



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Eine quantitative Analyse zur umweltschonenden und kostengünstigen Integration von U-Bahnen im City-Logistikbereich“

verfasst von / submitted by

Selina Koch, B.Sc.

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

Wien, 2022 / Vienna 2022

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. Mag. Dr. Karl Franz Dörner, Privatdoz.

Kurzfassung

Bei der letzten Meile Zustellung handelt es sich um ein häufig untersuchtes Forschungsgebiet im Bereich Supply Chain Management. Aufgrund zunehmender Urbanisierung, einem Anstieg im E-Commerce Sektor und neuen Regulierungen und Gesetzen, um Städte nachhaltiger und lebenswürdiger zu gestalten, wird das Problem der letzten Meile aus anderen Blickwinkeln betrachtet. Nachhaltige und kostengünstige Lösungen werden gesucht. Die Einbindung der U-Bahn in den City-Logistikbereich könnte eine umweltschonende und kostengünstige Lösung sein, um Kunden in dicht besiedelten Städten zu beliefern. In dieser Arbeit wird analytisch untersucht, inwiefern es kostengünstiger und umweltschonender ist, Kunden am Beispiel Wien mittels U-Bahn und von der U-Bahn-Station aus mit dem Lastenfahrrad zu beliefern im Vergleich zu einer herkömmlichen Belieferung mittels Transporter. Hierfür wurden die existierenden Wiener U-Bahn-Linien berücksichtigt. Es zeigt sich, dass eine Belieferung derselben Kunden mittels U-Bahn und Lastenfahrrad deutlich kostengünstiger und emissionsärmer als eine Belieferung mittels Transporter ist. So könnte die Einbindung der U-Bahn in den Belieferungsprozess eine gute Alternative sein, um Städte nachhaltiger zu gestalten.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis	V
1. Einleitung.....	1
2. Literaturrecherche.....	3
2.1. Relevanz der nachhaltigen City-Logistik.....	3
2.2. Indikator für die weitere Untersuchung	5
2.2.1. Emissionen einzelner Verkehrsmittel.....	6
2.2.2. Kosten einzelner Verkehrsmittel	7
2.2.3. Fassungsvermögen einzelner Verkehrsmittel.....	8
3. Problembeschreibung	10
3.1. Versuchsaufbau	10
3.2. Der Savings-Algorithmus.....	12
4. Ergebnisse.....	13
4.1. Referenzwert	13
4.2. Der Einsatz von U-Bahn und Lastenfahrrad	19
4.2.1. Clustering an der x-Achse	19
4.2.1.1. Clustering in drei Cluster	20
4.2.1.2. Clustering in vier Cluster	22
4.2.1.3. Clustering in fünf Cluster.....	24
4.2.2. Clustering an der x- und y-Achse	26
4.2.2.1. Clustering in sechs Cluster.....	26
4.2.2.2. Clustering in acht Cluster.....	27
4.2.2.3. Clustering in zehn Cluster.....	28
4.3. Einbindung aller U-Bahn-Linien.....	29
5. Diskussion	31
5.1. Berücksichtigung der Emissionen bei der Auslieferung.....	34
5.2. Berücksichtigung der Kosten bei der Auslieferung	35

6. Conclusio und Ausblick.....	36
Literaturverzeichnis	38
Anhang.....	42
Anhang A	42
Anhang B.....	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Ausgangsbasis mit 250 Kunden, U-Bahn-Linien und Hubs in Wien.....	11
Abbildung 2 - Illustration des Savings-Konzept.....	12
Abbildung 3 - Belieferung von 250 Kunden mittels LKW, Startpunkt Hütteldorf	14
Abbildung 4 - Belieferung von 250 Kunden mittels LKW, Startpunkt Heiligenstadt.....	15
Abbildung 5 - Belieferung von 250 Kunden mittels LKW, Startpunkt Kagran	16
Abbildung 6 - Belieferung von 250 Kunden mittels LKW, Startpunkt Erdberg	17
Abbildung 7 - Beispielhafte Clusterung der Kunden entlang der x-Achse	19
Abbildung 8 - Clusterung entlang der x-Achse in 3 Cluster.....	20
Abbildung 9 - Clusterung entlang der x-Achse in 4 Cluster.....	22
Abbildung 10 - Clusterung entlang der x-Achse in 5 Cluster.....	24
Abbildung 11 - Clusterung entlang der x- und y-Achse in 6 Cluster	26
Abbildung 12 - Clusterung entlang der x- und y-Achse in 8 Cluster	27
Abbildung 13 - Clusterung entlang der x- und y-Achse in 10 Cluster	28
Abbildung 14 - Clusterung entlang der x-Achse in 4 Cluster, Einbeziehung U1, U3 und U4	29
Abbildung 15 - Clusterung der Kunden in fünf Bereiche, Einbeziehung U1, U4 und U6	30
Abbildung 16 - Gegenüberstellung der Tourenlänge.....	33
Abbildung 17 - Gegenüberstellung der Kosten	33
Abbildung 18 - Gegenüberstellung der Emissionen	33
Abbildung 19 - Netzplan S-Bahn und U-Bahn Wien	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Emissionen Personenverkehrsmittel im Jahr 2019	6
Tabelle 2 - Emissionen Güterverkehrsmittel im Jahr 2019	6
Tabelle 3 - Vergleich des CO ₂ -Ausstoßes für PKW und Pedelec	7
Tabelle 4 - Emissionen unterschiedlicher Verkehrsmittel im Personenverkehr	7
Tabelle 5 - Zusammenfassung der Eckdaten betrachteter Verkehrsmittel	9
Tabelle 6 - Referenzwerte der Belieferung der Kunden mittels LKW	18
Tabelle 7 - Kosten- und Emissionsvergleich	32

1. Einleitung

Der fortlaufende Trend der Urbanisierung stellt politische Entscheidungsträger vor immer größere Herausforderungen. Städte leiden zunehmend unter dem sich ausbreitenden Autoverkehr, der teilweise der individuellen Mobilität der Anwohner und zu einem nicht unerheblichen Teil dem Güter- und Warentransport zuzuschreiben ist. Damit einher gehen Luftverschmutzung, Lärmbelästigung, Staus und Unfälle. Gleichzeitig steigt das Bewusstsein der Gesellschaft für Nachhaltigkeit sowie der Wunsch nach höherer Lebensqualität. Deshalb werden gerade im Hinblick auf die notwendigen logistischen Prozesse, die die Warenversorgung einer Stadt sicherstellen, nachhaltige bzw. umweltschonende Transportalternativen immer attraktiver (Djahel, S. et al., 2014). Besonders die Zustellung auf der letzten Meile wird als teuer und umweltschädlich beschrieben, was sich als Hindernis für die Entwicklung einer sowohl ökonomisch als auch ökologisch nachhaltigen Wirtschaft erweisen kann (Jiang et al., 2019). Ein Ansatzpunkt hiermit umzugehen, beginnt bei den Logistikprozessen, die sich in den Städten und Metropolen abspielen. So könnte die Integration der bereits vorhandenen Infrastruktur des Schienenverkehrs zu erheblichen Kosteneinsparungen führen und sich auch positiv auf die Umwelt auswirken.

Des Weiteren können neue Regulierungen und Ziele zu Einschränkungen des CO₂-Ausstoßes führen. Die Stadt Wien sieht beispielsweise im Wiener Klimapakt vor bis 2040 CO₂-neutral zu werden und so als smarte Stadt den Bewohnern eine hohe Lebensqualität zu ermöglichen. Dahingehend ist es ein Anliegen der Stadt Wien ebenfalls den Verkehr klimaverträglicher zu gestalten. Radwege und öffentliche Verkehrsmittel wie U-Bahnen und Straßenbahnen werden ausgebaut, um Autofahrten zu verringern. (Wiener Klimapakt, 2021a).

Aufgrund des wachsenden Ausbaus öffentlicher Schienenverkehrsmittel und der vermuteten Verdrängung von Kraftfahrzeugen könnte es vorteilhaft sein, U-Bahnen als Güterverkehrsmittel in Betracht zu ziehen. Allgemein gelten öffentliche Verkehrsmittel zwar als umweltneutral oder sogar umweltschonend, allerdings wurde noch nicht vollends untersucht, inwiefern sich die Einbindung von U-Bahnen in den Warengüterverkehr als umweltschonend erweist. Zwar gibt es bereits wenige praktische Versuche, wie beispielsweise die Cargo-Tram, die in Dresden als Güterstraßenbahn genutzt wurde, allerdings wurden hier kaum tiefere Untersuchungen durchgeführt (Müller-Eberstein & Franke, 2000). Elbert & Friedrich (2019) greifen in Ihrer Ausarbeitung den Schienengüterverkehr erneut auf und untersuchen die Einbindung des Schienengüterverkehrs als Transportmittel zu zentralen

Umschlagplätzen innerhalb von Städten anhand des Beispiels Darmstadt. Die Zustellung von den Umschlagpunkten zu den Endkunden wurde hier kaum berücksichtigt.

Inwiefern die Einbindung des Schienengüterverkehrs und insbesondere der U-Bahn sowie die Nutzung von Cargo-Bikes zu einer Kosten- und CO₂-Ersparnis am Beispiel der Stadt Wien führt, wurde noch nicht quantitativ untersucht. Aufgrund der steigenden Relevanz von Umweltschonung einhergehend mit Kostenersparnissen ergibt sich folgende Forschungsfrage:

„Inwiefern beeinflusst eine Einbindung von U-Bahnen und Lastenfahrrädern im City-Logistikbereich die Kosten und Emissionen bei der Belieferung von Kunden im Vergleich zur Belieferung mittels Transporter?“

So könnte mittels einer Belieferung durch die U-Bahn sowie der anschließenden letzten Meile Belieferung durch ein Cargo-Bike eine nahezu CO₂-neutrale Lieferkette geschaffen und deutlich Kosten eingespart werden. Kosten wie City-Maut Gebühren oder ähnliches können dazu beitragen, dass die Attraktivität von Fahrrädern und Schienenverkehrsmitteln steigt (Muschkiel & Schückhaus, 2019). Auch der steigende Preis für Betriebsmittel wie Diesel und Benzin, welcher unter anderem durch die kürzlich in Deutschland eingeführte CO₂-Steuer verursacht wurde, könnte preisgünstigere Alternativen attraktiver machen (Plank et al., 2021).

Zusammenfassend findet eine quantitative Analyse statt, in der anhand des Beispiels der Stadt Wien eine Belieferung von Kunden mittels Transporter untersucht wird. Dieser Wert dient als Referenzwert bzgl. Emissionen und Kosten und soll im weiteren Verlauf mit der Belieferung derselben Kunden mittels U-Bahn und von der U-Bahn-Station aus mittels Lastenfahrrad verglichen werden. Das Ergebnis zeigt, dass obwohl die Kilometeranzahl bei einer Belieferung der Kunden mittels U-Bahn und Rad zwar geringfügig höher ist als die Streckenlänge bei der Belieferung mittels LKW, die Emissionen und die Kosten deutlich geringer ausfallen. Somit bietet die Einbindung der U-Bahn eine kostengünstige und umweltschonende Alternative.

2. Literaturrecherche

Das Thema den Schienenverkehr zur Belieferung von Ware zu nutzen, ist seit einigen Jahren eine Überlegung. Bereits seit dem Jahr 2001 wurde die Cargo-Tram in Dresden dafür genutzt, um Ware für die Produktion verschiedener VW-Fahrzeuge zwischen Logistikzentrum und Produktion zu transportieren (Sächsische Zeitung, 2017). Auch in der Stadt Zürich fährt seit 2003 eine Cargo-Tram, um den Bewohnern die Entsorgung von Sperrgut ohne Auto zu erleichtern (Stadt Zürich, 2021a). Obwohl hier bereits zwei praktische Beispiele aufgeführt sind, wie der Schienenverkehr in die Distributionslogistik eingebunden werden kann, wird der Bereich der letzten Meile Zustellung an den Endkunden nicht berücksichtigt. Auch die Stadt Zürich erwähnt, dass sie aufgrund der Verdichtung der Stadt und des zunehmenden Onlinehandels nach umweltfreundlichen und lärmarmen Güterverkehrs- und Logistikkonzepten und Lösungsansätzen sucht (Stadt Zürich, 2021b).

Obwohl es keine tiefergehende Untersuchung einer Belieferung durch U-Bahnen und Lastenfahrrädern in Bezug auf Umweltauswirkungen und Kosten anhand des Beispiels Wien gibt, existieren trotzdem einige Veröffentlichungen, die sich ebenfalls mit dem innerstädtischen Schienengüterverkehr auseinandersetzen. Pietrzak, O. und Pietrzak, K. (2021) bestimmen in ihrer Ausarbeitung die Bedingungen und die Möglichkeiten für die Einführung einer Güterstraßenbahn in den städtischen Gebieten von Polen. Strale, M. (2014) erarbeitet in seiner Veröffentlichung den Stand und die Perspektive von Cargo-Trams am Beispiel der Stadt Brüssel.

2.1. Relevanz der nachhaltigen City-Logistik

Es gibt einige Punkte, die dazu beitragen alternative Lösungskonzepte für den Transport mittels LKW in Betracht zu ziehen. Diese sind einerseits umwelttechnisch zu sehen und andererseits ebenfalls auf der Kostenseite zu betrachten. Folgend ist eine Zusammenfassung der relevantesten Punkte gegeben, die die Wichtigkeit aufzeigen nach Alternativen zu suchen. Es wird der Vorteil des Einsatzes von U-Bahnen und Lastenfahrrädern im City-Logistikbereich deutlich.

Verdichtung der Stadt

Es leben derzeit über die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten oder städtischen Gebieten und laut Prognosen der Vereinten Nationen wird der Anteil bis zum Jahr 2050 auf ca. 68% ansteigen. Das heißt, es wird mehr menschliche Aktivitäten innerhalb der Städte geben (Vereinte Nationen, 2018). Hieraus geht hervor, dass mit mehr Einwohnern und

expandierenden Städten sowie erhöhten Aktivitäten innerhalb der Stadt vermutlich auch der innerstädtische Verkehr ansteigen wird.

Anstieg des Onlinehandels

Bei erhöhten Einwohnerzahlen steigt ebenfalls die Nachfrage nach Konsumgütern. Auch die Corona-Pandemie hat dazu beigetragen, dass der E-Commerce Sektor enorm gewachsen ist. Es wurden Waren, wie Elektronik oder auch Lebensmittel, vermehrt online gekauft (Bhatti, et al., 2020). Dieser enorme Anstieg im E-Commerce Sektor lässt vermuten, dass die gekaufte Ware auch zugestellt werden muss. Somit kann darauf geschlossen werden, dass ein erhöhtes Verkehrsaufkommen innerhalb der Stadt besteht, da die online gekauften Waren auch in der letzten Meile zugestellt werden müssen.

Erhöhung der Lebensqualität

Die Feinstaubbelastung durch den innerstädtischen Lieferverkehr beträgt ca. 5 bis 10% der gesamten Luftverschmutzung (Muschkiel & Schückhaus, 2019). Dadurch spielt der City-Logistikbereich bzw. die KEP-Branche (Kurier, Express, Paket) zwar nur eine untergeordnete Rolle, allerdings könnten zukünftige Regulierungen und Umstellungen des Feinstaubausstoßes die Zustellung von Paketen durch Kraftfahrzeuge deutlich erschweren, weshalb Alternativen in Betracht gezogen werden müssen.

Klimaziele

Auch Wien passt sich an die Probleme des Klimawandels an und möchte bis zum Jahr 2040 zu einer klimaneutralen Stadt werden. Hier werden u.a. auch die öffentlichen Verkehrsmittel ausgebaut und Radwege erweitert (Wiener Klimapakt, 2021b). Da dieser Umbau positive Auswirkungen auf eine City-Logistik hat, in der öffentliche Verkehrsmittel und Räder zur Belieferung verschiedener Kunden eingesetzt werden können, wird die Relevanz des Themas immer präsenter. Außerdem zeigt der Klimapakt der Stadt Wien, dass so auch der CO₂-austoßende Verkehr deutlich reduziert werden soll, weshalb Alternativen für den Einsatz von kleinen Transportern gesucht werden sollten (Wiener Klimapakt, 2021a).

Vordringen in schwer erreichbare Zonen

Des Weiteren können Beschränkungen der Lieferzeit wie beispielsweise Fahrverbote in der Nacht, an Feiertagen oder Wochenenden sowie Einschränkungen der Fahrt in Fußgängerzonen die Nutzung von U-Bahnen im City-Logistikbereich attraktiver machen. U-Bahnen in Kombination mit Lastenfahrrädern können auch in schwer zugängliche Orte vordringen, wenn

die entsprechenden U-Bahn-Stationen in der Nähe gegeben sind. So ist eine Belieferung innerhalb einer Fußgängerzone, in Parks oder auch Einbahnstraßenführungen leichter möglich (Muschkiet & Schückhaus, 2019).

Kostentreiber

Außerdem wird der Austausch von LKWs durch den Schienengüterverkehr und den Einsatz von Cargo-Bikes noch profitabler, wenn Kosten wie Gebühren oder City-Maut anfallen (Muschkiet & Schückhaus, 2019). Auch die kürzlich in Deutschland eingeführte und für Österreich vorgesehene CO₂-Steuer hat indirekte Auswirkungen auf die Benzin- und Dieselpreise, da durch die immer weiter steigenden Preise Alternativen attraktiver werden könnten (Plank et al., 2021).

Zusammenfassend ist deutlich geworden, dass der Einsatz von U-Bahnen und Rädern eine emissionsarme, kostengünstige Alternative im Vergleich zum Lastkraftwagen bieten könnte. Ob dies auch auf das Beispiel der Stadt Wien zutrifft und bei einer Einbindung des Schienengüterverkehrs auch Kosten und Emissionen gespart werden können, wird im Verlauf dieser Ausarbeitung quantitativ untersucht.

2.2. Indikator für die weitere Untersuchung

Da eine vergleichende Analyse der Belieferung von Kunden durch U-Bahnen und Lastenrädern bezogen auf die Umwelt- und Kosten-Auswirkung stattfinden soll, ist es wichtig zuerst zu identifizieren, welche Indikatoren herangezogen werden müssen. Kohlendioxid (CO₂) ist ein klimaschädliches Treibhausgas (Latif, 2009). Neben CO₂ gibt es noch weitere Treibhausgase wie Methan, Lachgas und fluorierte Treibhausgase (Rahmstorf & Schellnhuber, 2012). Zur Vereinfachung wird von den Gasen als CO₂-Äquivalente nur CO₂ erwähnt. Je mehr CO₂ in der Luft ist, desto schwieriger ist es für die Wärme der Sonneneinstrahlung wieder zu entweichen (Latif, 2009). Ein erhöhter CO₂-Anteil in der Luft bedeutet, dass die Erderwärmung steigt und somit Gletscher schmelzen und sich dadurch der Meeresspiegel erhöht. Folglich sind die ausgestoßenen CO₂-Emissionen verschiedener Verkehrsmittel ein guter Indikator für die Umweltschädlichkeit der Verkehrsmittel. Es wird weiterführend von CO₂-Äquivalenten gesprochen, um hier die Komplexität zu reduzieren.

2.2.1. Emissionen einzelner Verkehrsmittel

Bezüglich der Emissionen der eingesetzten Verkehrsmittel haben sich aus der Literatur verschiedene Werte ergeben. Bei einem Vergleich der Emissionen verschiedener Verkehrsmittel im Personenverkehr in Deutschland hat das Umweltbundesamt die Werte für das Jahr 2019 ermittelt (Umweltbundesamt, 06/2021).

Aus Tabelle 1, die die Emissionen von Verkehrsmitteln im Personenverkehr in Gramm pro Personenkilometer (g/Pkm) zeigt, geht hervor, dass sowohl die Eisenbahn als auch die U-Bahn mit einem deutlich geringeren Ausstoß von Treibhausgasen hervorstechen. Die Emissionen der U-Bahn betragen nur ca. ein Drittel der Emissionen des PKWs.

Verkehrsmittel	Treibhausgase in CO ₂ -Äquivalenten
PKW	154 g/Pkm
Flugzeug (Inlandsreisen)	214 g/Pkm
Eisenbahn im Nahverkehr	54 g/Pkm
Linienbusse im Nahverkehr	83 g/Pkm
Straßen-, Stadt- und U-Bahn	54 g/Pkm

Tabelle 1 - Emissionen Personenverkehrsmittel im Jahr 2019

Folgende Tabelle 2 zeigt die Emissionen von Güterverkehrsmitteln in Gramm pro Tonnenkilometer (g/tkm) bezogen auf das Jahr 2019 (Umweltbundesamt, 06/2021). Werden die Emissionen von Verkehrsmitteln im Güterverkehr im Bezugsjahr 2019 verglichen, fällt auf, dass der LKW mit 113g/tkm das Verkehrsmittel mit der höchsten Emission ist. Für den weiteren Verlauf der quantitativen Analyse werden die Emissionen für den Transporter mit 113g/tkm und für die U-Bahn mit 17g/tkm in CO₂-Äquivalenten angenommen.

Verkehrsmittel	Treibhausgase in CO ₂ -Äquivalenten
LKW	113g/tkm
Güterbahn	17g/tkm
Binnenschiff	30g/tkm

Tabelle 2 - Emissionen Güterverkehrsmittel im Jahr 2019

Die direkten Emissionen eines Elektro-Lastenfahrrads (Pedelec) liegen bei nahezu 0. Relevant sind hier die indirekten Emissionen, die in der Vorkette erzeugt wurden. Ein Pedelec verbraucht 0,564kg indirekte CO₂-Emissionen pro 100km (Wachotsch et al., 2014). Zur besseren Verdeutlichung vergleicht Tabelle 3 die CO₂-Emissionen pro 100km eines PKWs und eines Pedelecs.

Verkehrsmittel	Indirekte Emissionen	Direkte Emissionen	Gesamte Emissionen	Einheit
PKW (Ottomotor)	3,24	18,84	22,08	Kg/100km
PKW (Dieselmotor)	1,72	17,43	19,14	Kg/100km
Pedelec	0,564	0,00	0,564	Kg/100km

Tabelle 3 - Vergleich des CO₂-Ausstoßes für PKW und Pedelec

Werden die Emissionen von unterschiedlichen Verkehrsmitteln im Personenverkehr betrachtet, kommen folgende Werte in CO₂-Äquivalenten in Tabelle 4 heraus (Umweltbundesamt, 06/2021):

Verkehrsmittel	Treibhausgase in CO ₂ -Äquivalenten
PKW	154 g/Pkm
Flugzeug, Inland	214 g/Pkm
Straßen-, Stadt- und U-Bahn	54 g/Pkm

Tabelle 4 - Emissionen unterschiedlicher Verkehrsmittel im Personenverkehr

Aus Tabelle 4 geht deutlich hervor, dass die U-Bahn nur ca. ein Drittel der Emissionen eines PKWs verursacht. Das Flugzeug ist angeführt, da es die höchsten Emissionen verursacht. Dieses wird nicht näher betrachtet und dient lediglich einer besseren Einordnung der Höhe der Emissionen von PKW und U-Bahn. Die Emissionen sind in CO₂-Äquivalenten angegeben, welche sich wie bereits erwähnt u.a. aus CO₂, CH₄ und N₂O zusammensetzen. Da hier die Betrachtung in Gramm pro Personenkilometer stattfindet, werden diese Werte nicht für die weitere Analyse verwendet. Für den weiteren Verlauf werden die Angaben in Gramm pro Tonnenkilometer betrachtet, da Päckchen zugestellt werden.

Aufgrund des geringen Anteils an Emissionen, werden die U-Bahn und das Lastenfahrrad vermutlich bei Einbindung in den innerstädtischen Güterverkehr eine umweltschonende Alternative zum LKW darstellen.

2.2.2. Kosten einzelner Verkehrsmittel

Im folgenden Abschnitt werden die Kosten für den Transport von Päckchen für die Verkehrsmittel hergeleitet. Betrachtet wird die Belieferung durch einen kleinen Transporter, durch die U-Bahn sowie durch ein Lastenfahrrad bzw. Cargo-Bike. Bei den Werten handelt es sich um verschiedene Schätzungen, die natürlich je nach Modell variieren können.

Transporter: Die Kosten für einen Liter Diesel betragen 1,398 EUR zum Standpunkt Mitte Oktober 2021 (WKO, 2021). In der Stadt verbrauchen kleine Lastkraftwagen ca. 5,9 Liter auf

100 Kilometer. Dies ergibt einen Preis von 8,20€ auf 100km. Neben den Spritkosten fallen auch andere Kostenpositionen wie zum Beispiel Steuern, Versicherung und vor allem Wartung mit an, was im Schnitt zu Kosten von rund **42 Cent** pro km führt (Carwiki, 2021).

Lastenrad: Der Stromverbrauch des Lastenfahrads kann mit 34€ pro Jahr auf 15.000km gerechnet werden (Fahrrad XXL, 2021). Der Kilometerpreis eines Lastenrads liegt im Schnitt bei ca. **17,3 Cent** pro Kilometer mit Berücksichtigung wie beispielsweise Wartung und Versicherung (Lastenrad VCD, 2021).

U-Bahn: Die U-Bahnen in Wien werden mit Strom angetrieben. Hier wird laut Aussage der Wiener Linien 100% CO₂-neutraler Strom aus erneuerbarer Energie aus Österreich genutzt (Wiener Linien, 2021). Da es keine genauen Angaben der Wiener Linien gibt was ein Kilometer U-Bahn kostet, wird angenommen, dass sich die Kosten genau in der Mitte der durchschnittlichen Kosten von LKW und Lastenfahrzeug befinden. Somit wird zur Vereinfachung angenommen, dass ein Kilometer U-Bahn im Schnitt **29,65 Cent** kostet.

Aufgrund der geringen Kosten werden die U-Bahn und das Lastenfahrzeug vermutlich bei Einbindung in den innerstädtischen Güterverkehr eine kostengünstige Alternative zum LKW darstellen.

2.2.3. Fassungsvermögen einzelner Verkehrsmittel

Ein Kastenwagen besitzt ein Fassungsvermögen von ca. 4,2 - 4,7 Kubikmetern weshalb hier angenommen werden kann, dass mit einer Paketlänge von 45cm ca. 50 Pakete mit einem Fahrzeug ausgefahren werden können (VW Caddy Nutzfahrzeuge, 2021).

Lastenfahräder haben ein Fassungsvermögen von mindestens 1 Kubikmeter, weshalb im Schnitt 10-15 Pakete ausgeliefert werden können. Es wird angenommen, dass ein Lastenfahrzeug im Stande ist, 15 Pakete in einer Route auszuliefern (Cargobike, 2018). Die Reichweite eines E-Bikes beträgt ca. 50-100km je nach Fahrweise und Beladung. Somit stellt sich die Reichweite nicht als limitierender Faktor heraus, da max. 15 Kunden, die alle im nahen Umfeld liegen, beliefert werden (E-Lastenfahrzeug, 2021).

Da die U-Bahn mehrere Abteile besitzt, hat sie ein großes Fassungsvermögen. Im Beispiel werden 250 Kunden beliefert. Weil die U-Bahn mehr als 250 Päckchen auf einer Route aufnehmen kann, kann für dieses Beispiel ohne Kapazitätsbeschränkungen gerechnet werden.

Für die quantitative Analyse werden die folgenden Kosten und Emissionen für diese drei Verkehrsmittel angenommen. Zusammenfassend zeigt nachfolgende Tabelle 5 alle Werte gesammelt, um diese für den späteren Vergleich nutzen zu können.

Verkehrsmittel	Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten	Kosten pro km	Kapazitätsbeschränkung pro Route
Transporter	113g/tkm	0,42€/km	50 Päckchen
U-Bahn	17g/tkm	0,2965€/km	>250 Päckchen
Lastenfahrrad	0g/tkm	0,173€/km	15 Päckchen

Tabelle 5 - Zusammenfassung der Eckdaten betrachteter Verkehrsmittel

Im weiteren Verlauf wird der genaue Versuchsaufbau geschildert.

3. Problembeschreibung

3.1. Versuchsaufbau

Um die Fragestellung zu beantworten inwiefern eine Belieferung mittels der Einbindung der U-Bahn kostengünstiger und umweltschonender ist, wurden zwei unterschiedliche Modelle in Visual Studio in C++ implementiert. Es wurden 250 zufällig generierte Kunden in Wien erzeugt, die einerseits mittels Transporter und andererseits mittels U-Bahn in Wien und Lastenfahrrad beliefert werden.

Das Wiener U-Bahn-Netz wurde mittels Koordinaten schematisch abgebildet. So wurden die Koordinaten der U-Bahn-Stationen wie in Anhang B zu finden übertragen.

Der durchschnittliche Abstand zwischen den Stationen beträgt ca. 760 Meter, wobei die Linie U3 mit 13,402km Gesamtlänge einen durchschnittlichen Stationsabstand von 638,2m aufweist (Wiener Linien, 2019). Im Ergebnisteil wird die Tour-Länge in Kilometern angegeben, um eine leichte Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

In folgender Abbildung 1 findet sich die übertragene Abbildung des U-Bahn-Netzes aus Anhang B, in der bereits 250 zufällig erzeugte Kunden als blaue Punkte zu sehen sind. Die U-Bahn-Linien U1, U2, U3, U4 und U6 sind schematisch abgebildet. Die vier schwarzen Vierecke zeigen U-Bahn-Stationen (Hütteldorf, Heiligenstadt, Kagran, Erdberg) am Rand von Wien, welche als Hubs dienen könnten. Diese Hubs werden vorab beliefert und dienen als Ausgangsort für Transporter und U-Bahn. Wie die Belieferung des einzelnen Hubs erfolgt, wird in dieser Arbeit vernachlässigt, da es sich dabei nicht mehr um den City-Logistikbereich handelt. Die Belieferung der 250 innerstädtischen Kunden mittels LKW bzw. Transporter dient als Referenzwert. Der Transporter startet von einem Hub aus und beliefert alle 250 Kunden. Die Routenbildung erfolgt mittels Savings-Algorithmus, welcher im anschließenden Kapitel 3.2 *Der Savings-Algorithmus* genauer erläutert ist. Die Kapazitätsbeschränkung beträgt 50 Päckchen und somit 50 Kunden pro Route.

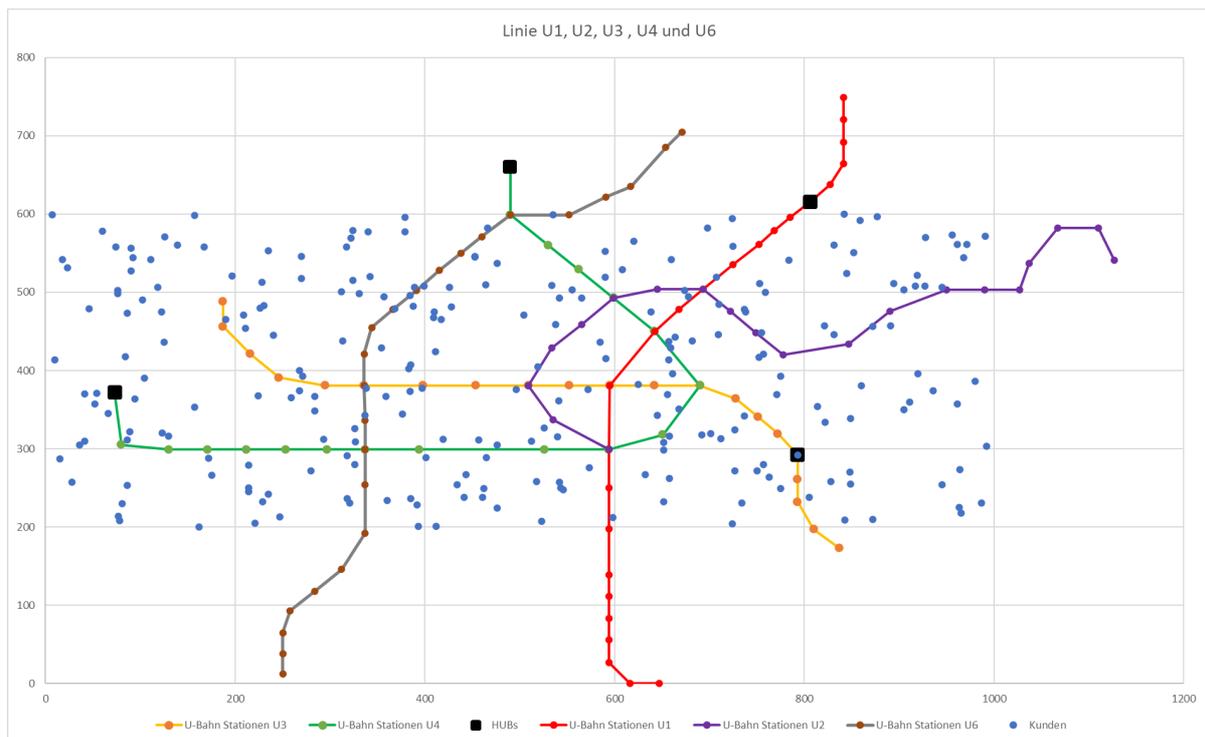


Abbildung 1 - Ausgangsbasis mit 250 Kunden, U-Bahn-Linien und Hubs in Wien

Es gilt den Referenzwert, der durch die Belieferung mittels Transporter entstanden ist, hinsichtlich Kosten und Emissionen zu verbessern, indem die U-Bahn und das Lastenfahrrad eingebunden werden. Hierfür wurde im Folgenden der Fokus auf die U-Bahn-Linie U3 gelegt, da diese sehr horizontal durch Wien verläuft. Eine Einbindung mehrerer U-Bahn-Linien folgt ebenfalls im weiteren Vergleich.

Die 250 Kunden wurden in verschiedene Cluster geteilt, wobei pro Cluster eine U-Bahn-Station zugeordnet wurde. Diese ist immer die erste Station entlang der x-Achse im jeweiligen Cluster. Anschließend wurden die Kunden, die sich im jeweiligen Cluster befinden von der dazugehörigen U-Bahn-Station aus beliefert. Die Kunden wurden in drei, vier und fünf Einheiten entlang der x-Achse eingeteilt und für eine weitere Untersuchung nochmals horizontal gruppiert.

3.2. Der Savings-Algorithmus

Als Referenzwert dient eine Belieferung mittels LKW. Es werden zufällig generierte Kunden in Wien beliefert. Der LKW startet von einem Hub außerhalb von Wien und fährt die Kunden auf Routen ab, die Mittels des Savings-Algorithmus von Clarke & Wright (1964) erstellt werden. Da es der Savings-Algorithmus ermöglicht, mehrere Routen zu bilden, ist dieser bei einer Belieferung von mehreren Kunden mit Kapazitätsbeschränkung passend (Paessens, 1988). Die Routenbildung zur Belieferung der Kunden mit dem Lastenfahrrad erfolgt ebenfalls mithilfe des Savings-Algorithmus. Als Depot dient die jeweils ausgewählte U-Bahn-Station. Wie die Station ausgewählt wird, wird im späteren Verlauf deutlich. Der Savings-Algorithmus ist ein heuristischer Algorithmus, weshalb die optimale Lösung des Routen-Problems nicht mit Sicherheit ausgegeben werden kann, sondern eher eine Vielzahl von guten Lösungen geliefert wird. In folgender Abbildung 2 ist das Konzept des Savings illustriert:

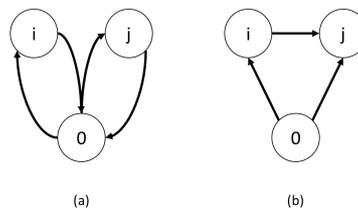


Abbildung 2 - Illustration des Savings-Konzepts (selbst erstellt in Anlehnung an Pichpibul & Kawtummachai, 2012)

In Figur (a) werden die Kunden i und j in zwei separaten Touren von dem Depot 0 aus besucht. Alternativ können die beiden Kunden auch in der Reihenfolge i-j in einer Tour besucht werden, wie in Figur (b) zu sehen ist. Da die Transportkosten (die Streckenlänge) feststehen, kann der Savings-Wert bzw. die Ersparnis errechnet werden, wenn statt zwei Touren wie in Figur (a) nur eine Tour wie in Figur (b) gefahren wird. Die Transport-Kosten für den Weg zwischen Punkt i und j werden mit c_{ij} bezeichnet. Die gesamten Transportkosten D_a in Figur (a) sind:

$$D_a = c_{0i} + c_{i0} + c_{0j} + c_{j0}$$

Damit sind die Kosten in Figur (b) äquivalent:

$$D_b = c_{0i} + c_{ij} + c_{j0}$$

Werden die beiden Routen kombiniert, erhält man die Ersparnis oder das Savings S_{ij} :

$$S_{ij} = D_a - D_b = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$$

Hohe Werte von S_{ij} zeigen, dass es sich in Bezug auf die Kosten lohnt, i und j in einer Tour sowie in der Reihenfolge i-j zu besuchen (Pichpibul & Kawtummachai, 2012). Als Zielfunktion soll die Tourenlänge und somit die gefahrenen Kilometer reduziert werden, welche hier gleich mit den Transportkosten zu verstehen sind.

4. Ergebnisse

Es zeigt sich, dass der LKW zwar weniger Kilometer fährt, allerdings höhere Kosten und Emissionen verursacht.

4.1. Referenzwert

Es wird angenommen, dass ein LKW bzw. kleiner Transporter vom Hub aus in Luftlinie starten kann und die Kunden mittels Savings-Algorithmus abfährt. Die Hubs sind an U-Bahn-Stationen am äußeren Rand von Wien positioniert. Vereinfacht wird angenommen, dass die Kunden einen Bedarf von 1 haben und ein Päckchen 1kg wiegt. Es wurden jeweils die vier Hubs als Depots ausprobiert. Als finaler Referenzwert dient der Startpunkt Erdberg, da in der weiteren Bearbeitung ein starker Fokus auf die U-Bahn-Linie U3 gelegt wird. Da der Transporter nur ein gewisses Fassungsvermögen hat, ist die Kapazitätsgrenze auf 50 gesetzt. Ein Kastenwagen besitzt ein Fassungsvermögen von ca. 4,2 - 4,7 Kubikmetern, weshalb hier angenommen werden kann, dass mit einer Paketlänge von 45 cm ungefähr 50 Pakete mit einem Fahrzeug ausgefahren werden können (VW Caddy Nutzfahrzeuge, 2021).

Da von einer schematischen Abbildung der U-Bahn ausgegangen wird, entsprechen die Kilometer-Angaben nicht 1:1 der Realität und dienen lediglich zur besseren Orientierung und Einordnung der Tourenlänge.

Hütteldorf:

Eine Belieferung von 250 Kunden mit einer Kapazitätsbeschränkung von 50 Kunden pro Route gestartet von **Hütteldorf** mit dem Savings-Algorithmus ergibt folgende Abbildung 3. Die Tourlänge entspricht ca. 171,06km.

Die Emissionen belaufen sich auf ca. 456g CO₂-Äquivalente. Da hier der Transporter die fünf Routen mit jeweils 50 Paketen startet und pro Kunde ein Paket entlädt, werden hier die Emissionen in Tonnenkilometern mit dem jeweiligen Kantengewicht berücksichtigt.

Die Kosten belaufen sich auf $171,06\text{km} * 0,42\text{€/km} = 71,84\text{€}$.

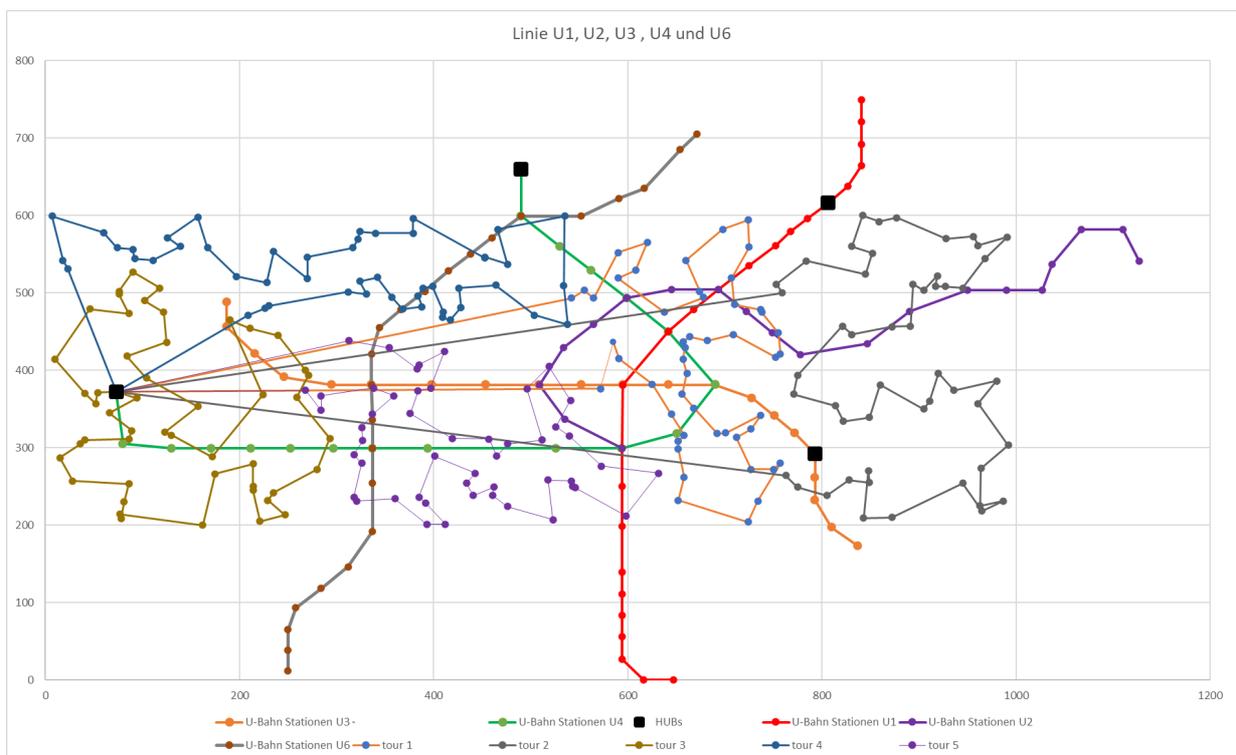


Abbildung 3 - Belieferung von 250 Kunden mittels LKW, Startpunkt Hütteldorf (selbst erstellt)

Heiligenstadt:

Eine Belieferung von 250 Kunden mit einer Kapazitätsbeschränkung von 50 Kunden pro Route gestartet von **Heiligenstadt** mit dem Savings-Algorithmus ergibt nachfolgende Abbildung 4. Die Tour-Länge beträgt ca. 181,02km.

Die Emissionen belaufen sich auf ca. 521,6g CO₂-Äquivalente. Da hier der Transporter die fünf Routen mit jeweils 50 Paketen startet und pro Kunden ein Paket entlädt, werden hier die Emissionen in Tonnenkilometern mit dem jeweiligen Kantengewicht berücksichtigt.

Die Kosten belaufen sich auf $181,02\text{km} * 0,42\text{€/km} = 76,03\text{€}$.

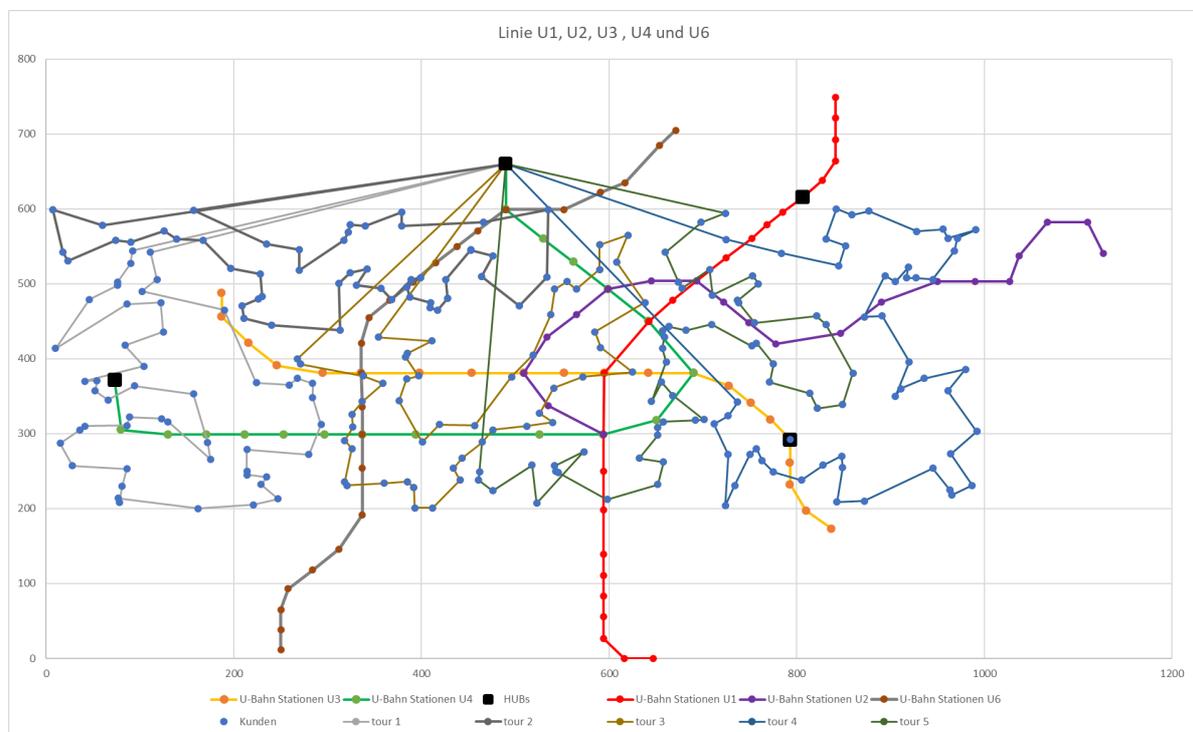


Abbildung 4 - Belieferung von 250 Kunden mittels LKW, Startpunkt Heiligenstadt (selbst erstellt)

Kagran:

Eine Belieferung von 250 Kunden mit einer Kapazitätsbeschränkung von 50 Kunden pro Route gestartet von **Kagran** mit dem Savings-Algorithmus ergibt folgende Abbildung 5. Die Tour-Länge beträgt ca. 172,17km.

Die Emissionen belaufen sich auf ca. 459,1g CO₂-Äquivalente. Da hier der Transporter die fünf Routen mit jeweils 50 Paketen startet und pro Kunden ein Paket entlädt, werden hier die Emissionen in Tonnenkilometern mit dem jeweiligen Kantengewicht berücksichtigt.

Die Kosten belaufen sich auf $172,17\text{km} * 0,42\text{€/km} = 72,31\text{€}$.

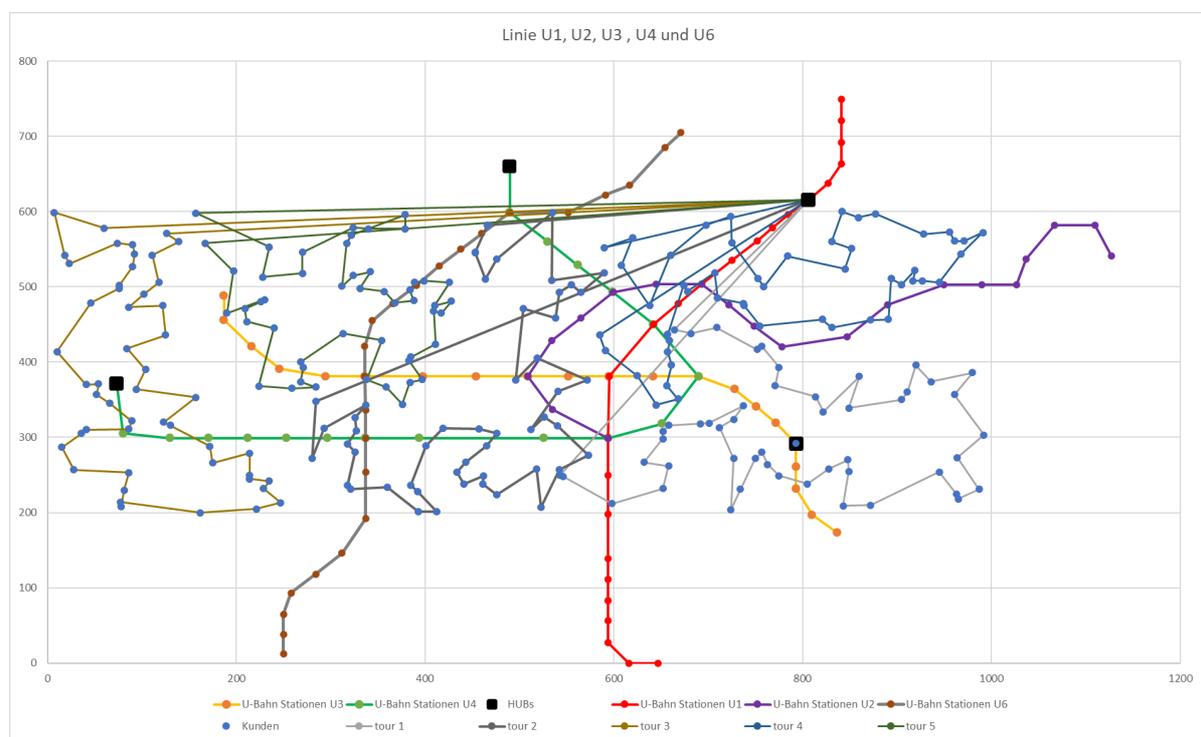


Abbildung 5 - Belieferung von 250 Kunden mittels LKW, Startpunkt Kagran (selbst erstellt)

Erdberg:

Eine Belieferung von 250 Kunden mit einer Kapazitätsbeschränkung von 50 Kunden pro Route gestartet von **Erdberg** mit dem Savings-Algorithmus ergibt folgende Abbildung 6. Die Tourlänge beträgt ca. 172,4km.

Die Emissionen belaufen sich auf ca. 497g CO₂-Äquivalente. Hierbei wurde das Kantengewicht berücksichtigt und die Tonnenkilometer mit jedem abgegebenen Päckchen reduziert. Beispielsweise fährt der Transporter in der ersten Route 50 Kunden auf einer Strecke von 45km ab. Vom Depot zum ersten Kunden fährt der LKW mit 50 Päckchen einen knappen Kilometer, danach vom ersten Kunden zum zweiten Kunden mit 49 Päckchen wieder einen knappen Kilometer. Dies passiert so lange bis alle Kunden beliefert wurden. Danach startet Route 2 mit ca. 32km. So entstehen die gesamten Emissionen von rund 497g CO₂-Äquivalente.

Die Kosten belaufen sich auf $172,4\text{km} * 0,42\text{€/km} = 72,46\text{€}$.

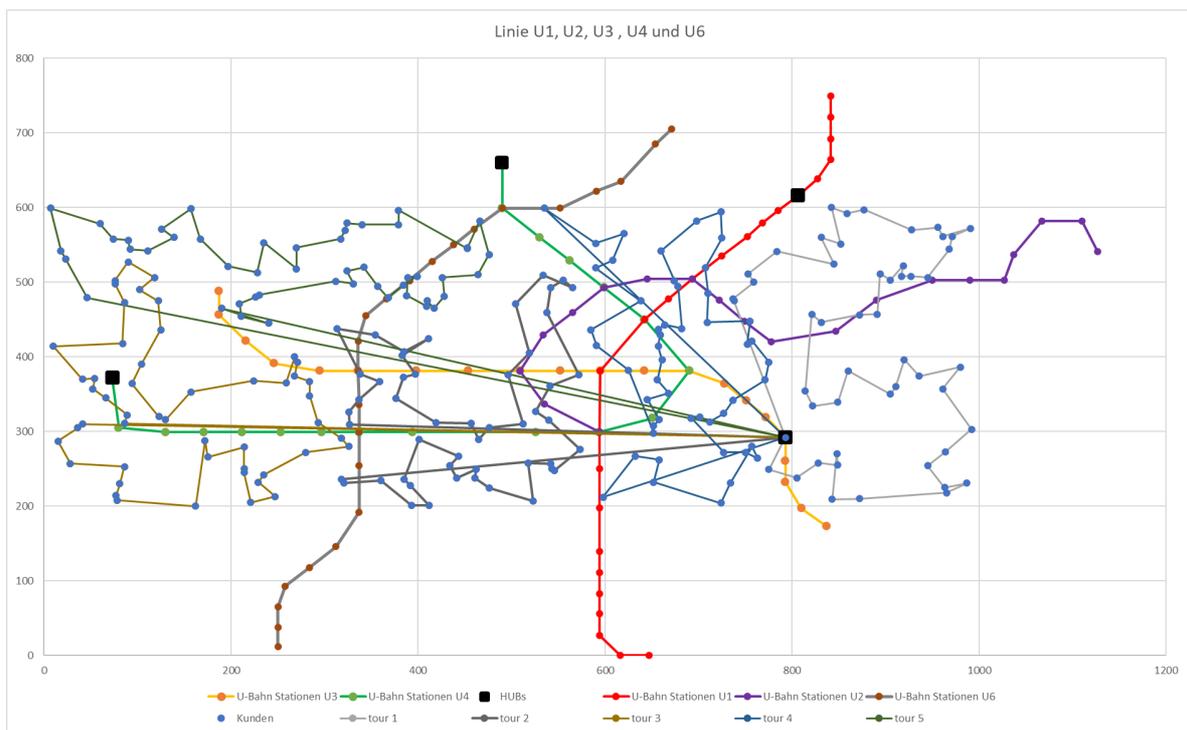


Abbildung 6 - Belieferung von 250 Kunden mittels LKW, Startpunkt Erdberg (selbst erstellt)

In folgender Tabelle 6 sind die Routen beginnend bei den vier unterschiedlichen Hubs vergleichend dargestellt. Die Tourenlängen betragen bei allen Startpunkten zwischen 172 - 182km. Die Emissionen belaufen sich alle auf 450-520g und die Kosten auf rund 72€.

Hubs:	Tourenlänge	Emissionen in CO ₂ -Äquivalenten	Kosten
Erdberg	172,54km	ca. 497g	72,46€
Hütteldorf	171,06km	ca. 456g	71,84€
Heiligenstadt	181,02km	ca. 521,6g	76,03€
Kagran	172,17km	ca. 459,1g	72,31€

Tabelle 6 - Referenzwerte der Belieferung der Kunden mittels LKW

Da sich die Werte nur unwesentlich voneinander unterscheiden, wird der Start-Hub Erdberg ausgewählt. Dies ist von Vorteil, da im späteren Verlauf die U-Bahn-Linie U3 aufgrund des horizontalen Verlaufs durch Wien im Mittelpunkt der Betrachtung steht. Der Startpunkt in Erdberg ermöglicht eine gute Vergleichbarkeit mit der Auslieferung via U-Bahn und Lastenfahrrad.

Folgend gilt es, den Wert von Erdberg mit **~172km** Tourenlänge, **~72€** Kosten und **~500g** Emissionen zu verbessern. Ob eine Reduzierung der Kosten sowie verminderte Emissionen durch den Einsatz anderer Verkehrsmittel möglich ist, wird folgend überprüft.

Des Weiteren ist anzumerken, dass auch eine Untersuchung der vier Hubs als Multi-Depot Model (MDVRP) möglich wäre. Da jedoch der Hub Erdberg eine gute Vergleichsmöglichkeit der Belieferung der Kunden einerseits mittels Transporter und andererseits mittels U-Bahn und Lastenfahrrad darstellt, wurde die Methode mit nur einem Single Depot gewählt.

4.2. Der Einsatz von U-Bahn und Lastenfahrrad

Da die U-Bahn-Linie U3 sehr horizontal durch Wien verläuft, wird der Hauptfokus auf diese Linie gelegt. Im späteren Kapitel 4.3 *Einbindung aller U-Bahn-Linien* wird kurz erwähnt inwiefern sich der Wert verschlechtert, wenn mit der gewählten Vorgehensweise alle U-Bahn-Stationen berücksichtigt werden. Lastenfahrräder haben ein Fassungsvermögen von mindestens 1 Kubikmeter, weshalb im Schnitt 10 - 15 Pakete ausgeliefert werden können. Es wird angenommen, dass ein Lastenfahrrad im Stande ist, 15 Pakete in einer Route auszuliefern (Cargobike, 2018).

4.2.1. Clusterung an der x-Achse

Es erfolgt eine Clusterung der Kunden an der x-Achse. Hierfür wird die Anzahl der Cluster gewählt und die Kunden dem Cluster zugeordnet. Es wird eine Clusterliste mit allen ermittelten Clustern erstellt, welche die Kunden als Liste pro Cluster enthält. Vereinfacht ist dies in Abbildung 7 dargestellt, in der 250 Kunden in 4 Cluster eingeteilt werden. Da jedes Cluster eine unterschiedliche Anzahl an Kunden enthält und ein Lastenrad nur eine beschränkte Kapazität in Höhe von 15 Päckchen aufweist, findet die Belieferung der Kunden mithilfe des Savings-Algorithmus statt. Die Ermittlung der U-Bahn-Station im jeweiligen Cluster erfolgt ebenfalls nach der Einteilung entlang der x-Achse. Es wird von links nach rechts die erste U-Bahn-Station ausgewählt, die im entsprechenden Cluster erscheint.

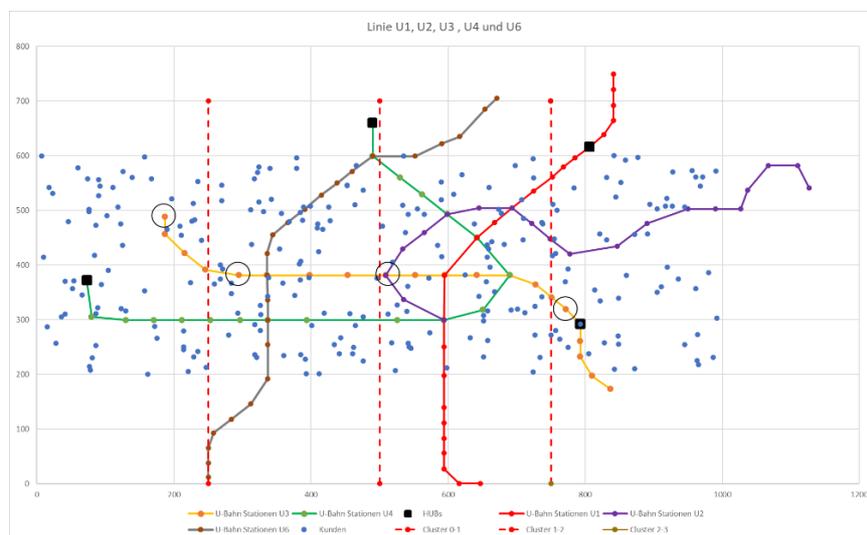


Abbildung 7 - Beispielhafte Clusterung der Kunden entlang der x-Achse

Folgend werden die Kunden in drei, vier und fünf Cluster geteilt. Des Weiteren wird untersucht, ob es die Tourenlänge reduziert, wenn die Kunden weiterhin in drei, vier und fünf Cluster eingeteilt werden, allerdings vorab in Bereiche oberhalb und unterhalb einer horizontalen Linie zugeordnet werden.

4.2.1.1. Clusterung in drei Cluster

Folgende Abbildung 8 zeigt die Belieferung der 250 Kunden eingeteilt in **drei** Cluster mit einer Kapazitätsbeschränkung von max. 15 Kunden pro Route. Für jedes Cluster wurde eine U-Bahn-Station entlang der x-Achse ausgewählt. Es ist die erste U-Bahn-Station, die im Cluster erscheint. Folgende drei U-Bahn-Stationen wurden gewählt:

- Station für Cluster 1: Ottakring
- Station für Cluster 2: Westbahnhof
- Station für Cluster 3: Landstraße/Wien Mitte

Je nachdem wie viele Kunden anhand ihrer Koordinaten einem Cluster zugeordnet wurden, fährt das Lastenrad von der ausgewählten Station zwischen fünf und sechs Routen die Kunden ab. Die Routen wurden ebenfalls mittels Savings-Algorithmus erstellt.

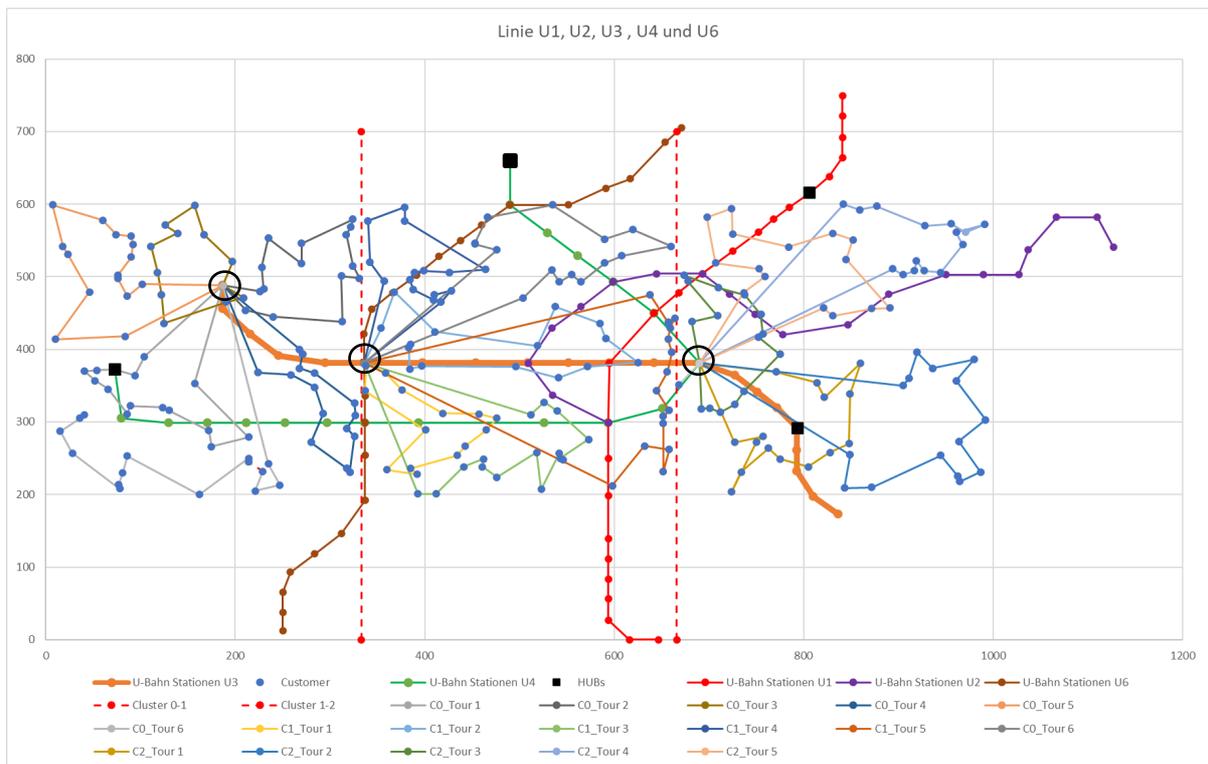


Abbildung 8 - Clusterung entlang der x-Achse in 3 Cluster (selbst erstellt)

Die Einteilung in drei Cluster ergibt eine Tourenlänge von ca. 191,29km. Hinzu kommt ebenfalls die Strecke der U-Bahn. Diese fährt voll beladen von Erdberg nach Ottakring mit einer Tourenlänge von 12,75km. Dies ergibt eine Gesamtlänge von 204,04km.

In Erdberg startet die U-Bahn mit 250 Päckchen und fährt 2,55km bis nach Wien Mitte (Emissionen von $2,55\text{km} * 0,25\text{t} * 17\text{g/tkm} = 10,84\text{g}$). Hier werden 77 Pakete entladen. Danach fährt die U-Bahn mit 173 Paketen weitere 4,47km bis zum Westbahnhof (Emissionen von

$4,47\text{km} * 0,173\text{t} * 17\text{g/tkm} = 13,14\text{g}$). Die letzten 3,19km bis nach Ottakring verursachen mit 84 Paketen 4,56g Emissionen ($3,19\text{km} * 0,084\text{t} * 17\text{g/tkm}$). Die Strecke verursacht Gesamtemissionen von **28,54g** CO₂-Äquivalenten.

Die Kosten belaufen sich auf 3,78€ für die U-Bahn und 33,09€ für das Lastenfahrrad. Gesamtkosten in der Höhe von **36,87€** fallen an.

4.2.1.2. Clusterung in vier Cluster

Folgende Abbildung 9 zeigt die Belieferung der 250 Kunden eingeteilt in **vier** Cluster mit einer Kapazitätsbeschränkung von max. 15 Kunden pro Route. Für jedes Cluster wurde die erste U-Bahn-Station entlang der x-Achse im Cluster ausgewählt. Folgende vier U-Bahn-Stationen wurden gewählt:

- Station für Cluster 1: Ottakring
- Station für Cluster 2: Schweglerstraße
- Station für Cluster 3: Volkstheater
- Station für Cluster 4: Schlachthausgasse

Je nachdem wie viele Kunden anhand ihrer Koordinaten einem Cluster zugeordnet wurden, fährt das Lastenrad von der ausgewählten Station zwischen vier und fünf Routen die Kunden ab. Die Routen wurden ebenfalls mittels Savings-Algorithmus erstellt.

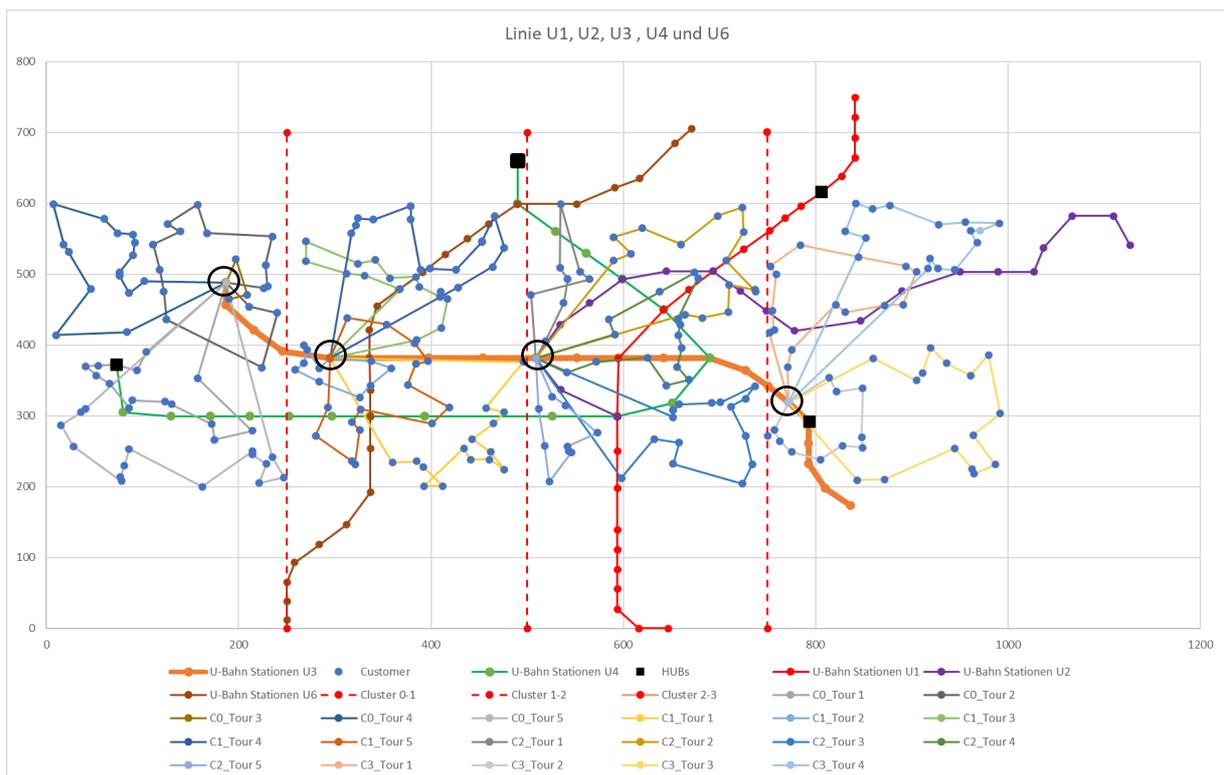


Abbildung 9 - Clusterung entlang der x-Achse in 4 Cluster (selbst erstellt)

Die Einteilung in vier Cluster ergibt eine Tourenlänge von ca. 181,17km. Hinzu kommt ebenfalls die Strecke der U-Bahn. Diese fährt voll beladen von Erdberg nach Ottakring mit einer Tourenlänge von 12,75km. Dies ergibt eine Gesamtlänge von 193,92km.

Da das Lastenfahrrad keine direkten Emissionen verursacht, werden nur die Emissionen der U-Bahn berücksichtigt. In Erdberg startet die U-Bahn mit 250 Päckchen und fährt 0,64km bis zur Schlachthausgasse (Emissionen von $0,64\text{km} * 0,25\text{t} * 17\text{g}/\text{tkm} = 2,72\text{g}$). Hier werden 55 Pakete entladen. Danach fährt die U-Bahn mit 195 Paketen weitere 4,47 km bis zum Volkstheater (Emissionen von $4,47\text{km} * 0,195\text{t} * 17\text{g}/\text{tkm} = 14,82\text{g}$). Es werden 62 Pakete entladen. Die U-Bahn fährt mit 133 Paketen weitere 2,55 km bis zur Schweglerstraße (Emissionen von $2,55\text{km} * 0,133\text{t} * 17\text{g}/\text{tkm} = 5,77\text{g}$). Die letzten 2,55km bis nach Ottakring verursachen mit 63 Paketen 2,7g Emissionen ($2,55\text{km} * 0,063\text{t} * 17\text{g}/\text{tkm}$). Die Strecke verursacht Gesamt-Emissionen von **26,04g** CO₂-Äquivalenten.

Die Kosten belaufen sich auf 3,78€ für die U-Bahn und 31,34€ für das Lastenfahrrad. Gesamtkosten in der Höhe von **35,12€** fallen an.

4.2.1.3. Clusterung in fünf Cluster

Folgende Abbildung 10 zeigt die Belieferung der 250 Kunden eingeteilt in **fünf** Cluster mit einer Kapazitätsbeschränkung von max. 15 Kunden pro Route. Für jedes Cluster wurde die erste U-Bahn-Station entlang der x-Achse im Cluster ausgewählt. Folgende fünf U-Bahn-Stationen wurden gewählt:

- Station für Cluster 1: Ottakring
- Station für Cluster 2: Hütteldorfer Straße
- Station für Cluster 3: Neubaugasse
- Station für Cluster 4: Stubentor
- Station für Cluster 5: Enkplatz

Je nachdem wie viele Kunden anhand ihrer Koordinaten einem Cluster zugeordnet wurden, fährt das Lastenrad von der ausgewählten Station zwischen fünf und sechs Routen die Kunden ab. Die Routen wurden ebenfalls mittels Savings-Algorithmus erstellt.

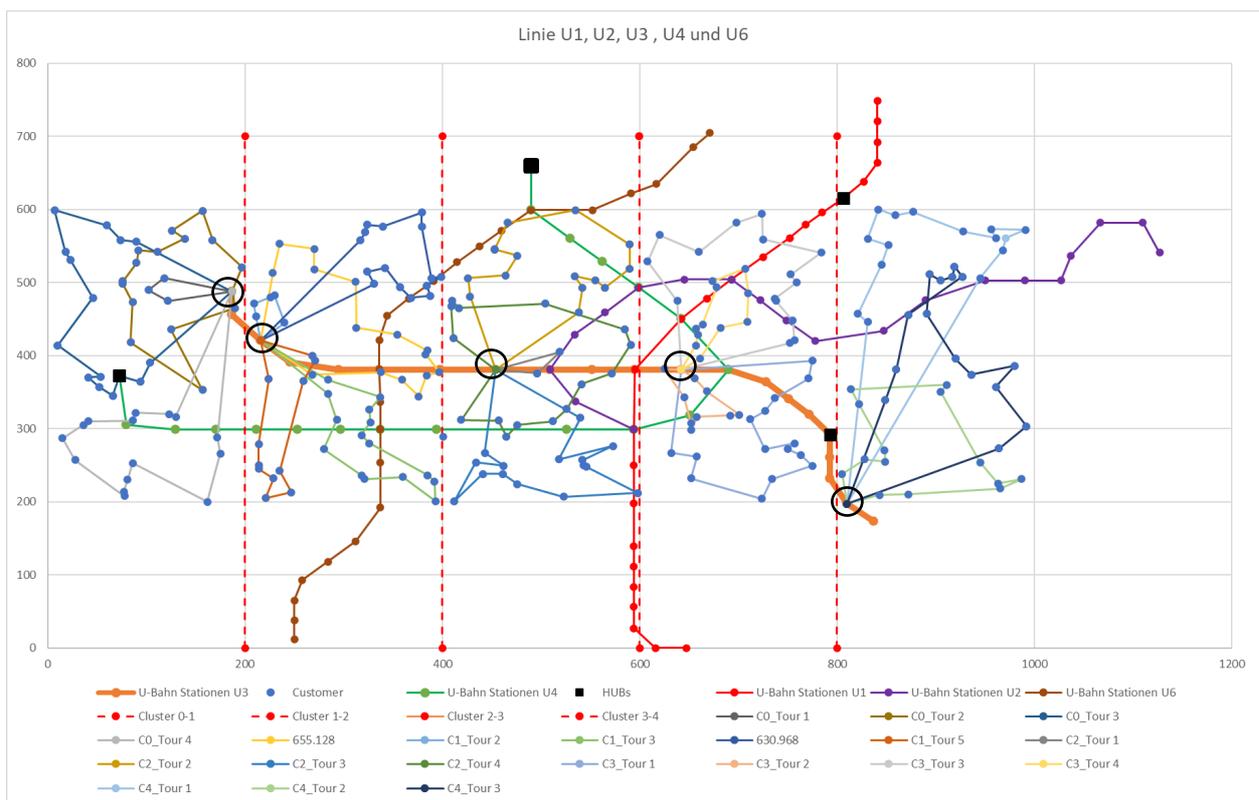


Abbildung 10 - Clusterung entlang der x-Achse in 5 Cluster (selbst erstellt)

Die Einteilung in fünf Cluster ergibt eine Tourenlänge von ca. 179,44km. Hinzu kommt ebenfalls die Strecke der U-Bahn. Diese fährt voll beladen von Erdberg nach Ottakring mit einer Tourenlänge von 12,75km. Dies ergibt eine Gesamtlänge von 192,18km.

Die U-Bahn fährt 1,91km von Erdberg zum Enkplatz mit 44 Paketen (0,89g Emissionen). Des Weiteren fährt die nächste U-Bahn von Erdberg mit 206 Paketen zum Stubentor (11,17g Emissionen). Die Strecke vom Stubentor bis zur Neubaugasse mit 156 Paketen verursacht 6,76g Emissionen und die Strecke von der Neubaugasse bis zur Hütteldorfer Straße mit 109 Paketen verursacht Emissionen in der Höhe von 5,91g. Die letzten 48 Kunden werden in Ottakring beliefert. Auf der letzten Strecke werden 1,05g Emissionen ausgestoßen. Dies verursacht Gesamt-Emissionen von **24,73g** CO₂-Äquivalenten.

Die Kosten belaufen sich auf 3,78€ für die U-Bahn und 31,04€ für das Lastenfahrrad. Gesamtkosten in der Höhe von **34,82€** fallen an.

Bereits vorweggenommen, handelt es sich von allen untersuchten Clusterungen bei der Einteilung in lediglich fünf Cluster an der x-Achse um die geringste Gesamtlänge mit 192,18km. Eine weitere Unterteilung in bspw. sechs Cluster ist nicht vorgesehen, da dann nicht in jedem Cluster eine U-Bahn-Station der Linie U3 gegeben ist. Somit endet die Unterteilung der Kunden bei fünf Bereichen entlang der x-Achse.

4.2.2. Clusterung an der x- und y-Achse

Um herauszufinden, inwiefern sich der Wert verändert, wenn die Kunden vorab noch feiner geclustert werden, wurden die drei, vier und fünf Cluster nochmals vertikal geteilt. Die U-Bahn-Station pro Cluster ist die gleiche geblieben, allerdings wurden die Kunden pro Cluster einmal oberhalb der vertikalen Einteilung und unterhalb der vertikalen Einteilung vor der Routenbildung zusammengefasst. Die Routenbildung erfolgte dann für den oberen und den unteren Bereich separat.

4.2.2.1. Clusterung in sechs Cluster

In der Abbildung 11 sind die 250 Kunden sowohl an der x-Achse in drei Cluster als auch horizontal an der y-Achse in zwei Cluster aufgeteilt mit einer Kapazitätsbeschränkung von max. 15 Kunden pro Route. Pro Cluster werden drei Routen gebildet. Dies ergibt eine gesamte Tourenlänge von ca. 192,44km. Hinzu kommt ebenfalls die Strecke der U-Bahn. Diese fährt voll beladen von Erdberg nach Ottakring mit einer Tourenlänge von 12,75km. Dies ergibt eine Gesamtlänge von 205,19km.

Die Kosten belaufen sich auf 37,07€. Die Emissionen betragen 28,54g, da hier gleich viele Emissionen ausgestoßen werden wie bei einer Einteilung in drei Cluster.

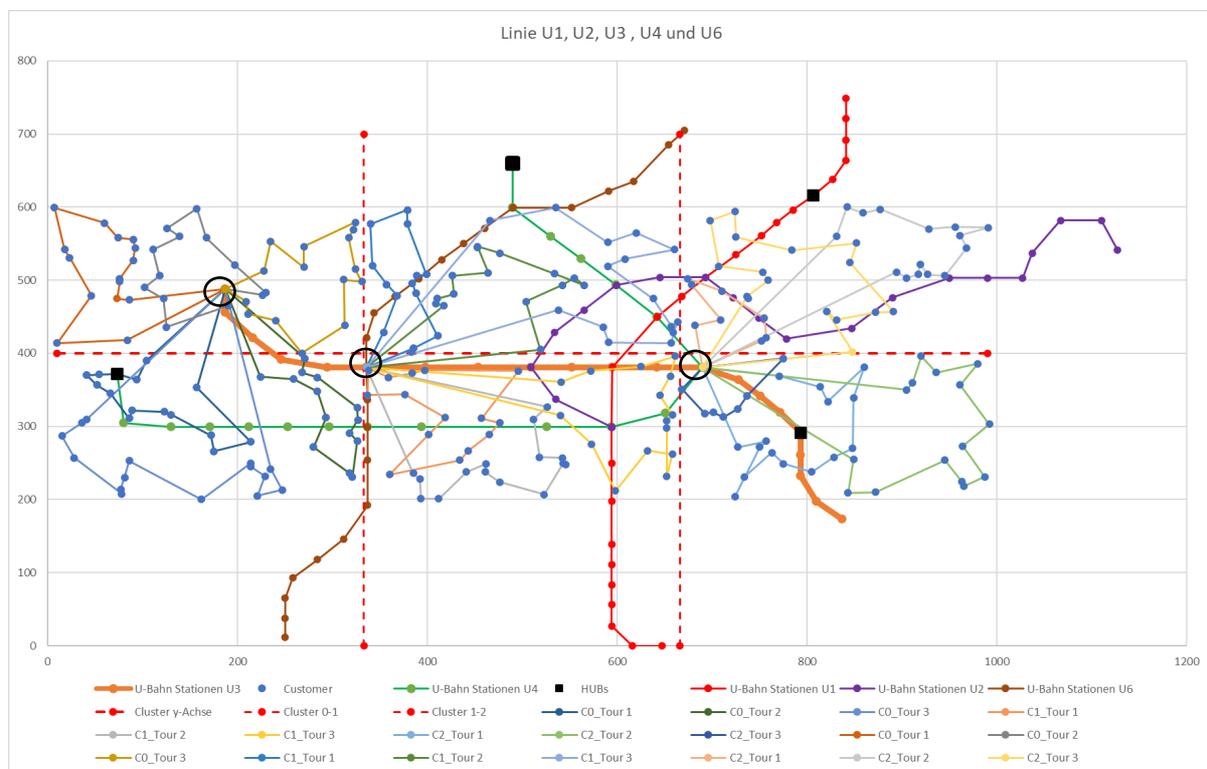


Abbildung 11 - Clusterung entlang der x- und y-Achse in 6 Cluster (selbst erstellt)

4.2.2.2. Clusterung in acht Cluster

In der Abbildung 12 sind die 250 Kunden sowohl an der x-Achse in vier Cluster als auch horizontal an der y-Achse in zwei Cluster aufgeteilt mit einer Kapazitätsbeschränkung von max. 15 Kunden pro Route. Pro Cluster werden zwischen zwei und drei Routen gebildet. Dies ergibt eine gesamte Tourenlänge von 186,65km. Hinzu kommt ebenfalls die Strecke der U-Bahn. Diese fährt voll beladen von Erdberg nach Ottakring mit einer Tourenlänge von 12,75km. Dies ergibt eine Gesamtlänge von 199,4km.

Die Kosten belaufen sich auf 36,07€. Die Emissionen betragen 26,04g, da hier gleich viele Emissionen ausgestoßen werden wie bei einer Einteilung in vier Cluster.

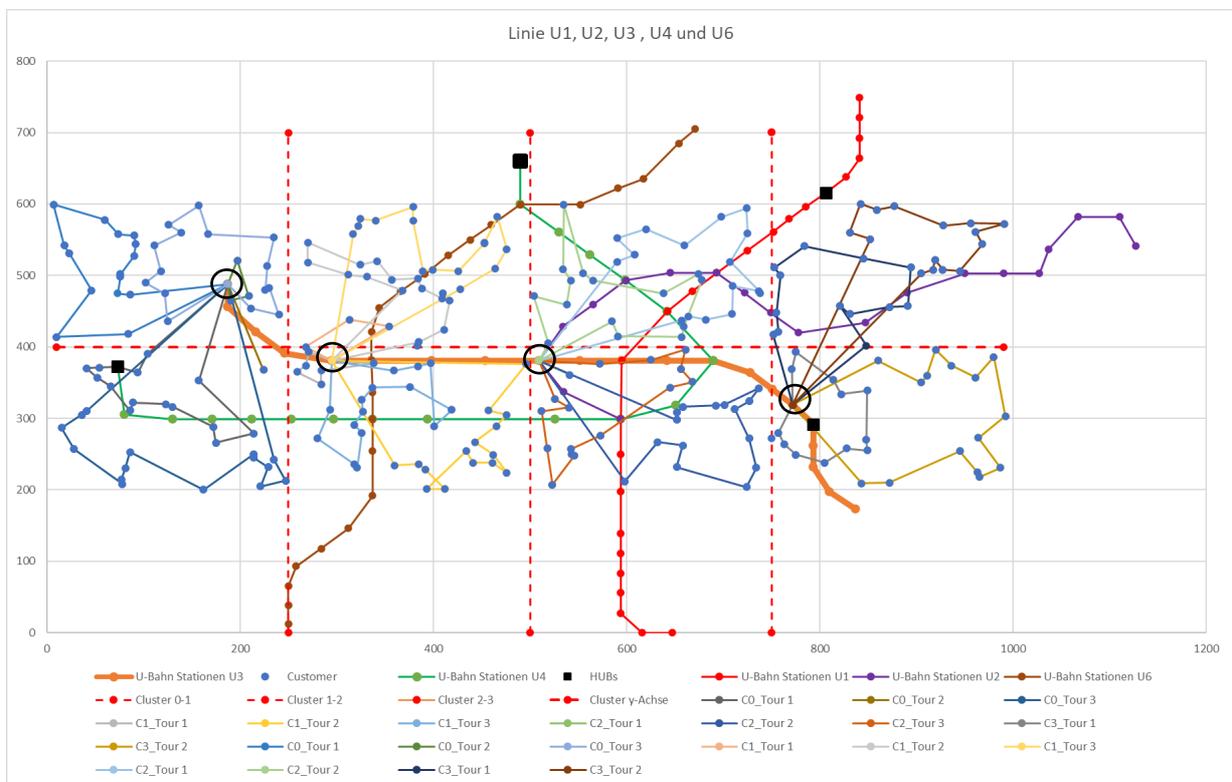


Abbildung 12 - Clusterung entlang der x- und y-Achse in 8 Cluster (selbst erstellt)

4.2.2.3. Clusterung in zehn Cluster

In der Abbildung 13 sind die 250 Kunden sowohl an der x-Achse in fünf Cluster als auch horizontal an der y-Achse in zwei Cluster aufgeteilt mit einer Kapazitätsbeschränkung von max. 15 Kunden pro Route. Pro Cluster werden zwischen zwei und drei Routen gebildet. Dies ergibt eine gesamte Tourenlänge von 188,85km. Hinzu kommt ebenfalls die Strecke der U-Bahn. Diese fährt voll beladen von Erdberg nach Ottakring mit einer Tourenlänge von 12,75km. Dies ergibt eine Gesamtlänge von 201,60km.

Die Kosten belaufen sich auf 36,45€. Die Emissionen betragen 24,73g, da hier gleich viele Emissionen ausgestoßen werden wie bei einer Einteilung in fünf Cluster.

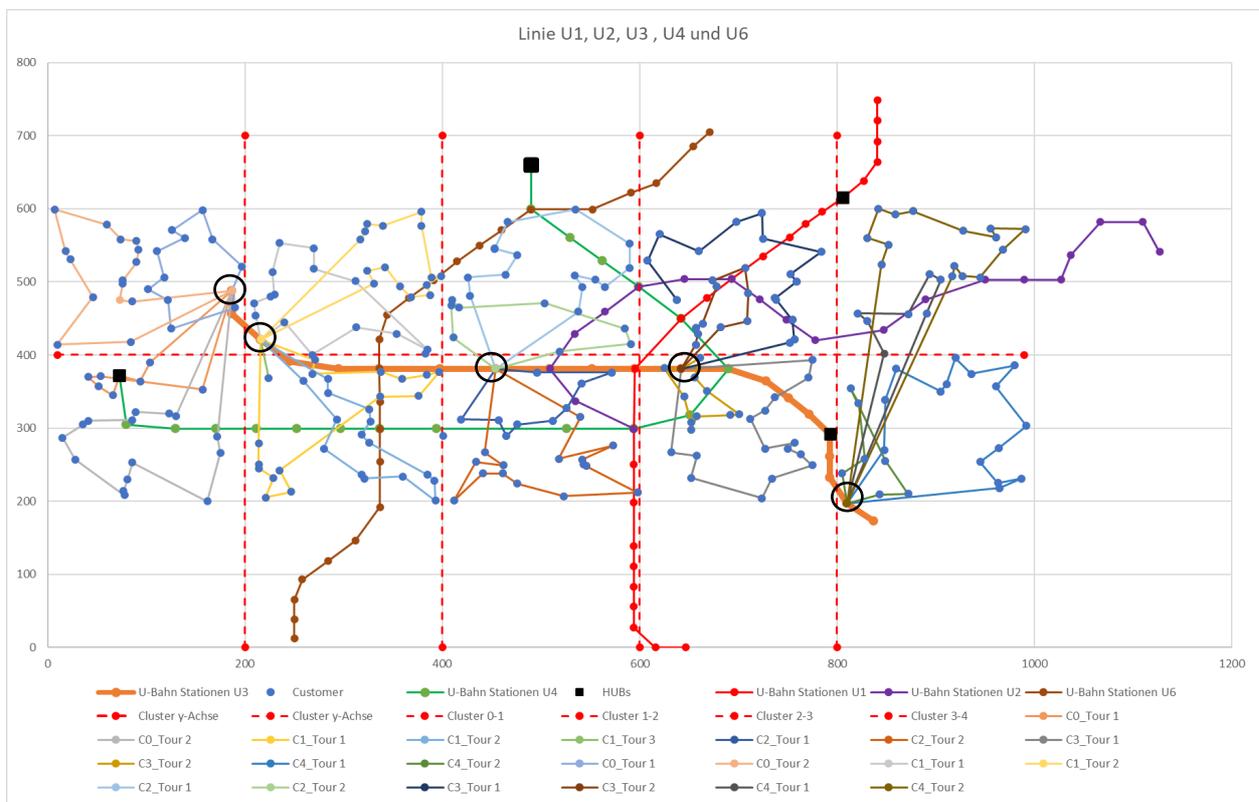


Abbildung 13 - Clusterung entlang der x- und y-Achse in 10 Cluster (selbst erstellt)

4.3. Einbindung aller U-Bahn-Linien

Die U-Bahn-Linie U3 liegt aufgrund des horizontalen Charakters im Fokus. Nichtsdestotrotz kann die Berücksichtigung mehrerer U-Bahn-Linien zu einem verbesserten Wert führen. Wenn die Kunden in vier Cluster eingeteilt werden und neben der Linie U3 auch die Linien U4 und U1 berücksichtigt werden, ergibt sich folgende Abbildung 14. Es wird die erste U-Bahn-Station im jeweiligen Cluster entlang der x-Achse als Startpunkt für die Belieferung der Kunden im Cluster ausgewählt.

Die Einteilung in vier Cluster führt zu einer Länge von 187,57km. Im ersten und im zweiten Cluster wird die Linie U4, im dritten Cluster die Linie U3 und im letzten Cluster die Linie U1 ausgewählt. Im Vergleich zur Belieferung nur durch die Linie U3 erhöht sich hier die Streckenlänge um 6,4km. Die Einteilung in vier Cluster ergibt eine Tourenlänge von 181,17km bei einer Belieferung nur durch die Linie U3. Es wird deutlich, dass sich der Wert verschlechtert, wenn mehr U-Bahnen berücksichtigt werden. Für weitere Untersuchungen könnte es interessant sein, eine andere Methode für die Auswahl der U-Bahn-Stationen in Betracht zu ziehen, da hier eventuell noch deutlichere Verbesserungen erzielt werden können.

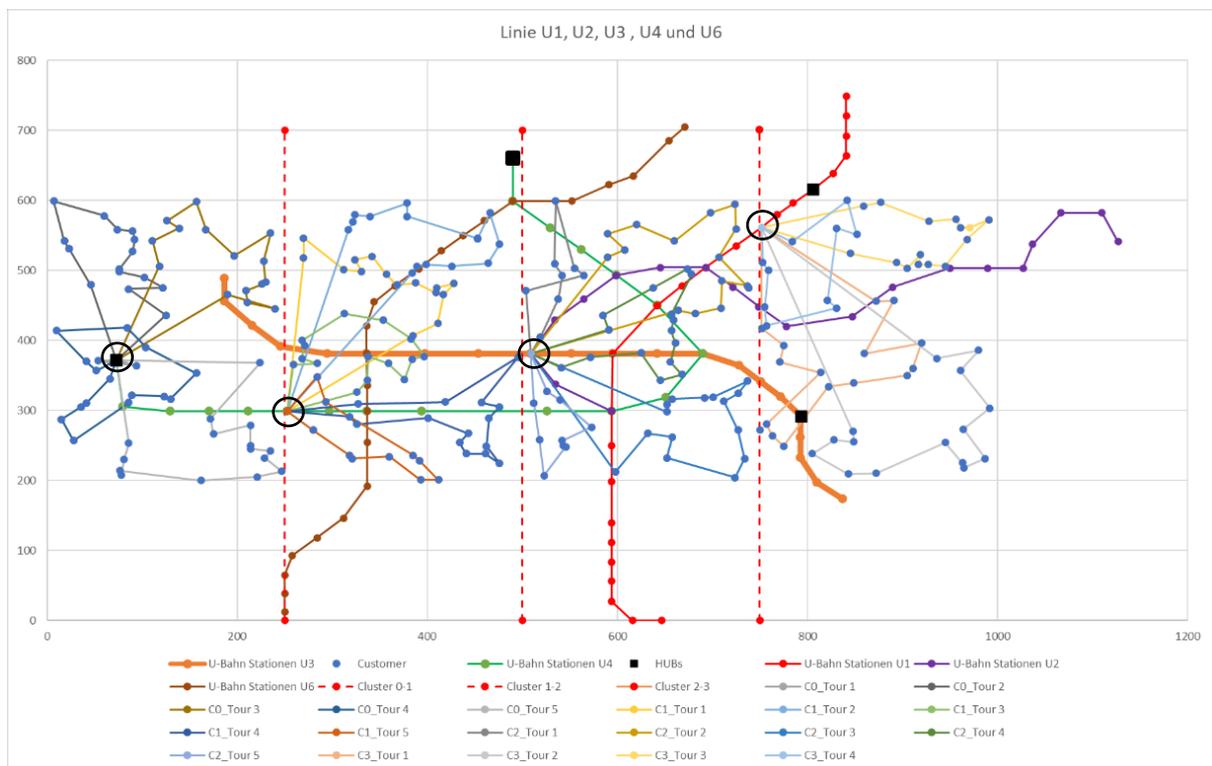


Abbildung 14 - Clusterung entlang der x-Achse in 4 Cluster, Einbeziehung U1, U3 und U4

Die Einteilung in vier Cluster führt zu einer Länge von 187,57km.

Bei einer Einteilung in fünf Cluster mit einer Streckenlänge von 214,22km (siehe Abbildung 15) wird deutlich, warum sich der Wert enorm erhöht, wenn mehrere U-Bahn-Stationen zur Auswahl stehen. Im vierten Cluster wird die Station Neulaa der U1 ausgewählt, da diese die erste Station im Cluster entlang der x-Achse ist. Da diese Station nicht sehr zentral liegt, kommt es hier zu erhöhten Werten und allein in diesem Cluster beträgt die gefahrene Streckenlänge ca. 64,5 Kilometer. Es wird deutlich, dass für eine weitere Untersuchung andere Clustertaktiken in Betracht gezogen werden könnten, um den Wert zu verbessern.

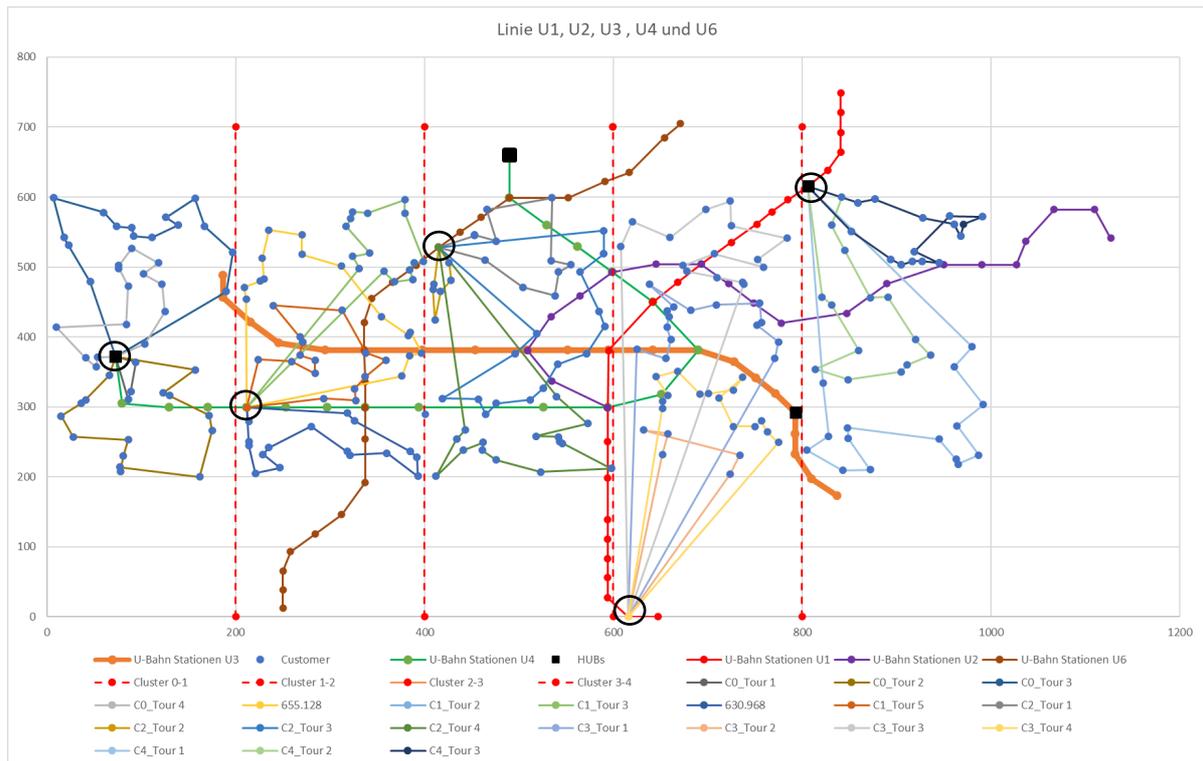


Abbildung 15 - Clusterung der Kunden in fünf Bereiche, Einbeziehung U1, U4 und U6

Die Einteilung in vier Cluster führt zu einer Länge von 214,22km.

5. Diskussion

Tabelle 7 auf folgender Seite gibt eine Übersicht der Belieferung von 250 Kunden mittels LKW sowie mittels U-Bahn und Lastenfahrrad wobei letztere in verschiedenen Clustern zusammengefasst ist. In der Spalte *Gesamte Tourenlänge* wird deutlich, dass der LKW die geringste Kilometeranzahl fährt. Eine Clusterung der Kunden in fünf Bereiche ergibt eine Tourenlänge von 192,19km. Somit ist die Belieferung der selben Kunden mit der U-Bahn und den Lastenfahrrädern um ca. 20km länger.

Zur Vereinfachung wird angenommen, dass ein Paket eines Kunden im Schnitt 1kg wiegt. So können die Emissionen ausgerechnet werden. Da, wie bereits erwähnt, ein Kunde einen Bedarf von 1 hat, wiegen die 250 Pakete somit 250 kg. Aufgrund der Kapazitätsbeschränkung des Transporters werden fünf Routen mit jeweils 50 Paketen gefahren. Der LKW fährt somit $\frac{1}{4}$ Tonne an Gewicht über eine Strecke von 172,54km. Es werden 113g Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten pro Tonnenkilometer ausgestoßen. Da der LKW fünf Routen mit 50 Päckchen startet und pro Kunde ein Päckchen abgibt, reduziert sich der Wert der Emissionen pro Kunde um wenige Gramm pro gefahrenem Kilometer. Werden hier die Emissionen in Tonnenkilometern entsprechend des jeweiligen Kantengewichts ausgerechnet und die Päckchen mit jedem besuchten Kunden reduziert, führt dies für die Belieferung der 250 Kunden zu ca. 662g CO₂-Äquivalenten.

Die Belieferung der Kunden eingeteilt in mehrere Cluster mit der Linie U3 und dem Lastenfahrrad ergibt direkte Emissionen von 14 - 20g. Hier handelt es sich je nach Clusterung um einen anderen Wert, da die U-Bahn pro Station ca. 50 - 80 Pakete an die Fahrer der Räder abgibt und somit pro Halt weniger Tonnen transportiert. In den einzelnen Kapiteln 4.2.1.1 bis 4.2.1.3 sind die genauen Berechnungen der Emissionen aufgeführt. Da die Emissionen bei allen Clustereinteilungen sehr gering sind, allerdings die Kosten und die gefahrenen Kilometer bei einer Einteilung in fünf Cluster am niedrigsten ausfallen, wird dieser Fall als der beste von allen betrachteten Versionen gesehen. Bei der Strecke des Cargo-Bikes gibt es keine direkten Emissionen. Indirekte Emissionen, die beispielsweise durch die Produktion des Rads entstehen, werden vernachlässigt, da hier diverse Komponenten hineinspielen, die die Komplexität enorm erhöhen würden.

Ausgangsbasis	Anzahl Cluster	Verkehrsmittel	Tourenlänge	Emissionen	Kosten in € pro km	Gesamte Tourenlänge	Max. Gesamt-Emissionen	Gesamtkosten in €
Referenzwert LKW, Startpunkt Erdberg	-	LKW	172,54km	113g/tkm	0,42€/km	172,54km	662g	72,46€
Clustering nur an x- Achse	3	Lastenrad	191,29km	-	0,173€/km	204,04km	28,54g	36,87€
		U-Bahn	12,75km	17g/tkm	0,2965€/km			
	4	Lastenrad	181,17km	-	0,173€/km	193,92km	26,04g	35,12€
		U-Bahn	12,75km	17g/tkm	0,2965€/km			
	5	Lastenrad	179,44km	-	0,173€/km	192,19km	24,73g	34,82€
		U-Bahn	12,75km	17g/tkm	0,2965€/km			
Clustering an x- und y- Achse	6	Lastenrad	192,44km	-	0,173€/km	205,19km	28,54g	37,07€
		U-Bahn	12,75km	17g/tkm	0,2965€/km			
	8	Lastenrad	186,65km	-	0,173€/km	199,40km	26,04g	36,07€
		U-Bahn	12,75km	17g/tkm	0,2965€/km			
	10	Lastenrad	188,85km	-	0,173€/km	201,60km	24,73g	36,45€
		U-Bahn	12,75km	17g/tkm	0,2965€/km			

Tabelle 7 - Kosten- und Emissionsvergleich

Um die Tabelle 7 grafisch darzustellen und hier eine bessere Vergleichbarkeit zu schaffen, finden sich die Kilometeranzahl, die Gesamt-Emissionen und die Gesamtkosten der betrachteten Szenarien in den folgenden drei Diagrammen. In Abbildung 16 zeigt die Darstellung im Diagramm deutlich, dass eine Belieferung mittels LKW die kürzeste Strecke ausmacht, da dieser ein größeres Fassungsvermögen als das Lastenrad hat. Abbildung 17 zeigt, dass die Kosten bei einer Einteilung der Kunden in fünf Cluster und einer Belieferung mittels U-Bahn und Lastenrad am geringsten sind. Abbildung 18 zeigt, dass eine Einteilung der Kunden in fünf Cluster und eine anschließende Belieferung mittels U-Bahn und Lastenrad die emissionsärmste Alternative ist. Zusammenfassend liefert die Einteilung in fünf Cluster die kürzeste Kilometeranzahl bei einer Belieferung durch U-Bahn und Lastenrad. Eine Untergliederung sowohl an der x-Achse und der y-Achse liefert eine höhere Kilometeranzahl als lediglich die Unterteilung in fünf Cluster an der x-Achse. Nichtsdestotrotz ist der geringste Wert bei einer Belieferung der 250 Kunden mittels U-Bahn und Lastenrad um knapp 20km höher als bei einer Belieferung derselben Kunden mit dem LKW.

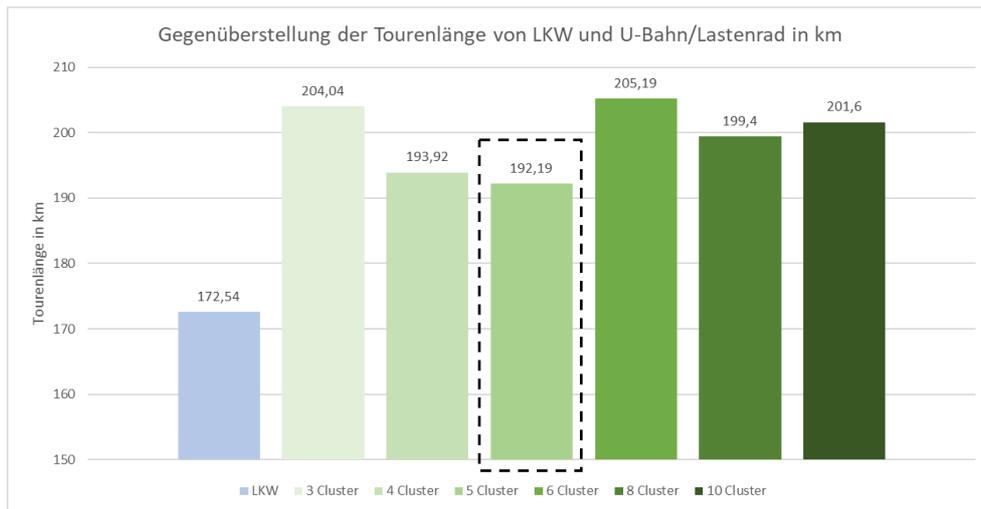


Abbildung 16 - Gegenüberstellung der Tourenlänge

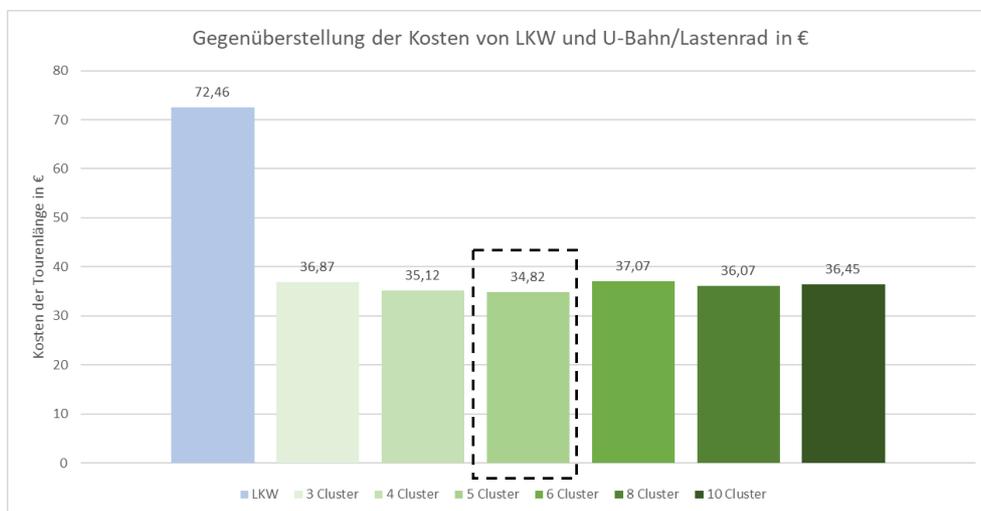


Abbildung 17 - Gegenüberstellung der Kosten

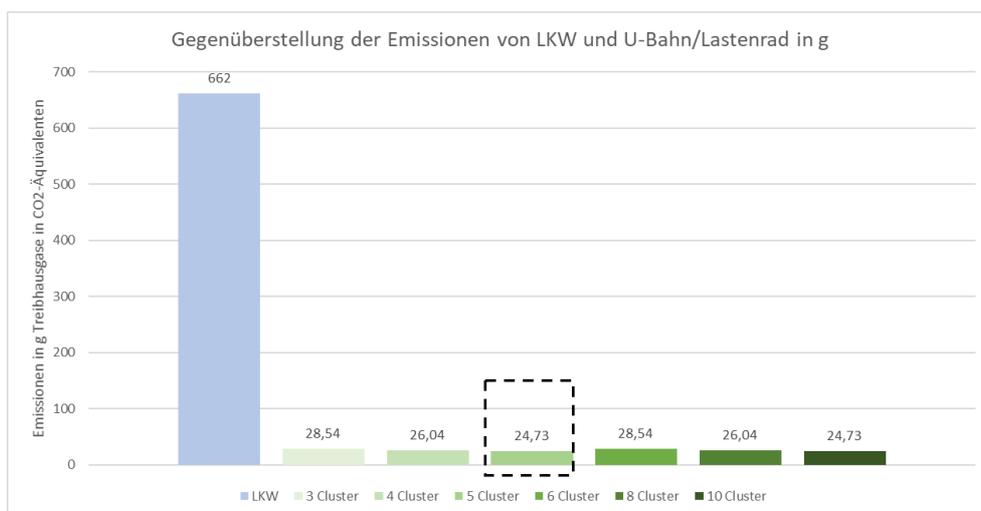


Abbildung 18 - Gegenüberstellung der Emissionen

5.1. Berücksichtigung der Emissionen bei der Auslieferung

Wie bereits vermutet wird deutlich, dass die Auslieferung mit öffentlichem Verkehrsmittel und elektronischem Cargo-Bike eine umweltschonendere Alternative im Vergleich zum Transporter darstellt. Obwohl die Kilometeranzahl einer Belieferung mittels LKW geringer ausfällt, ist der Emissionsausstoß mit einem normalen Lastkraftwagen bzw. Transporter deutlich höher. Dies liegt unter anderem am Ausstoß in Gramm pro Tonnenkilometer der einzelnen Verkehrsmittel. Die gefahrene Streckenlänge mit dem Lastkraftwagen ist nur rund 20km kürzer. Diese Streckeneinsparung reicht aber nicht aus, um die Emissionen auszugleichen. Da die U-Bahn eine hohe Kapazität besitzt und alle Päckchen für die Belieferung der 250 zufällig ausgewählten Kunden auf einmal aufnehmen kann, muss die U-Bahn im gewählten Szenario nur einmal fahren. Die Höhe der Gesamtemissionen wird ebenfalls durch die Emissionen des Lastenfahrrads beeinflusst. Da im betrachteten Beispiel ein Rad null Gramm direkte Emissionen ausstößt, fällt diese Alternative deutlich positiver ins Gewicht und so werden nur die Emissionen der U-Bahn berücksichtigt.

Der Wert der Emissionen ist stark abhängig von dem transportierten Gewicht auf der jeweiligen Streckenlänge und von der Anzahl an Stationen bzw. im betrachteten Fall von der Anzahl an Clustern. Auch bei der Einbindung von mehreren U-Bahn-Linien und mehreren Haltestellen führt dies zu geänderten Emissionswerten. Generell lässt sich aus den Ergebnissen schließen, dass es für die Emissionen besser ist, so viele Pakete wie möglich so früh wie möglich zu entladen, um dann wenige Kilometer mit einem geringen Tonnengewicht zu fahren. Im betrachteten Fall ergibt sich eine Einteilung der Kunden in fünf Cluster als emissionsärmste, kostengünstigste und auch kürzeste Strecke. Des Weiteren sind die Emissionswerte sehr gering, sodass vermutlich eher die Kosten eine entscheidende Rolle spielen sollten. Je nachdem welches Ziel verfolgt wird, kann ein Fokus auf die Kosten oder ein Fokus auf die Emissionen gelegt werden. Allgemein lässt sich schließen, dass mit einer Reduzierung der Emissionen oft auch eine Erhöhung der Kosten einhergehen kann. Folgend werden die Kosten genauer betrachtet.

5.2. Berücksichtigung der Kosten bei der Auslieferung

Die Belieferung auf der letzten Meile gehört zu dem kostenintensivsten Stück der Zustellung von Paketen (Cárdenas et al., 2017). Es zeigt sich, dass eine Belieferung mittels Transporter fast doppelt so hohe Kosten verursacht wie eine Belieferung mittels U-Bahn und Lastenrad. Hier werden Kosten wie Sprit oder Strom und Versicherungen und Wartungen berücksichtigt. Zukünftige Kosten wie eventuell eine CO₂-Steuer können sich auf Benzin- und Dieselpreise auswirken und so die Kosten für eine konventionelle Belieferung erhöhen. Im betrachteten Beispiel war es Ziel die Streckenlänge zu minimieren, da die Kosten und Emissionen auf den gefahrenen Kilometer betrachtet wurden. Im Beispiel liefert eine Einteilung der Kunden in fünf Cluster mit Belieferung durch U-Bahn und Lastenfahrrad die geringsten Kosten, da hier auch die Streckenlänge am kürzesten ist. Dahingehend könnte es vorteilhaft sein, die Kosten anstatt der Strecke zu minimieren. Dies bezieht sich auch darauf die Zeit zu minimieren, die für die Belieferung aufgebracht wird, da die Personalkosten oft einen ausschlaggebenden Anteil der Kosten einnehmen. Im Beispiel wird ein Cargo-Bike von einer Person gefahren. Hier könnte es vorteilhaft sein die Zeit zu minimieren, die die Person fährt, um dahingehend ebenfalls die Stundenanzahl und einhergehend die Lohnkosten zu minimieren. Die Personalkosten können ein großer Kostenfaktor sein und stellen oft den größten Posten einer Transport-Kostenrechnung dar (Brabänder, 2020). Da dies jedoch weitere Untersuchungen benötigt, ist keine genaue Aussage möglich.

In der Ausarbeitung von Cárdenas et al., (2017) stellen die Autoren verschiedene Kostenpositionen vor, in denen beispielsweise Kosten für Stau, Lärm, Unfälle sowie Klimawandel und Luftverschmutzung aufgezählt werden. Für den Klimawandel ermöglicht es die Schätzung der Vermeidungskosten eine Art Kohlenstoffpreis (CO₂-Äquivalent) festzulegen. Die wichtigsten kostenverursachenden Schadstoffe sind hierbei CO₂, CH₄ und N₂O (Cárdenas et al., 2017). Korzhenevych et al. (2014) haben einen zentralen Preis von 90€/Tonne vorgeschlagen, welcher auf dem aktuellen Ziel basiert, die globale Erderwärmung auf 2°C zu stabilisieren. So ein Preis könnte in zukünftigen Untersuchungen Anwendung finden, um auch die Emissionen preislich zu berücksichtigen.

Da elektrische Transporter momentan noch teuer sind, bieten diese kostentechnisch gesehen noch keine Alternative zum normalen Transporter. Allerdings könnte sich dies in Zukunft ändern, da mit fortschreitender Technologie und eventuellen Regelungen und Gesetzen zum CO₂-Ausstoß die elektrische Alternative attraktiver werden könnte.

6. Conclusio und Ausblick

In dieser Ausarbeitung wurde eine quantitative Analyse durchgeführt, inwiefern eine Einbindung der U-Bahn im City-Logistikbereich zu Kostenersparnissen und Emissionsreduzierung im Vergleich zum Transporter führen kann. Wie bereits vermutet, zeigen sich Kostenersparnisse und geringere Emissionen bei einem Einsatz von U-Bahnen und Lastenfahrrad. Werden dieselben Kunden mit dem öffentlichen Verkehrsmittel und dem Cargo-Bike beliefert, können im abgebildeten Modell bis zu 50% Kosten und rund 97% Emissionen im Vergleich zur Belieferung mittels Transporter gespart werden. Nichtsdestotrotz zeigt sich in der gefahrenen Kilometeranzahl, dass der Transporter weniger Kilometer fährt als die U-Bahn mit Lastenfahrrad. Dies liegt unter anderem an der Kapazitätsbeschränkung, da ein Transporter ein höheres Fassungsvermögen als ein Cargo-Bike besitzt.

Um die gefahrenen Kilometer weiter zu reduzieren, könnte es interessant sein die Kunden mit verschiedenen Clustermethoden zu unterteilen. So könnte eine Einteilung der Kunden mittels einer Art des k-means Algorithmus bessere Werte liefern (Likas et al., 2003). Hier werden dann die zufällig generierten Kunden nach dem Schema des Algorithmus geclustert. Dahingehend könnte eine passende U-Bahn-Station ausgewählt werden, die eventuell nahe des Clusterschwerpunkts liegt. Auch die Einbindung von Voronoi-Diagrammen könnte zu guten Lösungen führen (Bhattacharya & Gavrilova, 2007). Weiterführend könnten so eventuell geringere Streckenlängen erreicht werden. Außerdem wäre es möglich die Streckenlänge zu reduzieren, indem die Kapazität bzw. das Fassungsvermögen des E-Bikes vergrößert wird und so mehr Kunden pro Route erreicht, werden können.

Des Weiteren wäre es interessant, eine Minimierung der Kosten anstatt einer Minimierung der Strecke in Betracht zu ziehen. Da hier, wie bereits im Kapitel 5.2 *Berücksichtigung der Kosten bei der Auslieferung* erwähnt, die Personalkosten eine große Rolle spielen, ist dies eventuell ein Szenario, welches in realer Anwendung von Relevanz sein kann. Da in praktischer Umsetzung auch die Dauer der Auslieferung eine Rolle spielt und hier Zeitfresser wie das Beladen und Entladen der U-Bahn, der Transport von der U-Bahn bis zum Lastenrad und die Zeitfenster der Kunden mit einfließen, könnten in weiterführenden Betrachtungen andere Zielfunktionen fokussiert werden.

Weitere Szenarien sind denkbar, um Kunden umweltschonend und kostengünstig zu beliefern. Da elektrische Transporter momentan noch recht teuer sind, bieten diese kostentechnisch gesehen noch keine Alternative zum normalen Transporter. Allerdings könnte sich dies auch

ändern, da mit fortschreitender Technologie und eventuellen Regelungen und Gesetzen zum CO₂-Ausstoß die elektrische Alternative attraktiver werden könnte.

Obwohl das Problem heuristisch, also annähernd, gelöst wurde, zeigt es bereits deutlich, dass sich der Einsatz von U-Bahnen im Güterverkehr kosten- und umwelttechnisch lohnt. Zusammenfassend lässt sich schließen, dass aufgrund des innerstädtischen Wachstums, des allgemeinen Anstiegs des E-Commerce und Regulierungen wie CO₂-Steuern oder Klimapakte neue Probleme auftreten, die andere und eventuell unkonventionelle Lösungen im Bereich Supply Chain Management und der letzten Meile-Zustellung benötigen (Plank et al., 2021). Klimafreundliche und kostengünstige Alternativen werden gesucht, um die Nachfrage der Kunden besonders im City-Logistikbereich zu befriedigen. Die Einbindung des Schienenverkehrs in die Güterbelieferung zeigt eine passende Option, wobei hier die bereits vorhandenen Stationen und Schienen genutzt werden müssen. Flexibilität kann in Form von einer zusätzlichen Belieferung mittels Lastenfahrrad hinzugefügt werden, um auch unzugängliche Zonen zu erreichen (Muschkiel & Schückhaus, 2019). Zusammenfassend zeigt die Einbindung der U-Bahn eine kostengünstige und umweltschonende Alternative für die Zustellung auf der letzten Meile.

Literaturverzeichnis

- Bhattacharya, P., & Gavrilova, M. L. (2007, July). Voronoi diagram in optimal path planning. In 4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (ISVD 2007) (pp. 38-47). IEEE.
- Bhatti, A., Akram, H., Basit, H. M., Khan, A. U., Raza, S. M., & Naqvi, M. B. (2020). E-commerce trends during COVID-19 Pandemic. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 13(2), 1449-1452.
- Brabänder, C. (2020). *Die Letzte Meile: Definition, Prozess, Kostenrechnung und Gestaltungsfelder*. Springer-Verlag.
- Cárdenas, I., Beckers, J., & Vanelslender, T. (2017). E-commerce last-mile in Belgium: Developing an external cost delivery index. *Research in transportation business & management*, 24, 123-129.
- Cargobike. (2018). Kaufprämie für Schwerlastträger konkretisieren. Abgerufen am 13.08.2021 von <https://www.cargobike.jetzt/kaufpraemie-schwerlastraeder-konkretisiert/>
- Carwiki. (2021). Wieviel verbraucht der Volkswagen Caddy. Abgerufen am 19.10.2021 von <https://carwiki.de/vw-caddy-verbrauch>
- Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.
- Djahel, S., Doolan, R., Muntean, G. M., & Murphy, J. (2014). A communications-oriented perspective on traffic management systems for smart cities: Challenges and innovative approaches. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), 125-151.
- E-Lastenfahrrad. (2021). Antriebssysteme. Abgerufen am 25.11.2021, von <https://www.e-lastenrad.de/e-lastenrad-antriebssysteme>
- Elbert, R., & Friedrich, C. (2019). Green City Supply–Nachhaltige Einbindung des Schienengüterverkehrs in urbane Logistikkonzepte (Vol. 34). TU Darmstadt| Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik.
- Fahrrad XXL. (2021). Kostenvergleich: Auto vs. Lastenfahrrad. abgerufen am 19.10.2021 <https://www.fahrrad-xxl.de/beratung/lastenfahrrad/auto-vs-lastenfahrrad/#kostenpunkte>

- Jiang, L., Chang, H., Zhao, S., Dong, J., & Lu, W. (2019). A travelling salesman problem with carbon emission reduction in the last mile delivery. *IEEE Access*, 7, 61620-61627.)
- Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J., Holtkamp, M., Meier, H., Gibson, G., ... & Cox, V. (2014). Update of the handbook on external costs of transport: final report for the European Commission: DG-MOVE.
- Lastenrad VCD. (2021). Ersparnis mit dem Lastenrad. Abgerufen am 19.10.2021, von <https://lastenrad.vcd.org/nc/vorteile/kostenvorteil/calculator/>
- Latif, M. (2009). *Klimawandel und Klimadynamik*. UTB Ulmer.
- Likas, A., Vlassis, N., & Verbeek, J. J. (2003). The global k-means clustering algorithm. *Pattern recognition*, 36(2), 451-461.
- Müller-Eberstein, F., & Franke, M. (2000). Projekt CarGo Tram in Dresden. ZEV, DET, Glasers Annalen, Die Eisenbahntechnik, 124(5), 337-340.
- Muschket, M., & Schückhaus, U. (2019). Anforderungen an die Handelslogistik der Zukunft. In *Handel mit Mehrwert* (pp. 357-378). Springer Gabler, Wiesbaden.
- Paessens, H. (1988). The savings algorithm for the vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 34(3), 336-344.
- Pichpibul, T., & Kawtummachai, R. (2012). An improved Clarke and Wright savings algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *ScienceAsia*, 38(3), 307-318.
- Pietrzak, O., & Pietrzak, K. (2021). Cargo tram in freight handling in urban areas in Poland. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102902.
- Plank, K., Schnabl, A., & Wimmer, L. (2021). Wer soll bei einer CO2-Steuer zahlen? Und wer zahlt schon jetzt?.
- Prillinger, H. (2021). Netzplan S-Bahn und U-Bahn Wien (Stadtgebiet, 150dpi). Abgerufen am 27.08.2021, von <https://homepage.univie.ac.at/horst.prillinger/ubahn/m/largemap-s-wien-h.html>
- Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2012). *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie* (Vol. 2366). CH Beck.

- Sächsische Zeitung. (2017). Die Cargo-Tram ist wieder da. Abgerufen am 17.11.2021, von https://www.saechsische.de/die-cargo-tram-ist-wieder-da-3644803.html?utm_source=szonline
- Stadt Zürich. (2021a). Cargo-Tram und E-Tram. Abgerufen am 17.11.2021, von https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/entsorgung_recycling/entsorgen/wo-wann-entsorgen/cargo-tram_und_e-tram.html
- Stadt Zürich. (2021b). Gewerbe- und Güterverkehr. Abgerufen am 17.11.2021, von https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/stadtverkehr2025/gewerbe_gueterverkehr.html
- Strale, M. (2014). The cargo tram: current status and perspectives, the example of Brussels. In Sustainable Logistics. Emerald Group Publishing Limited.
- Umweltbundesamt. (2021). Emissionsdaten. Abgerufen am 13.08.2021, von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#grafik>
- Vereinte Nationen. (2018). 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN Abgerufen am 16.11.2021, von <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> abgerufen am 16.11.2021
- VW Caddy Nutzfahrzeuge. (2021). Nutzfahrzeuge. Abgerufen am 16.11.2021, von <https://www.vw-nutzfahrzeuge.at/caddy/caddy>
- Wachotsch, U., Kolodziej, A., Specht, B., Kohlmeyer, R., & Petrikowski, F. (2014). E-Rad macht mobil: Potenziale von Pedelecs und deren Umweltwirkung.
- Wiener Klimapakt. (2021a). Der Wiener Klimapakt. Abgerufen am 24.10.2021, von <https://www.wien.gv.at/regierungsabkommen2020/lebenswerte-klimamuster-stadt/der-wiener-klimapakt/>
- Wiener Klimapakt. (2021b). Klimaverträglicher Verkehr. Abgerufen am 24.10.2021, von <https://www.wien.gv.at/regierungsabkommen2020/lebenswerte-klimamuster-stadt/klimavertraglicher-verkehr/>
- Wiener Linien. (2019). 40 Facts zu 40 Jahre Wiener U-Bahn. Abgerufen am 03.09.2021, von <https://blog.wienerlinien.at/40-facts-zu-40-jahre-wiener-u-bahn/>

- Wiener Linien. (2021). Die Öffis sind Energiesparmeister. Abgerufen am 19.10.2021, von <https://www.wienerlinien.at/eportal3/ep/programView.do/pageTypeId/66528/programId/2000101/channelId/-48667>
- WKO. (2021). Kraftstoffpreise zum 19. Oktober 2021. Abgerufen am 19.10.2021, von <https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/kraftstoffpreise.html>

Anhang

Anhang A

Abstract

Last mile delivery is a frequently studied research area in supply chain management. Due to increasing urbanization, the rise of the e-commerce sector and new regulations and laws to make cities more sustainable and liveable, the problem of delivery is being looked at from different perspectives. Sustainable and cost-effective solutions are being sought. The integration of the metro into the city logistics sector could be an environmentally friendly and cost-effective solution to deliver customers in densely populated cities. In this paper, I analyse whether it is more cost-effective and environmentally friendly to deliver customers by subway and from the subway station by cargo bike compared to a conventional delivery by van. For this purpose, the existing Vienna subway lines were considered. It is shown that a delivery to the same customers by subway and cargo bike is significantly more cost-effective and lower in emissions than a delivery by van. Thus, the integration of the subway could be a good alternative to make cities more sustainable.

Anhang B

Netz der Wiener Linien

Im Verlauf der Ausarbeitung wurde die Linie U2 mit Verlauf von Schottentor über Volkstheater zum Karlsplatz grafisch noch mitberücksichtigt. Aufgrund der Bauarbeiten der neuen Linie U5 gibt es zukünftig vermutlich einige Änderungen des Netzplans.



Abbildung 19 - Netzplan S-Bahn und U-Bahn Wien (Stadtgebiet, 150dpi) (Prillinger, 2021)