

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. Ralf Bogdanski

Marius Bayer

Markus Seidenkranz

gefördert durch

Oberste Baubehörde
im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr
IHK Nürnberg für Mittelfranken
Stadt Nürnberg, Wirtschaftsreferat

Bayerisches Staatsministerium des
Innern, für Bau und Verkehr



Industrie- und Handelskammer
Nürnberg für Mittelfranken



Wirtschaftsreferat

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Mit Dank an die studentische Mitwirkung von:
Stefanie Eckart
Miryam Schmitz
Julia Behrens



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
Kurzfassung	8
Einleitung	9
1 Projektpartner und Projektmeilensteine	11
2 Vorüberlegungen für die Auswahl geeigneter Stadtgebiete in Nürnberg	13
3 Makroskopische Betrachtung	16
3.1 Analyse des Stadtgebiets Nürnberg	16
3.1.1 Szenario 1 – Steinbühl, Galgenhof, Glockenhof und Hummelstein	20
3.1.2 Szenario 2 – Pirkheimer Straße, Uhlandstraße	25
3.1.3 Szenario 3 – Sandberg, St. Johannis	27
3.1.4 Exkurs – Langwasser	30
3.2 Geographische Analyse	32
4 Mikroskopische Betrachtung	39
4.1 Konzeptionelle Vorgehensweise	39
4.2 Technische Restriktionen	40
4.3 Wirtschaftliche Restriktionen	40
5 Validierung und Vergleich zur konventionellen „alten“ Tour	43
5.1 Validierung mit dem Routenplanungsprogramm TransIT	43
5.1.1 Notwendigkeit einer Simulation	43
5.1.2 Bestandteile einer Tourenplanung	44
5.1.3 Durchführung der Tourenplanung	46
5.1.4 Simulation des Lastenfahrradeinsatzes	50
5.2 Validierung der Simulation durch Testfahrten	63
6 Praktischer Betrieb	68
6.1 Reguläre Mikro-Depot-Standorte und Ist-Daten der Praxisphase	69

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

6.2	Marktübersicht der Lastenfahrräder	71
6.3	Technische Zuverlässigkeit der eingesetzten Lastenfahrräder	81
7	Ökobilanzierung	91
7.1	Aufbau, naturwissenschaftliche und technische Grundlagen	91
7.2	Stand der Normung	97
7.3	Besonderheiten der Ökobilanzierung in der Logistik	98
7.4	Bilanzierung der Treibhausgasemissionen des Mikrodepotkonzepts	100
7.4.1	Darstellung des Ist-Szenarios	101
7.4.2	Bilanzierung der Treibhausgasemissionen des Ist-Szenarios	103
7.4.3	Darstellung des Soll-Szenarios	104
7.4.4	Bilanzierung der Treibhausgasemissionen des Soll-Szenarios	105
7.5	Ermittlung des Luftschadstoffausstoßes	111
7.5.1	Ermittlung des Luftschadstoffausstoßes des Ist-Szenarios	114
7.5.2	Ermittlung des Luftschadstoffausstoßes des Soll-Szenarios	114
7.6	Vorstellung der Ergebnisse	116
7.6.1	Vergleich der Treibhausgasemissionen beider Szenarien	116
7.6.2	Vergleich der Luftschadstoffemissionen beider Szenarien	117
7.7	Ökologische Effizienz und kritische Würdigung der Ergebnisse	119
8	Zusammenfassung und Fazit	123
	Literaturverzeichnis	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mikro-Depot-Konzept	9
Abbildung 2: Statistische Bezirke der Stadt Nürnberg	19
Abbildung 3: Stadtgebiete Steinbühl, Galgenhof, Glockenhof, Hummelstein in Verbindung mit Höhenprofil	21
Abbildung 4: Ausschnitt des Stadtgebietes für Szenario 1	23
Abbildung 5: Belastung durch Lärm und Stickstoffdioxid (links). Belastung durch Stickstoffdioxid (rechts)	24
Abbildung 6: Stadtgebiet „Pirkheimer Straße“, „Uhlandstraße“ (Szenario 2) in Verbindung mit Höhenprofil (links); radiale Ausdehnung des Gebietes	25
Abbildung 7: Stadtgebiet „Sandberg“, „St. Johannis“ in Verbindung mit Höhenprofil	27
Abbildung 8: Ausschnitt des Stadtgebiets für das Szenario 2 (links); Ausschnitt des nördlichen Stadtgebiets für die mögliche Kombination der Szenarien 2 und 3 (rechts)	28
Abbildung 9: Stadtgebiet „Langwasser“	30
Abbildung 10: Höhenprofil der Region "Langwasser"	31
Abbildung 11: Sendungsstruktur eines Projektpartners eines ausgewählten Tages im Verhältnis der Anzahl der Sendungen pro Quadratkilometer innerhalb der einzelnen Postleitzahlengebiete	33
Abbildung 12: UPS-Mikrodepot in Hamburg. Wechselbrücken im städtischen Zentrum und logistische Feinverteilung	36
Abbildung 13: Umnutzung ehemaliger Einzelhandelsimmobilien als Mikrodepotstandort	37
Abbildung 14: Begegnungsverkehre zwischen Transporter und Lastenfahrrad	37
Abbildung 15: Vollkostenkurven der Transportsysteme mit Fahrern	41
Abbildung 16: Anwendungsoberfläche TransIT	47
Abbildung 17: Aufstellung einiger Objektdialoge	48
Abbildung 18: Fehlende Korrelation zwischen Volumen und Gewicht einer Sendung in der KEP-Branche	50
Abbildung 19: Übersicht Sendungsaufkommen eines Projektpartners in der Nürnberger Innenstadt	52
Abbildung 20: Sendungsaufkommen nach Wochentagen	53
Abbildung 21: Ergebnis Landkarte Simulation Maximum	54
Abbildung 22: Ergebnisse Simulation Maximum	54
Abbildung 23: Simulation Maximum Verlauf Tour 1 und 2	55
Abbildung 24: Simulation Maximum Verlauf Tour 3 und 4	56
Abbildung 25: Simulation Maximum Verlauf Tour 5 und 6	56
Abbildung 26: Ergebnis Landkarte Simulation Minimum	58
Abbildung 27: Ergebnisse Simulation Minimum	58
Abbildung 28: Ergebnis Landkarte Simulation Mittelwert	59

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Abbildung 29: Ergebnisse Simulation Mittelwert.....	59
Abbildung 30: Simulation Mittelwert Verlauf Tour 1-3.....	60
Abbildung 31: Simulation Mittelwert Verlauf Tour 4 und 5.....	61
Abbildung 32: Versuchsfahrzeug Radkutsche Musketier	63
Abbildung 33: Realer Streckenverlauf der Versuchsfahrt am 06.07.2016.....	64
Abbildung 34: Links: Benutzung von mit Pollern abgesperrten Querstraßen; Rechts: Parken in zweiter Reihe mit dem Lastenfahrrad	65
Abbildung 35: Anfangsphase des Mikro-Depot-Konzepts	68
Abbildung 36: Beladung der Lastenfahrräder im ersten Mikro-Depot in der Löffelholzstraße....	69
Abbildung 37: Geographische Lage und Eingangsbereich des Mikrodepots im Pilotgebiet „Innenstadt“	70
Abbildung 38: Geographische Lage und Eingangsbereich des Mikrodepots im Pilotgebiet „Wohngebiet“	70
Abbildung 39: Eingesetztes Lastenfahrradmodell „Wohngebiet“	81
Abbildung 40: Anfänglich eingesetztes Lastenfahrradmodell „Innenstadt“	89
Abbildung 41: Neues Lastenfahrradmodell für das Pilotgebiet „Innenstadt“	90
Abbildung 42: Aufbau der Ökobilanz nach ISO 14040	94
Abbildung 43: Postleitzahlengebiete des Nürnberger Stadtgebiets.....	100
Abbildung 44: Geographische Lage des DPD-Depots 190.....	102
Abbildung 45: Optimale Lage des Mikrodepots Quelle: Google Maps	105
Abbildung 46: THG-Emissionen beider Szenarien in Tonnen	117
Abbildung 47: NOx-Emissionen beider Szenarien in Kilogramm.....	118
Abbildung 48: PM10-Emissionen beider Szenarien in Kilogramm.....	119

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 Auflistung der Stadtgebiete unter der Betrachtung der Faktoren Fläche in Hektar, Haushalte, Bevölkerung mit Hauptwohnsitz, Einwohner pro Hektar und Haushalte pro Hektar</i>	<i>17</i>
<i>Tabelle 2: Ausschnitt der Zeitreihenanalyse über die Anzahl der Sendungen pro qkm im gesamten Nürnberger Stadtgebiet</i>	<i>34</i>
<i>Tabelle 3: Ist-Daten der Praxisphase 03/2017-10/2017 in Nürnberg.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabelle 4: Übersicht geeigneter Lastenfahrrad-Modelle</i>	<i>73</i>
<i>Tabelle 5 Übersicht der Auswertung der Herstellerfragebögen der Hersteller El Ciclo und Radkutsche.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabelle 6 Verschleißteile und Wartungskosten des Herstellers El Ciclo</i>	<i>78</i>
<i>Tabelle 7 Darstellung der Anschaffungskosten der Modelle "Scoiattolo" und "Muskettier".....</i>	<i>79</i>
<i>Tabelle 8: Im Betrieb aufgetretene Mängel der Lastenfahrräder</i>	<i>83</i>
<i>Tabelle 9 kWh-Verbrauch pro 11 km Tour des VOS3 Soll-Szenario</i>	<i>109</i>
<i>Tabelle 10 Ergebnisse THG-Emissionen Soll-Szenario</i>	<i>111</i>
<i>Tabelle 11 Abgasgrenzwerte für Fahrzeuge ab 2.610 kg</i>	<i>112</i>
<i>Tabelle 12 Ergebnisse Luftschadstoffausstoß Soll-Szenario.....</i>	<i>116</i>

Kurzfassung

Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt die Vorgehensweise, Analysen auf makro- und mikroskopischer Ebene, die Methodik und die operative Umsetzung des „Pilotprojektes zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Stadtgebiet Nürnberg“. Der Anspruch des Projektes lag darin, nicht nur ökologische Mehrwerte zu generieren, sondern eine nachhaltige Zustellform zu etablieren, die dauerhaft in die täglichen Abläufe der teilnehmenden KEP-Unternehmen implementiert wird. Dabei musste das Konzept neben einer nachweisbaren Reduzierung von Luftschadstoffen und Treibhausgasen auch ökonomisch effizient sein, so dass der Einsatz von Lastenfahrrädern eine echte logistische Alternative der Paketzustellung wird. Des Weiteren wurden im Sinne der gesellschaftlichen Akzeptanz aller Stakeholder der urbanen Logistik auch soziale Ziele qualitativ verfolgt, wie z.B. Erhöhung der Lebensqualität durch Verkehrsreduzierung in Wohngebieten oder die Sicherheit der Fußgänger in Fußgängerzonen und ein attraktives Stadtbild durch Nutzung von Bestandsimmobilien als Mikrodepots. Um die Zielerreichung zu garantieren, musste vor dem Beginn des Modellversuchs eine Big-Data-Analyse des realen Sendungsaufkommens der Projektpartner über eine Zeitreihe von mindestens sechs Monaten sowie eine stadtgeographische Analyse in Frage kommender Gebiete durchgeführt werden. Diese Zeitreihenanalysen der als geeignet identifizierten Gebiete wurden darauf aufbauend - über nahezu den gesamten Projektzeitraum – durch eine Tourenplanungssoftware validiert. Dabei musste das bis dato noch nicht realisierbare Routing von Fahrrädern (elektrisch unterstützt bis 25km/h) entsprechend kalibriert werden, sodass die Software den Anwendungsfall darstellen konnte. Die auf die Datenanalysen und Simulationen folgende Praxisphase des Projektes von März 2017 bis Oktober 2017 konnte den Nachweis in den Pilotgebieten erbringen, dass sieben konventionelle Zustellfahrzeuge durch acht Lastenfahrräder dauerhaft ersetzt wurden, bei einer Reduzierung der Luftschadstoffe um 25% gegenüber dem Ausgangs-Szenario. Die Wirtschaftlichkeit des Konzeptes drückt sich auch in der dauerhaften Fortsetzung des operativen Zustellbetriebs über das Projektende hinweg aus, bei fortlaufender Erweiterung der Zustellgebiete. Zu keinem Zeitpunkt sind die Projektpartner der Praxisphase dabei für Investitionen oder für den operativen Betrieb des Mikro-Depot-Konzeptes subventioniert worden. Das Nürnberger Mikro-Depot-Konzept wurde dafür im Herbst 2017 in Nürnberg mit dem N-Ergie-Förderpreis und in Wien mit dem VCÖ-Mobilitätspreis für nachhaltige Mobilität in der Kategorie „Internationale Vorbildprojekte“ ausgezeichnet.

Einleitung

Die Kurier-, Express- und Paket-Branche (KEP) ist in Deutschland in einem beständigen Wachstum begriffen, ein großer Teil der Logistik auf der sog. „Letzten Meile“ findet in städtischen Ballungsräumen statt. Die dadurch entstehenden Lieferverkehre konkurrieren mit den ebenfalls stark zunehmenden motorisierten Individualverkehren sowie dem öffentlichen Personennahverkehr um die Flächen des Öffentlichen Raumes und belasten die Umwelt mit Stickoxid- und Feinstaubemissionen, so auch in Nürnberg.

Mikro-Depots sind an geeigneten Orten in den Zustellbezirken von KEP-Diensten abgestellte Container oder geeignete Immobilien, welche das Bestücken von Lastenfahrrädern oder fußläufigen Transporthilfen ermöglichen. Mikro-Depots können kooperativ genutzt werden, wenn die Zustellung und Abholung von Sendungen in der Verantwortung des jeweiligen KEP-Dienstes bleibt und eine Vermischung von Sendungen im Mikro-Depot durch geeignete Maßnahmen ausgeschlossen ist. Mit Hilfe eines Mikro-Depots kann die eigentliche Zustellung oder Abholung auf einer „Allerletzten Meile“ mit lokal emissionsfreien Lastenfahrrädern in effizienter Art und Weise erfolgen.

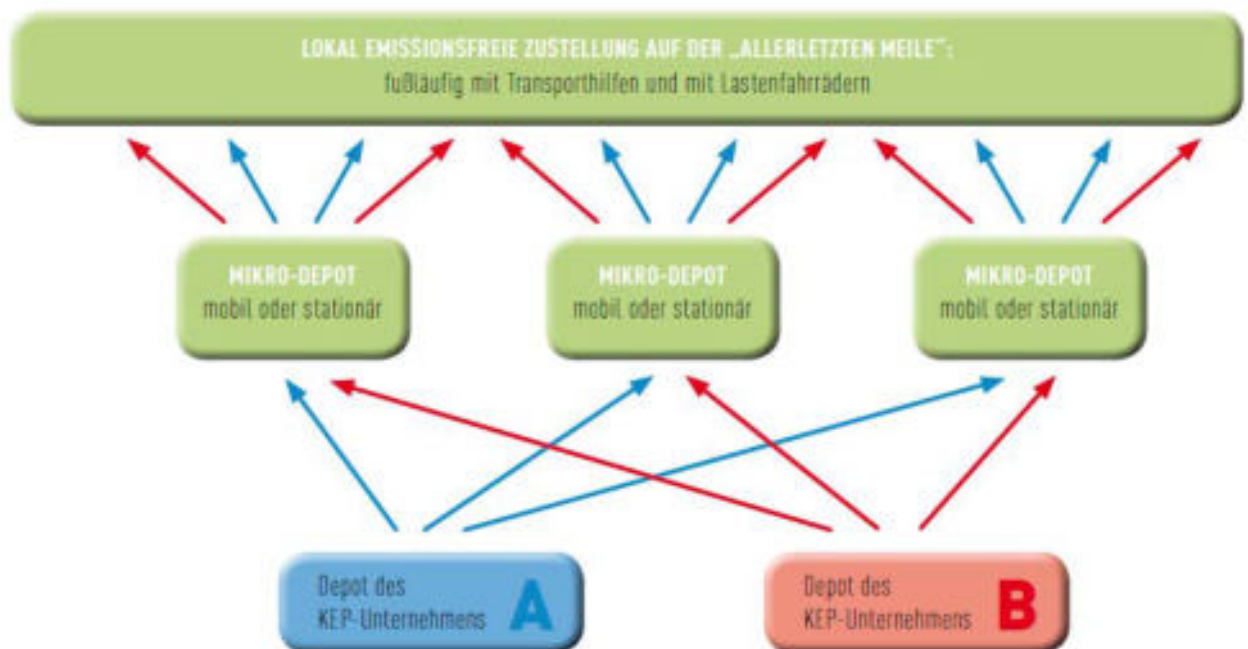


Abbildung 1 Mikro-Depot-Konzept

Quelle: Eigene Darstellung

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Ziel des Pilotprojektes in Nürnberg war der Nachweis der Praxistauglichkeit des Konzeptes und der Erreichung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Ziele der beteiligten KEP-Unternehmen und der Stadt Nürnberg. Im Versuchsaufbau sollte daher eine auf der „Letzten Meile“ emissionsfreie Ver- und Entsorgung von Einzelhandel, Gewerbetreibenden und Privatpersonen mit Paketen realisiert werden, bei gleichbleibender logistischer Servicequalität. Insbesondere bei in Zukunft drohenden Einfahrverboten für Dieselfahrzeugen in deutsche Innenstädte wurde damit ein wichtiger Beitrag zur Sicherung der Geschäftsgrundlagen von Einzelhandel und Gewerbe sowie einer logistischen Grundversorgung von Privatpersonen mit Waren geleistet.

1 Projektpartner und Projektmeilensteine

Unterstützt durch das Bayerische Staatsministerium des Inneren, für Bau und Verkehr, wurde das Pilotprojekt zur nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste auf dem Stadtgebiet Nürnberg unter der Leitung der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm durchgeführt.

Eine Projektbeteiligung ist seitens der KEP-Branche mit DPD GeoPost (Deutschland) GmbH und General Logistics Systems Germany GmbH & Co. OHG vereinbart worden. Die beiden KEP-Dienstleister waren von Beginn an mit großem Engagement an dem Projekt beteiligt und waren gegenüber der alternativen Zustellmöglichkeit sehr aufgeschlossen.

Kommunaler Projektpartner waren die Stadt Nürnberg, die dieses Projekt sowohl finanziell als auch administrativ unterstützte. Unter der Führung des Wirtschaftsreferats, wurde einstimmig, über alle städtischen Referate hinweg, die Bewilligung für die aktive Unterstützung zugesagt. So wurden beispielsweise die notwendigen Ausnahmeregelungen für das Befahren der Fußgängerzonen durch Lastenfahrräder sowohl in der städtischen Altstadt als auch im Rest des städtischen Gebiets durch den Servicedienst Öffentlicher Raum (SÖR) für alle Fahrzeuge genehmigt.

Der Bundesverband Paket & Expresslogistik e. V. (BIEK), der CNA Neuer Adler e.V. und der Verkehrsausschuss der Industrie und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken beteiligten sich ebenfalls an der Zusammenarbeit. Dabei leistete die IHK auch finanzielle Unterstützung und der CNA fungierte in der Rolle für die Öffentlichkeitsarbeit.

Konzeptionell-organisatorisch war das Pilotprojekt in drei große Arbeitspakete gegliedert, die allesamt erfolgreich abgearbeitet werden konnten. Dabei umfasste das Arbeitspaket 1 zum einen die Analyse des bereits zu Beginn feststehenden Gebietes der Innenstadt, welches GLS seit Beginn des Projektes bis zum heutigen Tag mit Lastenfahrrädern beliefert und dieses sogar noch zusätzlich vergrößerte. Zum anderen wurde das gesamte Stadtgebiet analysiert, um so einen bestmöglichen Standort für ein Pilotgebiet „Wohngebiet“ für den KEP-Dienstleister DPD zu finden. Hierbei war es wichtig, dass die Sendungsstrukturen sowie die Volumina ermittelt werden, um so das geeignete Wohngebiet festzulegen. Des Weiteren war es Aufgabe innerhalb des ersten Arbeitspakets, die konventionellen Zustelltouren auf ihre Umweltwirkungen hin zu

analysieren und das Sendungsaufkommen sowohl zu identifizieren und zu geocodieren.

Arbeitspaket 2 widmete sich der Evaluation logistischer Konzepte für die Ver- und Entsorgung der Mikrodepots, geeigneter Flächen oder Immobilien in beiden Pilotgebieten und einer Marktrecherche von auf dem Markt befindlichen Lastenfahrrädern und Transporthilfen. Zudem wurden die neuen logistischen Prozesse anhand der erhobenen Daten mit einer Tourenplanungssoftware simuliert und anschließend durch eine Ökobilanzierung der Sollkonzepte bewertet. Neben den logistischen Auswirkungen und Veränderungen wurde die sozialen Nachhaltigkeitsziele der Stadt Nürnberg auf deren Zielerreichung geprüft und bewertet. Nach der Konzeption und der Auswertung der simulierten Daten wurde das Commitment der Stadt Nürnberg und der KEP-Unternehmen zur Umsetzung der Soll-Konzepte eingeholt.

Arbeitspaket 3 bestand aus der operativen Umsetzung und dem Verwirklichen der Sollkonzepte im realen täglichen Betrieb der KEP-Unternehmen (Praxisphase). Um zu gewährleisten, dass es zu keinerlei straßenrechtlichen Verstößen kommt, wurden für alle Lastenfahrräder die erforderlichen Genehmigungen zum Befahren der Fußgängerzone eingeholt. Für die logistische Umsetzung wurden Verträge für die Immobilien der Mikrodepotstandorte geschlossen. Viele Tests vor der Inbetriebnahme des Konzepts wurden von Schulungen des Personals begleitet, um diese bestmöglich auf die neue Methodik der Zulieferung vorzubereiten. Zusätzlich mussten neue Geschäftsprozesse in beiden teilnehmenden Unternehmen implementiert werden, da der logistische Ablauf der Lastenfahrradzustellung gänzlich anders durchzuführen ist als die konventionelle Zustellung durch den Transporter. Nach der Inbetriebnahme des Mikro-Depot-Konzepts wurden fortwährend Ist-Daten aufgenommen, die zur Nachweisführung einer ökonomischen und ökologischen Effizienz dienten. Zudem wurden neben diesen beiden genannten Aspekten auch die Einhaltung der sozialen Nachhaltigkeitsziele beobachtet.

2 Vorüberlegungen für die Auswahl geeigneter Stadtgebiete in Nürnberg

Das einleitende Kapitel widmet sich der Herangehensweise für eine erfolgreiche Etablierung des Mikro-Depot-Konzepts und dessen Übertragbarkeit auf andere deutsche Städte. Im Speziellen soll zunächst auf die Analyse der städtischen Gebiete hinsichtlich ihrer Eignung für Mikro-Depot-Konzept eingegangen werden, da für die Umsetzung verschiedene räumliche Strukturen geographische Restriktionen nach sich ziehen können. Das Pilotprojekt war konzeptionell so ausgelegt, dass zusätzlich neben der Nürnberger Innenstadt (innerhalb des Altstadttrings) auch ein Wohngebiet ausgewählt werden sollte, das den Anforderungen einer erfolgreichen Umsetzung auf Basis ökonomischer und ökologischer Grundsätze entspricht. Hierbei ist es aufgrund der konzeptionellen Herangehensweise notwendig, das Stadtgebiet neben technischen und ökonomischen Restriktionen auf mögliche geographische Reglementierungen oder Einschränkungen hin zu untersuchen, da die geographische Konstitution der städtischen Gebiete eine essenzielle Rolle für das erfolgreiche Gelingen des Konzeptes darstellt. In der Folge wird auf Grundlage des Pilotprojektes in concreto näher auf die Stadt Nürnberg eingegangen, wenngleich sich die konzeptionelle(!) Herangehensweise auch auf andere deutsche Städte übertragen lässt. Neben der Realisierung des Projekts in der Innenstadt, sollte eine Möglichkeit gefunden werden, ein zweites Teilprojekt innerhalb eines Nürnberger Wohngebiets umzusetzen. Dabei war es das Ziel, die am geeignetsten Gebiete für die Umsetzung des Teilprojekts „Wohngebiet“ herauszufinden. Anhand der Untersuchung geographischer Kennziffern wie beispielsweise „Einwohner pro Quadratkilometer“ bzw. „Haushalte pro Quadratkilometer“ oder durch die Betrachtung der jeweiligen Höhenprofile der einzelnen städtischen Gebiete kann in der Folge eine Vorauswahl geeigneter Gebiete gegeben werden. Für die Analyse wurden unter anderem die von der Stadt Nürnberg bereitgestellten innergebietlichen Strukturdaten aus dem Jahr 2015 herangezogen. Im Bereich der ökologischen Analyse wurden Werte aus dem Messprogramm Luftschadstoffe verwendet, welches sich über die Jahre 2002 – 2011 erstreckte.

Die Stadt Nürnberg ist in 87 statistische Bezirke unterteilt, über welche aus den veröffentlichten Jahrbüchern und über den interaktiven Bezirksatlas der Stadt Nürnberg statistische Daten zu entnehmen sind. Grundsätzlich muss überlegt werden, welche Daten eine Relevanz bezüglich des Projekts aufweisen. Hierbei muss vor allem die Zustellung durch das Lastenrad in Betracht gezogen werden. Da dieses in mehreren

Gesichtspunkten wie Nutzlast, Ladevolumen und Reichweite restriktiv beeinflusst ist, muss die Analyse dementsprechend ausgerichtet sein, dass das Einzugsgebiet für die Zustellung und Abholung der Pakete davon unbeeinträchtigt bleibt. So ist das Lastenfahrrad sowohl durch das aufzunehmende Volumen bis maximal 2m³ wie auch durch die Nutzlast bis maximal 300kg beschränkt. Dies hat zur Folge, dass sich das Lastenfahrrad weder für sperrige Güter mit großen Maßen oder Volumina eignet, noch für schwere Pakete wie Möbel, Flachbildfernseher o.ä. Bei einer vollen Auslastung des Lastenfahrrads, welches modellabhängig bis zu 300kg Nutzlast transportieren kann, muss das Lastenfahrrad zwangsläufig mit einem Elektromotor ausgestattet sein. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Kapazität des Akkus auf die Länge der täglich gefahrenen Strecke dimensioniert wird, sodass es hierbei zu keinerlei Einschränkungen bezüglich der Unterstützung des Elektromotors führt. Dennoch sollte der Akku nicht überdimensioniert sein, da gerade leistungsstarke Akkus häufig ein sehr hohes Gewicht aufweisen und sehr teuer sind. Diese beiden Faktoren wirken sich negativ auf die gesamtwirtschaftliche Betrachtung des Konzepts aus und sind daher mit äußerster Sorgfalt zu ermitteln. Zudem korreliert die Entladung des Akkus auch mit der zu überwindenden Höhe. Folglich sind Gebiete wenig geeignet, in denen sowohl die absolute Zahl an Höhenmeter hoch ist, oder häufig viele Höhenmeter überwunden werden müssen. Zusätzliches Hindernis für die Belieferung via Lastenrad sind Zustelladressen, bei denen es sich um logistische Senken handelt. Logistische Senken werden im Rahmen des Pilotprojektes als solche bezeichnet, wenn drei oder mehr Pakete innerhalb einer Tour zu derselben Zustelladresse geliefert werden. Die Datenanalyse sowie Experteninterviews haben gezeigt, dass es sich bei der Überschreitung dieses Grenzwertes meist um eine Zustelladresse handelt, in der vorwiegend B2B Geschäftsverhältnisse bestehen, also Einzelhandel, Dienstleistungsbetriebe und Gewerbe. B2B - Sendungen sind für die Zustellung durch das Lastenfahrrad nicht generell auszuschließen, wobei schon festgestellt werden konnte, dass die Höhe der Anzahl der Pakete pro Stopp größer drei eine Kennzahl ist, bei der das Lastenfahrrad für die Zustellung nahezu ungeeignet ist. Dies liegt daran, dass das Lastenrad, um diesen Stopp zu beliefern, tendenziell ein großes Paketvolumen an dieser Adresse zustellt. Die Folge ist, dass der begrenzte Laderaum schneller leer wird, sodass das Lastenrad nach kurzer Zeit wieder ans Mikrodepot zurückkehren muss, um erneut mit nachgeladenen Paketen loszufahren. Im negativsten Szenario müsste das Lastenrad eine Lieferadresse mehrmals anfahren, da die Menge oder das Volumen aufgrund von Kapazitätsbeschränkungen nicht komplett

in dem Laderaum des Lastenfahrrads verstaut werden könnte. Dies führt zu einem enormen Absinken der Effizienz des Konzepts. In Anbetracht dieser Problematik ist es aus konzeptioneller Warte heraus betrachtet sinnvoll, logistische Senken komplett aus der Lastenfahrradtour zu entfernen und die Zustellung an diesen Stellen zu vermeiden. Anders gesehen sind gerade all jene Stopps, die nur ein Paket pro Stopp aufweisen, besonders für die Zustellung via Lastenrad geeignet, da diese Belieferungen sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht das größte Einsparpotenzial besitzen. Zeitlich ist es sinnvoll, gerade B2C-Lieferungen via Lastenfahrrad zuzustellen, da nicht die Fahrt zum nächsten Stopp, sondern die Zustellung per se den meisten Zeitbedarf benötigt. Hier weist das Lastenfahrrad verkehrliche Vorteile gegenüber der konventionellen Zustellung etwa durch Nutzung der Einbahnstraßen gegen die Fahrtrichtung, Abkürzungsmöglichkeiten bei dichter Bebauung und dem Wegfall der Suche nach geeigneten Haltepunkten klare Vorteile auf. Im Sinne der Nachhaltigkeit muss angeführt werden, dass gerade diese Stopps mit einem Paket zu einer hohen Belastung der Umwelt führen, da häufig der Motor beim Zustellprozess im Leerlauf weiterläuft und durch das ständige erneute Anfahren besonders viel Feinstaub und Stickoxide freigesetzt werden. Ökonomisch sind gerade diese Stopps im B2C Bereich bei der klassischen Zustellung auf der letzten Meile die teuersten, da in der gleichen Zeit weniger Pakete zugestellt werden können als bei einer Tour eines Transporters, der beispielsweise bei einem Elektromarkt eine Vielzahl von Paketen an derselben Adresse zustellt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass möglichst kleinräumige, urbane Gebiete in den Fokus der Aufmerksamkeit geraten müssen, die durch ein hohes Sendungsaufkommen, welches durch bestenfalls kleinteilige und leichte Pakete geprägt ist, konstituiert sind. Zudem ist es wünschenswert, wenn die in dem Gebiet anfallenden Touren viele Stopps aufweisen, da hierbei das Lastenfahrrad im Gegensatz zu den konventionellen Zustell- und Abholvorgängen klar zu bevorzugen ist. Die Herangehensweise gilt de facto für alle Städte, wenngleich jede Stadt ihre eigenen stadtstrukturellen Spezifika aufweist, die es jedes Mal aufs Neue zu beachten gilt. Im Folgenden soll die Vorgehensweise und Analyse der Stadt Nürnberg näher betrachtet werden.

3 Makroskopische Betrachtung

3.1 Analyse des Stadtgebiets Nürnberg

Bei der Analyse wurden die 87 Bezirke auf folgende Faktoren untersucht:

- Fläche in Hektar
- Einwohner mit Hauptwohnsitz
- Haushalte
- PLZ

Daraus lassen sich folgende Kennwerte für die jeweiligen Gebiete ableiten:

- Einwohner pro Hektar
- Haushalte pro Hektar

Diese Vorgehensweise filtert die Gebiete hinsichtlich ihrer Einwohnerdichte, welche aus ökonomischer Sicht das Hauptkriterium bildet, da dieser Kennwert für eine Vielzahl von Restriktionen ausschlaggebend ist. Es besteht nämlich eine hohe Korrelation zwischen der Einwohnerdichte und der ökonomischen Sinnhaftigkeit des zu empfehlenden „Wohngebiets“. De facto ist der mathematische Bezugsrahmen (Hektar, km², o.ä.) unerheblich – für die Stadt Nürnberg ist aus den innerstädtischen Strukturdaten die Bezugsgröße Hektar vorliegend, sodass diese als Betrachtungsgröße herangezogen wurde. Den Referenzwert der nachfolgenden Betrachtung bildet die Kennzahl der „Haushalte pro Hektar“. Dies fußt auf der Tatsache, dass sich dieser Wert prinzipiell noch besser als Referenzwert eignet, da dieser aufgrund der möglichen Zustelladressen aussagekräftiger ist, als der der absoluten Anzahl der Einwohner innerhalb eines Bezirks. Da die Konzeption eher von der Anzahl der Stopps als von der Anzahl der Pakete abhängig ist (dies würde eine Betrachtung über das Kriterium der „Einwohner pro Hektar“ nach sich ziehen), führt die Referenz „Haushalte pro Hektar“ zu noch präziseren Ergebnissen. Nichtsdestotrotz kann aber noch konstatiert werden, dass in den Gebieten, in denen die meisten „Haushalte pro Hektar“ zu verorten sind, auch die meisten Einwohner pro Hektar wohnen, sodass diese Unterscheidung nicht zu sehr ins Gewicht fällt. Erst an Position 8 gibt es eine Abweichung, bei der verhältnismäßig mehr „Haushalte pro Hektar“ als „Einwohner pro Hektar“ zu finden sind, sodass für die Analyse der Gebiete nicht zwingend die Anzahl der „Haushalte pro Hektar“ erforderlich sind, sondern es durchaus ausreicht die Einwohnerdichte zu betrachten. Nachfolgende Tabelle (vgl. Tab. 1) zeigt

die Bezirke, gestaffelt nach der Anzahl von „Haushalten pro Hektar“, in absteigender Reihenfolge.

Tabelle 1 Auflistung der Stadtgebiete unter der Betrachtung der Faktoren Fläche in Hektar, Haushalte, Bevölkerung mit Hauptwohnsitz, Einwohner pro Hektar und Haushalte pro Hektar

Nr.	Bezirk	Fläche in Hektar	Haushalte	Bevölkerung mit Hauptwohnsitz	Einwohner pro Hektar	Haushalte pro Hektar
16	Steinbühl	55,71	7.510	13.181	236,60	134,81
13	Galgenhof	84,84	11.379	19.927	234,88	134,12
11	Glockenhof	82,99	10.362	18.042	217,40	124,17
08	Pirkheimer Straße	41,19	4.991	7.890	191,55	121,17
04	Gostenhof	51,78	5.339	9.462	182,73	103,11
23	Sandberg	70,94	6.654	10.889	153,50	93,80
25	Uhlandstraße	70,71	6.478	11.467	162,17	91,61
06	Altstadt St. Sebald	79,62	6.789	9.197	115,51	85,27
07	St. Johannis	59,41	4.986	8.143	137,06	83,93
14	Hummelstein	73,22	6.064	10.791	147,38	82,82

Quelle: eigene Darstellung nach „Innergebietliche Strukturdaten Nürnberg 2016“.

Auf der nachfolgenden Abbildung (vgl. Abb.2) wurden die Gebiete, die sich innerhalb der ersten 10 Platzierungen befinden (inkl. Bezirk 01 Altstadt St. Lorenz) und somit im gesamten Stadtgebiet Nürnbergs die höchsten Werte an „Haushalte pro Hektar“ aufweisen, visuell hervorgehoben. Dabei sind die Bezirke für das Teilprojekt Innenstadt in der Farbe „grün“ markiert. Die in der Farbe „blau“ markierten Gebiete sind dabei die mit der höchsten Haushaltsdichte pro Hektar. Da der Stadtbezirk „06 – Altstadt St. Sebald“ zwar unter der Betrachtung der Haushalte pro Hektar zu den näher zu betrachtenden Bezirken zählt, aber schon durch das Teilprojekt „Innenstadt“ abgedeckt wird, verliert dieser Teil in der Untersuchung für das Teilprojekt „Wohngebiet“ seine Relevanz.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass die drei Stadtbezirke Steinbühl, Galgenhof und Glockenhof aneinandergrenzen und somit ein großes Gebiet vorliegt, in dem die idealen Standortfaktoren wie Kleinräumigkeit und hohe Dichte an Haushalten vorliegen. Diese müssen aber dennoch nochmals auf mikroskopischer Betrachtungsweise untersucht werden. Diese Untersuchungen analysieren vor allem die Deckungsgleichheit der Gebiete mit der Sendungsstruktur des Projektpartners, da

es nicht zwingend der Fall sein muss, dass ein Gebiet, das sich aus stadtgeographischen Faktoren sehr gut eignet, mit der Sendungsstruktur des KEP-Unternehmens deckungsgleich ist. Dies bedeutet, dass trotz der gebietsbezogenen Gegebenheiten, welche essenziell wichtig sind, und auch die Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung sind, dennoch das Paketaufkommen in der jeweiligen Region entsprechend hoch sein muss.

Dieses Gebiet könnte potenziell je nach weiterer Betrachtung auch auf das Gebiet Hummelstein ausgeweitet werden, welches sich südlich an die genannten Bezirke anschließt. Das Gebiet Gostenhof belegt zwar mit 103,11 Haushalten Platz 5 der Tabelle 1, kommt aber im Gegensatz zu den anderen Bezirken nicht an deren Attraktivität heran, da sich in dessen unmittelbarer Umgebung kein weiteres Gebiet anschließt. Als weitere relevante Gebiete kämen im Sinne der Nähe zueinander bei gleichzeitigem Herausstellungsmerkmal von vielen Haushalten pro Hektar die sich an die nördliche Altstadt anschließenden Bezirke „Pirkheimer Straße“, „Uhlandstraße“ in Kombination oder separat mit den Gebieten „St. Johannis“ und „Sandberg“ in Betracht.

Im Folgenden sollen innerhalb verschiedener Szenarienanalysen die jeweils vorausgewählten Gebiete näher betrachtet werden. Dabei werden weitere Faktoren wie die Größe des Gebietes per se, als auch ein weiterer entscheidender Faktor – der des Höhenprofils – analysiert. Neben der ökonomischen Machbarkeitsprüfung sollen vor allem im Hinblick auf die Dieselpolitik und den damit verbundenen erhöhten Schadstoffausstößen von Feinstaub und Stickoxiden im städtischen Raum die ökologischen Auswirkungen mit in die Analyse einbezogen werden. So wäre aus konzeptioneller Sicht das Maximalziel eine höchstmögliche Deckungsgleichheit zwischen ökonomischem und ökologischem Nutzen durch das Mikro-Depot-Konzept zu erreichen, was konkret heißt, dass ein maximaler Wert an Sendungen durch die Substitution der Transporter durch Lastenfahrräder an den derzeit am meisten schadstoffbelasteten innerstädtischen Regionen erfolgen sollte. Aus stadtgeographischer Sicht können alle in Abbildung 2 markierten städtischen Bezirke dem (engeren/weiteren) Innenstadtgürtel zugeordnet werden, was aufgrund des politischen Drucks bezüglich der Reduktion von Abgasen in den Innenstädten auch für die Stadt Nürnberg einen weiteren Mehrwert darstellt.

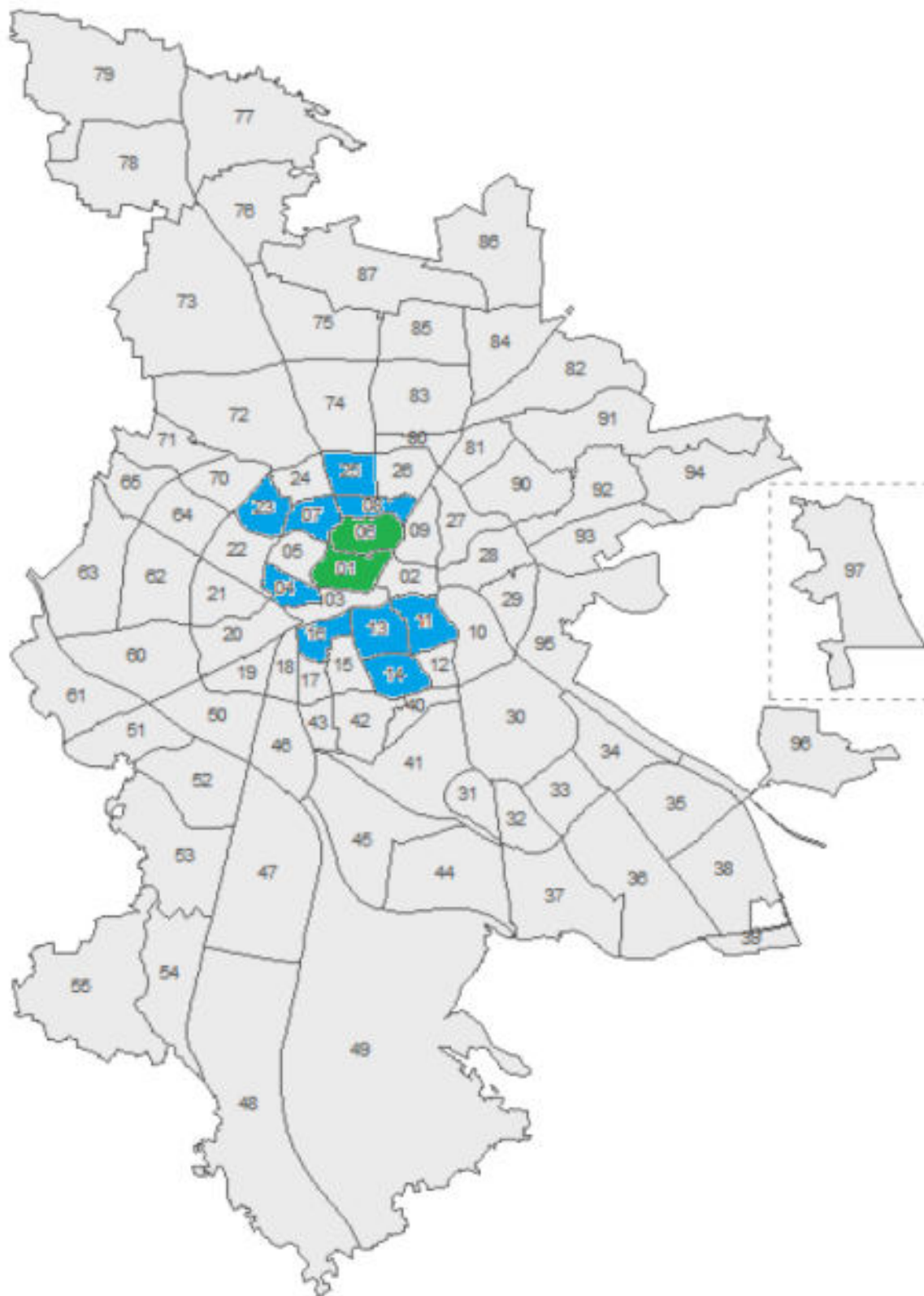


Abbildung 2 Statistische Bezirke der Stadt Nürnberg

Quelle: eigene Hervorhebungen nach „Innergebietliche Strukturdaten Nürnberg 2016“

3.1.1 Szenario 1 – Steinbühl, Galgenhof, Glockenhof und Hummelstein

Auf Grundlage der Einwohnerdichte soll innerhalb einer Szenarienanalyse vor allem das Höhenprofil der jeweiligen Region genauer betrachtet werden, da dieses sich bei entsprechender Ausprägung negativ auf die Reichweite der Akkuleistung auswirkt, was wiederum zu Lasten der Wirtschaftlichkeit des Mikro-Depot-Konzepts in der entsprechenden Region geht. Demnach sollte darauf geachtet werden, dass das Zustellgebiet von einer notwendigen Ebenenrigkeit geprägt ist. Das genaue Untersuchungsgebiet (vgl. Abb.3) ist dabei noch nicht fest fixiert und ist im Nachhinein noch veränderbar, jedoch unterliegt dieses stadtgeographischen Entitäten und urbanen Strukturen bzw. der städtischen Flächennutzung, da beispielsweise große gewerblich genutzte Flächen, die sich nicht für das Lastenfahrrad eignen, ausgeschlossen sind. Zudem wird versucht, dass möglichst solche Gebiete miteinander verbunden und zum Untersuchungsraum erklärt werden, die sich allesamt durch eine hohe Einwohnerdichte auszeichnen und dabei zusätzlich durch eine Nähe zueinander geprägt sind. Dabei sollten auch „natürliche“ oder verkehrliche Strukturen wie große Verbindungsstraßen oder Stadtautobahnen mit in die Bewertung und die damit verbundene Gebietsabgrenzung eingeschlossen werden. Zudem spielen die Postleitzahlen innerhalb der ausgewählten Regionen eine nicht zu vernachlässigende Rolle, auf die im Folgenden noch genauer eingegangen wird. Abbildung 3 zeigt das Stadtgebiet, in dem die Stadtbezirke Steinbühl, Galgenhof und Hummelstein besonders hervorgehoben worden sind. Betrachtet man in Verbindung des Stadtgebiets das Höhenprofil, so stellt man fest, dass sich dieses sehr gut eignet, da es im kompletten Verlauf nur ca. 10 Meter Höhendifferenz aufweist. Ausgenommen das Höhenprofil des Stadtbezirks Hummelstein, (vgl. Abb. 3) welches in der Darstellung ab ca. 6000m auf der Abszisse abgebildet zu sehen ist, steigt nochmals um weitere 8m an, was dann insgesamt zu einer Höhendifferenz von 18 Metern führen würde. Inwieweit dies den Akku des Lastenfahrrads zu sehr belastet, muss nach Bekanntwerden der verwendeten Fahrzeuge getestet werden. Sollte sich herausstellen, dass sich die 18 Meter Höhendifferenz zu Lasten der Reichweite auswirken, kann man das ausgewählte Stadtgebiet der Zulieferung auch um den Stadtbezirk Hummelstein verkleinern, sodass nur die anderen drei aneinanderhängenden Stadtbezirke in Form des Mikro-Depot-Konzeptes versorgt werden. An dieser Stelle soll auch nochmals darauf hingewiesen werden, dass diese Analyse nur die Potenziale des jeweiligen Gebietes aufzeigt. Selbstverständlich müssen die Untersuchungen auch mit der Sendungs- und Kundenstruktur

Sendungsstruktur des am Teilprojekt „Wohngebiet“ partizipierenden Unternehmers korrelieren, da es ansonsten sein kann, dass Teile der Bezirke von dem Paket- und Lieferdienst gar nicht beliefert werden. Dies hätte zur Folge, dass beispielsweise ein Stadtbezirk, der sich grundsätzlich für die betrachtete Sonderform des kombinierten Verkehrs eignen würde, keine Deckungsgleichheit mit den Sendungsdaten des in dem Gebiet ausliefernden Unternehmens aufweist. Sollte es zu dieser Entwicklung kommen, müsste man die Bezirke bzw. die Ausrichtung des Belieferungsgebietes nochmals feinjustieren.

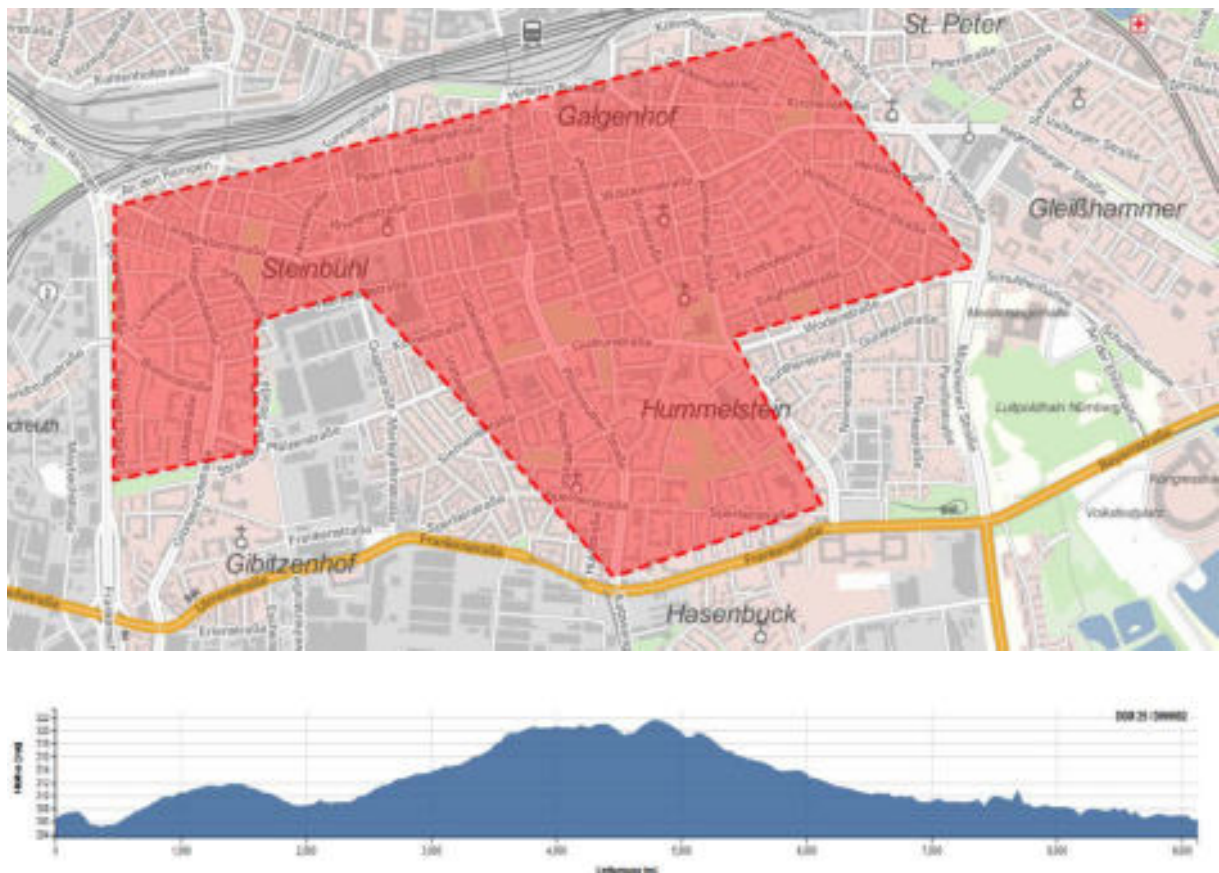


Abbildung 3 Stadtgebiete Steinbühl, Galgenhof, Glockenhof, Hummelstein in Verbindung mit Höhenprofil

Quelle: eigene Darstellung nach BayernAtlas.

Da die Auslieferung von Paketen durch das Lastenfahrrad durch Volumen- oder Gewichtskapazitäten beschränkt ist, besteht zunächst der Grund zu der Annahme, dass ein Lastenfahrrad bei gleicher Tourlänge nicht ausreicht, um ein konventionelles Lieferfahrzeug zu ersetzen. Im Rahmen von Berechnungen wurde dieser Tourenersatz anhand von drei ausgewählten, sich bereits auf dem Markt befindenden oder innerhalb

von anderen Projekten zum Einsatz gekommenen Lastenfahrradmodellen, untersucht. Diese Berechnungen sind essenziell, da sichergestellt werden muss, dass das ausgewählte Gebiet eine nicht zu große Ausdehnung hat, da ansonsten die logistischen Kapazitäten oder die Kapazitäten des Akkus überschritten werden könnten.

Der Vollständigkeit wegen wurden dabei sowohl ein- als auch zweispurige Lastenfahräder in der Berechnung betrachtet, auch wenn seit Beginn des Projekts feststeht, dass zur effektiven Umsetzung des Mikro-Depot-Konzepts zwingendermaßen zweispurige Lastenfahräder eingesetzt werden müssen; der Vergleich stand auch unter dem Credo der Vergleichbarkeit zwischen ein- und zweispurigen Lastenfahrädern und ob es diesbezüglich entscheidende Unterschiede bezüglich der Akkuleistung auszumachen gilt. Es stellte sich aber heraus, dass hierbei keine eklatanten Unterschiede erkennbar wurden.

Als Referenzmodell wurde ein handelsüblicher Mercedes Sprinter mit einem Fassungsvermögen von 16m³ herangezogen. Zum Vergleich auf der Ebene der Lastenfahräder wurden der „CycloCargo“, das „I-Bullit“ und der „CargoCruiser“ analysiert (vgl. 6.1). Wichtig hierbei ist, dass bezüglich der Reichweite stets die Rückfahrt des Lastenfahrrades zum Mikro-Depot, nachdem es die Pakete ausgeliefert hat, berücksichtigt wird. Bei der Berechnung wurden hinsichtlich der Reichweite der einzelnen Lastenfahräder Erfahrungsrichtwerte in Bezug auf die Akkuleistung aus anderen Anwendungsbereichen übernommen.

Nach der Analyse ergeben sich folgende Werte, die durch den radialen Abstand vom Mikro-Depot zur Substitution eines konventionellen Fahrzeuges abgebildet werden.¹

- CycloCargo: 1,17 km
- I-Bullit: 1,58 km
- CargoCruiser: 2,33 km

¹ Hierbei wurden die durchschnittlichen Strecken einer Tour innerhalb dieses Gebietes in Betracht gezogen und die logistische Leistung des Sprinters auf Grundlage von Volumen und Gewicht der Pakete auf das Lastenfahrrad inkl. mehrmaligen Nachladens am Mikrodepot übertragen.



Abbildung 4 Ausschnitt des Stadtgebietes für Szenario 1

Quelle: eigene Darstellung nach BayernAtlas.

Abbildung 4 zeigt, dass sich das gesamte untersuchte Gebiet innerhalb eines Radius von 1,29 km erstreckt. Dies hat zur Folge, dass eine Kohärenz bezüglich ausgewähltem Gebiet und der Möglichkeit, dieses mit den Lastenfahrrädern bezüglich ihrer Akkuleistung zu beliefern besteht.

Zusätzlich ist der Anspruch des Projekts für eine Klimaverbesserung der Gesamtstadt beizutragen. Dies ist durch die emissionsfreie Zustellung und Abholung der Pakete gegeben. Vergleicht man nun das untersuchte Gebiet mit den thematischen Karten der Stadt Nürnberg (Amt für Stadtforschung und Statistik) bezüglich der Belastung durch Lärm und Stickstoffdioxid, so stellt man fest, dass im ausgewählten Gebiet die Werte des NO_2 -Ausstoßes im städtischen Vergleich mit am höchsten sind und über einem Wert von $42\mu\text{g}/\text{m}^3$ und höher liegen. Da Werte ab über $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ als für den Menschen gesundheitsschädlich eingestuft werden, ist es daher im „doppelten“ Sinne erstrebenswert, diese hoch belasteten Bezirke als Gebiete für das Teilprojekt „Wohngebiet“ zu empfehlen.

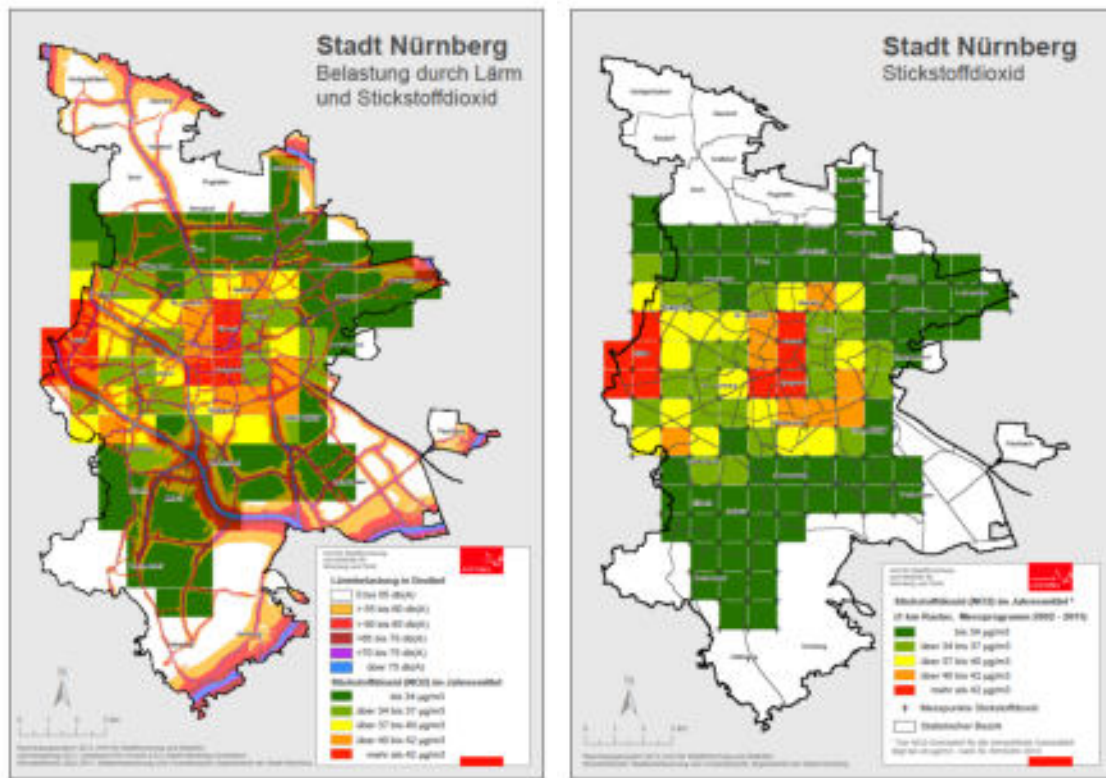


Abbildung 5 Belastung durch Lärm und Stickstoffdioxid (links). Belastung durch Stickstoffdioxid (rechts)

Quelle: Amt für Stadtforschung und Statistik. Stadt Nürnberg.

Ebenfalls ist gerade die Südstadt durch ein hohes Verkehrsaufkommen belastet, welches sich durch eine hohe Lärmbelästigung und der Präsenz von vielen Fahrzeugen bemerkbar macht. Diese beiden Komponenten werden durch die Etablierung des Mikro-Depot-Konzeptes ebenfalls positiv beeinflusst. Durch die Substitution von konventionellen Lieferfahrzeugen der 3,5t- Klasse, trägt die Auslieferung auf der letzten Meile via Lastenfahrrad zu einer lokal emissionsfreien, stadtverträglichen, lärmbegünstigenden und klimaneutralen Logistik bei. Dabei bekräftigen sich die positiven Auswirkungen des konzeptionellen Ansatzes gegenseitig, was die selbigen zusätzlich verstärkt. Die sich reziprok beeinflussenden Faktoren führen zu einer klassischen win-win-Situation aller Beteiligten. Sowohl die beteiligten KEP-Dienstleister als auch die Kommune und die ansässigen Bürger profitieren durch die Zustellung durch Lastenfahrräder auf der letzten Meile. Gerade urbane Gebiete sind aus Sicht ihrer infrastrukturellen Konstitution grundsätzlich relativ schwer durch konventionelle Fahrzeuge befahrbar, wodurch die Zustellung durch Lastenfahrräder besonders profitiert. Beispiele dafür sind Einbahnstraßen, Fußgängerzonen,

eingeschränkter Platz durch viele Anwohnerparkplätze, wenig bis keine Möglichkeit zu wenden usw. So wirkt gerade in solchen städtischen Ballungsgebieten die Etablierung des Mikro-Depot-Konzeptes, denen aufgrund ihrer städtischen und baulichen Struktur eine hohe Einwohnerdichte inhärent ist, besonders stark den Problemen wie Staus, Lärm, Szenario 2 – Pirkheimer Straße, Uhlandstraße

3.1.2 Szenario 2 – Pirkheimer Straße, Uhlandstraße

Das an die nördliche Altstadt angrenzende Gebiet der Bezirke „Pirkheimer Straße“ und „Uhlandstraße“ belegen in punkto Haushalte pro Hektar den 4. und 7. Platz, was sie für eine erfolgreiche Umsetzung auch unter ökonomischen Gesichtspunkten als vielversprechend klassifizieren. Dieses Gebiet soll nun in gleichem Maße wie in Szenario 1 genauer beleuchtet werden, um die weiteren Vorzüge oder Schwierigkeiten, die sich in der möglichen Realisierung ergeben, herauszuarbeiten.

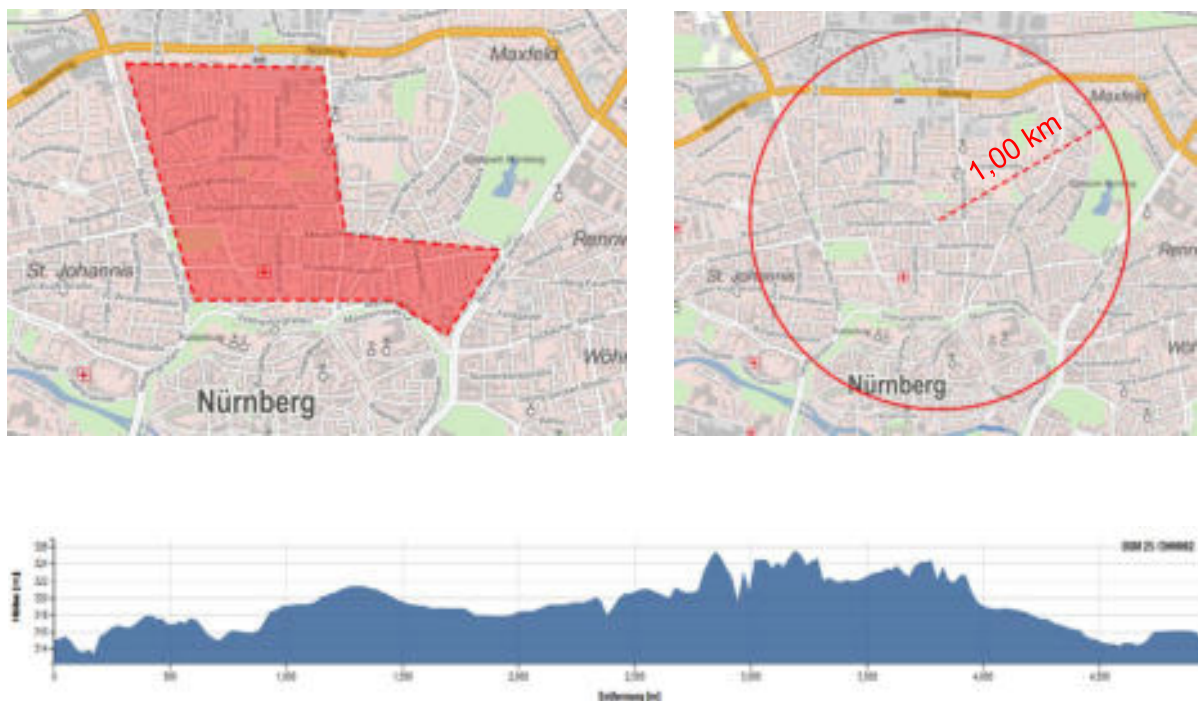


Abbildung 6 Stadtgebiet „Pirkheimer Straße“, „Uhlandstraße“ (Szenario 2) in Verbindung mit Höhenprofil (links); radiale Ausdehnung des Gebietes

Quelle: eigene Darstellung nach BayernAtlas.

Abbildung 6 zeigt das Gebiet der Bezirke „Pirkheimer Straße“ und „Uhlandstraße“ in Verbindung mit dem Höhenprofil. Insgesamt steigt dieses in dem gesamten Gebiet um 14m. Gerade im Bereich Altstadt, im Bereich der mittelalterlichen Festungsanlagen

(vgl. Abb. 6), welche ab ca. 2500m auf der Abszisse zu verorten sind, ist das Gelände in relativ kurzen Abständen sehr unbeständig im Verlauf. Die restlichen Regionen zeichnen sich aber durch ebenerdige Verläufe aus.

Der vorliegende Ausschnitt könnte auch noch um das Gebiet Maxfeld erweitert werden (Position 13 auf der Tabelle der Haushaltsdichte). Dieses rangiert zwar nicht unter den vordersten Platzierungen in der tabellarischen Auflistung der Haushaltsdichte, was aber daran liegt, dass der „Stadtpark Nürnberg“ aufgrund seiner Größe den Quotienten zwischen Fläche in Hektar und Haushalte verfälscht. So wirkt es, als ob das Gebiet in der Betrachtung Haushalte bzw. (wie oben angesprochen) Einwohner pro Hektar nicht so sehr gewinnversprechend sei, wie es tatsächlich ist, da der Wert durch die unbebaute Fläche verfälscht wird und dadurch niedriger ist, als wenn nur die bebaute Fläche als Gebiet betrachtet werden würde. Zudem wird in Abbildung 6 (rechts oben), auch deutlich, dass das gesamte Gebiet – inklusive Maxfeld – nur eine radiale Ausdehnung von unter 1km aufweist, was enorm förderlich für die Zustellung und Abholung via Lastenfahrrad ist. Grundsätzlich sollte versucht werden, die angrenzenden Gebiete mit in die Betrachtung zu inkludieren, da aus ökonomischer Sichtweise zusätzliche Erträge erwirtschaftet werden können. Da innerhalb dieses Gebietes bei der Umsetzung des Konzepts ein Mikrodepot gesucht und angemietet werden muss, ist es nur sinnvoll die Kapazitäten der Logistikfläche so weit wie möglich auszunutzen. Dies geschieht durch die Zustellung in einem von diesem Standort aus möglichst großem Gebiet. Sicherlich müssen an dieser Stelle Detailuntersuchungen und Tourensimulationen durchgeführt werden, aber im Grunde sollte versucht werden das Potenzial größtmöglich auszuschöpfen. Dies ist ein klassischer Fall einer Fixkostendegression, die gerade bei der Suche nach einem stationären Mikrodepot eine entscheidende Komponente bezüglich der Wirtschaftlichkeit des Standorts bildet.

Wie bereits oben erwähnt, muss wie immer, auch in diesem zweiten Szenario die Sendungsstruktur des KEP-Dienstleisters beachtet werden, sodass sichergestellt wird, dass die Haushalts- und Einwohnerstruktur mit dem Sendungsaufkommen deckungsgleich sind. Je nach Aufkommen, kann dann der Bezirk „Maxfeld“ mit einbezogen werden. Denkbar wäre auch eine Verbindung des Szenarios 2 mit dem nun in der Folge vorgestellten Szenario 3.

Bezüglich der Ökobilanz liegt das Gebiet, aufgrund der Nähe zur Altstadt teilweise noch im Bereich der höchsten Schadstoffausstöße (vgl. Abb. 4) Das restliche Gebiet liegt zwischen einer Belastung von 37 und 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, was nahe der höchsten

Ausstoßkategorie liegt. Somit ist auch im Sinne der Kommune, gerade in diesen Regionen Maßnahmen bezüglich der Mitigation von Schadstoffausstößen einzuleiten.

3.1.3 Szenario 3 – Sandberg, St. Johannis

Szenario 3 umfasst die Bezirke „Sandberg“ und „St. Johannis“. Diese nehmen in der Haushaltsdichte die Position 6 und 9 ein, was einem Niveau zwischen 83 und 92 Haushalten pro Hektar entspricht und damit eine gute Ausgangslage für die konzeptionelle Umsetzung des Projektes darstellt.

Auf Abbildung 7 erkennt man das für das Szenario 3 empfohlene Gebiet. In Anbetracht des Höhenunterschieds eignet sich dieses Gebiet gut (mit Ausnahme des Bereichs um die Kaiserburg, welches aber nur als lokale Ausprägung und nicht als durchgängiges Phänomen zu betrachten ist), da die Höhendifferenz im gesamten Gebiet bei 10m liegt (wie bereits erwähnt, wurde der Burgberg aufgrund des Alleinstellungsmerkmals ausgeschlossen).

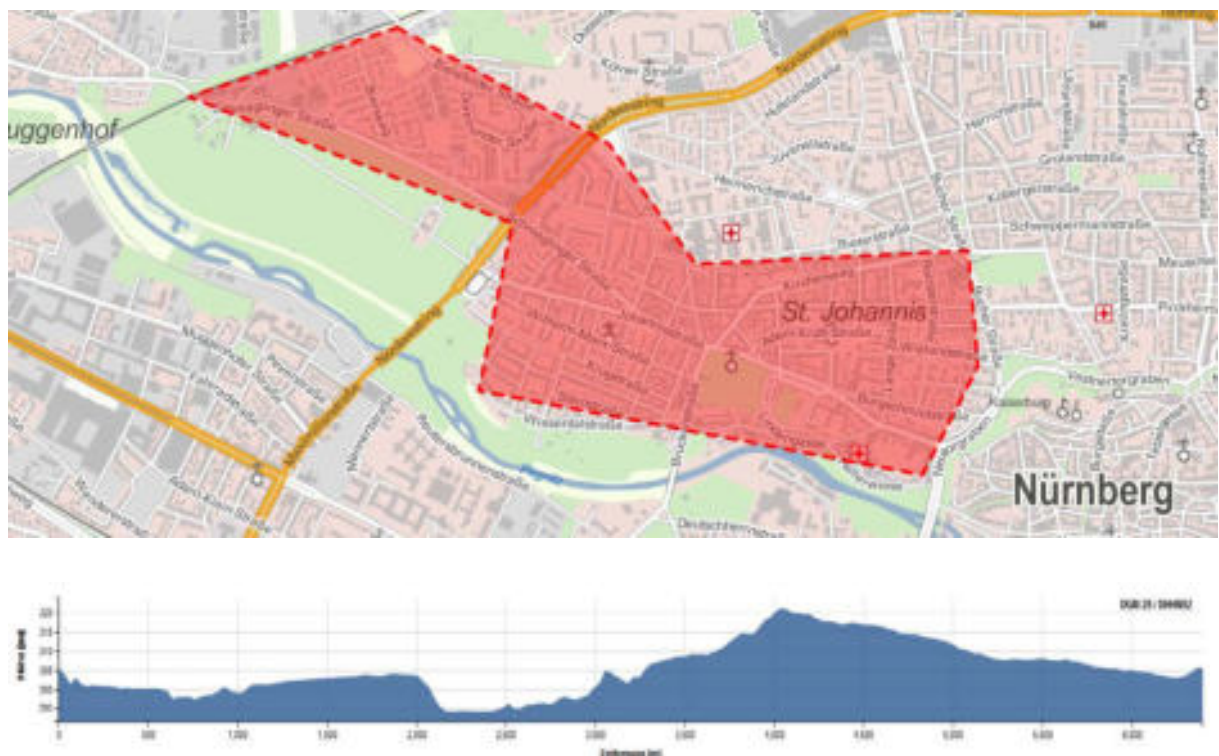


Abbildung 7 Stadtgebiet „Sandberg“, „St. Johannis“ in Verbindung mit Höhenprofil

Quelle: eigene Darstellung nach BayernAtlas.

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Abbildung 7 zeigt, dass auch hier, bei einer Wahl des Radius von 1,00km das gesamte empfohlene Gebiet durch die Lastenfahrräder ver- und entsorgt werden können.

Wie bereits erwähnt, können die Szenarien 2 und 3 aufgrund ihrer absoluten Lage zueinander auch untereinander verbunden und je nach Sendungsstruktur des Unternehmers kombiniert werden.

Betrachtet man Szenario 3 im Zuge der Abgas- und Lärmemissionen, so liegen diese im mittleren Bereich der Grenzwerte. Eine Verbesserung der Werte ist bei Umsetzung des Mikro-Depot-Konzeptes zu erwarten.

Abbildung 8 macht deutlich, dass sich alle für geeignet erachteten Gebiete im nördlichen Teil der Stadt Nürnberg innerhalb eines Radius von 2,03 km befinden. So kann konstatiert werden, dass je nach Bereitwilligkeit der am Projekt beteiligten Unternehmer das Gebiet nördlich der Altstadt auf das gesamte Gebiet ausgeweitet werden könnte, da es aus geographischer Sicht komplett mit der Paketlieferung und – abholung versorgt werden kann. Die Berechnung, die für den CargoCruiser (s.o.) angestellt wurde, ergab, dass dieser innerhalb eines Radius von 2,33 km ein konventionelles Lieferfahrzeug ersetzt. Erwähnung sollte an dieser Stelle finden, dass die Berechnung im Sinne der Einfachheit für nur ein Lastenfahrrad ausgeführt wurde. Der Realisierung und Umsetzung des Pilotprojekts unterliegt natürlich dem Credo, dass möglichst viele Lastenfahrräder zum Einsatz kommen werden, sodass flächendeckend konventionelle Touren durch den Lastenradeinsatz substituiert werden können.



Abbildung 8 Ausschnitt des Stadtgebiets für das Szenario 2 (links); Ausschnitt des nördlichen Stadtgebiets für die mögliche Kombination der Szenarien 2 und 3 (rechts)

Quelle: eigene Darstellung nach BayernAtlas.

Dennoch muss erwähnt werden, dass die Umsetzung eines solchen Projektes und die Etablierung aller konzeptuellen Ideen mehr ist als der bloße Ersatz des Sprinters durch ein Lastenfahrrad. Diese logistische Veränderung zieht in der logistischen Kette des Nachlaufs erhebliche Veränderungsmaßnahmen in der strukturellen Vorgehensweise nach sich – von der Sortierung der Pakete im Depot über die Belieferung des Mikrodepots bis hin zur Zustellung auf der allerletzten Meile. So ist es zwar erwünscht und aufgrund von Kostenvorteilen auch wirtschaftlich sinnvoll ein möglichst großes Gebiet zu wählen, doch sollte gerade zu Beginn der Projektphase ein Gebiet gewählt werden, welches in seiner Ausdehnung nicht diesen sehr großen Umfang aufweist, sodass die Veränderungen im täglichen Ablauf der Zustellung nicht überfordern.

3.1.4 Exkurs – Langwasser

Bei den ersten Überlegungen und noch vor Beginn der Projektphase bezüglich des Mikro-Depot-Konzeptes für das Teilprojekt „Wohngebiet“ wurde das Gebiet „Langwasser“ näher in die Betrachtungen einbezogen und vermutet, dass diesem Gebiet ein gewisses Potenzial inhärent sei. Dieses Gebiet eignet sich aber nach intensiverer Analyse nicht und die erhobenen Kennziffern sind nicht mit den Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung kongruent. Die folgenden Ausführungen sollen dies genauer belegen.

Um den analysierten Raum besser vor Augen zu haben, soll folgender Kartenausschnitt der Stadt Nürnberg dies visualisieren.

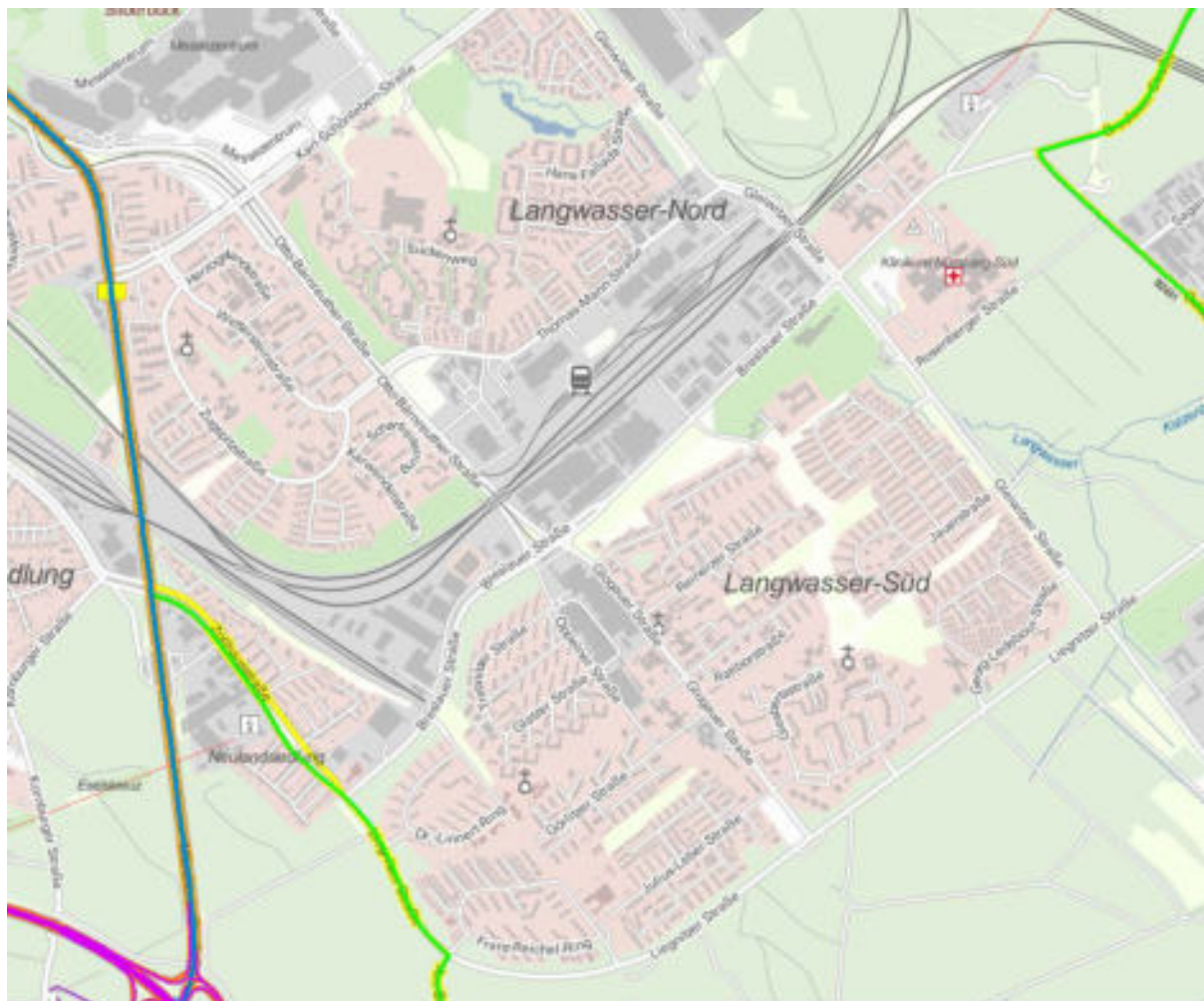


Abbildung 9 Stadtgebiet „Langwasser“

Quelle: BayernAtlas.

Langwasser ist in 4 Bezirke unterteilt, namentlich „Langwasser Nordwest“, „Langwasser Nordost“, „Langwasser Südwest“ und „Langwasser Südost“. Diese 4 Bezirke umfassen ein Gebiet von 911,68 Hektar und verfügen über eine Haushaltsanzahl von 16.631. Dies ist ein enorm hoher Wert, doch bezogen auf die 911,68 Hektar, stellt man bei der Berechnung der Haushaltsdichte fest, dass diese bei nur 18,24 Haushalten pro Hektar liegt. Dieser Wert ist im Vergleich zu den Bezirken in den drei ausgeführten Szenarien überaus gering. Beachtet werden muss, dass der gesamte südliche unbebaute Teil Langwassers (vgl. Abb. 8 – schließt sich südlich der Bezirke „Langwasser Südwest“ und „Langwasser Südost“ an) zu der statistischen Erfassung des städtischen Bezirks hinsichtlich der Fläche hinzugezählt wurde, sodass die gesamte Fläche des Bezirkes unweit größer ist, als die bebaute Fläche. Doch selbst bei der Berücksichtigung dieser enorm wichtigen Einschränkung, geht ein Wert von 543 Hektar in die Rechnung ein, mit welchem sich ein Wert der Haushaltsdichte von 30,62 Haushalten pro Hektar errechnet. Doch auch dieser Wert kann nicht hinreichend sein, um die Region Langwasser oder einen Teilbereich davon bezüglich der Realisierung des Mikro-Depot-Konzeptes umzusetzen. Des Weiteren konterkariert die Auswertung des Höhenprofils (vgl. Abb.9) – egal ob das gesamte Gebiet oder Teilbezirke davon – eine Handlungsempfehlung für die Region auszusprechen. Im gesamten Verlauf ist das Höhenprofil durch eine Höhendifferenz von bis zu knapp 40m geprägt. Dieser hohe Wert verbunden mit der geringen Haushaltsdichte, schließt Langwasser als adäquates Gebiet aus.

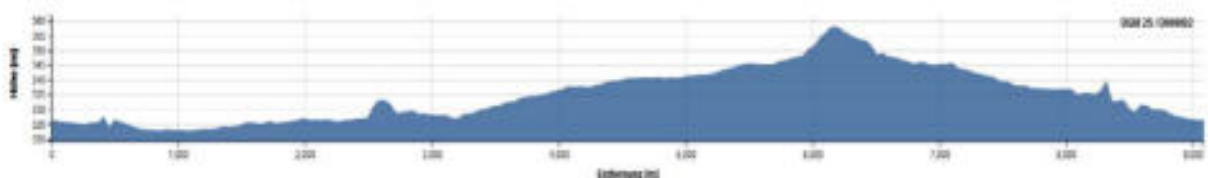


Abbildung 10: Höhenprofil der Region "Langwasser"

Quelle: BayernAtlas.

Grundsätzlich ist abschließend noch festzustellen, dass sich Gebiete für den Mikro-Depot Ansatz besser eignen, bei denen sich ein hoher Wert des Quotienten aus der Anzahl der Haushalte und der Fläche, durch eine im Verhältnis kleine Fläche in Verbindung mit einer hohen Anzahl von Haushalten ergibt, als wenn dieser Quotient durch eine große Fläche mit einer sehr hohen Anzahl von Haushalten entsteht.

3.2 Geographische Analyse

Wie bereits im vorherigen Kapitel angedeutet, ist die Gebietsauswahl für eine wirtschaftliche und nachhaltige Umsetzung des Mikro-Depot-Konzepts essenziell. Dabei bilden die städtischen Strukturen, die für eine erfolgreiche Etablierung vonnöten sind, die notwendige Basis, worauf sich in einem zweiten Schritt die Sendungsaufkommen und deren Verortung im Raum aufbauen. Dabei müssen die städtebaulichen und infrastrukturellen Voraussetzungen mit den Sendungsaufkommen des jeweiligen KEP-Dienstleisters Hand in Hand gehen; denn eine den Voraussetzungen entsprechende urbane Struktur heißt noch nicht zwangsläufig, dass innerhalb dieses Gebiets eine Etablierung des Mikro-Depot-Konzept Ansatzes von Erfolg gekrönt ist. Das Sendungsaufkommen muss innerhalb dieses ausgewählten Gebietes entsprechend hoch sein, dass sich der Umstieg auf das Lastenfahrrad wirtschaftlich lohnt, da die Kosten für beispielsweise die Miete für das stationäre Mikrodepot oder den erneuten Umschlag der Waren abgedeckt sein müssen. Umso mehr Pakete innerhalb des ausgewählten Gebietes zugestellt werden, umso geringer werden die Kosten pro Paket bis der Break-Even-Point erreicht wird. Sollte ein zu geringes Sendungsaufkommen in der ausgewählten Region vorherrschen, so kann das Konzept nicht wirtschaftlich betrieben werden. Deshalb müssen an dieser Stelle sorgfältige Untersuchungen und Analysen durchgeführt werden, da ansonsten keine ökonomischen Mehrwerte für die beteiligten Unternehmen generiert werden können, sodass das Projekt nicht die gewünschte Strahlkraft entfalten würde. So war das Bestreben der wissenschaftlichen Begleitung neben der Reduktion von Schadstoffausstoßen wie CO₂ und Stickoxiden, auch die wirtschaftlich ertragreiche Umsetzung, sodass das Pilotprojekt einem langfristigen nachhaltigen Habitus unterliegt und auch nach der Projektphase weiterhin betrieben und fest in die Abläufe der jeweiligen KEP-Dienstleister integriert wird.

Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen müssen die Gebiete auf Basis der Postleitzahlen genauer analysiert werden, wobei eine Zeitreihe der Sendungsdaten betrachtet werden muss, sodass eventuelle beispielsweise saison- oder wochentagbedingte Ausreißer nicht ins Gewicht fallen, bzw. ausgeschlossen werden können. Abbildung 10 zeigt die Visualisierung der Sendungen pro Quadratkilometer eines Wochentages. Je dunkler die die Farbe, desto mehr Sendungen/ qkm wurden in diesem Bereich zugestellt.

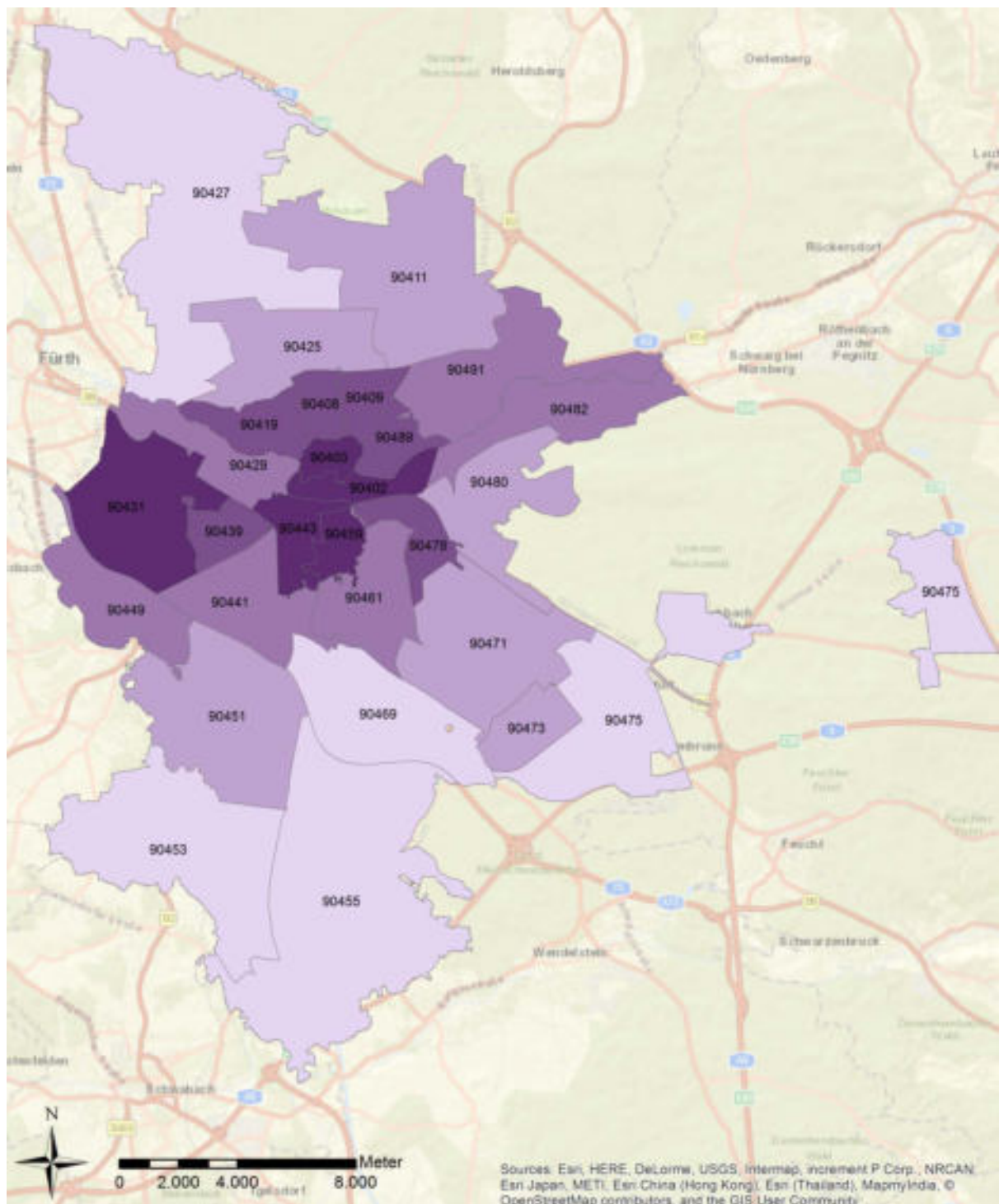


Abbildung 11 Sendungsstruktur eines Projektpartners eines ausgewählten Tages im Verhältnis der Anzahl der Sendungen pro Quadratkilometer innerhalb der einzelnen Postleitzahlgebiete

Quelle: eigene Auswertung und Darstellung.

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Als Datengrundlage wurden alle Sendungen des gesamten Nürnberger Stadtgebietes dokumentiert und in der Art wie in Abbildung 10 ersichtlich ausgewertet. Dabei basierte die Datengrundlage auf einem Zeitraum von drei Monaten und wurde im Laufe der Projektzeit stets erweitert und kreuzvalidiert, sodass keine Verschiebungen der Sendungsstrukturen Auswirkungen auf die Handlungsempfehlung für die am besten geeigneten Gebiete hatten. Da diese Methodik auch nur zur Vorauswahl dient, reicht dieser Analyseschritt nicht aus, um schlussendlich die Eignung eines Gebietes festzustellen, sondern bedarf weiterer Betrachtung und sorgfältiger Prüfung. Hierzu müssen auf Basis von Zeitreihen die geeignetsten Gebiete aufgelistet werden (vgl. Tab.3).

Tabelle 2: Ausschnitt der Zeitreihenanalyse über die Anzahl der Sendungen pro qkm im gesamten Nürnberger Stadtgebiet

[illegible]

Quelle: eigene Auswertung und Darstellung.

Aufgrund von firmeninternen Daten wurde hier in Tabelle 3 nur die Reihenfolge der jeweiligen Postleitzahlengebiete sichtbar gemacht und darauf verzichtet, die Anzahl der Sendungen/qkm aufzuführen, welche aber zur Analyse selbstverständlich vorlagen, sodass diese sinnvoll durchgeführt werden konnte. Augenscheinlich ist, dass die beiden Postleitzahlen 90402 und 90403, die die Nürnberger Innenstadt in zwei Teile aufteilen, nahezu immer die beiden ersten Plätze unter sich ausmachen. Dies ist durch die vielen ansässigen Einzelhändler relativ einfach zu erklären. Des Weiteren ist beispielsweise die Postleitzahl 90459 sehr häufig in der ersten Klasse vertreten,

ebenso wie die Postleitzahl 90431. In dieser Hinsicht erscheinen die beiden Gebiete für die Umsetzung des Mikro-Depot-Konzepts sinnvoll.

Neben der Ermittlung der logistischen Senken und Höhen wird in der Folge auch der ideale Mikrodepotstandort berechnet, der das mathematische Ergebnis aller Sendungen im Zielgebiet darstellt. Dabei werden die Sendungen der logistischen Senken herausgerechnet und spielen somit keine Rolle bezüglich des idealen Mikrodepotstandorts. Dabei wurden sowohl der arithmetische Mittelwert der x- und y-Koordinaten der Sendungsgeokoordinaten errechnet, als auch der Medianwert, der sich durch die kleinstmögliche euklidische Distanz aller Punkte zu diesem errechneten Punkt ergeben. Dadurch, dass die logistischen Senken in dieser Berechnung keinerlei Beachtung fanden, ergaben die beiden Rechenoperationen stets nahezu denselben Ort, an dem sich der ideale Standort des Mikrodepots befindet. Dies liegt zudem auch daran, dass hierbei die Sendungsdaten sinnigerweise über einen längeren Zeitraum die Grundlage der Berechnung bildeten. Bei der Betrachtung einzelner Tage oder Wochen würde sich der Standort selbstredend verschieben, jedoch gleichen sich die Sendungsschwankungen bei der Analyse von mehreren Monaten innerhalb des Gebiets aus, wodurch der Standort sowohl bei arithmetischen Mittel als auch bei der Medianberechnung die gleiche Lage besitzt. Dieser errechnete Punkt nimmt dabei natürlich keinerlei Rücksicht auf bauliche Strukturen der Stadt, sodass dieser genau an einer Stelle angezeigt wird, wo beispielsweise schon Bebauung vorliegt; davon bleibt das Ergebnis aber dennoch unberührt und weiterhin aussagekräftig, da die Lage des Mikrodepots nicht obligatorisch ist. Dieses Ergebnis dient eher als Anhaltspunkt, in welchem Umkreis der Standort für das Mikrodepot gesucht werden sollte, da dieser Punkt den idealen Standort darstellt. Dabei spielen bei der Suche einer geeigneten Immobilie natürlich nicht nur die Entfernung des Mikrodepots zu allen Zustellpunkten eine Rolle, sondern auch die Mietkosten oder die Möglichkeit die Immobilie mit einem 7,5t- Lkw zu beliefern usw.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle gesagt werden, dass die geographische Analyse, die hier in ihrer theoretischen Natur nur sehr kurz, dafür das Beispiel Nürnberg (vgl. auch Kap.2.1) sehr ausführlich dargestellt wurden, einen unverzichtbaren Stützpfiler für die erfolgreiche und nachhaltige Umsetzung des Mikro-Depot-Konzeptes bildet.

Exkurs Mikrodepot

Da das Mikro-Depot-Konzept in seiner gesamten Konzeption nachhaltig, ökonomisch, ökologisch und stadtverträglich sein soll, muss auch mit dem Mikrodepot als Standort sorgsam umgegangen werden. Da in der logistischen Kette ein weiterer Umschlag eingebaut wird, der die letzte Meile nochmals in einer letzte und eine allerletzte Meile unterteilt, um so eine noch effektivere Feinverteilung zu erreichen, muss ein Ort gefunden werden, an dem dieser logistische Umschlag erfolgen kann. Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten, die allesamt ihre Probleme und aber auch Vorteile bieten.

Definition: Mikro-Depots sind an geeigneten Orten in den Zustellbezirken von KEP-Diensten abgestellte motorisierte Nutzfahrzeuge oder Container, aber auch geeignete Immobilien, welche das Bestücken von Lastenfahrrädern oder fußläufigen Transporthilfen ermöglichen.

1. Möglichkeit: Wechselbrücke

Wie in Hamburg von UPS² umgesetzt, kann im städtischen Raum eine sog. Wechselbrücke aufgestellt werden, welche ein LKW am Morgen in die Stadt fährt, abstellt und von wo aus die Feinverteilung vorgenommen wird.



Abbildung 12 UPS-Mikrodepot in Hamburg. Wechselbrücken im städtischen Zentrum und logistische Feinverteilung

Quelle: eigene Aufnahmen

Vorteile bietet die kostengünstige und schnelle Umsetzbarkeit, Nachteile hingegen, dass diese Variante einen enormen Flächenbedarf mit sich bringt, durch welchen diese niemals für alle KEP-Unternehmen im gleichen Zustellgebiet umgesetzt werden könnte. Hinzu kommt die fehlende Rechtssicherheit der notwendigen

² UPS UPS Corporate Sustainability Report 2013 [Bericht]. - 2014

Sondernutzung des öffentlichen Raums sowie eine Beeinträchtigung des Stadtbildes.

2. Möglichkeit: Immobilie

Im Pilotprojekt in Nürnberg wurde nicht auf eine teilmobile, sondern auf eine stationäre Lösung gesetzt, die sich dadurch auszeichnet, dass leerstehende Immobilien im innerstädtischen Bereich als Logistikfläche benutzt werden, in welchen der zusätzliche Umschlag zur Effizienzsteigerung vonstattengeht.

Vorteile ergeben sich durch die Nutzung von leerstehenden Ladenflächen in der Innenstadt, die durch die KEP-Unternehmen revitalisiert werden, Nachteile hingegen sind die Verfügbarkeit der Immobilien in entsprechender Lage.



Abbildung 13 Umnutzung ehemaliger Einzelhandelsimmobilien als Mikrodepotstandort

Quelle: Google Maps und eigene Aufnahme

3. Möglichkeit: Begegnungsverkehre

Die dritte und letzte vorstellbare Möglichkeit ist die der vollmobilen Mikrodepots, die auf Basis von Begegnungsverkehren realisiert werden (vgl. Abb.19). Erste Versuche und Untersuchungen wurden im Zuge des Pilotprojektes bereits analysiert.



Abbildung 14 Begegnungsverkehre zwischen Transporter und Lastenfahrrad

Quelle: eigene Aufnahmen

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Ziel ist es dabei, dass sich die beiden Fahrzeugtypen auf der Zustelltour an bestimmten Punkten treffen und über eine Art Cross-Docking Verfahren Waren übergeben, sodass diese dann via Lastenfahrrad zugestellt werden können. Vorteile sind die wegfallenden Mietkosten für das Mikrodepot und die Flexibilität aus logistischer Warte heraus. Ein solches Konzept bedarf eines konsequenten Einsatzes innovativer digitaler Technologien und somit weiterer Forschung.

4 Mikroskopische Betrachtung

Neben der makroskopischen Auswahl hinsichtlich Haushalte, Bevölkerungsdichte, Höhenprofilen und weiteren Faktoren der einzelnen Stadtgebiete in Nürnberg, muss für die Simulation eine Vorauswahl hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte der Zulieferfahrzeuge erfolgen. Zwar liefert die makroskopische Betrachtung erste wichtige Ergebnisse hinsichtlich der Sendungsnetzdicke innerhalb der städtischen Infrastruktur, es kann aber dadurch nicht abgeschätzt werden, ob die Zustellung mittels Lastenfahrrad möglich ist. In der mikroskopischen Betrachtung werden die Daten hinsichtlich Volumen und Gewicht der Sendungen verarbeitet und ein vorläufiger Haltepunktabstand ermittelt. Hierbei werden die realen Zeiten zwischen den Stopps in Verbindung gebracht und mit der folgenden Methodik die einzelnen Zeitbausteine bei der Zustellung herausgerechnet. Aufbauend auf den Zeitbausteinen der realen Touren werden theoretische Zeiten für die Lastenfahrräder berechnet und anschließend die realen Zeitbausteine der Transporter mit denen der Lastenfahräder verglichen. Mit Hilfe der Haltepunktabstände innerhalb der Straßenzüge können Fahrzyklen und somit die Zeiten zwischen den Haltepunkten, als auch die Zustellzeiten ermittelt werden. Diese Methodik ist mit einer gewissen Unschärfe behaftet, da in den realen Zeiten zwischen den Stopps auch infrastrukturelle und weitere zufällige zeitliche Widerstände vorhanden sein können und diese entsprechende Auswirkungen auf die ermittelte Zustellzeit haben. Durch die massenhafte Verarbeitung von Daten kann diese Unschärfe minimiert, jedoch nicht vollständig beseitigt werden, welches dazu führt, dass diese Abweichung bewertet und die Auswirkungen dieser auf die theoretischen Zeiten der Lastenfahräder untersucht werden muss.

4.1 Konzeptionelle Vorgehensweise

Für die Wiederholbarkeit der Ergebnisse und die Minimierung der Unschärfe werden Zeitreihen in einem regelmäßigen Zyklus analysiert und für jeden Straßenzug ein durchschnittliches Sendungsaufkommen mit den entsprechenden Gewichts- und Volumenangaben berechnet. Mit Hilfe der Adresssätze können für jeden Straßenzug die Stoppdichte und die zeitliche Verteilung der Pakete innerhalb der Straße ermittelt und anschließend, mit Hilfe der Stoppanzahl, für jeden Straßenzug ein Fahrprofil entsprechend der zeitlichen Verteilung der Pakete auf Basis der fahrphysikalischen Rahmendaten eines PKW's (Punkt 3.1.2) erstellt werden. Für eine Vergleichbarkeit der Konzepte werden für die Betrachtung des Transporters die Strecken zum und vom

Hauptdepot nicht berücksichtigt; die Berechnung des Fahrprofils erfolgt ab dem ersten Stopp.

Da die Gewährleistung der Wirtschaftlichkeit in diesem Projekt oberste Priorität hat, wird für die Ermittlung der theoretischen Fahrzeit mit den fahrphysikalischen Maximalwerten des konventionellen Fahrzeugs gerechnet. Hierdurch wird sichergestellt, dass das Lastenfahrrad immer „schlechter gerechnet“ wird, als es eigentlich ist und somit bei einer positiven ökonomischen Bilanz des Fahrrads im theoretischen Modell davon ausgegangen werden kann, dass die Zustellung in der Realität sogar ein höheres Potenzial hat als errechnet.

4.2 Technische Restriktionen

Die Berechnung der Zeit für die Verbindung der Sendungspunkte im Straßennetz für unterschiedliche Verkehrsträger erfolgt bei der mikroskopischen Betrachtung mit Hilfe von physikalischen Bewegungsgleichungen. Dabei wird die benötigte Zeit der verschiedenen Verkehrsträger zwischen den Haltepunkten ermittelt.

Mit Hilfe der Daten der Projektpartner wird über die allgemein gültigen Bewegungsgleichungen ein Fahrprofil erstellt.

Das Fahrprofil untergliedert sich dabei in drei Teilbereiche. Diese bestehen aus einem Beschleunigungsvorgang, eine Konstantfahrt mit 50 km/h und einen Bremsvorgang.

Die Berechnung des Lastenfahrrades erfolgt ähnlich zur Berechnung der konventionellen Zustellvariante. Zusätzlich wird über das durchschnittliche Volumen pro Paket, Paketanzahl und das mögliche Fahrzeugvolumen die Anzahl der Touren zum Mikrodepot und damit die zusätzliche Zeit berechnet.

4.3 Wirtschaftliche Restriktionen

Aus den technischen Restriktionen geht hervor, wie viele Pakete pro Stunde sowohl mit dem Lastenfahrrad als auch mit konventionellen Transportern geliefert werden können. Weiterhin sind die Kosten der Fahrzeuge, als auch die der Fahrer bekannt, sodass hier ebenfalls die Kosten pro Stunde ermittelt werden können. Hieraus lässt sich eine Verknüpfung mit den Technischen Restriktionen herstellen und prüfen, ob der Einsatz des Lastenfahrrades unter gegebenen Bedingungen wirtschaftlich ist.

Hierzu werden folgende Daten verarbeitet:

- 250 Arbeitstage pro Jahr
- Durchschnittsgehalt des Fahrers
- Arbeitsstunden pro Tag
- Kosten für 1 Liter Dieseldieselkraftstoff bzw. 1 kWh elektrischer Energie
- Fahrleistung pro Tag
- Versicherungskosten der Fahrzeuge
- Steuer der Fahrzeuge
- Leasingkosten der Fahrzeuge bzw. Kosten der Anschaffung
- Wartung/Inspektion
- Reparatur

Mit Hilfe der Daten können Vollkostenkurven und die entsprechenden Funktionen der Fahrzeuge mit den Fahrern erstellt werden (siehe Abbildung 23).

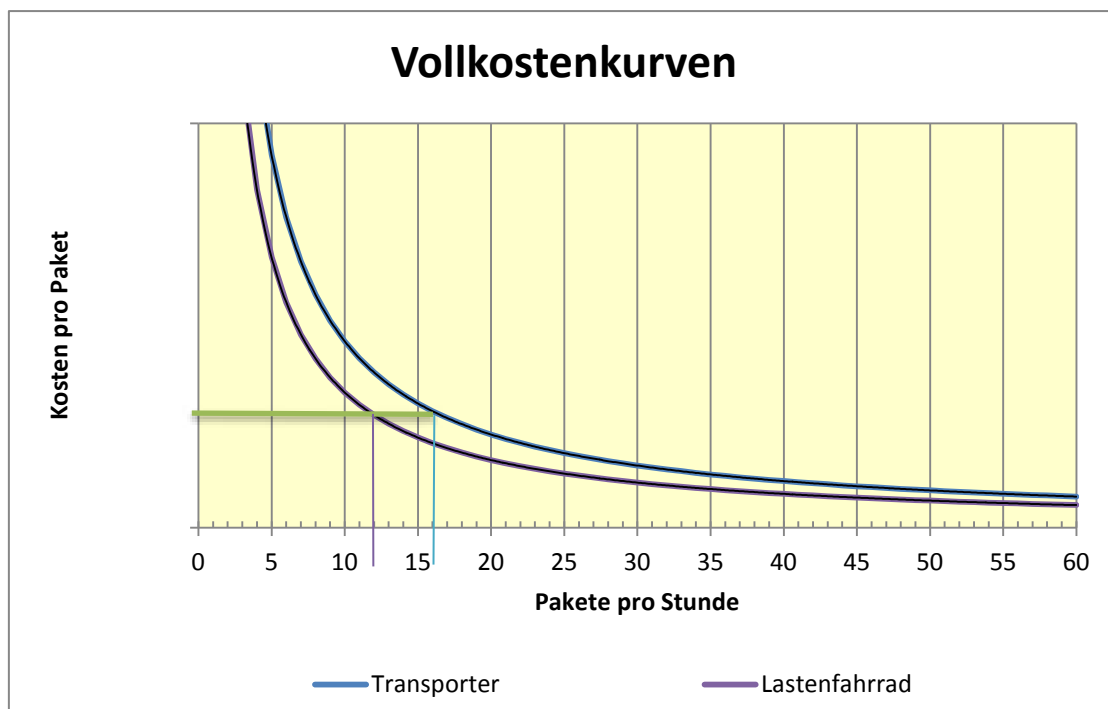


Abbildung 15 Vollkostenkurven der Transportsysteme mit Fahrern

Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung

Die grüne Linie in Abbildung 23 bildet ein Kostenniveau ab. Wird diese Linie mit den jeweiligen Kostenkurven der Fahrzeuge geschnitten, erhält man einen x-Wert, der angibt, wie viele Pakete das jeweilige Transportsystem pro Stunde für dieses

Kostenniveau ausliefern muss. Wie zu erkennen ist, muss der Transporter 16 Pakete pro Stunde ausliefern, um auf die gleichen Auslieferungskosten zu kommen, wie ein Lastenfahrrad, welches 12 Pakete pro Stunde bewegt. Erreicht der Transporter bedingt aus den Technischen Restriktionen 14 oder 12 Pakete bei diesem Kostenniveau, dann ist das Lastenfahrrad in diesem Fall wirtschaftlicher. Diese Kostendifferenz beinhaltet nicht die Kosten für das Mikrodepot und den Transport der Pakete zum Mikrodepot. Diese Kosten sind Gebietsabhängig (Mietkosten der Immobilie, Entfernung des Mikrodepots zum Hauptdepot etc.) und werden in Abhängigkeit der tatsächlichen Lage des Mikrodepots in einer späteren Berechnung berücksichtigt. Technische und wirtschaftliche Restriktionen werden in Kombination für jeden Straßenzug angewendet. Entsprechend ergeben sich für jeden Straßenzug (innerhalb der fest definierten Grenzen aus der makroskopischen Betrachtung) Kostenkurven sowohl für den Transporter als auch für das Lastenfahrrad. Hieraus kann abgeleitet werden, dass es Straßenzüge gibt, welche aus ökonomischer Sicht besser für den Transporter oder für das Lastenfahrrad geeignet sind.

Eine hohe Haltepunktdichte in einer vorher ausgewählten Mikrozellstruktur bietet keine Erkenntnis darüber, ob ein Gebiet wirtschaftlich mit Lastenfahrrädern zu betreiben ist, da keine Aussage über die Anzahl der logistischen Senken getroffen werden kann. Dennoch kann eine hohe Haltepunktdichte nützlich für die Abbildung des Infrastrukturnetzes sein, Lücken im Netz können erkannt und entsprechende Korrekturen in der mikroskopischen Betrachtung durchgeführt werden.

5 Validierung und Vergleich zur konventionellen „alten“ Tour

5.1 Validierung mit dem Routenplanungsprogramm TransIT

5.1.1 Notwendigkeit einer Simulation

Vor der realen Umsetzung des Konzepts und der Implementierung desselbigen in den täglichen operativen Betrieb der Projektpartner, musste, um die Wirtschaftlichkeit theoretisch nachzuweisen, eine Tourenplanung durchgeführt werden. Dieser Schritt ist notwendig, da die KEP-Unternehmen einen geregelten Ablauf in der Kommissionierung, der Erstellung von Touren und der Zustellung haben und dies alles durch hausinterne IT unterstützt wird. Deswegen muss vor der Neuausrichtung in allen der genannten Schritte relativ sicher geklärt sein, dass die neue Methodik nicht nur ökologisch effizient, sondern auch logistisch effizient ist.

Da selbst die neuesten Software-Angebote nicht in der Lage sind eine Tourenplanung für Fahrradlogistik abzubilden, musste durch Szenarienanalysen und Tourenplanungsanwendungen der bestmögliche Weg gefunden werden, eine Simulation zu erschaffen, die die Realität möglichst wahrheitsgemäß abbildet. Hierzu wurden auch die generierten simulierten Touren durch real durchgeführte Testfahrten geprüft und die Ausgangssituation innerhalb der Simulation kalibriert (vgl. 5.2). Indem man verschiedene Szenarien durchspielt, kann man sich schrittweise an eine bestmögliche Lösung herantasten. Simulationen bringen deshalb so viele Vorteile mit sich, da diese im Vergleich zum realen Versuch Kosten einsparen. Über eine Simulation können so problemlos ohne große Aufwendungen verschiedene Varianten „durchgespielt“ werden. An erster Stelle muss geprüft werden, ob eine Umstellung auf eine Auslieferung mit Fahrrädern überhaupt umsetzbar ist und wenn ja, wie viele Lastenfahrräder überhaupt benötigt werden. In dem Pilotprojekt sollen auf Basis der tatsächlichen Aufträge und Daten der konventionellen Zustellung die Touren mit Lastenfahrrädern simuliert werden. Des Weiteren bietet eine Simulation eine gute Grundlage für eine folgende Entscheidungsfindung. Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse können zum Beispiel eine Planung und Soll-Konzeption erfolgen. Durch das Ausprobieren mehrerer Alternativen können zusätzlich Fehltritte verhindert werden, was wiederum Kosten einspart. Außerdem kann eine ausführliche Betrachtung unvorhergesehene Ereignisse aufzeigen und damit auch zu einer geeigneteren Lösung

führen. Aufgrund der zahlreichen Vorzüge zeigt sich, dass eine Simulation für eine verlässliche Planung unentbehrlich ist.³

5.1.2 Bestandteile einer Tourenplanung

Bei der Tourenplanung geht es um eine Planung, bei der die Aufträge auf verschiedene Transportmittel verteilt und nachträglich Touren zugeordnet werden. Dabei sind einige Vorgaben, wie zum Beispiel Zeitfenster für eine Anlieferung beim Kunden oder der Zustellort zu beachten. Diese Planung von Touren lässt sich als ein wichtiger Teil der Logistik zuordnen. Wie auch allgemein in der Logistik ist es hier das Ziel, einen bestimmten Auftrag in einer vorgeschriebenen Zeit am richtigen Ort zuzustellen. Unterteilt wird die Logistik üblicherweise in Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik, welche die Versorgung eines Betriebes sicherstellen. Dazu schließt sich meist noch eine Entsorgungslogistik an. Tourenplanungsprobleme lassen sich dabei vor allem der Distributionslogistik zuordnen. Dabei geht es hauptsächlich darum, die Produkte eines Unternehmens schnellstmöglich dem Kunden bereitzustellen. Die Aufgaben dieses Teilbereichs der Logistik lassen sich in kurz-, mittel- und langfristige Planungen unterteilen. Die kurzfristigen Aufgaben beinhalten im Allgemeinen Aufgaben der Lagerung der fertigen Produkte und den Transport zum Endkunden. Demzufolge handelt es sich bei der Zuordnung von Aufträgen zu Touren um eine kurzfristige Planung der Distributionslogistik.⁴ Im Folgenden sind einige grundlegende Begrifflichkeiten zu klären. Unter einer Tour versteht man eine Vielzahl von Stationen, die schrittweise von einem Fahrzeug angefahren werden. In der Regel beginnt die Fahrt in einem Ausgangspunkt und endet auch wieder an diesem. Dabei kann es sich beispielsweise um ein Lager oder Depot handeln. So einen beschriebenen Normalfall, bei dem die Tour wieder am Startpunkt endet, bezeichnet man als geschlossene Tour. Anderenfalls handelt es sich um eine offene Tour, wenn der Ausgangspunkt nicht dem Endpunkt entspricht. Im gleichen Zug wie die Tour wird meistens auch ein genauer Ablauf der Fahrt geplant. In der Tourenplanung spricht man dabei von einer Route, welche die Reihenfolge der Aufträge festlegt. Die Gesamtheit aller Touren mit ihren Routen ergibt letztendlich den Tourenplan, welchen man als Ergebnis der Tourenplanung betrachten kann.⁵ Auf dem Lösungsweg sind dabei verschiedene Ziele einzuhalten. In erster Linie soll eine Kostenminimierung erreicht werden. Eine Einsparung von Fahrtstrecken, geringere Fahrtzeiten oder eine

³ Vgl. Simulations online (2013)

⁴ Vgl. Ohrt (2008), S. 4-6

⁵ Vgl. Novak (1999), S.1-4

Minimierung der Fahrzeugeinsätze sind weitere wichtige Ziele. Es geht also um eine ständige Optimierung unter Berücksichtigung verschiedener Restriktionen. Oftmals stehen bei der Tourenplanung jedoch nicht eine solche Optimierung im Vordergrund, sondern die eigentlichen Aufgaben der Planung. Vorrangig müssen die vorliegenden Aufträge in geeignete Touren aufgeteilt werden, wobei Zeiten und Kapazitäten eingehalten werden müssen. Je mehr Beschränkungen vorliegen, desto umfangreicher gestaltet sich das grundlegende Zusammenstellen von Touren. Bei der Tourenplanung geht es also nicht nur darum ein Problem zu lösen, sondern es treten oftmals mehrere gleichzeitig auf.⁶ Dabei kann es sich beispielsweise um Probleme bei der Verteilung, Zusammenstellung oder auch um Herausforderungen durch vorgegebene Zeitfenster handeln. Grundlegend kann man bei der Tourenplanung das Zuordnungsproblem und das Reihenfolgeproblem unterscheiden. Das Problem der Zuordnung ist auch bekannt als Clusterung. Bei dieser Aufgabe sollen Kundenaufträge einem bestimmten Fahrzeug und damit einer Tour zugeordnet werden. Die Summe aller Aufträge wird somit erstmal in verschiedene Gruppen aufgeteilt. Das Reihenfolgeproblem, auch Routing-Problem genannt, soll die optimale Rundreise festlegen. Die zu einer Tour zugeordneten Aufträge sollen in eine geeignete Reihe gebracht werden. In Bezug auf die Lösung der Probleme kann man zwei Verfahren abgrenzen. Dabei gibt es kantenorientierte und knotenorientierte Methoden. Kanten beziehen sich auf eine Strecke, Knoten dagegen auf einen bestimmten Ort. Bei kantenorientierten Lösungen soll demnach das Hauptaugenmerk auf gewissen Strecken liegen, wobei Knotenlösungen auf gewissen Orte abzielen. Das sogenannte „Travelling-Salesman“ Problem ist ein Beispiel für eine knotenorientierte Tourenplanung. Es ist auch bekannt als Rundreiseproblem und wird den Routing-Problemen zugeordnet. Bei dieser Problemstellung müssen Kunden in verschiedenen Orten aufgesucht werden, währenddessen der Weg möglichst kurz sein soll. Zudem muss der Reisende am Ende wieder am Ausgangspunkt ankommen. Das Finden eines solchen geeigneten Rundwegs zählt zu den grundlegendsten Problemen der Tourenplanung. In der Praxis werden die Grundprobleme der Tourenplanung aufgrund einer Vielzahl verschiedener Varianten deutlich ausgeweitet. Beschränkungen bei Kapazitäten, eine heterogene Fahrzeugflotte, Kunden- und Fahrzeugzeitfenster oder Personalvorschriften führen zu einer erheblichen Erweiterung der Problematik.⁷

⁶ Vgl. Novak (1999), S. 25-26

⁷ Vgl. Novak (1999), S. 28, 30-39

5.1.3 Durchführung der Tourenplanung

Die folgende Abbildung (vgl. Abb. 20) zeigt zunächst einen Überblick der Benutzeroberfläche der Tourenplanungssoftware TransIT. Das Anwendungsprogramm ist dabei in unterschiedliche Komponenten unterteilt. Im Mittelpunkt steht die Landkarte, welche auf dem Kartenmaterial von OpenStreetMaps basiert. Über die Karte können die geplanten Touren mit ihren Fahrzeugen und Aufträgen visualisiert werden. Diese sogenannten Objekte können über den ihnen zugeordneten geographischen x-y-Koordinaten in der Karte angezeigt werden.

Des Weiteren bietet das Programm die Möglichkeit eine Vielzahl an Anwendungen durchzuführen; darunter fallen Auswertungen der einzelnen Touren, Datenimporte oder das Anpassen von Stammdaten der Fahrzeuge oder Depots. Innerhalb des Objektbaums kann man alle relevanten Objekte wie Aufträge, Fahrzeuge mit ihren Fahrzeugtypen, Depots oder auch bereits geplante Touren aufgelistet betrachten und detaillierte Datensätze zu jedem einzelnen Element aufrufen, in der Karte anzeigen lassen und verplanen. Erst durch eine Übertragung in das Planungsfenster kann mit bestimmten Elementen eine Planung erfolgen. Über das Planungsfenster kann der Anwender manuelle Tourenplanungen sowie automatische Optimierungen starten. Dieser grundlegende Bestandteil der Tourenplanungssoftware ist unterteilt in ein Gantt-Diagramm und die Planungsliste. Das Diagramm im oberen Bereich zeigt den Ablaufplan der Tourenpläne an. Jedem Fahrzeug wird dabei eine eigene Zeile in der vorgegebenen Zeitachse zugeteilt. Verschiedenfarbige Balken geben die Fahrzeit und die Auftragsdauer an. Die Heimataufenthalte werden bei jedem Fahrzeug direkt hinterlegt und geben an, zu welcher Uhrzeit ein Fahrzeug am Heimatstandort sein muss. Als Stammdaten werden unter anderem die Objektdialoge Fahrzeugtyp, Fahrzeug, Geschwindigkeitsprofil, Qualifikation, Artikeltyp, Leistungstyp und Depot bezeichnet, welche im Folgenden eingehender beleuchtet werden, sodass die Möglichkeiten und die Komplexität des Simulationsvorgangs besser eingeordnet werden können. Wichtig an dieser Stelle hervorzuheben ist, dass die Simulation zwar sozusagen „selbständig“ simuliert und die kürzeste bzw. ökonomisch effizienteste Route ermittelt, diese jedoch stets an die manuell angelegten Stammdaten gekoppelt sind.

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

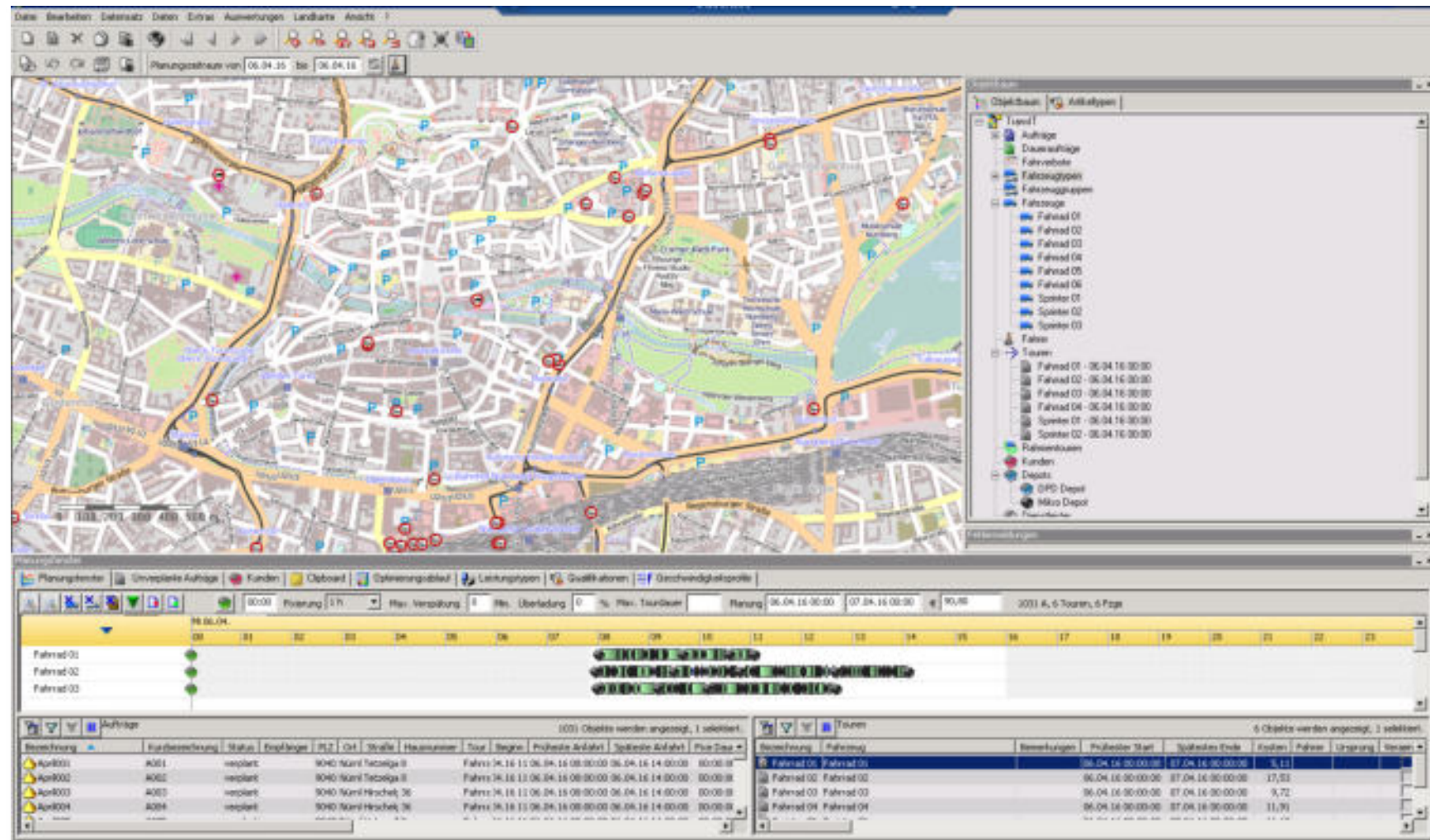


Abbildung 16 Anwendungsoberfläche TransIT

Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung der Tourenplanungssoftware TransIT

Dies bedeutet, dass bei fehlerhaften Eingaben die Simulation ad absurdum geführt wird, da diese dann nicht mehr ein optimales Szenario abbildet. Anschaulich kann dies beispielsweise an dem Objektdialog „Geschwindigkeitsprofil“ gemacht werden. Basiert die Simulation auf einer falschen Annahme an Durchschnittsgeschwindigkeiten des Lastenfahrrades, so wird die Tourenplanung zu dem Schluss kommen, dass mehr Aufträge pro Tag zugestellt werden können, als real jemals durchgeführt werden könnten. So muss sich der Nutzer gerade an dieser Stelle durch iterative Simulationsergebnisse zu einer real abbildbaren Tourenplanung, die auch in der Realität beispielsweise an Arbeitszeiten gebunden ist, gelangen.

Im **Fahrzeugtyp** werden für eine Gruppe von Fahrzeugen einer bestimmten Klasse die grundlegenden Eigenschaften zusammengefasst. Ein Auslieferungsfahrzeug kann beispielsweise in mehrfacher Ausführung genutzt werden, wobei typische Restriktionen dieselben sind. Ein Fahrzeugtyp mit einer bestimmten Kapazität, Kosten- und Lenkzeitvorschriften wird so als Muster festgelegt. Dieser Typ wird dann dem entsprechenden Fahrzeug zugeteilt, wodurch auch alle Eigenschaften des Fahrzeugtyps beim Fahrzeug berücksichtigt werden. Durch eine solche Verknüpfung müssen gewisse Restriktionen nur einmal allgemein und nicht für jedes einzelne Fahrzeug separat angelegt werden. Der Objektdialog „**Fahrzeug**“ ist eines der wichtigsten Objekte der Tourenplanung. Darüber wird jedes einzelne Fahrzeug, welches für eine Planung zur Verfügung stehen

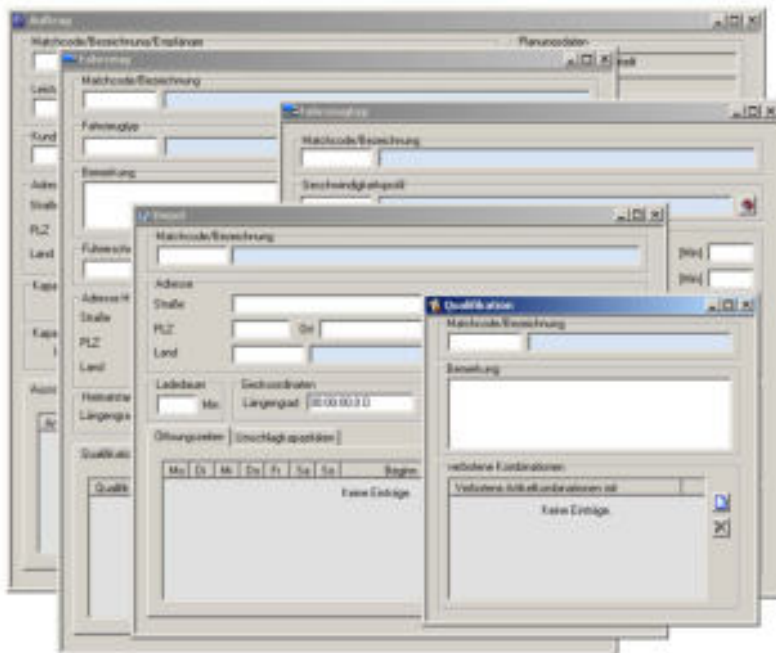


Abbildung 17: Aufstellung einiger Objektdialoge

Quelle: eigene Darstellung

kann, angelegt. Neben dem zugehörigen Fahrzeugtyp muss hier eine Bezeichnung des Fahrzeugs eingetragen werden. Beispielsweise „Sprinter01“. Ebenso verlangt das System

eine Adresse eines Heimatstandortes, wodurch die geographischen Koordinaten berechnet werden. Zudem sind der Beginn und das Ende der Fahrtzeit, sowie die Einsatztage einzurichten. Ein weiterer Stammdatensatz ist das **Geschwindigkeitsprofil**. Ein solcher Dialog wird immer direkt bei einem Fahrzeugtyp hinterlegt und wird demnach auch für alle Fahrzeuge dieses Typs verwendet. Über das Profil wird festgelegt mit welcher durchschnittlichen Geschwindigkeit ein Fahrzeugtyp auf bestimmten Straßen, wie Autobahn, Landstraße oder in der Stadt fährt. Innerhalb der Software TransIT sind standardmäßige Geschwindigkeitsprofile eines Personenwagens und eines Lastwagens bereits eingerichtet, nicht jedoch wie angesprochen Geschwindigkeitsprofile eines Lastenfahrrades. Dieses wurde durch eigene Testfahrten und durch Abgleich real gefahrener Zustelltouren im Laufe des Projektes feinjustiert. Weiterhin sind **Qualifikationen** anzulegen. Diese werden im Objektdialog der Aufträge, sowie Fahrzeuge eingetragen und legen damit fest welche Aufträge bei der Tourenplanung zu einem Fahrzeug zugewiesen werden können. Dabei handelt es sich um verschiedene Filterkriterien, wie zum Beispiel eine bestimmte Paketgröße, die nur von einem bestimmten Fahrzeug transportiert werden kann. Die **Artikeltypen** sind mit den Qualifikationen vergleichbar, da es auch um Vorgaben der Zuordnung von Aufträgen geht. Der einzige Unterschied ist, dass die Artikeltypen nicht bei einem bestimmten Fahrzeug, sondern beim Fahrzeugtyp vermerkt werden. Möchte man keine Einschränkungen vorgeben, kann einfach ein Artikeltyp „Standard“ angelegt werden. Mithilfe des **Leistungstyps** lassen sich die Aufträge in Kategorien einteilen. Hierbei geht es jedoch hauptsächlich um eine Darstellung mit Symbolen im TransIT. Beispielsweise können Express-Aufträge visuell vom Standardversand abgegrenzt werden. Eine letzte wichtige Einstellung ist die Einrichtung der **Depots**. Dabei werden dem Depot spezifische Kriterien hinterlegt wie beispielsweise wie oft und ab wann dieses angefahren werden kann. Zudem werden die Lastenfahräder in diesem Fall dem jeweiligen Mikrodepot zugewiesen, dass die Software diese nach dem Zustellvorgang wieder zurück zum Mikrodepot lotst, wodurch diese auf eine, wenn nötig, zweite Zustelltour zugeteilt werden können.

Nachdem diese grundlegenden Einstellungen vorgenommen worden sind, können nun die jeweiligen Aufträge mit Hilfe eines Datenimports eingeladen werden. Dabei ist stets auf eine einheitliche Satzstruktur und die Bereinigung von Rechtschreibfehlern in den Adress- und Ortszeilen zu achten, da dies für eine anschließende Geokodierung essenziell ist.

Die Satzstruktur innerhalb der Tourenplanungssoftware ist dabei stets gleich und besteht aus der Auftragsbezeichnung, Paketnummer (welche verfremdet wurde, um die Nachverfolgung der realen Sendung zu verhindern), Leistungstyp, Qualifikation, Artikeltyp, Adresse, Hausnummer, PLZ, Ort, „Früheste Anfahrt“, „Späteste Anfahrt“, Gewicht und Volumen. Gerade die letzten Größen sind für die Simulation von enormer Bedeutung. Die Elemente

„Früheste Anfahrt“ und „Späteste Anfahrt“ sind hier für das Zeitfenster einer Belieferung eines Kunden notwendig (was eine enorme Auswirkung auf die simulierte Tour haben kann) und durch das Gewicht und das Volumen werden für die Kapazität des Lastenfahrrades benötigt. Sollten diese Daten fehlen, so kann der Simulation und deren Prognose bei weitem nicht so große Aufmerksamkeit geschenkt werden, da diese dann relativ vage ausfällt. Auch reicht es nicht nur eine der beiden Größen zu kennen, da in vielen Tests und Stichproben nachgewiesen werden konnte, dass es keinerlei Korrelation zwischen Gewicht und Volumen eines Pakets gibt (vgl. Abb. 22).

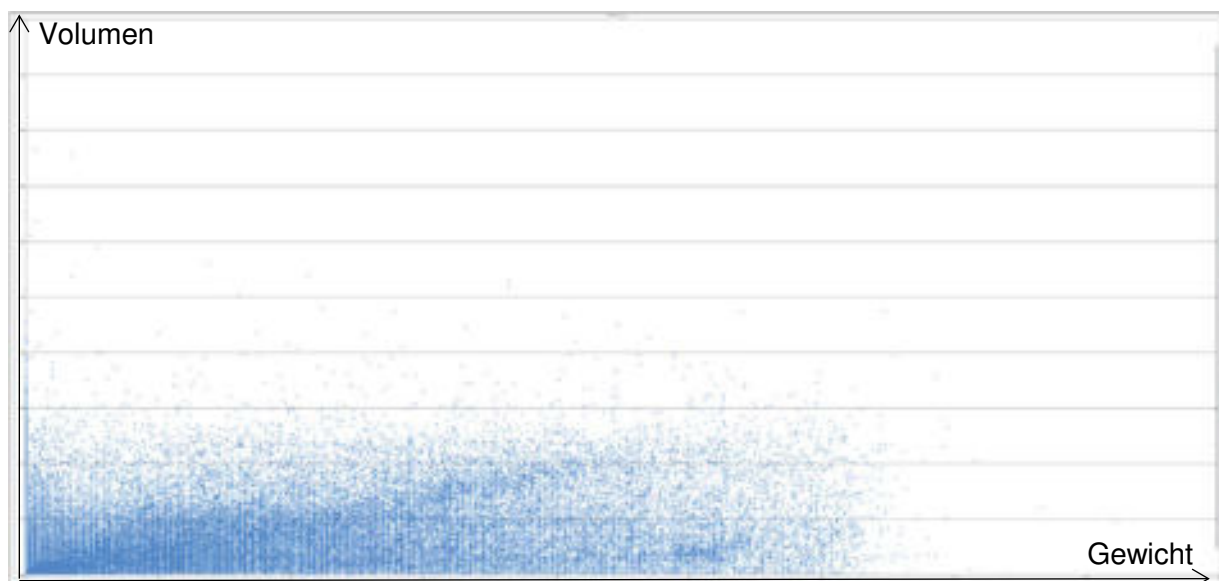


Abbildung 18 Fehlende Korrelation zwischen Volumen und Gewicht einer Sendung in der KEP-Branche

Quelle: Eigene Erhebung und Darstellung

Zusätzlich wird durch eine Eingabe einer fixen und variablen Dauer des Auftrags, die Servicedauer und damit die individuelle Zeit der Zustellung festgelegt. Dieser Parameter ist ebenfalls von entscheidender Bedeutung, da ansonsten nur über einen Mittelwert, welcher de facto gar nicht existiert, simuliert werden kann. Dadurch entsteht in der Folge wie aus den gleichen Gründen wie oben ausgeführt kein für die Praxis taugliches Ergebnis.

5.1.4 Simulation des Lastenfahrradeinsatzes

Im folgenden Abschnitt wird die Simulation verschiedener Szenarien beschrieben. Diese wurden zu Beginn des Projektes dazu benutzt, sich der Komplexität bewusst zu werden und somit in der Fülle der Datenmengen einen geordneteren Überblick zu wahren. Natürlich wurden in der Folge auch Simulationen und Berechnungen für jeden einzelnen Tag vorgenommen, welcher in der Folge analysiert, simuliert, be- und ausgewertet wurde. Für die

Übersichtlichkeit in diesem Kontext werden drei Szenarien vorgestellt, die auch für den Leser ein umfängliches Abbild generiert, um den Gesamtzusammenhang besser einzuordnen. Dabei werden zwei Extremszenarien dargestellt (minimal und maximal) und ein weiteres Szenario, welches einen Mittelwert mit durchschnittlichen Werten abbildet. Diese Vorgehensweise entsteht aus der Logik der sich über den Wochenverlauf veränderlichen Anzahl an Paketen, die in der Mitte der Woche ihr Maximum erreichen. Des Weiteren ist die KEP-Branche noch saisonalen Eiflüssen unterlegen wie Ferien oder Feiertagen wie Weihnachten oder Ostern, wo das Sendungsaufkommen häufig höher ist, als während des restlichen Jahres, auch Winter- und Sommereinflüsse an wirken sich auf die Anzahl der Sendungen pro Tag aus.

Als Untersuchungsraum wird innerhalb dieser Szenarienanalyse die Nürnberger Innenstadt untersucht und an dieser Stelle dargestellt. Die anderen Gebiete und Postleitzahlengebiete wurden innerhalb des Projekts ebenso untersucht und analysiert.

Abbildung 23 zeigt eine Übersicht über die Anzahl der Aufträge des Innenstadtbereichs, welche zu der Zeit dieser Szenarienanalyse vorlagen. Die farbliche Unterteilung der Tagesaufträge ergibt sich durch die zwei festgelegten Qualifikationen „Fahrrad“ und „Sprinter“. Anhand der Auftragsmenge pro Tag kann man schon eine erste Auswahl der Extrema treffen. Jedoch wird dabei die Gewichts- und Volumenauslastung vernachlässigt. Erst in Verbindung mit einer Betrachtung der durchschnittlichen, minimalen und maximalen Gewichts- und Volumendaten ergibt sich eine geeignete Zusammenstellung der Tage für die drei Szenarien. Hierbei ist zu beachten, dass kein Tag alle Extremwerte vereint, wodurch man abwägen muss, welcher Tag am nächsten an ein Minium, einen Mittelwert oder ein Maximum heranreicht.

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept
auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

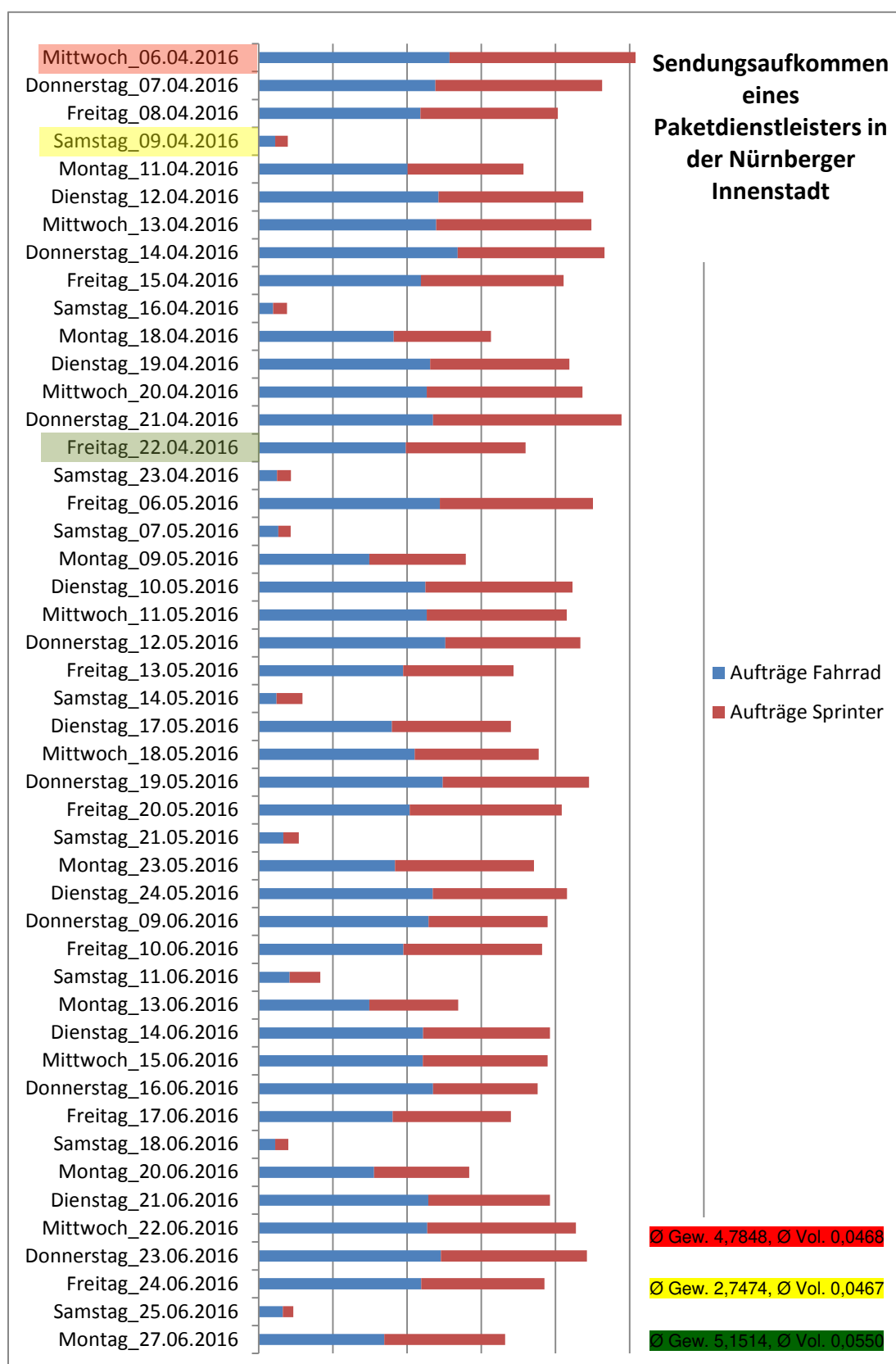


Abbildung 19 Übersicht Sendungsaufkommen eines Projektpartners in der Nürnberger Innenstadt

Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung der bereitgestellten Daten

Mittwoch, der 06.04.2016 stellt das Szenario für einen Tag mit maximaler Auslastung dar, da an diesem Tag das Maximum aller vorliegenden Pakete erreicht wurde. Zudem liegen die durchschnittlichen Volumen- und Gewichtswerte über dem Durchschnitt. Samstag, der 09.04.2016 repräsentiert ein Minimum an Auslastung. Die Aufträge, sowie das durchschnittliche Volumen und Gewicht befinden sich sehr nahe am minimalen Wert. Für einen Tag mit mittlerer Auslastung bieten sich mehrere Möglichkeiten an. Es wird Freitag, der 22.04.2016 ausgewählt. Dieser Tag liegt zwar von der Auftragsanzahl leicht unter dem Mittelwert, jedoch ist dieser von den Gewichts- und Volumendaten her am repräsentativsten. Eine weitere Aufstellung in Abbildung 29 zeigt das durchschnittliche Sendungsaufkommen der Innenstadt nach Wochentagen. Auch hier wird noch einmal deutlich, dass Mitte der Woche die größte Auslastung gegeben ist. Montag, Dienstag und Freitag können als mittlere Tage verstanden werden. An Samstagen herrscht dagegen ein sehr niedriges Sendungsaufkommen.

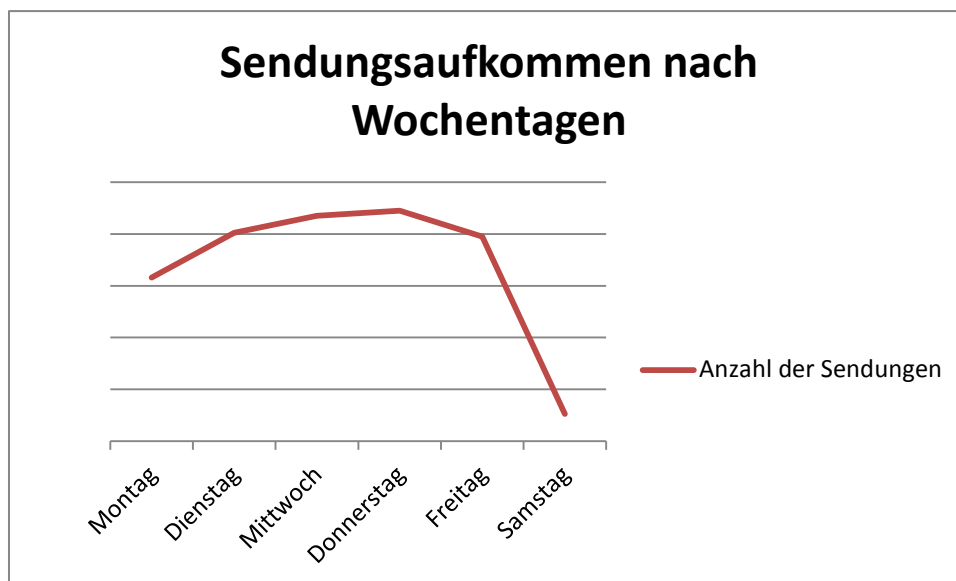


Abbildung 20: Sendungsaufkommen nach Wochentagen

Quelle: Eigene Darstellung

Die Simulationen der drei ausgewählten Tage finden alle unter Verwendung der eingepflegten Stammdaten, Fahrzeuge und Mikrodepots sowie den importierten Auftragsdaten statt. Zu Beginn wird die Simulation des Maximums durchgeführt. Nach mehrfacher Anpassung ergibt sich folgender Verlauf (siehe Abbildung 24).

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

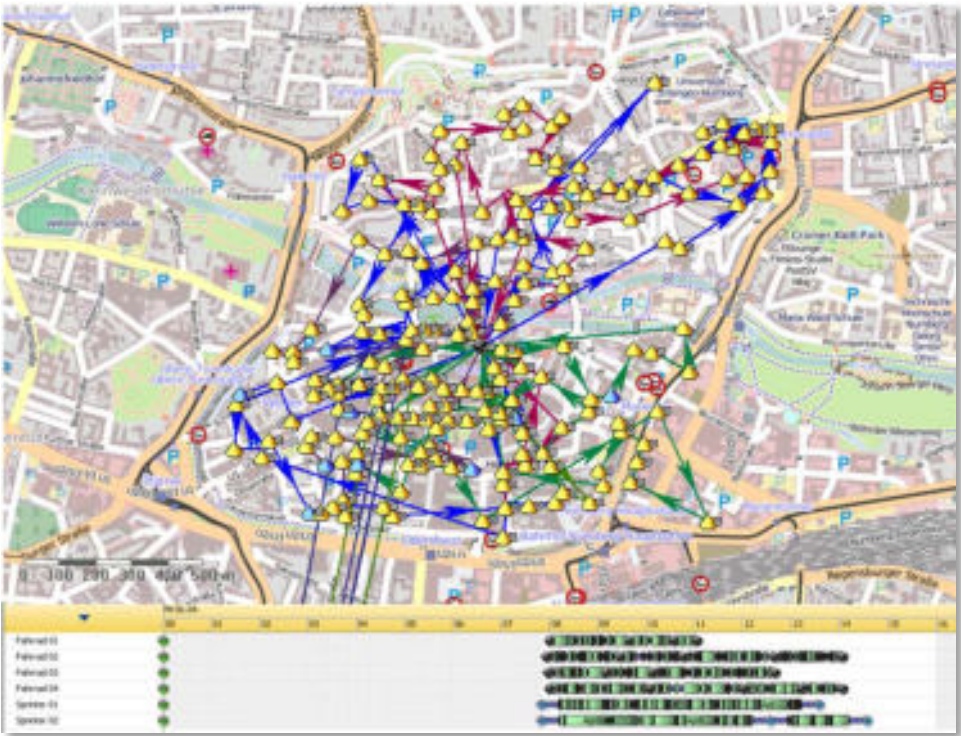


Abbildung 21: Ergebnis Landkarte Simulation Maximum

Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung des Tourenplanungssystems TransIT

Für eine Auslieferung im Zeitraum 8:00 bis 14:00 Uhr werden hier sechs Touren für sechs Fahrzeuge geplant. Dabei werden aufgrund der zwei verschiedenen Qualifikationen vier Fahrräder und zwei Sprinter benötigt. In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse der Optimierung zusammengefasst.

Tour	Tourstart	Tourende	Tourdauer	Anz. Aufträge	Anz. Stopp	Aufträge/ Stopp	Anz. Depotanfahrten	Summe Gewicht	Summe Volumen	Max.Auslastung Gewicht %	Max.Auslastung Volumen %
Tour 1:											
Fahrrad 01	06.04.2016 08:00	06.04.2016 11:02	03:02	83	34	2,2	4	499,1	3,42	89,9	95,5
Tour 2:											
Fahrrad 02	06.04.2016 07:56	06.04.2016 14:04	06:08	146	97	1,4	5	904,19	6,95	97,3	100
Tour 3:											
Fahrrad 03	06.04.2016 07:58	06.04.2016 12:39	04:41	123	68	1,7	4	527,6	5,92	88,7	99,5
Tour 4:											
Fahrrad 04	06.04.2016 08:00	06.04.2016 14:04	06:04	162	72	2,1	5	717,91	6,41	85,6	99,5
Tour 5:											
Sprinter 01	06.04.2016 07:50	06.04.2016 13:34	05:44	251	81	3	2	1053,44	12,8	70,2	98,5
Tour 6:											
Sprinter 02	06.04.2016 07:50	06.04.2016 14:33	06:43	266	47	5,3	3	1608,85	21,15	71,7	99,5

Abbildung 22: Ergebnisse Simulation Maximum

Quelle: Eigene Darstellung

Das Fahrzeug „Fahrrad 01“ ist der ersten Tour zugeteilt. Abbildung 23 zeigt im linken Bild unter anderem den exakten Fahrverlauf des ersten Fahrrads mit seinen zugehörigen Touren,

welcher durch die türkisfarbene Linie gekennzeichnet ist. Die Pfeile geben lediglich die Richtung der Auslieferungsvorgänge an.

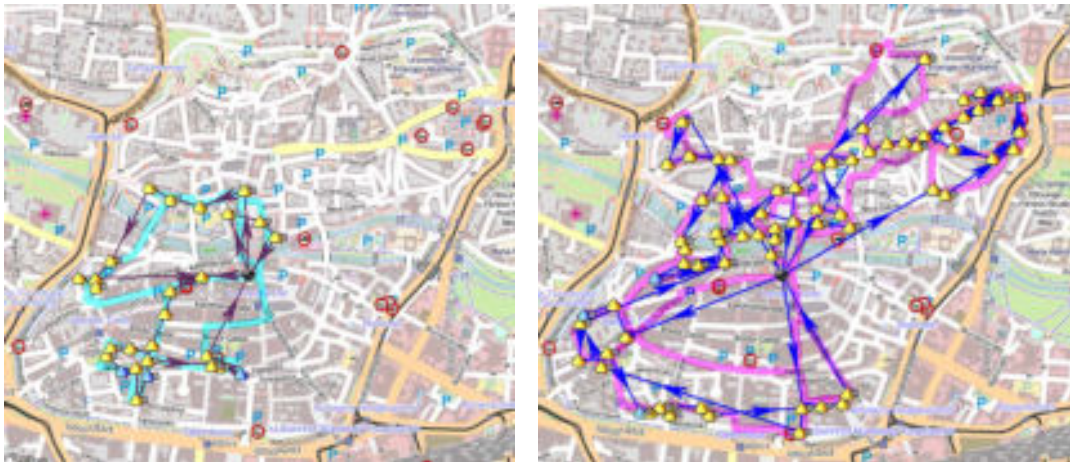


Abbildung 23: Simulation Maximum Verlauf Tour 1 und 2

Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung des Tourenplanungssystems TransIT

Bei einer Tourdauer von ungefähr drei Stunden werden 83 Aufträge ausgeliefert. Im Schnitt sind dabei circa zwei Aufträge pro Stopp zu verzeichnen. Um die Auftragsanzahl zu bewerkstelligen, muss der Fahrer dreimal beim Standort des Mikro-Depots nachladen. Am Ende der Tour wird das Fahrrad über Nacht im Mikrodepot untergestellt und bleibt dort bis zum nächsten Tag abgeschlossen. „Tour 1“ ist sozusagen in drei geschlossene Auslieferungsvorgänge unterteilt, bei denen eine maximale Auslastung des Volumens von 95,5%, sowie eine 89,9%-ige Auslastung des Gewichts erreicht wird. Insgesamt werden ein Volumen von 3,42 m³ und ein zugehöriges Gewicht von 499,1 kg bewältigt. Für den Zeitraum von 8:00 bis 11:00 Uhr ist dieses Fahrzeug gut ausgelastet. Dieses könnte jedoch noch an anderer Stelle genutzt werden, um die Tagesauslastung des Fahrzeugs zu erhöhen. Eine Umlagerung der Aufträge auf die anderen drei Fahrräder kommt dagegen eher nicht in Frage, da diese fast voll ausgelastet sind und sich dadurch kein großer Spielraum mehr ergibt. Die zweite Tour wird durch das Fahrzeug „Fahrrad 02“ bedient. Rechts in Abbildung 23 ist auch hier der exakte Verlauf der Tour gekennzeichnet. Bei dieser Tour werden die maximalen 6 Stunden Auslieferungszeit voll ausgenutzt. Man geht dabei von einem 8 Stunden Arbeitstag aus und berücksichtigt zwei Stunden als Puffer für Beladen, Pausen oder sonstige Umstände. Das Fahrrad ermöglicht es in dieser Zeit 146 Aufträge, bei durchschnittlich 1,4 Aufträgen pro Stopp zuzustellen (insgesamt 97 Stopps). Dabei muss viermal im Mikro-Depot nachgeladen werden, wodurch ein Gesamtgewicht von 904,19 kg, sowie ein Gesamtvolumen von 6,95 m³ erreicht wird. Im besten Fall erreicht das Fahrzeug hier eine Auslastung von 97,3% beim Gewicht und sogar 100% beim Volumen. Die dritte Tour wird von „Fahrrad 03“ durchgeführt, welches Abbildung 28 im linken Bereich zeigt.



Abbildung 24: Simulation Maximum Verlauf Tour 3 und 4

Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung des Tourenplanungssystems TransIT

In fast fünf Stunden werden hier 123 Sendungen, bei 1,7 Aufträgen pro Stopp abgeschlossen. Der Fahrer muss das Fahrzeug dreimal nachbefüllen und kommt somit auf ein Gewicht von 527,6 kg und ein Volumen von 5,92 m³. Beim Beladen wird eine maximale Auslastung des Gewichts von 88,75%, beim Volumen sogar 99,5% erreicht. Eine komplette Auslastung der eingeplanten sechs Stunden Zustellzeit wird hier nicht ganz erzielt. Dies lässt einen Spielraum für die Zustellung zu. Bei der vierten Fahrradtour wird die Zeit dagegen voll ausgeschöpft. Dieses Fahrrad schafft mit einer Anzahl von 162 die meisten Aufträge, da hier pro Stopp im Schnitt zwei Pakete abgeliefert werden können. Das Fahrzeug muss dazu viermal nachbestückt werden. Die Summe des Gesamtgewichts beträgt 717,91 kg, das gesamte Volumen 6,41 m³. Es kommt zu einer maximalen Auslastung des Gewichts von 85,6% und 99,5% beim Volumen. Die Sprinter bedienen vor allem Großaufträge, bei denen deutlich mehr als drei Aufträge pro Stopp zu verzeichnen sind. Hierfür wird nicht das Mikrodepot genutzt, sondern die Touren der Sprinter starten direkt vom Depot am Nürnberger Hafen auf die jeweilige Zustelltour. Diese beliefern gerade die Straßen, die geprägt sind von großvolumigen Aufträgen oder vielen Paketen pro Stopp, da sich diese nicht für die Zustellung via Lastenfahrrad eignen. Diese Stopps befinden sich in der Innenstadt meist in den Einkaufsstraßen und in Gebieten des Handels (vgl. Abb. 29).

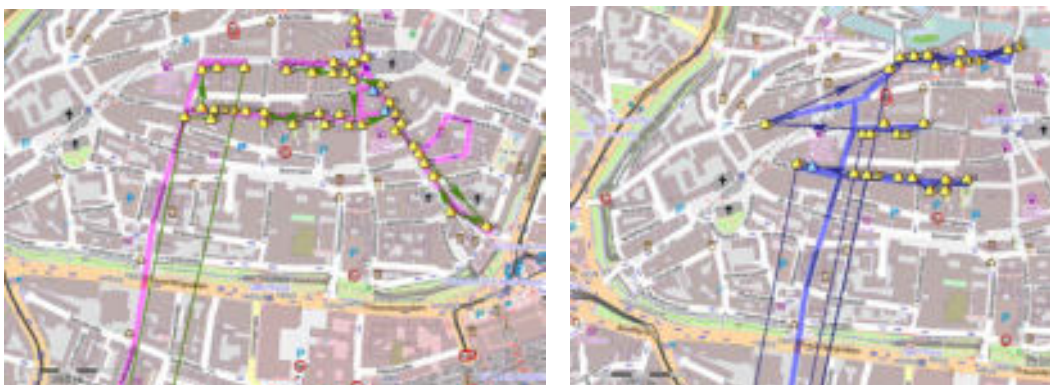


Abbildung 25: Simulation Maximum Verlauf Tour 5 und 6

Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung des Tourenplanungssystems TransIT

Pro Stopp werden hier im Durchschnitt mindestens drei Sendungen abgeladen. Mit fast sechs Stunden ist auch hier die maximale eingeplante Zeit ausgenutzt. Bei der sechsten Tour kommt der „Sprinter 02“ zum Einsatz (siehe rechts in Abbildung 29). In über sechs Stunden wird das Depot zweimal zum Nachladen angefahren, wodurch 266 Sendungen bewerkstelligt werden können. Mit durchschnittlichen 5,3 Stopps pro Auftrag muss dieses Fahrzeug am wenigsten Adressen anfahren. Insgesamt wird ein gesamtes Gewicht von 1608,85 kg mit einem Volumen von 21,15 m³ ausgefahren. Die Auslastung des Sprinters beträgt beim Volumen bis maximal 99,5%.

Zusammenfassend kann man sagen, dass an einem Tag mit maximaler Auslastung mindestens zwei gut belastbare Sprinter benötigt werden. Die Fahrräder sind in der vorliegenden Simulation zwar nicht alle komplett ausgelastet, jedoch wäre eine Reduktion auf 3 Fahrräder an einem solchen Tag kaum abzuwickeln. Ein Spielraum gibt Sicherheit bei schwankenden Volumen- oder Gewichtswerten und kann unvorhersehbare Risiken abfangen. Gegebenenfalls könnte ein Sprinter eines benachbarten Gebiets einige Sendungen übernehmen, um das Fahrrad, welches nicht gut ausgelastet ist, abzulösen. Alternativ könnte das Fahrrad nach der dreistündigen Tour aber auch noch in einem anderen nahen gelegenen Gebiet zur Unterstützung eingesetzt werden.

Im Folgenden wird die **Simulation des Minimums** beschrieben. Für die Planung stehen insgesamt nur 78 Aufträge bereit, wobei nach der Aufteilung der Sendungen in „sprinter-“ und „fahrrahfähige“ Aufträge, 44 auf das Fahrrad und 34 auf den Transporter geladen werden könnten. In der Simulation ergäbe sich aber als rentabelste Möglichkeit, diese alle mit dem Fahrrad zuzustellen. Mit zwei verschiedenen Fahrzeugtypen würde sich nicht annähernd eine geeignete Auslastung ergeben. Nach der Optimierung ergibt sich in der TransIT-Landkarte folgendes Bild.



Abbildung 26: Ergebnis Landkarte Simulation Minimum

Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung des Tourenplanungssystems TransIT

Für die Gesamtzahl von 78 Aufträgen wird hier gerade ein Fahrrad benötigt. Dies bestätigt noch einmal, dass der zusätzliche Einsatz eines Sprinters überflüssig wäre. In der Karte rot gekennzeichnet ist der exakte Verlauf der Zustellung. Abbildungen 30 und 31 zeigen die Ergebnisse der Tourenplanung.

Tour	Tourstart	Tourende	Tour- dauer	Anz. Aufträge	Anz. Stops	Aufträge/ Stopp	Anz. Depot- anfahrten	Summe Gewicht	Summe Volumen	Max. Auslastung Gewicht %	Max. Auslastung Volumen %
Tour 1: Fahrrad 01	09.04.2016 07:59	09.04.2016 10:46	02:47	78	33	2,2	3	214,3	3,69	57,1	99,5

Abbildung 27: Ergebnisse Simulation Minimum

Quelle: Eigene Darstellung

Dabei gibt es nur einen Tourenplan für das „Fahrrad 01“, bei dem die 78 Aufträge in zwei Zustellrunden abgewickelt werden. Pro Adresse werden im Durchschnitt zwei Pakete überreicht. Insgesamt werden ungefähr drei Stunden für die Dauer der Auslieferung eingeplant, was mit dem Beladen gerade einem halben Arbeitstag entspricht. Das Fahrrad erreicht während dieser Zeit aber eine maximale Auslastung des Volumens von 99,5%. In der Summe werden ein Gewicht von 214,3 kg und ein Volumen von 3,69 m³ erlangt. Die Samstage stellen als einziger Wochentag einen extremen Ausreißer in Richtung einer minimalen Auslastung dar. An solch einem Tag wird je nach Bedarf maximal ein Fahrrad benötigt. Man kann den Wochentag somit teilweise als halben Arbeitstag verbuchen, oder

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

auch Touren aus benachbarten Gebieten mitbringen. Durch eine gezielte Umlagerung könnte die Tagesauslastung doch noch verbessert werden.

Zuletzt schließt sich noch die Simulation eines Mittelwerts an. Hierbei erhält man einen guten Einblick zu einer durchschnittlichen Tagesauslastung. Die Simulation für Freitag, den 22.04.2016 zeigt folgendes Ergebnis in der Landkarte.

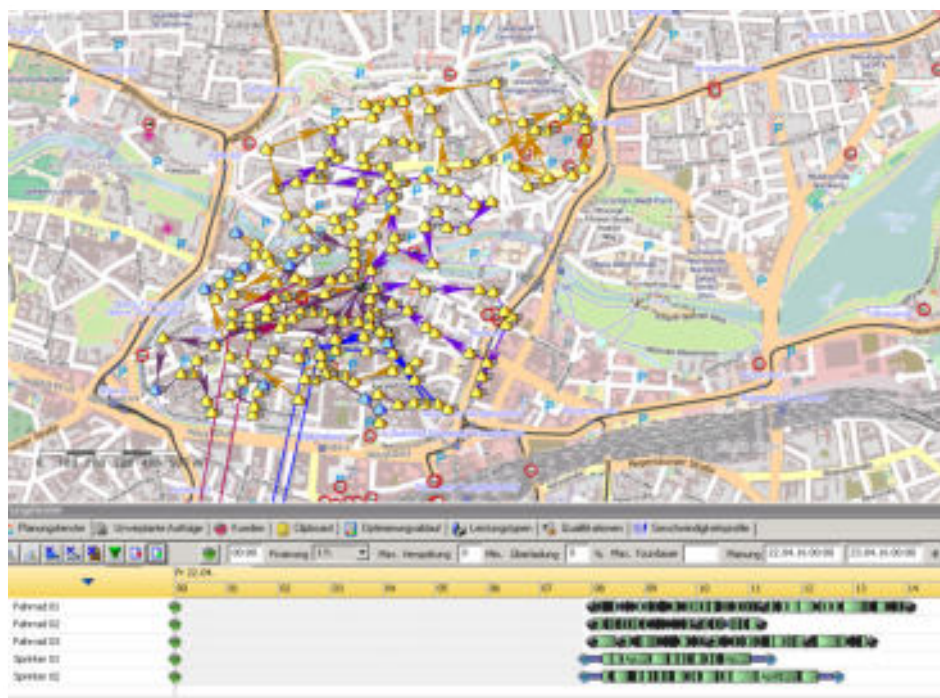


Abbildung 28: Ergebnis Landkarte Simulation Mittelwert

Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung des Tourenplanungssystems TransIT

Für insgesamt 719 Aufträge sind fünf Tourenpläne aufgestellt. Drei Fahrräder und zwei Transporter bewältigen dabei die Zustellung der Sendungen. Die Sprinter konzentrieren sich dabei besonders auf die Straßen mit Großaufträgen. Das Ergebnis in Zahlen wird in der nächsten Abbildung dargestellt.

Tour	Tourstart	Tourende	Tour- dauer	Anz. Aufträge	Anz. Stopp e	Aufträge/ Stopp	Anz. Depot- anfahrten	Summe Gewichte	Summe Volumen	Max. Auslastung Gewicht %	Max. Auslastung Volumen %
Tour 1:	22.04.2016 07:59	22.04.2016 14:04	06:05	165	86	1,9	3	496	3,9	99,7	98
Fahrrad 01											
Tour 2:	22.04.2016 07:59	22.04.2016 11:13	03:14	85	54	1,5	3	480,4	2,86	96,9	77
Fahrrad 02											
Tour 3:	22.04.2016 07:59	22.04.2016 13:20	05:21	146	72	1,9	5	878,17	7,21	99,5	87,5
Fahrrad 03											
Tour 4:	22.04.2016 07:50	22.04.2016 11:23	03:33	131	24	5	2	707,5	9,22	47,2	70,9
Sprinter 01											
Tour 5:	22.04.2016 07:50	22.04.2016 12:41	04:51	192	39	4,7	2	878,22	10,39	58,5	78,9
Sprinter 02											

Abbildung 29: Ergebnisse Simulation Mittelwert

Quelle: Eigene Darstellung

Bei der ersten Tour wird das „Fahrrad 01“ mit sechs Stunden Tourdauer komplett ausgelastet. Zweimal wird das Fahrzeug neu beladen und kann dadurch ein Gesamtgewicht von 496 kg und ein Volumen von 3,9 m³ stemmen. Zudem wird eine Volumenauslastung von 98% erreicht. „Fahrrad 02“, dem der zweite Tourenplan zugewiesen ist, wird nur zur Hälfte der maximal vorgegebenen Tourdauer genutzt, wodurch auch nur 85 Sendungen, bei durchschnittlichen 1,5 Aufträgen/Stopp und drei Nachladungen, ausgeliefert werden. Einsparen kann man dieses Fahrrad jedoch nicht. Eine Umlagerung der Aufträge auf die anderen Fahrräder ist nicht möglich, da diese fast voll ausgelastet sind. Es wäre eher sinnvoll einige Aufträge mit der Qualifikation „Fahrrad“ an einen der beiden Sprinter zu übertragen, um eine bessere Gesamtauslastung zu erreichen. Innerhalb der drei Stunden ist das Fahrzeug mit einer maximalen Auslastung des Gewichts von 99,5% gut eingesetzt. Es bietet sich ein Spielraum an, für Tage an denen das Sendungsaufkommen etwas erhöht ist. Das dritte Fahrrad ist, wie bereits erwähnt, fast voll ausgelastet und erreicht bei ungefähr 1,9 Aufträgen pro Stopp eine Gesamtzahl von 146 Stück. Im Verlauf der Tour muss das Fahrzeug viermal im Mikrodepot versorgt werden. Insgesamt wird so ein Gewicht von 878,17 kg und ein Volumen von 7,21 m³ ausgefahren. Dabei kommt es sogar zu einer maximalen 99,5%-igen Gewichtsauslastung. Abbildung 34 zeigt den jeweiligen Verlauf der eingesetzten Fahrräder.



Abbildung 30: Simulation Mittelwert Verlauf Tour 1-3

Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung des Tourenplanungssystems TransIT

Die restlichen Aufträge sind aufgrund ihrer Qualifikation den Sprintern zugeordnet. „Sprinter 01“ ist gut dreieinhalb Stunden eingeplant und schafft in dieser Zeit 131 Aufträge bei üblichen fünf Paketen pro Haltepunkt. Beladen wird nur einmal zu Beginn der Tour mit einem Gewicht von 707,5 kg sowie Volumen von 9,22 m³. Dadurch ist eine Volumenauslastung von 70,9 % gegeben. Der letzte Tourenplan wird durch den „Sprinter 02“ bedient. Hier können in fast fünf Stunden 192 Aufträge ausgeliefert werden, welche von Anfang an mit einem Gewicht von 878,22 kg und 10,39 m³ Fassungsvermögen verladen sind. Somit kommt es zu einer maximalen Volumenauslastung von 79,9%. In der folgenden Abbildung 35 wird der

Ablauf der Touren der beiden Sprinter aufgezeigt. Auch hier werden nur die Großstopps bedient, wobei die Touren nur wenige Adressen umfassen.

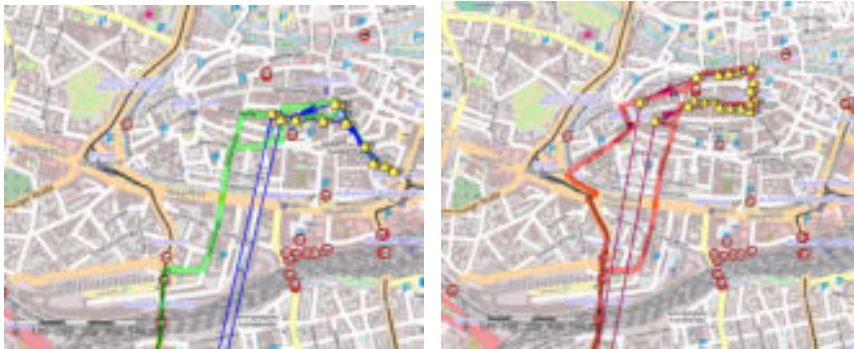


Abbildung 31: Simulation Mittelwert Verlauf Tour 4 und 5

Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung des Tourenplanungssystems TransIT

Zusammenfassend kann man sagen, dass abgesehen von einigen Ausreißern eine minimale und maximale Auslastung an bestimmten Wochentagen gegeben sein kann. Dabei werden bei der Umsetzung einer nachhaltigen Paketzustellung in der Nürnberger Innenstadt minimal ein, oder maximal vier Fahrräder benötigt. Die meisten Tage bewegen sich im Bereich Sendungen (vgl. Abb. 35) um den dargestellten Mittelwert, was einem Bedarf von zwei bis drei Lastenfahrrädern ergibt. Bei der vorliegenden Simulation eines Tages mit mittlerer Auslastung bietet sich zu einer Volllauslastung der drei Fahrräder ein Spielraum von circa 80 bis 100 Paketen nach oben an. Dadurch können die meisten Tage gut abgedeckt werden. An Tagen mit einem geringeren Sendungsaufkommen können freie Kapazitäten der Fahrräder für umliegende Gebiete genutzt werden. Bei einer deutlich erhöhten Auftragsanzahl können die zu hohen Mengen von anderen Touren benachbarter Gebiete übernommen werden.

An dieser Stelle soll nochmals Erwähnung finden, dass die oben aufgezeigten Szenarien theoretischer Natur sind und bei der Projektkonzeption halfen, eine erste Analyse bezüglich der notwendigen Kapazitäten zu ermitteln und valide zu überprüfen, inwiefern die Volumina und Gewichte durch die Lastenfahrräder transportiert werden können. Im operativen Betrieb kommt erschwerend dazu, dass bei der Vorsortierung im Hauptdepot die Pakete manuell ausgewählt werden müssen und nicht durch Automatisierungstechniken den Lastenfahrrädern zugewiesen werden können, da die IT-Systeme innerhalb der KEP-Unternehmen in sich geschlossen sind und es schwierig ist eine Schnittstelle zu den Projektergebnissen zu generieren. Dadurch kommt es im realen operativen Betrieb nicht dazu, dass so häufig wie beschrieben nachgeladen wird. Da meist die kleineren Pakete bei der Vorauswahl den Weg ins Mikrodepot finden, können mehr Pakete auf einmal in dem Lastenfahrrad verstaut werden. Die Anzahl der Stopps erhöht sich dadurch auch, da die

kleineren Pakete meist auf Kunden im B2C Business hindeuten. Da hier der Stoppfaktor nur knapp über 1 liegt und gerade auch das die Stopps sind, die seitens der KEP-Unternehmen auf das Lastenfahrrad verlagert werden sollten, nimmt die Anzahl der Stopps zu und der Nachladevorgang ab. Dennoch war diese Simulation von enormer Bedeutung, stellt aber nur einen Baustein zur erfolgreichen Umsetzung dar. Ein weiterer, da wie oben beschrieben beispielsweise Geschwindigkeitsprofile von elektrisch unterstützten Lastenfahrrädern nicht vorhanden sind, ist die Validierung der simulierten Ergebnisse durch eigene Testfahrten. Hier wurden in diesem Zusammenhang zudem auch die verkehrlichen (Un-)Gunstsituation innerhalb der Pilotgebiete untersucht. Im Nachhinein konnten bei zu großer Abweichung die vorhandenen Geschwindigkeitsprofile angepasst, verbessert und optimiert werden.

5.2 Validierung der Simulation durch Testfahrten

Um die ermittelten theoretischen Annahmen bezüglich der Fahrzeit und die damit verbundenen Eingabewerte mit der Routenplanungssoftware TransIT zu bestätigen bzw. zu optimieren, wurden Versuchsfahrten durchgeführt. Da zu dem Zeitpunkt noch keinerlei Erkenntnis oder Erfahrungen mit dem Lastenfahrrad vorlagen, wurde eine Strecke abgefahren, welche das Worst-Case-Szenario abdeckt und die im realen Betrieb gefahrenen Streckenlängen bei weitem übersteigen. Diese Strecke wurde zunächst mit dem Routenplanungsprogramm TransIT mit folgenden Ergebnissen simuliert:

- Theoretische Streckenlänge: 27,7 km
- Gesamtzeitbedarf der Simulation: 6h: 09 Min.
- Davon Zustellzeit: 4h: 23 Min.
- Gesamte Fahrzeit: 1h: 45 Min.
- Durchschnittl. Geschw. Simulation: 15,82 km/h

Über die Stadt Erlangen und den ADFC (Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club e.V.) konnte als Versuchsfahrzeug das Lastenfahrrad der Firma Radkutsche mit der Bezeichnung Musketier ausgeliehen werden (siehe Abbildung 36).



Abbildung 32: Versuchsfahrzeug Radkutsche Musketier

Quelle: Eigene Aufnahme

Die Versuchsstrecke beinhaltete dabei 58 Stopps mit 73 Paketen und wurde am 06.07.2016 am Maffeiplatz, welcher der ideal-theoretische Standort des Mikrodepots (Südstadt) für die Postleitzahlengebiete 90443, 90459, 90461 ist. Die real abgefahrte Strecke (siehe Abbildung 37) wurde mit der Smartphone-App Endomondo sowie den GPS-Tracker „GPS Data-Logger“ aufgenommen. Das Fahrradrouting erfolgte mit Hilfe von Googlemaps. Daten der Versuchsfahrt:

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

- Reale Streckenlänge: 26,5 km
- Gesamte Fahrzeit: 2h
- Durchschnittl. Geschw. Real: 12,92 km/h

Die Fahrzeitdifferenz zur simulierten Tour (TransIT) beträgt für die erste Versuchsfahrt ca. 15 Minuten und 1,2 km. Da festgestellt wurde, dass sowohl Fahrzeit als auch Restakkukapazität stark abhängig vom Fahrer ist, wurden weitere Versuche durchgeführt.

Bereits bei der ersten Testfahrt konnten einige Erkenntnisse bezüglich der Vorteile dieses Konzeptes hinsichtlich Wendigkeit, Zeitersparnis durch Benutzung der Radwege, welche mit Poller für den Kfz-Verkehr abgesperrt sind als auch bezüglich der Anforderungen eines solchen Lastenfahrrads gewonnen werden.

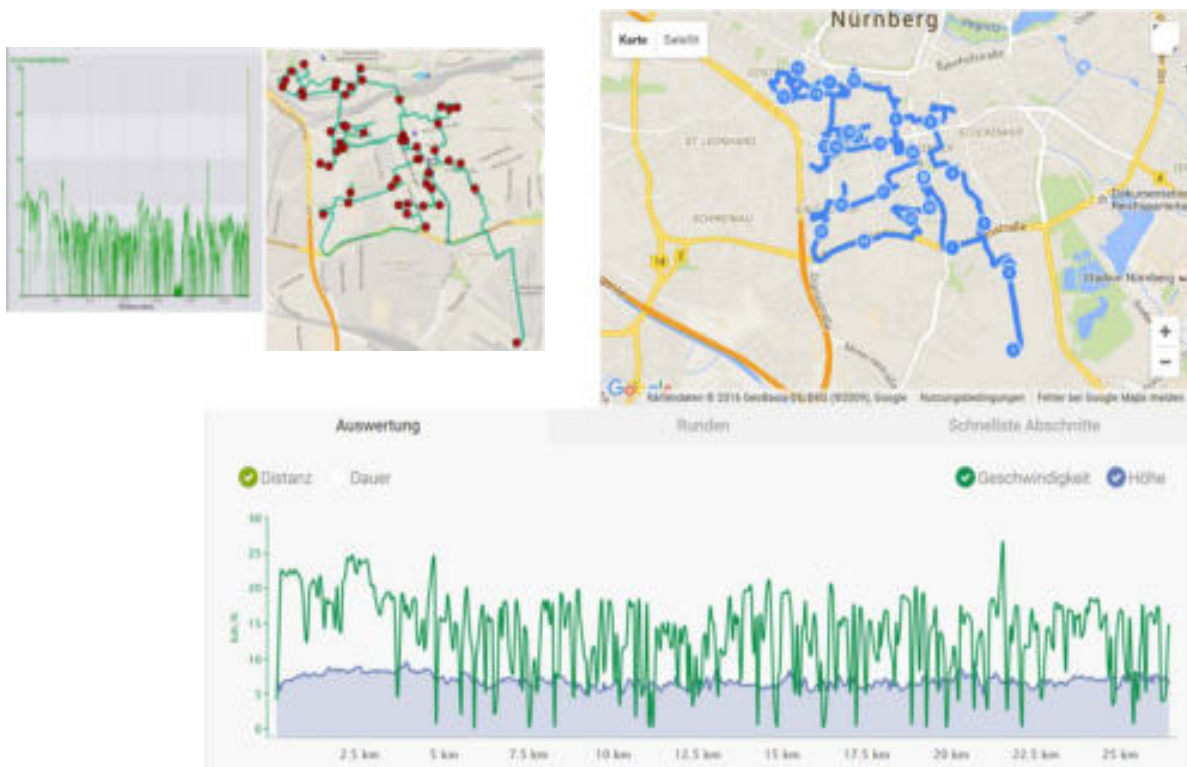


Abbildung 33: Realer Streckenverlauf der Versuchsfahrt am 06.07.2016

Quelle: Eigene Auswertung und Darstellung nach Endomondo

Weitere Testfahrten erfolgten in Zusammenarbeit mit dem Subunternehmer von DPD, welcher für die Zustellung entsprechende Pakete ausgesucht hatte; diese waren reale Sendungen des Tagesgeschäfts.

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg



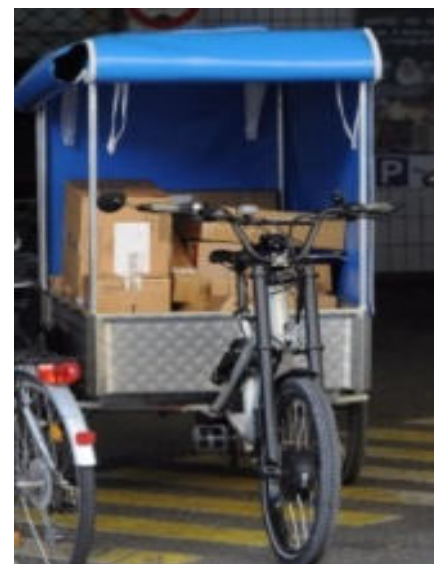
Abbildung 34: Links: Benutzung von mit Pollern abgesperrten Querstraßen; Rechts: Parken in zweiter Reihe mit dem Lastenfahrrad

Quelle: Eigene Aufnahme

DPD plante die Sendungen aufgrund der Zeitfensterzustellung und nicht geeigneter interner Routenplanungssoftware mit dem für die Transporter vorgegebenen Zeitbedarf ein. Die Testfahrten, zusammen mit dem Systempartner, wurden vom 30.08. bis 01.09.2016 durchgeführt und die Sendungsmenge täglich erhöht. Aufgezeichnet wurde wiederum mit der Smartphone App Endomondo.

Tag 1: 30.08.2016:

Bezeichnung	Werte Versuchsfahrt	Planung DPD
Streckenlänge	11,53 km	
Tourdauer	2h : 30 Min.	2h: 31 Min.
Pakete	46	
Stopps	39	



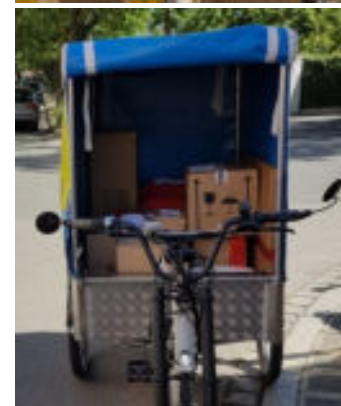
Quelle: Eigene Berechnungen und Aufnahmen

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Die Tourdauer, sowie die geplanten Zeitfenster konnten am ersten Tag eingehalten werden. Die Zeitfenster der mit der Transportertour geplanten Software wurden alle eingehalten.

Tag 2: 31.08.2016:

Bezeichnung	Werte Versuchsfahrt	Planung DPD
Streckenlänge	16,23 km	
Tourdauer	4h : 19 Min.	5h: 16 Min.
Pakete	69	
Stops	61	
Nachladedauer	ca. 12 Min.	



Quelle: Eigene Berechnungen und Aufnahmen

Am zweiten Tag wurde eine Nachladung am Nachmittag integriert. Die Erste Ladung (linkes Bild) enthielt 31 Pakete, die Nachladung 38 Pakete. Die Nachladung konnte in den regulären Zustellprozess integriert werden, da aufgrund der hohen Zustellgeschwindigkeit das für den Transporter geplante Zeitfenster unterschritten wurde und gewartet werden musste, bis das Zeitfenster erreicht war.

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept
auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Tag 3: 01.09.2016:

Bezeichnung	Werte Versuchsfahrt	Planung DPD
Streckenlänge	19,37 km	
Tourdauer	4h : 11 Min.	3h: 38 Min.
Pakete	68	68
Stops	59	59
Dauer der Panne	58 Min.	



Quelle: Eigene Berechnung und Aufnahme

Am letzten Versuchstag konnten die Zeitfenster und die vorgegebene Planung von DPD aufgrund einer unvorhergesehenen Reifenpanne zunächst nicht eingehalten werden. Die Behebung der Panne dauerte insgesamt 58 Minuten. Wegen der in den ersten beiden Tagen erzielten hohen Zustellgeschwindigkeit wurde am dritten Tag die Stoppzeit reduziert. Aufgrund des Ausfalles musste die Strecke entsprechend des Zeitfensters der Pakete angepasst werden. Dennoch konnte die verlorene Zeit bis auf 33 Minuten wieder hereingefahren werden.

6 Praktischer Betrieb

Der Projektpartner DPD startete inoffiziell bereits im Dezember 2016 mit einer improvisierten regulären Zustellung mit zu dem damaligen Zeitpunkt ungelabelten Lastenfahrrädern (siehe Abbildung 28), von einem suboptimalen Interims-Mikrodepot aus. Aufgrund der Tatsache, dass zu dem Zeitpunkt noch kein reguläres Mikrodepot gefunden wurde, experimentierte der Subunternehmer zusätzlich einem mit mobilen Depot in Form eines regulären Transporters. Der Transporter wurde hierfür bis unter das Dach beladen und die Sendungen für das Lastenfahrrad in kleinen Boxen vorbestückt. Das Lastenfahrrad diente als Satellit und die Treffpunkte für die Umladung bzw. Neubestückung wurden per Telefon bzw. WhatsApp kommuniziert. Das Fahrrad wurde bei jedem Treffen mit ca. 30 Stopps beladen, die Nachladedauer beträgt dabei ca. 10 Minuten. Die Auslieferungsgeschwindigkeit lag in der Anfangsphase bei ca. 15 Stopps pro Stunde.



Abbildung 35 Anfangsphase des Mikro-Depot-Konzepts

Quelle: Eigene Aufnahmen

Mit Hilfe kleinerer Behälter erfolgte zunächst die Sortierung der Sendungen für die Teilgebiete bzw. Straßenzüge. Dieses System hat sich im Verlauf des Pilotprojektes bewährt, woraufhin mehrere Europalettenmaß kompatible Behälter vom Projektpartner DPD angeschafft wurden. Die Vorsortierung nach Teilgebieten bzw. Straßenzügen ist hierbei elementar für die spätere Auslieferung, da aufgrund der beengten Situation im Ladebereich des Lastenfahrrads das Suchen nach einer Sendung unnötig viel Zeit in Anspruch nehmen würde. Im ersten Mikrodepot des Projektpartners DPD, welches aufgrund der suboptimalen Lage, des Platzbedarfs, Wetterschutzes und weiterer fehlenden Mikrodepotanforderungen eher als Provisorium anzusehen war, konnte nur der Umladeprozess des Zubringerfahrzeuges auf die Lastenfahrräder realisiert werden (siehe Abbildung 29). Der Vorsortierprozess erfolgte im Hauptdepot. Die Suche nach einem anforderungsgerechten Mikrodepot dauerte beim Projektpartner DPD mehr als ein halbes Jahr.



Abbildung 36 Beladung der Lastenfahrräder im ersten Mikro-Depot in der Löffelholzstraße

Quelle: Eigene Aufnahmen

Bei der Auslieferung aus dem ersten Mikrodepot konnten mitunter ca. 80 Stopps mit einem Lastenfahrrad pro Tag bei einer täglichen Einsatzdauer von durchschnittlich 4,6 Stunden erreicht werden.

6.1 Reguläre Mikro-Depot-Standorte und Ist-Daten der Praxisphase

Die Mikrodepotstandortsuche gestaltete sich als sehr zeitintensiv und war mit mehr Schwierigkeiten verbunden als vermutet. Schlussendlich wurden aber sowohl im Pilotgebiet „Innenstadt“ als auch im Pilotgebiet „Wohngebiet“ sowohl von der Lage als auch aus wirtschaftlicher Sichtweise gute Standorte gefunden werden. Diese Kombination aus Lage, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit durch relativ geringe Mietkosten ist die Problematik bei der Suche der Immobilienstandorte für das Mikrodepot. In der Innenstadt konnte in der Schlehengasse 12 (vgl. Abbildung 37) eine leerstehende Gewerbeimmobilie angemietet werden, die den nötigen Zugang und eine entsprechende Anfahrtsmöglichkeit bietet. Diese Immobilie befindet sich nicht direkt im Zentrum der Innenstadt, was diese für den Einzelhandel aufgrund von fehlenden Besucherverkehr relativ unattraktiv macht. Als Logistikimmobilie ist die Lage aber nahezu perfekt, da die Anlieferung nicht durch die gesamte historisch mittelalterlich geprägte Innenstadt erfolgen muss und das Zentrum dennoch in kürzester Zeit durch die Lastenfahrräder erreicht werden kann. Die sich in sog. B-Lage befindliche Immobilie wird aus städtebaulicher Sicht demnach nun optimal verwendet. Dass sich das Mikrodepot nicht genau in dem geographischen Zentrum des Auslieferungsgebiets befindet wird durch die Flexibilität der Lastenfahrräder ausgeglichen und hat keine negativen Auswirkungen auf die ökonomische Effizienz.

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

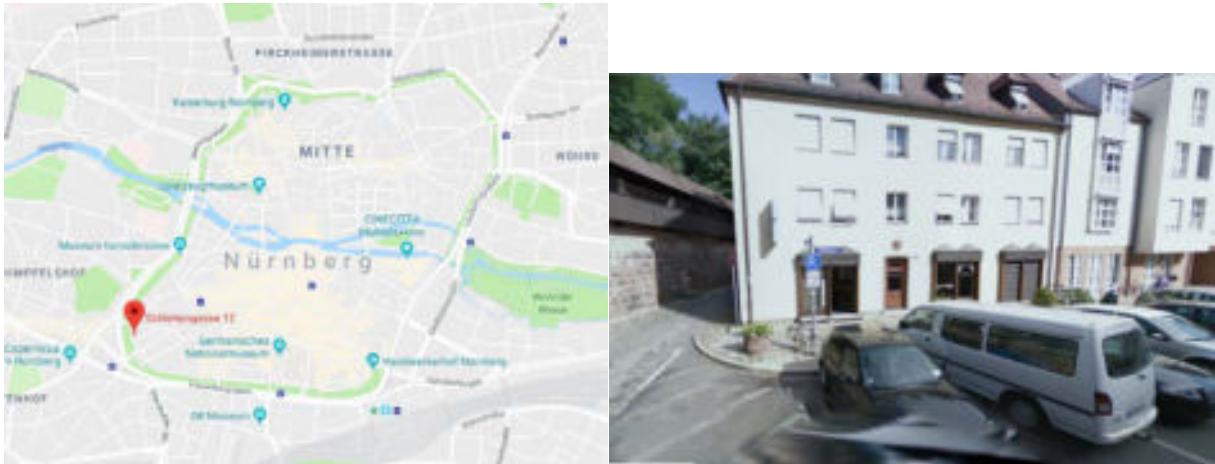


Abbildung 37 Geographische Lage und Eingangsbereich des Mikrodepots im Pilotgebiet „Innenstadt“

Quelle: Google Maps

Auch im Pilotgebiet „Wohngebiet“ wurde nach aufwendiger Suche ein Standort für das Mikrodepot gefunden. Auch hier gestaltete sich die Suche schwierig, da es beispielsweise teilweise nicht möglich war Inhaber von leerstehenden Immobilien zu ermitteln und somit kein Kontakt zustande kam, sodass man an potenziell guten Standorten keine Immobilienbesichtigungen durchführen konnte. Auch bereits mündlich vereinbarte Immobilienstandorte konnten aufgrund privater Entscheidungen seitens des Inhabers nicht realisiert werden. Schlussendlich wurde aber auch hier eine sehr gut gelegene Immobilie gefunden und angemietet. Diese befindet sich in der Allersberger Str. 185 im sog. Gewerbepark Nürbanum (vgl. Abbildung 38). Das Mikrodepot liegt im Kellergeschoss und kann durch einen Lastenaufzug erreicht werden.



Abbildung 38 Geographische Lage und Eingangsbereich des Mikrodepots im Pilotgebiet „Wohngebiet“

Quelle: Google Maps

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Das Mikrodepot liegt somit unmittelbar in dem zu beliefernden Gebiet, welches sich von dort aus schnell bedienen lässt.

Im Pilotgebiet „Wohngebiet“ wurden neben Tests auch schon reguläre Sendungen ab November 2016 durchgeführt. Zweck des teil-regulären Betriebs war es, bereits Erfahrungen bei widrigen Wetterbedingungen zu erlangen. Auch aus logistischer Sicht bereitet die Vorweihnachtszeit gerade in den Monaten November und Dezember stets eine Herausforderung, welche durch den Betrieb der Lastenfahrräder partiell getestet werden sollte.

Folgende Tabelle zeigt die Ist-Daten der Praxisphase des Pilotprojektes seit dem offiziellen Beginn des regulären Betriebs von März 2017 bis Oktober 2017:

Tabelle 3: Ist-Daten der Praxisphase 03/2017-10/2017 in Nürnberg

	Beginn der regulären Belieferung	Anzahl tägliche Lastenradtouren	Ø Anzahl der Pakete pro Tag	Anzahl Pakete insgesamt (bis Oktober 2017)
Pilotgebiet „Innenstadt“	März 2017	3	200	~30.000
Pilotgebiet „Wohngebiet“	November 2016	3	250	~55.000
Erweiterungsgebiet DPD	September 2017	2	150	

Quelle: eigene Erhebungen und Darstellung

6.2 Marktübersicht der Lastenfahrräder

Zur Ermittlung geeigneter Lastenfahrradhersteller wurde eine internetbasierte Marktrecherche auf dem europaweiten Markt vorgenommen. Die Lastenräder wurden nach unten beschrieben Kriterien bewertet und selektiert. Anschließend wurden fünf Hersteller und deren Produkte ausgewählt, die den Unternehmen präsentiert wurden. Im Anschluss wurden Experteninterviews geführt, um zu ermitteln welche Ansprüche die Unternehmen an die Fahrräder stellen und welche Besonderheiten und Spezialeinbauten sie sich an den Produkten wünschen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den Interviews wurden ausgewählten Herstellern Fragebögen zugesandt, die der Klärung der Frage dienten, ob die Hersteller den Wünschen der Unternehmen nachkommen können. Auf diese und auf die Resultate aus den Fragebögen wird in diesem Kapitel noch näher eingegangen. Auf Basis der gewonnenen Informationen konnte dem Entscheidungsfindungsprozess beigetragen werden.

Bei der Vorauswahl der Hersteller wurde zunächst betrachtet, ob die Hersteller mehrspurige Fahrzeuge anbieten und ob diese mit Elektro-Antrieb ausgestattet sind, da diese Kriterien die

Mindestanforderungen darstellen. Es wurde auch geprüft, welche Reichweite die Fahrzeuge mit dem jeweiligen Motor besitzen und ob Ersatz-Akkus zur Verfügung stehen, die während der Fahrt mitgeführt werden können. Weiterhin wurde berücksichtigt, welche Geschwindigkeit die Fahrräder maximal erreichen können und ob eine ausreichende Stabilität gegeben ist. Weiterhin wurden die Verschlussmöglichkeiten der Transportboxen in die Selektion miteinbezogen, da die Sicherung der Ware vor Diebstählen essenziell für die KEP-Unternehmen ist.

Außerdem war es von Bedeutung, welche Maße die Transportboxen des Lastenfahrrads besitzen und ob die Möglichkeit besteht, diese zu ändern beziehungsweise zu vergrößern. In diesem Rahmen wurde auch die maximale Kapazität der Zuladung in Betracht gezogen. Weiterhin wurden die Beschaffenheit und die Qualität des Akkus, der Bremsen und der Schaltungen überprüft, um zum einen Sicherheit zu gewährleisten und zum anderen eine Langlebigkeit der Komponenten sicherzustellen. Letztlich wurden Erfahrungsberichte und Referenzen der Produkte geprüft. Diese dienten zwar nicht als Ausschlusskriterium, konnten jedoch für einen umfassenderen Überblick sorgen.

Die beschriebenen Kriterien dienten der Vorauswahl geeigneter Hersteller und Produkte in der internetbasierten Marktrecherche. Es fiel auf, dass relativ zahlreiche Lastenfahrradanbieter für Privatkunden am Markt existieren. Diese zeichnete aus, dass die Produkte besonders auf den Transport von Kindern oder Einkäufen spezialisiert sind. Aus dieser Erkenntnis lässt sich ableiten, dass die Nachfrage nach diesen Produkten in der heutigen Zeit ansteigt und sich dieses Kaufverhalten besonders im urbanen Raum zeigt, um den häufigen Gebrauch des Autos zu verringern.⁸

Aber auch für den Gütertransport von Unternehmen existieren zahlreiche Angebote und Möglichkeiten von Lastenfahrrädern. Hier galt es innerhalb der Marktrecherche zu unterscheiden, welche Branche mit den Produkten angesprochen werden sollte. Beispielsweise eignen sich kleinere Transportboxen sehr gut für den mobilen Verkauf von Speisen oder deren Auslieferung aber auch für kleinere Kurierdienste. Die Größen der Transportboxen fielen jedoch oftmals zu klein aus für Konzerne wie DPD und GLS, die mit einer hohen Anzahl von Paketen kalkulieren müssen.

Unter Beachtung der bereits aufgezählten Kriterien konnten acht europaweite Hersteller ausgewählt werden, die geeignete Produkte im Rahmen der Untersuchung anbieten, darunter ein elektronisch unterstützter Fahrradanhänger. In der folgenden Tabelle werden die Modelle vorgestellt, die anhand der Recherchetätigkeit den größten Erfolg versprechen.

⁸ Vgl. Tagesspiegel online

Tabelle 4: Übersicht geeigneter Lastenfahrrad-Modelle

Modell	Hersteller	Typ	Gewicht	Zuladung	Transportbox	Motor	Reichweite, Geschwindigkeit	Bild
Cargo Scoiattolo	El Ciclo	Transportbox hinten, aufrechte Sitzposition	120 kg	250kg ohne Fahrer	140x90x150cm, 1800L	250W – 48 V	30 km, 25km/h ⁹	
Musketier	Radkutsche	Transportbox hinten, aufrechte Sitzposition	58 kg	Bis 300 kg inkl. Fahrer	Länge 127cm x Breite 83cm x Höhe 127 cm	eZee 250W	Bis 200km ¹⁰	
Grizzly	Pedalpower Berlin	Transportbox hinten, aufrechte Sitzposition	k.A.	Bis 300 kg inkl. Fahrer	840x1237x964	250 W	zwischen 50-120 km ¹¹	
Cyclecargo, CG4	Cyclopolitaïn	Transportbox hinten, aufrechte Sitzposition	110 Kg	200 kg ohne Fahrer	1,5 m³	250W	50 km ¹²	
Carla Cargo	Carla Cargo	Fahrradanhängen	30 kg unmot. orisiert 40kg motorisiert	150kg ohne Fahrer	160cmx60cm 150cm ab Boden	250W	23km/h, Anfahrhilfe bis 6km/h ¹³	
Cargo Cruiser (Delivery Cruiser)	Veloform	Transportbox hinten, liegende Sitzposition	190 kg	270 kg inkl. Fahrer	Aluminium u. Edelstahl, 1 m³ Ladevolumen	48 V 250 W M	90 km, 25 km/h ¹⁴	

⁹ Vgl. El Ciclo online

¹⁰ Vgl. Radkutsche online

¹¹ Vgl. Pedalpower Berlin online

¹² Vgl. Cyclopolitaïn online

¹³ Vgl. Carla Cargo online

¹⁴ Vgl. Veloform online

**Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept
auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg**

Modell	Hersteller	Typ	Gewicht	Zuladung	Transportbox	Motor	Reichweite, Geschwindigkeit	Bild
Berliner Lastenrad	Pedalpower Berlin	Transportbox vorne, aufrechte Sitzposition	k.A.	100kg ohne Fahrer	L 960 ; B 640 ; H 600	250W ¹⁵	k.A.	
Vrachtfiets Cargo	Vrachtfiets	Transportbox hinten, aufrechte Sitzposition	k.A.	k.A.	200x100x100cm	Ja. Annahme: 250W ¹⁶	k.A.	

¹⁷

Quelle: Eigene Darstellung

Die aufgelisteten acht Modelle wurden den Projektanforderungen entsprechend vorausgewählt und anschließend den Unternehmen DPD und GLS präsentiert. Die aussichtsreichsten Lastenfahrräder für das Pilotprojekt belaufen sich auf die Modelle „Scoiattolo“ von El Ciclo, „Musketier“ von Radkutsche, „Grizzly“ von Pedalpower Berlin, „Cyclocargo CG4“ von Cyclopolitaïn sowie den Fahrradanhänger „Carla Cargo“ von Carla Cargo.

Innerhalb der Gespräche mit den Unternehmen entwickelten sich allerdings schnell Tendenzen zu dem italienischen Hersteller El Ciclo und dessen Modell „Scoiattolo“ sowie zu dem Modell „Musketier“ der Firma Radkutsche. Diese entstanden einerseits aufgrund der hochwertigen Stabilität der Produkte, aber auch durch deren äußere Form und Erscheinungsbild

Eine äußerst interessante Alternative bildete auch das Modell „Carla Cargo“ ab. Der elektronisch unterstützte Fahrradanhänger kann an jedes beliebige Fahrrad angehängt oder auch durch einen elektronisch unterstützten Motor von Hand und somit zu Fuß genutzt werden. Dabei wird der Anhänger mit einer Anfahrhilfe von bis zu 6km/h unterstützt, im Fahren unterstützt dieser mit bis zu 23km/h. Aus der Recherchetätigkeit ergab sich die Information, dass Carla Cargo eine Kooperation mit dem Hersteller Radkutsche einging und den „Fahrrad-LKW“ auf den Markt brachte. Dabei wird der Fahrradanhänger mithilfe einer speziellen Vorrichtung an das Lastenfahrradmodell „Musketier“ angebracht und ist somit in

¹⁵ Vgl. Pedalpower Berlin online

¹⁶ Vgl. Vrachtfiets online

¹⁷ Einige der Informationen wurden telefonisch oder per Email von den Herstellern eingeholt

der Lage Zuladungen von bis zu 450kg (inklusive Fahrer) zu transportieren.¹⁸ Dieses Modell wurde aufgrund der hohen Zuladungskapazität sowohl von den Unternehmen als auch aus persönlicher Sicht zeitweise als sehr vielversprechende Alternative angesehen. Besonders im Zeitmanagement wäre den Kurieren dieses Modell von Nutzen gewesen, da diese aufgrund der hohen Zuladung weniger häufig zwischen dem Mikro-Depot und den Kunden hätten verkehren müssen. Die Option des „Fahrrad-LKWs“ hing jedoch davon ab, welche Route gefahren wird und wie viele Güter die Kuriere transportieren. Somit wäre diese Alternative lediglich sinnvoll wenn auch genügend Waren zum Transport vorhanden wären.

Wie sich nach weiteren Analysen herausstellte, ist der „Fahrrad-LKW“ jedoch gesetzlich zulassungspflichtig. Es werden lediglich Fahrzeuge, die eine Nenndauerleistung von 0,25kW und eine Geschwindigkeit von 25km/h nicht überschreiten als Fahrrad gewertet und unterliegen daher keiner Typgenehmigung.¹⁹ Das Gespann besitzt jedoch zwei Elektromotoren, jeweils beim Fahrrad als auch beim Anhänger, mit jeweiligen Leistungen von 0,25kW. Aus einem persönlichen Gespräch mit der zuständigen Ansprechpartnerin von Carla Cargo stellte sich heraus, dass der Hersteller bereits an einer Lösung arbeitet, die es dem „Fahrrad-LKW“ ermöglicht, gesetzlich als Fahrrad gewertet zu werden. Laut den Angaben von Carla Cargo entwickelte der zuständige Ingenieur zum damaligen Zeitpunkt eine Möglichkeit, nach der die Motoren miteinander kommunizieren, um die gesetzlich vorgeschriebene Nenndauerleistung von 250W nicht zu überschreiten. Eine Umsetzung dieser Lösung war jedoch in der Zeitspanne, die das Projekt umfasste, nicht zu erwarten. Nach der Durchführung der Experteninterviews wurde ersichtlich, welche genauen Anforderungen und Wünsche die Unternehmen an die Lastenfahrräder stellen. Es wurde ein Herstellerfragebogen angefertigt, hauptsächlich zur Ermittlung, ob die Hersteller im Stande sind spezielle Ein- oder Umbauten zu tätigen aber auch um den Umfang der dadurch entstehenden Kosten einzuschätzen.

Der Fragebogen wurde an die vier vorab ausgewählten Lastenfahrradhersteller El Ciclo, Radkutsche, Pedalpower sowie Cyclopolitain versandt. Die Hersteller wurden darum gebeten den Fragebogen innerhalb von zwei Wochen beantwortet zurückzuschicken. Bedauerlicherweise kamen nur die Hersteller El Ciclo und Radkutsche dieser Bitte nach. Der Hersteller Cyclopolitain gab an, dass die Anforderungen zur Umsetzung zu speziell seien. Da zu diesem Zeitpunkt die Entscheidung hinsichtlich der Auswahl der Lastenfahrräder sowieso

¹⁸ Vgl. Carla Cargo online

¹⁹ Vgl. Verordnung über die EG-Genehmigung für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger sowie für Systeme, Bauteile und selbstständige technische Einheiten für diese Fahrzeuge (EG-Genehmigungsverordnung EG-FGV), 2002, S. 12, Kapitel 3, §15, Abschnitt 8

schon in Richtung EL Ciclo bzw. der Radkutsche tendierten, waren die fehlenden Einschätzungen der übrigen Hersteller zu vernachlässigen.

Zunächst wurden die Hersteller um eine Aufstellung der anfallenden Verschleiß- und Ersatzteile sowie zur Angabe des Wartungszyklus gebeten. Anschließend sollte eine Einschätzung zur Umsetzung eventuell anfallender Ein- und Umbauten am Fahrrad selbst sowie an der Transportbox angegeben werden. Daraufhin wurden Fragen zum Akku, dem Rückwärtsfahren, der Möglichkeit von Energierückgewinnung sowie zu Leasingoptionen behandelt. Zuletzt wurde anhand einer zusammenfassenden Tabelle um eine Abschätzung der anfallenden Kosten gebeten. Anhand des Internetauftritts sowie persönlichen Gesprächen mit den Herstellern konnte ermittelt werden, dass die Produkte über mehrere der geforderten „Must-have“-Kriterien standardmäßig verfügen. Daher wurden die Kriterien „Einhaltung gesetzlich vorgeschriebener Maße“, „Stabilität“, „Federung zwischen den Hinterrädern“ und „hydraulische Bremse“ nicht zusätzlich abgefragt.

Die folgende Übersicht stellt die Angaben der Hersteller El Ciclo und Radkutsche gegenüber.

Tabelle 5 Übersicht der Auswertung der Herstellerfragebögen der Hersteller El Ciclo und Radkutsche

Ein-/Umbauten	El Ciclo	Radkutsche
Zentralverriegelung	Sicherheitsschloss an der Transportbox. Schlüssel, der den Motor ausschaltet und dessen Energie in die elektromagnetische Bremse konvertiert	zwei Rahmenschlösser, die sowohl Box als auch Fahrrad verschließen können. Gesteuert über App auf dem Handy. Noch in Testphase, kann aber sofort eingebaut werden
Anhängerkupplung	Umsetzbar, wenn der Anhänger auch motorisiert ist	Umsetzbar
GPS Tracker	Umsetzbar	Umsetzbar
Zigarettenanzünder	Umsetzbar	Umsetzbar
Halterung für Handscanner	Umsetzbar	Umsetzbar
Trinkflaschenhalterung	Umsetzbar, an der Box	Umsetzbar, an der Box
Dokumentenablage (Briefkasten)	Umsetzbar, an der Box	Umsetzbar, an der Box
Anpassen des Spiegelarms	Umsetzbar	Nicht möglich
Blinker hinten und vorne	Umsetzbar, Einbau eines LED Lichtsystem mit Positionsleuchten, Blinkern und Bremslichtern	Umsetzbar, bestellbar
Sitz-/Griffheizung	Nicht möglich	Nicht möglich
Sonnen-/Regenschutz	Umsetzbar (Lexan Polycarbonat)	Umsetzbar
Nässespritzschutz	umsetzbar, Erweiterung des Schutzblechs	Nicht möglich

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept
auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Auswahl an Satteln	Umsetzbar	Umsetzbar
seitliches Öffnen d. Transportbox	Umsetzbar	Umsetzbar
Transportbox auf 2m Länge ausbauen	Nicht möglich, max. 1,80m	Nicht möglich, max. 1,50m
Transportbox aus Carbon	Nicht möglich	Umsetzbar
Ausreichend Licht und Katzenaugen	Vorhanden und erweiterbar	Vorhanden und Reflektor Streifen an den Seiten
Reichweite des Akkus	25 km, ein weiterer Akku kann mitgeführt werden	Im Extraenergytest sind die Fahrer ca. 105 Kilometer weit gekommen, der Akku kann noch verdoppelt werden: also 210 Kilometer
Leasing	Nicht möglich	möglich über Leaserad
Rückwärtsfahren	Umsetzbar	ab 2017 möglich
Energierückgewinnung	Vorhanden	Theoretisch möglich
Probefahren	am Standort in Vigevano	Am Standort in Mössingen und bei den Händlern von Radkutsche

Quelle: Eigene Auswertung

Anhand der Auswertung der Herstellerfragebögen ist zu erkennen, dass die Hersteller im Stande sind, die meisten der geforderten Einbauten umzusetzen. Das Unternehmen Radkutsche gab an, dass die Länge des Spiegelarms nicht individuell verstellbar ist. Gewährt der Spiegel jedoch auch ohne eine Justierung eine einwandfreie Sicht, kann dieser Aspekt vernachlässigt werden. Laut Aussage der Radkutsche kann kein Näsenspritzschutz angebracht werden. Dieser könnte durch eine Verlängerung des Schutzblechs oder durch angemessene Kleidung der Fahrer substituiert werden.

Die Produktion der Transportbox aus dem Material Carbon kann durch den Hersteller EL Ciclo nicht umgesetzt werden. Besteht diese jedoch aus einem vergleichbaren Material, sollte dies kein Hindernis darstellen. Weiterhin kann EL Ciclo keine eigene Leasingoption anbieten.

Die Funktion des Rückwärtsfahrens wurde von DPD im Rahmen der Experteninterviews als Ausschlusskriterium angegeben. Wie anhand des Herstellerfragebogens zu erkennen ist, besitzt das Modell „Scoiattolo“ von El Ciclo dieses als Standard-Eigenschaft. Der Hersteller Radkutsche wird laut dessen Angaben erst ab dem Jahr 2017 im Stande sein diese Eigenschaft umzusetzen. In der Testphase des Projekts wurde aber festgestellt, dass die Möglichkeit eines Rückwärtsgangs gar nicht notwendig ist, da die Eigenschaft der Wendigkeit des Lastenfahrrads eine viel wichtigere Komponente darstellt. Durch die dreirädrige Anordnung der Räder, kann das Lastenfahrrad de facto auf der Stelle drehen, da man den Lenker zu nahezu 90° einschlagen kann.

Es kann festgehalten werden, dass die Modelle „Scoiattolo“ von El Ciclo und „Musketier“ der Radkutsche sowohl anhand der Recherchetätigkeit als auch in den Experteninterviews als Favoriten hervorgingen. Diese Modelle weisen die geforderten Eigenschaften zu einem großen Teil auf und in jedem Fall in einem höheren Maß als mögliche Konkurrenzmodelle.

Anschaffungskosten

Innerhalb der Recherchetätigkeit konnten die Kosten für die Anschaffung des Basismodells des Lastenfahrrads sowie einiger weiterer Zusätze wie Transportbox oder Lichtanlagen ermitteln werden. Die Preise konnten anhand des Internetauftritts oder durch einen persönlichen Kontakt mit den Herstellern ausfindig gemacht werden. Wie bereits angesprochen, wurden die Hersteller im Rahmen des Herstellerfragebogens auch um eine Einschätzung der anfallenden Kosten bei möglichen Umbauten gebeten. Durch die Zusammenführung dieser Erkenntnisse konnte eine Aufstellung getätigt werden, die einen preislichen Überblick gewährt. Es werden dabei ausschließlich Lastenfahrräder betrachtet, die im Rahmen des Projekts in die engere Auswahl gekommen sind. Bei den aufgeführten Preisen handelt es sich um Nettopreise (excl. MwSt.).

Tabelle 6 Verschleißteile und Wartungskosten des Herstellers El Ciclo (Händlerangaben)

	Cargo Scoiattolo		Musketier	
	El Ciclo		Radkutsche	
Basisgestell	5.900,00 €		3.360,50 €	<i>inkl. Nuvinci Schaltung und Plattform</i>
Transportbox	1.270,00 €		2.520,17 €	
Motor			1.399,00 €	
Akku	1.100,00 €	<i>Lithium LiFePO4 38V 25Ah, Gewicht: 10 Kg., Reichweite: 30Km,</i>	252,10 €	<i>plus 8Ah</i>
			671,43 €	<i>plus 29Ah</i>
Schloss	330,00 €	<i>Sicherheitsschloss Transportbox</i>	300,00 €	
	200,00 €	<i>Schlüssel um Motor zu blockieren</i>		
Licht	400,00 €		112,10 €	
	200,00 €	<i>Positionsleuchten oben an der Transportbox</i>	40,00 €	<i>In der Transportbox</i>
Regen-/Sonnenschutz	300,00 €	<i>Dach mit Rollplane</i>	350,00 €	

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept
auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Umbau Transportbox (Änderung d. Maße)	600,00 €			<i>je nach Maß</i>
Umbau Transportbox (seitl. Öffnen)	600,00 €	<i>hinteres Rolltor</i>		<i>kostenlos</i>
	300,00 €	<i>zusätzliches seitliches Öffnen</i>		
	800,00 €	<i>zusätzliches seitliches Rolltor</i>		
Energierückgewinnung		<i>Standard</i>	800,00 €	
Umbau Rückwärtsfahren	100,00 €			<i>je nach Maß</i>
Anhängerkupplung			180,00 €	
GPS Tracker	250,00 €		160,00 €	
Schutzblech			150,42 €	
Stromquelle (Zigarettenanzünder)	120,00 €		89,00 €	
Spezieller Sattel		<i>Modellabhängig</i>		<i>Modellabhängig</i>
Halterung für Handscanner	50,00 €			
Trinkflaschenhalter	25,00 €		30,00 €	
Dokumentenablage	30,00 €			
Verlängerung Spiegelarm		<i>Standard</i>		
Sonderlackierung			126,05 €	
Werkzeug- und Akkukiste			276,47 €	
minimale Gesamtkosten	9.200,00		7.943,87 €	
maximale Gesamtkosten	12.575,00		10.817,24 €	

Tabelle 7 Darstellung der Anschaffungskosten der Modelle "Scoiattolo" und "Musketier"
Quelle: Eigene Auswertung

In der dargestellten Tabelle wird zuletzt auf die Minimalkosten eingegangen, die der Käufer auf jeden Fall aufwenden muss, aber auch auf den maximal zu zahlenden Betrag bei Umsetzung aller Sondereinbauten. Die Minimalkosten setzen sich dabei aus dem Basisgestell des Fahrrads, der Transportbox, dem Motor, dem Akku, sowie den Schlössern und der Lichtanlage zusammen. Diese Faktoren werden als Mindestanforderungen an jedes Lastenfahrrad angesehen, da diese essenziell für ein sicheres Fahren sind.

Geschätzte Wartungs- und Reparaturkosten (nach Hersteller El Ciclo)

Im Rahmen des Projekts wurden die Hersteller auch um eine Aufstellung der verschiedenen Verschleißteile sowie der anfallenden Kosten bei einem Ersatz dieser gebeten. Der Hersteller El Ciclo kam dieser Bitte nach und stellte die Wartungszyklen sowie die Ersatzteilkosten in der folgenden Tabelle dar.

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept
auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Verschleißteile	Häufigkeit	Menge	Einzelkosten	Gesamtkosten
Bremsbelag	nach Verschleiß	3	10,00 €	30,00 €
Räder (3)	nach Verschleiß	3	70,00 €	210,00 €
Ketten (2)	jährlich oder alle 10000km	2	10,00 €	20,00 €
Schaltwerk, mit Kabeln und Revo Griff	jährlich oder alle 10000km	1	50,00 €	50,00 €
Kurbelsatz	jährlich oder alle 10000km	1	30,00 €	30,00 €
				340,00 €

Quelle: Eigene Darstellung

Es wird ersichtlich, dass der Verschleiß der Bremsbeläge sowie der Räder nur schwer messbar gemacht werden kann. Dieser hängt stark von der Nutzungshäufigkeit des Fahrzeugs, den ausgesetzten Witterungsbedingungen, der Fahrbahnbeschaffenheit, aber auch von einem pfleglichen Umgang mit dem Gefährt ab. Die weiteren aufgeführten Verschleißteile sollten laut Angabe des Herstellers El Ciclo jährlich oder alle 10.000 Kilometer gewartet und ersetzt werden. Bei diesem Prozess entstehen jährlich etwa 100 Euro Kosten, zuzüglich der variierenden Kosten für den Ersatz von Bremsbelägen und Ketten.

Diese Untersuchungen fanden bereits vor dem Start des operativen Betriebs des Pilotprojekts statt, sodass sich die Recherchen oder auch die Herstellerangaben nicht mit der Realität decken. Wie im Laufe des Projekts ersichtlich wurden traten bei weitem mehr Probleme auf, als herstellerseitig angegeben wurden. Ähnlich falsch waren die Angaben zu Verschleiß und Wartung, was sich im Nachhinein als sehr ungünstig erweist. Zum einen wird durch den Ausfall der Lastenfahrräder das Gesamtergebnis bezüglich der Ökologie und Ökonomie geschmälert, zum anderen ist gerade die Logistik eine Branche in der sich die Prozesse automatisieren müssen und eine gewisse Stabilität vorhanden sein muss, da diese ansonsten zwangsläufig nicht effektiv und zuverlässig ausgeübt werden können. Gerade hier wurde eine gewisse Unprofessionalität der Lastenfahrzeughersteller zu einer entscheidenden Komponente. Grundsätzlich haben diese das große Problem, dass das Phänomen Lastenfahrzeug noch sehr jung ist und somit die baulichen Konzepte keineswegs ausgereift sind. Die Produktionshallen der Anbieter haben eher einen semi-professionellen Charakter und beispielsweise die Bestellzeiten dauern mit 8-12 Wochen eindeutig viel zu lange. Vor allem wenn in diesem Zeitraum dem Käufer nur um die 3 Lastenfahrräder versprochen werden können. So haben diese Hersteller alle nur einen manufakturartigen Charakter, welcher beim Bau der Lastenfahrräder auch dadurch ersichtlich wird, dass alle Lastenfahrräder baulich hier und da in kleinen Teilen unterschiedlich sind. Auch werden die Lastenräder größtenteils mit Artikeln des Consumer-Bereichs, den man aus dem „normalen“

Fahrradhandel kennt, ausgestattet. Darunter fallen die Reifen oder die Schlösser für die Transportbox, die allesamt nicht auf die Belastungen der KEP-Branche ausgerichtet sind. Das anschließende Kapitel zeigt daher nochmals detailliert die technischen Probleme bezüglich der Lastenfahrräder.

6.3 Technische Zuverlässigkeit der eingesetzten Lastenfahrräder



Abbildung 39 Eingesetztes Lastenfahrzeugmodell „Wohngebiet“

Quelle: Eigene Aufnahme

Bei der Sendungsauslieferung mit den Lastenfahrrädern kam es sowohl durch eine Unterdimensionierung von Bauteilen, als auch zum Teil durch Montagefehler seitens der Hersteller regelmäßig zu kurzzeitigen, als auch zu Komplettausfällen für mehrere Tage der Lastenfahrräder bei beiden Projektpartnern. Der Projektpartner DPD kommunizierte die Ausfälle und Mängel vorbildlich mit dem Projektteam, während GLS die Dokumentation und Kommunikation der Mängel etwas vernachlässigte. Hierdurch ergibt sich in folgender Tabelle ein etwas einseitiges Bild bezüglich der Mängelliste, was aber wie bereits erwähnt, an der Kommunikation der Mängel mit den Projektpartnern begründet ist.

Die hohe Ausfallquote der Lastenfahrräder führte zu hohen Kosten, welche die Wirtschaftlichkeit des Projektes gefährdeten. Um die Kosten und die Ausfallquote zu reduzieren sind mehrere Maßnahmen getroffen worden:

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept
auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

- Auf Empfehlung der TH-Nürnberg erarbeitete DPD und ihr Subunternehmer mit einem vor Ort ansässigen Fahrradmechaniker einen regelmäßigen Service- und Wartungsplan, welcher zu einer erheblichen Reduktion der Ausfälle führte
- Vorhalten von Ersatz- und Verschleißteilen um die Ausfallzeit zu minimieren
- Abrufbereitschaft des Fahrradmechanikers bei kurzzeitig auftretenden Schäden
- Sensibilisierung der Fahrer um Schäden zu vermeiden
- Erarbeiten von Lösungs- und Handlungsvorschlägen mit dem Hersteller zur Verbesserung der Konstruktion der stark verschleißenden/mangelhaften Bauteilen

Tabelle 8: Im Betrieb aufgetretene Mängel der Lastenfahrräder



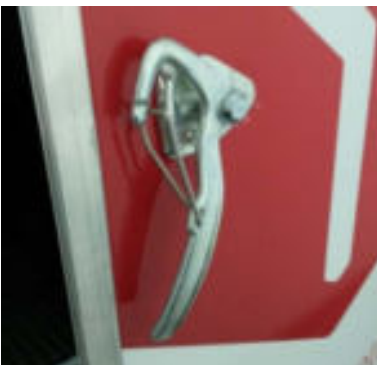
1. Mangelbeschreibung: Bügelschloss schleift an der Reifenflanke des Vorderrades



2. Mangelbeschreibung: Befestigungsmutter löst sich bei seitlicher Zugangsklappe



3. Mangelbeschreibung: Spiegelarm ist zu kurz, eine Sicht nach hinten ist nicht möglich. In der Folge wurde der Wetterschutz abmontiert, da dieser die Fahrer stört und stark windanfällig ist



4. Mangelbeschreibung: Bedienung der Verschlussvorrichtung der Hauptzugangsklappe ist nur mit Zweihandbedienung möglich. Das Verschließen der Box mit den Bügelschlössern ist unpraktisch (Zeitaufwand zu hoch)



Verbesserung: Testen von neuen Schlössern mit Funkanbindung (siehe Bild)



5. Mangelbeschreibung: Antriebswelle wandert im Lagersitz. Dadurch wurden mehrere Bauteile beschädigt. Fehlerursache ist eine nicht korrekt ausgeführte Welle-Lager Befestigung. Hierdurch kann bei Kurvenfahrten das Rad nach außen wandern



Verbesserung: Der Hersteller wird die Wellenkonstruktion überarbeiten und bei den bisherigen Fahrzeugen die Verwendung von geschlitzten Klemmrinnen empfehlen



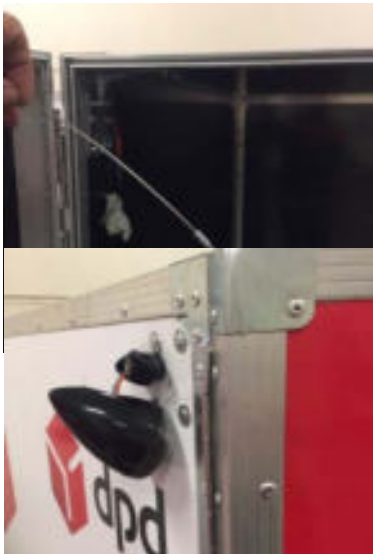
6. Mangelbeschreibung: Der sogenannte Tempomat, welcher für die Regelung der Unterstützung zuständig ist, wurde durch einen Wasserschaden beschädigt. Grund war ein Montagefehler, welcher die Abdichtung nicht mehr gewährleistete



Lösung: Austausch der betroffenen Einheit und Verbesserung der Endkontrolle seitens des Herstellers



7. Mangelbeschreibung: Beschädigung des linken hinteren Rades. Fahrer ist an Verkehrsschild hängen geblieben
-



8. Mangelbeschreibung: Fangseil der Hauptzugangs-
klappe ist durch starken Wind abgerissen und hat
dabei die hintere Blinkereinheit an der Transportbox
beschädigt
-



9. Mangelbeschreibung: Tür der Box muss zum
Verschließen angehoben werden. Bei der regulären
Zustellung wird dies nicht durchgeführt, da hierzu
die Tür mit zwei Händen bedient werden müsste.
Dadurch läuft Wasser in die Box und beschädigt die
Pakete. Des Weiteren sammelt sich das Wasser
beim korrekten Verschließen der Box im oberen
Türbereich. Dieses Wasser läuft beim Öffnen in die
Box und beschädigt ebenfalls die Sendungen
- Verbesserung: Für die Lastenfahrräder wird eine
Gummilippe für den oberen Bereich der
Transportboxtür nachgerüstet. Hierdurch soll ein
Eindringen von Wasser in die Box beim Öffnen der
Tür vermieden werden. Weiterhin wird die
Transportboxtür mit einer Metallstrebe verstärkt



10. Mangelbeschreibung: Es wurde ein sehr starker Bremsenverschleiß (monatlicher Austausch der selbigen), ein defektes Bremshydrauliksystem und eine sehr hohe Ausfallquote bzw. Verschlechterung der Lastenfahrräder durch Reifenpannen festgestellt



Verbesserung: Austausch durch eine besser dimensionierte Bremsanlage (Magura Big mit EBC Bremsbelägen), sowie Testen von ausgeschäumten Reifen, Reifen mit Milch und widerstandsfähigere Reifenmäntel (Maxxis). Weiterhin wird ein Rad entwickelt, welches die Montage von Motorradbereifung ermöglicht. Zukünftig wird ein regelmäßiger Service- und Wartungsplan eingeführt, sowie auf Basis einem Ersatz und Verschleißteilliste Teile vorgehalten (Minimierung einer möglichen Ausfallzeit)



11. Mangelbeschreibung: Kette springt aus dem Ritzel heraus. Beschädigung der Ritzelabdeckung, unrunder Lauf der hinteren Räder



Verbesserung: Austausch der betroffenen Bauteile. Der Hersteller entwickelte daraufhin ein Aluminiumguss – Laufrad, welches mit einer Motorradbereifung verwendet werden kann. Weiterhin wurden der Kettenspanner und das Kettenritzel bei den neuen Fahrzeugen überarbeitet



12. Mangelbeschreibung: Generell lösen sich alle Schrauben an dem Fahrzeug. Während der täglichen Benutzung sind Schrauben verloren gegangen. Weiterhin wird von den Fahrern eine geringere Einstiegshöhe gefordert



Verbesserung: Sicherung der Schrauben mit Loctite



13. Mangelbeschreibung: Umlenkrolle (beim Getriebe) löst sich. Ein schleichender Getriebschaden kann nicht ausgeschlossen werden

Verbesserung: Vorläufige Reparatur der betroffenen Bauteile. Im Mikrodepot werden entsprechende Ersatzteile vorgehalten



14. Mangelbeschreibung: Die Passnut in der Antriebswelle ist ausgebrochen, wodurch die Antriebskräfte nicht mehr übertragen werden konnten. Weiterhin kam es im Verlauf der Pilotphase zum Ausfall des Motors



15. Mangelbeschreibung: Halterungen der Bremsklötze sind aus der Gabel herausgebrochen



16. Mangelbeschreibung: Schäden, welche durch äußere Stöße aufgetreten sind und so den Zellenhalter des Akkus beschädigt haben.



Weitere Mängel ohne Bilder:

17. Mangelbeschreibung: Stecker für den Anschluss des Fahrradakkus ist defekt

18. Mangelbeschreibung: Zahnrad vom Kettenspanner ist gerissen
Lösung: Ersatz der betroffenen Bauteile mit verstärkten Spannern

19. Mangelbeschreibung: Ausfall eines Akkus nach ca. einem Jahr Betriebszeit

Insgesamt muss konstatiert werden, dass die eingesetzten Lastenfahrräder zwar ihren Zweck erfüllen und damit erfolgreich Sendungen zugestellt werden können, aber die bisher konstruierten Lastenfahrräder nicht auf den Alltag der KEP-Branche ausgerichtet sind. Manche Modelle schaffen dies besser als andere, aber auch diese leiden an gewissen „Kinderkrankheiten“. Als unbrauchbar erwies sich ein chinesisches Modell der Firma Ester Tricycle Chilwee, welches im Pilotgebiet „Innenstadt“ eingesetzt wurde (vgl. Abb. 40)



Abbildung 40 Anfänglich eingesetztes Lastenfahrradmodell „Innenstadt“

Quelle: eigene Aufnahme des Herstellers

Durch die Marktanalyse (vgl. 6.2) wurde dieses Modell nicht abgebildet und aufgrund großer Bedenken bezüglich Baufestigkeit, Zuverlässigkeit, verbauten Teilen und vielem mehr zwingend davon abgeraten. Der tägliche Einsatz bestätigte diese Einschätzung auch sehr schnell. Auch rechtliche Zweifel an die Konformität zum Pedelec-Status (max. Nenndauerleistung 250W und max. 25km/h) waren dabei ein weiteres Kriterium, das zu einem Abraten des Modells führte. Schlussendlich traten nicht unerwartet zu viele Mängel auf, sodass dieses Modell durch das Modell T-Cargo der italienischen Firma ESA (ecologia solutione ambiente) ersetzt wurde.



Abbildung 41 Neues Lastenfahrradmodell für das Pilotgebiet „Innenstadt“

Quelle: eigene Aufnahme

Dieses ist erfüllt wie auch das im Pilotgebiet „Wohngebiet“ eingesetzte Lastenfahrrad die rechtlichen Normen und ist weitaus weniger anfällig auf den täglichen Einsatz als das zuvor eingesetzte Lastenfahrrad.

7 Ökobilanzierung

Ein primäres Nachhaltigkeitsziel ist auch in der Stadt Nürnberg der Immissionsschutz (Luftreinhaltung).²⁰ Verbrennungsmotoren gehören dabei zu den Hauptemittenten der im Fokus stehenden Luftschadstoffe Stickoxide (NO_x) und Feinstaub (PM₁₀).²¹ Das sekundäre Nachhaltigkeitsziel im verkehrlichen Bereich ist der Klimaschutz und somit die Reduzierung der Emissionen von CO₂-Äquivalenten.²²

Die Nachhaltigkeitsziele der KEP-Dienste werden hauptsächlich durch die Sorge eines Verbots für Nutzfahrzeuge mit konventionellem Antrieb in den Innenstädten angetrieben, wobei als primäres Nachhaltigkeitsziel der Klimaschutz durch Reduzierung und Kompensation der CO_{2e}-Emissionen angegeben wird und nur selten auf die Emissionen von Luftschadstoffen Bezug genommen wird, was jedoch zu keinen Zielkonflikten mit der Kommune führt.²³

In diesem Kapitel soll untersucht werden, ob das Mikrodepotkonzept für die Paketzustellung auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg ökologisch effizient ist, also ob der Ausstoß der Luftschadstoffe und sekundär auch der Treibhausgase (im Folgenden als THG abgekürzt) durch das Mikrodepotkonzept reduziert werden kann. Dazu wird zunächst das Ist-Szenario sowie das Soll-Szenario, also eine Zustellung mittels des Mikrodepotkonzepts, vorgestellt und die jeweiligen Treibhausgasemissionen bilanziert. Die Erstellung der THG-Bilanzen erfolgt auf Grundlage der DIN EN 16258:2012. Im nächsten Schritt werden die Emissionen der Luftschadstoffe sowohl des Ist-, als auch des Soll-Szenarios ermittelt. Die Luftschadstoffe werden anhand von den vom Umweltbundesamt vorgegebenen Grenzwerten für Schadstoffemissionen für die jeweiligen Fahrzeuge und zugehörigen EURO-Klassen berechnet.

7.1 Aufbau, naturwissenschaftliche und technische Grundlagen

Grundlage der Ökobilanz ist die internationale Norm ISO 14040. Die Ökobilanz wird in der ISO 14040 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen als „Zusammenstellung und Beurteilung der Input-und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“²⁴ definiert. Die englische Bezeichnung „Life Cycle Assessment“, auch LCA abgekürzt, ist dahingehend die genauere Bezeichnung und wird daher auch häufig im deutschsprachigen Raum benutzt.²⁵

²⁰ Vgl. Bogdanski (2015), S. 34

²¹ Vgl. Meunier et al. (2016e)

²² Vgl. Bogdanski (2015), S. 34

²³ Vgl. ebenda, S. 36

²⁴ Deutsches Institut für Normung e.V. (2009), S. 7

²⁵ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 1

Der Lebensweg eines betrachteten Produktes oder Produktsystems beinhaltet die Rohstoffförderung und -herstellung, Energieerzeugung, Materialproduktion, die Anwendung des Produktes oder Produktsystems sowie dessen Entsorgung und Beseitigung.²⁶ Die Ökobilanz besteht aus den vier Komponenten „Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens“, „Sachbilanz“, „Wirkungsabschätzung“ und „Auswertung“.²⁷

Der erste Bestandteil der Ökobilanz „Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens“ muss folgende Fragen beantworten: Was ist der Anwendungsbereich der Ökobilanz? Aus welchen Gründen wird die Ökobilanz durchgeführt? Wer ist die angesprochene Zielgruppe? Sind die Ergebnisse zur Veröffentlichung für vergleichende Aussagen vorgesehen?²⁸ Es ist möglich, dass aufgrund des iterativen Vorgehens eine Änderung von Ziel und Untersuchungsrahmen während der Erstellung der Ökobilanz nötig wird.²⁹ Der Untersuchungsrahmen definiert unter anderem technische, geografische und zeitliche Systemgrenzen, das untersuchte Produktsystem sowie dessen Funktion, die funktionelle Einheit, die Anforderung an die Qualität der verfügbaren Daten, die ausgewählten Wirkungskategorien, Annahmen und Einschränkungen und die Art der Kritischen Prüfung.³⁰

Als zweite Komponente folgt die Sachbilanz, die eine Stoff- und Energieanalyse darstellt.³¹ Der Massenerhaltungssatz, der Energieerhaltungssatz, auch als erster Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet, der Entropiesatz, auch als zweiter Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet, sowie die Gesetze der Stöchiometrie bilden die Grundlage, auf der die Sachbilanz beruht.³²

Der dritte Bestandteil einer Ökobilanz, die „Wirkungsabschätzung“, ist nötig, um aus den aus der Sachbilanz gewonnenen Daten die potentiellen Umweltwirkungen ableiten zu können.³³ Da die gewonnenen Daten aus der Sachbilanz häufig unübersichtlich und umfangreich sind und auch meist mehr Informationen enthalten als die Inputs und Outputs, müssen sie in der Wirkungsabschätzung zusammengefasst werden.³⁴ Die Wirkungsabschätzung besteht aus verbindlichen und optionalen Bestandteilen.³⁵ Der erste verbindliche Bestandteil ist die Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen.³⁶ Diese Begriffe werden zum Verständnis genauer definiert. Wirkungskategorie wird definiert

²⁶ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2009), S. 14

²⁷ Vgl. ebenda, S. 15

²⁸ Vgl. ebenda, S. 22f.

²⁹ Vgl. ebenda, S. 27

³⁰ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 23

³¹ Vgl. ebenda, S. 63

³² Vgl. ebenda, S. 64

³³ Vgl. ebenda, S. 196

³⁴ Vgl. ebenda

³⁵ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2009), S. 29

³⁶ Vgl. ebenda

als die „Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können“.³⁷ Wirkungsindikatoren sind die „quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie“.³⁸ Der Charakterisierungsfaktor wird als „Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird“³⁹ definiert. Veranschaulicht werden diese Definitionen am Beispiel der Wirkungskategorie der Klimaänderung. Sie ist eine der am besten wissenschaftlich abgesicherten Wirkungskategorien.⁴⁰ Die Ergebnisse dieser Wirkungskategorie in der Sachbilanz wird dargestellt als Menge an Treibhausgasen je funktionelle Einheit.⁴¹ Der Wirkungsindikator der Wirkungskategorie Klimaänderung ist die Verstärkung der Infrarotstrahlung, der Charakterisierungsfaktor das Treibhauspotential, angegeben als GWP₁₀₀ für jedes Treibhausgas.⁴² Das Treibhauspotential wird in diesem Kapitel im Weiteren genauer erläutert.

Im letzten Schritt „Auswertung“ werden dann die Ergebnisse aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung herangezogen und übereinstimmend mit der Zielsetzung Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsempfehlungen gegeben.⁴³ In folgender Abbildung ist der Aufbau der Ökobilanz zusammenfassend dargestellt.

³⁷ Deutsches Institut für Normung e.V. (2009), S. 29

³⁸ ebenda

³⁹ ebenda, S. 12

⁴⁰ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 202

⁴¹ Vgl. ebenda, S. 203

⁴² Vgl. ebenda

⁴³ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2009), S. 31

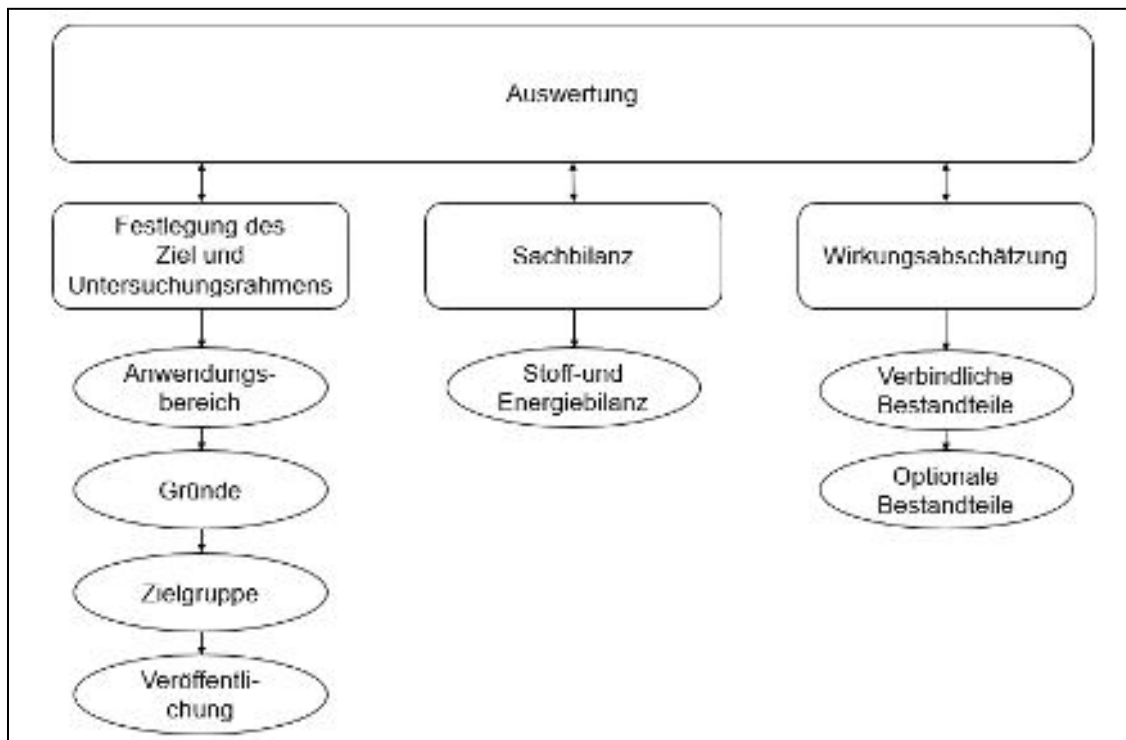


Abbildung 42 Aufbau der Ökobilanz nach ISO 14040

Quelle: Eigene Darstellung nach Deutsches Institut für Normung e.V.

Die Wirkungskategorie Klimaänderung ist Output-bezogen mit globalen Wirkungen.⁴⁴ Die Menge an ausgestoßenen Treibhausgasen wird bei der Untersuchung dieser Wirkungskategorie in der Sachbilanz ermittelt. Als Treibhausgase (kurz: THG) werden allgemein solche Gase bezeichnet, die zum Treibhauseffekt beitragen.⁴⁵ Die Treibhausgase in der Atmosphäre lassen kurzwellige, energiereiche Strahlung von der Sonne zur Erde die Atmosphäre durchqueren, während ein Teil der langwelligen Wärmestrahlung, die von der Erdoberfläche kommt, absorbiert wird.⁴⁶ Zu unterscheiden ist dabei zwischen dem natürlichen und dem zusätzlich durch den Menschen verursachten, dem sogenannten anthropogenen Treibhauseffekt.⁴⁷ Der natürliche Treibhauseffekt bildet die Grundlage des Lebens auf der Erde, da ohne diesen die vorherrschende Temperatur auf der Erdoberfläche nicht die jetzigen 15 Grad Celsius betragen würde, sondern minus 18 Grad Celsius.⁴⁸ Die Erdoberfläche wäre somit vereist. Die Gase, die hauptsächlich zum natürlichen Treibhauseffekt beitragen, sind Kohlendioxid (CO₂), Ozon (O₃), Distickstoff-oxid, auch als Lachgas bezeichnet (N₂O), Methan (CH₄) sowie Wasserdampf (H₂O).⁴⁹ Zusätzlich gelangen

⁴⁴ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 251

⁴⁵ Vgl. Meunier et al. (2014)

⁴⁶ Vgl. Kranke et al. (2011), S. 17

⁴⁷ Vgl. ebenda, S. 23

⁴⁸ Vgl. Meunier et al. (2014)

⁴⁹ Vgl. Kranke et al. (2011), S. 22

anthropogene Treibhausgase, wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), vollfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW), teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (H-FKW) und Schwefelhexafluorid (SF_6) in die Atmosphäre.⁵⁰ Auch die Emissionen der natürlichen Treibhausgase nehmen durch menschliches Handeln zu, was insgesamt zu einem Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre führt.⁵¹ Die Folgen dieses Anstieges können heute noch nicht vollständig abgesehen werden.⁵² Im Folgenden sollen nun die wichtigsten Treibhausgase genauer vorgestellt werden.

Kohlendioxid (CO_2) ist ein unbrennbares, farb- und geruchloses Gas, das nach Wasserdampf mit einem Anteil von 20% am zweitstärksten zum natürlichen Treibhauseffekt beiträgt.⁵³ Hinzu kommt durch den Menschen verursachtes CO_2 , welches zu einem großen Teil zum anthropogenen Treibhauseffekt beiträgt.⁵⁴ Die Verbrennung fossiler Energieträger ist dabei hauptsächlicher Verursacher von anthropogenem CO_2 .⁵⁵ Seine durchschnittliche Verweildauer in der Atmosphäre beträgt 120 Jahre.⁵⁶ Um die Klimawirksamkeit aller Treibhausgase miteinander vergleichbar zu machen, wurde CO_2 im Kyoto-Protokoll als Referenzwert festgelegt.⁵⁷ Angegeben wird die Klimawirksamkeit unter der Berücksichtigung der unterschiedlichen Verweildauern in der Atmosphäre der Treibhausgase als ein Vielfaches der Wirkung von CO_2 durch das Global Warming Potential (GWP) für einen Zeitraum von 100 Jahren.⁵⁸ Die GWP-Werte werden herausgegeben vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Das IPCC ist ein 1988 von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) gegründetes Gremium mit der Aufgabe, Handlungsempfehlungen zur Klimapolitik für alle Entscheidungsebenen zu geben.⁵⁹

Ein weiteres wichtiges Treibhausgas ist Methan (CH_4). Methan ist farb- und geruchlos und hochentzündlich.⁶⁰ Es hat im Vergleich zu CO_2 eine deutlich kürzere durchschnittliche Verweildauer in der Atmosphäre von neun bis fünfzehn Jahren, weist aber eine weitaus höhere Klimawirksamkeit auf.⁶¹ Es entsteht beim Abbau von organischem Material unter

⁵⁰ Vgl. Kranke et al. (2011)

⁵¹ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 253

⁵² Vgl. Meunier et al. (2014)

⁵³ Vgl. Kranke et al. (2011), S. 22

⁵⁴ Vgl. Meunier et al. (2016a)

⁵⁵ Vgl. ebenda

⁵⁶ Vgl. ebenda

⁵⁷ Vgl. Kranke et al. (2011), S. 22

⁵⁸ Vgl. ebenda

⁵⁹ Vgl. IPCC (Hg.) (2013)

⁶⁰ Vgl. Meunier et al. (2016a)

⁶¹ Vgl. Kranke et al. (2011), S. 22

Luftausschluss, was häufig in der Land- und Forstwirtschaft, besonders bei der Massentierhaltung, aber auch in Mülldeponien und Klärwerken vorkommt.⁶²

Besonders hohe Klimawirksamkeit und Verweildauer in der Atmosphäre weisen die anthropogenen fluorierten Kohlenwasserstoffverbindungen (HFKW, FKW, SF₆, NF₃) auf.⁶³ Sie werden für den Einsatz als Treibgas, Kühl- und Löschmittel oder als Bestandteil von Schallschutzscheiben hergestellt.⁶⁴ So hat beispielsweise Schwefelhexafluorid (SF₆) einen GWP₁₀₀-Wert von 22.800.⁶⁵ Das bedeutet, dass Schwefelhexafluorid 22.800 Mal so klimawirksam ist wie CO₂.

Neben den Treibhausgasen, die für das Ziel des Klimaschutzes relevant sind, werden auch die Emissionen der Luftschadstoffe Stickoxide und Feinstaub berechnet. Dies sind die relevanten Luftschadstoffe für das primäre Ziel der Luftreinhaltung. Als Stickoxide (NO_x) oder auch Stickstoffoxide werden verschiedene gasförmige Verbindungen bezeichnet, die aus Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) bestehen.⁶⁶ Hauptemittent für Stickoxide ist in dicht besiedelten Gegenden der Straßenverkehr, denn Stickoxide entstehen als Nebenreaktion bei Verbrennungsprozessen in Verbrennungsmotoren.⁶⁷ Besonders für Asthmatiker stellen Stickoxide ein gesundheitliches Risiko dar.⁶⁸ Sie schädigen die Schleimhäute im gesamten Atemtrakt, was die Atemwege anfälliger für Allergien machen kann und reizen die Augen.⁶⁹ So werden bei hoher Stickoxidbelastung Menschen wegen Atemwegserkrankungen ins Krankenhaus eingewiesen und auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Sterblichkeit nehmen zu.⁷⁰

Feinstaub wird abhängig von dessen Partikelgröße in unterschiedliche Kategorien eingeteilt. Als Feinstaub in vorliegender Arbeit wird dabei Feinstaub mit einer Partikelgröße von 10 Mikrometern (PM₁₀) betrachtet. Wie auch für die Stickoxide stellt der Straßenverkehr die Hauptquelle für Feinstaub dar.⁷¹ Feinstaub gilt als Gesundheitsrisiko, und zwar nicht nur dann, wenn der Staub aus gesundheitsgefährdenden Stoffen besteht, auch die Staubpartikel an sich sind schädlich.⁷² Je kleiner die Staubpartikel, desto gefährlicher für die Gesundheit ist Feinstaub. Außerdem gibt es keinen Grenzwert, ab welchem die Feinstaubbelastung nicht mehr gesundheitsgefährdend wäre, das heißt, dass auch geringe Feinstaubkonzentrationen

⁶² Vgl. Meunier et al. (2016a)

⁶³ Vgl. ebenda

⁶⁴ Vgl. ebenda

⁶⁵ Vgl. Meunier et al. (2017b), S. 2

⁶⁶ Vgl. Meunier et al. (2016d)

⁶⁷ Vgl. Bogdanski (2015), S. 34

⁶⁸ Vgl. Meunier et al. (2016d)

⁶⁹ Vgl. Meunier et al. (2013b)

⁷⁰ Vgl. ebenda

⁷¹ Vgl. Meunier et al. (2016e)

⁷² Vgl. Meunier et al. (2013a)

bereits ein Gesundheitsrisiko darstellen und die Belastung deshalb so gering wie möglich gehalten werden soll.⁷³

7.2 Stand der Normung

Die geltenden Normen zur Ökobilanz auf internationaler Ebene sind die ISO 14040 und die ISO 14044. Bei der ersten Herausgabe im Jahr 1997 war die ISO 14040 Serie so strukturiert, dass die ISO 14040 die Rahmennorm bildete, während die Normen ISO 14041, ISO 14042 und ISO 14043 die jeweiligen Komponenten der Ökobilanz beinhalteten.⁷⁴ Im Jahr 2006 wurden dann die bisherigen Normen ISO 14041 bis 14043 in einer einzigen Norm, der ISO 14044 zusammengefasst, während die ISO 14040 weiterhin als Rahmennorm besteht.⁷⁵

Die Untersuchung zur Ökoeffizienz des Mikrodepotkonzepts auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg erfolgt auf Grundlage der europäischen Norm DIN EN 16258:2012 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)“, welche auf den zuvor erwähnten ISO-Normen als für die Transportlogistik praktisch anwendbare Norm aufbaut. Ziel der Norm ist es, die Berechnung und Deklaration von Energieverbrauch und Emissionen von Transportdienstleistungen im gesamten Transportsektor und ungeachtet der Komplexität vergleichbar zu machen.⁷⁶ Dafür wurden allgemeine Grundsätze, Definitionen, Systemgrenzen, Berechnungsverfahren und Allokationsregeln festgelegt.⁷⁷ Als potentielle Anwender dieser Norm gelten insbesondere Transportdienstleister, Organisatoren von Transportdienstleistungen oder Nutzer von Transportdienstleistungen.⁷⁸ Zu den Treibhausgasen nach dieser Norm gehören die sechs Gase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆).⁷⁹ Treibhausgasemissionen müssen in Gramm (g), Kilogramm (kg) oder Tonnen (t) des Kohlendioxid-Äquivalents CO_{2e} angegeben werden, die Energiemengen müssen im Rahmen dieser Norm in Joule (J) oder einem Vielfachen davon, also beispielsweise Megajoule (MJ) angegeben werden.⁸⁰ Die Norm verfolgt dabei einen „Well-to-Wheel“-Ansatz, das bedeutet, dass auch die Emissionen, die während der Energieprozesse der eingesetzten Kraftstoffe oder Elektrizität entstehen, berücksichtigt werden müssen.⁸¹ Diese Energieprozesse umfassen dabei bei Kraftstoffen die

⁷³ Vgl. Meunier et al. (2013a)

⁷⁴ Vgl. Klöpffer/Grahl (2009), S. 17

⁷⁵ Vgl. ebenda

⁷⁶ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2013), S. 5

⁷⁷ Vgl. ebenda, S. 6

⁷⁸ Vgl. ebenda

⁷⁹ Vgl. ebenda, S. 8

⁸⁰ Vgl. ebenda, S. 11

⁸¹ Vgl. ebenda, S. 5

Förderung von Primärenergie, das Raffinieren, die Umwandlung sowie den Transport und die Verteilung des Kraftstoffes.⁸² Die Gewinnung und der Transport der Primärenergie, die Umwandlung, die Stromerzeugung sowie Verluste in Stromnetzen gehören bei Elektrizität zu den Energieprozessen.⁸³ Nicht enthalten sind dabei Prozesse des Umschlags, des Handling innerhalb der Einrichtung und des Be- und Entladens von Paketen bei KEP-Diensten.⁸⁴

7.3 Besonderheiten der Ökobilanzierung in der Logistik

Während bei einer Ökobilanz häufig ein Produkt beziehungsweise ein Produktlebenszyklus bilanziert wird, erfolgt in der Logistik wie in vorliegender Arbeit meist die Bilanzierung einer Transportdienstleistung. Die bereits in Kapitel 1.2 vorgestellte DIN EN 16258:2012 gibt dazu die Grundlagen und Methoden vor. Der Großteil der Treibhausgasemissionen in der Logistik entsteht bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe.⁸⁵ Die Berechnung der THG-Emissionen erfolgt also grundsätzlich auf Basis des gesamten Kraftstoffverbrauchs beziehungsweise Energieverbrauchs einer Transportdienstleistung.⁸⁶ Die Schwierigkeit bei der Bilanzierung von Transportdienstleistungen stellen dabei die sogenannten Scope-3-Emissionen dar. Diese bezeichnen THG-Emissionen, die von externen Dienstleistern des bilanzierenden Unternehmens verursacht werden.⁸⁷ Diese Scope-3-Emissionen machen aber besonders bei größeren Logistikdienstleistern einen bedeutenden Anteil an den Gesamtemissionen von 80% bei der deutschen Post und mehr als 90% bei DB Schenker aus.⁸⁸ Gemäß der DIN EN 16258:2012 müssen diese Scope-3-Emissionen nun auch für die Berechnung der THG-Emissionen berücksichtigt werden.⁸⁹ Aufgrund der hohen Anzahl eingesetzter Dienstleister und Subunternehmer, besonders bei großen Logistikdienstleistern, ist dies häufig ein Problem, da alle beauftragten Dienstleister die exakten Kraftstoffverbräuche offen legen müssen. Häufig liegen den beauftragten Dienstleistern aber selbst lediglich Durchschnittswerte für alle Transporte insgesamt vor.⁹⁰ Aus diesem Grund kann häufig nicht auf spezifische Werte des Transportdienstleisters oder gar individuelle Messwerte zurückgegriffen werden. Alternativ dazu kann gemäß DIN EN 16258:2012 allerdings auch auf Vorgabewerte zurückgegriffen werden. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass bei der

⁸² Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2013) S. 12

⁸³ Vgl. ebenda

⁸⁴ Vgl. ebenda

⁸⁵ Vgl. Kranke et al. (2011), S. 61

⁸⁶ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2013), S. 13

⁸⁷ Vgl. Kranke et al. (2011), S. 47

⁸⁸ Vgl. ebenda

⁸⁹ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2013), S. 13

⁹⁰ Vgl. Kranke et al. (2011), S. 48

Verwendung von Vorgabewerten die entsprechende Quelle und eine Begründung, weshalb auf Vorgabewerte zurückgegriffen wurde, angegeben werden.⁹¹

Die Berechnung der THG-Emissionen erfolgt in Teilstrecken. Die Transporte müssen also zunächst in unterschiedliche Teilstrecken gegliedert werden und es werden die THG-Emissionen für jede Teilstrecke berechnet.⁹² Für die Berechnung der THG-Emissionen jeder Teilstrecke wird zunächst ein sogenanntes Fahrzeugeinsatz-System, auch als VOS (Vehicle Operation System) bezeichnet, bestimmt.⁹³ Anschließend wird der gesamte Energieverbrauch für das VOS berechnet und im dritten Schritt erfolgt die Berechnung der gesamten THG-Emissionen für dieses VOS.⁹⁴ Zuletzt werden die Ergebnisse für jede Teilstrecke addiert.⁹⁵

Die Berechnung der THG-Emissionen erfolgt bei vorliegendem Kraftstoff- beziehungsweise Energieverbrauch für jede Teilstrecke anhand der zugehörigen Umrechnungsfaktoren. Was die Umrechnungsfaktoren darstellen und wie sie auszuwählen sind, wird in Kapitel 2 ausführlich dargestellt.

⁹¹ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2013), S. 21

⁹² Vgl. ebenda, S. 13

⁹³ Vgl. ebenda

⁹⁴ Vgl. ebenda

⁹⁵ Vgl. ebenda

7.4 Bilanzierung der Treibhausgasemissionen des Mikrodepotkonzepts

In diesem Kapitel wird auf Grundlage der Norm DIN EN 16258:2012 teilweise mit Vorgabewerten, aber auch mit individuellen Messwerten und bereits im Rahmen des Projektes ermittelten Werten zum Energieverbrauch gerechnet. Um aus einem durchschnittlichen Verbrauchswert pro 100 km den gesamten Energieverbrauch zu ermitteln, wird zunächst die gesamte zurückgelegte Strecke im Betrachtungszeitraum benötigt. Diese errechnet sich aus der Anzahl der gefahrenen Touren multipliziert mit deren durchschnittlicher Länge in Kilometern. Die Werte zur Tourenlänge und Tourenanzahl im Monat basieren für beide Szenarien auf realen Auftragsdaten für die betrachteten Postleitzahlgebiete 90443, 90459 und 90461 eines KEP-Dienstes im Zeitraum von April 2016 bis Juni 2016. Folgende Abbildung zeigt diese Postleitzahlgebiete rot markiert.

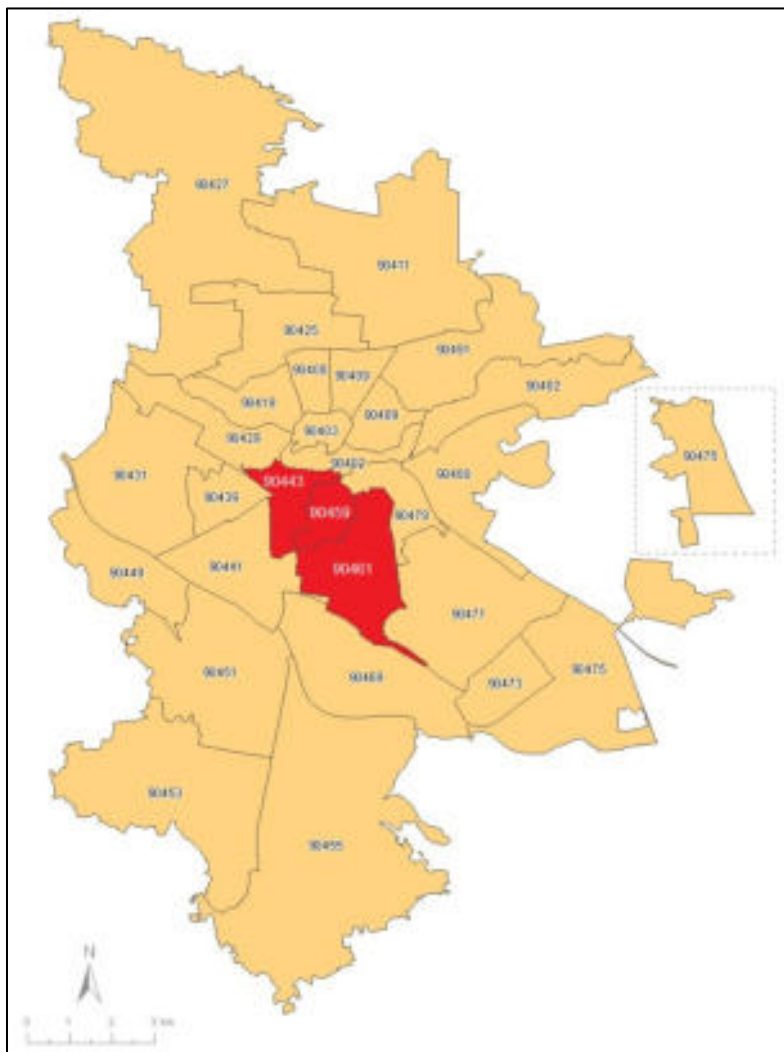


Abbildung 43: Postleitzahlgebiete des Nürnberger Stadtgebiets

Quelle: Amt für Stadtforschung und Statistik für Nürnberg und Fürth

Die von diesem KEP-Dienst angegebenen Aufträge wurden mit der Simulationssoftware TransIT für beide Szenarien zu optimalen Touren zusammengestellt. TransIT ordnet die angegebenen Aufträge in eine optimale Tour und ermittelt zudem für das Soll-Szenario anhand der gegebenen Restriktionen, wie Gewichts- oder Volumenbegrenzungen, welche Pakete mit dem Lastenfahrrad und welche mit dem konventionellen Zustellfahrzeug ausgeliefert werden können. Dabei ist anzumerken, dass die in der Realität gefahrenen Touren von den optimalen Touren abweichen können.

Für die Berechnung der THG-Emissionen wird neben dem Energieverbrauch der jeweilige THG-Emissionsfaktor benötigt, mit welchem der Energieverbrauch multipliziert wird. Der entsprechende Emissionsfaktor gibt an, wie viele Kilogramm CO_{2e} pro verbranntem Liter Diesel oder pro verbrauchter Kilowattstunde ausgestoßen werden. Dabei ist zwischen Tank-to-Wheel (TTW) und Well-to-Wheel (WTW) Emissionsfaktoren zu unterscheiden. Als Tank-to-Wheel werden die Emissionen bezeichnet, die von den Fahrzeugen während des Betriebes ausgestoßen werden.⁹⁶ Well-to-Wheel hingegen umfasst auch die Emissionen, die im Zusammenhang mit den Energieprozessen der eingesetzten Kraftstoffe oder der Stromversorgung entstehen, also zum Beispiel bei der Produktion oder Verteilung von Kraftstoffen.⁹⁷ Nachfolgend wird der jeweilige WTW-Emissionsfaktor benötigt, da für das Sekundärziel Klimaschutz, wie bereits dargestellt, eine globale Betrachtungsweise notwendig ist. Es ist also nicht nur der lokale Ausstoß von Treibhausgasen während des Fahrbetriebes zu beachten, sondern sämtliche zugehörige Emissionen sind von Bedeutung.

Die Formel für die Berechnung der Well-to-Wheel THG-Emissionen lautet also:

$$THG\text{-Emissionen}_{WTW} = THG\text{-}F_{(WTW)} \times EV$$

THG-Emissionen_{WTW} bezeichnet die Well-to-Wheel Treibhausgasemissionen, THG-F_{WTW} den Well-to-Wheel-Emissionsfaktor für Treibhausgase und EV steht für den Energieverbrauch in Liter Kraftstoff beziehungsweise in Kilowattstunden.⁹⁸

Alle Ergebnisse werden auf eine Nachkommastelle kaufmännisch gerundet angegeben.

7.4.1 Darstellung des Ist-Szenarios

Als Ist-Szenario wird das momentane Zustellsystem der KEP-Dienste auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg bezeichnet.

⁹⁶ Vgl. Kranke et al. (2011), S. 65

⁹⁷ Vgl. ebenda, S. 65 f.

⁹⁸ Vgl. ebenda, S. 67

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

Die Zustellung auf der letzten Meile erfolgt dabei durch motorisierte Zustellfahrzeuge mit konventionellem Dieselantrieb, leichte Nutzfahrzeuge in der Klasse bis zu einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) von 3,5 t mit mindestens der EURO IV-Klasse oder höher.

Folgende Abbildung zeigt die Lage des Depots des KEP-Dienstes DPD in der Triester Straße am Nürnberger Hafen.

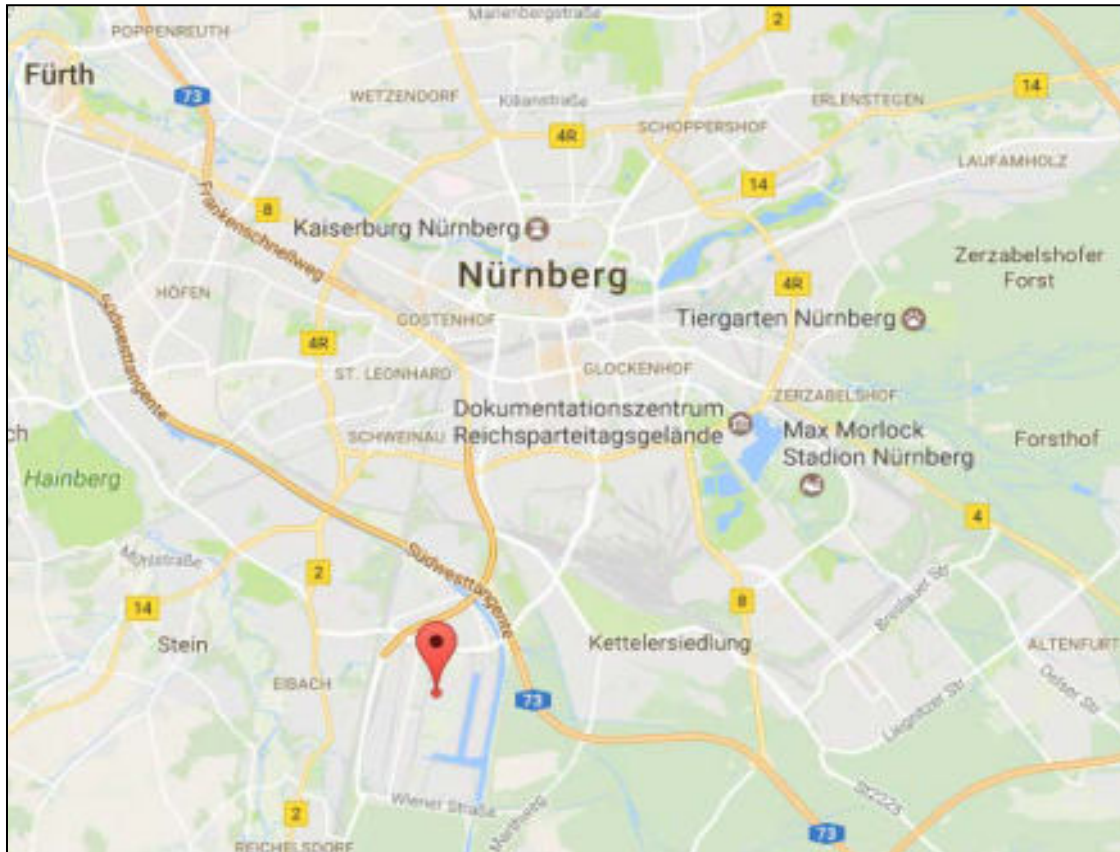


Abbildung 44: Geographische Lage des DPD-Depots 190

Quelle: Google Maps

Von dort aus erfolgen die Zustelltouren an sechs Tagen die Woche von Montag bis Samstag in alle Postleitzahlgebiete. In vorliegender Arbeit werden lediglich die Postleitzahlgebiete 90443, 90459 und 90461 der Nürnberger Südstadt betrachtet (siehe Abbildung 2). Die geografische Systemgrenze bilden somit die Strecke von dem in Abbildung 3 abgebildeten Hauptdepot bis in die Postleitzahlgebiete 90443, 90459 und 90461 sowie diese Postleitzahlgebiete als Auslieferungsgebiet selbst. Die zeitliche Systemgrenze ist auf ein Jahr festgelegt. Alle Ergebnisse werden auf diesen Betrachtungszeitraum normiert angegeben.

7.4.2 Bilanzierung der Treibhausgasemissionen des Ist-Szenarios

Wie bereits dargestellt, muss für die Berechnung der THG-Emissionen zunächst eine Untergliederung des betrachteten Szenarios in Teilstrecken erfolgen. Im Ist-Szenario liegt lediglich eine Teilstrecke vor, die Paketzustellung vom Hauptdepot in der Triester Straße startend in die betrachteten Postleitzahlgebiete 90443, 90459 und 90461. Für diese Teilstrecke muss im nächsten Schritt das Fahrzeugeinsatz-System (VOS) bestimmt werden. Auf dieser Strecke wird nur ein VOS, nämlich ein leichtes Nutzfahrzeug mit 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht der EURO IV-Klasse als Auslieferungsfahrzeug eingesetzt. Dieses wird im Folgenden als „VOS1 Ist-Szenario“ bezeichnet. Zunächst sollen die zurückgelegten Kilometer des „VOS1 Ist-Szenario“ im ganzen Betrachtungszeitraum ermittelt werden. Dazu werden die bereits als Projektdaten vorliegenden Tourenlängen und Anzahl der eingesetzten Zustellfahrzeuge herangezogen. An den Tagen von Montag bis Freitag fahren pro Tag im Mittel 5,8 Zustellfahrzeuge in das betrachtete Gebiet. Zusätzlich fahren jeden Samstag im Mittel 1,7 Zustellfahrzeuge in das betrachtete Gebiet. Pro Tour wird ein Zustellfahrzeug eingesetzt. Die Anzahl der Zustellfahrzeuge entspricht also der Anzahl der Touren. Für die Tage Montag bis Freitag werden 20 Tage im Monat veranschlagt, für die Samstage werden vier Tage im Monat angesetzt. Somit ergibt sich für die Tourenanzahl pro Monat:

$$\text{Tourenanzahl pro Monat}_{(\text{VOS1 Ist-Szenario})} = (5,8 \text{ Touren/Tag} \times 20 \text{ Tage}) + (1,7 \text{ Touren/Tag} \times 4 \text{ Tage}) = 123 \text{ Touren}$$

Im Mittel fahren somit 123 Touren im Monat in die betrachteten Gebiete. Multipliziert mit der mittleren Tourenlänge erhält man die gefahrene Strecke pro Monat. Der Mittelwert aller Tourenlängen beträgt 21,2 Kilometer:

$$\text{Strecke pro Monat}_{(\text{VOS1 Ist-Szenario})} = 123 \text{ Touren} \times 21,2 \text{ km/Tour} = 2.607,6 \text{ km}$$

Für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr ergibt dies dann:

$$\text{Strecke pro Jahr}_{(\text{VOS1 Ist-Szenario})} = 2.607,6 \text{ km/Monat} \times 12 \text{ Monate} = 31.291,2 \text{ km}$$

Mit diesem Ergebnis lässt sich der gesamte Energieverbrauch in Liter Diesel des „VOS1 Ist-Szenario“ berechnen. Der Dieserverbrauch eines eingesetzten Zustellfahrzeuges wurde bereits im Rahmen des Projektes ermittelt und liegt bei 14,79 Liter pro 100 Kilometer.⁹⁹ Somit ergibt sich ein gesamter Energieverbrauch für das „VOS1 Ist-Szenario“ im Betrachtungszeitraum von:

$$\text{EV}_{(\text{VOS1 Ist-Szenario})} = 31.291,2 \text{ km} \times 14,79 \text{ l/100 km} = 4.628,0 \text{ l}$$

⁹⁹ Vgl. Kranke et al. (2011), S. 23

Um nun die Menge an Treibhausgasemissionen zu erhalten, muss dieser Energieverbrauch noch mit dem zugehörigen Emissionsfaktor multipliziert werden. Der zugehörige Well-to-Wheel THG-Emissionsfaktor beträgt $3,24 \text{ kgCO}_{2e}/\text{l}$.¹⁰⁰ Mit der in Kapitel 2 hergeleiteten Formel $THG\text{-Emissionen}_{WTW} = THG\text{-}F_{WTW} \times EV$ ergibt sich folgendes Ergebnis:

$$THG\text{-Emissionen}_{WTW} (\text{VOS1 Ist-Szenario}) = 3,24 \text{ kgCO}_{2e}/\text{l} \times 4.628,0 \text{ l} = 14.994,7 \text{ kgCO}_{2e}$$

Das „VOS1 Ist-Szenario“ stößt Treibhausgase in Höhe von $14.994,7 \text{ kgCO}_{2e}$ im Zeitraum von einem Jahr aus.

Als letzter Schritt erfolgt die Addition aller Ergebnisse der einzelnen Teilstrecken. Das Ist-Szenario besteht allerdings nur aus einer Teilstrecke mit dem VOS1 Ist-Szenario als einziges Fahrzeugeinsatz-System. Im Betrachtungszeitraum von einem Jahr werden also im Ist-Szenario rund 15,0 Tonnen Treibhausgase emittiert.

7.4.3 Darstellung des Soll-Szenarios

Als Soll-Szenario wird die Zustellmethode mit dem Mikrodepotkonzept bezeichnet. Dabei wird das Mikrodepot einmal täglich von Montag bis Samstag von einem schweren Nutzfahrzeug mit 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht vom Hauptdepot in der Triester Straße mit Paketen beliefert. Diese sind auf Rollcontainern geladen, bereits geleerte Rollcontainer im Mikrodepot werden bei der Rückfahrt des LKW wieder mit in das Hauptdepot transportiert. Die Zustellung auf der letzten Meile in das betrachtete Gebiet erfolgt dann mit Lastenfahrrädern. Die eingesetzten Lastenfahrräder sind das Modell „Musketier“ von der Firma Radkutsche mit einem 23 Ah Lithium-Ionen-Mangan Akku und einem Planen/Spiegel-Aufbau. Das Leergewicht des Lastenfahrrads mit einem Planenaufbau beträgt laut Hersteller $102,4 \text{ kg}$ (siehe digitaler Anhang II). Das zulässige Gesamtgewicht beträgt bis zu 300 kg .¹⁰¹

Zusätzlich kommen auf der letzten Meile auch leichte Nutzfahrzeuge mit $3,5 \text{ t zGG}$ zum Einsatz, da aufgrund von Volumen und Gewichtsbeschränkungen eine Auslieferung nur mit dem Lastenfahrrad nicht möglich ist.¹⁰²

Als optimale Lage für das Mikrodepot wurde im Rahmen des Projekts eine Lage nahe dem Maffeiplatz bestimmt. Diese Lage zeigt folgende Abbildung.

¹⁰⁰ Deutsches Institut für Normung e.V. (2013), S. 23

¹⁰¹ Vgl. Radkutsche GmbH (2013)

¹⁰² Vgl. Bogdanski (2015), S. 53

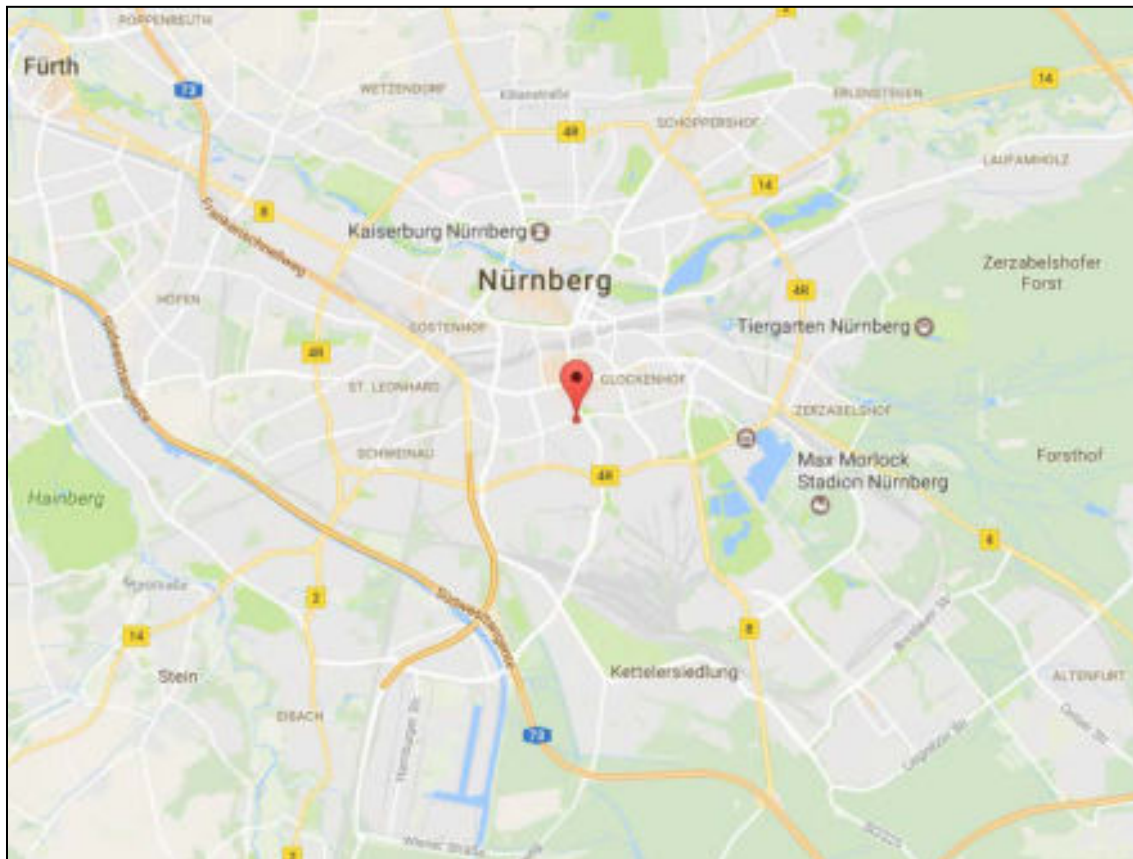


Abbildung 45: Optimale Lage des Mikrodepots

Quelle: Google Maps

Die geographische Systemgrenze wird durch die Strecke vom Hauptdepot bis zum Mikrodepot und weiterhin durch die Strecke vom Mikrodepot bis in die Postleitzahlgebiete 90443, 90459 und 90461 gebildet. Zudem enthält die geografische Systemgrenze die Postleitzahlgebiete 90443, 90459 und 90461 als Auslieferungsgebiet selbst. Die zeitliche Systemgrenze ist ebenfalls auf ein Jahr festgelegt. Alle Ergebnisse werden auf diesen Betrachtungszeitraum normiert angegeben.

7.4.4 Bilanzierung der Treibhausgasemissionen des Soll-Szenarios

Auch hier erfolgt zunächst eine Unterteilung des Szenarios in die jeweiligen Teilstrecken und die Festlegung des zugehörigen VOS für die jeweilige Teilstrecke. Anschließend wird der gesamte Energieverbrauch für jedes VOS berechnet und mit den zugehörigen Emissionsfaktoren multipliziert, um die THG-Emissionen für das VOS zu erhalten.

Im Soll-Szenario liegen drei Teilstrecken vor. Die erste Teilstrecke bildet die Belieferung vom Hauptdepot zum Mikrodepot. Das eingesetzte VOS auf der ersten Teilstrecke ist ein LKW mit 7,5 t zGG mit Dieselantrieb unter Annahme der EURO IV-Klasse. Dieses VOS wird als „VOS1 Soll-Szenario“ bezeichnet. Die zweite Teilstrecke ist die Paketzustellung auf der

letzten Meile vom Hauptdepot startend in die betrachteten Postleitzahlgebiete. Das dabei eingesetzte VOS ist ein leichtes Nutzfahrzeug mit 3,5 t zGG, Dieselantrieb und EURO IV-Klasse, welches im Folgenden als „VOS2 Soll-Szenario“ bezeichnet wird. Die dritte und letzte Teilstrecke ist die Paketzustellung auf der letzten Meile vom Mikrodepot startend in die jeweiligen Postleitzahlgebiete mit dem Lastenfahrrad. Das dabei eingesetzte „VOS3 Soll-Szenario“ ist ein Lastenfahrrad der Marke „Musketier“ des Herstellers Radkutsche mit 23 Ah Lithium-Ionen-Mangan Akku und einem Planen/Spiegel-Aufbau.

Im nächsten Schritt muss für jedes VOS der gesamte Energieverbrauch im Betrachtungszeitraum berechnet werden. Anschließend erfolgt die Berechnung der THG-Emissionen für jedes VOS für den gesamten Betrachtungszeitraum.

Für das „VOS1 Soll-Szenario“ liegen keine Realwerte für den Energieverbrauch vor. In der Literatur werden für einen vollbeladenen LKW mit 7,5 t zGG und EURO IV-Klasse Dieserverbrauchswerte zwischen 12,9 l/100 km¹⁰³ und 16,2 l/100 km¹⁰⁴ für den Stadtverkehr angegeben. Für die Berechnung wird der höchste Wert von 16,2 l/100 km herangezogen, da so eine Minimalersparnis angegeben werden kann. Eine Tour des „VOS1 Soll-Szenario“ besteht aus Hin- und Rückfahrt zwischen Hauptdepot und Mikrodepot. Die Strecke zwischen Hauptdepot und Mikrodepot beträgt einfach 5,4 km, eine Tour beträgt somit 10,8 km. Diese wird an sechs Tagen pro Woche und somit an 24 Tagen pro Monat gefahren. Somit ergibt sich die zurückgelegte Strecke pro Monat:

$$\text{Strecke pro Monat}_{(\text{VOS1 Soll-Szenario})} = 10,8 \text{ km/Tag} \times 24 \text{ Tage} = 259,2 \text{ km}$$

Für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr bedeutet das:

$$\text{Strecke pro Jahr}_{(\text{VOS1 Soll-Szenario})} = 259,2 \text{ km/Monat} \times 12 \text{ Monate} = 3.110,4 \text{ km}$$

Mit der gesamten zurückgelegten Strecke lässt sich als nächstes der gesamte Energieverbrauch des „VOS1 Soll-Szenario“ berechnen. Legt man einen Energieverbrauch von 16,2 Liter Diesel/100 km zugrunde, ergibt dies für den gesamten Betrachtungszeitraum:

$$EV_{(\text{VOS1 Soll-Szenario})} = 3.110,4 \text{ km} \times 16,2 \text{ l/100 km} = 503,9 \text{ l}$$

Für die Berechnung der THG-Emissionen ist auch hier der WTW THG-Emissionsfaktor von 3,24 kgCO_{2e}/l relevant. Setzt man diese Werte in die Formel zur Berechnung der THG-Emissionen ein, erhält man folgendes Ergebnis für das „VOS1 Soll-Szenario“:

$$\text{THG-Emissionen}_{\text{WTW} (\text{VOS1 Soll-Szenario})} = 3,24 \text{ kgCO}_{2e}/\text{l} \times 503,9 \text{ l} = 1.632,6 \text{ kgCO}_{2e}$$

¹⁰³ Kranke et al. (2011), S. 155

¹⁰⁴ ebenda, S. 148

Das „VOS1 Soll-Szenario“ stößt also Treibhausgase in Höhe von 1.632,6 kgCO_{2e} im Zeitraum von einem Jahr im betrachteten Gebiet aus.

Für die Berechnung des Energieverbrauchs des „VOS2 Soll-Szenario“ werden die bereits als Projektdaten vorliegenden Tourenlängen und die Anzahl der eingesetzten Zustellfahrzeuge (siehe digitaler Anhang III) sowie der bereits ermittelte Dieserverbrauch von 14,79 l/100 km, herangezogen. An den Tagen Montag bis Freitag fahren täglich im Mittel 3,4 Zustellfahrzeuge in die betrachteten Gebiete. Zusätzlich fährt jeden Samstag im Mittel ein Zustellfahrzeug in das betrachtete Gebiet. Pro Tour wird ein Zustellfahrzeug eingesetzt. Die Anzahl der Zustellfahrzeuge entspricht also der Anzahl der Touren. Für die Tage Montag bis Freitag werden 20 Tage im Monat veranschlagt, für die Samstage vier Tage im Monat. Dies ergibt für die Tourenanzahl pro Monat:

$$\text{Tourenanzahl pro Monat}_{(\text{VOS2 Soll-Szenario})} = (3,4 \text{ Touren/Tag} \times 20 \text{ Tage}) + (1 \text{ Tour/Tag} \times 4 \text{ Tage}) = 72 \text{ Touren}$$

Im Mittel fahren 72 Touren im Monat in die betrachteten Gebiete. Multipliziert mit der mittleren Tourenlänge ergibt dies die zurückgelegte Strecke im Monat des „VOS2 Soll-Szenario“. Der Mittelwert der Tourenlängen für diese Teilstrecke beträgt 23,3 km:

$$\text{Strecke pro Monat}_{(\text{VOS2 Soll-Szenario})} = 72 \text{ Touren} \times 23,3 \text{ km/Tour} = 1.677,6 \text{ km}$$

Für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr ergibt dies dann:

$$\text{Strecke pro Jahr}_{(\text{VOS2 Soll-Szenario})} = 1.677,6 \text{ km/Monat} \times 12 \text{ Monate} = 20.131,2 \text{ km}$$

Im nächsten Schritt wird der gesamte Energieverbrauch für das VOS berechnet. Der Energieverbrauch des „VOS2 Soll-Szenario“ liegt bei 14,79 Liter Diesel/100 km. Somit beträgt der gesamte Energieverbrauch für das „VOS2 Soll-Szenario“:

$$\text{EV}_{(\text{VOS2 Soll-Szenario})} = 20.131,2 \text{ km} \times 14,79 \text{ l/100km} = 2.977,4 \text{ l}$$

Als letzter Schritt erfolgt die Berechnung der THG-Emissionen. Dazu wird auch für das „VOS2-Soll-Szenario“ der gesamte Energieverbrauch mit dem WTW-THG-Emissionsfaktor multipliziert:

$$\text{THG-Emissionen}_{\text{WTW} (\text{VOS2 Soll-Szenario})} = 3,24 \text{ kgCO}_{2e}/\text{l} \times 2.977,4 \text{ l} = 9.646,8 \text{ kgCO}_{2e}$$

Das „VOS2 Soll-Szenario“ stößt also Treibhausgase in Höhe von 9.646,8 kgCO_{2e} im Zeitraum von einem Jahr im betrachteten Gebiet aus.

Generell erfolgt die Berechnung der THG-Emissionen für elektrisch betriebene Transportmittel auf dieselbe Weise wie für dieselbetriebene. Die Formel $THG-Emissionen_{WTW} = THG-F_{WTW} \times EV$ ist auch für diese Berechnung relevant, EV bezeichnet nun den Energieverbrauch in Kilowattstunden und nicht mehr in Liter Dieselkraftstoff. Auch für das „VOS3 Soll-Szenario“ muss also zunächst der Energieverbrauch bestimmt werden.

Der Kilowattstunden-Verbrauch eines Lastenfahrads hängt von einer Vielzahl von Faktoren, wie Ladungsgewicht, Straßenbelag, Temperatur, Steigungsprofil der Tour und der individuellen Fahrweise des Fahrers ab. Hinzu kommen außerdem noch tourenspezifische Faktoren wie das Ladegewicht, die Stoppanzahl einer Auslieferungstour und die Meter zwischen den Stopps, die Einfluss auf den Stromverbrauch haben. Durch das Anfahren nach jedem Stopp wird mehr Strom verbraucht, als wenn die selbige Strecke ohne sämtliche Stopps gefahren werden würde. Aufgrund dieser vielen verschiedenen Einflussfaktoren war es nicht möglich, den Stromverbrauch zu berechnen und auch der Hersteller des eingesetzten Lastenfahrads, Radkutsche GmbH, konnte deshalb keine Werte zum Stromverbrauch unter den Bedingungen einer Auslieferungstour nennen.

Aus diesem Grund wurde ein Ausschnitt einer realen Zustelltour mit drei unterschiedlichen Ladungsgewichten (ohne Zuladung, mit 45 kg Zuladung und mit 81 kg Zuladung) nachgefahren und der Verbrauch gemessen. Das Leergewicht des Lastenfahrads beträgt 102,4 kg. Das Gewicht des Fahrers während der Tour betrug inklusive Gepäck 65 kg, so dass für die Messwerte ein Leergewicht von 167,4 kg zu Grunde liegt. Im Weiteren wird bei der Berechnung für den Fahrer mit einem Gewicht von 75 kg gemäß der Richtlinie EG 92/21/EWG gerechnet.¹⁰⁵ Das Leergewicht des Lastenfahrads beträgt dann also 177,4 kg. Für die Messung wurde das Modell „Musketier“ der Firma Radkutsche mit einem 23 Ah Lithium-Ionen-Mangan Akku und einem Planen/Spiegel-Aufbau, wie auch in der Realität verwendet, eingesetzt. Die Länge des gefahrenen Ausschnitts betrug 11 km und enthielt 40 Stopps. Eine Aufzeichnung der gefahrenen Tour ist in Anhang 1 zu finden. Somit liegt alle 275 Meter ein Stopp. Das bedeutet, dass alle im Weiteren berechneten Werte unter der Annahme gelten, dass auf der gegebenen Strecke alle 275 Meter ein Stopp liegt. Während der gesamten Tour wurde das Lastenfahrrad, wie auch in Realbedingungen, auf höchster Unterstützungsstufe gefahren. Der Straßenbelag bestand zum Großteil aus Asphalt, phasenweise aus Kopfsteinpflaster. Die Temperatur betrug dabei zwischen 18 und 21° Celsius ohne Wind. Die Höhendifferenz der gefahrenen Tour betrug 33 Meter. Das Höhenprofil der Tour befindet sich in Anhang 2. Die Messung des Stromverbrauchs erfolgte mit einem Strommessgerät mit der Modellnummer 9149 der Marke SilverCrest. Der Akku des

¹⁰⁵ Vgl. Rat der Europäischen Gemeinschaft (1992)

Lastenfahrrads wurde nach jeder Tour geladen, wobei das Strommessgerät zwischengeschaltet wurde. Folgender Tabelle sind die Ergebnisse der Messung zu entnehmen.

Tabelle 9 kWh-Verbrauch pro 11 km Tour des VOS3 Soll-Szenario

	Ohne Ladung	45 kg Ladung	81 kg Ladung
Gesamtgewicht in kg	167,4	212,4	248,4
Verbrauch in Wh / 11 km Tour mit 40 Stopps	0,22	0,25	0,30

Quelle: eigene Messung

Das anfängliche Ladegewicht einer Auslieferungstour mit dem „VOS3 Soll-Szenario“ beträgt im Mittel 110,0 kg. Da die Abnahme des Ladungsgewichtes durch Auslieferung der Pakete näherungsweise linear verläuft, kann mit einem mittleren Ladungsgewicht von 55 kg gerechnet werden. Mit einem Leergewicht von 177,4 kg beläuft sich das mittlere Gesamtgewicht damit auf 232,4 kg. Die Ergebnisse müssen nun auf dieses Gewicht skaliert werden. Zur Berechnung wird der mittlere Messwert von 0,25 kWh/11 km Tour für das Gesamtgewicht von 212,4 kg zugrunde gelegt. Der Verbrauch bei diesem Gewicht beträgt 23 Wattstunden (Wh) pro Kilometer. So ergibt sich der Energieverbrauch für ein Gesamtgewicht von 232,4 kg:

$$EV_{212,4kg} = 23 \text{ Wh/km}$$

$$EV_{232,4kg} = (23 \text{ Wh/km} \div 212,4) \times 232,4 = 25 \text{ Wh/km}$$

Der Energieverbrauch für eine Tour mit einem Stoppabstand von 275 Metern und einem Gesamtgewicht des Lastenfahrrads von 232,4 kg beträgt also 25 Wh/km oder 2,5 kWh/100 km.

Bei diesem Wert handelt es sich lediglich um einen Näherungswert. Durch nicht beeinflussbare Faktoren wie Messungenauigkeiten bei der Messung des Stromverbrauches, den individuellen Fahrstil des Fahrers, Verkehrsgegebenheiten, Außentemperatur und Wind können Abweichungen entstehen. Auch die tourenspezifischen Faktoren, die in die Berechnung miteingeflossen sind, wie die Anzahl der Stopps, die Strecke zwischen den Stopps oder Ladungsgewichte, basieren zwar auf Daten realer Touren (siehe digitaler Anhang IV), sind aber letztendlich getroffene Annahmen. Auch hier sind Abweichungen möglich.

Um den gesamten Energieverbrauch des „VOS3 Soll-Szenario“ zu erhalten, muss zunächst die gesamte zurückgelegte Strecke des „VOS3 Soll-Szenario“ im Betrachtungszeitraum von einem Jahr ermittelt werden. Die Werte zu Tourenlänge und Anzahl der eingesetzten Lastenfahrräder als Zustellfahrzeuge stammen ebenfalls aus den bereits vorliegenden Projektdaten. An den Tagen von Montag bis Freitag fahren im Mittel 5,5 Lastenfahrräder pro Tag in das betrachtete Gebiet. Zusätzlich fahren jeden Samstag 1,8 Lastenfahrräder in das betrachtete Gebiet. Pro Tour wird ein Lastenfahrrad eingesetzt, die Anzahl der Lastenfahrräder entspricht also der Tourenanzahl. Für die Tage Montag bis Freitag wurden 20 Tage im Monat veranschlagt, für die Samstage vier Tage. Das ergibt:

$$\text{Tourenanzahl pro Monat}_{(\text{VOS3 Soll-Szenario})} = (5,5 \text{ Touren/Tag} \times 20 \text{ Tage}) + (1,8 \text{ Touren/Tag} \times 4 \text{ Tage}) = 117 \text{ Touren}$$

Somit fahren im Mittel 117 Touren im Monat in das betrachtete Gebiet. Die mittlere Tourenlänge für das „VOS3 Soll-Szenario“ beträgt 14,9 km. Dies ergibt für die zurückgelegte Strecke pro Monat für das „VOS3 Soll-Szenario“:

$$\text{Strecke pro Monat}_{(\text{VOS3 Soll-Szenario})} = 117 \text{ Touren} \times 14,9 \text{ km/Tour} = 1743,3 \text{ km}$$

Daraus ergibt sich die zurückgelegte Strecke für den Betrachtungszeitraum:

$$\text{Strecke pro Jahr}_{(\text{VOS3 Soll-Szenario})} = 1743,3 \text{ km/Monat} \times 12 \text{ Monate} = 20.919,6 \text{ km}$$

Nun kann der gesamte Energieverbrauch im Betrachtungszeitraum des „VOS3 Soll-Szenario“ berechnet werden.

$$EV_{(\text{VOS3 Soll-Szenario})} = 20.919,6 \text{ km} \times 2,5 \text{ kWh/100 km} = 523,0 \text{ kWh}$$

Um die THG-Emissionen berechnen zu können, wird der zugehörige Emissionsfaktor benötigt. Bei strombetriebenen Transportmitteln wie einem Lastenfahrrad ist der TTW-Emissionsfaktor immer null, da während des Betriebes keine Treibhausgase ausgestoßen werden.¹⁰⁶ Aus diesem Grund ist hier besonders darauf zu achten, dass der WTW-Emissionsfaktor gewählt wird und so die THG-Emissionen bei der Stromherstellung und der Verteilung des Stromes berücksichtigt werden. Der WTW-Emissionsfaktor für Treibhausgase für Strom aus dem öffentlichen Niederspannungsnetz in Deutschland beträgt 0,589 kgCO_{2e}/kWh.¹⁰⁷

Daraus ergibt sich:

¹⁰⁶ Vgl. Kranke et al. (2011), S. 99

¹⁰⁷ Vgl. ebenda

$$THG\text{-Emissionen}_{WTW (VOS3 \text{ Soll-Szenario})} = 0,589 \text{ kgCO}_{2e}/kWh \times 523,0 \text{ kWh} = 308,0 \text{ kgCO}_{2e}$$

Unter den getroffenen Annahmen stößt das VOS3 Soll-Szenario also im Betrachtungszeitraum von einem Jahr Treibhausgase in Höhe von 308,4 kgCO_{2e} aus.

Da für jede Teilstrecke und die zugehörigen VOS die THG-Emissionen im Einzelnen berechnet wurden, erfolgt im letzten Schritt die Addition der Ergebnisse aller Teilstrecken. In folgender Tabelle werden alle Ergebnisse der jeweiligen VOS des Soll-Szenarios zur Übersicht aufgelistet.

Tabelle 10 Ergebnisse THG-Emissionen Soll-Szenario

	VOS1	VOS2	VOS3
THG-Emissionen in kgCO _{2e}	1.632,6	9.646,8	308,0

Quelle: eigene Berechnung

Zusammen addiert ergibt dies einen Treibhausgas-Ausstoß von 11,6 Tonnen CO_{2e} für das Soll-Szenario im Betrachtungszeitraum von einem Jahr im betrachteten Gebiet.

7.5 Ermittlung des Luftschadstoffausstoßes

Wie bereits beschrieben, ist der Immissionsschutz durch Luftreinhaltung primäres Ziel der Stadt Nürnberg. Immissionen können mit den im Projekt verfügbaren Softwaretools jedoch nicht berechnet werden, aus diesem Grund sollen die Emissionen der Luftschadstoffe NO_x und PM₁₀ des Ist-Szenarios sowie des Soll-Szenarios ermittelt werden.

Die Berechnung der NO_x- und PM₁₀-Emissionen erfolgt analog zur Bilanzierung der THG-Emissionen für jedes VOS einzeln. Die Ergebnisse der einzelnen Teilstrecken werden im letzten Schritt addiert. Die bereits ermittelten Energieverbräuche der einzelnen VOS werden danach zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen herangezogen.

Reale Messwerte für den Ausstoß an Luftschadstoffen für die jeweiligen VOS liegen in diesem Fall nicht vor, eine Messung direkt am Auspuff der eingesetzten Fahrzeuge unter realen Bedingungen ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht realisierbar gewesen. Aus diesem Grund erfolgt die überschlägige Ermittlung der ausgestoßenen Luftschadstoffe anhand der in der EU geltenden Grenzwerte der EURO-Klassen für Schadstoffemissionen der jeweiligen Fahrzeugeinsatz-Systeme.

Mit den europäischen Richtlinien 91/441/EWG vom 26. Juni 1991 bzw. 91/542/EWG vom 01. Oktober 1991 wurden erstmals Emissionsgrenzwerte für Luftschadstoffe von Kraftfahrzeugen festgelegt und seitdem mit jeder neuen Verordnung verschärft. Die aktuell

geltenden Grenzwerte für Schadstoffemissionen werden vom Umweltbundesamt herausgegeben. Für PKW gelten dabei andere Grenzwerte als für leichte Nutzfahrzeuge oder schwere Nutzfahrzeuge. Bei PKW unterscheiden sich die Grenzwerte zudem zwischen Benzin- und Dieselmotoren, wobei Grenzwerte für Benzinmotoren deutlich strenger sind.¹⁰⁸ Dieselfahrzeuge stoßen also deutlich mehr Luftschadstoffe aus als Fahrzeuge mit Ottomotor. Auch die Testverfahren für PKW und leichte Nutzfahrzeuge unterscheiden sich dabei von den Testverfahren für schwere Nutzfahrzeuge. Die Messung der Emission des Motors erfolgt bei schweren Nutzfahrzeugen auf dem Motorenprüfstand in einer definierten Folge von Betriebszuständen.¹⁰⁹ Während die Messungen für EURO I und II im 13-Stufen-Test erfolgten, sind die angewendeten Messverfahren für EURO III bis VI das ESC (European Stationary Cycle)- und ELR (European Load Response Test)-Verfahren.¹¹⁰ Beim ESC-Test werden die Messungen aufgrund des hohen Reifen- und Bremsenverschleißes bei schweren Nutzfahrzeugen auf einem Rollenprüfstand grundsätzlich auf stationären Motoren-Prüfständen durchgeführt.¹¹¹ Dazu werden drei angewandte Motordrehzahlen ermittelt, und zwar für jeweils 70%, 50% und 25% der angegebenen Höchstleistung.¹¹² Angegeben werden die Grenzwerte dann in Bezug auf die verrichtete Arbeit des Motors in Gramm pro Kilowattstunde (g/kWh).¹¹³ Dazu muss noch der ELR-Rauchtest, ein mehrschichtiger Belastungstest, für die im ESC-Test angewendeten Drehzahlen bestanden werden.¹¹⁴ Mit Einführung der EURO VI-Klasse wird auch ein neues Prüfverfahren eingeführt, das sogenannte WHSC (World Harmonized Stationary Cycle)-Verfahren. Die WHSC-Prüfung basiert auf neuen, weltweit harmonisierten stationären Fahrzyklen.¹¹⁵

Folgende Tabelle zeigt die Abgasgrenzwerte für Fahrzeuge ab 2.610 kg für die EURO-Klassen III bis VI.

Tabelle 11 Abgasgrenzwerte für Fahrzeuge ab 2.610 kg

	EURO III	EURO IV	EURO V	EURO VI
Richtlinie/ Verordnung	99/96/EG Stufe A	99/96/EG Stufe B1	99/96/EG Stufe B2	EG 582/2011, Anhang XV
Typprüfung	01.10.2000	01.10.2005	01.10.2008	31.12.2012

¹⁰⁸ Vgl. Meunier et al. (2016c)

¹⁰⁹ Vgl. Appel et al. (2013), S. 412 f.

¹¹⁰ Vgl. Meunier et al. (2015)

¹¹¹ Vgl. Appel et al. (2013), S. 412 f.

¹¹² Vgl. ebenda, S. 414 f.

¹¹³ Vgl. Meunier et al. (2015)

¹¹⁴ Vgl. Appel et al. (2013), S. 416

¹¹⁵ Vgl. ebenda, S. 418

Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept
auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg

ab				
Serienprüfung ab	01.10.2001	01.10.2006	01.10.2009	31.12.2013
In g/kWh	ESC- und ELR-Prüfung			WHSC- Prüfung
NO _x	5	3,5	2	0,4
PM ₁₀	0,10	0,02	0,02	0,01

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Meunier et al. (2015)

Hier ist gut zu erkennen, dass die Grenzwerte für Stickoxide mit jeder EURO-Klasse immer weiter abgesenkt wurden, mit Einführung der EURO VI-Klasse sogar auf ein Fünftel des zuvor gültigen Grenzwertes.

Für das „VOS1 Ist-Szenario“, das „VOS1 Soll-Szenario“ und das „VOS2 Soll-Szenario“ gelten dabei die Grenzwerte für Fahrzeuge ab 2.610 kg.

Da der Energieverbrauch für diese VOS in Liter Diesel vorliegt, die Grenzwerte jedoch in Kilowattstunden angegeben sind, muss zunächst eine Umrechnung erfolgen. Um die verbrauchten Kilowattstunden zu erhalten, muss der gesamte Kraftstoffverbrauch in Liter des betrachteten VOS mit dem zugehörigen TTW-Energiefaktors für Dieselmotorkraftstoff in Megajoule (MJ) pro Liter umgerechnet werden. In diesem Falle wird der TTW-Energiefaktor benötigt, da für die lokale Luftreinhaltung im Stadtgebiet Nürnbergs lediglich die während des Fahrbetriebs in diesem Gebiet ausgestoßenen Luftschadstoffe relevant sind. Der TTW-Energiefaktor für Dieselmotorkraftstoff beträgt 35,9 MJ/l.¹¹⁶ Weiter gilt, dass 3,6 MJ einer kWh entsprechen.¹¹⁷ Der Energiewert eines Liter Diesels beträgt somit 10,0 kWh/l. Mit diesem Energiewert wird der gesamte Energieverbrauch in Liter Diesel des jeweiligen VOS in einen gesamten kWh-Verbrauch umgerechnet und dann mit dem vorgegebenen Abgasgrenzwert multipliziert.

Die TTW-Luftschadstoffemissionen des „VOS3 Soll-Szenario“ sind dabei gleich null, da elektrisch betriebene Lastenfahrräder keine Luftschadstoffe ausstoßen. Es werden im Folgenden also lediglich die Luftschadstoffemissionen des „VOS1 Ist-Szenario“, „VOS1 Soll-Szenario“ und des „VOS2 Soll-Szenario“ berechnet.

¹¹⁶ Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2013), S. 23

¹¹⁷ Vgl. ebenda, S. 30

7.5.1 Ermittlung des Luftschadstoffausstoßes des Ist-Szenarios

Bei der Bilanzierung der Treibhausgasemissionen des Ist-Szenarios wurde bereits der gesamte Energieverbrauch für das „VOS1 Ist-Szenario“ mit 4.628,0 Liter Diesel pro Jahr berechnet. Um den gesamten Energieverbrauch in Kilowattstunden zu erhalten, muss der Energieverbrauch in Liter Diesel mit dem Energiefaktor von 10,0 kWh/l multipliziert werden. Damit ergibt sich:

$$EV_{(\text{VOS1 Ist-Szenario})} = 4.628,0 \text{ l} \times 10,0 \text{ kWh/l} = 46.280,0 \text{ kWh}$$

Für das „VOS1 Ist-Szenario“ wurde ein leichtes Nutzfahrzeug mit 3,5 t zGG und der EURO-Klasse IV bestimmt. Für die Berechnung der ausgestoßenen Luftschadstoffe des „VOS1 Ist-Szenario“ wurden also die Grenzwerte für Fahrzeuge ab 2.610 kg mit der EURO IV-Klasse herangezogen. Der Grenzwert für NO_x beträgt hier 3,5 g/kWh, der Grenzwert für PM_{10} beträgt 0,02 g/kWh.¹¹⁸ Somit ergibt sich der NO_x -Ausstoß für das „VOS1 Ist-Szenario“ im betrachteten Gebiet im gesamten Betrachtungszeitraum:

$$\text{Ausstoß } \text{NO}_x(\text{VOS1 Ist-Szenario}) = 46.280,0 \text{ kWh} \times 3,5 \text{ g/kWh} = 161.980 \text{ g}$$

Die Berechnung des Feinstaubausstoßes für das „VOS1 Ist-Szenario“ erfolgt analog mit dem entsprechenden Grenzwert für PM_{10} :

$$\text{Ausstoß } \text{PM}_{10}(\text{VOS1 Ist-Szenario}) = 46.280,0 \text{ kWh} \times 0,02 \text{ g/kWh} = 925,6 \text{ g}$$

Das „VOS1 Ist-Szenario“ stößt somit im Betrachtungszeitraum von einem Jahr 162,0 kg NO_x und 0,926 kg PM_{10} im betrachteten Gebiet aus. Im letzten Schritt erfolgt die Addition der Ergebnisse für alle VOS des Ist-Szenarios. Weil für das Ist-Szenario keine weiteren Teilstrecken vorliegen, stellt dies das Ergebnis für das Ist-Szenario dar.

7.5.2 Ermittlung des Luftschadstoffausstoßes des Soll-Szenarios

Zunächst soll der Luftschadstoffausstoß des „VOS1 Soll-Szenario“ berechnet werden. Das „VOS1 Soll-Szenario“ wurde als schweres Nutzfahrzeug mit 7,5 t zGG und EURO IV-Klasse bestimmt. Somit gelten auch hier die Grenzwerte für Fahrzeuge ab 2.610 kg mit der EURO IV-Klasse von 3,5 g/kWh für NO_x und 0,02 g/kWh für PM_{10} . Der gesamte Energieverbrauch im Betrachtungszeitraum von einem Jahr für das „VOS1 Soll-Szenario“ wurde bereits mit 503,9 Liter Diesel berechnet. Der gesamte Energieverbrauch in Kilowattstunden beträgt also:

$$EV_{(\text{VOS1 Soll-Szenario})} = 503,9 \text{ l} \times 10,0 \text{ kWh/l} = 5.039,0 \text{ kWh}$$

¹¹⁸ Meunier et al. (2015)

Somit ergibt sich der NO_x -Ausstoß für das „VOS1 Soll-Szenario“ für den gesamten Betrachtungszeitraum:

$$\text{Ausstoß } \text{NO}_{x(\text{VOS1 Soll-Szenario})} = 5.039,0 \text{ kWh} \times 3,5 \text{ g/kWh} = 17.636,5 \text{ g}$$

Die Berechnung des PM_{10} -Feinstaubausstoßes für das „VOS1 Soll-Szenario“ für den gesamten Betrachtungszeitraum ergibt:

$$\text{Ausstoß } \text{PM}_{10(\text{VOS1 Soll-Szenario})} = 5.039,0 \text{ kWh} \times 0,02 \text{ g/kWh} = 100,8 \text{ g}$$

Das „VOS1 Soll-Szenario“ stößt im Betrachtungszeitraum also 17,6 kg Stickoxide und 0,101 kg Feinstaub aus.

Im nächsten Schritt erfolgt die Berechnung des Luftschadstoffausstoßes des „VOS2 Soll-Szenario“. Das „VOS2 Soll-Szenario“ wurde als leichtes Nutzfahrzeug mit 3,5 t zGG und EURO IV-Klasse bestimmt. Auch hier gelten also die Grenzwerte für Fahrzeuge ab 2.610 kg mit der EURO IV-Klasse von 3,5 g/kWh für NO_x und 0,02 g/kWh für PM_{10} . Der gesamte Energieverbrauch für das VOS im Betrachtungszeitraum von einem Jahr wurde in Kapitel 2.4 mit 2.977,4 Liter Diesel berechnet. Der Energieverbrauch in Kilowattstunden beträgt somit:

$$\text{EV}_{(\text{VOS2 Soll-Szenario})} = 2.977,4 \text{ l} \times 10,0 \text{ kWh/l} = 29.774,0 \text{ kWh}$$

Somit ergibt sich der NO_x -Ausstoß für das „VOS2 Soll-Szenario“ für den Betrachtungszeitraum:

$$\text{Ausstoß } \text{NO}_{x(\text{VOS2 Soll-Szenario})} = 29.774,0 \text{ kWh} \times 3,5 \text{ g/kWh} = 104.209,0 \text{ g}$$

Der PM_{10} -Ausstoß für das VOS2 „Soll-Szenario“ im Betrachtungszeitraum beträgt:

$$\text{Ausstoß } \text{PM}_{10(\text{VOS2 Soll-Szenario})} = 29.774,0 \text{ kWh} \times 0,02 \text{ g/kWh} = 595,5 \text{ g}$$

Das „VOS2 Soll-Szenario“ stößt im Betrachtungszeitraum von einem Jahr also 104,2 kg Stickoxide und 0,596 kg Feinstaub aus.

Wie bereits erwähnt, stößt das „VOS3 Soll-Szenario“ keine Luftschadstoffe während des Fahrbetriebes aus. Der TTW-Ausstoß von Luftschadstoffen für das „VOS3 Soll-Szenario“ beträgt also null. In folgender Tabelle werden die Ergebnisse des Soll-Szenarios zur Übersicht aufgelistet.

Tabelle 12 Ergebnisse Luftschadstoffausstoß Soll-Szenario

	VOS1	VOS2	VOS3
NO _x in kg	17,6	104,2	0
PM ₁₀ in kg	0,101	0,596	0

Quelle: eigene Darstellung

Zusammen addiert ergibt dies einen Ausstoß von 121,8 kg Stickoxiden (NO_x) und 0,697 kg Feinstaub (PM₁₀) für das Soll-Szenario im betrachteten Gebiet im Betrachtungszeitraum von einem Jahr.

7.6 Vorstellung der Ergebnisse

Abschließend werden alle Ergebnisse zusammengefasst und vorgestellt. Dazu erfolgt zunächst eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der THG-Emissionen des Ist-Szenarios mit den THG-Emissionen des Soll-Szenarios. Daraufhin erfolgt die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Luftschadstoffemissionen des Ist-Szenarios mit den Luftschadstoffemissionen des Soll-Szenarios.

7.6.1 Vergleich der Treibhausgasemissionen beider Szenarien

In Kapitel 2 wurde das Ist-Szenario vorgestellt und die Treibhausgasemissionen des Ist-Szenarios berechnet. Dies erfolgte auf Grundlage der DIN EN 16258:2012. Dazu wurde das Ist-Szenario in Teilstrecken unterteilt und das Fahrzeugeinsatz-System (VOS) der Teilstrecke bestimmt. Im Ist-Szenario lag dabei lediglich eine Teilstrecke mit dem zugehörigen „VOS1 Ist-Szenario“ vor. Für dieses Fahrzeugeinsatz-System wurde dann der gesamte Energieverbrauch in Liter Diesel ermittelt und mit dem zugehörigen Well-to-Wheel THG-Emissionsfaktor multipliziert. Für das Ist-Szenario wurde so ein Treibhausgasausstoß von 15,0 Tonnen CO₂-Äquivalenten ermittelt.

Analog erfolgte die Berechnung der Treibhausgasemissionen für das Soll-Szenario. Für das Soll-Szenario lagen dabei drei Teilstrecken mit jeweils einem VOS vor. Auch hier wurde zunächst der gesamte Energieverbrauch jeder Teilstrecke einzeln im gesamten Betrachtungszeitraum ermittelt und mit dem zugehörigen Well-to-Wheel THG-Emissionsfaktor multipliziert. So ergaben sich die THG-Emissionen für jede Teilstrecke für den gesamten Betrachtungszeitraum. Die Ergebnisse wurden dann im letzten Schritt addiert. Für das Soll-Szenario wurde so ein Treibhausgasausstoß von 11,6 Tonnen CO₂-Äquivalenten ermittelt.

Folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Treibhausgasemissionen beider Szenarien gegenübergestellt.

Abbildung 46: THG-Emissionen beider Szenarien in Tonnen

Quelle: eigene Darstellung

Durch die Einführung des Mikrodepotkonzepts für die Paketzustellung auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg lassen sich unter allen getroffenen Annahmen 3,4 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr einsparen. Das bedeutet eine Verminderung der jährlich ausgestoßenen Treibhausgase um 23 % für das betrachtete Gebiet und den betrachteten Zeitraum.

7.6.2 Vergleich der Luftschadstoffemissionen beider Szenarien

Die Emissionen der Luftschadstoffe beider Szenarien wurden überschlägig berechnet. Die relevanten Luftschadstoffe für das primäre Ziel des Immissionsschutzes der Stadt Nürnberg sind Stickoxide (NO_x) und Feinstaub (PM₁₀). Die Berechnung der Luftschadstoffemissionen basierte dabei auf den Abgasgrenzwerten der EURO-Klassen.

Auch hier erfolgte die Berechnung für jedes VOS im Einzelnen, die Ergebnisse wurden im letzten Schritt addiert. Dazu wurden zunächst die ermittelten Energieverbräuche in Liter Diesel der einzelnen VOS herangezogen. Diese mussten in einen Energieverbrauch in Kilowattstunden umgerechnet werden, da die vorgegebenen Grenzwerte für Abgasemissionen in g/kWh angegeben sind. Für das Ist-Szenario wurde somit ein Ausstoß von 162,0 kg NO_x für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr ermittelt. Im Soll-Szenario werden unter den getroffenen Annahmen im Betrachtungszeitraum von einem Jahr 121,8 kg NO_x ausgestoßen.

Folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Stickoxid-Emissionen der beiden Szenarien gegenübergestellt.

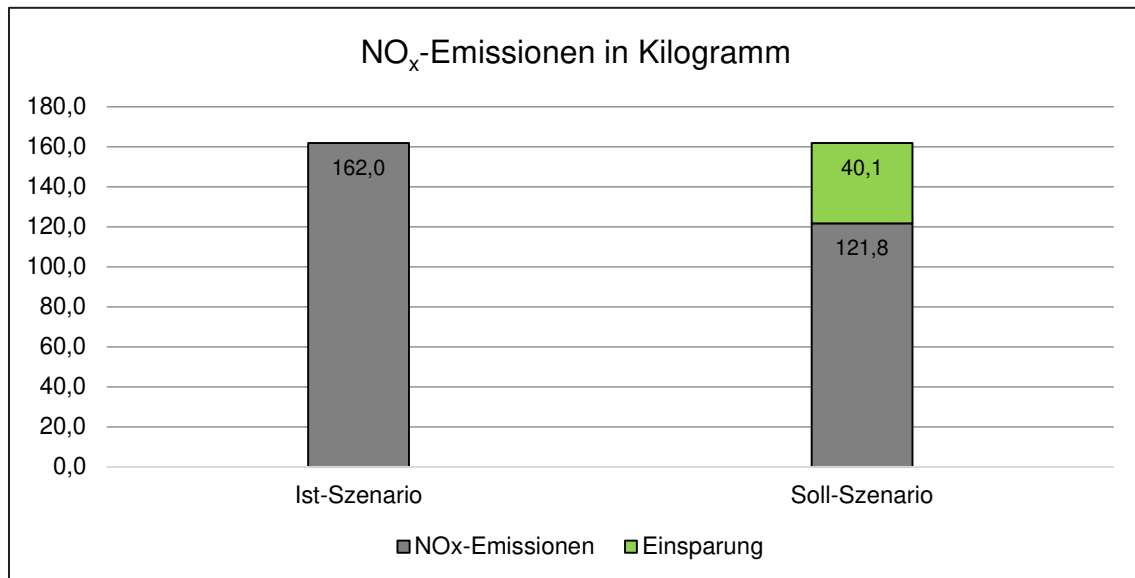


Abbildung 47 NOx-Emissionen beider Szenarien in Kilogramm

Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

Die Ersparnis beträgt unter allen getroffenen Annahmen 40,1 Kilogramm Stickoxide auf dem betrachteten Gebiet im Betrachtungszeitraum von einem Jahr. Das bedeutet, dass durch die Einführung des Mikrodepotkonzepts für die Paketzustellung auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg ein Viertel der ausgestoßenen Stickoxide auf dem betrachteten Gebiet im Jahr eingespart werden können.

Und auch die auf denselben Weg errechnete Einsparung an Feinstaub bewegt sich in diesem Bereich. Folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Feinstaub-Emissionen der beiden Szenarien gegenübergestellt.

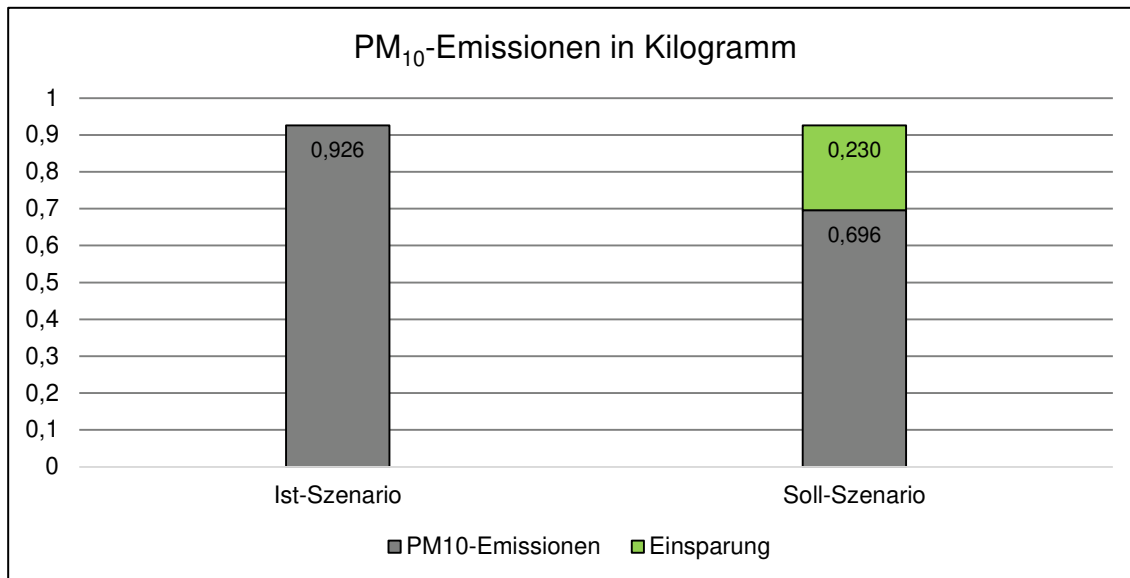


Abbildung 48 PM10-Emissionen beider Szenarien in Kilogramm

Quelle: eigene Darstellung

Für das Ist-Szenario wurde ein PM_{10} -Ausstoß von 0,926 kg PM_{10} berechnet. Der PM_{10} -Ausstoß für das Soll-Szenario beträgt, unter allen getroffenen Annahmen, 0,696 kg PM_{10} . Das ergibt eine Einsparung von 0,230 kg PM_{10} pro Jahr, die durch die Einführung des Mikrodepotkonzepts im betrachteten Gebiet realisiert werden kann. Das bedeutet ebenfalls eine Einsparung von 25% der PM_{10} -Gesamtemissionen auf dem betrachteten Gebiet pro Jahr.

7.7 Ökologische Effizienz und kritische Würdigung der Ergebnisse

Der Ausstoß der Treibhausgase sowie der Luftschadstoffe kann durch die Einführung des Mikrodepotkonzepts deutlich gesenkt werden. In einem Jahr können dabei 23% der Treibhausgasemissionen auf dem betrachteten Gebiet eingespart werden. Die potentielle Einsparung an Luftschadstoffemissionen auf dem betrachteten Gebiet pro Jahr ist sogar noch höher. Sie beträgt sowohl für Stickoxide als auch für Feinstaub 25% pro Jahr. Das Mikrodepotkonzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg ist damit ökologisch effizient.

Die Datengrundlage für die Berechnung der Treibhausgasemissionen sowie der Luftschadstoffemissionen beruht auf Simulationen des jeweiligen Szenarios mit der Simulationssoftware TransIT. Für das Ist-Szenario wurden dabei real zugestellte Sendungsdaten und Tourdaten der Projektpartner verwendet und in TransIT zu optimalen Touren simuliert, unter Beachtung aller rechtlichen Restriktionen. In der Realität kommt es bei der Paketzustellung vor, dass diese Restriktionen nicht immer eingehalten werden. So wurden für das Ist-Szenario methodisch mehr konventionelle Fahrzeuge eingeplant, als real gefahren sind. Für das Soll-Szenario wurden die Touren mit den gleichen Restriktionen

simuliert, so dass methodisch ebenfalls mehr konventionelle Fahrzeuge mit „Resttouren“ zusätzlich zu den Lastenfahrrädern eingeplant wurden, als real benötigt. Dieses Vorgehen wirkt sich negativ auf den Ersetzungsgrad aus und verzerrt auch auf die errechnete absolute Ersparnis, sowohl der Treibhausgas-, als auch der Luftschadstoffemissionen – oder mit anderen Worten formuliert, die reale Einsparung an Luftschadstoffen ist voraussichtlich wesentlich größer als die errechnete, weil in dem Soll-Szenario tendenziell zu viele verbleibende konventionelle Zustellfahrzeuge angesetzt wurden.

Insofern ist die errechnete relative Senkung von Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen im Szenarien-Vergleich ein aussagekräftiger Wert, da in beiden Szenarien methodisch gleich vorgegangen wurde, die errechnete absolute Emissionsreduzierung kann nur eine Aussage zur Größenordnung geben.

Des Weiteren geht insbesondere die errechnete absolute Reduzierung der Luftschadstoffe von den gesetzlich festgelegten Grenzwerten der zugrunde gelegten Schadstoffklassen der konventionellen Fahrzeuge aus und nicht von den realen Schadstoffemissionen.

Die zu hohe Stickoxid- und Feinstaubbelastung ist aktuell wieder Thema in den Nachrichten. Zwar gibt es europaweit geltende Grenzwerte der EURO-Abgasnorm, die auch regelmäßig verschärft werden (siehe Tabelle 3), jedoch stellt sich die Frage, inwiefern diese tatsächlich eingehalten werden. Vorfälle wie der sogenannte Abgasskandal im Jahr 2015 rund um den Automobilhersteller Volkswagen haben die Thematik in die Öffentlichkeit gerückt. Volkswagen setzte eine Software ein, um die Abgaswerte der Diesel-Autos in den USA zu manipulieren. Diese Software erkennt, wenn sich das Auto im Testbetrieb befindet und schaltet den Motor dann in einen Sparmodus, der Ausstoß der betroffenen Dieselfahrzeuge liegt in der Realität wohl zehn bis 40 Mal höher als unter den Testbedingungen.¹¹⁹ Auch in Europa könnten die realen Stickoxidemissionen deutlich höher sein als es die Grenzwerte der Abgasnorm erlauben. Die unabhängige Forschungsgruppe International Council on Clean Transportation (ICCT) führte im Jahr 2014 eine Studie zum realen Emissionsverhalten moderner EURO VI-Dieselfahrzeuge durch. Die Tests erfolgten dabei an 15 Fahrzeugen unter Einsatz des Verfahrens Portable Emissions Measurement Systems (PEMS).¹²⁰ Dabei wurden Daten von 97 Fahrten mit insgesamt mehr als 140 Stunden Fahrzeit und 6.400 Kilometern Fahrstrecke gesammelt.¹²¹ Dabei ergab sich, dass die realen Stickoxidemissionen der getesteten Dieselfahrzeuge durchschnittlich siebenmal höher sind als es die EURO VI zulässt.¹²² Die Ergebnisse der getesteten Fahrzeuge liegen dabei weit

¹¹⁹ Vgl. Gent (2015)

¹²⁰ Vgl. Vicente et al. (2014)

¹²¹ Vgl. ebenda

¹²² Vgl. ebenda

auseinander. Einige Fahrzeuge halten die Grenzwerte der EURO VI unter realen Fahrbedingungen ein, andere hingegen überschreiten diese bis zu einem Faktor von 25.¹²³ Auch das Umweltbundesamt kam durch eine Untersuchung im April 2017 zu dem Ergebnis, dass EURO VI-Diesel-PKW deutlich mehr NO_x ausstoßen als die Abgasnorm zulässt. Die NO_x-Emissionen von modernen, aktuell zugelassenen Euro-VI-Diesel-Pkw lagen dabei im Mittel bei 507 mg NO_x/km, was eine Überschreitung des Grenzwertes um ein fünffaches bedeutet.¹²⁴

Insofern kann die vorliegende Berechnung der Schadstoffemissionen in absoluten Zahlen nur eine Näherung darstellen, interessant ist die im Szenarien-Vergleich nachgewiesene relative Emissionsreduzierung von Feinstaub und Stickoxiden.

Die europäischen Grenzwerte für Feinstaub betragen 50 µg/m³ als Tagesgrenzwert, welcher 35 Mal im Jahr überschritten werden darf, und 40 µg/m³ als zulässiger Jahresmittelwert.¹²⁵

In Nürnberg wurde im Jahr 2015 der Tagesgrenzwert für PM₁₀ an der Messstation Nürnberg / Von-der-Tann-Straße (Stationscode DEBY120) 21 Mal überschritten, der Jahresmittelwert lag bei 26 µg/m³.¹²⁶ Die endgültigen Daten für das Jahr 2016 liegen noch nicht vor. Jedoch zeigen die aktuellen Messwerte aus vorläufigen, kontinuierlich erhobenen Daten, dass zum Stand des 05.06.2017 der Tagesgrenzwert von 50 µg/m³ an der Messstation Nürnberg/ Von-der-Tann-Straße bereits 22 Mal im Jahr 2017 überschritten wurde.¹²⁷ Zudem gilt für Feinstaub, dass die Belastung ohnehin so gering wie möglich gehalten werden soll, da bereits jede noch so geringe Belastung schädlich ist.

Ebenfalls europaweit geltende Grenzwerte gibt es auch für Stickstoffdioxid, wie den 1-Stunden-Grenzwert von 200 µg/m³, der nicht öfter als 18 Mal im Kalenderjahr überschritten werden darf, und einen Jahresgrenzwert von 40 µg/m³.¹²⁸ An der Messstation Nürnberg/ Von-der-Tann-Straße (Stationscode DEBY120) lag der Jahresmittelwert der Stickstoffdioxidbelastung des Jahres 2015 um acht µg über dem Jahresgrenzwert, bei 48 µg/m³.¹²⁹ Der 1-Stunden-Grenzwert von 200 µg/m³ wurde allerdings nicht überschritten.¹³⁰ Dabei kommt die Stadt Nürnberg derzeit noch ohne Umweltzone aus.

¹²³ Vgl. ebenda

¹²⁴ Vgl. Umweltbundesamt (Hg.) (2017)

¹²⁵ Vgl. Meunier et al. (2016e)

¹²⁶ Vgl. Meunier et al. (2016b), S. 4

¹²⁷ Vgl. Meunier et al. (2017a)

¹²⁸ Vgl. Meunier et al. (2016e)

¹²⁹ Vgl. Meunier et al. (2016f), S. 5

¹³⁰ Vgl. ebenda

Dass die Einrichtung einer Umweltzone und dem damit einhergehenden Verbot für besonders stark schadstoffemittierende Fahrzeuge in dieser Zone allerdings nicht zwangsläufig zu einer besseren Luftqualität führt, kann man am Beispiel der Stadt Stuttgart erkennen. Die Messstelle Stuttgart Am Neckartor (Stationscode DEBW118) liegt innerhalb der Umweltzone von Stuttgart.¹³¹ An dieser Messstelle gab es 2015 deutschlandweit die höchsten Überschreitungen der erlaubten Grenzwerte, sowohl an Feinstaub als auch an Stickoxiden. Der Tagesgrenzwert für Feinstaub wurde 78 Mal anstelle der erlaubten 35 Mal überschritten.¹³² Der 1-Stunden-Grenzwert für Stickstoffdioxid wurde 61 Mal anstelle der erlaubten 18 Mal überschritten, der Jahresmittelwert lag bei $87 \mu\text{g}/\text{m}^3$.¹³³ So kommen immer wieder Fahrverbote für sämtliche Dieselfahrzeuge, also auch Fahrzeuge mit grüner Europlakette, ins Gespräch.

Trotz weiterer Verschärfungen der Abgasgrenzwerte und eingerichteten Umweltzonen besteht die Problematik der Luftschadstoffbelastung also weiterhin. Daher müssen auch andere Lösungen als Stadtlogistik mit Verbrennungsmotoren in Betracht gezogen werden – das erfolgreiche Mikro-Depot-Konzept in Nürnberg ist ein Baustein im nachhaltigen urbanen Logistikmix der Zukunft.

.

¹³¹ Vgl. Amt für öffentliche Ordnung, Stadt Stuttgart (o.J.)

¹³² Vgl. Meunier et al. (2016b), S. 3

¹³³ Vgl. Meunier et al. (2016f), S. 3

8 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass das Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg erfolgreich war. Es wurden die Nachweise für die drei Ziele des Pilotprojektes – ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeit – erbracht. Alle Komponenten der Arbeitspakete konnten erfüllt werden und die logistische Effizienz ist noch höher ausgefallen, als zu Beginn des Projektes erhofft. So soll an dieser Stelle nochmals kurz auf die Ergebnisse eingegangen werden. Aus logistischer Sicht konnte bewiesen werden, dass mit der entsprechenden methodischen Herangehensweise, die Effizienz der konventionellen Zustellung durch das Mikro-Depot-Konzept sogar gesteigert werden kann. Hierbei können die volumenabhängigen Nachteile des Lastenfahrrades gegenüber dem konventionellen Transporter durch Vorteile der Wendigkeit, Durchfahren von Einbahnstraßen in beiden Richtungen, Wegfallen der Parkplatzsuche, kürzere Wege zum Kunden usw., die gerade im urbanen Umfeld zur Geltung kommen, wettgemacht werden. Deswegen kann derzeit in beiden Pilotgebieten ein Erbringen der logistischen Leistung durch einen annähernden 1:1 Ersatz von Lastenfahrrad zum konventionellen Transporter realisiert werden. Zusätzlich steigt die Anzahl an Paketzustellungen durch einen stetigen Anstieg der Onlinebestellungen. Dabei unterliegen die Pakete dem Trend, vom Volumen her kleiner zu werden, was wiederum ein enormes Potenzial an dem Einsatz von Lastenrädern in sich trägt, da gerade diese kleinen leichten B2C-Pakete ideal für die Zustellung via Lastenfahrrad sind. Insgesamt können nach internen Berechnungen etwa 30% der gesamten Sendungen der KEP-Branche in urbanen Gebieten ab 100.000 Einwohnern mit Lastenfahrrädern zugestellt werden – Tendenz steigend. Dabei muss beachtet werden, dass bei diesen Berechnungen nur die ökonomisch effizienten Pakete enthalten sind – prinzipiell könnten noch weitaus mehr Pakete durch Lastenfahrräder transportiert werden, was aber wirtschaftlich und im Sinne eines guten Services der KEP-Unternehmen nicht ratsam wäre. Hingegen muss noch ein anderer Aspekt Erwähnung finden und zwar, dass sich der dreißigprozentige Anteil über das gesamte Stadtgebiet errechnet, was bedeutet, dass gerade in Stadtzentren und anderen urbanen Ballungsräume die Prozentzahl weit höher ist.

Betrachtet man die ökonomische Bilanz des Mikro-Depot-Konzeptes, so müssen die Kosten für das Mikrodepot, die Lastenfahrräder und den zusätzlichen Sendungsumschlag durch die effektive Zustellung und Zeitersparnis sowie die eingesparten Kosten für konventionelle Zustellfahrzeuge aufgewogen und übertroffen werden. Dies gelingt in den untersuchten Gebieten, sodass der Nachweis der ökonomischen Effizienz gegeben ist. So konnte in den ausgewählten Gebieten davon ausgegangen werden, dass die Einsparung an Kosten in den Simulationsrechnungen zwischen 10-20% pro Paket liegt. Erwähnt werden muss, dass die

real erzielte Kosteneinsparung geringer ist, beispielsweise durch einige Ausfälle der Fahrzeuge und die Wartungskosten, die aufgrund der nur bedingten Zuverlässigkeit der verwendeten Lastenfahrräder im harten logistischen Alltagsbetrieb höher sind als angenommen. So sind die theoretisch errechneten Einsparungen mit Einsatz eines derzeit noch nicht marktverfügbaren Lastenfahrrads, welches explizit auf die Anforderungen der KEP-Branche hin entwickelt worden ist, und einem reibungslosen Ablauf des Mikro-Depot-Konzepts, aber als sehr realistisch einzuschätzen. Genaue Werte und ökonomische Vorteile können indes aufgrund von firmeninternen Verrechnungssätzen und individuellen Systempartnerverträgen von KEP-Unternehmen zu KEP-Unternehmen unterschiedlich ausfallen und dürfen aus Datenschutzgründen nicht veröffentlicht werden.

Neben der logistischen und wirtschaftlichen Komponente wurden auch die ökologischen Ziele erreicht. So werden die Zustellfahrten ins Mikrodepot, die durch den zusätzlichen Umschlag entstehen, durch die lokal emissionsfreie Zustellung der Lastenfahrräder ausgeglichen und übertroffen. Im Vergleich der Systeme leistet das Mikro-Depot-Konzept eine Senkung von Treibhausgasemissionen (minus 23%) und Luftschadstoffemissionen (minus 25%) in den umgestellten Gebieten. So stellt das Mikro-Depot-Konzept eine sehr effiziente Möglichkeit dar, ökologische Verbesserungen zu erzielen. Gerade in der Diskussion um Einfahrverbote in die Innenstädte, kann das Mikro-Depot-Konzept in allen Städten und Kommunen einen positiven Beitrag zur Senkung der Gesamtbelastung leisten.

Als soziale Ziele des Projekts sollten zum einen die gesteigerte Attraktivität des Einzelhandels in den Nürnberger Fußgängerzonen durch ganztägige Belieferung ohne Gefährdung von Fußgängern durch motorisierten Lieferverkehr, zum anderen auch die Steigerung der Lebensqualität in Stadtquartieren durch die Abnahme von motorisiertem Lieferverkehr sowie eine Reduzierung der Verkehrsgefährdung durch Parken in zweiter Reihe erreicht werden. Dabei sollten keine Flächen des öffentlichen Raumes für Mikrodepots genutzt werden und somit ein attraktives Stadtbild erhalten bleiben. Diese Ziele konnten uneingeschränkt erreicht werden. Auch kurzfristig benötigte Ware kann ganztägig in Fußgängerzonen angeliefert werden und die Besucher der Innenstädte haben beim Einkaufsbummel keine störenden Lieferfahrzeuge, die das Erlebnis Einkaufen negativ beeinflussen. In den Wohngebieten der Südstadt konnte die Lebensqualität ebenfalls erhöht werden. Durch den nahezu 1:1 - Ersatz von insgesamt sieben konventionellen Fahrzeugen durch acht Lastenfahrräder konnte ein Beitrag zur Verminderung des motorisierten Lieferverkehrs in Nürnberg geleistet werden, womit beispielsweise auch die Reduzierung von dem in „Zweiter-Reihe-Parken“ verbunden ist; durch die Nutzung von Bestandsimmobilien als Mikrodepot blieb das Stadtbild unverändert.

Literaturverzeichnis

Amt für Stadtforschung und Statistik, Stadt Nürnberg (Hg.) (2016): Innergebietliche Strukturdaten 2016 Nürnberg.

Appel et al. (2013): Appel, Wolfgang; Brähler, Hermann; Breuer, Stefan; Dahlhaus, Ulrich; Esch, Thomas; Hoepke, Erich; Kopp, Stephan; Rhein, Bernd: Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten. 7., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden: Imprint Vieweg+Teubner Verlag (ATZ / MTZ-Fachbuch).

Bogdanski (2015): Bogdanski, Ralf: Nachhaltige Stadtlogistik durch Kurier-, Express-, Paketdienste. Studie über die Möglichkeiten und notwendigen Rahmenbedingungen am Beispiel der Städte Nürnberg und Frankfurt am Main. Hg. v. Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V. Berlin. Online verfügbar unter http://biek.de/tl_files/biek/downloads/papiere/BIEK_Nachhaltigkeitsstudie_Innenstadtlogistik.pdf, zuletzt geprüft am 06.06.2017.

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2002), Verordnung über die EG-Genehmigung für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger sowie für Systeme, Bauteile und selbstständige technische Einheiten für diese Fahrzeuge (EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung - EG-FGV), Outlook Verlag GmbH, 1. Auflage, Paderborn, 2002

Carla Cargo Engineering (2016): Online verfügbar unter http://www.carlacargo.de/wp-content/uploads/2016/01/CarlaCargo_Flyer_1_2016.pdf zuletzt geprüft (17.04.2018).

Cyclopolitain 3.0 urban mobility (2014): online abrufbar unter <http://www.cyclopolitain.com/buy-your-professional-tricycle/> und <http://www.cyclopolitain.com/pdf/achat/Cyclocargo-CG4-EN.pdf> zuletzt geprüft am (20.06.2016)

Deutsches Institut für Normung e.V. (2013): DIN EN 16258:2012: Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr). 2013

EAFO (Hg.) (2017): Fleet table PEV. European Alternative Fuels Observatory. Online verfügbar unter http://www.eafo.eu/eu#eu_fleet_pev_block_anchor, zuletzt aktualisiert am März 2017, zuletzt geprüft am 10.06.2017.

El Ciclo (2016): Online abrufbar unter http://cargoe-bike.com/portfolio_page/scoiattolo/ (18.06.2016), zuletzt überprüft am 17.04.2018

Gent (2015): Gent, Martin: Sauber nur beim Schadstofftest. Fragen und Antworten zum VW-Skandal. Hg. v. Westdeutscher Rundfunk Köln. Anstalt des öffentlichen Rechts. Köln. Online verfügbar unter <http://www1.wdr.de/wissen/vw-manipulation-usa-100.html>, zuletzt aktualisiert am 21.09.2015, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

IPCC (Hg.) (2013): IPCC Factsheet: What is the IPCC? Hg. v. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Genf. Online verfügbar unter http://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/factsheets/FS_what_ipcc.pdf, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Klöpffer/Grahl (2009): Klöpffer, Walter; Grahl, Birgit: Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: WILEY-VCH. bevoelkerung-in-deutschland-und-weltweit/, zuletzt geprüft am 30.05.2017

Kranke et al. (2011): Kranke, Andre; Schmied, Martin; Schön, Andrea Dorothea: CO₂-Berechnung in der Logistik. Datenquellen, Formeln, Standards. 1. Aufl., Stand August 2011. München: Vogel.

Steinbacher/Henni (2017): Steinbacher, Moritz; Henni, Rüdiger Bald Fahrverbot für Dieselfahrzeuge? Hg. v. Bayerischer Rundfunk. Anstalt des öffentlichen Rechts. München. Online verfügbar unter <http://www.br.de/nachrichten/oberbayern/inhalt/diesel-fahrzeuge-muenchen-verbannen-100.html>, zuletzt aktualisiert am 14.06.2017, zuletzt geprüft am 15.06.2017.

Meunier et al. (2013a): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Warum ist Feinstaub schädlich für den Menschen? Hg. v. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/warum-ist-feinstaub-schaedlich-fuer-den-menschen>, zuletzt geprüft am 30.05.2017.

Meunier et al. (2013b): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Wie wirken sich Stickstoffoxide auf die menschliche Gesundheit aus? Hg. v. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-wirken-sich-stickstoffoxide-auf-die-menschliche>, zuletzt geprüft am 30.05.2017.

Meunier et al. (2014): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Klima und Treibhauseffekt. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/klima-treibhauseffekt#textpart-1>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2014, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Meunier et al. (2015): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Abgasgrenzwerte für LKW und Busse. Fahrzeuge ab 2.610 kg; Grenzwerte für die Typ- und Serienprüfungen. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/420/bilder/dateien/5_tab_grenzwerte-lkw.pdf, zuletzt geprüft am 09.06.2017.

Meunier et al. (2016a): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Die Treibhausgase. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Meunier et al. (2016b): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Feinstaub (PM₁₀) im Jahr 2015. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/358/dokumente/pm10_2015_1.pdf, zuletzt aktualisiert am 13.10.2016, zuletzt geprüft am 09.06.2017.

Meunier et al. (2016c): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Grenzwerte für Schadstoffemissionen von PKW. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses

vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/dateien/tabelle_grenzwerte_fuer_schadstoffemissionen_von_pkw.pdf, zuletzt geprüft am 06.06.2017.

Meunier et al. (2016d): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Luftschadstoffe im Überblick: Stickstoffoxide. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/stickstoffoxide>, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Meunier et al. (2016e): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Luftschadstoffe im Überblick: Feinstaub. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub>, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Meunier et al. (2016f): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Stickstoffdioxid (NO₂) im Jahr 2015. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/358/dokumente/no2_2015_1.pdf, zuletzt aktualisiert am 22.09.2016, zuletzt geprüft am 09.06.2017.

Meunier et al. (2017a): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Aktuelle Luftdaten. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/aktuelle-luftdaten#/transgressions?_k=v3zwyu, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Meunier et al. (2017b): Meunier, Corinne; Schoen, Laura; Zinsius, Christoph: Treibhauspotentiale (Global Warming Potential, GWP) ausgewählter Verbindungen und deren Gemische gemäß Viertem Sachstandsbericht des IPCC bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren. Hg. v. Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), dieses vertreten durch die Präsidentin des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/treibhauspotentiale_ausgewaehlter_verbindungen_und_deren_gemische_2017_05.pdf, zuletzt aktualisiert am Mai 2017, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Novak (1999): Novak, Bernhard: Tourenplanung in mittelständischen Unternehmen, 1. Auflage, Wiesbaden: Springer Gabler, 1999.

Ohrt (2008): Ohrt, Claudius: Tourenplanung im Straßengüterverkehr, 1. Auflage, Wiesbaden: Gabler, 2008.

Pedalpower Berlin (2016): online abrufbar unter https://pedalpowerpreview.files.wordpress.com/2014/09/preisliste_lastenraeder.pdf zuletzt überprüft am 20.06.2016.

Radkutsche GmbH (Hg.) (2013): MUSKETIER - einer für alles! Online verfügbar unter <http://www.radkutsche.de/musketiere-353.html>, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

Rat der Europäischen Gemeinschaft (1992): Richtlinie 92/21/EWG des Rates vom 31. März 1992 über Massen und Abmessungen von Kraftfahrzeugen der Klasse M1. Richtlinie 92/21/EWG, vom 31.03.1992, S. 3. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31992L0021&from=DE>, zuletzt geprüft am 30.05.2017.

Simulations online (2013): <http://simulations.at/wp/index.php/2013/01/vorteile-von-simulationen/>, zuletzt geprüft am 06.04.2016.

Tagesspiegel Online (2016): <http://www.tagesspiegel.de/mobil/fahrrad/lastenraeder-sind-die-neuen-familienkutschen-kombis-zum-strampeln/8568222.html> (17.06.2016).

Umweltbundesamt (Hg.) (2017): Stickoxid-Belastung durch Diesel-Pkw noch höher als gedacht. Auch Euro-6-Diesel stoßen sechs Mal mehr Stickstoffoxide aus als erlaubt. Dessau-Roßlau. Ittershagen, Martin, Tel. +49-340-2103-2122, E-Mail: martin.ittershagen@uba.de. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/stickoxid-belastung-durch-diesel-pkw-noch-hoehler>, zuletzt geprüft am 16.06.2017.

Vicente et al. (2014): Reale Emissionen moderner Diesel-Autos sieben Mal höher als gesetzlich erlaubt. Berlin. Mock, Peter, peter@theicct.org. Online verfügbar unter <http://www.theicct.org/news/pressemitteilung-reale-emissionen-moderner-diesel-autos-sieben-mal-h%C3%B6her-als-gesetzlich-erlaubt>, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

UPS (2014): UPS Corporate Sustainability Report 2013. Bericht 2014.

Veloform (2015): Online abrufbar unter <http://www.veloform.com/de/produkte/velotaxi/velotaxi-deliverycruiser> zuletzt geprüft am 20.06.2016.

Vrachtfiets Amsterdam (2016): online abrufbar unter <http://vrachtfiets.nl/product/cargo/> zuletzt geprüft am (17.04.2018).