare Verbesserungen der Luftqualität beobachtet werden: Die Stickoxid-Emissionen (NO_x) nahmen um 13–17 % ab, Feinstaub (PM₁₀) um 15–24 % und der Ausstoß von CO₂ sank um 3–16 % (Beevers & Carslaw, 2005) (Mayor of London, 2008). Außerdem wurde festgestellt, dass die Zahl der Verkehrsunfälle im Innenstadtbereich zwischen 2000 und 2010 um ungefähr 40 % sank (Green, et

al., 2018). Neuere Untersuchungen deuten zudem darauf hin, dass sich die Stadtmaut positiv auf die öffentliche Gesundheit auswirken kann, insbesondere durch die Verringerung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen (O'Hare, 2023). Die Einnahmen aus der Gebühr werden gezielt zur Verbesserung des öffentlichen Verkehrs und der nachhaltigen Mobilität eingesetzt.

- **Dynamische Preisgestaltung:**

In Stockholm wurde das heutige System nach einem erfolgreichen Pilotversuch im Jahr 2006 dauerhaft im Jahr 2007 eingeführt. Es basiert auf einer zeitabhängigen Preisgestaltung: Je nach Uhrzeit fällt pro Ein- oder Ausfahrt in die Mautzone ein Betrag zwischen 11 und 35 SEK an, mit einem Tagesmaximum von 105 SEK (rund 9,50 €). Die Erfassung erfolgt vollautomatisch über das Kfz-Kennzeichen, das beim Durchfahren von Kameras abgerechnet wird. Von der Maut befreit sind z.B. Elektrofahrzeuge, Motorräder und Fahrzeuge mit Sondergenehmigung (Eliasson, 2009) & (Börjesson, et al., 2012). Bereits in den ersten Monaten nach Einführung zeigte sich eine deutliche Reduktion des Verkehrsaufkommens um etwa 20 %, sowie eine messbare Abnahme der Stickstoffdioxid- und Feinstaubbelastung. Auch der Anteil der Fahrten mit dem öffentlichen Verkehr konnte gesteigert werden (Henriksson, et al., 2011).

Diese unterschiedlichen Modelle zeigen, dass Stadtmautsysteme flexibel gestaltet werden können, um sowohl ökologische als auch verkehrstechnische Ziele zu erreichen. Die Erfahrungen aus verschiedenen Städten lassen zudem erkennen, dass durch gut durchdachte Mautsysteme ein relevanter Beitrag zur nachhaltigen Stadtentwicklung geleistet werden kann.

4.2. Umweltzonen

Umweltzonen (Low Emission Zones, LEZ) sind räumlich abgegrenzte Gebiete, in die nur Fahrzeuge einfahren dürfen, die bestimmte Abgasnormen erfüllen. Ziel dieser Zonen ist es, die Luftqualität durch eine gezielte Verringerung schädlicher Abgase – insbesondere von Personen- und Nutzfahrzeugen – zu verbessern. In Österreich und Deutschland werden Fahrzeuge durch das sogenannte Umweltplaketten klassifiziert, wobei nur Fahrzeuge mit einer Plakette bestimmter Farben in die Umweltzonen einfahren dürfen. Anhand der Plakette lässt sich erkennen, welcher Emissionsnorm ein Fahrzeug entspricht. Durch die Einführung der Umweltzonen soll der Marktanteil

umweltschädlicher Fahrzeuge reduziert werden, um die menschliche Gesundheit zu schützen (Pestel & Wozny, 2019). Die Euro-Emissionsklasse stützt sich auf den Abgaswerten aller Fahrzeugtypen und auf dieser Grundlage wird die Zufahrt in Umweltzonen normiert. Diese Euro-Normen werden in den Verordnungen für Umweltzonen verwendet. Ältere Dieselmotoren, die den Euro-Normen 1 bis 4 entsprechen, sind in vielen Umweltzonen wie in München oder Berlin verboten. (Umweltbundesamt Deutschlands, 2021). Benzinfahrzeuge mit den genannten Euro-Normen, die über eine grüne Umweltplakette verfügen, dürfen weiterhin in Umweltzonen einfahren, da sie im Vergleich zu Dieselfahrzeugen geringere Emissionen verursachen. Die Vorschriften für die Einfahrt hängen somit nicht nur von der jeweiligen Euro-Norm, sondern auch vom Kraftstofftyp ab. Je nach Land und Stadt können die Regeln und Zulassungsvoraussetzungen für Fahrzeuge in Umweltzonen variieren. In einigen Staaten gelten zudem unterschiedliche Bestimmungen für Pkw, Lkw und Busse.

In Österreich besteht seit dem 1. Januar 2015 eine Pflicht zur Anbringung einer Umweltplakette für alle Lastkraftwagen der Klassen N1 bis N3. Diese Plaketten dienen der Kontrolle und Regulierung des Verkehrs in Umweltzonen und ermöglichen es, Fahrzeuge mit hohem Schadstoffausstoß aus bestimmten Bereichen auszuschließen. Wer ohne entsprechende Kennzeichnung in eine Umweltzone einfährt, muss mit Geldstrafen rechnen. Ab dem Jahr 2024 wird zudem die Lkw-Maut um einen CO₂-basierten Aufschlag erweitert. Je höher der CO₂-Ausstoß eines Fahrzeugs, desto höher fällt die Maut aus. Diese Maßnahme soll wirtschaftliche Anreize für den Umstieg auf umweltfreundlichere Transportlösungen schaffen (Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, 2023).

Zur Fahrzeugklasse N1 zählen Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von bis zu 3,5 Tonnen. Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht zwischen 3,5 und 12 Tonnen werden der Klasse N2 zugeordnet, während alle darüber hinausgehenden Lastkraftwagen in die Klasse N3 fallen (Rechtsinformationssystem des Bundes, 1967).

Die Umweltplakette ist in sechs verschiedenen Farben erhältlich. Diese Farben – schwarz, rot, gelb, grün, blau und violett – kennzeichnen die jeweilige Euro-Schadstoffklasse von EURO 1 bis EURO 6. Die Plakette enthält außerdem wichtige Informationen wie die letzten sechs Stellen der Fahrzeug-Identifizierungsnummer, die

Fahrzeugklasse gemäß dem Kraftfahrgesetz (KFG) von 1967, den verwendeten Kraftstofftyp sowie eine individuelle Kontrollnummer (Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, 2012).

Die Umweltplakette ist derzeit in sieben ausgewiesenen Umweltzonen in Österreich verpflichtend: Wien, Oberösterreich, Niederösterreich, Steiermark, Tirol, Linz sowie Burgenland. In diesen Gebieten ist das Befahren für Fahrzeuge ohne entsprechende Kennzeichnung untersagt, um die Emissionen im Schwerverkehr gezielt zu reduzieren und zur Einhaltung der regionalen Luftqualitätsziele beizutragen (Öamtc, 2023).

- Wien

Die Umweltzone in Wien ist am 01.07.2014 in Kraft getreten. Zur gesamten Stadt Wien dürfen Lastkraftwagen der Klassen N1, N2 und N3 mit der EURO Norm 0-2, nicht einfahren (IG-L-Maßnahmenkatalog 2005, 20.12.2013).

- Oberösterreich

In Oberösterreich wird eine Teilstrecke der A1 West Autobahn als ein Sanierungsgebiet festgelegt und sowohl die Lastkraftwagen als auch Sattelkraftfahrzeuge mit einer Gesamtmasse von mehr als 3,5 Tonnen, die Euroklasse 0-2 entsprechen, nicht zu diesem Gebiet einfahren dürfen (LGBl. Nr. 87/2015, 2015). In Österreich bezieht sich der Begriff Sanierungsgebiet auf ein förmlich ausgewiesenes Gebiet, das im Rahmen einer städtebaulichen Sanierungsmaßnahme definiert wurde. Das vorrangige Ziel eines Sanierungsgebiets besteht darin, die Einhaltung von Luftschadstoffgrenz- oder -zielwerten zu gewährleisten und in solchen Sanierungsgebieten sind die getroffenen Maßnahmen darauf ausgerichtet, die Emissionen, die dazu geführt haben, dass die Immissionsgrenzwerte überschritten wurden, zu reduzieren. Dies geschieht, um sicherzustellen, dass die IG-L- bzw. EU-Grenzwerte eingehalten werden können (Bundesministerium Klimaschutz, 2023).

- Niederösterreich

Ab 1.01.2016 gilt im Sanierungsgebiet Wiener Umland ein Fahrverbot für Lastkraftwagen aller Gewichtsklassen, die die Anforderungen von Euro 0 bis 2 erfüllen. Alle Lastkraftwagen der Klassen N1, N2 und N3 mit der Euroklasse 3 und höher müssen seit 2015 mit einer Abgasplakette gekennzeichnet werden

(LGBI. 8103/1-0, 2015). In der Abbildung 3 sind alle Gebiete markiert, wo eine Umweltplakette erforderlich ist.

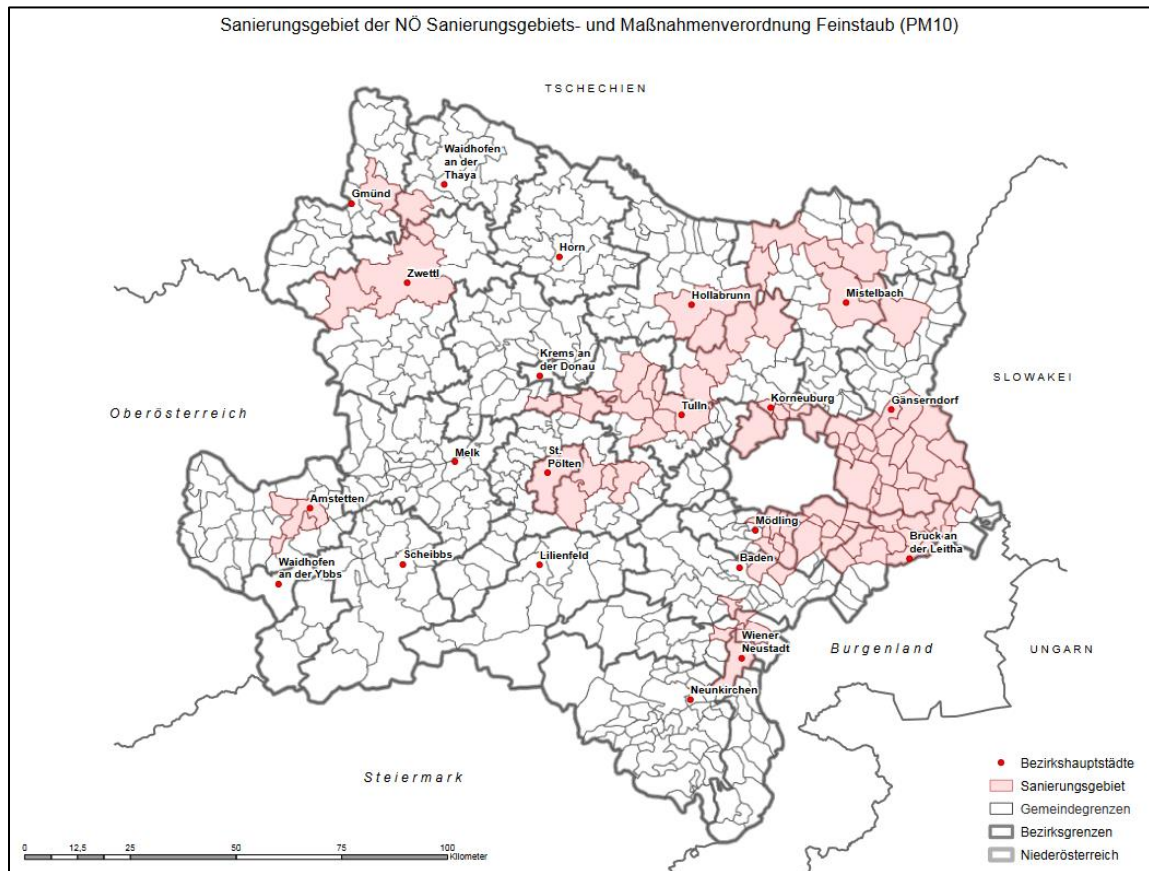


Abbildung 3 Sanierungsgebiet der Niederösterreich (Amt der NÖ Landesregierung, 2023)

- Steiermark

In Steiermark sind zwei Sanierungsgebiete, die Großraum Graz (Hellrosa auf der Abbildung 4) und Außer알pine Steiermark (Dunkelrosa auf der Abbildung 4) umfassen. Zu diesen Gebieten dürfen keine Lastkraftwagen, Sattelkraftfahrzeuge, selbstfahrende Arbeitsmaschinen und Spezialkraftwagen, deren Abgaswerte Euro 0-3 betragen, hineinfahren. Ab 1.01.2013 gilt auf dieselbetriebene Taxifahrzeuge eine maximale Partikelemissionsgrenzwert von 0,025 g/km. Alle Taxifahrzeuge, die diese Emissionsgrenzwert überschreiten, dürfen nicht der Stadtgebiet von Graz befahren (LGBI. Nr. 2/2012, 2012).

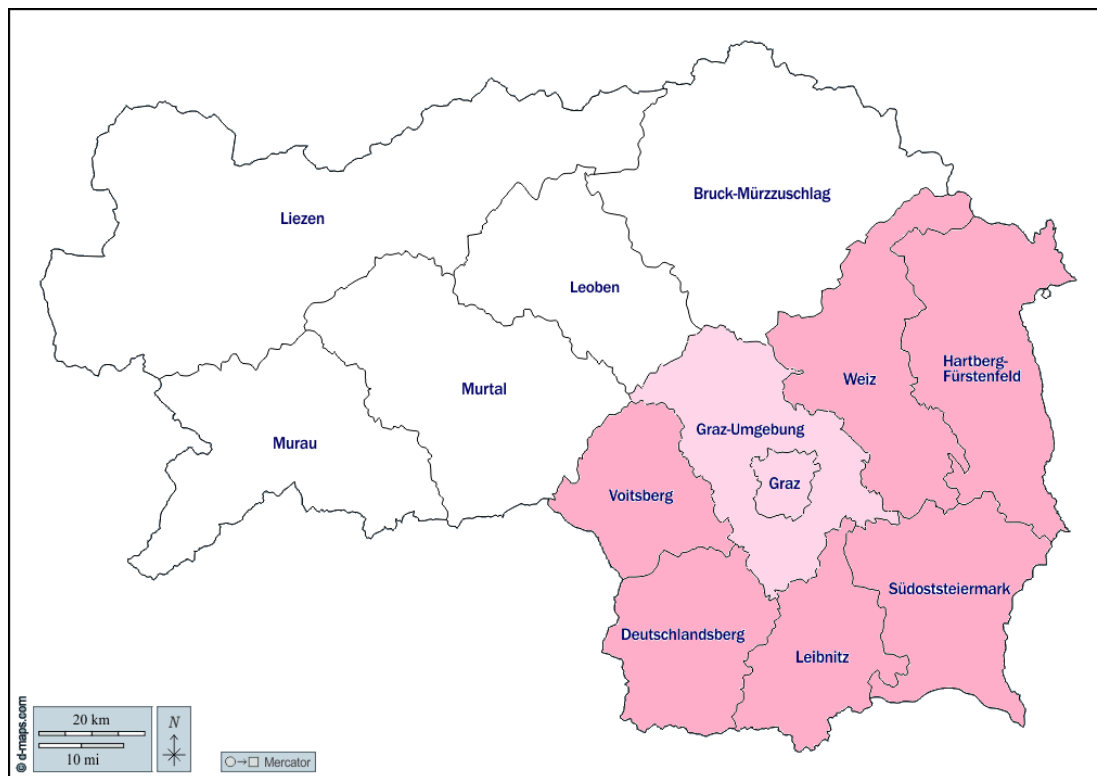


Abbildung 4 Sanierungsgebiete in Steiermark, LGBl. Nr. 2/2012

- Tirol

In Tirol wurde im Jahr 2016 ein Autobahnabschnitt die A 12 Inntal Autobahn von der österreichischen Staatsgrenze zu Deutschland als Sanierungsgebiet festgelegt. Ein Fahrverbot gilt auf Lastkraftwagen und Sattelkraftfahrzeugen mit einer höchsten zulässigen Gesamtmasse von mehr als 7,5 Tonne. Abhängig von transportiertem Gut sind die Ausnahmen im §3 Abs 1a (LGBl. Nr. 44/2016, 2016) aufgelistet und somit dürfen die Lastkraftwagen oder Sattelkraftfahrzeuge die Autobahn befahren.

- Linz

Das Sanierungsgebiet in Linz ist am 01.07.2020 eingeführt und betrifft nur die Taxis der Klasse M1. Die Einfahrt ins Sanierungsgebiet ist für den dieselbetriebenen Taxifahrzeuge mit der Abgasklasse Euro 0-3 und benzinbetriebene Taxifahrzeuge mit der Euronorm 0-2 nicht gestattet (LGBl. Nr. 3/2020 , 2.01.2020). Die Grenzen des Sanierungsgebiets- Linz sind in Anlage 1 der Verordnungsnummer 3/2020 als Plan dargestellt.

- Burgenland

Abbildung 5 zeigt das gesamte burgenländische Sanierungsgebiet. Es darf ab 1.10.2018 von Lastkraftwagen und Sattelkraftfahrzeuge mit einer Abgasklasse Euro 0-2 nicht befahren werden (LGBI Nr. 2/2017, 2017). Die genaue Auflistung von Gemeinden in Bezirken, die zum Sanierungsgebiet gehören, ist im §1 Abs 1 LGBI zu finden.

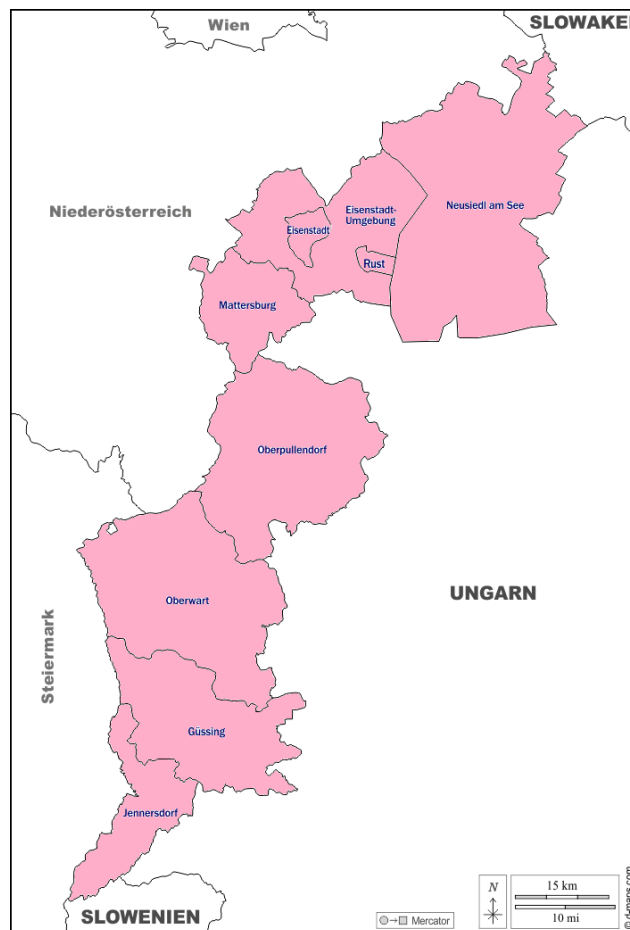


Abbildung 5 Sanierungsgebiete in Burgenland, LGBI Nr. 2/2017

Untersuchungen zeigen, dass die Einführung von Low Emission Zones (LEZ) zwar zu einem höheren Anteil alternativer Antriebsformen führen kann, dieser Effekt sich jedoch nicht zwangsläufig in einer signifikanten Reduktion der CO₂-Emissionen niederschlägt. Peters et al. analysierten beispielsweise die Auswirkungen einer LEZ in Madrid und stellten fest, dass zwar vermehrt Fahrzeuge mit alternativen Antrieben – insbesondere Plug-in-Hybride – neu zugelassen wurden, die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Fahrzeugflotte jedoch kaum sanken. Elektrofahrzeuge, die das größte Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen aufweisen, wurden

durch die Maßnahme nur geringfügig beeinflusst. Daraus lässt sich schließen, dass LEZ allein nicht ausreichen, um eine deutliche Dekarbonisierung im Verkehrssektor zu erreichen. Strengere Maßnahmen wie Zero Emission Zones (ZEZ) könnten hingegen wirksamer sein, um langfristige Klimaziele zu unterstützen (Peters, et al., 2021).

Auch andere Studien kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Laut dem Bericht des European Court of Auditors konnte in mehreren europäischen Städten zwar eine Verbesserung der Luftqualität durch LEZ festgestellt werden, der Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen war jedoch begrenzt. Der Bericht betont, dass flankierende Maßnahmen wie Förderprogramme für emissionsfreie Fahrzeuge oder Investitionen in den öffentlichen Nahverkehr notwendig sind, um die Klimaziele im Verkehrsbereich zu erreichen (European Court of Auditors, 2018).

4.3. Zufahrtsbeschränkungen

Sowohl Zufahrtsbeschränkungen als auch Stadtmautsysteme gehören zu den Maßnahmen, die Städte einsetzen, um den motorisierten Individualverkehr zu regulieren und die Luftqualität zu verbessern. Dabei unterscheiden sie sich grundlegend in ihrer Funktionsweise. Zufahrtsbeschränkungen basieren auf rechtlichen Vorgaben, die bestimmten Fahrzeugen – meist älteren Diesel- oder Benzfahrzeugen – die Einfahrt in festgelegte Umweltzonen oder Stadtgebiet verbieten, sofern sie nicht die geforderten Emissionsstandards erfüllen (Holman, et al., 2015). In Deutschland und Österreich sind solche Umweltzonen weit verbreitet; hier dürfen nur Fahrzeuge mit einer entsprechenden Umweltplakette einfahren (Umweltbundesamt Deutschlands, 2021).

Demgegenüber steht die Stadtmaut, bei der für die Einfahrt in bestimmte innerstädtische Bereiche eine Gebühr erhoben wird – unabhängig von der Emissionsklasse des Fahrzeugs, wenngleich emissionsarme Fahrzeuge oft von der Zahlung ausgenommen oder bevorzugt behandelt werden. Beispiele für solche Systeme sind bereits in Kapitel 4.1 dargestellt worden.

Am Beispiel italienischer Städte wie Bologna, Mailand und Palermo zeigt sich, dass Zufahrtsbeschränkungen häufig mit einer städtischen Maut kombiniert werden. Die Einfahrt in die verkehrsbeschränkte Zone der Innenstadt von Bologna ist täglich zwischen 7:00 und 20:00 Uhr mit einem Tagesticket möglich, das sechs Euro kostet.

Ein generelles Einfahrtsverbot gilt dort für Fahrzeuge mit den Abgasnormen Euro 0–2 sowie für Dieselfahrzeuge der Klassen Euro 0–3. Elektrofahrzeuge sind von den Gebühren befreit.

Ähnliche Zufahrtsregelungen gelten in Palermo: Der Zugang zum Stadtzentrum ist von Montag bis Freitag zwischen 8:00 und 20:00 Uhr sowie samstags von 7:30 bis 18:00 Uhr nur mit einem Tagesticket in Höhe von fünf Euro gestattet. Auch hier sind ältere Fahrzeuge – insbesondere Benzinfahrzeuge der Klassen Euro 0–2 und Dieselfahrzeuge bis Euro 3 – von der Ticketvergabe ausgeschlossen und dürfen somit nicht in die verkehrsbeschränkte Zone einfahren. Elektroautos sind ebenfalls von der Stadtmaut befreit.

Wie bereits in Kapitel 4.1 dargestellt, existieren in Mailand zwei Zonen: Zone B und Zone C. In die Zone C dürfen derzeit (Stand: August 2025) Benzinfahrzeuge mit Abgasnorm Euro 4 sowie Dieselfahrzeuge bis einschließlich Euro 6 noch bis zum 1. Oktober 2027 einfahren. Mopeds mit den Normen Euro 0–3, Fahrzeuge mit einer Länge über 7,5 Meter, sowie Fahrzeuge mit Diesel-LPG- oder Diesel-Methan-Antrieb der Klassen Euro 0–4 sind von der Einfahrt ausgeschlossen. Laut aktueller Regelung soll ab dem Jahr 2029 die Einfahrt in die Zone C auch für alle Diesel-Pkw verboten werden (Urban Access Regulations, 2022).

Die Zone B stellt eine reine Zufahrtsbeschränkung dar und umfasst weite Teile des Stadtgebiets. Sie gilt montags bis freitags von 7:30 bis 19:30 Uhr. In dieser Zone sind Benzinfahrzeuge der Klassen Euro 0–2, Dieselfahrzeuge bis einschließlich Euro 6, Fahrzeuge mit Diesel-LPG oder Diesel-Methan der Klassen Euro 0–4 sowie alle Fahrzeuge über 12 Meter Länge nicht zugelassen. Die Einhaltung der Vorschriften wird durch ein flächendeckendes Kamerasystem überwacht, das die Einfahrten kontinuierlich kontrolliert. Daher ist es zwingend erforderlich, dass einfahrende Fahrzeuge den geforderten Emissionsstandards entsprechen (Comune di Milano, 2015).

5. Beschreibung des verwendeten Models

In dieser Arbeit wird ein MFVRPCP dargestellt, mit dem Ziel, optimale Routen für eine gemischte Flotte aus Elektro- und Dieselfahrzeugen unter Berücksichtigung der bestehenden Mautzonen in Wien zu ermitteln. Für die Auslieferung von Waren zum Empfänger ist eine sorgfältige Routenplanung erforderlich, um sowohl Zeit- als auch Transportkosten möglichst gering zu halten.

Basierend auf den Arbeiten von Goeke und Schneider (2015) sowie Mohammadbagher und Torabi (2022) wurde ein neuer Variantenansatz des Mixed Fleet Vehicle Routing Problems entwickelt, der zusätzlich Mautkosten berücksichtigt. Das zugehörige mathematische Modell wird im Folgenden dargestellt.

Δb_{ij} Entladung der Batterie eines Elektrofahrzeugs bei der Fahrt vom Kunden i zum Kunden j

ΔL_{ij} Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs mit Dieselmotor bei der Fahrt vom Kunden i zum Kunden j

d_{ij} Entfernung zwischen Kunde i und j

q_i Nachfrage des Kunden i

f_y Kosten pro Energieeinheit für das Wiederaufladen der Batterie

f_l Kosten für den Verbrennungskraftstoff pro Liter Kraftstoff

F_A Set von Filialen in Zone A

$$F_A = \{17, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 31, 32, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46\}$$

F_B Set von Filialen in Zone B

$$F_B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 22, 23, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 37, 38\}$$

x_{ij}^e Binäre Entscheidungsvariable, ob die Verbindung ij von einem Elektrofahrzeug befahren wird

x_{ij}^d Binäre Entscheidungsvariable, ob die Verbindung ij von einem Dieselfahrzeug befahren wird

$t_{N_0 Z_a}^d$ Binäre Entscheidungsvariable, ob das Dieselfahrzeug d von Depot in Zone A fährt

$t_{N_0 Z_b}^d$ Binäre Entscheidungsvariable, ob das Dieselfahrzeug d von Depot in Zone B fährt

$t_{Z_a Z_b}^d$ Binäre Entscheidungsvariable, ob das Dieselfahrzeug d von Zone A in Zone B fährt

K_a Mautgebühren für Zone A, $K_a = 5$

K_b Mautgebühren für Zone B, $K_b = 9$

K_{ab} Mautgebühren für die Einfahrt von Zone A nach Zone B, $K_{ab} = 4$

V Set von Kunden, $V = \{1, 2, 3, \dots, 46\}$

Q^d Dieselfahrzeugkapazität

Q^e Elektrofahrzeugkapazität

u_i Last des Fahrzeugs beim Kunden i

m_e Set von Elektrofahrzeugen in der Flotte

m_d Set von Dieselfahrzeugen in der Flotte

$M = m_d + m_e$ Anzahl von allen Fahrzeugen

p_{ij} CO₂ – Ausstoß des Fahrzeugs bei der Fahrt von Kunde i zur Kunde j in Gramm

α, β, γ Gewichtungen der einzelnen Zielfunktionen

Das Ziel dieses Modells ist es, die Gesamtkosten der Flotte unter Berücksichtigung von drei Hauptfaktoren zu minimieren: den Streckenkosten (1), dem CO₂-Ausstoß (2) sowie den anfallenden Mautgebühren (3). Die Streckenkosten ergeben sich aus dem Energieverbrauch der Fahrzeuge auf den jeweiligen Routen, dabei werden Stromkosten für Elektrofahrzeuge und Kraftstoffkosten für Dieselfahrzeuge berücksichtigt. Zur Modellvereinfachung wurden Lohnkosten, die in vergleichbaren Studien einbezogen wurden, in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

Zur Lösung aller drei Zielfunktionen werden diese zu einer einzigen Zielfunktion (4) zusammengeführt. Hierfür kann beispielsweise die gewichtete Summenmethode verwendet werden, mit der sich die relative Bedeutung der einzelnen Ziele abbilden lässt. Die Gewichtungsfaktoren α , β und γ werden entsprechend der Priorität der jeweiligen Ziele festgelegt und liegen jeweils zwischen 0 und 1, wobei ihre Summe gleich 1 ist (Yang, 2014).

$$\min C = \sum_{e \in m_e} \sum_{i \in N_0, j \in N_{n+1}} f_y \Delta b_{ij} d_{ij} x_{ij}^e + \sum_{d \in m_d} \sum_{i \in N_0, j \in N_{n+1}} f_l \Delta L_{ij} d_{ij} x_{ij}^d \quad i \neq j \quad (1)$$

$$\min P = \sum_{d \in m_d} \sum_{i \in N_0, j \in N_{n+1}} p_{ij} x_{ij}^d \quad i \neq j \quad (2)$$

$$\min T = \sum_{d \in m_d} \sum_{i \in N_0, j \in F_a} x_{ij}^d * K_a + \sum_{d \in m_d} \sum_{i \in N_0, j \in F_b} x_{ij}^d * K_b + \sum_{d \in m_d} \sum_{i \in F_a, j \in F_b} x_{ij}^d * K_{ab} \quad (3)$$

$$\min Z = \alpha C + \beta P + \gamma T \quad (4)$$

Die Bedingungen (5) und (6) implizieren, dass für jeden Kunden die Anzahl der ankommenden Fahrzeugbewegungen der Anzahl der abgehenden Bewegungen desselben Fahrzeugtyps entspricht. Dies bedeutet, dass der Fahrzeugtyp, der einen Kunden anfährt, diesen auch wieder verlässt:

$$\sum_{j \in V_{n+1}} x_{ij}^e - \sum_{j \in V_0} x_{ji}^e = 0 \quad \forall i \in V, i \neq j \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V_{n+1}} x_{ij}^d - \sum_{j \in V_0} x_{ji}^d = 0 \quad \forall i \in V, i \neq j \quad (6)$$

Die gemischte Fahrzeugflotte setzt sich aus einer festen Anzahl von Dieselfahrzeugen m_d und Elektrofahrzeugen m_e zusammen. Die Elektrofahrzeuge werden über Nacht im Depot vollständig auf ihre maximale Batteriekapazität aufgeladen. In der vorliegenden Fallstudie stellte jedoch nicht die Reichweite der Elektrofahrzeuge die limitierende Größe dar, sondern deren Ladevolumen. Aus diesem Grund war es nicht notwendig, eine Nebenbedingung zu formulieren, die sicherstellt, dass die Batteriereichweite für die Rückkehr zum Depot ausreicht.

Die Nebenbedingungen (7) und (8) gewährleisten, dass die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge jeweils der vorgegebenen Flottenzusammensetzung entspricht:

$$\sum_{j \in V} x_{0j}^e \leq m_e \quad (7)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j}^d \leq m_d \quad (8)$$

Die verbrauchte elektrische Energiemenge lässt sich wie folgt berechnen:

$$\text{Verbrauch in kWh} = \frac{\text{Batteriegröße}}{\text{Reichweite}} * 100$$

$$\text{Energiekosten} = f_y * \text{Verbrauch in kWh}$$

Die Formulierungen in (9) und (10) stellen sicher, dass jedes Dieselfahrzeug $d \in m_d$ sowie jedes Elektrofahrzeug $e \in m_e$ das Depot N_0 genau einmal verlässt:

$$\sum_{j \in V \cup \{N_1\}} x_{N_0 j}^d = 1 \quad \forall d \in m_d \quad (9)$$

$$\sum_{j \in V \cup \{N_1\}} x_{N_0 j}^e = 1 \quad \forall e \in m_e \quad (10)$$

In den Bedingungen (11) und (12) wird zusätzlich festgelegt, dass jedes dieser Fahrzeuge nach Abschluss der jeweiligen Route wieder zum Depot N_1 zurückkehrt. Damit wird gewährleistet, dass alle Fahrzeuge nach ihrem Einsatz vollständig in das Depot zurückgeführt werden – ein Aspekt, der insbesondere im Hinblick auf Fahrzeugverfügbarkeit, Energieversorgung und logistische Rückverfolgbarkeit von Bedeutung ist:

$$\sum_{i \in V \cup \{N_0\}} x_{i N_1}^d = 1 \quad \forall d \in m_d \quad (11)$$

$$\sum_{i \in V \cup \{N_0\}} x_{i N_1}^e = 1 \quad \forall e \in m_e \quad (12)$$

Die folgenden Nebenbedingungen dienen dazu, eine logische Verknüpfung zwischen den Binärvariablen und den Entscheidungen über die Routenwahl herzustellen. Dabei wird sichergestellt, dass Mautzonen nur dann berücksichtigt werden, wenn sie auch tatsächlich befahren werden.

Die Bedingung (13) stellt sicher, dass ein Dieselfahrzeug die Zone A nur dann aktiviert, wenn es mindestens einen Kunden in dieser Zone anfährt.

$$t_{N_0 Z_a}^d \geq \sum_{j \in F_a} x_{N_0 j}^d \quad \forall d \in m_d \quad (13)$$

Analog gewährleistet Bedingung (14), dass Zone B nur bei tatsächlicher Zufahrt in die Kostenrechnung eingeht:

$$t_{N_0 Z_b}^d \geq \sum_{j \in F_b} x_{N_0 j}^d \quad \forall d \in m_d \quad (14)$$

Schließlich überprüft Bedingung (15), ob ein Wechsel von Zone A nach Zone B stattfindet:

$$t_{Z_a Z_b}^d \geq \sum_{i \in F_a} \sum_{j \in F_b} x_{ij}^d \quad \forall d \in m_d \quad (15)$$

Ein zentrales Ziel dieses Modells besteht darin, neben Emissions- und Streckenkosten auch Mautgebühren zu berücksichtigen und diese innerhalb eines festgelegten Budgets zu halten. In der analysierten Fallstudie wurde ein tägliches Limit von 9 Euro pro Dieselfahrzeug festgelegt. Die Bedingung (16) sichert die Einhaltung dieser Kostenbeschränkung:

$$K_a * t_{N_0 Z_a}^d + K_b * t_{N_0 Z_b}^d + K_{ab} * t_{Z_a Z_b}^d \leq 9 \quad \forall d \in m_d \quad (16)$$

Dabei stehen K_a, K_b, K_{ab} für die Mauttarife für das Befahren der Zonen bzw. den Übergang zwischen ihnen.

Um die Konsistenz des Transportprozesses zu gewährleisten, müssen Fahrzeuge, die das Depot verlassen, auch wieder dorthin zurückkehren. Dies wird durch die folgenden Gleichungen abgebildet:

$$\sum_{j \in V} x_{N_0 j}^d = \sum_{i \in V} x_{i N_1}^d \quad \forall d \in m_d \quad (17)$$

$$\sum_{j \in V} x_{N_0 j}^e = \sum_{i \in V} x_{i N_1}^e \quad \forall e \in m_e \quad (18)$$

Darüber hinaus stellt Bedingung (19) sicher, dass jeder Kunde genau einmal beliefert wird – entweder von einem Diesel- oder einem Elektrofahrzeug:

$$\sum_{j \in V \cup \{N_1\} \mid i \neq j} x_{ij}^d + \sum_{j \in V \cup \{N_1\} \mid i \neq j} x_{ij}^e = 1 \quad \forall i \in V \quad (19)$$

Die folgenden Kapazitätsrestriktionen stellen sicher, dass die maximal zulässige Nutzlast pro Fahrzeugtyp nicht überschritten wird:

$$q_j * x_{ij}^d \leq Q^d \quad \forall i \in V, \forall j \in V \quad (20)$$

$$q_j * x_{ij}^e \leq Q^e \quad \forall i \in V, \forall j \in V \quad (21)$$

Zur Vermeidung von Subtours, die nicht mit dem Depot verbunden sind, wird die sogenannte Miller–Tucker–Zemlin-Formulierung angewendet. Sie stellt sicher, dass jede Route zusammenhängend ist und am Depot beginnt und endet:

$$u_i - u_j + |V| * x_{ij}^d \leq |V| - 1 \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (22)$$

$$u_i - u_j + |V| * x_{ij}^e \leq |V| - 1 \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (23)$$

Die Wertebereiche der Hilfsvariablen u_i , die der Reihenfolge der Kundenbesuche dienen, werden durch folgende Bedingung begrenzt:

$$1 \leq u_i \leq |V| \quad \forall i \in V \quad (24)$$

6. Case Study

Das Ziel dieser Fallstudie ist es, zu analysieren, ob die Einführung eines städtischen Mautsystems in Wien zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor führen kann und wie sich diese Emissionen verändern, wenn ein Unternehmen für Lieferungen eine gemischte Flotte aus Elektro- und Dieselfahrzeugen einsetzt. Dabei wird untersucht, ob die Betriebskosten einer Flotte von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu einer Dieselflotte geringer ausfallen, wenn ein Mautsystem in einer urbanen Umgebung wie Wien Anwendung findet. Darüber hinaus wird analysiert, welche Flottenzusammensetzung – ausschließlich Diesel, ausschließlich Elektrofahrzeuge oder eine gemischte Flotte – unter den spezifischen Rahmenbedingungen in Wien die kosteneffizienteste Lösung darstellt. Abschließend wird der Frage nachgegangen, ob durch die Wahl der wirtschaftlich effizientesten Flottenstrategie eine Reduktion der Emissionen im Vergleich zu einem Szenario ohne Mautsystem erzielt werden kann. Die Fallstudie soll damit einen Beitrag dazu leisten, wie wirtschaftliche und ökologische Ziele im urbanen Lieferverkehr durch eine gezielte Flottenplanung miteinander in Einklang gebracht werden können.

- Zone & Bepreisungssystem

Angelehnt an das aktuelle Tarifsysteem der Stadt Madrid wurde ein fiktives Mautmodell für Wien entwickelt, das in zwei Zonen unterteilt ist: Zone A und Zone B. Wie in Abbildung 6 dargestellt, umfasst Zone A die äußeren Bezirke der Stadt, die auf der Karte gelb eingefärbt sind. Zone B hingegen beinhaltet die innerstädtischen Bezirke, die ausschließlich über die Zone A erreichbar sind und auf der Karte in Pink hervorgehoben wurden.

Für das Befahren sowie das uneingeschränkte Bewegen innerhalb aller Bezirke der Zone A fällt eine tägliche Mautgebühr in Höhe von 5 € an. Befinden sich Kunden in der Zone B, so ist diese – aufgrund der geografischen Lage – nur über die Zone A zugänglich. In einem solchen Fall ist für Dieselfahrzeuge ein ganztägiges Ticket zum Preis von 9 € erforderlich. Dieses berechtigt die Fahrer, innerhalb eines Tages beliebig oft die Grenzen zwischen den beiden Zonen zu überschreiten.

Die Mautpflicht gilt an Werktagen (Montag bis Freitag) in der Zeit von 7:00 Uhr bis 20:00 Uhr. Elektrofahrzeuge sind von der Zahlungspflicht vollständig befreit und dürfen beide Zonen ohne zusätzliche Gebühren befahren.

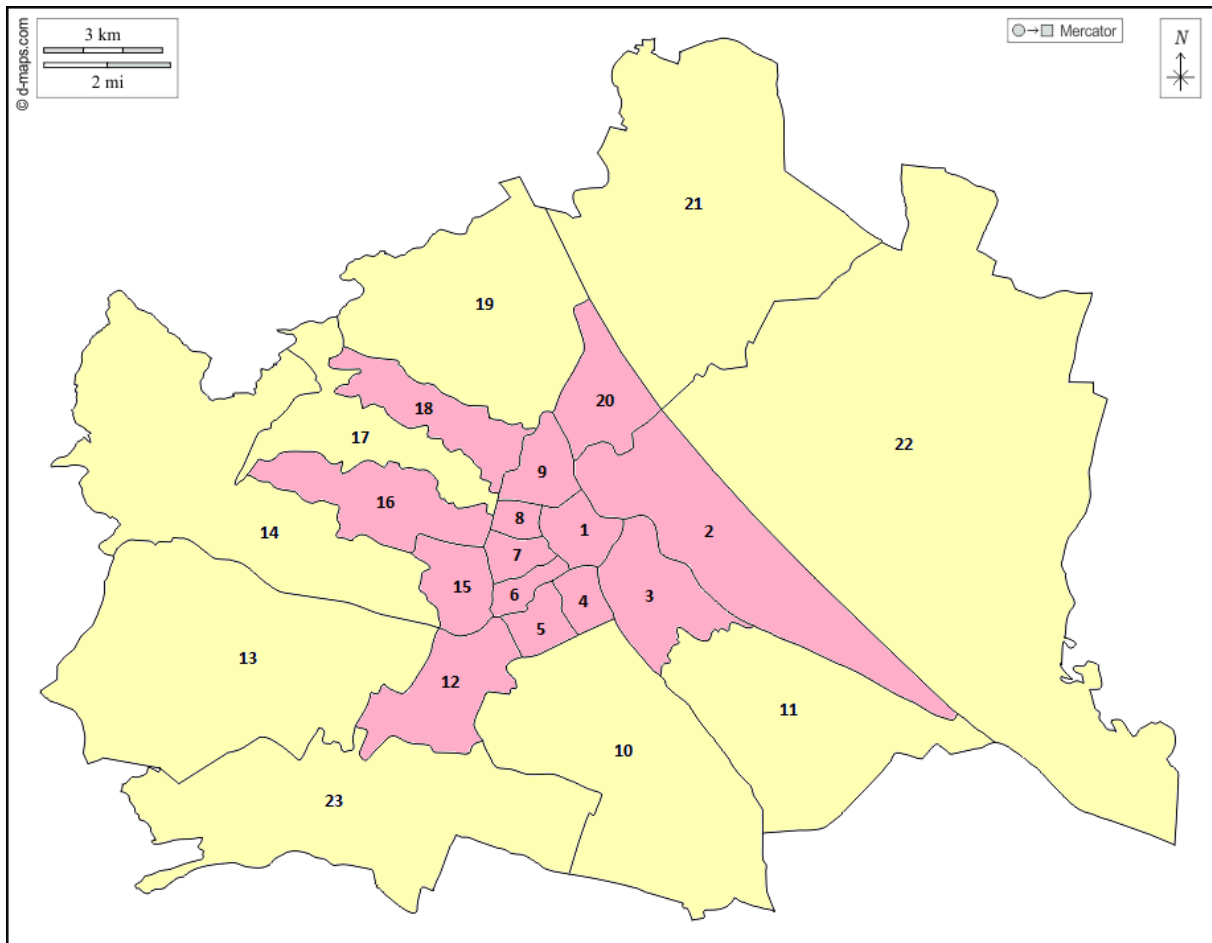


Abbildung 6 Mautzonen in Wien

- Depot

Die Wahl des geeigneten Depotstandorts stellt eine strategisch zentrale Entscheidung für jedes Logistikunternehmen dar, da sie maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz der Routenplanung und damit auf die gesamten Betriebskosten hat. Derzeit betreibt das Unternehmen Hofer sechs regionale Verteilzentren. Da sich die vorliegende Fallstudie ausschließlich auf die Stadt Wien konzentriert, wurden im Rahmen der Modellierung zwei Städte im Umland – Stockerau im Nordwesten und Trumau im Süden Wiens – als potenzielle Depotstandorte in Betracht gezogen.

Um die Komplexität der Analyse zu reduzieren, wird in diesem Modell ein vereinfachtes Single-Depot-Vehicle-Routing-Problem (SDVRP) betrachtet. Das bedeutet, dass sämtliche Fahrzeuge ihre Touren von einem zentralen Depot aus starten und nach der Belieferung aller Kunden wieder dorthin zurückkehren.

Die endgültige Wahl des Depots erfolgte auf Basis der Luftlinienentfernung zum ersten Wiener Gemeindebezirk, der als zentraler Referenzpunkt für das Stadtgebiet

dient. Da Stockerau in diesem Vergleich näher am Wiener Stadtzentrum liegt als Trumau, wurde dieser Standort als Ausgangspunkt für die Routenplanung im Modell herangezogen. Diese Entscheidung zielt darauf ab, die durchschnittliche Fahrdistanz und somit sowohl die operativen Kosten als auch potenzielle Emissionen zu minimieren.

- Kunden

Die für diese Fallstudie verwendeten Kundendaten basieren auf öffentlich zugänglichen Informationen des Unternehmens Hofer. Als Kunden gelten dabei alle Hofer-Filialen innerhalb der Stadtgrenzen Wiens, die im Rahmen der Belieferung berücksichtigt werden. Die Anzahl der Filialen pro Bezirk ist in der untenstehenden Abbildung 7 grafisch dargestellt.

Wien ist administrativ in 23 Bezirke unterteilt, wobei der 22. Bezirk (Donaustadt) flächenmäßig der Größte ist, gefolgt vom 21. Bezirk (Floridsdorf) und dem 13. Bezirk (Hietzing) (Mohr, 2022). Laut aktuellen Daten verfügt die Stadt Wien über 119 Hofer-Filialen. Eine besonders hohe Filialdichte zeigt sich im 10. Bezirk (Favoriten), der mit 15 Standorten den Spitzenwert unter den Wiener Bezirken aufweist. Es folgen der 22. Bezirk (Donaustadt) mit 14 und der 21. Bezirk (Floridsdorf) mit 13 Filialen. Diese räumliche Verteilung der Kundenstandorte stellt eine wesentliche Grundlage für die Optimierung der Routenplanung im Rahmen des Vehicle-Routing-Problems dar (Hofer, 2023).

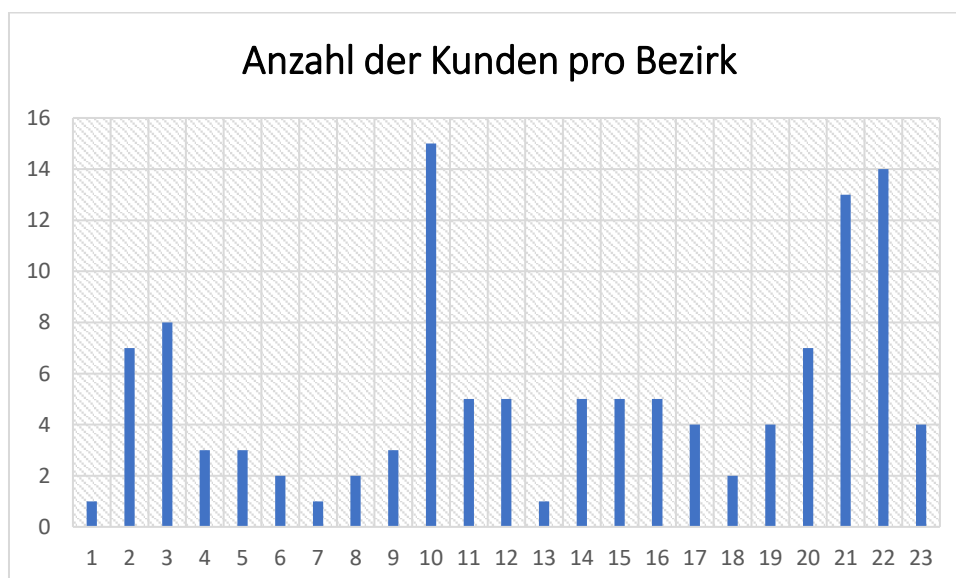


Abbildung 7 Anzahl der Kunden pro Bezirk, basierend auf Daten von hofer.at (Hofer, 2023)

6.1 Untersuchungsaufbau

Die Standorte des Depots und der Kunden sind bekannt, sodass die Entfernungen zwischen den jeweiligen Punkten eindeutig bestimmt werden können. Um die minimale Anzahl an Touren- und somit an benötigten Fahrzeugen- zu ermitteln, muss die Gesamtnachfrage aller Kunden im Vorfeld bekannt sein. Diese wird durch die Kapazität eines Fahrzeugs dividiert und das Ergebnis aufgerundet. Auf diese Weise lässt sich eine Anzahl potenzieller Lieferwege bestimmen, die durch eine begrenzte Reichweite der Fahrzeuge oder deren maximale Nutzlast definiert sind. Jeder dieser Routen beginnt und endet am Depot und kann mehrere Kunden entlang des Weges bedienen, wobei jeder Kunde genau einmal besucht wird. Da Elektrofahrzeuge während des Ladevorgangs nicht verwendet werden können und der Fahrer in dieser Zeit dennoch entlohnt werden muss, wurde angenommen, dass das Aufladen über Nacht im Depot erfolgt, um Effizienzverluste im Tagesbetrieb zu vermeiden. Es werden sowohl eine Nutzlast als auch eine Kilometerzahl festgelegt, die den realen Parametern von Lieferwagen entsprechen.

Die Flottengröße in dieser Arbeit richtet sich nach der Nachfrage und setzt sich aus einer Mischung von Diesel- und Elektrofahrzeugen zusammen. Für diese Fallstudie wird der Iveco Daily 7 Tonnen als Diesel-Fahrzeug und der Iveco Edaily als Elektrofahrzeug verwendet. Iveco Daily 7 Tonnen erfüllt die Euro 6 Norm und weist CO₂-Emissionen von 204 g/km auf, bei einem Kraftstoffverbrauch von 8,5 Litern pro 100 km (Iveco Austria G.m.b.H, 2023). Im Unterschied dazu verbraucht der Edaily 42S 30 kWh pro 100 km mit drei Batteriepaketen und hat eine Reichweite von 347 km bei voller Beladung und bis zu 408 km bei Halbbeladung. Die maximale Beladungskapazität beträgt 1129 kg (IVECO S.p.A, 2024). Für das Iveco Daily 7 Tonnen die maximale Beladungskapazität beträgt 4300 kg (4Trucks, 2018).

Die Kosten pro Energieeinheit für das Wiederaufladen der Batterie eines Elektrofahrzeugs variieren je nach aktuellem Strompreis, der Ladeleistung, der Batteriekapazität und der Art des Ladevorgangs. Ein Elektrofahrzeug kann beispielsweise über eine herkömmliche Haushaltssteckdose geladen werden, wobei die Ladedauer des Iveco eDaily aufgrund der geringen Ladeleistung zwischen 22 und 32 Stunden liegen kann. Durch die Installation einer Wallbox kann die Ladezeit deutlich verkürzt werden. Mit einer durchschnittlichen Ladeleistung von 111 kWh lässt sich ein Iveco Edaily in etwa 7 Stunden vollständig aufgeladen.

Eine weitere Möglichkeit zur Senkung der Betriebskosten stellt die Nutzung einer eigenen Solaranlage dar. Damit kann die Elektroflotte mit selbst erzeugtem Strom versorgt werden. Die tatsächlichen Kosten hängen hierbei von der Größe der Solaranlage sowie vom Stromverbrauch der Flotte ab. Um zusätzliche Kosten durch Netzstrombezug zu vermeiden, sollte die Flottengröße an die Produktionskapazität der Solaranlage angepasst werden (Shell, 2023).

Im Rahmen dieser Fallstudie wurde ein Ladetarif zugrunde gelegt, um realistische Annahmen für die Aufladekosten zu treffen. Basierend auf den offiziellen Informationen von Wien Energie wurde der Preis pro Kilowattstunde (kWh) aus einem mittleren Tarifpaket gewählt und beträgt 0,35 Euro/kWh. Dieser Wert bildet die Grundlage für die Berechnung der potenziellen Lade- und Betriebskosten (Wien Energie, 2025). Für die Berechnung der Betriebskosten von Dieselfahrzeugen wurde der durchschnittliche Dieselpreis im April 2025 in Höhe von 1,53 €/Liter herangezogen (Rhino Car Hire, 2025). Die E-Autos zeigen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren niedrigere Betriebskosten pro Kilometer auf. Für die in der Fallstudie betrachteten Fahrzeugtypen betragen die Kosten pro gefahrenem Kilometer bei einem Elektrofahrzeug 10 Cent, während sie bei einem Dieselfahrzeug bei 13 Cent liegen. Die Kosteneinsparungen sind auf mehrere Faktoren zurückzuführen. Zum einen ist der Strom, den Elektrofahrzeuge benötigen, in vielen Regionen kostengünstiger im Vergleich zu Kraftstoff. Darüber hinaus können Elektrofahrzeuge in vielen Ländern von Steuervergünstigungen und reduzierten Gebühren für das Parken und die Nutzung von Straßen profitieren. Dies führt zu insgesamt niedrigeren Betriebskosten für die Besitzer von Elektrofahrzeugen und trägt dazu bei, sie wirtschaftlich attraktiver zu machen. Zusätzlich zeichnen sich Elektrofahrzeuge durch eine geringere Geräuscentwicklung im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor aus. Dies kann insbesondere in städtischen Gebieten von Vorteil sein, wo Lärmbelästigung ein Anliegen ist (Breitsprecher, 2023).

Zur Bewertung des Einflusses verschiedener logistischer und wirtschaftlicher Faktoren auf die Struktur einer optimalen Fahrzeugflotte sowie auf die Effizienz von Lieferwegen wurde eine Reihe von Testszenarien durchgeführt. Analysiert wurden unter anderem die Auswirkungen von Gewichtungen in der Zielfunktion, städtischen Mautgebühren, Fahrzeugkapazitäten sowie die Flottenkonfiguration (homogen vs. gemischt). Dabei ist zu beachten, dass für Dieselfahrzeuge bei Fahrten im

Stadtgebiet eine städtische Gebühr anfällt, während elektrisch betriebene Lieferfahrzeuge davon ausgenommen sind.

6.2 Ergebnisse der Untersuchung

Die Fallstudie wurde in FICO Xpress Mosel implementiert. Aufgrund begrenzter Rechenkapazitäten musste die Anzahl der betrachteten Filialen von ursprünglich 119 auf 46 reduziert werden. Die Entfernungen zwischen dem Depot und den Kundenstandorten wurden mithilfe des VRP Spreadsheet Solvers berechnet. Auf dieser Grundlage wurde eine Distanzmatrix mit 48^2 Einträgen erstellt, welche anschließend in FICO Xpress Mosel für die Modellierung verwendet wurde. Die Mindestanzahl einer Flotte, die ausschließlich aus Dieselfahrzeugen Iveco Daily besteht, beträgt fünf Fahrzeuge. Wird hingegen eine Flotte aus elektrisch betriebenen Lieferfahrzeugen Iveco E-Daily eingesetzt, erhöht sich die erforderliche Anzahl auf insgesamt neunzehn Fahrzeuge.

Gegenstand dieser Arbeit ist eine Fahrzeugflotte, die sich aus Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebstechnologien zusammensetzt. Im Zentrum der Analyse steht dabei die gemischte Flotte, bestehend aus Diesel- und Elektrofahrzeugen. Dennoch wird auch jeder Fahrzeugtyp einzeln betrachtet, um Unterschiede und Besonderheiten der jeweiligen Antriebsform im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit, Umweltbilanz und logistische Leistungsfähigkeit zu beleuchten.

Die Ergebnisse der Untersuchung wurden thematisch in aufeinander aufbauende Unterkapitel gegliedert, um den Einfluss einzelner Modellveränderungen auf die jeweiligen Bewertungskriterien nachvollziehbar darzustellen.

Im Kapitel 6.2.1 erfolgt eine detaillierte Betrachtung der täglichen Betriebskosten, aufgeteilt nach Flottenkonfigurationen: zunächst für eine Diesel-Flotte, anschließend für eine rein elektrische Flotte und abschließend für die kombinierte, gemischte Flotte. Zu den Tageskosten zählen neben Streckenkosten auch städtische Gebühren, die beim Befahren kostenpflichtiger Umweltzonen innerhalb Wiens für Dieselfahrzeuge anfallen. Zudem wird in diesem Abschnitt die CO₂-Emission der gemischten Flotte analysiert, um deren ökologische Auswirkungen zu quantifizieren.

Kapitel 6.2.2 widmet sich der Zielfunktion des entwickelten Modells. Diese basiert auf einer gewichteten Minimierung dreier zentraler Kriterien: Transportkosten, CO₂-Emissionen sowie städtische Gebühren. Je nach gesetztem Prioritätsschwerpunkt

wird das Mixed Fleet Vehicle Routing Problem with Congestion Prices im Optimierungstool FICO Xpress Mosel gelöst, um das jeweils effizienteste Szenario zu identifizieren.

Im Kapitel 6.2.3 wird eine Modellvariante untersucht, in der angepasste Mautgebühren zum Einsatz kommen. In dieser Variante wurden die städtischen Gebühren deutlich erhöht, orientiert an den aktuellen Preisen in London. Ziel dieser Anpassung ist es, die Auswirkungen deutlich höherer städtischer Gebühren auf die Tourenplanung sowie die CO₂-Emissionen zu analysieren. Es wird untersucht, inwiefern derartige Maßnahmen als regulatorisches Steuerungsinstrument den Einsatz emissionsärmerer Fahrzeugtypen fördern können.

Im Kapitel 6.2.4 wird untersucht, welchen Einfluss eine Erhöhung der Nutzlast von Elektrofahrzeugen auf die Tourenplanung und die Gesamteffizienz der Flotte hat. Ziel ist es, zu prüfen, ob und in welchem Umfang durch technische Weiterentwicklungen bei E-Fahrzeugen Einschränkungen hinsichtlich Ladekapazität kompensiert werden können.

Das darauf folgende Kapitel 6.2.5 beschäftigt sich mit der Analyse einer homogenen Flottenkonfiguration. Dabei wird sowohl eine vollständig dieselbetriebene als auch eine vollständig elektrische Flotte getestet und bewertet, um deren Leistungsfähigkeit mit der gemischten Hauptflotte systematisch zu vergleichen.

Im abschließenden Kapitel 6.2.6 wird das Modell unter der Annahme wegfallender städtischer Gebühren erneut durchgerechnet. Ziel ist es, herauszufinden, ob diese Gebühren in der Praxis tatsächlich einen ökologischen Lenkungseffekt entfalten – also Unternehmen dazu bewegen, emissionsärmere Fahrzeuge einzusetzen – und in welchem Ausmaß sie zur Reduktion der CO₂-Emissionen im städtischen Lieferverkehr beitragen können.

❖ **Standardvariante**

Zur Lösung des Mixed Fleet Vehicle Routing Problems with Congestion Prices wurden Gewichtungen für die einzelnen Parameter festgelegt: Den Streckenkosten und den städtischen Mautgebühren wurde jeweils ein Gewicht von 40 % zugewiesen, während die CO₂-Emissionen mit einem Gewicht von 20 % berücksichtigt wurden. Als Ausgangsvariante wurde angenommen, dass die Flotte aus drei Elektrofahrzeugen und sechs Dieselfahrzeugen besteht.

Zur Berechnung der Lösung mit FICO Xpress Mosel wurde ein Zeitlimit von 20 Minuten festgelegt. Ohne diese zeitliche Begrenzung rechnete der Solver auch nach mehreren Stunden weiter, ohne ein zufriedenstellendes Näherungsergebnis zu liefern. Nach etwa zwölf Minuten wurde eine erste zulässige Lösung gefunden, bei der der sogenannte Gap – also die prozentuale Abweichung zwischen der besten gefundenen Lösung und der unteren Schranke – bei 86 % lag. Ein GAP-Wert nahe null deutet darauf hin, dass die aktuelle Lösung sehr nahe am globalen Optimum liegt. Nach Ablauf des Zeitlimits von 20 Minuten reduzierte sich dieser Wert nur geringfügig auf 83 %, was darauf hinweist, dass der Solver zwar eine gültige Lösung gefunden hat, jedoch noch kein qualitativ hochwertiges Ergebnis ermitteln konnte.

Alle drei Elektrofahrzeuge wurden bei der Tourenplanung berücksichtigt. Das Fahrzeug mit der höchsten Anzahl beliefeter Kunden erreichte vier Stopps auf seiner Route. Von den sechs zur Verfügung stehenden Dieselfahrzeugen wurden nur fünf eingesetzt; eines blieb im Depot. Die im Rahmen der Tourenplanung angefallenen städtischen Mautgebühren beliefen sich insgesamt auf 45 Euro. Daraus ergibt sich, dass alle fünf eingesetzten Dieselfahrzeuge beide kostenpflichtigen Zonen durchquerten und dementsprechend Tagespässe im Wert von jeweils 9 Euro pro Fahrzeug erworben werden mussten. Die Streckenkosten – welche die Kraftstoffkosten und den Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge widerspiegeln – beliefen sich auf insgesamt 76,33 Euro. Somit ergaben sich Gesamtkosten in Höhe von 121,33 Euro pro Tag für den Einsatz der gesamten Fahrzeugflotte. Die zurückgelegte Gesamtstrecke aller Fahrzeuge betrug 649 Kilometer. Die durch die Dieselfahrzeuge verursachten Emissionen beliefen sich auf insgesamt 82.504,13 Gramm CO₂.

Die Lösung dieses Ausgangsszenarios ist in Tabelle 1 im Kapitel 6.2.2 dargestellt und dient dort als Grundlage für die Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Gewichtungen der einzelnen Optimierungsparameter.

6.2.1 Vergleich der täglichen Betriebskosten und Emissionen bei unterschiedlichen Flottenzusammensetzungen

Zu Beginn der Analyse wird eine Flotte betrachtet, die ausschließlich aus fünf dieselbetriebenen Fahrzeugen besteht. Das zugrunde liegende Optimierungsmodell zielt darauf ab, eine Zielfunktion zu minimieren, welche sich aus drei zentralen Parametern zusammensetzt: den Streckenkosten, den städtischen Mautgebühren sowie den CO₂-Emissionen. Um diese simultan optimieren zu können, wurden entsprechende Gewichtungsfaktoren eingeführt.

Im Rahmen der Modellierung des Mixed Fleet Vehicle Routing Problems with Congestion Prices wurde angenommen, dass den Streckenkosten und den Mautgebühren jeweils ein Gewicht von 40 % zukommt, während die CO₂-Emissionen mit einem Gewicht von 20 % berücksichtigt werden. Die Wahl dieser Gewichtungen folgt dem Prinzip der Gleichbehandlung wirtschaftlicher Faktoren, wobei der ökologische Aspekt bewusst in moderater Form integriert wird. Eine ausführlichere Diskussion der Gewichtungsstruktur ist in Kapitel 6.2.2 Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Gewichtungen von Zielparametern auf die Routenplanung zu finden. Die tägliche Mautgebühr beträgt bei dieser Flottenkonfiguration 45 €, die Streckenkosten belaufen sich auf 61,30 €, was in Summe zu einem täglichen Betriebskostenaufwand von 106,30 € führt. Die von allen fünf Dieselfahrzeugen gemeinsam zurückgelegte Strecke summiert sich auf 471,4 km. Die detaillierte Darstellung der mit der Dieselflotte zurückgelegten Routen ist Abbildung 11 in Kapitel 6.2.5 zu entnehmen.

Im nächsten Schritt wurde das Antriebskonzept auf eine rein elektrische Flotte umgestellt. In dieser Konstellation ergeben sich tägliche Betriebskosten in Höhe von 129,54 €. Diese beinhalten keine städtischen Gebühren, da Elektrofahrzeuge von diesen Abgaben befreit sind. Eine detaillierte Analyse der Routenverläufe befindet sich ebenfalls im Kapitel 6.2.5.

Die Einführung von Elektrofahrzeugen in eine bestehende Diesel-Flotte führt zur Bildung einer sogenannten gemischten Flotte. Unter der Annahme, dass die Anzahl an Dieselfahrzeugen konstant bleibt und lediglich die Anzahl an Elektrofahrzeugen variiert, ergeben sich interessante Beobachtungen. Wird der Flotte ein einziges Elektrofahrzeug hinzugefügt (bei gleichbleibenden fünf Dieselfahrzeugen), steigen

die Gesamtkosten lediglich um 5,55€, wie in Abbildung 8 ersichtlich. Gleichzeitig sinken die CO₂-Emissionen um beachtliche 7664 g, was der Abbildung 9 zu entnehmen ist.

Ein interessanter Effekt zeigt sich jedoch nach der Einführung eines zweiten Elektrofahrzeugs: Sowohl die Streckenkosten als auch die Emissionen steigen signifikant an. Dieser Anstieg ist auf die erhebliche Zunahme der insgesamt zurückgelegten Strecke um ganze 100 km zurückzuführen. Die städtische Mautgebühr blieb dabei jedoch unverändert und beträgt weiterhin 45€.

Wird ein drittes Elektrofahrzeug in die Flotte integriert, ist kaum ein weiterer Anstieg der täglichen Betriebskosten zu verzeichnen (vgl. Abbildung 8).

Bei einer Flottenzusammensetzung von vier Elektro- und fünf Dieselfahrzeugen bleibt ein Diesel im Depot. Die Routen werden so effizient neu organisiert, dass sich die städtische Mautgebühr auf 36€ reduziert. Die Gesamtkosten belaufen sich in diesem Fall auf 124,78€, bei einer gleichzeitigen Reduktion der CO₂-Emissionen auf 82.372,55 g – ein ausgewogener Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit.

Wird die Flotte schließlich aus fünf Diesel- und fünf Elektrofahrzeugen gebildet, ergibt sich eine Gesamtdistanz von 807,6 km für alle Fahrzeuge. Im Vergleich zur rein dieselbetriebenen Flotte bedeutet dies eine Differenz von 336,2 km, was einen Mehrkostenaufwand von 29,55€ verursacht. In dieser Konfiguration verlassen alle zehn Fahrzeuge das Depot zur Belieferung der Kundschaft. Die Mautkosten bleiben konstant bei 45€, während die Streckenkosten auf 90,85€ steigen, was die zuvor genannte Kostendifferenz bestätigt.

Es ist jedoch zu beachten, dass der Einsatz einer gemischten oder rein elektrischen Flotte eine Verdopplung der benötigten Fahrerzahl erfordert (von fünf auf zehn Personen, bzw. im Fall einer homogenen Flotte sogar auf potenziell zwanzig Fahrer), was zu einem deutlichen Anstieg der Personalkosten führt. Neben den Gehaltskosten sind auch lohnnebenkostenbezogene Aufwendungen zu berücksichtigen, was zu zusätzlichen betrieblichen Belastungen für das Unternehmen führt.

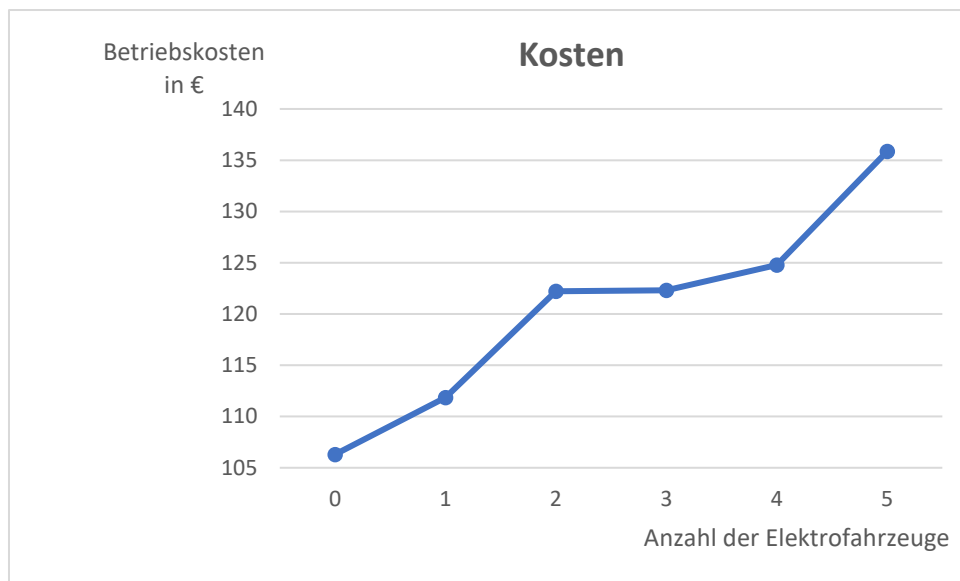


Abbildung 8 Gesamtkosten der gemischten Flotte bei fester Anzahl von Dieselfahrzeugen

Im Gegensatz zu den Gesamtkosten nimmt die Menge des ausgestoßenen CO₂ mit zunehmendem Anteil an Elektrofahrzeugen in der Fahrzeugflotte ab. Bereits die Integration eines einzelnen Elektrofahrzeugs führt zu einer messbaren Reduktion der Emissionen um mehr als 7.500 g CO₂ (entspricht 7,5 kg). Interessanterweise ist beim Hinzufügen eines zweiten Elektrofahrzeugs ein temporärer Anstieg der CO₂-Emissionen zu beobachten. Dieser Effekt ist jedoch nicht auf das Elektrofahrzeug selbst zurückzuführen, sondern auf eine Veränderung in der Fahrverteilung innerhalb der Flotte. Die Fahrstrecken der verbleibenden Dieselfahrzeuge verlängerten sich um 19 km, was zu einem höheren Dieserverbrauch und folglich zu einem leichten Anstieg der Emissionen führte.

Ab dem Einsatz von drei Elektrofahrzeugen zeigt sich jedoch ein kontinuierlich sinkender Trend der Gesamtemissionen. Dies deutet darauf hin, dass sich die Vorteile von Elektrofahrzeugen im Hinblick auf die CO₂-Bilanz insbesondere bei einem höheren Anteil innerhalb der Flotte deutlich bemerkbar machen. Zum Vergleich: In einer vollständig aus Dieselfahrzeugen bestehenden Flotte wurden insgesamt 96.000 g CO₂ (entspricht 96 kg) ausgestoßen. Im Gegensatz dazu konnte in einer gemischten Flotte – bestehend aus fünf Diesel- und fünf Elektrofahrzeugen – der CO₂-Ausstoß auf 76.000 g (76 kg) gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduktion von rund 20.000 g (20 kg) CO₂ bei der vollständigen Belieferung aller Kunden. Diese Ergebnisse unterstreichen das erhebliche Potenzial von Elektromobilität zur Verbesserung der Umweltbilanz im Güterverkehr auf lokaler

Ebene.

Die Entwicklung der CO₂-Emissionen in Abhängigkeit vom Anteil der Elektrofahrzeuge ist in Abbildung 9 unten grafisch dargestellt. Diese Visualisierung verdeutlicht nochmals den beschriebenen Trend und unterstützt die Interpretation der numerischen Ergebnisse.

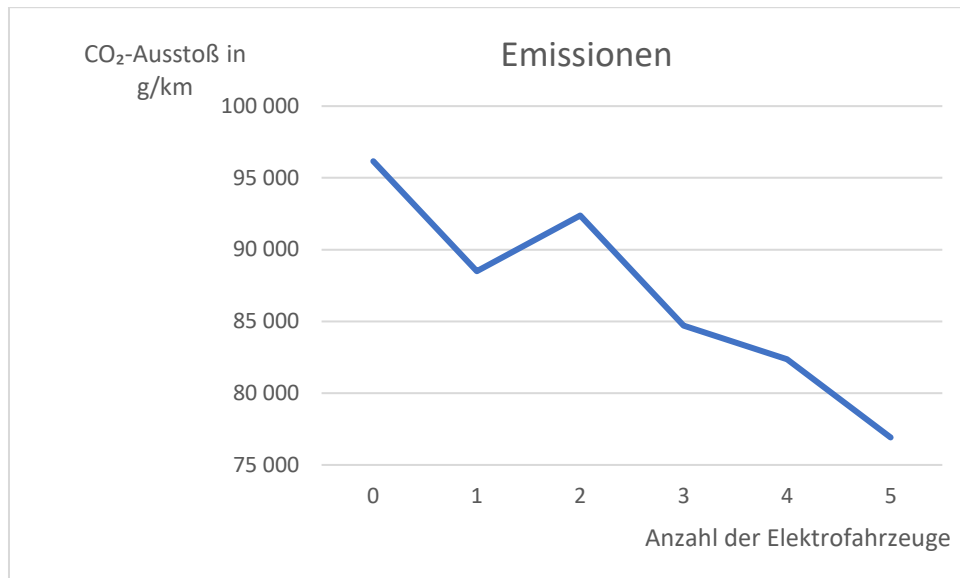


Abbildung 9 Gesamtemissionen der gemischten Flotte bei fester Anzahl von Dieselfahrzeugen

6.2.2 Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Gewichtungen von Zielparametern auf die Routenplanung

In diesem Unterkapitel wird untersucht, welchen Einfluss zentrale Zielparameter – wie Emissionswerte, Betriebskosten der Fahrzeuge und Gebühren für die Einfahrt in städtische Zonen – auf ausgewählte Aspekte des Flottenbetriebs haben. Ziel ist es, durch die Analyse verschiedener Gewichtungsszenarien die Bedeutung dieser Variablen zu bewerten und Rückschlüsse für ein optimiertes Flottenmanagement zu ziehen.

Im Szenario mit drei Elektrofahrzeugen und sechs Dieselfahrzeugen führte die ausschließliche Minimierung der städtischen Gebühren zu einer signifikanten Verlängerung der insgesamt zurückgelegten Strecke um rund 200 Kilometer. Diese einseitige Zielausrichtung hatte jedoch keine positive Auswirkung auf den CO₂-Ausstoß – im Gegenteil: Die Emissionen der Dieselfahrzeuge waren in diesem Fall die höchsten aller Testläufe. Die städtischen Gebühren konnten zwar leicht reduziert werden – von 45 € auf 41 € – allerdings führte der damit verbundene Anstieg des

Kraftstoffverbrauchs zu Gesamtkosten, die 16 € über dem Wert des Ausgangsszenarios lagen.

Auch die ausschließliche Fokussierung auf die Minimierung der CO₂-Emissionen führt – entgegen der Erwartung – nicht zwangsläufig zu dem Ergebnis mit dem geringsten Emissionswert seitens der Dieselfahrzeuge. Überraschenderweise emittierten die Dieselfahrzeuge in einem alternativen Szenario, bei dem die Emissionen mit 50 % gewichtet wurden, die Betriebskosten mit 30 % und die städtischen Gebühren mit 20 %, rund 1.000 g weniger CO₂. Wie in der nachstehenden Tabelle 1 dargestellt, weisen beide Lösungsansätze vergleichbare Ergebnisse auf. Im ersten Szenario, bei dem die Minimierung der CO₂-Emissionen als alleiniges Ziel definiert wurde, lagen die städtischen Gebühren bei 45 €, die Gesamtemissionen betrugen 81.958,02 g CO₂, und die Streckenkosten beliefen sich auf 78,26 €. Daraus ergibt sich ein täglicher Gesamtaufwand von 123,26 €. Im zweiten Szenario – mit der oben genannten differenzierten Gewichtung der drei Zielgrößen – beliefen sich die städtischen Gebühren ebenfalls auf 45 €, der CO₂-Ausstoß reduzierte sich auf 80.711 g, während die Streckenkosten leicht höher bei 78,53 € lagen. Dies ergibt Gesamtkosten in Höhe von 123,53 € pro Tag.

Weitere Tests mit alternativen Gewichtungskombinationen lieferten zusätzliche interessante Erkenntnisse. In einem Szenario wurden die Emissionen mit 30 %, die Streckenkosten mit 50 % und die städtischen Gebühren mit 20 % gewichtet. Die Routen wurden von FICO Xpress Mosel so geplant, dass die städtischen Gebühren 41 € betrugen. Die verursachten CO₂-Emissionen lagen bei 99.547,31 g, während die Streckenkosten mit 83,90 € beziffert wurden. Daraus resultieren tägliche Gesamtkosten in Höhe von 124,90 €, bei einer Flotte bestehend aus drei Elektrofahrzeugen und sechs Dieselfahrzeugen, von denen ein Dieselfahrzeug nicht eingesetzt wurde.

Bei einer anderen Gewichtung (30 % Emissionen, 20 % Streckenkosten und 50 % städtische Gebühren) reduzierte sich der CO₂-Ausstoß auf 81.333,59 g (entsprechend 18.213,73 g weniger als im Szenario mit der Gewichtung 30/50/20), während die Streckenkosten auf 80,23 € sanken und die städtischen Gebühren 45 € betrugen. Die resultierenden Tageskosten beliefen sich in diesem Fall auf 125,23 €, womit beide Szenarien aus wirtschaftlicher Sicht vergleichbare Ergebnisse lieferten. Trotz eines minimalen Kostenanstiegs von lediglich 0,33 € kann dieses Szenario

aufgrund der deutlich geringeren Emissionen als die ökologisch vorteilhaftere Alternative betrachtet werden.

Die Gewichtungskombination der Zielfunktion – 40 % Betriebskosten, 20 % Emissionen und 40 % städtische Gebühren – führte zu den niedrigsten täglichen Gesamtkosten aller getesteten Szenarien. Die täglichen Gesamtkosten beliefen sich in diesem Fall auf 121,33 €, während die CO₂-Emissionen bei 82.504,13 g lagen. Dies entspricht einem Anstieg von 1.793 g im Vergleich zum emissionsoptimierten Szenario (50 % Emissionen, 30 % Kosten, 20 % städtische Gebühren).

Bei reiner Fokussierung auf die Minimierung der Betriebskosten ergaben sich ebenfalls günstige Ergebnisse hinsichtlich der Gesamtkosten (121,43 €). Allerdings war der CO₂-Ausstoß mit 86.710,61 g in diesem Fall einer der höchsten unter den getesteten Szenarien. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass eine einseitige Optimierung einzelner Kriterien ohne gleichzeitige Berücksichtigung relevanter Einflussgrößen wie Fahrstrecke oder Kraftstoffverbrauch zu suboptimalen und ineffizienten logistischen Entscheidungen führen kann.

Die nachfolgende Tabelle 1 bietet eine zusammenfassende Übersicht über alle analysierten Gewichtungsszenarien. So lassen sich die Ergebnisse hinsichtlich CO₂-Ausstoß, Betriebskosten und städtischer Gebühren direkt miteinander vergleichen.

Anzahl der Elektrofahrzeuge	3	3	3	3	3	3	3
Anzahl der Dieselfahrzeuge	6	6	6	6	6	6	6
Zielfunktion	C 50%, P 30%, T 20%	C 30%, P 50%, T20%	C 20%, P 30%, T 50%	C 40%, P 20%, T 40%	C 100%	P 100%	T 100%
E1	0-43-4-47	0-45-25-24-47	0-45-24-5-42-47	0-34-20-21-47	0-5-23-24-25-47	0-25-21-7-47	0-28-7-47
E2	0-39-35-47	0-40-43-4-47	0-36-44-25-47	0-17-11-47	0-40-39-41-47	0-39-23-4-47	0-3-46-1-47
E3	0-7-12-25-47	0-46-20-21-47	0-20-39-38-47	0-40-41-5-25-47	0-20-21-3-47	0-44-40-43-47	0-20-32-47
D4	0-40-31-13-1-3-5-14-27-26-47	0-5-3-2-6-1-15-38-35-47	0-35-3-1-4-6-9-46-19-47	0-39-38-10-28-22-23-9-19-46-47	0-36-33-34-7-1-14-13-12-47	0-33-31-18-17-45-24-26-47	0-29-22-33-2-5-38-34-10-35-47
D5	0-24-34-30-33-37-16-15-32-47	0-37-33-34-8-11-7-19-17-18-47	0-26-30-22-23-28-10-11-8-7-47	0-2-3-7-13-16-15-47	0-35-38-2-4-6-15-16-37-47	0-34-15-1-3-11-12-14-5-47	0-41-39-21-42-6-37-14-13-23-16-47
D6	0-18-17-23-8-11-10-29-28-6-47	0-30-29-12-14-13-27-26-47	0-33-27-13-12-34-37-47	0-37-1-32-18-45-24-26-36-35-47	0-18-9-27-10-28-22-45-17-47	0-41-42-20-6-9-8-28-35-47	0-8-27-30-9-4-15-36-47
D7	0-44-45-19-9-38-22-46-20-47	0-16-23-9-36-47	0-40-41-43-21-17-18-31-32-16-47	0-31-33-30-27-12-47	0-43-44-42-32-19-46-26-30-29-47	0-36-32-29-13-37-37-2-47	0-19-12-11-44-31-43-26-47

D8	0-47	0-39-41- 44-42-31- 32-10-28- 22-47	0-2-15- 14-29-47	0-14-29- 8-6-4-43- 42-44-47	0-31-11-8- 47	0-16-30- 27-10- 22-19- 46-47	0-25-18- 45-24-17- 40-47
D9	0-36-21- 42-41-47	0-47	0-47	0-47	0-47	0-47	0-47
Mautgebühr (T) in €	41	45	45	45	45	45	41
CO ₂ -Emission (P) in Gramm	99547	80711	81334	82504	86710,61	81958	118227
Kosten (C) in €	83,9	78,53	80,23	76,33	76,43	78,26	96,34
Gesamtkosten in €	124,9	123,53	125,23	121,33	121,43	123,26	137,34

Tabelle 1 Vergleich der Gewichtungsszenarien hinsichtlich CO₂-Emissionen, Betriebskosten und städtischer Gebühren im Mix Fleet Vehicle Routing Problem Modell

6.2.3 Modellvariante mit angepassten Mautgebühren

In einem weiteren Szenario wurde das bestehende Gebührensystem für die Zonen A und B überarbeitet. Die Tagessätze wurden dabei an das höchste Mautgebühreenniveau angepasst, das derzeit in London erhoben wird. Nach Umrechnung in Euro beträgt die Tagespauschale für das Befahren der Zone A sowie die Durchfahrt in Zone B 17,50 €. Für das ausschließliche Befahren und Durchqueren der äußeren Bezirke wurde eine Gebühr in Höhe von 7,50 € festgelegt. Ziel dieser Anpassung war es, den Einfluss deutlich erhöhter Umweltabgaben auf die Wahl emissionsarmer Fahrzeugflotte sowie auf die gesamte Kostenstruktur der Transportplanung zu untersuchen.

In der nachstehenden Tabelle 2 sind die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen dargestellt, die verschiedene Konfigurationen gemischter Flotten aus Elektro- und Dieselfahrzeugen berücksichtigen.

Anzahl der Elektrofahrzeuge	5	5	6	6	7	7	8	8
Anzahl der Dieselfahrzeuge	5	5	4	4	4	4	3	3
Zielfunktion	C 40%, P 20%, T 40%	C 40%, P 20%, T 40%	C 40%, P 20%, T 40%	C 40%, P 20%, T 40%	C 40%, P 20%, T 40%	C 40%, P 20%, T 40%	C 40%, P 20%, T 40%	C 40%, P 20%, T 40%
Mautgebührensystem	Neu	Alt	Neu	Alt	Neu	Alt	Neu	Alt
E1	0-46-45-26-47	0-24-45-5-21-47	0-41-40-42-24-47	0-24-7-21-20-47	0-26-5-28-47	0-25-24-34-47	0-18-19-3-47	0-19-5-4-47
E2	0-25-24-4-47	0-25-30-47	0-36-45-26-47	0-45-26-46-47	0-21-4-44-47	0-44-35-47	0-24-25-39-47	0-21-20-43-47
E3	0-39-41-20-47	0-40-20-41-47	0-25-4-6-47	0-39-40-47	0-43-42-39-47	0-4-19-47	0-46-45-37-47	0-46-45-38-47
E4	0-19-16-47	0-39-4-44-47	0-43-44-39-47	0-2-4-47	0-40-24-41-46-47	0-1-41-47	0-6-17-43-47	0-44-42-40-47
E5	0-21-6-40-42-47	0-43-38-42-47	0-20-21-46-47	0-37-38-25-47	0-20-17-47	0-21-43-2-47	0-20-1-47	0-24-25-17-47
E6			0-5-37-35-47	0-47	0-25-27-47	0-40-20-42-47	0-4-21-42-47	0-39-35-36-47
E7					0-18-7-45-47	0-26-36-38-47	0-16-7-44-47	0-41-6-7-37-47
E8							0-36-38-2-47	0-18-30-47
D1	0-18-17-9-29-27-33-30-47	0-46-18-17-19-29-16-1-3-37-47	0-7-9-8-28-22-23-19-17-18-47	0-31-34-3-29-27-33-30-32-47	0-37-2-9-8-6-31-32-47	0-14-9-22-23-28-7-27-47	0-40-35-31-33-34-15-32-41-47	0-23-28-12-10-11-8-9-22-47
D2	0-2-10-8-7-11-3-34-22-23-28-47	0-31-32-26-27-10-33-47	0-31-34-29-11-10-12-32-47	0-5-15-16-12-13-14-1-47	0-29-10-11-13-12-14-47	0-31-32-13-12-11-10-29-47	0-13-29-10-11-12-14-5-47	0-32-31-34-14-13-29-2-47
D3	0-38-15-13-12-1-14-37-5-	0-22-23-15-8-7-28-11-6-	0-38-2-3-13-14-1-47	0-28-11-10-8-9-22-23-47	0-35-19-23-22-30-33-	0-45-18-17-5-33-30-6-37-	0-26-28-22-23-8-9-27-30-	0-26-27-1-3-16-15-33-47

	47	35-47			34-16- 36-47	47	47	
D4	0-43-44- 31-36- 35-32-47	0-13-9- 14-12- 34-47	0-15-33- 27-30- 16-47	0-35-42- 6-19-17- 18-43- 44-36- 41-47	0-15-38- 3-1-47	0-39-3- 15-16-8- 46-47		
D5	0-47	0-2-36- 47						
Mautgebühr (T) in €	60	45	70	36	70	36	52,5	27
CO ₂ - Emission (P) in Gramm	71346,96	76914,73	56364,18	72128,48	57456,4	69180,89	48047,1	45406,73
Kosten (C) in €	87,61	90,85	84,01	83,91	96,12	96,53	90,66	90,08
Gesamtkost en in €	147,61	135,85	154,01	119,91	166,12	132,53	143,16	117,08

Tabelle 2 Vergleich zweier städtischer Gebührensysteme

Im Fall einer Flotte, bestehend aus fünf Elektrofahrzeugen und fünf Dieselfahrzeugen, blieb bei höheren städtischen Gebühren ein Dieselfahrzeug (D5) ungenutzt im Depot. Dennoch war die gesamte CO₂-Emission der eingesetzten Dieselfahrzeuge geringer als im Szenario mit niedrigeren städtischen Gebühren, was auf eine effizientere Routenplanung hindeutet.

Für Flottenkonfigurationen mit 5 Elektro- und 5 Dieselfahrzeugen, 6 Elektro- und 4 Dieselfahrzeugen, 7 Elektro- und 3 Dieselfahrzeugen sowie 8 Elektro- und 2 Dieselfahrzeugen waren die Gesamtkosten für Kraftstoff und elektrische Energie vergleichbar mit den Kraftstoffkosten im Szenario mit niedrigeren städtischen Gebühren.

Das höhere Gebührenniveau wirkte sich positiv auf die Optimierung der Routenplanung aus. Dies zeigt sich auch daran, dass im Szenario mit niedrigeren Gebühren ein Elektrofahrzeug (bei der Konstellation mit 6 Elektro- und 4 Dieselfahrzeugen) ungenutzt im Depot verblieb.

6.2.4 Auswirkungen einer erhöhten Ladekapazität von Elektrofahrzeugen auf Routenplanung und Flottenkosten

Ein weiterer untersuchter Aspekt war die Frage, wie sich die Routenplanung und die Flottennutzung verändern, wenn Elektrofahrzeuge eine mit Dieselfahrzeugen vergleichbare Ladekapazität erreichen. In diesem Szenario wurde angenommen, dass das Modell Iveco E-Daily – bei gleichbleibender Batteriekapazität – anstelle einer Nutzlast von 1129 kg eine Kapazität von 4000 kg aufweist.

Wie in Tabelle 3 dargestellt, wurde in einem Modell mit insgesamt neun Fahrzeugen – davon vier elektrisch betrieben und fünf mit Dieselmotor- der Einfluss der Gewichtung einzelner Entscheidungsparameter auf das Optimierungsergebnis analysiert. Unter der Annahme, dass Betriebskosten und städtische Gebühren gleich gewichtet werden, während CO₂-Emissionen eine untergeordnete Rolle spielen, zeigte sich, dass drei Dieselfahrzeuge im Depot verblieben, während alle verfügbaren Elektrofahrzeuge möglichst effizient in die Routenplanung integriert wurden. Die städtische Gebühr betrug dabei 18€, während die Kosten für die Ware Zustellung an alle Kunden bei 65,60€ lagen. Daraus ergaben sich tägliche Gesamtkosten in Höhe von 83,60€. Im Vergleich zum Basismodell, in dem Elektrofahrzeuge nur eine begrenzte Nutzlast aufwiesen, führte die Erhöhung der Ladekapazität zu einer täglichen Einsparung von über 41€. Zudem konnte auch die CO₂-Emission signifikant reduziert werden: Im Szenario mit höherer Nutzlast betrug der Ausstoß 25.040,39 g, was einer Reduktion von 57.332 g gegenüber dem Ausgangsmodell entspricht, in dem Dieselfahrzeuge 82.372,55 g CO₂ verursachten. Wurde hingegen die Priorität in der Zielfunktion zugunsten der CO₂-Reduktion gesetzt – das heißt, Umweltfreundlichkeit wurde über Kosteneffizienz gestellt – so stiegen die Emissionen auf 28.889,67 g an. Gleichzeitig kam es nur zu einem geringen Anstieg der Gesamtkosten um etwa 5€. Dieses Ergebnis ist im Vergleich zum ersten Testszenario, bei dem die Minimierung von Kosten und städtischen Gebühren im Vordergrund stand, als weniger effizient zu bewerten.

Weitere drei Testszenarien – mit Flottenzusammensetzungen von fünf Elektro- und fünf Dieselfahrzeugen, sechs Elektro- und vier Dieselfahrzeugen sowie sieben Elektro- und zwei Dieselfahrzeugen – bestätigen eine klare Tendenz: Sobald ausreichend Ladekapazität in den Elektrofahrzeugen zur Verfügung steht, werden

diese bevorzugt für die Tourenplanung eingesetzt. Das Szenario mit einer Flottenzusammensetzung von sechs Elektrofahrzeugen und vier Dieselfahrzeugen weist die niedrigsten Streckenkosten auf – sie betragen lediglich 48 €. Bemerkenswert ist dabei, dass in dieser Lösung kein einziges Dieselfahrzeug das Depot verlassen hat, was den effizienten und bevorzugten Einsatz der Elektrofahrzeuge unterstreicht.

Nutzlast Elektrofahrzeug	4000	4000	4000	4000	4000
Nutzlast Dieselfahrzeug	4300	4300	4300	4300	4300
Anzahl Elektrofahrzeuge	4	4	5	6	7
Anzahl Dieselfahrzeuge	5	5	5	4	4
Zielfunktion	C 40%, P 20%, T 40%	C 10%, P 80%, T 10%	C 40%, P 20%, T 40%	C 40%, P 20%, T 40%	C 40%, P 20%, T 40%
E1	0-39-20-17-23- 9-7-8-4-46-47	0-2-46-5-3-4- 21-20-22-16- 38-47	0-35-12-31- 32-33-1-3-2- 47	0-26-27-45- 24-19-17-18- 46-25-47	0-26-25-24-45- 23-22-28-10-27- 47
E2	0-2-18-22-19- 33-38-45-24- 26-47	0-41-6-9-7-1- 17-36-27-39-47	0-40-41-38- 36-16-13-6- 43-44-42-47	0-39-3-5-4- 21-20-6-7-40- 44-43-42-41- 47	0-41-44-43-4- 20-21-5-3-38- 39-42-40-47
E3	0-6-15-44-43- 5-1-16-36-35- 47	0-31-15-33-19- 8-37-35-47	0-4-20-9-27- 10-21-5-39-47	0-35-38-2-1- 16-15-37-47	0-2-16-36-37- 35-18-17-6-12- 47
E4	0-25-3-12-30- 21-37-41-42- 27-40-47	0-45-44-18-40- 24-32-43-42- 25-26-47	0-37-14-22-8- 11-25-30-26- 47	0-36-28-11-9- 8-22-23-34-47	0-1-32-34-31- 46-19-15-47
E5			0-34-19-23-7- 46-28-45-24- 18-17-47	0-32-31-29- 30-47	0-14-29-13-8- 33-47
E6				0-14-10-12- 13-33-47	0-47
E7					0-30-7-9-11-47
D1	0-31-32-29-13- 14-34-47	0-30-14-10-11- 12-13-47	0-29-15-47	0-47	0-47

D2	0-47	0-47	0-47	0-47	0-47
D3	0-28-10-11-47	0-23-34-29-28-47	0-47	0-47	0-47
D4	0-47	0-47	0-47	0-47	0-47
D5	0-47	0-47	0-47		
Mautgebühr (T) in €	18	18	9	0	0
CO ₂ -Ausstoß (P) in Gramm	25040,39	28889,67	11756,32	0	0
Kosten (C) in €	65,6	70,63	54,66	48,06	50,63
Gesamtkosten in €	83,6	88,63	63,66	48,06	50,63

Tabelle 3 Modelllösung nach Anpassung der Ladekapazität von Elektrofahrzeugen

6.2.5 Homogene Fahrzeugflotte

In diesem Abschnitt wird eine homogene Fahrzeugflotte betrachtet, die ausschließlich aus Fahrzeugen mit einheitlicher Antriebstechnologie besteht – entweder vollständig aus Dieselfahrzeugen oder vollständig aus Elektrofahrzeugen. Ziel der Analyse ist es, systematisch zu untersuchen, wie sich diese beiden Konfigurationen auf zentrale betriebswirtschaftliche Kennzahlen wie Streckenkosten, tägliche Betriebsausgaben sowie auf den Ausstoß von CO₂-Emissionen auswirken. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den ökologischen Implikationen der Antriebswahl: Im Kontext wachsender regulatorischer Anforderungen sowie gesellschaftlicher und politischer Forderungen nach emissionsarmen Logistiklösungen soll analysiert werden, ob und inwieweit eine vollständige Elektrifizierung der Flotte zu einer signifikanten Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen kann.

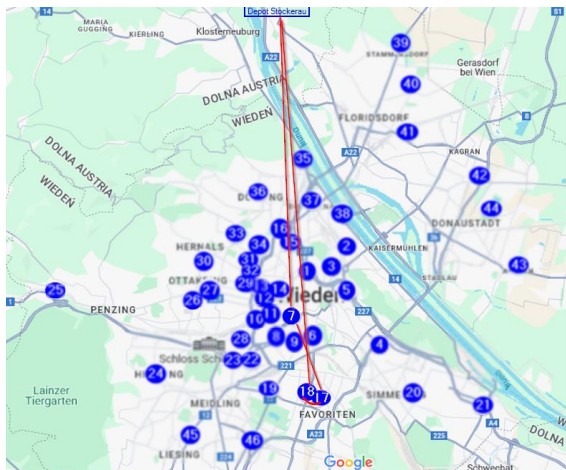
Unter der Annahme, dass die Nutzlast des Iveco eDaily den realen technischen Daten entspricht und 1129 kg beträgt, ergibt sich eine Mindestanzahl von 19 Elektrofahrzeugen, die erforderlich ist, um sämtliche Kunden unter Berücksichtigung aller Restriktionen zu beliefern. Nach sechs Stunden Rechenzeit war FICO Xpress Mosel jedoch nicht in der Lage, eine gültige Lösung zu ermitteln, weshalb die Fahrzeuganzahl auf 20 erhöht wurde. Auch in diesem Fall benötigte Mosel deutlich mehr Zeit im Vergleich zu den Tests mit einer Diesel- oder gemischten Flotte – eine Lösung konnte erst nach 90 Minuten Rechenzeit gefunden werden.

Von allen geplanten Lieferrouten konnten im günstigsten Szenario lediglich drei Kunden tatsächlich beliefert werden. Bemerkenswert ist dabei, dass die Anzahl der pro Route versorgten Kunden nicht durch die Reichweite des E-Fahrzeugs begrenzt wurde, sondern primär durch dessen eingeschränkte Nutzlast.

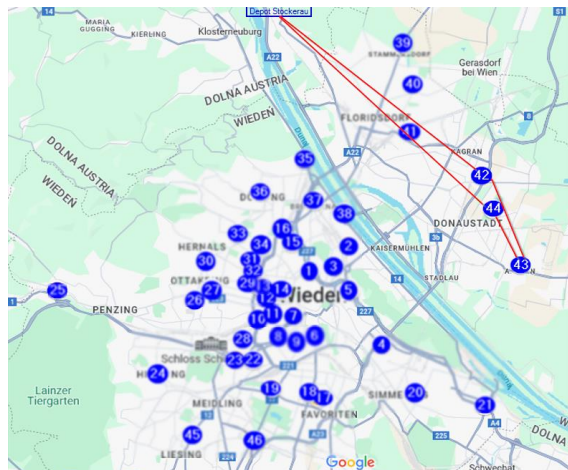
Die Streckenkosten der Elektrofahrzeuge – das heißt die Kosten für das erneute Aufladen der Batterien – beliefen sich auf 129,54 €. Es handelt sich hierbei ausschließlich um Betriebskosten, da für Elektrofahrzeuge keine städtischen Gebühren anfallen. Zudem ist hervorzuheben, dass Elektrofahrzeuge im Fahrbetrieb keine umweltschädlichen Emissionen wie CO₂ verursachen, was einen entscheidenden ökologischen Vorteil darstellt.

In Abbildung 10 sind die zwanzig geplanten Routen der Elektrofahrzeuge dargestellt. Auch wenn einzelne Strecken auf der Karte – beispielsweise Route 5 – auf den ersten Blick suboptimal erscheinen, zeigt sich bei einer manuellen Optimierung der Reihenfolge auf 0–10–41–39–47 lediglich eine Reduktion der Streckenlänge um 50 Meter.

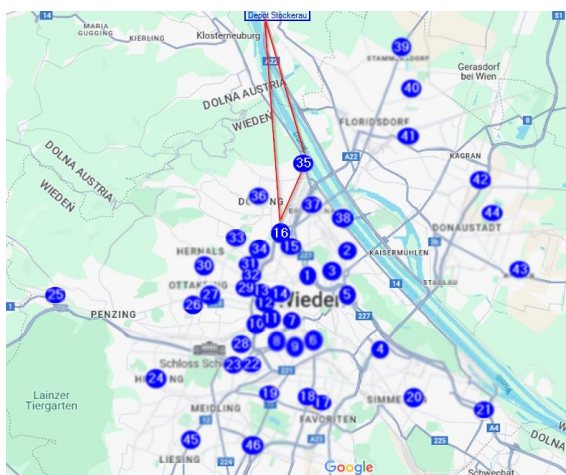
Route 1: 0-7-17-18-47



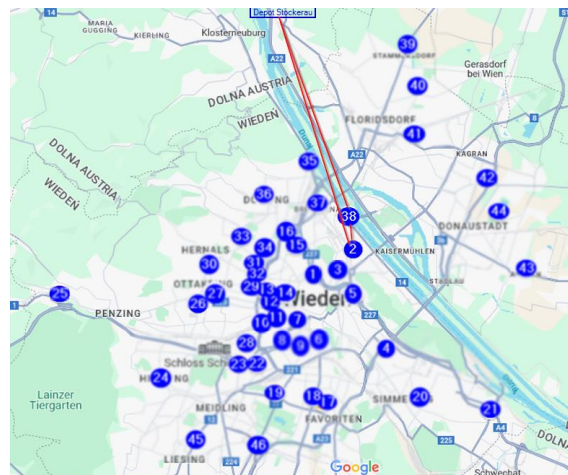
Route 2: 0-44-43-42-47



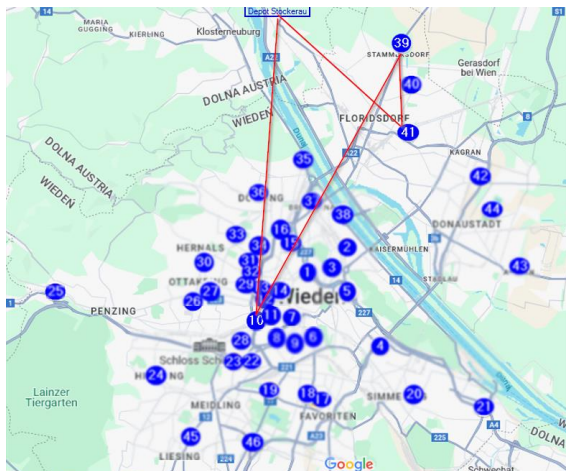
Route 3: 0-16-35-47



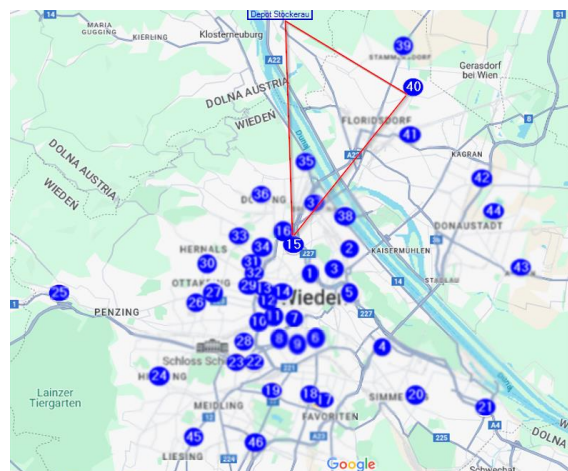
Route 4: 0-38-2-47



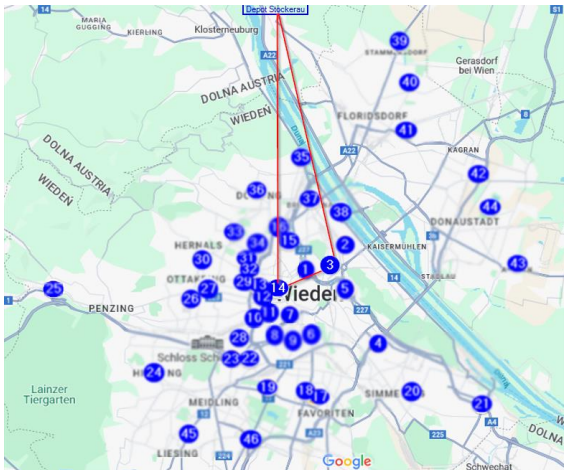
Route 5: 0-41-39-10-47



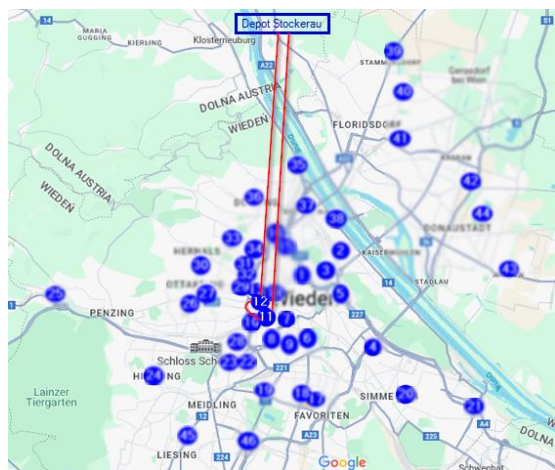
Route 6: 0-15-40-47



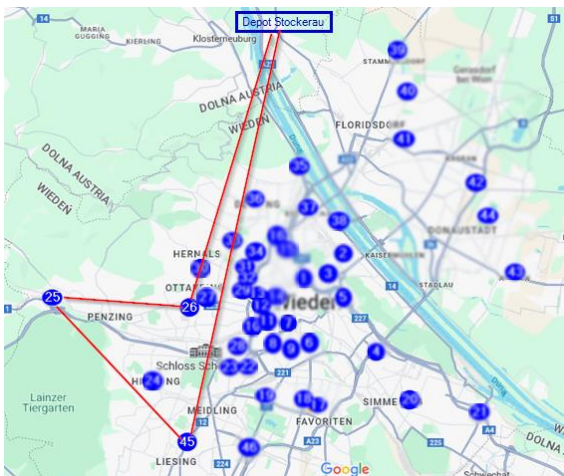
Route 7: 0-14-3-47



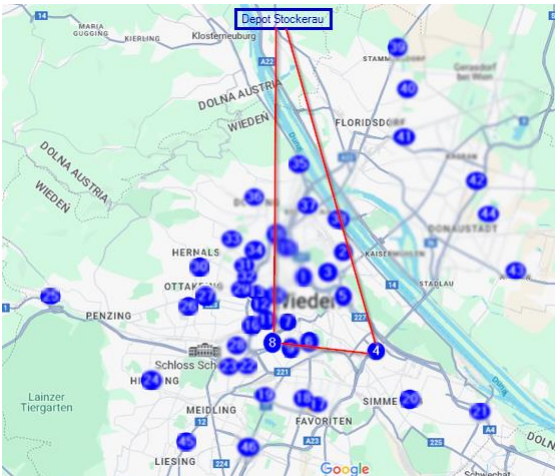
Route 8: 0-11-12-47



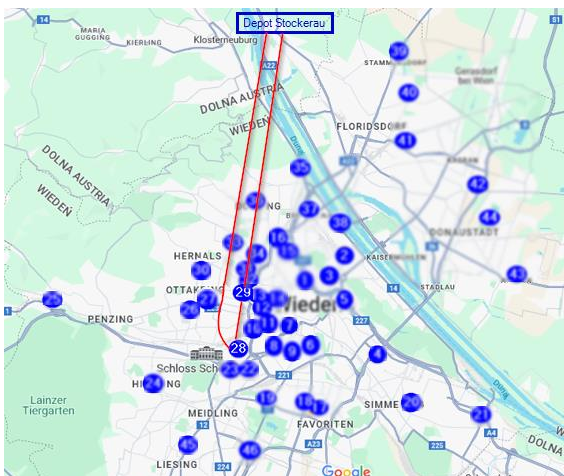
Route 9: 0-45-25-26-47



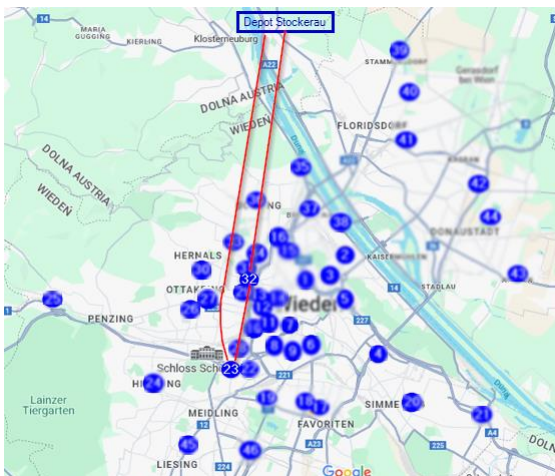
Route 10: 0-4-8-47



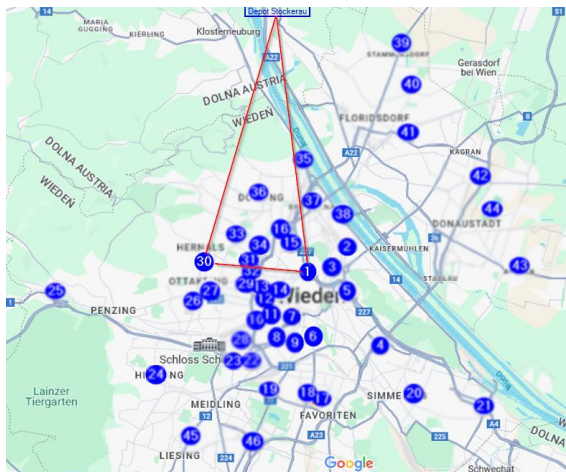
Route 11: 0-29-28-47



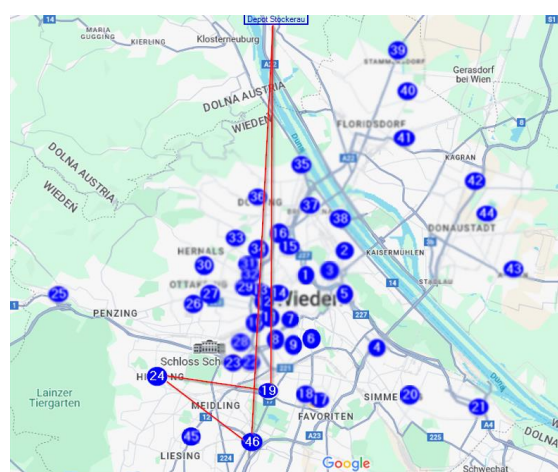
Route 12: 0-23-32-47



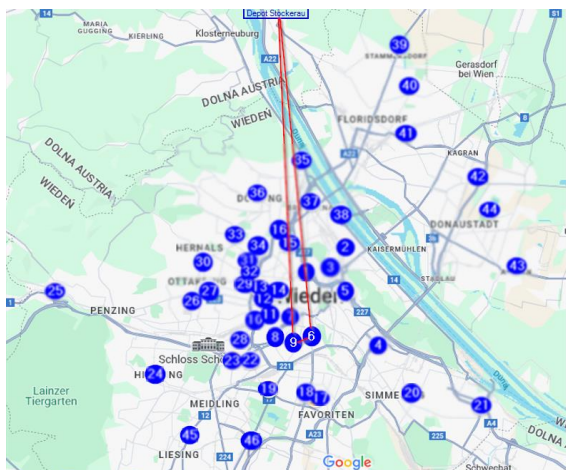
Route 13: 0-1-30-47



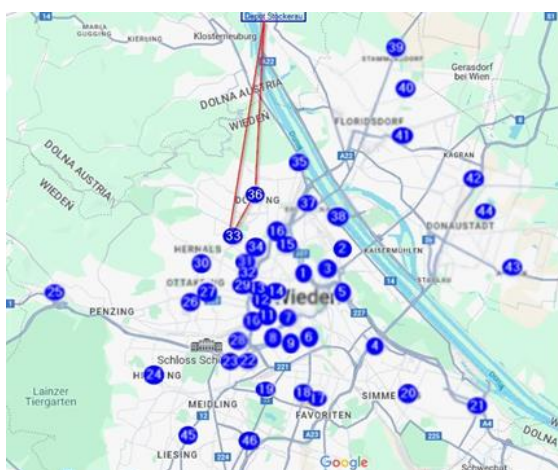
Route 14: 0-46-24-19-47



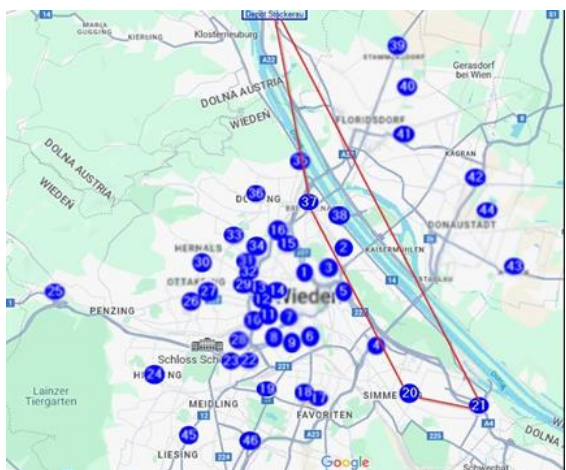
Route 15: 0-9-6-47



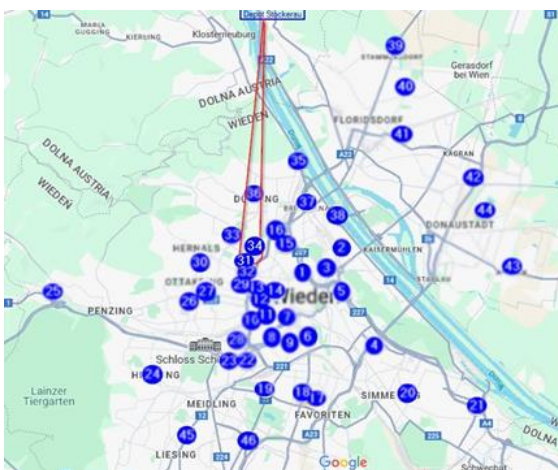
Route 16: 0-33-36-47



Route 17: 0-21-20-37-47



Route 18: 0-31-34-47



Route 19: 0-22-27-47

Route 20: 0-13-5-47

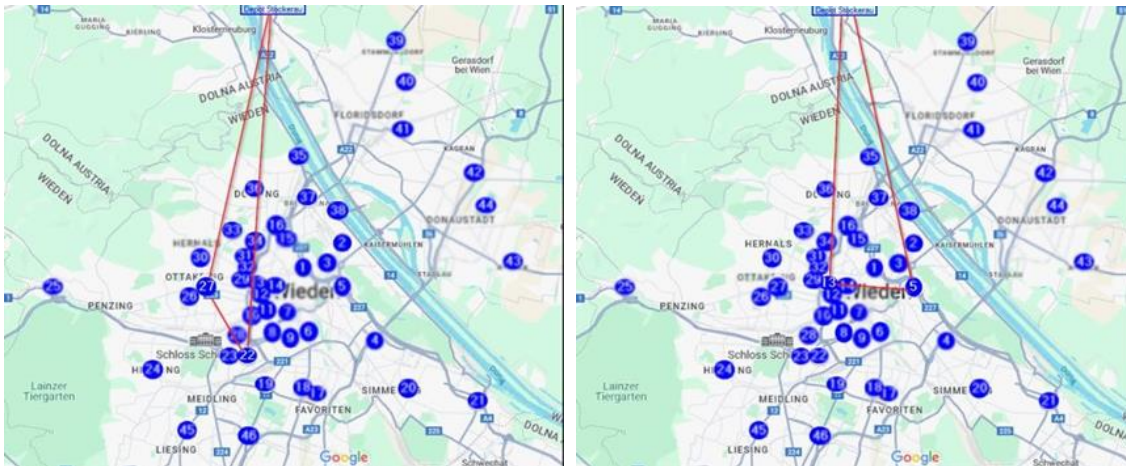


Abbildung 10 Routenplanung für die homogene Elektroflotte

Ein Wechsel des Antriebssystems von Elektro- auf Dieselfahrzeuge führt zu überraschend deutlichen Unterschieden in der Anzahl der Fahrzeuge, die erforderlich sind, um denselben logistischen Auftrag – die Belieferung aller Empfänger – zu erfüllen.

Eine detaillierte Analyse der technischen Spezifikationen beider Flottentypen, insbesondere in Bezug auf die Nutzlast, offenbart einen klaren Vorteil zugunsten der dieselpetriebenen Fahrzeuge. Die maximale Nutzlast des Iveco Daily mit Dieselmotor beträgt 4300 kg, während das elektrisch betriebene Pendant, der Iveco eDaily, lediglich eine Nutzlast von 1129 kg aufweist. Der daraus resultierende Unterschied von 3171 kg zugunsten des Dieselmotors wirkt sich unmittelbar auf die notwendige Flottengröße aus – vorausgesetzt, das Lieferaufkommen bleibt unverändert. Während in der elektrischen Variante 19 Fahrzeuge (letztlich sogar 20) benötigt wurden, um alle Kunden zu beliefern, genügt bei der Dieselsvariante der Einsatz von lediglich fünf Fahrzeugen zur Erreichung desselben Ziels.

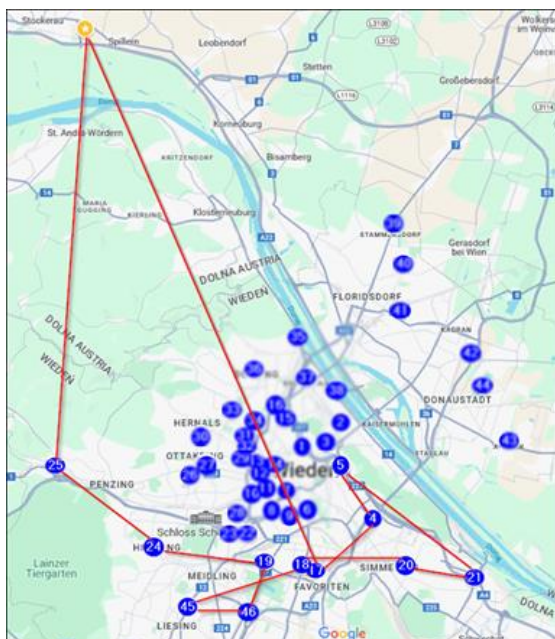
Abbildung 11 zeigt die im Rahmen des VRPs unter Berücksichtigung städtischer Gebühren ermittelten Fahrtrouten der Dieselfahrzeuge, die durch das Optimierungsprogramm FICO Xpress Mosel generiert wurden. Die gesamte von der Flotte zurückgelegte Distanz beträgt 471,38 km. Hervorzuheben ist, dass die Lösung zwei besonders effiziente Routen umfasst - Route 1 und 2-, auf denen jeweils bis zu elf Kunden beliefert werden. Dies stellt einen Indikator für die logistische Leistungsfähigkeit der Dieselflotte dar, insbesondere im Hinblick auf deren hohe Nutzlast und Reichweite.

Gleichwohl ließ sich durch eine geringfügige manuelle Modifikation der Routenführungen 4 und 5 (vgl. Abbildung 11) eine zusätzliche Optimierung erzielen. Die Gesamtdistanz konnte in diesem Zusammenhang um 9,55 km verringert werden, was zu einer Einsparung von 1.948,2 g an CO₂-Emissionen führte. Diese Reduktion unterstreicht das Potenzial kleiner Anpassungen zur Steigerung der ökologischen Effizienz selbst innerhalb bereits optimierter Lösungen.

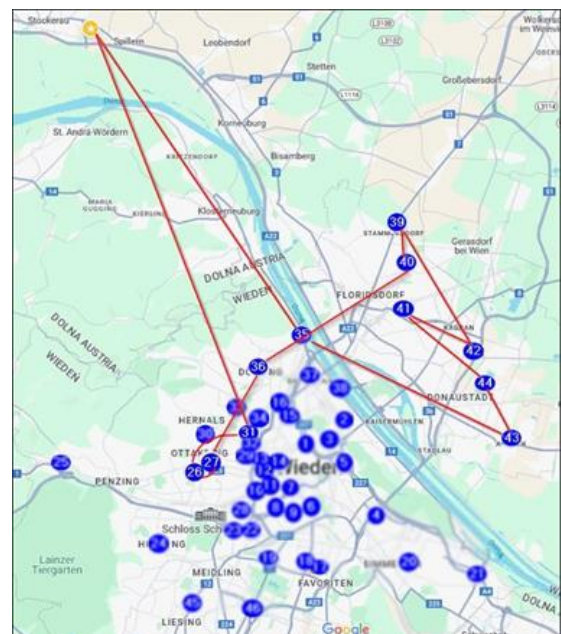
Die täglichen Gesamtbetriebskosten, einschließlich 45€ an städtischen Gebühren, belaufen sich auf 106,30€ und bieten damit einen Kostenvorteil von 23,24€ im Vergleich zur rein elektrischen Fahrzeugflotte. Ökologisch betrachtet zeigt sich ein deutlicher Unterschied: Während die Dieselfahrzeuge auf ihren Fahrten insgesamt 96.161,32 g CO₂ emittierten, verursachen Elektrofahrzeuge im laufenden Betrieb keine lokalen Emissionen und profitieren zusätzlich von der Befreiung städtischer Gebühren – ein klarer Vorteil für die Umwelt, besonders in Städten.

Diese Differenz macht deutlich, dass die begrenzte Nutzlast von Elektrofahrzeugen derzeit einen wesentlichen Nachteil darstellt. Insbesondere im urbanen Lieferverkehr mit hohen Sendungsvolumina oder längeren Distanzen führt dieser Faktor zu einer erhöhten Anzahl benötigter Fahrzeuge, was wiederum zusätzliche Fahrten, höhere Betriebskosten sowie einen gesteigerten Personalaufwand für das Flottenmanagement zur Folge hat.

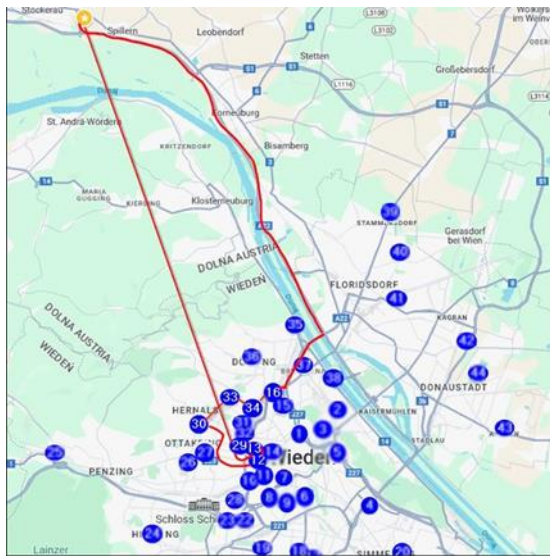
Route 1: 0-25-24-19-46-45-18-20-21-5-4-17-47



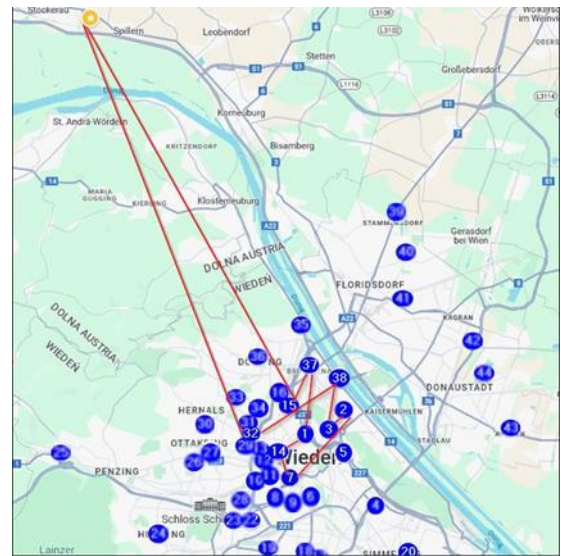
Route 2: 0-35-43-44-41-42-39-40-36-27-26-31-47



Route 3: 0-29-13-12-30-33-34-16-47



Route 4: 0-15-37-1-14-7-2-3-38-32-4



Route 5: 0-11-10-28-22-23-8-6-9-47

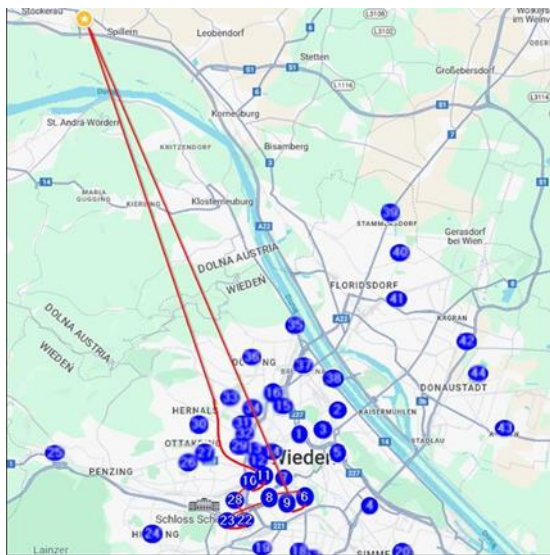
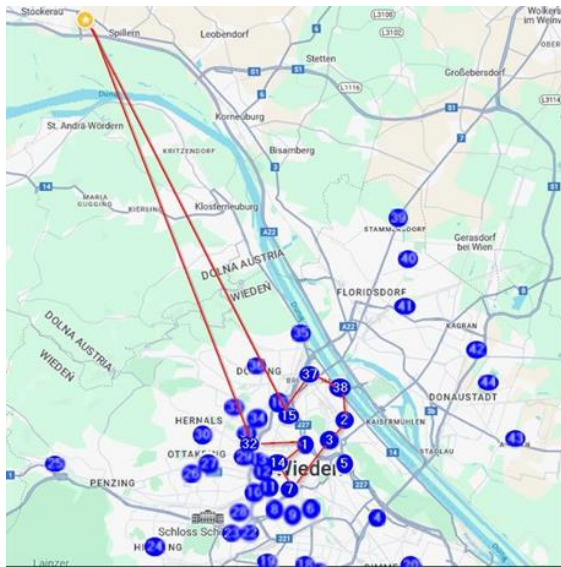


Abbildung 11 Routenplanung für die homogene Dieselflotte

Optimierte **Route 4** 0-15-37-38-2-3-7-14-1-32-47



Optimierte **Route 5** 0-11-10-28-23-22-8-9-6-47

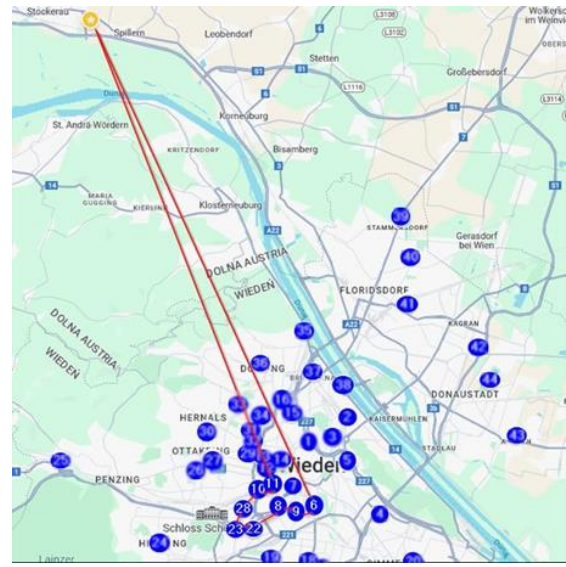


Abbildung 12 Optimierte Routen Nr. 4 und 5 für Dieselfahrzeuge

6.2.6 Auswirkung städtischer Gebühren auf Emissionen und Kostenstruktur in gemischten Flottenmodellen

Die letzte Analyse wurde durchgeführt, um zu untersuchen, ob die Einführung städtischer Gebühren die CO₂-Emissionen reduziert und ob sich dadurch die Präferenzen bei der Flottenzusammensetzung verändern.

Tabelle 3 zeigt einen zusammenfassenden Vergleich der Lösungen des MFVRPs mit und ohne städtische Gebühren.

Im Szenario mit drei Elektro- und sechs Dieselfahrzeugen führte der Verzicht auf städtische Gebühren zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen um rund 1.000 g, während die Streckenkosten in beiden Modellen identisch blieben. Im Modell mit städtischen Gebühren muss jedoch zusätzlich eine Gebühr in Höhe von 45 € berücksichtigt werden, was dazu führt, dass das Modell ohne städtische Abgaben aus betriebswirtschaftlicher Sicht klar vorteilhafter ist.

Auch im Fall einer Flottenzusammensetzung von sechs Elektro- und vier Dieselfahrzeugen erweist sich das Modell ohne städtische Gebühren sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht als überlegen. Im gebührenpflichtigen Modell verursachten die Dieselfahrzeuge CO₂-Emissionen in Höhe von 72.128,48 g, während die Gesamtkosten – bestehend aus Streckenkosten und städtischen

Gebühren – knapp 120 € betrugen. Im Vergleich dazu beliefen sich die Emissionen im Modell ohne Gebühren auf 66.273,89 g und die Gesamtkosten lagen bei unter 89 €.

Wird die Nutzlast des Iveco E-Daily – wie in Kapitel 6.3.3 angenommen – auf 4.000 kg erhöht, nähern sich die Ergebnisse der Modelle mit und ohne städtische Gebühren einander deutlich an. Da Elektrofahrzeuge – wie in den vorangegangenen Kapiteln mehrfach dargestellt – von städtischen Abgaben befreit sind und in beiden Szenarien sämtliche Dieselfahrzeuge im Depot verbleiben, haben die städtischen Gebühren keinen wesentlichen Einfluss mehr auf die Gesamtkosten oder die CO₂-Emissionen.

Elektrofahrzeugkapazität	1129	1129	1129	1129	4000	4000
Dieselfahrzeugkapazität	4300	4300	4300	4300	4300	4300
Anzahl der Elektrofahrzeuge	3	3	6	6	6	6
Anzahl der Dieselfahrzeuge	6	6	4	4	4	4
Mautgebührensysteem	ohne Maut	mit Maut	ohne Maut	mit Maut	ohne Maut	mit Maut
E1	0-44-42- 23-47	0-34-20- 21-47	0-21-20-7- 47	0-24-7- 21-20- 47	0-38-2-3- 5-4-21-20- 6-7-1-47	0-26-27- 45-24- 19-17- 18-46- 25-47
E2	0-40-25- 22-47	0-17-11- 47	0-39-4-40- 47	0-45-26- 46-47	0-34-15- 37-39-42- 44-43-41- 40-47	0-39-3- 5-4-21- 20-6-7- 40-44- 43-42- 41-47
E3	0-20-21- 43-47	0-40-41- 5-25-47	0-24-30- 36-47	0-39-40- 47	0-36-8-9- 11-16-47	0-35-38- 2-1-16- 15-37- 47

E4			0-41-45- 19-47	0-2-4-47	0-12-17- 18-25-26- 31-32-30- 47	0-36-28- 11-9-8- 22-23- 34-47
E5			0-1-34-3- 47	0-37-38- 25-47	0-33-27- 13-14-35- 47	0-32-31- 29-30- 47
E6			0-6-17-25- 47	0-47	0-29-19- 46-22-23- 28-24-45- 10-47	0-14-10- 12-13- 33-47
D1	0-13-32- 31-29-28- 10-12-47	0-39-38- 10-28- 22-23-9- 19-46-47	0-37-2-38- 5-23-22-9- 31-47	0-31-34- 3-29-27- 33-30- 32-47	0-47	0-47
D2	0-16-15-1- 2-3-38-5- 37-35-36- 47	0-2-3-7- 13-16- 15-47	0-14-26- 12-13-8- 10-47	0-5-15- 16-12- 13-14-1- 47	0-47	0-47
D3	0-7-6-4- 17-19-46- 45-18-9- 39-47	0-37-1- 32-18- 45-24- 26-36- 35-47	0-42-43- 44-18-46- 11-28-27- 35-47	0-28-11- 10-8-9- 22-23- 47	0-47	0-47
D4	0-14-30- 34-24-26- 27-8-11- 47	0-31-33- 30-27- 12-47	0-33-32- 29-15-16- 47	0-35-42- 6-19-17- 18-43- 44-36- 41-47	0-47	0-47
D5	0-47	0-14-29- 8-6-4-43- 42-44-47				
D6	0-41-33- 47	0-47				

Mautgebühr (T) in €	0	45	0	36	0	0
CO ₂ -Emission (P) in Gramm	81002	82504,13	66274	72128	0	0
Kosten (C) in €	76,74	76,33	88,73	83,91	47,7	48,06
Gesamtkosten in €	76,74	121,33	88,73	119,91	47,7	48,06

Tabelle 4 Vergleich der Lösungen des Mix Fleet Vehicle Routing Problems mit und ohne städtische Gebühren

7. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden verschiedene aktuelle Ansätze zur Reduzierung des Autoverkehrs in Städten vorgestellt, mit dem Ziel, die Treibhausgasemissionen zu senken und die Luftqualität nachhaltig zu verbessern. Es wurden unterschiedliche Modelle städtischer Mautsysteme analysiert, wie in zahlreichen europäischen Städten und in anderen Regionen der Welt erfolgreich umgesetzt wurden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein fiktives Mautsystem für die Stadt Wien entworfen, und das Modell im Solver implementiert. Während der Umsetzung traten jedoch bestimmte Einschränkungen auf. Zum einen konnten nicht alle verfügbaren Daten für die Tests genutzt werden – die Anzahl der Kunden musste um mindestens die Hälfte reduziert werden. Zudem war das Programm auch nach vielen Stunden Rechenzeit nicht in der Lage, eine Lösung in der Nähe des Optimums zu finden. Daher wurde ein Zeitlimit eingeführt, sodass der Solver nach 20 Minuten das bis dahin gefundene Ergebnis ausgab und die Suche beendete. Bei dieser mathematischen Komplexität und der großen Datenmenge ist das Auffinden einer optimalen Lösung praktisch nicht möglich. Fico Xpress Mosel konnte das MFVRPCP-Problem mit zehn Kunden in einer Lösung nahe am Optimum berechnen. Die Wahl von 46 Kunden stellte eine Annäherung an ein realistisches Szenario dar. Eine weitere Einschränkung bestand in der Vereinfachung der Berechnung der Lieferkosten. Wie in der Arbeit von Mohammadbagher und Torabi (2022) beschrieben, setzen sich die Lieferkosten aus Fahrerkosten, Energiekosten und Opportunitätskosten zusammen. In der vorliegenden Arbeit wurden jedoch die Fahrerkosten nicht berücksichtigt. Anschließend erfolgte eine umfassende Test- und Analysephase, um die Auswirkungen des Mautsystems auf Emissionen und die wirtschaftliche Effizienz zu bewerten.

Die Ergebnisse der Analysen zeigen deutlich, dass eine einseitige Optimierung – sei es in Richtung minimaler Emissionen, geringster Kosten oder niedrigster Mautgebühren – selten zu einer für alle betrachteten Parameter optimalen Lösung führt. Vielmehr erweisen sich Szenarien mit einer ausgewogenen Gewichtung ökologischer und ökonomischer Ziele als besonders vorteilhaft. Auffällig war, dass eine leichte Erhöhung der Betriebskosten oder städtischen Gebühren häufig mit einem signifikanten Rückgang der CO₂-Emissionen verbunden ist – ein wesentlicher Vorteil im Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit urbaner Logistik. Daraus lässt

sich ableiten, dass die Priorisierung ökologischer Zielgrößen bei nur geringfügigen Mehrkosten einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Flottenplanung leisten kann.

Ein weiterer zentraler Aspekt betrifft den Einfluss städtischer Mautgebühren auf die Tourenplanung. Die Analyse zeigte, dass insbesondere bei der Nutzung von Dieselfahrzeugen die Höhe der Gebühr einen direkten Effekt auf die Routenwahl hatte. Um den Anteil der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zu verringern, wurden vermehrt Elektrofahrzeuge eingesetzt. Bei niedrigeren Mautkosten war dieser Effekt jedoch kaum zu erkennen. Zudem ergab die Untersuchung, dass eine Stadtmaut nicht automatisch zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen führt. Ihre Wirksamkeit hängt maßgeblich davon ab, ob der festgelegte Betrag hoch genug ist, um eine tatsächliche Anpassung in der Flottenplanung zu bewirken. Andernfalls kann ein gut gemeintes Steuerungsinstrument sogar kontraproduktive Effekte im Hinblick auf Umweltziele entfalten.

Schließlich deutet die kontinuierliche Weiterentwicklung der Batterietechnologie und die Verbesserung der Reichweite von Elektrofahrzeugen darauf hin, dass Elektromobilität in den kommenden Jahren sowohl an Effizienz als auch an Alltagstauglichkeit deutlich gewinnen wird. In Kombination mit intelligent gestalteten städtischen Steuerungsmechanismen wie Mautsystemen eröffnet dies vielversprechende Perspektiven für eine umweltfreundlichere und zugleich wirtschaftlich tragfähige urbane Logistik.

Literaturverzeichnis

4Trucks, 2018. *4Trucks.pl*. [Online]

Available at: <https://4trucks.pl/aktualnosci/12780/iveco-daily-7-ton>

[Zugriff am 14 4 2024].

Amt der NÖ Landesregierung, 2023. *Amt der NÖ Landesregierung*. [Online]

Available at:

https://www.noel.gv.at/noe/Umweltrecht/Sanierungsgebiete_und_Massnahmen_PM10.html

[Zugriff am 26 3 2023].

Beevers, S. D. & Carslaw, D. C., 2005. The impact of congestion charging on vehicle emissions in London. *Atmospheric Environment*, 39(1), pp. 1-5.

Börjesson, M., Eliasson, J., Hugosson, M. B. & Brundell-Freij, K., 2012. The Stockholm congestion charges- 5 years on. Effects, acceptability and lessons learnt. *Transport Policy*, Band 20, pp. 1-12.

Breitsprecher, V., 2023. *tarife.at*. [Online]

Available at: <https://www.tarife.at/energie/strom/ratgeber/elektroautos-und-die-stromrechnung-was-kostet-das-aufladen>

[Zugriff am 16 9 2023].

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, 2022. *Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie*. [Online]

Available at: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/agenda2030/bericht-2020/nachhaltigkeit.html

[Zugriff am 24 10 2023].

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz (BMUV), 2022. *Klima und Erneuerbare Energien: Ist Elektromobilität wirklich klimafreundlich?*. [Online]

Available at: <https://www.bmuv.de/themen/verkehr/elektromobilitaet/klima-und-energie>

[Zugriff am 17 2 2024].

Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, 2023. *LKW-Maut wird um Kosten für klimaschädliche CO₂-Emissionen erweitert*. [Online]

Available at:

https://www.bmk.gv.at/service/presse/gewessler/20230831_oekologisierung-lkw-maut.html

[Zugriff am 12 11 2023].

Bundesministerium Klimaschutz, U. E., 2023. [Online]

Available at: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/recht/ig_l.html

[Zugriff am 3 9 2023].

Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, 2012. Bundesrecht konsolidiert:

Gesamte Rechtsvorschrift für IG-L – Abgasklassen-Kennzeichnungsverordnung. In:

Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, mit der Bestimmungen über die Durchführung der besonderen Kennzeichnung von Fahrzeugen betreffend die Zuordnung zu den Abgasklassen (IG-L - AbgklassV). Wien: s.n., p. §3.

Bundesverband Elektromobilität Österreich, 2025. *Ladepunkte in Österreich*. [Online] Available at: <https://www.beoe.at/ladepunkte-in-oesterreich/> [Zugriff am 26 08 2025].

Cheikhrouhou, O. & Khoufi, I., 2021. A comprehensive survey on the Multiple Traveling Salesman Problem: Applications, approaches and taxonomy. *Computer Science Review*, 40(100369).

Clark, G. & Wright, J. W., 1964. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, Band 12, pp. 568-581.

Comune di Milano, 2015. *Milan's Area C reduces traffic pollution and transforms the city center*. [Online] Available at: <https://www.c40.org/case-studies/milan-s-area-c-reduces-traffic-pollution-and-transforms-the-city-center/> [Zugriff am 04 08 2025].

Dantzig, G. B. & Ramser, J. H., 1959. The Truck Dispatching Problem,. *Management Science*, Issue 6, pp. 80-91.

De Palma, A. & Lindsey, R., 2011. Traffic congestion pricing methodologies and technologies. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 19(6), pp. 1377-1399.

Dekhici, L., Guerraiche, K. & Belkadi, K., 2020. Green Capacited Vehicles Routing Optimization with Constraints Rule-Based Approach. *ICREEC 2019*, pp. 673-679.

Duszczyk, M., 2021. *Rzeczpospolita*. [Online] Available at: <https://www.rp.pl/handel/art19230961-branze-q-commerce-czekaja-zmiany> [Zugriff am 5 11 2023].

Eliasson, J., 2009. A cost–benefit analysis of the Stockholm congestion charging system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(4), pp. 468-480.

El-Sherbeny, N., 2010. Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University - Science*, 07, 22(3), pp. 123-131.

Erdoğan, S. & Miller-Hooks, E., 2012. A Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), pp. 100-114.

Europäische Kommission, 2021. *Zero pollution action plan*. [Online] Available at: <https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action->

[plan_en?etrans=pl](#)

[Zugriff am 24 10 2023].

Europäischen Kommission in Polen, 2025. [Online]

Available at: https://poland.representation.ec.europa.eu/news/nowe-etapy-dekarbonizacji-2025-07-02_pl

[Zugriff am 04 08 2025].

Europäisches Parlament, 2023. *European Parliament*. [Online]

Available at:

https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2019/4/story/20190313STO31218/20190313STO31218_pl.pdf

[Zugriff am 3 11 2023].

European Commission, 2024. *The European Green Deal*. [Online]

Available at: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[Zugriff am 26 08 2025].

European Court of Auditors, 2018. *Air pollution: Our health still insufficiently protected. Special Report no 23*, s.l.: s.n.

European Environment Agency, 2022. *Health impacts of air pollution in Europe, 2022*. [Online]

Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>

[Zugriff am 24 10 2023].

Eurostat Statistics Explained, 2023. *Eurostat Statistics Explained*. [Online]

Available at: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Oil and petroleum products - a statistical overview](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Oil_and_petroleum_products_-_a_statistical_overview)

[Zugriff am 3 11 2023].

FHWA, U. S. D. o. T. F. H. A., 2022. *About Congestion Pricing*, Washington: s.n.

Goeke & Schneider, 2015. Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 245(1), pp. 81-99.

Green, C. P., Heywood, J. S. & Navarro, M., 2018. *Did the London Congestion Charge Reduce Pollution?*, Lancaster: The Department of Economics Lancaster University Management School.

Henriksson, G., Hagman, O. & Hakan, A., 2011. Environmentally Reformed Travel Habits During the 2006 Congestion Charge Trial in Stockholm—A Qualitative Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health (IJERPH)*, 8(8), pp. 3202-15.

Herdianti, W., Gunawan, A. & Komsiyah, S., 2021. Distribution Cost Optimization Using Pigeon Inspired Optimization Method with Reverse Learning Mechanism. *Procedia Computer Science*, 7(179), pp. 920-929.

Hiermann, Puchinger, Ropke & Hartl, 2016. The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations. *European Journal of Operational Research*, Issue 252 (3), pp. 995-1018.

Hofer, 2023. *Hofer*. [Online]
Available at: <https://filialen.hofer.at/wien/wien>
[Zugriff am 18 9 2023].

Holman, C., Harrison, R. & Xavier, Q., 2015. Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities. *Atmospheric Environment*, Band 111, pp. 161-169.

IG-L-Maßnahmenkatalog 2005, 20.12.2013. *Verordnung des Landeshauptmannes von Wien, mit der Maßnahmen zur Verringerung der Immission der Luftschadstoffe PM10 und NO2 nach dem Immissionsschutzgesetz - Luft getroffen werden (IG-L-Maßnahmenkatalog 2005)*, Wien: RIS.

IKEA Österreich, 2022. *IKEA Österreich Newsroom*. [Online]
Available at: https://www.ikea.com/at/de/files/pdf/62/43/6243747f/ikea_oesterreich_presseinformation_ausbau_ev-truck_flotte.pdf
[Zugriff am 19 08 2025].

IKEA Österreich, 2023. *IKEA Österreich Newsroom*. [Online]
Available at: <https://www.ikea.com/at/de/newsroom/corporate-news/weltweite-ikea-premiere-fuer-emissionsfreie-lieferung-ikea-oesterreich-fuehrt-wasserstoffbetriebene-lieferfahrzeuge-ein-pub1bc63df0>
[Zugriff am 15 10 2023].

Iveco Austria G.m.b.H, 2023. *IVECO*. [Online]
Available at:
https://www.iveco.com/austria/Documents/Configurator/Brochure/Dailyvan_AT.pdf
[Zugriff am 19 1 2024].

IVECO S.p.A, 2023. *Iveco*. [Online]
Available at: <https://viewer.ipaper.io/iveco-hq/de/edaily/?page=3>
[Zugriff am 6 1 2024].

IVECO S.p.A, 2024. *EDaily Konfigurator*. [Online]
Available at: <https://edaily.iveco.com/youredaily/?country=pl&lang=pl>
[Zugriff am 4 2 2024].

Kopfer, H. W., Schönberger, J. & Kopfer, H., 2014. Reducing greenhouse gas emissions of a heterogeneous vehicle fleet. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Issue 26, pp. 221-248.

Leape, J., 2006. The London Congestion Charge. *Journal of Economic Perspectives*, 20(4), pp. 157-176.

Lebeau, Van Mierlo & Verbeke, 2015. Conventional, hybrid, or electric vehicles: Which technology for an urban distribution centre?. *The Scientific World Journal*.

Leihns, D., Siegl, T. & Hartmann, M., 2014. *City-Maut. Nutzen und Technologien von Systemen zum Steuern der Zufahrt in Zonen*. Wien: Springer Vieweg.

LGBl. Nr. 2/2017, 2017. *Verordnung des Landeshauptmannes von Burgenland vom 12. Jänner 2017, mit der Maßnahmen zur Verringerung der Immission des Luftschadstoffes PM₁₀ nach dem Immissionsschutzgesetz - Luft getroffen werden (IG-L Maßnahmenkatalog 2016)*, Wien: RIS.

LGBl. 8103/1-0, 2015. *NÖ Sanierungsgebiets- und Maßnahmenverordnung Feinstaub (PM₁₀)*, Wien: RIS.

LGBl. Nr. 2/2012, 2012. *Verordnung des Landeshauptmannes von Steiermark vom 17. Jänner 2012, mit der Maßnahmen zur Verringerung der Emission von Luftschadstoffen nach dem Immissionsschutzgesetz-Luft angeordnet werden (Stmk. Luftreinhalteverordnung 2011)*, Wien: RIS.

LGBl. Nr. 3/2020 , 2.01.2020. *Verordnung des Landeshauptmanns von Oberösterreich, mit der Mindestemissionsstandards für den Betrieb von Taxifahrzeugen in Teilen des Stadtgebiets von Linz angeordnet werden*, Wien: Rechtsinformationssystem des Bundes .

LGBl. Nr. 44/2016, 2016. *Verordnung des Landeshauptmannes vom 18. Mai 2016, mit der auf einem Abschnitt der A 12 Inntal Autobahn der Transport bestimmter Güter im Fernverkehr verboten wird (Sektorales Fahrverbot-Verordnung)*, Wien: RIS.

LGBl. Nr. 87/2015, 2015. *Verordnung des Landeshauptmanns von Oberösterreich, mit der die Verordnung, mit der ein emissionsabhängiges Fahrverbot für Lastkraftfahrzeuge für eine Teilstrecke der A1 West Autobahn angeordnet wird, geändert wird*, Wien: RIS.

Lin, J., Zhou, W. & Wolfson, O., 2016. Electric vehicle routing problem. *Transportation Research Procedia*, Band 12, pp. 508-521.

Mayor of London, 2008. *Central London Congestion Charging – Impacts monitoring*, London: Transport for London.

Mohammadbagher, A. & Torabi, S. A., 2022. Multi-Objective Vehicle Routing Problem for a Mixed Fleet of Electric and Conventional Vehicles with Time Windows and Recharging Stations. *International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects*, 35(12), pp. 2359-2369.

Mohr, M., 2022. *Statista*. [Online]
Available at: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1087579/umfrage/flaeche-von-wien-nach-bezirken/>
[Zugriff am 18 9 2023].

Öamtc, 2023. *Oeamtc*. [Online]
Available at: <https://www.oeamtc.at/thema/vorschriften-straßen/ig-luft-abgasplaketten-verordnung-fahrverbote-für-lkw-16179408>
[Zugriff am 5 3 2023].

O'Hare, R., 2023. *Low-emission and congestion-charge zones linked to health benefits*. [Online]

Available at: <https://www.imperial.ac.uk/news/245774/low-emission-congestion-charge-zones-linked/>

[Zugriff am 30 07 2025].

Österreichische Post Aktiengesellschaft, 2023. *Startschuss für emissionsfreie Zustellung in Innsbruck*. [Online]

Available at: <https://unsere.post.at/umwelt/startschuss-fuer-emissionsfreie-zustellung-in-innsbruck,175.html>

[Zugriff am 14 10 2023].

Patel, R., 2023. *Upper*. [Online]

Available at: <https://www.upperinc.com/glossary/route-optimization/capacitated-vehicle-routing-problem-cvrp/>

[Zugriff am 23 7 2023].

Pestel, N. & Wozny, F., 2019. *Low Emission Zones for Better Health: Evidence from German Hospitals*, Bonn: IZA Institute of Labor Economics.

Peters, J., Burguillo, M. & Arranz, J. M., 2021. Low emission zones: Effects on alternative-fuel vehicle uptake and fleet CO2 emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Band 95.

Rechtsinformationssystem des Bundes, 1967. Kraftfahrgesetz. In: RIS, Hrsg. *Gesamte Rechtsvorschrift für Kraftfahrgesetz 1967*. 48/2021 Hrsg. Wien: RIS, p. §3.

Rhino Car Hire, 2025. *Petrol and Diesel Fuel Prices in Austria*. [Online]

Available at: https://www.rhinocarhire.com/World-Fuel-Prices/Europe/Austria.aspx?utm_source=chatgpt.com

[Zugriff am 19 5 2025].

Sassi, O., Cherif, W. R. & Oulamara, A., 2014. *Vehicle Routing Problem with Mixed fleet of conventional and heterogenous electric vehicles and time dependent charging costs*. s.l., hal-01083966.

Savelsbergh, M., 1995. The General Pickup and Delivery Problem. *Transportation Science*, 29(1), pp. 17-29.

Shell, 2023. *Shell in Österreich*. [Online]

Available at: <https://www.shell.at/geschaefte-und-privatkunden/shell-card/shell-card-blog/e-auto-ladekosten.html#iframe=L3NoZWxsY2FyZFYyZXF1ZXN0X2F0P3BhZ2VfVJMPWh0dHBzOi8vd3d3LnNoZWxsLmF0L2dlc2NoYWVmdHMtdW5kLXByaXZhdGt1bmRlbi9zaGVsbC1jYXJkL3NoZWxsLWNhcmQtYmxvZy9lWF1d>

[Zugriff am 10 3 2024].

Stadt Wien Verkehrsorganisation und technische Verkehrsangelegenheiten, 2022. *Freigegebene Busspuren für Motorräder in Wien*, s.l.: s.n.

Stadt Wien, 2025. *Stad Wien*. [Online]

Available at: <https://www.wien.gv.at/verkehr/kfz/ladestationen/>

[Zugriff am 26 08 2025].

Stahl, T., 2022. *Alte E-Autos: So viel kostet der Akkutauch bei VW e-Golf, BMW i3 & Co..* [Online]

Available at: https://efahrer.chip.de/news/alte-e-autos-so-viel-kostet-der-akkutauch-bei-vw-e-golf-bmw-i3-co_107270

[Zugriff am 12 11 2023].

Statistik Austria, 2023. *Kfz-Neuzulassungen*. [Online]

Available at: <https://www.statistik.at/statistiken/tourismus-und-verkehr/fahrzeuge/kfz-neuzulassungen>

[Zugriff am 01 04 2023].

Statistik Austria, 2025. *KFZ-Bestand*. [Online]

Available at: <https://www.statistik.at/statistiken/tourismus-und-verkehr/fahrzeuge/kfz-bestand>

[Zugriff am 16 08 2025].

U. S. Administration, D. o. T. F. H., Februar 2022. *About Congestion Pricing*, s.l.: s.n.

U.S. Department of Transportation, 2021. *Lessons Learned From International Experience in Congestion Pricing*. [Online]

Available at: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08047/es.htm>

[Zugriff am 04 08 2025].

Umweltbundesamt Deutschlands, 2021. *Umweltbundesamt*. [Online]

Available at:

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub/umweltzonen-in-deutschland#10-welche-grundlegendenden-effekte-hatten-die-umweltzonen-bisher>

[Zugriff am 27 2 2023].

Urban Access Regulations, 2022. *Stadtzugangsverordnung in Europa*. [Online]

Available at: <https://de.urbanaccessregulations.eu/countries-mainmenu-147/italy-mainmenu-81/lombardia/milan-area-c-charging-scheme>

[Zugriff am 19 2 2023].

Volvo Trucks Deutschland, 2023. *Technische Daten- Volvo FL Electric*. [Online]

Available at: <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/trucks/volvo-fl/volvo-fl-electric.html>

[Zugriff am 12 11 2023].

Volvo Trucks, 2025. *Volvo Trucks*. [Online]

Available at:

https://stpi.it.volvo.com/STPIFiles/Volvo/ModelRange/fl42re16_pol_pol.pdf

[Zugriff am 31 03 2025].

Wien Energie, 2025. *Tanke-Tarife*. [Online]

Available at: <https://www.wienenergie.at/privat/produkte/e-mobilitaet/tanke-tarife/>
[Zugriff am 28 04 2025].

Wood, N. et al., Februar 2021. *National Inventory of Specialty Lanes and Highways: Technical Report*, New Jersey: U.S. Department of Transportation.

Yang, X.-S., 2014. Chapter 14 - Multi-Objective Optimization. In: *Nature-Inspired Optimization Algorithms*. s.l.:Elsevier, pp. 197-211.

Yilmaz, S., 2019. *Quantron mit Hybrid-Antrieb auf Basis des IVECO Daily preislich und auch technisch derzeit konkurrenzlos*. [Online]

Available at: <https://www.quantron.net/wp-content/uploads/2020/05/Vorreiterrolle-Quantron-mit-Hybrid-Antrieb-auf-Basis-des-IVECO-Daily-preislich-und-auch-technisch-derzeit-konkurrenzlos.pdf>
[Zugriff am 12 11 2023].

Anhänge

Anhang A: Kfz-Neuzulassungen

Kfz-Neuzulassungen nach Kfz-Art und Kraftstoffart bzw. Energiequelle

Kfz-Art	1. Halbjahr 2020			1. Halbjahr 2021			1. Halbjahr 2022			1. Halbjahr 2023			1. Halbjahr 2024		
	absolut	Anteil in %	Veränderung in %	absolut	Anteil in %	Veränderung in %	absolut	Anteil in %	Veränderung in %	absolut	Anteil in %	Veränderung in %	absolut	Anteil in %	Veränderung in %
Kfz insgesamt															
Personenkraftwagen	112 787	69,3	-35,9	134 396	64,4	19,2	108 606	67,9	-19,2	126 690	69,2	16,7	135 113	68,6	6,6
Lkw N1	16 818	10,3	-27,4	30 783	14,7	83,0	11 252	7,0	-63,4	14 538	7,9	29,2	19 560	9,9	34,5
Lkw N2 und N3	1 774	1,1	-43,5	2 133	1,0	20,2	1 626	1,0	-23,8	1 926	1,1	18,5	2 586	1,3	34,3
Motorräder	16 451	10,1	-8,0	20 618	9,9	25,3	20 705	12,9	0,4	22 594	12,3	9,1	22 119	11,2	-2,1
Motorfahrräder	6 391	3,9	-8,2	7 278	3,5	13,9	5 978	3,7	-17,9	5 973	3,3	-0,1	6 219	3,2	4,1
Andere Kfz	8 633	5,3	-16,8	13 623	6,5	57,8	11 770	7,4	-13,6	11 469	6,3	-2,6	11 497	5,8	0,2
Kfz insgesamt	162 854	100,0	-31,4	208 831	100,0	28,2	159 937	100,0	-23,4	183 190	100,0	14,5	197 094	100,0	7,6
Darunter alternative Antriebe¹															
Personenkraftwagen	17 135	92,2	42,2	45 926	93,6	168,0	41 744	91,9	-9,1	58 276	94,5	39,6	62 048	94,2	6,5
Lkw N1	277	1,5	-23,5	1 165	2,4	320,6	1 152	2,5	-1,1	1 643	2,7	42,6	1 656	2,5	0,8
Lkw N2 und N3	8	0,0	-11,1	37	0,1	362,5	24	0,1	-35,1	23	0,0	-4,2	85	0,1	269,6
Motorräder	349	1,9	7,1	501	1,0	43,6	910	2,0	81,6	645	1,0	-29,1	704	1,1	9,1
Motorfahrräder	714	3,8	-22,6	1 232	2,5	72,5	1 230	2,7	-0,2	798	1,3	-35,1	905	1,4	13,4
Andere Kfz	111	0,6	-26,5	228	0,5	105,4	343	0,8	50,4	254	0,4	-25,9	466	0,7	83,5
Kfz insgesamt	18 594	100,0	34,5	49 089	100,0	164,0	45 403	100,0	-7,5	61 639	100,0	35,8	65 864	100,0	6,9
Darunter Elektro-Antrieb (BEV)															
Personenkraftwagen	4 805	77,7	-2,0	15 347	83,9	219,4	14 493	80,7	-5,6	23 372	88,1	61,3	22 178	85,8	-5,1
Lkw N1	233	3,8	-26,3	1 035	5,7	344,2	987	5,5	-4,6	1 440	5,4	45,9	1 600	6,2	11,1
Lkw N2 und N3	-	-	-100,0	6	0,0	-	22	0,1	266,7	15	0,1	-31,8	60	0,2	300,0
Motorräder	349	5,6	7,1	501	2,7	43,6	910	5,1	81,6	645	2,4	-29,1	696	2,7	7,9
Motorfahrräder	714	11,5	-22,6	1 232	6,7	72,5	1 230	6,8	-0,2	798	3,0	-35,1	905	3,5	13,4
Andere Kfz	85	1,4	-28,0	173	0,9	103,5	322	1,8	86,1	247	0,9	-23,3	399	1,5	61,5
Kfz insgesamt	6 186	100,0	-6,1	18 294	100,0	195,7	17 964	100,0	-1,8	26 517	100,0	47,6	25 838	100,0	-2,6

Tabelle 5 Vergleich der Anzahl der Kfz-Neuzulassungen in den Jahren 2020–2024 (Statistik Austria, 2025)

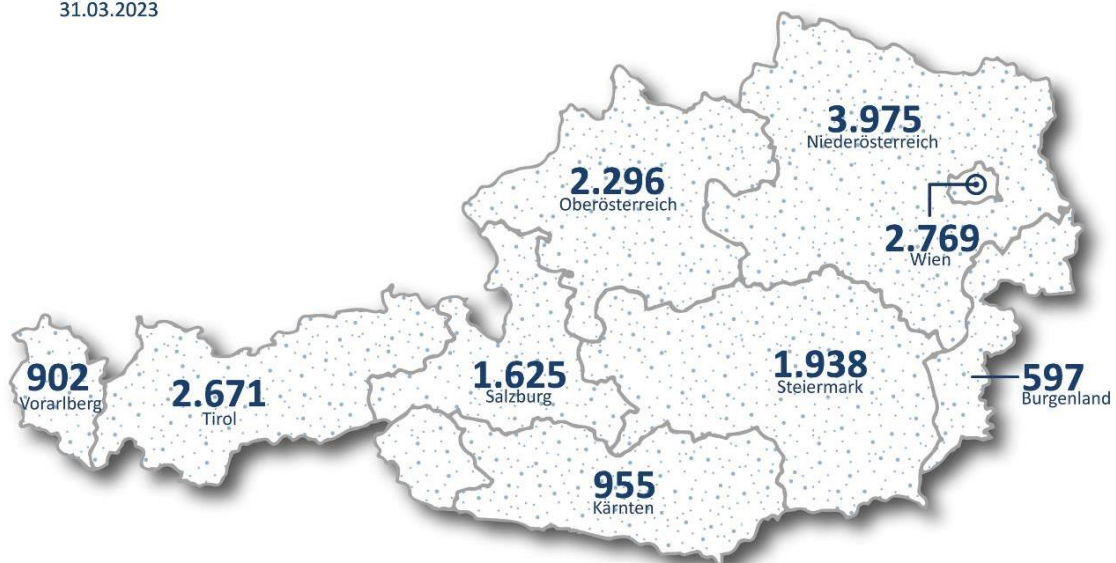
Anhang B: E-Ladestationen

- In Österreich

E-Ladepunkte in Österreich

17.728 öffentliche Ladepunkte

31.03.2023



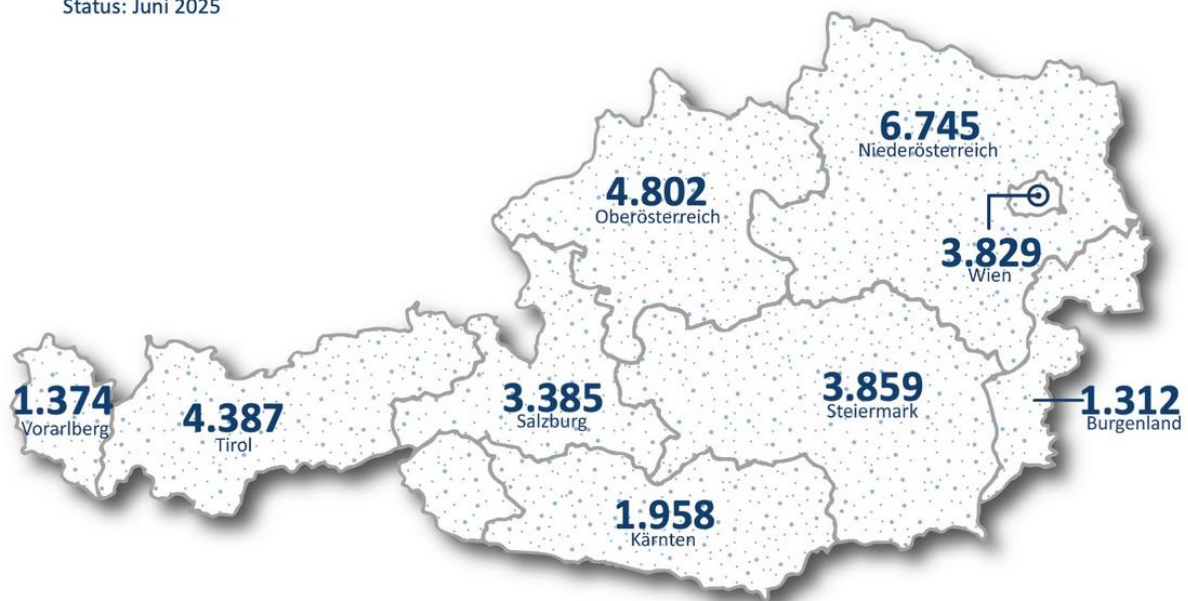
Bundesverband Elektromobilität Österreich (BEO) | Quelle: e-control, Quartalsbericht Q1 2023

© com_unit

E-Ladepunkte in Österreich

31.651 öffentliche Ladepunkte

Status: Juni 2025



Bundesverband Elektromobilität Österreich (BEÖ) | www.beoe.at | E-Ladepunkte in Österreich | Quelle: BEÖ/Charging Radar/e-control

© com_unit

Abbildung 13 Vergleich der Anzahl an E-Ladepunkten 2023 und 2025 (Bundesverband Elektromobilität Österreich, 2025)

- In Wien

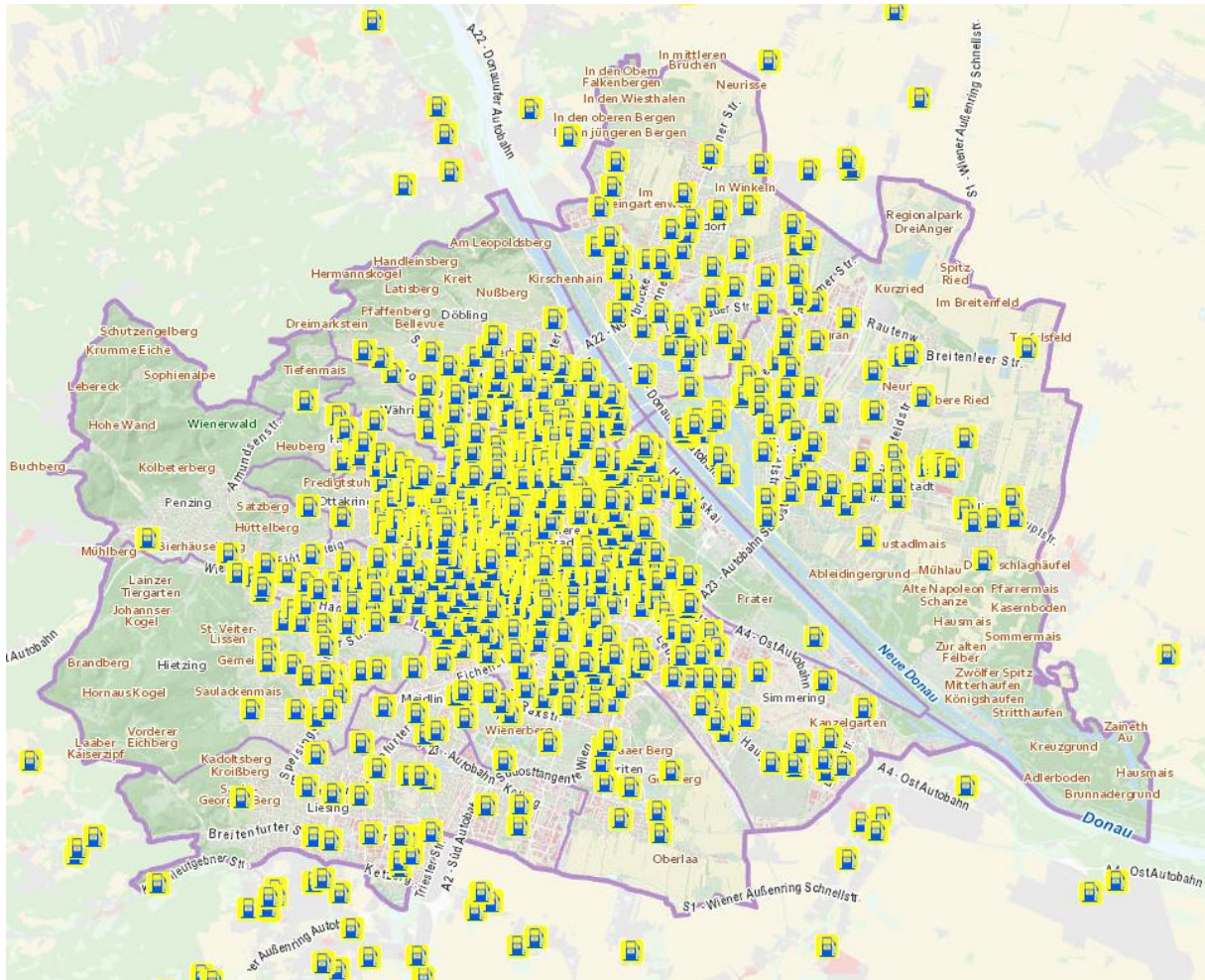


Abbildung 14 Anzahl der E-Ladepunkten in Wien (Stadt Wien, 2025)

Anhang C: Standortlisten der Instanzen

Kunde	Adresse	Postleitzahl	Stadt
1	Neutorgasse, Heinrichsg. 2, 1, 1010 Wien	1010	Wien
2	Am Tabor 42 - 44, 1020 Wien	1020	Wien
3	Zirkusgasse 24, 1020 Wien	1020	Wien
4	Döblerhofstraße 8, 1030 Wien	1030	Wien
5	Marxergasse 29, 1030 Wien	1030	Wien
6	Favoritenstraße 27, 1040 Wien	1040	Wien
7	Rechte Wienzeile 35, 1040 Wien	1040	Wien
8	Bräuhausgasse 37 , 1050 Wien	1050	Wien
9	Nikolsdorfergasse 7-11 , 1050 Wien	1050	Wien
10	Mariahilferstraße 123 , 1060 Wien	1060	Wien
11	Mariahilferstraße 85-87, 1060 Wien	1060	Wien
12	Zieglergasse 58-64, 1070 Wien	1070	Wien
13	Lerchenfelder Str. 124-126, 1080 Wien	1080	Wien
14	Lerchenfelder Straße 14,1080 Wien	1080	Wien
15	Alserbachstraße 18, 1090 Wien	1090	Wien
16	Nussdorfer Straße 73, 1090 Wien	1090	Wien
17	Daumegasse 13, 1100 Wien	1100	Wien
18	Laxenburger Straße 137-139, 1100 Wien	1100	Wien
19	Triester Straße 64, 1100 Wien	1100	Wien
20	Florian Hedorfer-Straße 19, 1110 Wien	1110	Wien
21	Zinnergasse 6, 1110 Wien	1110	Wien
22	Aßmayergasse 38-40, 1120 Wien	1120	Wien
23	Tivoligasse 15, 1120 Wien	1120	Wien
24	Versorgungsheimstraße 4, 1130 Wien	1130	Wien
25	Albert-Schweitzer-Gasse 1a, 1140 Wien	1140	Wien
26	Maroltingergasse 1, 1140 Wien	1140	Wien
27	Gablenzgasse 111, 1150 Wien	1150	Wien
28	Sechshauser Straße 48, 1150 Wien	1150	Wien
29	Brunnengasse 38, 1160 Wien	1160	Wien
30	Odoakergasse 38, 1160 Wien	1160	Wien
31	Bergsteiggasse 36-38, 1170 Wien	1170	Wien

32	Ottakringer Straße 38, 1170 Wien	1170	Wien
33	Gersthofer Straße 2 d, 1180 Wien	1180	Wien
34	Martinstraße 57-61, 1180 Wien	1180	Wien
35	Heiligenstädter Straße 158, 1190 Wien	1190	Wien
36	Obkirchergasse 35, 1190 Wien	1190	Wien
37	Adalbert Stifter Straße 40, 1200 Wien	1200	Wien
38	Traisengasse 20-22, 1200 Wien	1200	Wien
39	Brünner Str./Eberescheng. 3, 1210 Wien	1210	Wien
40	Gerasdorfer Straße 131/2, 1210 Wien	1210	Wien
41	Siemensstraße 105, 1210 Wien	1210	Wien
42	Breitenleer Straße 106, 1220 Wien	1220	Wien
43	Großenzersd.Str./Lohwagg. 2, 1220 Wien	1220	Wien
44	Ziegelhofstraße 24, 1220 Wien	1220	Wien
45	Breitenfurterstraße 261, 1230 Wien	1230	Wien
46	Klingerstraße 4, 1230 Wien	1230	Wien

Tabelle 6 Adresslisten der getesteten Instanzen

Zone A	Kunde	Zone B	Kunde
	17		1
	18		2
	19		3
	20		4
	21		5
	24		6
	25		7
	26		8
	31		9
	32		10
	35		11
	36		12
	39		13
	40		14
	41		15
	42		16
	43		22
	44		23
	45		27
	46		28
			29
			30
			33
			34
			37
			38

Tabelle 7 Kundenaufteilung nach Wiener Mautzonen

Anhang D: Vollständiger Code des MFVRPCP in Fico Xpress Mosel

```
model MixedFleetCongestionPriceVehicleRoutingProblem
```

```
uses "mmxprs"; !gain access to the Xpress-Optimizer solver
```

```
uses "advmod";
```

```
setparam("XPRS_MAXTIME", 1200) ! Time limit of 20 Minutes
```

```
setparam("XPRS_VERBOSE", true) ! Enable detailed output
```

```
! declarations section
```

```
declarations
```

```
PROJECTDIR="" ! for when file is added to project
```

```
cust = 1..46 !define the set of customers- 46 customers
```

```
all = 0..47 !define the set of depot+customers+depot 48 elements
```

```
N0= 0 !Start depot
```

```
N1= 47 !End depot
```

```
distances: array(all, all) of real ! define the distance matrix- dij
```

```
demand: array (all) of integer ! demands of the customers
```

```
electric_vehicles = 1..3 ! define a set of electric vehicles
```

```
capacity_electric= 1129 !4000 !capacity of a electric vehicle
```

```
diesel_vehicles =4..9 !define a set of electric vehicles
```

```
capacity_diesel=4300 !capacity of a diesel vehicle
```

```
emission = 204
```

```
alpha= 0.4
```

```

beta=0.2

gamma=0.4

visit_diesel: dynamic array(all, all,diesel_vehicles) of mpvar ! dec variable xijd
visit_electric: dynamic array (all, all, electric_vehicles) of mpvar ! dec variable xije
u:array(cust) of mpvar ! Auxiliary variables for subtour elimination

N_Customers= 46 ! This gives the number of customers

total_distance:linctr


depot_to_zoneA: array(diesel_vehicles) of mpvar
depot_to_zoneB: array(diesel_vehicles) of mpvar
zoneA_to_zoneB: array(diesel_vehicles) of mpvar


customer_zone_B=
{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,22,23,27,28,29,30,33,34,37,38}

customer_zone_A= {17,18,19,20,21,24,25,26,31,32,35,36,39,40,41,42,43,44,45,46}


filename = "46_KU.dat"


end-declarations


initializations from filename

    distances demand ! read the distances between depot and customers and the
demand of vehicles

end-initializations


forall(i in all, j in all, d in diesel_vehicles) create(visit_diesel(i,j,d))
forall(i in all, j in all, e in electric_vehicles) create(visit_electric(i,j,e))

```

forall(i in all, j in all, d in diesel_vehicles) visit_diesel(i,j,d) is_binary !xijd is 0 or 1

forall(i in all, j in all, e in electric_vehicles) visit_electric(i,j,e) is_binary ! dec variable
xje is 0 or 1

forall(d in diesel_vehicles) do

depot_to_zoneA(d) is_binary

depot_to_zoneB(d) is_binary

zoneA_to_zoneB(d) is_binary

end-do

! Constraints

! Each vehicle must leave the depot exactly once

forall(d in diesel_vehicles)

sum(j in all)visit_diesel(N0,j,d) = 1

forall(e in electric_vehicles)

sum(j in all)visit_electric(N0,j,e) = 1

! Each vehicle must return to the depot exactly once

forall(d in diesel_vehicles)

sum(i in all)visit_diesel(i,N1,d) = 1

forall(e in electric_vehicles)

sum(i in all)visit_electric(i,N1,e) = 1

!For toll calculation, link binary variables with the entire route decision variables for each vehicle

forall(d in diesel_vehicles) do

! depot_to_zoneA is 1 if the vehicle d travels from the depot to any customer in Zone A

depot_to_zoneA(d) >= sum(j in customer_zone_A) visit_diesel(N0, j, d)

! depot_to_zoneB is 1 if the vehicle d travels from the depot to any customer in Zone B

depot_to_zoneB(d) >= sum(j in customer_zone_B) visit_diesel(N0, j, d)

! zoneA_to_zoneB is 1 if the vehicle d travels from any customer in Zone A to any customer in Zone B

zoneA_to_zoneB(d) >= sum(i in customer_zone_A, j in customer_zone_B)
visit_diesel(i, j, d)

end-do

!Toll calculation and strict maximum toll limit

forall(d in diesel_vehicles) do

toll(d):= (5 * depot_to_zoneA(d) + 9 * depot_to_zoneB(d) + 4 *
zoneA_to_zoneB(d))

toll(d)<= 9

end-do

! Flow conservation constraints for Depot ensure that the number of vehicles leaving the depot equals the number of vehicles returning to the depot

forall(d in diesel_vehicles)

sum(j in cust) visit_diesel(N0, j, d) = sum(i in cust) visit_diesel(i, N1, d)

forall(e in electric_vehicles)

sum(j in cust) visit_electric(N0, j, e) = sum(i in cust) visit_electric(i, N1, e)

!Each customer is visited exactly once

forall (i in cust)

sum(j in all, e in electric_vehicles | j > 0 and i <> j)visit_electric(i,j,e)+sum(j in all, d
in diesel_vehicles | j > 0 and i <> j)visit_diesel(i,j,d)=1

forall(j in cust)

sum(i in all, e in electric_vehicles | i < N1 and i <> j)visit_electric(i,j,e)+sum(i in all,
d in diesel_vehicles | i < N1 and i <> j)visit_diesel(i,j,d)=1

! Flow conservation constraints for each customer, if a vehicle visits a customer, it
must also leave that customer to continue its route or return to the depot.

forall(d in diesel_vehicles, j in cust)

sum(i in all | i <> j and j>0) visit_diesel(i, j, d) = sum(i in all | i <> j and j<N1)
visit_diesel(j, i, d)

forall(e in electric_vehicles, j in cust)

sum(i in all | i <> j and j>0) visit_electric(i, j, e) = sum(i in all | i <> j and j<N1)
visit_electric(j, i, e)

```

!enforce that no vehicles leave the final depot or enter the starting depot
forall(i in all)
    sum(d in diesel_vehicles) visit_diesel(i, N0, d) =0
forall(i in all)
    sum(d in diesel_vehicles) visit_diesel(N1, i, d) =0
forall(i in all)
    sum(e in electric_vehicles) visit_electric(i, N0, e) =0
forall(i in all)
    sum(e in electric_vehicles) visit_electric(N1, i, e) =0

! Capacity constraints

forall(e in electric_vehicles)
    sum(i in all, j in cust | i <> j) visit_electric(i,j,e)*demand(j) <= capacity_electric

!forall(i in all, j in cust, e in electric_vehicles | i <> j) do
!    (111 - (111 / 400) * distances(i, j)) * visit_electric(i, j, e) >= 0
!end-do

forall(d in diesel_vehicles)
    sum(i in all, j in cust | i <> j) visit_diesel(i,j,d)*demand(j) <= capacity_diesel

!Subtour elimation constraints using MTZ (Millen-Tucker-Zemlin)

forall(i in cust, j in cust | i <> j) do
    forall (e in electric_vehicles) do

```

```

    u(i) - u(j) + N_Customers*visit_electric(i, j, e) <= N_Customers-1
end-do

forall(d in diesel_vehicles) do
    u(i) - u(j) + N_Customers *visit_diesel(i, j, d) <= N_Customers-1
end-do
end-do

! Bound the auxiliary variables to ensure proper sequencing
forall(i in cust) do
    u(i) >= 1 ! Auxiliary variable bounds (1 to N_Customers)
    u(i) <= N_Customers
end-do

total_distance:= sum(d in diesel_vehicles, i in all, j in all | i <> j)distances(i,j)*
visit_diesel(i,j,d)+ sum(e in electric_vehicles, i in all, j in all | i <> j) distances(i,j) *
visit_electric(i,j,e)

! Objective function

C:= sum(i in all, j in all, e in electric_vehicles | j > 0)0.35 * (111 / 400 * distances(i,
j))*visit_electric(i, j, e) + sum(i in all, j in all, d in diesel_vehicles | i <> j)visit_diesel(i, j,
d)*1.53 * 0.085 * distances(i, j)

P:= sum(i in all, j in all, d in diesel_vehicles)visit_diesel(i,j,d)*distances(i,j)
*emission

T:= sum(d in diesel_vehicles)toll(d)

F:= alpha*C+beta*P+gamma*T

```

! Minimize objective functions

!minimize(C)

!minimize(P)

!minimize(T)

minimize(F)

! Return result

if PROJECTDIR <> " then

 setparam('workdir', PROJECTDIR)

 writeln("Project directory: " + PROJECTDIR)

end-if

forall (i in all,j in all) do

 if i<>j then

 forall(e in electric_vehicles) do

 !writeln(i,j) if the cust ij is visited through electric vehicle

 if getsol(visit_electric(i,j,e)) > 0

 then writeln("Electric ", e , " going from ", i, " to ", j," with distance ",
distances(i,j), " with demand ", demand(i)) !if the cust is not visited through an electric
vehicle, write visited through diesel vehicle

 end-if

 end-do

 !if the cust is not visited trough electric vehicle, write visited through diesel
vehicle

```

forall(d in diesel_vehicles) do
    if getsol(visit_diesel(i,j,d)) > 0
        then writeln("Diesel " , d," going from ", i, " to ", j," with distance "
,distances(i,j), " with demand ", demand(i))
        end-if
    end-do
end-if
end-do

! Print final results
writeln("Toll: ", getsol (T)) ! calculate the total toll (t) which is needed to pay

writeln ("Total pollutions in grams: ", getsol (P)) ! calculate the pollution

writeln ("Total Costs are: ", getsol(C)) ! calculate the total costs (C)

writeln("Total distance: ", getsol(total_distance))

writeln("Final Objective Value (F): ", getsol(F))

end-model

```