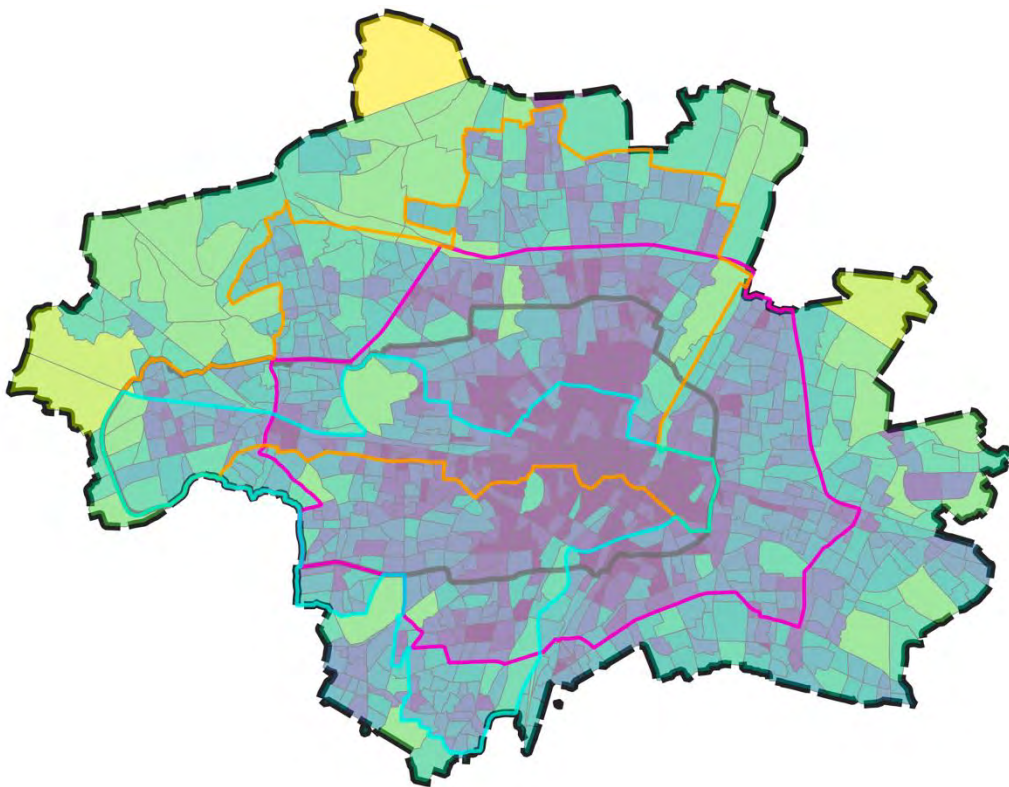


Betriebskonzeption und Flottensteuerung von ODM-Angeboten in München

- Zusammenfassung -



Betriebskonzeption und Flottensteuerung von ODM (On-Demand-Mobilität) - Angeboten in München

1	Management-Summary.....	3
1.1	Grundlagen und Eingangsparameter.....	3
1.1.1	On-Demand: Eine neue Säule des ÖPNV, die den "Umweltverbund" erweitert.....	3
1.1.2	Szenarien und Bediengebiete.....	4
1.1.3	Service-Parameter.....	5
1.1.4	Tarifmodelle.....	5
1.2	Ergebnisse und Empfehlungen.....	6
1.2.1	Vergleich der Szenarien.....	6
1.2.2	Tarifgestaltung und Preis-Sensitivität.....	7
1.2.3	Verlauf der Nachfrage im Tages- und Wochengang.....	7
1.2.4	Verkehrliche Wirkungen.....	8
1.2.5	Verzahnung mit dem Linien-ÖPNV.....	9
1.2.6	Fahrzeuge.....	10
1.2.7	Barrierefreiheit.....	10
1.3	Ausblick:.....	11
2	Einleitung.....	12
2.1	Bediengebiete / Szenarien.....	13
2.1.1	Bediengebiet Südwest.....	14
2.1.2	Bediengebiet Nordwest.....	15
2.1.3	Bediengebiet Mittlerer Westen.....	15
2.1.4	Bediengebiet Herzstück.....	15
2.1.5	Stadtweit autonomes Bediengebiet.....	15
2.2	Methodik.....	15
3	Betriebsparameter.....	18
3.1	Eingangsparameter.....	18
3.1.1	Physische und virtuelle Infrastruktur.....	18
3.1.2	Tarife.....	20
3.1.3	Weitere Modellannahmen.....	21
3.2	Modellableitungen.....	21

3.2.1	Szenarien unter Anwendung von Tarif 1	21
3.2.2	Szenarien unter Anwendung von Tarif 2.....	28
3.2.3	Preis-Sensitivitätsanalyse Herzstück	28
3.2.4	Variante Szenarien von Tarif 1a/b	29
3.2.5	Stadtweit autonome Szenarien	30
4	Konzeptionelle Anforderungen & Service Elemente.....	32
4.1	Kundenzentrierte Service Elemente	32
4.2	Operationszentrierte Service Elemente.....	32
4.3	Ein kurzer Blick in die Zukunft: Zusätzliche Anforderungen an autonome Flotten	34
4.3.1	Volle Effizienzpotentiale heben	34
4.3.2	Sicherheit & Regulatorik	35
4.3.3	Fahrernebenaufgaben & Grenzfälle	35
4.3.4	Kund:inneninteraktion	36
5	Anlagen.....	I

1 Management-Summary

1.1 Grundlagen und Eingangsparameter

1.1.1 On-Demand: Eine neue Säule des ÖPNV, die den "Umweltverbund" erweitert

Mit On-Demand-Mobilität (ODM) gelingt es, den ÖPNV durch ein neues Angebotsselement zu erweitern, das mit seinen spezifischen Produkteigenschaften wie Komfort, Verfügbarkeit und Flexibilität den klassischen Linienverkehr ergänzt und auf diese Weise die Attraktivität des Gesamtsystems ÖPNV stärken kann.

Aus diesem Grund sind in den letzten Jahren daher alleine in Deutschland über 80 neuartige On-Demand-Angebote eingeführt worden, i.d.R. handelt es sich dabei aber um eher kleine Flotten. Auch in München wurde durch die MVG bereits ab dem Jahr 2018 bis zur Coronapandemie 2020 ein Feldversuch unter dem Namen "IsarTiger" durchgeführt, um Erfahrungen im Realbetrieb zu sammeln. Der private Anbieter Clevershuttle operierte von 2016 bis 2020 eigenwirtschaftlich in München und zog sich anschließend zurück. Es stellt sich daher die Frage, wie der Einstieg in ein skaliertes, dauerhaftes Angebot für München (Stadt und Region) gelingen kann und ob sich für einen solchen Service ein sinnvolles Nutzen-Kosten-Verhältnis ergibt.

ODM kann eine wichtige Rolle für eine Verkehrswende weg vom motorisierten Individualverkehr spielen (MIV). Dabei geht es weniger um direkte Verlagerungseffekte und die Menge der mit ODM durchgeführten Fahrten – ODM wird mengenmäßig im Vergleich zum Linien-ÖPNV immer eine untergeordnete Rolle spielen – sondern vielmehr um die Verbesserung der Systemqualität: ODM komplettiert mit seinen spezifischen Produkteigenschaften die Angebotspalette des "Umweltverbundes" (ÖPNV, Rad, Fuß, CarSharing) und macht diesen als Ganzes attraktiver. ODM sichert die Mobilität auch dort, wo heute Angebote fehlen und erhöht damit auch die Akzeptanz für Maßnahmen der Verkehrswende. Er trägt spürbar dazu bei, den Besitz eines eigenen PKW überflüssig zu machen und bietet auch für Autofahrende eine sehr attraktive Alternative.

Vor diesem Hintergrund sollte ODM gerade in einer vom Linien-ÖPNV bereits hervorragend erschlossenen Stadt wie München nicht darauf reduziert werden, lediglich einzelne Angebotslücken des Linienverkehrs in den Randbereichen oder Nachtstunden zu schließen. Stattdessen sollte ODM über den Linienverkehr mit Bussen und Bahnen hinaus als zusätzliche Angebotssäule des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) verstanden werden. Diese Verzahnung von Linien- und On-Demand-Verkehr ermöglicht sowohl eine umfassende räumliche und zeitliche Verfügbarkeit als auch eine neue Qualität und Resilienz des öffentlichen Mobilitätsangebotes in München: Flächig und für alle Verbindungen steht ein hoch verfügbares und attraktives ÖPNV-Angebot zur Verfügung!

Der Aufbau eines solch umfassenden ODM-Angebotes kann, insbesondere auch angesichts der sehr hohen spezifischen Kosten, nur in Stufen erfolgen. So lassen sich sowohl auf der Anbieterseite (Politik, Verwaltung, Verkehrsunternehmen) als auch auf Seiten der Fahrgäste Erfahrungen mit dem System sammeln, und es kann besser auf Nutzer:innenverhalten, das spezifisch für München ist, reagiert werden.

Perspektivisch sind erhebliche Kostensenkungen und Effizienzverbesserungen durch den Betrieb autonomer (fahrerlos operierender) Fahrzeuge zu erwarten, so dass der Zuschussbedarf verringert und damit die Chancen für die anzustrebende Skalierung von ODM auf das gesamte Stadtgebiet und darüber hinaus deutlich verbessert werden kann. Es ist davon auszugehen, dass ein solcher Übergang zum autonomen Betrieb der ODM-Fahrzeuge noch in der zweiten Hälfte dieses Jahrzehntes erfolgen kann und somit durchaus "greifbar" ist. Daher wurde neben den räumlich auf Teilgebiete begrenzten "konventionellen" Einstiegszenarien auch ein stadtweites Perspektiv-Szenario mit autonomen Fahrzeugen betrachtet.

1.1.2 Szenarien und Bedienegebiete

Für den Einstieg in ein substanzielles ODM-Angebot wurden geeignete Szenarien in verschiedenen Teilräumen entwickelt und vergleichend untersucht. Wichtig war hier, dass bereits diese Einstiegsszenarien – auch in der Perspektive “Verkehrswende” - eine ausreichende Größe und einen hohen eigenen Verkehrswert aufweisen müssen. Denn ODM sollte nicht nur als “Lückenfüller” und Zu- oder Abbringer zum Linienverkehr fungieren, sondern sowohl relevante Quellen als auch Ziele bedienen, so dass den Kund:innen bei möglichst vielen Fahrten nicht nur die intermodale Kombination mit dem Linienverkehr, sondern auch komplette Direktverbindungen mit dem ODM angeboten werden können. Wichtige Anwendungsfälle für solche ODM-Direktfahrten sind die Wege, bei denen der Linienverkehr kein hinreichend attraktives Angebot bietet, wie z. B. bestimmte Tangentialverkehre, Fahrten im Quartier, Freizeitverkehre, Verbindungen in den Nachtstunden oder Fahrten für Menschen mit eingeschränkter Mobilität, denen das Umsteigen schwerfällt. Die Erfahrung zeigt, dass diese Direktfahrten zumindest bei urbanen ODM-Systemen auch den klaren Schwerpunkt der Nachfrage bilden.

Für die Effizienz des Angebotes, d.h. eine möglichst gemeinsame Beförderung von Fahrgästen mit unterschiedlichen Start- und Zielpunkten (Pooling) bei gleichzeitig geringem Leerfahrtenanteil, sind Bedienegebiete mit einer höheren Nachfragedichte wichtig. Die Effizienz von ODM in verdichteten Stadtteilen ist abzuwägen mit dem Wunsch, den Linienverkehr insbesondere in den dispersen Bereichen durch ODM zu ergänzen. Grundsätzlich scheint es sinnvoll, ODM in Stadtrandgebieten anzubieten. Aufgrund der geringeren Nachfragedichte bleibt die Pooling-Rate in solchen Gebieten aber niedrig.

Die Bedienegebiete aller Szenarien umfassen deshalb bewusst auch den Innenstadtbereich und konzentrieren sich nicht ausschließlich auf Randgebiete. Nur so wird ein effizienter, wirtschaftlicher und wirkungsvoller Betrieb möglich sein. Einer unerwünschten Konkurrenz zum Linienverkehr kann dabei insbesondere durch die Preisgestaltung entgegengewirkt werden.

Weitere Ausgangspunkte für die Szenarien waren die Einbeziehung des Entwicklungsgebietes Freiham sowie die Vorbereitung der angestrebten Ausweitung in das Umland, so dass die Bedienegebiete bis zur Stadtgrenze reichen. Hieraus ergaben sich ausgehend von der Innenstadt drei “Tortenstücke”:

- Nordwest
- Mittlerer Westen
- Südwest

Diese wurden durch ein weiteres Szenario “Herzstück” ergänzt, dass sich zu Gunsten einer maximalen Nachfragedichte ausgehend von der Innenstadt auf den Kernbereich konzentriert und bewusst auf eine Ausdehnung bis an den Stadtrand verzichtet.

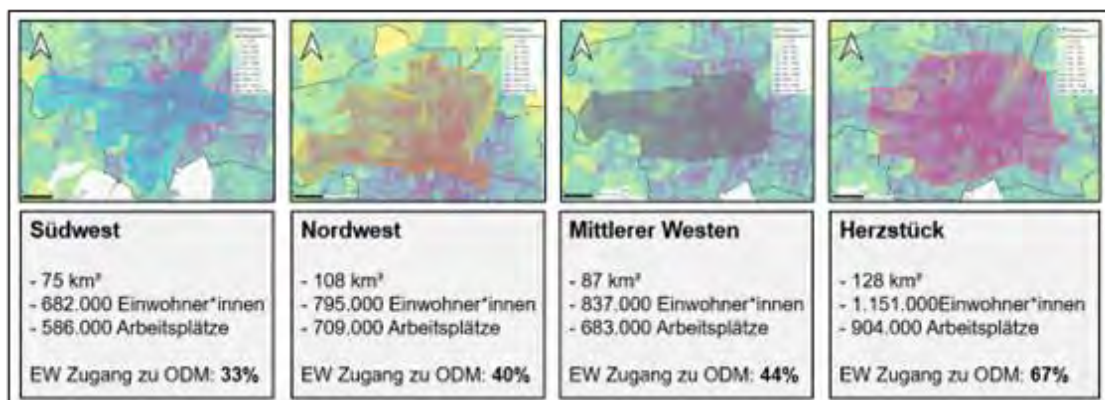


Abbildung 1: Übersicht der untersuchten Szenarien

Perspektivisch wurde zusätzlich eine Bedienung der Gesamtstadt durch ein skaliertes, autonomes (fahrerloses) ODM-System betrachtet.

1.1.3 Service-Parameter

Im Hinblick auf eine gute Vergleichbarkeit wurden in allen Szenarien gleiche Service-Parameter zugrunde gelegt:

- Ein- und Ausstieg an sog. "virtuellen Haltestellen", d. h. nicht an der Haustür, sondern nur an geeigneten Punkten im Straßennetz. Diese finden sich in hoher Dichte im gesamten Bediengebiet, so dass die Zugangswege nicht länger als 350 m sind. Im Durchschnitt betragen sie 230m.
- Keine Bedienung von Fahrten unter 1 km Distanz
- Wartezeiten von maximal 30 min (i.d.R. deutlich kürzer)
- Hohe Bedienquote (größer als 90%), d. h. Angebot (Flottengröße) und Nachfrage müssen so zueinander passen, dass für maximal 10% der Fahrthanfragen kein passendes ODM-Angebot bereitgestellt werden kann.
- Bedienzeiten ca. 05 – 01 Uhr (Sonntag bis 00 Uhr), Freitag und Samstag rund um die Uhr.

1.1.4 Tarifmodelle

Der Tarif ist ein elementares Steuerungsinstrument für ODM, das nicht nur die Wirtschaftlichkeit, sondern auch Effizienz und Servicequalität sowie die verkehrlichen Wirkungen beeinflusst. Höhe und Struktur des Tarifes sind insbesondere bei einem Angebot im urbanen Raum entscheidend, da den Nutzenden fast immer eine Alternative zum ODM zur Verfügung steht und diese folglich sehr preissensibel reagieren. Anders als z. B. beim konventionellen ÖPNV ist hier der Anteil der gefangenen Kund:innen ("Captive Rider") gering. Die Tarifgestaltung hat also großen Einfluss darauf, von welchem alternativen Verkehrsmittel die Kund:innen kommen bzw. welche Alternativen sie ansonsten nutzen würden. Dabei ist der Fahrpreis, manifestiert durch das Tarifmodell, auch eine der wichtigsten Stellgrößen, um die Nachfrage sowohl zeitlich als auch räumlich nach an die jeweils verfügbare Flottenkapazität anzupassen. Sind Preise zu niedrig, steigt die Nachfrage stark an und die vorhandenen Flottenkapazitäten können die Fahrthanfragen nicht mehr aufnehmen. Die daraus resultierenden hohen Ablehnungsquoten können zum Verlust von Kund:innen führen, die unter Umständen erst wieder reaktiviert werden müssen.

ODM-Tarife setzen sich i.d.R. aus einem Pricing-Grundmodell (z. B. Grundpreis plus km-Preis), einer Dynamik (z. B. Zuschläge in Spitzenzeiten) und Rabatten (z. B. für Besitzer:innen von ÖPNV-Abos) zusammen. Nach oben wird die Preisbildung sinnvollerweise durch den Preis für die Nutzung eines Taxis und nach unten durch den Preis eines ÖPNV-Tickets begrenzt.

Grundsätzlich basieren die simulierten Tarifmodelle auf der Kombination von Grundpreis und distanzbasiertem Leistungspreis. Um eine gute Ergänzungsfunktion des ODM-Angebotes zum Linienverkehr zu gewährleisten und eine unerwünschte Kannibalisierung zu vermeiden, wird dieser Leistungspreis in Abhängigkeit von der Qualität der ÖPNV-Verbindung im Linienverkehr variiert. Besteht zum Ziel

- eine gute Linienverkehrsverbindung, wird der Leistungspreis um 50% erhöht (Faktor 1,5)
- keine gute Linienverkehrsverbindung, wird der Leistungspreis um 50% gesenkt (Faktor 0,5)

Ferner wird in den Wochenendnächten generell ein um 50% erhöhter Leistungspreis berechnet, um die erheblichen Nachfragespitzen zu dämpfen.

Die Umsetzung der Berechnung erfolgte in zwei Varianten (Tarif 1 und Tarif 2), die sich bezüglich der Gewährung von Rabatten für ÖPNV-Kund:innen unterscheiden. Tarif 1 gewährt einen Rabatt für Inhaber:innen von Zeitkarten, bei Tarif 2 entfällt der Grundpreis für alle Personen, die über ein gültiges ÖPNV-Ticket verfügen.

Für den Tarif 1 wurden ergänzend zwei Ansätze für eine stärkere Dynamisierung des Preises untersucht, um die Nachfrage noch besser mit den Kapazitäten des ODM-Angebotes in Einklang zu

bringen: die Stimulation von zusätzlicher Nachfrage durch Rabatte während der Woche und stärker erhöhten Preisen in den Nachfragespitzen der Wochenendnächte (Tarif 1a und 1b). Die Kappungsgrenze stellt jeweils der Preis für eine vergleichbare Taxifahrt dar.

Tarif 1		Tarif 2	
3,70 € Grundpreis Gestaffelter Preis für jede weitere Person 0,70 € pro km Leistungspreis	Faktor 0,5 auf Leistungspreis bei schlechter ÖV-Verbindung Faktor 1,5 auf Leistungspreis bei guter ÖV-Verbindung	3,70 Grundpreis für jede Person ohne ÖV-Ticket 0,00 € Grundpreis für Person mit ÖV-Ticket 0,70 € pro km Leistungspreis	Faktor 0,5 auf Leistungspreis bei schlechter ÖV-Verbindung Faktor 1,5 auf Leistungspreis bei guter ÖV-Verbindung
Faktor 1,5 auf Leistungspreis zu Spitzenzeiten am Wochenende (19-24 Uhr Fr u. Sa.) 2 € Rabatt für ÖV-Tickets je Buchung		Faktor 1,5 auf Leistungspreis zu Spitzenzeiten am Wochenende (19-24 Uhr Fr u. Sa.) Kein Rabatt	
↓ Südwest, Nordwest		↓ Herzstück	
Tarif 1a – Rabattierung nachfrageschwächerer Zeiten		Tarif 1b – Aufschlag für Nachfragespitzen	
3,70 € Grundpreis 1,50 € für jede weitere Person 0,70 € pro km Leistungspreis	Faktor 0,5 auf Leistungspreis bei schlechter ÖV-Verbindung Faktor 1,5 auf Leistungspreis bei guter ÖV-Verbindung	4,00 € Grundpreis 1,50 € für jede weitere Person 0,90 € pro km Leistungspreis	Faktor 0,5 auf Leistungspreis bei schlechter ÖV-Verbindung Faktor 1,5 auf Leistungspreis bei guter ÖV-Verbindung
Faktor 0,5 auf Leistungspreis Montag – Freitag sowie Sonntag Faktor 1,5 auf Leistungspreis zu Spitzenzeiten am Wochenende (19-24 Uhr Fr u. Sa.) 2 € Rabatt für ÖV-Tickets je Buchung		Faktor 2,0 auf Leistungspreis zwischen 16:00 und 02:00 jeweils Freitag und Samstag 1 € Rabatt für ÖV-Tickets je Buchung	
Für alle gilt: Taxi-Tarif als Höchstpreis je Buchung (5,50 km Grundpreis + 2,50 €/km)			

Abbildung 2: Übersicht der untersuchten Tarifvarianten

1.2 Ergebnisse und Empfehlungen

Für die Szenarien wurden Verkehrssimulationen erstellt, verkehrliche und wirtschaftliche Kenngrößen ermittelt sowie daraus folgende Empfehlungen erarbeitet. Die wesentlichen Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

1.2.1 Vergleich der Szenarien

Die unten stehenden Abbildungen zeigen die räumliche Nachfragedichte (Startorte der Fahrten) in den Szenarien. Erwartungsgemäß sinkt diese Dichte nach außen hin erheblich ab. Neben der Innenstadt stellt vor allem die Maxvorstadt einen Nachfrageschwerpunkt dar. Die Tabelle gibt zudem einen guten Überblick über die wesentlichen Kenngrößen der untersuchten Szenarien.

Tabelle 1: Wesentliche Kenngrößen der Szenarien

Szenario	Fläche	Einwohner* innen	Arbeitsplätze	Einwohneranteil Gesamtstadt
Südwest	75 km ²	682.000	586.000	43%
Nordwest	108 km ²	795.000	709.000	50%
Mittlerer Westen	87 km ²	837.000	683.000	53%
Herzstück	128 km ²	1.151.000	904.000	73%
Stadtweit (autonom)	310 km ²	1.573.000	1.057.000	100%

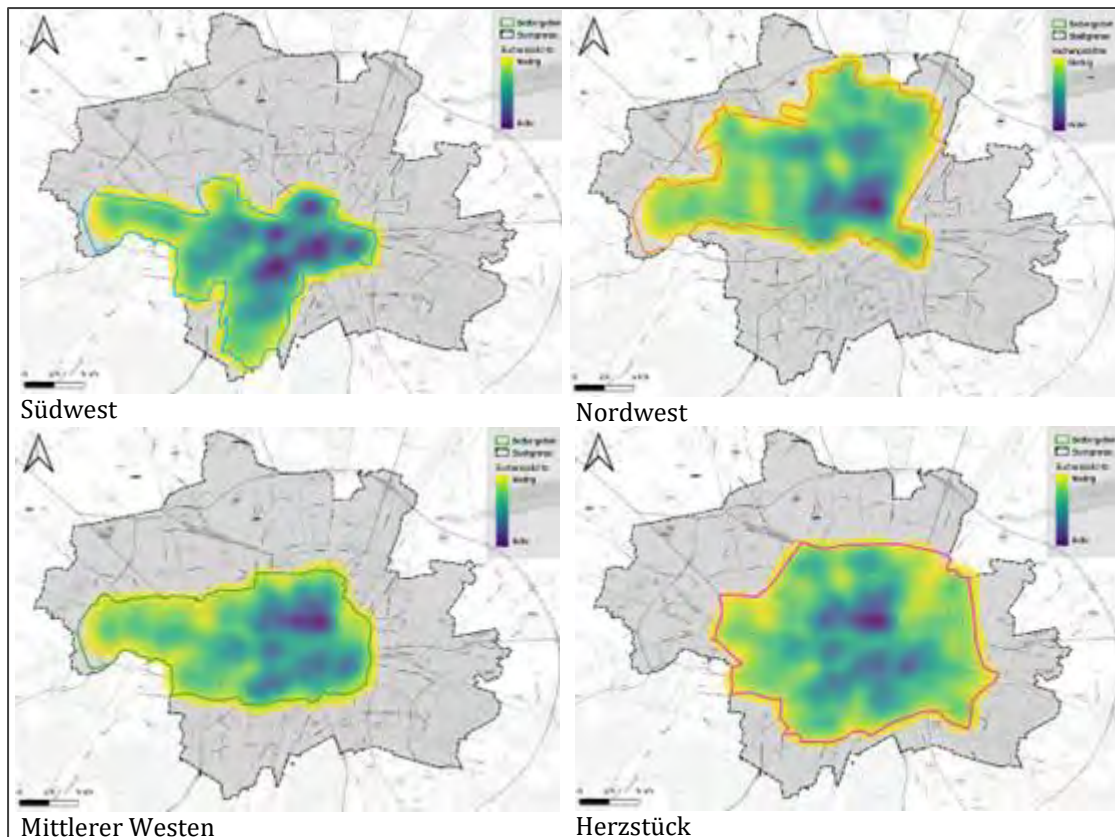


Abbildung 3: Räumlicher Szenarienvergleich inkl. Verteilung der Nachfragedichte

1.2.2 Tarifgestaltung und Preis-Sensitivität

Die untersuchten Tarifmodelle sind oben in Abschnitt 1.1.4 dargestellt. Diese beeinflussen entscheidend nicht nur die Wirtschaftlichkeit, sondern auch die Nachfrage und die Systemeffizienz. Gerade kurze Fahrten sollten nicht zu günstig sein, um Verlagerungen vom Fuß- und Radverkehr zu vermeiden. Auch ist ein angemessener preislicher Abstand zum Linienverkehr zu wahren, damit einer unerwünschten Verlagerung entgegengewirkt wird.

Wir sehen daher Vorteile in einem an Tarif 1 orientierten Modell mit einem Grundpreis, einem distanzbasierten Leistungspreis sowie einem moderaten Rabatt für ÖPNV-Stammkund*innen. Der völlige Entfall des Grundpreises für ÖPNV-Kund*innen in Tarif 2 könnte dazu führen, dass vor allem kurze Fahrten mit ODM durchgeführt und in hohem Maße auch Fuß- und Radverkehr verlagert wird. Der Tarif 1 sorgt dagegen für höhere Erlöse und zielt stärker auf die gewünschten Verlagerungen vom Autoverkehr hin zum ÖPNV ab.

1.2.3 Verlauf der Nachfrage im Tages- und Wochengang

Die Ganglinie der ODM-Nachfrage unterscheidet sich in allen Szenarien deutlich von der Ganglinie der allgemeinen Verkehrsnachfrage. Während letztere die bekannten "Hauptverkehrszeiten" Mo-Fr in den Morgen- und frühen Abendstunden aufweist (schwarze Linie), zeigt die Abbildung am Beispiel des Szenarios "Herzstück" die beim ODM-Service völlig andere Verteilung im Wochenverlauf und die deutlich anders gelagerte Nachfragestruktur von ODM. Hier liegen die Schwerpunkte in den Abendstunden und den Wochenendnächten, da der Nutzungsschwerpunkt nicht Schüler:innen- und Pendler:innenfahrten, sondern Freizeitverkehre sind. Die Hauptnachfrage ist in den Abendstunden – insbesondere am Fr.- und Sa.- Abend – zu verzeichnen.

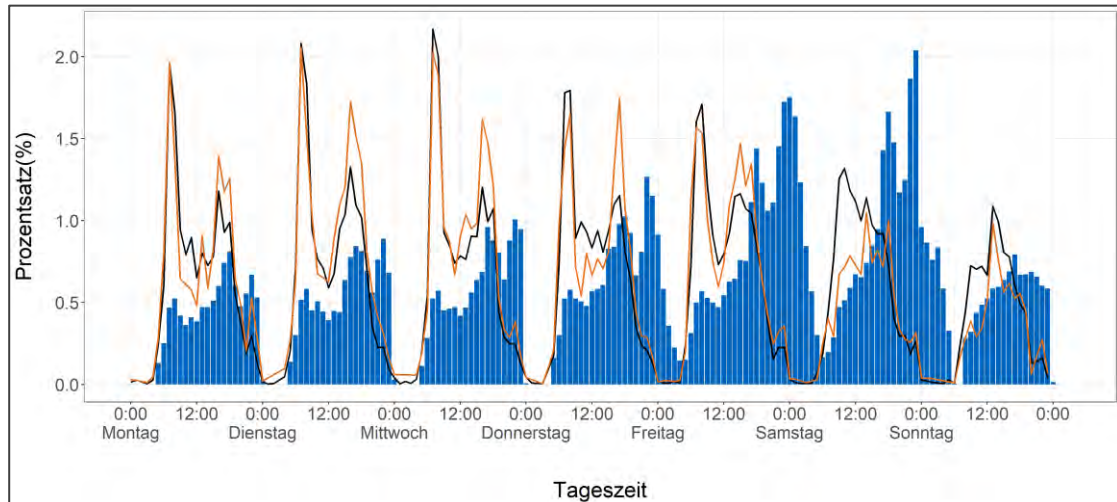


Abbildung 4: Verkehrsnachfrage ODM Herzstück (blau) im Vergleich mit dem Gesamtverkehr München (schwarz) und im ÖV zurückgelegte Wege (orange) im Verlauf einer Woche (Mo – So). Gilt ähnlich für alle Szenarien.

Durch eine gewisse Dynamik (Zuschläge bzw. Rabatte) sollten die Nachfragespitzen gedämpft werden, um Kapazitäten optimal zu nutzen und eine hohe Bedienqualität zu sichern. Im Szenario Herzstück ist dieses zwingend notwendig, weil die Nachfrage die Kapazitätsgrenze der verfügbaren Flotte deutlich übersteigen würde. Um die Funktionsfähigkeit des Systems zu verbessern ist es daher zu empfehlen, in diesen Spitzenzeiten die Nachfrage einen erhöhten Fahrpreis zu verlangen. Dieses erscheint praktikabel, da bei den Kund:innen zu diesen Zeiten eine erhöhte Zahlungsbereitschaft besteht oder die Fahrt auch auf weniger stark ausgelastete Zeiträume verschoben werden kann. Insgesamt kann dadurch die Effizienz verbessert und der spezifische Zuschussbedarf weiter reduziert werden.

Alternativ können auch durch Rabatte Anreize geschaffen werden, um die Nachfrage in Zeiten zu erhöhen, in denen das ODM-System nur schwach ausgelastet ist. Perspektivisch empfehlen wir für das Angebot ein volldynamisches Pricing, bei dem jede Fahrt individuell bepreist wird, um Servicequalität, verkehrliche Wirkung, Ertrag und Effizienz zu optimieren. Wichtig ist jedoch, dass die Regeln der dynamischen Bepreisung möglichst transparent dargestellt werden, um die Akzeptanz bei den Nutzer:innen zu gewährleisten. Dass ein solches System mit einem dynamischen Pricing auf diese Weise auch als ÖPNV-Linienbedarfsverkehr genehmigungsfähig ist, zeigt das Beispiel MOIA in Hamburg.

Eine wichtige Anforderung an das für das städtische ODM-Angebot der Landeshauptstadt München (LHM) entwickelte Tarifsystem war die "Anschlussfähigkeit" des Tarifes für das Umland. Diese ist gegeben, da die Tarif-Logik (Grundpreis, Leistungspreis, Rabatt für ÖPNV-Kund:innen) auf das Umland voll übertragbar ist. Bei Bedarf können dabei einzelne Parameter an die spezifischen Anforderungen angepasst werden. Denn anders als in der LHM wird ODM im Umland seltener eine zusätzliche Angebotsoption in Ergänzung zu einem guten Linienverkehr, sondern häufig Bestandteil des ÖPNV-Grundangebotes sein. Dieses muss sich auch im Pricing abbilden. Hier könnte z. B. der Entfall des Grundpreises für ÖPNV-Kund:innen analog zum Tarif 2 oder die Fakturierung des Distanzpreises mit 0,0 eine gute Lösung sein.

1.2.4 Verkehrliche Wirkungen

Auf Grund der relativ geringen Beförderungsleistungen von ODM sind die direkten Verlagerungswirkungen (z.B. Anzahl der Fahrten, Personen-km) und damit die direkten Entlastungswirkungen zwangsläufig gering. Die ca. 100 Fahrzeuge umfassende Flotte trägt daher nur unwesentlich zum Verkehrsaufkommen bei, sodass auch nicht mit einem erhöhten Stauaufkommen zu rechnen ist (zum Vergleich: in München sind über 750.000 Kraftfahrzeuge gemeldet). Lediglich bei Ein- und Ausstiegen kann es gelegentlich zu kurzen Wartezeiten für Fahrzeuge kommen, die das kurz wartende ODM-Fahrzeug überholen müssen.

Ähnlich wie Car-Sharing wird ODM nicht als Hauptverkehrsmittel, sondern als Ergänzung und Option für "besondere Wege" genutzt. Wichtiger als die reine Menge ist daher wie oben dargestellt die Ergänzungswirkung von ODM für den Umweltverbund: Mit ODM erhalten die Kund:innen für ihre Fahrtwünsche auch dann ein attraktives Verkehrsangebot, wenn im Einzelfall die Nutzung von Linienverkehr oder Fahrrad ungünstig ist. So werden Angebotslücken geschlossen, für die ansonsten ggf. bewusst ein eigener PKW vorgehalten wird. Entsprechend liegt der Anteil der Bürger:innen, die z. B. im Verlauf einer Woche den ODM-Service nutzen würden, deutlich höher als es die direkten Verlagerungswirkungen vermuten lassen.

Tabelle 2: Anteil der ODM-Nutzenden in den Szenarien

Szenario	Anteil der ODM-Nutzenden an der Gesamtbevölkerung des Bediengebietes im Verlauf einer Woche
Herzstück	4,37%
Südwest	2,49%
Nordwest	3,88%
Mittlerer Westen	3,29%

1.2.5 Verzahnung mit dem Linien-ÖPNV

Angebotsseitig sollte ODM neben Bussen und Bahnen als vierte Angebotssäule in der Stadt München positioniert werden, die das Angebot des Linienverkehrs sinnvoll ergänzt, sich durch Pricing, Auftritt und Systemgestaltung aber auch durchaus abgrenzt.

In allen untersuchten Szenarien zeigt sich die hohe Bedeutung des eigenen Charakters und Verkehrswertes von ODM:

- Bei ca. 85% der Fahrten handelt es sich um reine ODM-Fahrten (vom Start zum Ziel). Nur ca. 15% werden als sog. intermodale Fahrten durchgeführt, bei denen ODM als Zubringer oder Abbringer in Verknüpfung mit dem Linienverkehr genutzt wird. Bei ODM steht also die multimodale Option (ODM-Nutzung anstatt eines anderen Verkehrsmittels für den gesamten Weg) im Vordergrund. Dies deckt sich auch mit Untersuchungen in Hamburg¹, bei denen ca. 14% aller Wege mit einem anderen Verkehrsmittel kombiniert wurden (davon 70% mit dem öffentlichen Nahverkehr).
- Etwa 70% aller Fahrgäste, die ODM wählen, sparen mit ODM Reisezeit. Die verbleibenden 30% der ODM-Nutzenden wählen den Verkehrsmodus aus Komfortgründen (sehr kurze Zu- und Abgangswege, kein Umsteigen, mehr ein Empfinden wie auf einer Taxifahrt).

Insgesamt zeigt sich damit, dass ODM den Linienverkehr ergänzt und (fast) nicht kannibalisiert. Hierzu trägt auch das Pricing bei, da eine Fahrt mit dem ODM immer teurer ist als die Nutzung des Linienverkehrs.

Über die untersuchten, flächigen Szenarien hinaus kann die ODM-Flotte auch weitere Funktionen übernehmen, wie z. B. die Gewährleistung eines Nachtverkehrs unter der Woche², Ersatzverkehre, die Bedienung schwach ausgelasteter Linien oder die Beförderung von Menschen mit Behinderung oder Mobilitätseinschränkungen. Auch wird die Resilienz des ÖPNV-Systems gestärkt, da ODM bei

¹ Schatzmann, T., Zwick, F., Axhausen, K.W. Investigating the preferences for the use of urban ridepooling. Angenommen zum 11. Symposium of the European Association for Research in Transportation 2023. Preprint verfügbar unter <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000606783>

² Siehe z.B.: Zwick, F., Fraedrich, E., Kostorz, N., Kagerbauer, M. Ridepooling als ÖPNV-Ergänzung - Der Moia-Nachtservice während der Corona-Pandemie. Internationales Verkehrswesen 72(3) S. 84-88. URL <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/reports/1501-1600/ab1582.pdf>

Störungen oder kurzfristigen Anpassungen des Fahrplans als zusätzliche Option zur Verfügung steht.

1.2.6 Fahrzeuge

In der Praxis haben sich für ODM-Angebote Kleinbusse mit einer Kapazität für bis zu sechs Fahrgästen bewährt. Diese bieten bei guter Wendigkeit genügend Möglichkeiten zum Pooling oder zur Beförderung von Gruppen. Größere Kapazitäten sind i.d.R. im flächigen Poolingverkehr nicht sinnvoll.

Hoher Wert sollte auf den Komfort und das Erscheinungsbild der Fahrzeuge gelegt werden. Aufgrund der erhöhten Kosten gegenüber dem ÖV wird die Erwartung nach einer komfortablen Fahrt größer. Klimaanlage, komfortable Sitze, WiFi und USB-Ladepunkte sollten als Ausstattung erwogen werden.

Im Zuge der angestrebten Elektrifizierung des Verkehrs sollten die Fahrzeuge idealerweise elektrisch betrieben werden. Sowohl die Simulationen als auch Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass die Batteriekapazitäten ausreichend sind, um in einem ODM-System eingesetzt zu werden. Ferner sollte ein Teil der Flotte barrierefrei ausgestattet sein, um Menschen mit Behinderung die Möglichkeit zu geben, ODM zu nutzen.

1.2.7 Barrierefreiheit

Die Barrierefreiheit des ODM-Services ist nicht nur wünschenswert, sondern wird im PBefG für Linienbedarfsverkehre zwingend gefordert.

Für viele Gruppen wie Sehbehinderte, Gehbehinderte oder Personen mit Gepäck oder Kinderwagen kann im Rahmen eines sorgsam universellen Designs von Fahrzeugen und Service eine barrierefreie Nutzbarkeit des ODM-Angebotes erreicht werden, die für die Nutzenden vielfach auch Vorteile gegenüber der Nutzung des Linienverkehrs bietet. Bei der Software kann hier durch personalisierte Einstellungen für z.B. besonders kontrastreiche Anzeigen, gesprochene Navigation oder auch die Möglichkeit, langsamere Zugangswege oder Einstiegshilfen anzumelden, eine verbesserte Barrierefreiheit erreicht werden.

Für Rollstuhlfahrende (sofern diese sitzend im Rollstuhl befördert werden müssen) ist dagegen eine Barrierefreiheit nur durch den Einbau spezieller Fahrzeugrampen oder Hublifte zu erreichen, zumal der ODM-Service eine Vielzahl von virtuellen, nicht baulich ausgestaltete, virtuelle Haltepunkte bedient. Die Erfahrung zeigt, dass es für diesen Nutzendenkreis ausreicht, einen Teil der Flotte (ca. 10-15% der Fahrzeuge) mit Rampen bzw. Hubliften auszustatten. Die Fahrzeuge können im regulären ODM-Service eingesetzt werden und werden immer dann gezielt disponiert, wenn über Auslösen der speziellen Buchungsoption eine Fahratanfrage für ein rollstuhlgerechtes Fahrzeug (engl. Wheelchair accessible vehicle, WAV) vorliegt. Hier ist es sinnvoll, den Optimierungsalgorithmus so auszulegen, dass WAVs bevorzugt, aber nicht exklusiv Rollstuhlfahrenden zugewiesen werden, um einerseits auch für diese Nutzengruppe ein inklusives Angebot mit der Möglichkeit der Fahrtenbündelung zu schaffen und andererseits eine passable Auslastung der WAV-Fahrer:innenschichten zu gewährleisten. Berücksichtigt werden muss hierbei auch, dass die Sicherung eines Rollstuhls sowie die Bedienung eines etwaigen Lifts oder einer Rampe sich auch auf die Haltedauer und damit auf den Poolingalgorithmus auswirkt, weshalb geringere Poolingquoten im WAV-Verkehr zu erwarten und zu akzeptieren sind. Erfahrungswerte bei MOIA in Hamburg zeigen Haltedauern von bis zu fünf Minuten beim Zu- oder Ausstieg von Rollstuhlfahrenden.

Ein rollstuhlgerechter Service verbessert die Mobilitätsmöglichkeit für Rollstuhlfahrende ganz erheblich, da diese dann nicht mehr auf die oft stark eingeschränkte Nutzung von Sonderfahrdiensten angewiesen sind. Dies belegen auch erste Auswertungen des 2023 eingeführten WAV-

Service bei MOIA in Hamburg³. Hier zeigte sich, dass die Nachfrage im ersten Halbjahr 2023 kontinuierlich anstieg und zuletzt 1,5% aller Fahrtenanfragen ausmachte. Während nur 9,6% der Fahrgäste ohne Rollstuhl mehr als zehn Fahrten im ersten Halbjahr angefragt haben, waren dies über 24,2% aller rollstuhlfahrenden Fahrgäste, was für eine regelmäßigeren und intensiveren Nutzung spricht. Zu beachten ist hierbei, dass schwerbehinderte Fahrgäste und deren Begleitperson seit 2023 außerdem unentgeltlich befördert werden, was den Fahrdienst zusätzlich attraktiv macht. Schlussendlich sollte zudem beachtet werden, dass aufgrund des Mangels an Alternativen sowie des höheren Bedarfs an Verlässlichkeit und der teilweise aufwendigen Vorbereitung von Alltagswegen die Möglichkeit der Vorbuchung für Rollstuhlfahrende besonders wichtig erscheint. So wurden über 43% aller Buchungsanfragen mit Rollstuhl vorgebucht (d.h., mindestens eine Stunde vor Fahrtbeginn und bis zu 24 Stunden im Voraus). Dies trifft nur auf 14% aller sonstigen Fahrtenanfragen zu.

1.3 Ausblick:

ODM kann als ein wichtiger Baustein der städtischen Mobilitätsstrategie 2035 ausgebaut werden, und bietet den Einwohner:innen der Stadt München sowie den Gästen eine komfortable Ergänzung zum ÖPNV und kann dazu beitragen, das Wohnen ohne eigenes Auto in der Stadt München zu vereinfachen. In den Verkehrswissenschaften wird vielfach davon ausgegangen, dass in Zukunft mehr On-Demand Verkehrsangebote in den Städten erwartet werden. Der Erfolg der Ride-Hailing Angebote in den USA (Uber und Lyft), Indien (Ola und Uber), China (Didi) und anderen Ländern zeigt, dass die Nachfrage nach On-Demand Angeboten sehr groß ist. Vor allem in den USA konnte beobachtet werden, dass unreguliertes Ride-Hailing zu erhöhtem Stauaufkommen und einer unerwünschten Kannibalisierung des ÖPNV führen kann.

Die Stadt München hat hier die Gelegenheit, steuernd einzugreifen und ineffizientes Ride-Hailing (Einzelfahrten) durch ein koordiniertes Ride-Pooling (Sammelfahrten) zu ersetzen. Es gibt zwei entscheidende Merkmale, die Ride-Pooling deutlich effizienter als Ride-Hailing machen. Zum einen werden beim Ride-Pooling mehrere Fahrgäste in einem Fahrzeug gleichzeitig gefahren, sofern deren Quelle und Ziel ein Pooling kosteneffizient machen. Zum anderen fährt die hier untersuchte Variante des ODM Ride-Pooling Fahrgäste nicht von Tür-zu-Tür (wie das im Ride-Hailing üblich ist), sondern von virtueller Haltestelle zu virtueller Haltestelle.

Sowohl das Pooling als auch ein Service zwischen Haltestellen führt zu einer erheblichen Effizienzsteigerung, was die Lehrkilometer deutlich reduziert. Ein durchdacht geplantes Ride-Pooling-System kann heute Push- und Pull-Maßnahmen kombinieren, um eine Verlagerung vom Auto auf öffentliche Verkehrssysteme zu fördern. Eine rein marktwirtschaftlich orientierte Öffnung des öffentlichen Verkehrssektors für die profitabelsten Fahrdienste (insbesondere Ride-Hailing) wäre nicht zielführend.

Durch die zunehmende Digitalisierung des Verkehrs wird davon ausgegangen, dass On-Demand Angebote wichtiger werden. Der klassische ÖPNV wird sicherlich auf stark nachgefragten Routen weiterhin mit großen Einheiten nach Fahrplan fahren und damit auch künftig die Masse der Fahrgäste befördern und das Rückgrat der nachhaltigen Mobilität bilden - aber überlagernd und ergänzend dazu ist mit einer Transformation hin zu dynamischen Systemen zu rechnen, die auf Nachfrage in Echtzeit reagieren. Hier bietet ein ODM-System einen geeigneten Einstieg, um Erfahrungen mit einem neuen nachfrageorientierten Systemen zu sammeln und die Digitalisierung des Verkehrs zu fördern.

³ Krohn, A.-L., Fassina, Z., Kuehnel, N. und Zwick, F. Stadtweites barrierefreies Ridepooling. Erste Erfahrungen des MOIA-Rollstuhlservice in Hamburg. Der Nahverkehr (in Druck).

2 Einleitung

“What is now proved was once only imagined”

William Blake, 1757-1827

On-Demand Mobilitätsangebote stehen an einem faszinierenden Scheideweg. Auf der einen Seite gibt es zahlreiche kleinere Projekte, die zwar die faktische Umsetzbarkeit von ODM-Ridepooling erwiesen haben, aber insbesondere auf Grund des hohen Zuschussbedarfs nicht die Skalierung erreicht haben, um eine echte Aussage über ihre Rolle in einer ÖPNV-Landschaft treffen zu können.

Auf der anderen Seite zeigen relevante Studien,⁴ welche große Rolle ODM-Ridepooling für den urbanen Verkehr auf dem Weg hin zu einer inklusiveren, sozial-gerechteren und umweltverträglicheren Mobilität spielen kann. Dabei geht es insbesondere darum, den ÖPNV durch ein neues Angebotselement zu erweitern, das mit seinen spezifischen Produkteigenschaften wie Komfort, Verfügbarkeit und Flexibilität den klassischen Linienverkehr ergänzt und somit die Attraktivität des Gesamtsystems ÖPNV stärkt. Kurzum, ODM-Ridepooling spielt, wenn es entsprechend aufgebaut und betrieben wird, eine wichtige Rolle für eine echte Verkehrswende weg vom MIV. Dabei zeigt sich, dass Ridepooling eine breite Basis an Zielgruppen bzw. Reisezwecken anspricht (u.a. Reisende, Student:innen, Geschäftsreisende, Pendler:innen, Freizeitverkehre, Mobilitätseingeschränkte, Familien und Tourist:innen)⁴. Dabei bedarf das Konzept von Ridepooling und das tatsächliche Kund:innenenerlebnis aufgrund des Innovationsgrades des Konzeptes oft noch Kommunikation gegenüber den Reisenden. Fälschlicherweise wird Ridepooling gemeinhin oft eng mit dem Taxi assoziiert, hat dabei jedoch einige elementare Unterschiede. Aus Kund:innensicht ist oft der Preisunterschied, welcher ja nach spezifischer Konzession und Tarifgestaltung deutlich unter dem Taxipreis liegt, am auffälligsten. Des Weiteren funktioniert Ridepooling i.d.R. nicht als Tür-zu-Tür Verkehr, sondern das System arbeitet mit einer Vielzahl an virtuellen Haltestellen, die die Bündelung von Fahrtanfragen erleichtern und ungünstige Fahrwege (z. B. Befahren von Sackgassen) verhindern sollen. Dies impliziert einen Fußweg für Reisende vor Fahrtbeginn und nach Fahrtende. Die Kombination von Pooling, optimierten Fahrwegen, geringeren Standzeiten und optimierender Software macht das ODM-Ridepooling deutlich effizienter als die Systeme von Taxi und Personenmietwagen (Ride-Hailing). Der Besetzungsgrad ist signifikant höher, der Leerfahrtenanteil signifikant geringer. Abbildung 5 fasst dabei einige Kernversprechen des Ridepoolings zusammen. Je nach Ausgestaltung ist das Reiseerlebnis vergleichbar oder unwesentlich unangenehmer als der private PKW, erlaubt gleichzeitig jedoch, wieder abhängig von den Details, die Realisierung eines niedrigeren Preises. Somit ist ein flächendeckendes Ridepooling eine wichtige Ergänzung zu vorhandenen öffentlichen Transportmitteln.

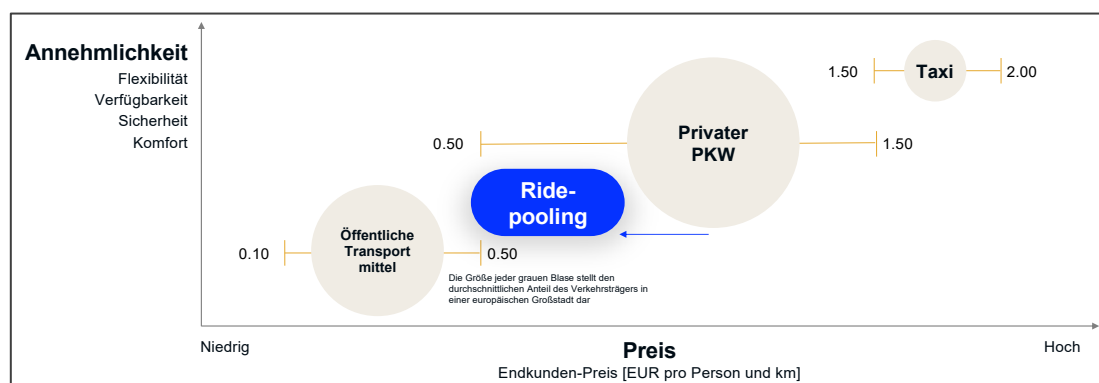


Abbildung 5: Positionierung von Ridepooling im urbanen Verkehrssystem

Im Rahmen der städtischen Mobilitätsstrategie 2035 der Stadt München sollen Erreichbarkeit und Aufenthaltsqualität in München flächendeckend verbessert und ein umfassendes ODM-Angebot für

⁴ Siehe z.B. Kagerbauer et al. (2021) Ridepooling in Hamburg auf dem Weg in die Zukunft. Ergebnisbericht zur MOIA Begleitforschung. https://www.ifv.kit.edu/downloads/211207_MOIA_Ergebnisbericht_Begleitforschung.pdf

das gesamte Stadtgebiet unter Berücksichtigung des Umlandanschlusses angeboten werden. Ein skaliertes ODM-Angebot ermöglicht eine gute flächige Erreichbarkeit und eine umfassende Verfügbarkeit von öffentlicher Mobilität, wie sie allein mit Linienverkehren nicht umsetzbar wäre. Gleichzeitig schafft es durch hohen Beförderungskomfort und Direktverbindungen attraktive Angebote, die Autofahrer:innen zum Umsteigen bewegen und auch stellen eine flexible Ergänzung zum Kernangebot des Linien-ÖPNV dar. In der Summe kann ODM als zusätzliches, hochwertiges Angebot dazu beitragen, das System öffentlicher Mobilität signifikant zu verbessern und damit sowohl Verkehrsaufkommen als auch Verkehrsleistung des MIV zu reduzieren. So kann eine fundierte Grundlage für die weiteren Entscheidungen getroffen werden, wie die Stadt München den Entwicklungspfad für den Aufbau eines umfassenden ODM Ridepooling-Angebotes gestalten kann, der optimal auf die Ziele der Mobilitätsstrategie abzielt.

Ein skaliertes, stadtweites ODM-Angebot kann nur in Stufen aufgebaut werden und wird auch erst im Zusammenhang mit dem Betrieb autonomer Fahrzeuge oder dem Aufbau neuer, langfristiger Finanzierungsinstrumente finanzierbar sein. Der vorliegende Bericht fasst vor diesem Hintergrund die Ergebnisse des Projektes „Betriebskonzeption und Flottensteuerung für verschiedene Einstiegsszenarien von ODM-Angeboten“ zusammen, ergänzt um ein Ziel-Szenario mit einem stadtweiten operierenden autonomen Betrieb. Das Projektkonsortium bestehend aus dmo, der Technischen Universität München (TUM) und MOIA hat dabei in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin, dem Mobilitätsreferat der Landeshauptstadt München (MOR) und in Zusammenarbeit mit der Münchner Verkehrsgesellschaft (MVG) im Zeitraum von November 2022 bis Juni 2023 die Inhalte erarbeitet⁵.

2.1 Bediengebiete / Szenarien

Für die Betriebskonzeption wurden mehrere Bediengebietsvarianten untersucht, die sich als „Einstiegsszenario“ für einen ODM-Service eignen. Die Bediengebiete weisen in jedem Fall eine ausreichende Größe auf und sind so zugeschnitten, dass der ODM-Service einen hohen eigenen Verkehrswert aufweist, also relevante Quellen und Ziele einschließt und nicht ausschließlich als Zubringer zum Linienverkehr oder als „Lückenfüller“ fungiert und damit relevante und vielfältige „use cases“ der Fahrgäste abdeckt, die bisher zum Teil nur ungenügend vom klassischen ÖPNV abgebildet werden (z.B. Holen und Bringen von Kindern, Fahrten mobilitätseingeschränkter Personen, erhöhtes Sicherheitsbedürfnis bei nächtlichen Fahrten insb. bei Frauen, u.a.). Auf dieser Basis sollten sich die Gebiete bezüglich erwartbarer Nachfrage, Bevölkerungsabdeckung und Erschließung potenziell unterversorgter Gebiete aber deutlich unterscheiden. Neben der Abdeckung möglichst vieler Einwohner:innen und Arbeitsplätze und der politisch gesetzten Anbindung von Randgebieten (hier insbesondere auch das Neubaugebiet Freiham) wurde dabei auch die potenzielle Effizienz im Sinne eines ausgelasteten Services berücksichtigt. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass Ridepooling besonders dann effizient ist, wenn die Nachfragedichte hoch ist⁶. In diesem Fall ist die Wahrscheinlichkeit zum Poolen, also zum Zusammenlegen mehrerer ähnlich verlaufender Fahrtwünsche, höher, wodurch Leerkilometer gespart und durchschnittliche Besetzungsgrade erhöht werden können.

Bei der initialen Festlegung der verschiedenen Varianten wurde daher ein vereinfachtes räumliches Nachfragemodell zugrunde gelegt, das die Nachfrage (hier: Buchungen, unabhängig von Gruppengröße) anhand verschiedener Variablen, inkl. Einwohner:innen, Arbeitsplätze sowie points of interest⁷ aus OpenStreetMap, schätzt. Dieses Modell wurde anhand der Erfahrungswerte aus MOIAs Betrieb in Hamburg trainiert⁸ unter der Annahme, dass grundlegende

⁵ Bitte beachten Sie, dass aufgrund rechtlicher Vorgaben, bestimmte Arbeitspakete und Ergebnisse ausschließlich von dmo und TUM erarbeitet, diskutiert und aufbereitet wurden. Diese Teile des Abschlussberichtes werden dem MOR in einem separaten Dokument übermittelt.

⁶ Siehe z.B.: Zwick, F., Kuehnel, N., Moeckel, R. und Axhausen, K.W. Ride-Pooling Efficiency in Large, Medium-Sized and Small Towns -Simulation Assessment in the Munich Metropolitan Region. *Procedia Computer Science* (184) 2021. S. 662-667

⁷ Hier vor allem Läden, Gastronomie, Kulturstätten wie Kino und Theater sowie ÖV-Haltestellen

⁸ Zwick, F. und Axhausen, K.W. Ride-pooling demand prediction: A spatiotemporal assessment in Germany. *Journal of Transport Geography* (100) 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103307>

Nachfragepotenziale zwischen den beiden Metropolen ähnlich sind. Ziel hierbei ist nicht, die genaue Nachfrage zu ermitteln, sondern eher, räumliche Muster für die Abgrenzung von Bediengengebieten zu erkennen. Da Einwohner:innen sowie Arbeitsplätze starke Indikatoren für die Nachfrage sind, kann hierbei bei der Wahl der Grenzen auch sichergestellt werden, dass eine hohe Abdeckung der Bevölkerung gewährleistet wird.

Für die Schätzung in München wird auf die Verkehrszellen des Mobilitätsreferats der Landeshauptstadt München zurückgegriffen, inklusive Zahlen zu Einwohner:innen und Arbeitsplätzen. Zusätzlich wurden point-of-interest-Daten aus OpenStreetMap bezogen.

Abbildung 6 verdeutlicht die initiale Nachfrageschätzung in und um München. Intuitiv ist zu erkennen, dass im dicht besiedelten Stadtzentrum, insbesondere in Altstadt, Maxvorstadt und Au-Haidhausen, eine hohe Nachfragedichte geschätzt wird. Auch die Achse entlang der S-Bahn Stammstrecke inklusive Pasing zeigt hohe Schätzwerte auf. Der englische Garten im Norden und der weitere Verlauf der Isar nebst Flaucher im Süden stellen natürlich Barrieren dar. Zum Stadtrand hin nimmt die Nachfragedichte erwartungsgemäß deutlich ab.

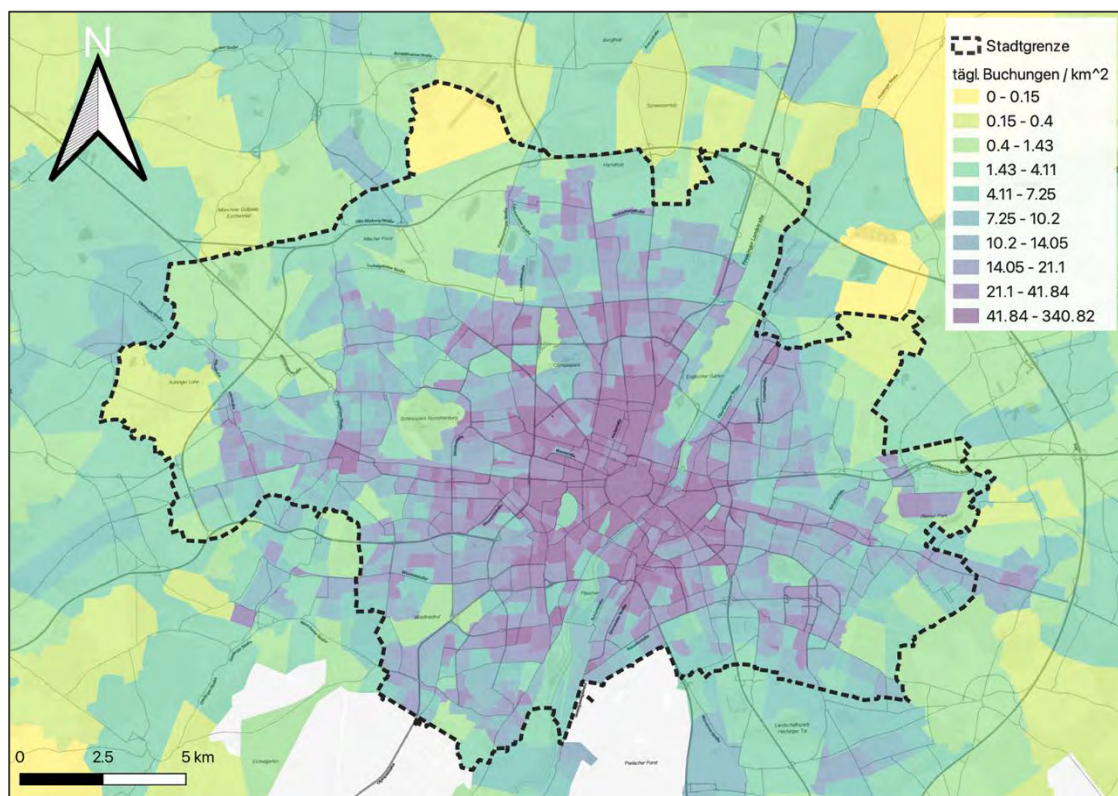


Abbildung 6: Räumliche Nachfrageschätzung zur Bediengengebietsabgrenzung, Abstufung nach Dezilen

2.1.1 Bedienggebiet Südwest

Das Bedienggebiet Südwest ist das kleinste der untersuchten Gebiete. Es hat eine Fläche von 75 km² und erstreckt sich von der Innenstadt nach Westen entlang der Stammstrecke und Schloss Nymphenburg weiter über Pasing bis nach Aubing inkl. Neubaugebiet Freiham. Nach Süden wird ein Großteil des Stadtrands angebunden, östlich begrenzt von Flaucher und Isar. In diesem Szenario werden laut Daten des städtischen Verkehrsmodells ca. 682.000 Einwohnende und 586.000 Arbeitsplätze angebunden. Damit erhalten ca. 43 % der Bevölkerung Münchens Zugang zu einem On-Demand-Dienst.

2.1.2 Bediengebiet Nordwest

Das Bediengebiet Nordwest erstreckt sich ähnlich wie das Szenario Südwest von der Innenstadt nach Westen bis nach Aubing und schließt nach Norden die wichtigsten Siedlungsgebiete sowie den Olympiapark und Umsteigeknoten wie Moosach und Feldmoching ein. Nach Osten ist das Gebiet durch den Englischen Garten begrenzt. Das Gebiet ist 108 km² groß und bindet 795.000 Einwohnende sowie 709.000 Arbeitsplätze an, was etwa 50 % der Bevölkerung entspricht.

2.1.3 Bediengebiet Mittlerer Westen

Das Szenario Mittlerer Westen hat eine Ausdehnung von 87 km² und ähnelt, anders als das Nordwest Szenario, weniger einem "Tortenstück" als einem breiten Streifen, der sich vom erweiterten Stadtzentrum nach Westen bis an den Stadtrand zieht. Hier ist die Idee, ein Bediengebiet zu erhalten, das sowohl einen Stadtrandanschluss als auch eine Anbindung eines Großteils der Innenstadt inklusive Schwabing und Maxvorstadt herstellt. Außerdem bieten sich hier beidseitig entlang der westlichen Stammstrecke viele intermodale Anschlussmöglichkeiten, bei denen der On-Demand-Dienst als Zu- und Abbringer fungieren könnte. Insgesamt werden in diesem Szenario ungefähr 837.000 Einwohnende und 683.000 Arbeitsplätze angebunden. Das entspricht ca. 53 % der Bevölkerung Münchens.

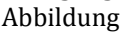
2.1.4 Bediengebiet Herzstück

Das Herzstück ist mit 128 km² das größte der untersuchten fahrerbasierten Betriebsszenarien. Das Gebiet umschließt vom Stadtzentrum ausgehend einen Großteil der inneren Stadtteile. Im Süden reicht das Gebiet bis nach Giesing, Obersendling und Neuperlach. Im Westen endet das Gebiet am Bahnhof Pasing und im Norden werden der Olympiapark sowie Milbertshofen angebunden. Der Osten erstreckt sich bis zum Bahnhof Trudering. Der Fokus des Herzstücks richtet sich weniger auf einen Stadtrandanschluss als auf einen möglichst effizienten On-Demand-Service, der einen Großteil der Bevölkerung erreicht und dabei einen geringeren Subventionierungsbedarf pro Fahrt benötigt als die anderen Gebiete. Insgesamt werden hier etwa 1.151.000 Einwohner:innen sowie 904.000 Arbeitsplätze angebunden. In diesem Fall hätten 73% der Münchner Bevölkerung direkten Zugang zum Service.

2.1.5 Stadtweit autonomes Bediengebiet

Als Zukunftsvision wird in einem letzten Schritt auch ein stadtweiter autonomer Service untersucht, welcher allen Einwohner:innen Münchens einen Zugang zum On-Demand-Dienst ermöglichen würde. Hier ist die Annahme, dass die Fahrpreise durch einen angenommen reduzierten Personalaufwand deutlich reduziert werden können, wodurch der Service sehr attraktiv werden könnte und deutlich größer skaliert werden könnte. Das gesamte Stadtgebiet umfasst 310 km² mit 1,57 Millionen Einwohner:innen und 1,06 Millionen Arbeitsplätzen.

2.2 Methodik

Die TUM hatte ein agentenbasiertes Verkehrsnachfragemodell - Microscopic Transportation Orchestrator (MITO) entwickelt und auf die Metropolregion München angewandt⁹ MITO basiert auf einem fahrtenbasierten Modellierungsansatz, bei dem die Teilmodule Verkehrserzeugung, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl und Verkehrsumlegung, wie in  Abbildung 7 zusammengefasst, sequenziell ablaufen. Das Verkehrsverhalten wird für eine typische Woche für die folgenden Wegezwecke geschätzt: Arbeit, Ausbildung, Einkaufen, Freizeit, Anderer Zweck, Wegekette mit Arbeit und Wegekette ohne Arbeit. Die synthetische Bevölkerung des Modells

⁹ Moeckel, R., Kuehnel, N., Llorca, C., Moreno, A. und Rayaprolu, H. Agent-Based Simulation to Improve Policy Sensitivity of Trip-Based Models. Journal of Advanced Transportation. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1902162>

wurde für das Jahr 2011 implementiert und kalibriert und für das Basisjahr des Projekts (2022) hochskaliert. Das eigentliche Verhaltensmodell beruht auf Daten der Mobilität in Deutschland 2017 (MID 2017) sowie des Mobilitätspanels (2016-2019). Damit kann die Verkehrsnachfrage für jeden einzelnen Haushalt und jede einzelne Person in der Metropolregion geschätzt werden.

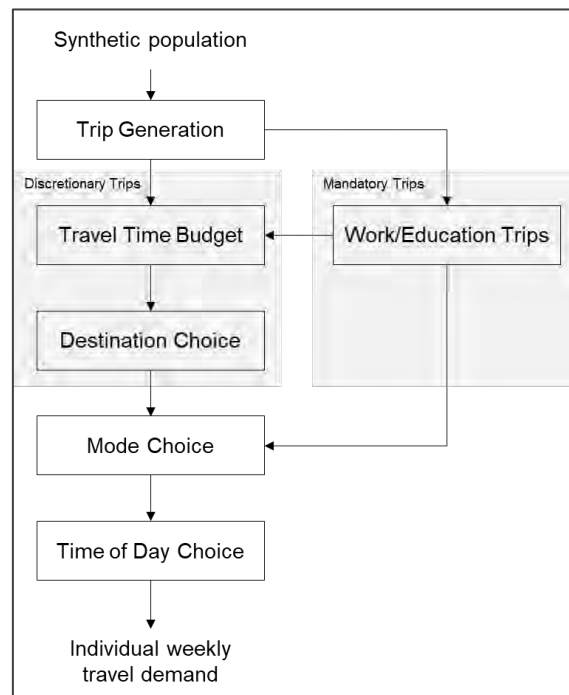


Abbildung 7: MITO Flussdiagramm

MITO verwendet Verkehrsmittelwahlmodelle auf der Grundlage von Daten aus dem Deutschen Mobilitätspanel für Haushalte. Die Modelle simulieren die Wahl zwischen den Verkehrsträgern Autofahrer:in, Mitfahrer:in, ÖPNV (inkl. Bus, Straßenbahn, U-Bahn und S-Bahn/Nahverkehrszug), Fahrrad, und zu Fuß. Um den potenziellen Anteil des neuen Verkehrsträgers Ride-Pooling (ODM) abzuschätzen, wird das bestehende Verkehrsnachfragemodell MITO erweitert. Folgende Schritte verfeinerten das Modell zur Projektlaufzeit:

- Skalierung der Bevölkerung auf die Bevölkerungsstatistik 2022 nach Bezirken. Durch die Verwendung der Bevölkerungsdaten von 2022 auf Stadtteilebene kann das Modell die räumliche Verteilung der Bevölkerung besser darstellen und die neuen Wohnentwicklungen in München, wie zum Beispiel Freiham, besser erfassen.
- Ein Multinomiales Logit-Modell (MNL) wurde entwickelt, das den Taximodus einschließt, um den Modal Split abzuschätzen. (Die Details des Verkehrsmittelwahlmodells sind in der Anlage aufgeführt)
- Zur Schätzung der Anteile des ODM-Modus wurde ein inkrementelles Logit-Modell entwickelt¹⁰. (Die Details des inkrementelles Logit-Modell sind in der Anlage aufgeführt)
- Für die Zugangs- und Abgangswege zum öffentlichen Personennahverkehr wurde ein Verkehrsmittelwahlmodell implementiert, das ODM mit einschließt.

¹⁰ Bei diesem Verfahren wird auf beobachtete Sensitivitäten vergleichbarer Referenzmodi (hier: Taxi) mit angepassten Variablen wie Warte- und Reisezeit zurückgegriffen, um Verhalten für bisher nicht beobachtbare Angebote abzuschätzen. Siehe hierzu: Koppelman, F., (1983). Predicting Transit Ridership in Response to Transit Service Changes. Journal of Transportation Engineering 109:4.

- Die Tageszeitverteilung der ODM-Fahrten wurde - mangels beobachtbarer Daten vergleichbarer urbaner Systeme - anhand von jährlichen Durchschnittsdaten einer Woche von MOIA kalibriert. Die für diese Verkehre typischen Abend- und Wochenendspitzen wurden auch bei existierenden Taxidaten aus München beobachtet¹¹.

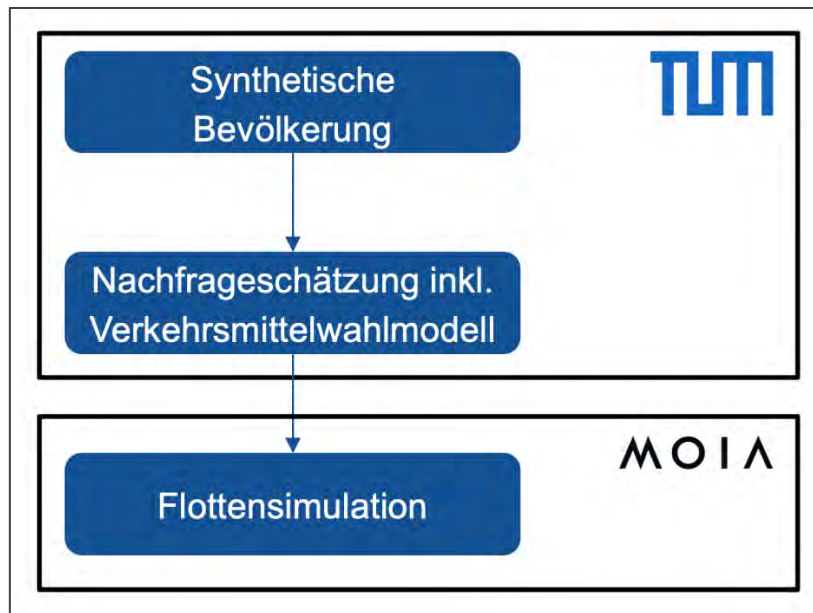


Abbildung 8: Arbeitsteilung und Modellverknüpfung im Projektteam

Die geschätzte Nachfrage für eine typische Woche wird im Anschluss mit der Multi-Agenten Verkehrssimulation MATSim simuliert¹² (Horni, Nagel, & Axhausen, 2016). MATSim ist eine ursprünglich an der TU Berlin sowie ETH Zürich entwickelte open-source Software (<https://github.com/matsim-org/matsim-libs>) die es erlaubt, vielfältigste Mobilitätssimulationen auf detailgetreuer Ebene durchzuführen. Neben der typischen Verkehrsumlegung von PKW- und ÖV-Verkehren beinhaltet das Framework auch Komponenten, um die Nachfrage iterativ anzupassen, indem die sogenannten Agenten, also synthetische Individuen, über den Verlauf der Simulation von vergangenen Entscheidungen lernen und sich anpassen. Für die Abbildung von ODM-Verkehren existieren mehrere Erweiterungen, die es erlauben, Ridepooling-Dienste detailgetreu zu evaluieren (Maciejewski, 2016). Auch die explizite Betrachtung fahrerbasierter Services inklusive Fahrer:innenschichten, -pausen sowie das (Ent-)Ladeverhalten elektrischer Fahrzeuge ist möglich¹³. Mithilfe der Ergebnisse aus MATSim sind detaillierte Auswertungen zu Flottenauslastung, Ladezyklen, gefahrene Kilometer inkl. Leerkilometer, Poolingquote u.v.m. möglich. Die Dispatching-Logik der Flottensimulation basiert ausschließlich auf den quelloffenen Algorithmen und liefert daher anbieterneutrale und akademisch anerkannte Ergebnisse.

Da die Nachfrage bereits aus dem Nachfragemodell MITO kommt, wird MATSim in dieser Studie als reines Umlegungsmodell für die Flottensimulation verwendet, in dem die Nachfrage fixiert ist.

¹¹ Jäger, B., Wittmann, M., Lienkamp, M. Analyzing and Modeling a City's Spatiotemporal Taxi Supply and Demand: A Case Study for Munich. Journal of Traffic and Logistics Engineering, Vol. 4, No. 2, S. 147-153, 2016. <https://doi.org/10.18178/jtle.4.2.147-153>

¹² Horni, A., Nagel, K., Axhausen, K.W. (Hrsg.) The Multi-Agent Transport Simulation MATSim. 2016 Ubiquity Press, London. <http://dx.doi.org/10.5334/baw>

¹³ Zwick, F., Kuehnel, N und Hörnl, S. Shifts in perspective: Operational aspects in (non-)autonomous ride-pooling simulations. Transportation Research Part A: Policy and Practice (165) 2022. S. 300-320. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.09.001>

3 Betriebsparameter

Die Konfiguration der Betriebsparameter wurde in Abstimmung mit der Auftraggeberin festgelegt und beinhaltet im Wesentlichen folgende Parameter:

- Maximal 30% Umweg für gepoolte Fahrten, maximal 20 Minuten absolut, 5 Minuten Umweg sind immer erlaubt
- Keine Fahrten unter 1 km
- Maximale Wartezeit von 30 Minuten, angestrebt werden 15 Minuten
- Angestrebte maximale Zu- und Abgangswege von 300-350 Meter
- Fahrzeuge mit 6 Sitzplätzen für Fahrgäste
- Batteriekapazität von 77kWh
- Angenommener durchschnittlicher Verbrauch von 30 kWh pro 100 km

Die Details der Umsetzung und Limitierungen in der Flottensimulation mit MATSim sind in der Anlage aufgeführt. Im weiteren Verlauf verwendete Begriffe werden in Tabelle 3 kurz definiert.

Tabelle 3: Begriffsklärung

Begriff	Definition
Buchung	Entspricht einer Fahratanfrage, kann mehrere Fahrgäste als Gruppe umfassen.
Fahrt	Eine beförderte Person – eine Buchung mit drei Fahrgästen in einer Gruppe entspricht drei Fahrten.
Bedienquote	Anteil der Fahrten, die befördert und nicht vom System abgelehnt worden sind.
Poolingquote	Anteil der Buchungen, die während der Fahrt einen Teil der Strecke mit mindestens einer anderen Buchung teilen (eine für sich fahrende Gruppe gilt nicht als gepoolt).
Personenkilometer	Anzahl der besetzten Kilometer, gewichtet nach der Passagieranzahl (ein Fahrzeug, das mit drei Fahrgästen einen Kilometer zurücklegt, ergibt drei Personenkilometer).
Durchschnittl. Besetzung	Durchschnittliche Anzahl an Fahrgästen im Fahrzeug, bezogen auf die Strecke (= Personenkilometer geteilt durch alle gefahrenen Kilometer, inkl. Leerkilometer).
Besetzungszahl	Durchschnittliche Anzahl an Fahrgästen im Fahrzeug, bezogen auf die produktive Strecke (= Personenkilometer geteilt durch Besetzungskilometer, also exklusive Leerkilometer).
Wartezeit	Die Wartezeit wird definiert vom Zeitpunkt der Fahratanfrage bis zum Zeitpunkt der Abholung des Fahrgastes.
Reisezeit	Die Reisezeit ist die Dauer der Fahrt, exklusive der Warte- sowie Zu- und Abgangszeit.

3.1 Eingangsparameter

3.1.1 Physische und virtuelle Infrastruktur

Wie im klassischen ÖPNV-Betrieb werden auch für einen On-Demand-Service Betriebshöfe benötigt, in denen ausreichend Stellplätze für die Flotte bereitstehen. Des Weiteren können dort operative Aufgaben wie Waschen und Laden sowie kleinere Reparaturen durchgeführt werden. Da die Fahrer:innen dort ihre Schichten beginnen und beenden sowie Pausen durchführen, ist die Wahl der Standorte auch entscheidend für eine Reduzierung möglicher Leerkilometer, da die Fahrten in und aus dem Servicegebiet in der Regel ohne Fahrgäste stattfinden. In einem autonomen Betrieb ist dieser Einfluss gegebenenfalls geringer, da dort z.B. die Fahrer:innenpausen entfallen.

Neben der physischen Infrastruktur arbeiten On-Demand-Dienste in der Regel mit einem virtuellen Haltestellennetzwerk, bei denen Fahrgäste jeweils kurze zumutbare Zu- und Abgangswege bei Ein- und Ausstieg zurücklegen müssen. Dies unterscheidet vor allem gepoolte On-Demand-Dienste von klassischen Ride-Hailing und Taxi-Diensten, die einen Tür-zu-Tür Service anbieten. Der Vorteil eines haltestellenbasierten Services ist, dass Fahrgäste räumlich besser gebündelt und dadurch Leerkilometer reduziert werden können. Außerdem können dadurch auch verkehrspolitische und -technische Ziele verfolgt werden. Zum Beispiel kann durch strategische Verortung der Haltepositionen erwirkt werden, dass Fahrzeuge seltener durch Wohnstraßen fahren, um Straßenlärm gering zu halten. Zusätzlich kann die Wahl der Haltestellen auch beeinflussen, an welchen Stellen der Verkehr durch haltende Fahrzeuge gestört werden könnte (Stueger, Fehn, & Bogenberger, 2023). Eine weitere Dimension ist die der Barrierefreiheit, da Haltestellen auch für mobilitätseingeschränkte Personen erreichbar sein sollten. Dafür kann es sich anbieten, Haltestellen zu klassifizieren, sodass z.B. Rollstuhlfahrer:innen nur an bestimmten Haltestellen zu- und aussteigen können. Im Idealfall sind möglichst viele Haltestellen barrierefrei.

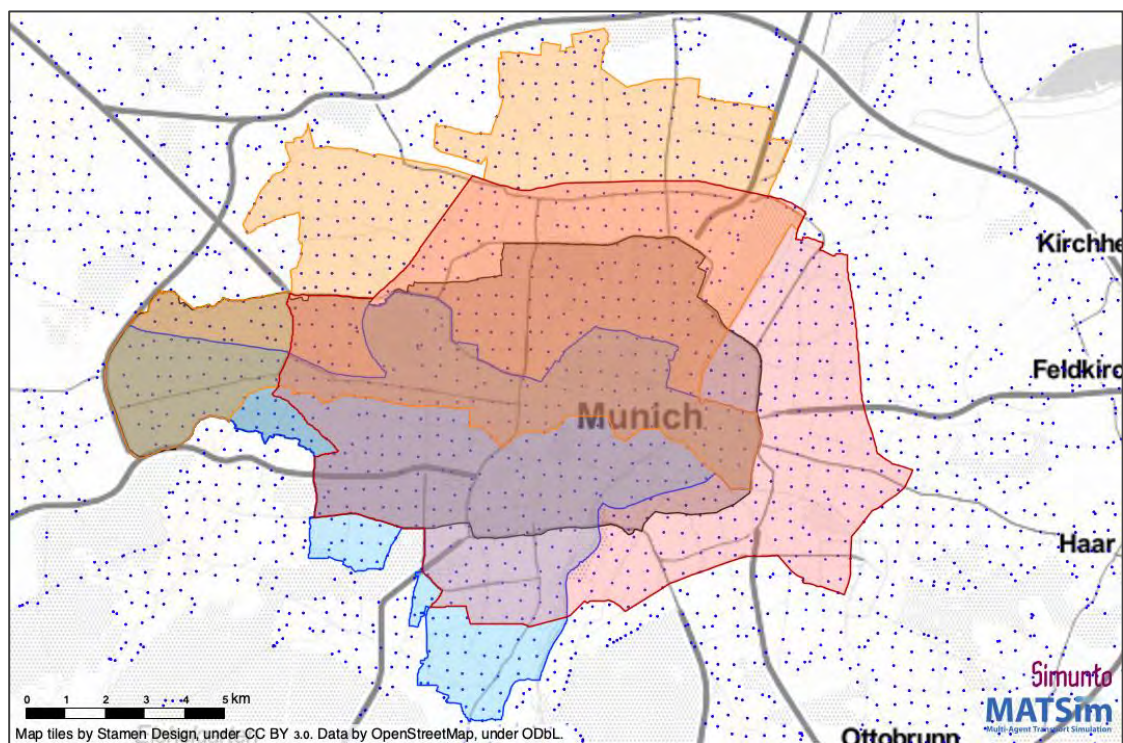


Abbildung 9: Haltestellennetz im Modell.

In Absprache mit der Auftragsgeberin wurde ein Haltestellennetzwerk mit ungefähr 250 Meter Radius und ca. 300-350 Meter Laufdistanz zwischen den einzelnen Haltestellen angestrebt. Für die weitere Vorgehensweise in der modellgestützten Betriebskonzeption wurde ein vereinfachtes Haltestellennetzwerk angenommen, in der in einem hypothetischen Netz alle 450 Meter eine Haltestelle verortet wird. Dadurch ergibt sich eine hypothetische maximale Distanz von ca. 318 Meter. Da die jeweilige Haltestelle an die nächstgelegene Kante im Straßennetzwerk verschoben wird, kann es aber auch zu größeren Distanzen kommen, insbesondere wenn Anfragen von nicht direkt zugänglichen Orten wie z.B. in der Mitte des Olympiaparks oder der Theresienwiese gestellt werden. Auch ungünstige Straßengeometrien bzw. natürliche Barrieren wie die Isar oder größere Bahnanlagen können die Laufdistanz vergrößern. Die Haltestellen innerhalb der verschiedenen Bediengebiete sind in Abbildung 9 abgebildet. Der Algorithmus zur Erstellung der Haltestellen erstreckt sich über einen größeren Bereich als den Bereich, der durch die Bediengebiete abgedeckt wird. Diese Haltestellen werden im Modell jedoch nicht bedient, da dort auch keine Nachfrage generiert wird.

3.1.2 Tarife

Einer der wichtigsten Eingangsparameter der Nachfrageabschätzung ist das Preismodell. Eine Übersicht der während des Projekts, in Abstimmung mit der Auftraggeberin, entwickelten Tarifmodelle ist in Abbildung 10 dargestellt. Grundsätzlich gibt es zwei Tarife, die sich vor allem in der Handhabung der Grundpreise sowie der Rabatte unterscheiden. Während Tarif 1 immer einen Grundpreis beinhaltet, entfällt der Grundpreis in Tarif 2 komplett für Inhaber:innen eines ÖV-Tickets. In Tarif 1 gibt es jedoch je Buchung einen Rabatt von 2 € bei Vorhandensein eines ÖV-Tickets.

Beide Tarife beinhalten zudem einen distanzabhängigen Leistungspreis von 0,70 € pro Kilometer. Dieser Leistungspreis wird je nach ÖV-Qualität und zu Stoßzeiten mit Faktoren angepasst.

Während der Projektlaufzeit wurden zwei weitere Varianten des Tarif 1 entwickelt. Tarif 1a sieht eine Rabattierung des Leistungspreises während nachfrageschwächerer Zeiten unter der Woche vor, mit dem Ziel, eine gleichmäßigere Fahrzeugauslastung in den beiden kleineren Szenarien Südwest und Nordwest zu erreichen. Tarif 1b sieht eine grundsätzlich deutlich höhere Bepreisung vor, mit einem Grundpreis von 4 € sowie einem Grundleistungspreis von 0,90 € pro Kilometer. Zusätzlich gibt es eine deutlich stärkere Bepreisung zu den Spitzenzeiten am Freitag und Samstag. Grundlage dieser Entscheidung war die Eindämmung der Nachfrage im Herzstück-Szenario, um die generierte Nachfrage mit einer kleineren Flotte bedienen zu können.

Tarif 1		Tarif 2	
3,70 € Grundpreis Gestaffelter Preis für jede weitere Person 0,70 € pro km Leistungspreis Faktor 0,5 auf Leistungspreis bei schlechter ÖV-Verbindung Faktor 1,5 auf Leistungspreis bei guter ÖV-Verbindung Faktor 1,5 auf Leistungspreis zu Spitzenzeiten am Wochenende (19-24 Uhr Fr u. Sa.) 2 € Rabatt für ÖV-Tickets je Buchung		3,70 Grundpreis für jede Person ohne ÖV-Ticket 0,00 € Grundpreis für Person mit ÖV-Ticket 0,70 € pro km Leistungspreis Faktor 0,5 auf Leistungspreis bei schlechter ÖV-Verbindung Faktor 1,5 auf Leistungspreis bei guter ÖV-Verbindung Faktor 1,5 auf Leistungspreis zu Spitzenzeiten am Wochenende (19-24 Uhr Fr u. Sa.) Kein Rabatt	
↓ Südwest, Nordwest		↓ Herzstück	
Tarif 1a – Rabattierung nachfrageschwächerer Zeiten		Tarif 1b – Aufschlag für Nachfragespitzen	
3,70 € Grundpreis 1,50 € für jede weitere Person 0,70 € pro km Leistungspreis Faktor 0,5 auf Leistungspreis bei schlechter ÖV-Verbindung Faktor 1,5 auf Leistungspreis bei guter ÖV-Verbindung Faktor 0,5 auf Leistungspreis Montag – Freitag sowie Sonntag Faktor 1,5 auf Leistungspreis zu Spitzenzeiten am Wochenende (19-24 Uhr Fr u. Sa.) 2 € Rabatt für ÖV-Tickets je Buchung		4,00 € Grundpreis 1,50 € für jede weitere Person 0,90 € pro km Leistungspreis Faktor 0,5 auf Leistungspreis bei schlechter ÖV-Verbindung Faktor 1,5 auf Leistungspreis bei guter ÖV-Verbindung Faktor 2,0 auf Leistungspreis zwischen 16:00 und 02:00 jeweils Freitag und Samstag 1 € Rabatt für ÖV-Tickets je Buchung	
Für alle gilt: Taxi-Tarif als Höchstpreis je Buchung (5,50 km Grundpreis + 2,50 €/km)			

Abbildung 10: Übersicht der untersuchten Tarifvarianten

Zusätzliche Bestimmungen zu Tarif 1 und 2 beinhalten besondere Bedingungen für Kinder sowie gestaffelte Preise für Mitfahrende und Mindestendpreise in Tarif 1. Die Bestimmungen sind in Abbildung 11 gegenübergestellt.

Tarif 1 - Zusatzbestimmungen	Tarif 2 - Zusatzbestimmungen
Kinder zahlen als Mitfahrende 1,00 € Allein fahrende Kinder zahlen 50% des Endpreises Mindestendpreise für Buchungen ohne ÖV-Ticket: 1 Person 3,70 € 2 Personen 6,80 € 3 Personen 10,20 € 4 Personen 13,60 € 5 Personen 17,00 € 6 Personen 21,00€ Gestaffelte Preise für Mitfahrende: 1. Mitfahrende 2,50 € 2. Mitfahrende 2,00 € 3. Mitfahrende 1,50 € 4. Mitfahrende 1,50 € 5. Mitfahrende 1,50 €	Kinder erhalten als Mitfahrende keinen Rabatt. Allein fahrende Kinder erhalten 50% Rabatt auf den Distanzpreis Keine Mindestendpreise Keine gestaffelten Preise für Mitfahrende

Abbildung 11: Zusatzbestimmungen zu den Tarifen

In den stadtweit autonomen Szenarien werden zum einen der unveränderte Tarif 1 sowie eine reduzierte Version mit einem Grundpreis von 2€ und einem Distanzpreis von 0,45 €/km angenommen. Die Ergebnisse beider Szenarien werden im weiteren Verlauf vorgestellt.

3.1.3 Weitere Modellannahmen

Für die Flottensimulation wird für Haltevorgänge eine konstante Haltezeit von 60 Sekunden angenommen. Es wurde festgelegt, dass Umwege für das Poolen die Fahrtzeit um nicht mehr als 30% überschreiten sollte. Das ist sinnvoll, um zu vermeiden, dass eine Fahrt von 15 Minuten wegen Pooling plötzlich 30 Minuten dauert. Bei kurzen innerstädtischen Fahrten muss diese Einschränkung aber etwas gelockert werden. Bei zum Beispiel einer direkten Fahrtzeit von 7 Minuten verlängert sich die Reisezeit um 15% allein durch die Haltezeit von 60 Sekunden für den Zustieg eines zusätzlichen Passagiers, ohne dass dabei ein Umweg gefahren wurden. Um höhere Poolingquoten zu erreichen, werden daher 5 Minuten Umwegezeit immer akzeptiert, auch wenn die direkte Fahrtzeit kurz wäre.

3.2 Modellableitungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Nachfragemodellierung sowie anschließender Flottensimulation dargestellt. Dabei werden zuerst die Ergebnisse des fahrerbasierten Betriebs mit Tarif 1 im Detail ausgeführt. Anschließend wird kurz vergleichend auf Ergebnisse des Tarif 2 eingegangen. In einem weiteren Schritt erfolgt eine Sensitivitätsanalyse verschiedener Tarifvariationen basierend auf Tarif 1 beispielhaft am größten Bedienegebiet Herzstück. Darauf aufbauend werden drei weitere Variationen vorgestellt, die eine höhere zeitliche Dynamik im Tarif untersuchen. Abschließend werden die beiden autonomen Szenarien vorgestellt.

3.2.1 Szenarien unter Anwendung von Tarif 1

Es werden einige Abbildungen präsentiert, um die Verteilung der ODM-Buchungen unter Anwendung des Tarif 1 zu veranschaulichen. Diese Abbildungen geben Aufschluss darüber, wer die potenziellen Nutzer:innen von ODM sind und wann und wo ODM-Fahrten stattfinden.

Die folgenden Balkendiagramme zeigen die Verteilung des Wegezwecks (Abbildung 13). Das erste Diagramm zeigt die Verteilung aller Fahrten in der Stadt München auf der Grundlage von Beobachtungsdaten aus dem Jahr 2017. Die anderen Diagramme zeigen die Verteilung der ODM-Buchungen in jedem Servicebereich. Die drei häufigsten Zwecke von ODM-Fahrten sind "Wegekette ohne Arbeit" (zum Beispiel von einem Geschäft zu einem Restaurant), "Wegekette mit Arbeit" (zum Beispiel nach der Arbeit ins Restaurant gehen) und "Freizeit". Im Allgemeinen dienen ODM-Fahrten hauptsächlich Freizeitzwecken. Im Gegensatz zu den anderen Szenarien hat das Szenario Nordwest einen hohen Anteil an "Wegeketten mit Arbeit"-Fahrten. Dies könnte daran liegen, dass das Szenario Nordwest das Industriegebiet Euro Industriepark im Norden von München abdeckt, wo eine hohe Dichte an Arbeitsplätzen vorhanden ist.

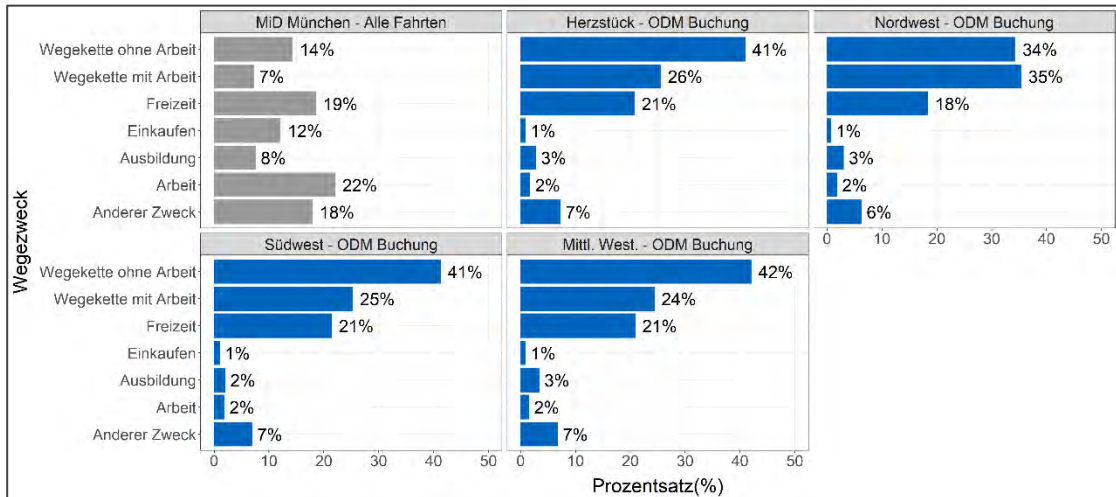


Abbildung 12: Die Verteilung der Buchungen nach Wegezweck

Wie in Abbildung 13 gezeigt, werden die meisten Fahrten in München von einer Person durchgeführt. ODM-Buchungen weisen in allen Szenarien ein ähnliches Muster auf. Über siebzig Prozent der ODM-Fahrten sind Buchungen für eine Person.

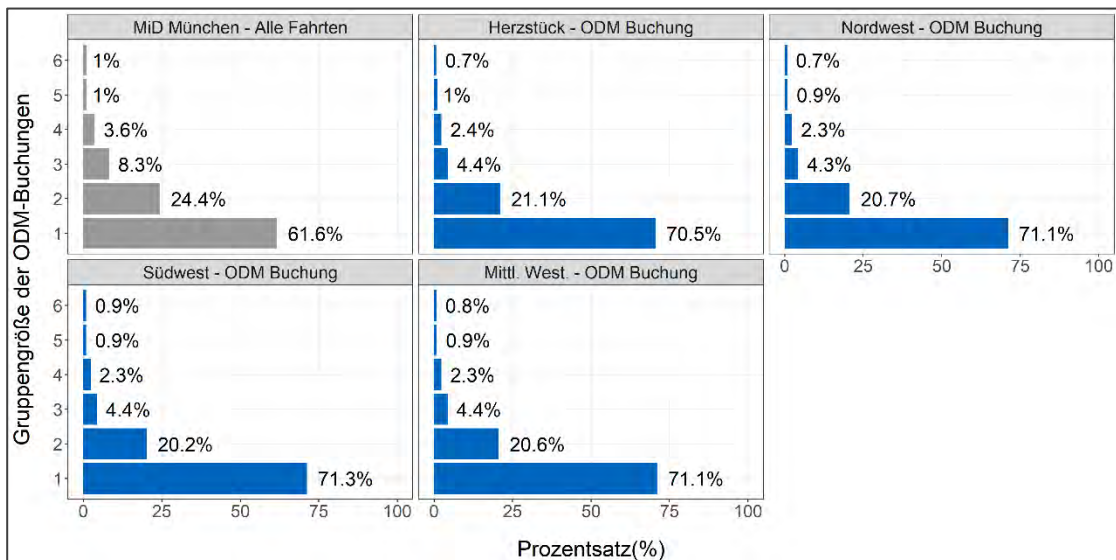


Abbildung 13: Die Verteilung der Buchungen nach Gruppengröße

Abbildung 14 zeigt, wie viele Personen in der Gruppe ein ÖPNV-Ticket besitzen. Alle Szenarien weisen ähnliche Muster auf. Bei Buchungen für nur eine Person hat etwa die Hälfte der Personen kein ÖPNV-Ticket. Bei Buchungen für zwei oder mehr Personen hat bei der Mehrzahl der Buchungen mindestens eine Person ein ÖPNV-Ticket. Im Allgemeinen erhalten 56% der ODM-Buchungen einen Rabatt. Es ist wichtig zu beachten, dass es im Allgemeinen eine gewisse Unsicherheit gibt, da derzeit keine verlässlichen Daten zur Verbreitung und Nutzung des Deutschland-Tickets vorliegen. Es wird jedoch erwartet, dass das Deutschland-Ticket den Anteil der Kund:innen mit einem öffentlichen Nahverkehrsticket erhöhen wird. Einerseits stellt das Deutschland-Ticket eine attraktive Option für Reisende dar, was zu einer höheren Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs führen könnte. Andererseits erhalten Deutschland-Ticket-Inhaber:innen einen Rabatt für die Nutzung von ODM, was sich auf die vermehrte Nutzung von ODM auswirken wird.

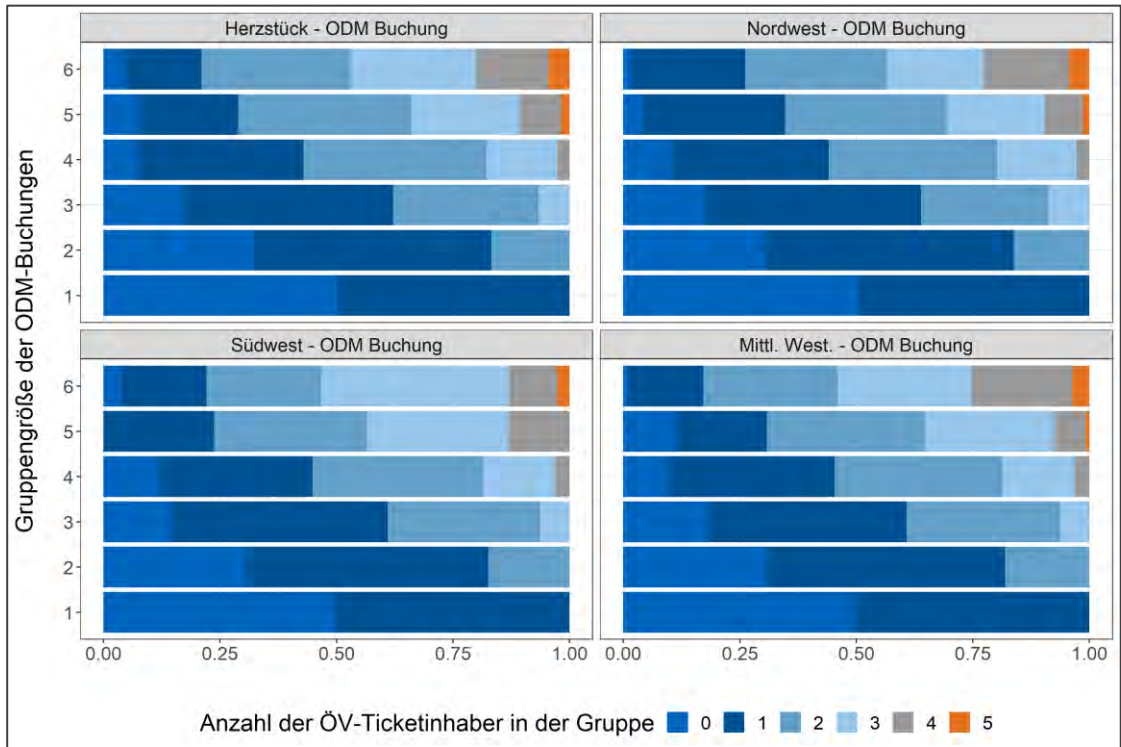


Abbildung 14: Die Verteilung der Buchungen nach Anzahl der ÖV-Ticketinhaber

Abbildung 15 zeigt, wie viele Kinder Bestandteil einer ODM-Gruppenbuchung sind. Im Allgemeinen reist ein Kind selten allein mit ODM. Die Mehrheit der ODM-Buchungen besteht aus Erwachsenengruppen. Häufige Fälle mit Kindern sind Buchungen für 3 Personen mit 1 Kind oder Buchungen für 4 Personen mit 2 Kindern, was auf Buchungen von Familien hinweist.

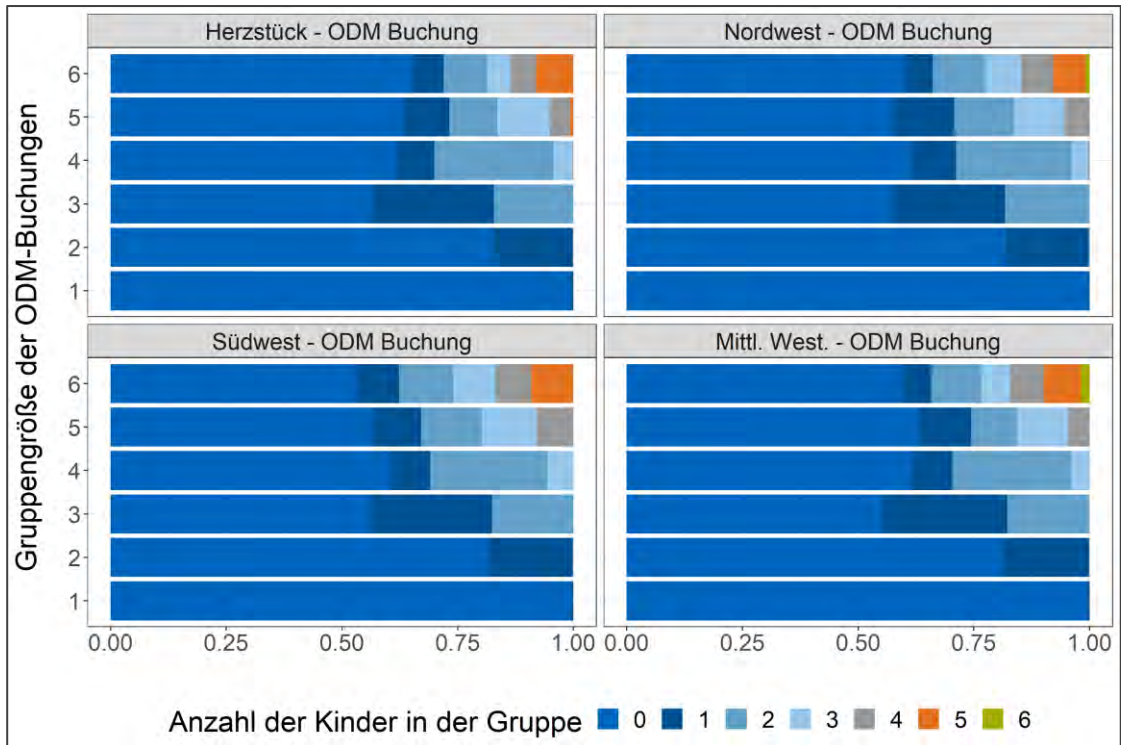


Abbildung 15: Die Verteilung der Buchungen nach Anzahl der Kinder in der Gruppe

Flottensimulation

Abbildung 16 verdeutlicht die Verteilung der Distanzen der Zu- und Abgangswege beispielhaft für das Herzstück. Es ist zu erkennen, dass ein Großteil der Wege unter der gewünschten Maximaldistanz von 350 Metern liegt. Der Mittelwert beträgt 227 Meter, der Median beträgt 231 Meter. Dennoch ergibt sich aufgrund der in der Methodik beschriebenen Sonderfälle in insgesamt 8% aller ODM-Fahrten eine größere Distanz als 350 Meter bei den Zu- oder Abgangswegen. Insgesamt liegen jedoch 98% aller Laufwege unter 400 Meter. Diese grundlegende Verteilung ändert sich zwischen den verschiedenen Szenarien nur minimal.

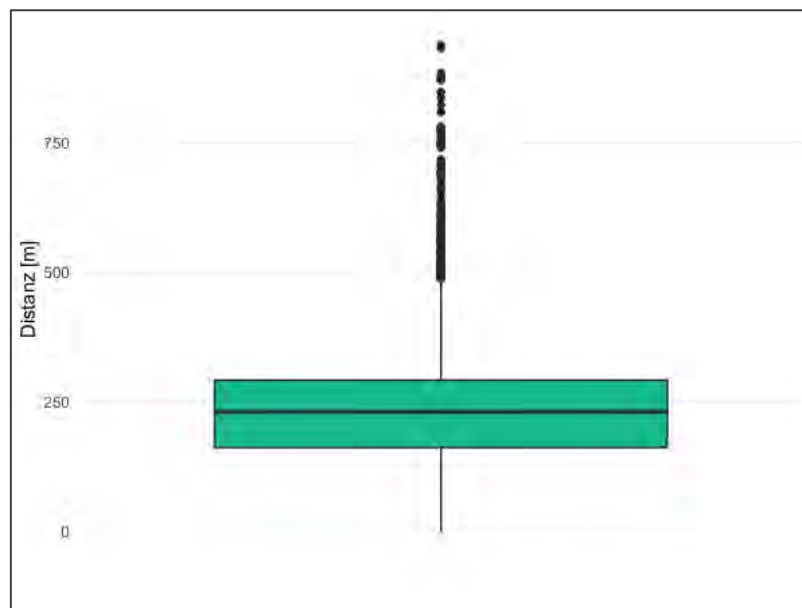


Abbildung 16: Distanzverteilung der Zu- und Abgangswege, beispielhaft für das Herzstück

Tabelle 4 zeigt die Übersicht wichtiger Servicequalitätsparameter. Alle vier Szenarien wurden so optimiert, dass sie eine vergleichbare Bedienquote um die 93-94% erreichen, womit die gesetzte Mindestakzeptanzquote von 90% übertroffen wird. Die durchschnittliche Reisezeit nimmt mit Größe des Bedienegebietes und den damit möglichen Fahrt-Distanzen zu und bewegt sich zwischen 11 und 14 Minuten. Die durchschnittliche Wartezeit bewegt sich in allen Szenarien um die 6-7 Minuten.

Hierbei sei angemerkt, dass die Wartezeit in MATSim richtig interpretiert werden muss, da die Agenten in der Simulation die Fahrthanfrage erst bei Erreichen der Haltestelle stellen. In der Realität stellen die Fahrgäste die Fahrthanfrage bereits vor dem Zugangsweg. Auf die Simulationsergebnisse hat dies jedoch nur vernachlässigbare Auswirkungen, da dies lediglich einer leichten zeitlichen Verschiebung der Nachfrage gleichkommt. Weiterhin gibt es On-Demand-Dienste, wie etwa MOIA in Hamburg, bei denen die Wartezeit keine resultierende Größe der Optimierung ist, sondern eher ein Eingangsparameter des Fahrtwunsches, da die Kund:innen bei der Buchung selbst angeben, in welchem zeitlichen Abstand sie die Fahrt antreten wollen.

In jedem Fall dient die durchschnittliche Wartezeit als guter Indikator für die Verfügbarkeit der Flotte. Sie liegt in allen Szenarien deutlich unter der maximalen Wartezeit von 30 Minuten. Der durchschnittliche Umweg steigt mit Größe des Bedienegebietes und der Anzahl der Fahrten an. Der Grund dafür liegt vor allem an der besseren und effizienteren Möglichkeit Fahrten zu poolen, was sich auch in der steigenden Poolingquote widerspiegelt. Zur Einordnung wird beispielsweise berichtet, dass der randstädtische ODM -Service KNUT eine Pooling-Quote von 26% erreicht¹⁴. Der urbane MOIA-Betrieb in Hamburg erreicht ähnlich dem Ergebnis im Herzstück eine Pooling-Quote

¹⁴ Dietl, K., Rupprecht, L. und Schreiber, T. Erfolge und Herausforderungen randstädtischer On-Demand-Verkehre am Beispiel KNUT. DER NAHVERKEHR 05/2023 S.50-54

von 60%¹⁵. Auch der ehemalige Clevershuttle-Betrieb in München (dessen Servicegebiet dem Herzstück am nächsten kam) sowie der Isartiger erzielten eine Pooling-Quote von über 60%¹⁶.

Tabelle 4: Servicequalität Tarif 1, Werte für eine typische Woche

	Fahrten	Bedien- -quote	Durchschnittl. . Reisezeit	Durchschnittl. Umweg	Durchschnittl. Wartezeit
Südwest	13.870	93%	11:37 min	10%	6:42 min
Nordwest	26.365	93%	12:43 min	11%	6:50 min
Mittl. West.	23.309	93%	12:48 min	12%	6:45 min
Herzstück	43.865	94%	13:57 min	14%	6:53 min

Die insbesondere für die Kostenauswertung relevanten Kennzahlen sind in Tabelle 5 aufgeführt. Mit steigender Nachfrage werden naturgemäß auch mehr Fahrer:innenstunden benötigt, um die Szenarien bedienen zu können. Während die Erlöse mehr oder wenig linear mit der Nachfrage steigen, steigen die benötigten Fahrer:innenstunden nicht notwendigerweise im selben Maße, da die steigende Effizienz in den größeren Szenarien relative Einsparungen bei den Fahrer:innenstunden erlaubt. Dies wird besonders in den Fahrten pro Fahrer:innenstunde und dem Erlös pro Fahrer:innenstunde ersichtlich, die mit steigender Nachfrage(-dichte) ansteigen. Da sich naturgemäß auch die Spitzenstunden der Nachfrage zum Teil deutlich unterscheiden, müssen auch unterschiedliche Flottengrößen für den Betrieb vorgehalten werden. Die genaue Flottengröße ist nicht komplett trennscharf zu ermitteln, da es z.B. nach Bedarf auch möglich ist, während der Nachfragespitzen noch mehr Ablehnungen zuzulassen, oder die Nachfrage durch eine höhere Preis-Dynamik zu steuern. Es wurden deshalb sinnvolle Bandbreiten vorgeschlagen. Die eigentliche Flottengröße ist letztendlich auch abhängig von der Effizienz und Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur sowie der Ausfallquote für Reparatur und Wartung der Fahrzeuge.

Tabelle 5: Betriebliche Kennzahlen Tarif 1, Werte für eine typische Woche

	Fahrer- stunden	Erlöse	Fahrten pro Fahrerstunde	Erlös pro Fahrerstunde	Benötigte Flottengröße	Strom- verbrauch
Südwest	4.047 h	56.702 €	3.4 1/h	14.07 €/h	70-75	21.190 kW
Nordwest	7.484 h	108.857 €	3.5 1/h	14.59 €/h	100-105	43.950 kW
Mittl. West.	6.146 h	97.465 €	3.8 1/h	15.90 €/h	100-105	34.700 kW
Herzstück	11.554 h	190.663 €	3.8 1/h	16.63 €/h	185-195	68.704 kW

Um die ermittelte Flottengröße einzuordnen, lohnt sich ein Blick auf die Vorschläge des VDV (siehe Abbildung 17), nach denen etwa 1 Fahrzeug je 5.000 Einwohnenden in Gebieten mit hoher Siedlungsdichte empfohlen wird. Nach dieser simplen Logik wären dies:

- 98 Fahrzeuge im Südwest Szenario
- 118 Fahrzeuge im Nordwest Szenario
- 131 Fahrzeuge im Szenario Mittlerer Westen
- 200 Fahrzeuge im Herzstück

¹⁵ MOIA Factsheet, Stand Mai 2023 [https://www.moia.io/news-center/MOIA Factsheet Hamburg Mai DE.pdf](https://www.moia.io/news-center/MOIA_Factsheet_Hamburg_Mai_DE.pdf)

¹⁶ <https://vision-mobility.de/news/clevershuttle-neuer-hub-in-muenchen-und-fokus-auf-erfolgsstandorte-5007.html>

	hohe	mittlere	geringe
Qualitätsvorgaben	Siedlungsdichte		
Maximale Wartezeit als Zielgröße (abhängig von Siedlungsdichte und tageszeitlicher Nachfrage)	max. 15 Min.	max. 25 Min.	max. 50 Min
Mittlere Wartezeit	7,5 Min.	15. Min.	30 Min
Angebotsquote als Zielgröße (Fahrtvorschläge im Verhältnis zu gesamter Anzahl der Anfragen unter Beachtung der maximalen Wartezeit)	> 95%	80%* -95%	70%* -90%
Zulässige Umwegdistanz (als Verlängerung der Fahrtzeit, mindestens 5 Minuten sind zu akzeptieren; ggf. absolute Begrenzung in Abhängigkeit des Bedienegebiets und durchschnittlicher Fahrtzeiten)	max. 30%	max. 50%	max.100%**
Fahrzeuge je Bedienegebiet (Eingesetzte Fahrzeuge je Einwohner oder eingesetzte Fahrzeuge je Quadratkilometer)	1 Fzg. je 5.000 Ew.	1 Fzg. je 5.000 – 10.000 Ew.	1 Fzg. je 100 km ² (100 Ew./km ²)

* - Bei Überschreiten der maximalen Wartezeit kommt es zum Abbruch oder der Kunde erhält eine Information darüber, wann die nächste Fahrtmöglichkeit besteht.

** Im dispersen Raum nur im Einzelfall, falls Fahrtanfrage eines anderen Kunden ansonsten abgebrochen werden müsste

Abbildung 17: Vorgeschlagene Qualitätsvorgaben aus dem VDV-Positionspapier zu On-Demand-Verkehren¹⁷.

Die Ergebnisse der Flottensimulation können gut mit dem Verlauf der Belegungsgrade über die gesamte Woche dargestellt werden. Diese sind für das Südwest-Szenario (Abbildung 18), das Nordwest-Szenario (Abbildung 19), das Szenario Mittlerer Westen (Abbildung 20) sowie das Herzstück (Abbildung 19) aufgeführt.

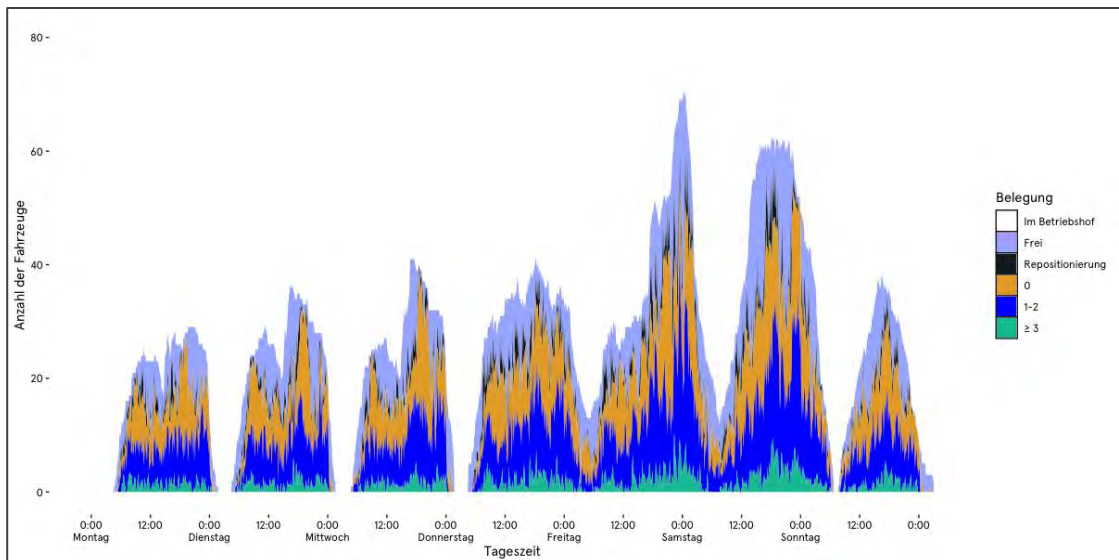


Abbildung 18: Belegungsgrade über den Verlauf der Woche im Südwest-Szenario

¹⁷ Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. Linienbedarfsverkehr: zukunftsgerichtet, integriert und nachfragegesteuert. VDV Positionspapier 2023
https://www.vdv.de/positionensuche.aspx?id=ecb3bf26-1e30-42ba-80b9-579f839075a9&mode=detail&coriander=V3_7c7a7ede-97d1-9208-360f-18b1f63f0d2d

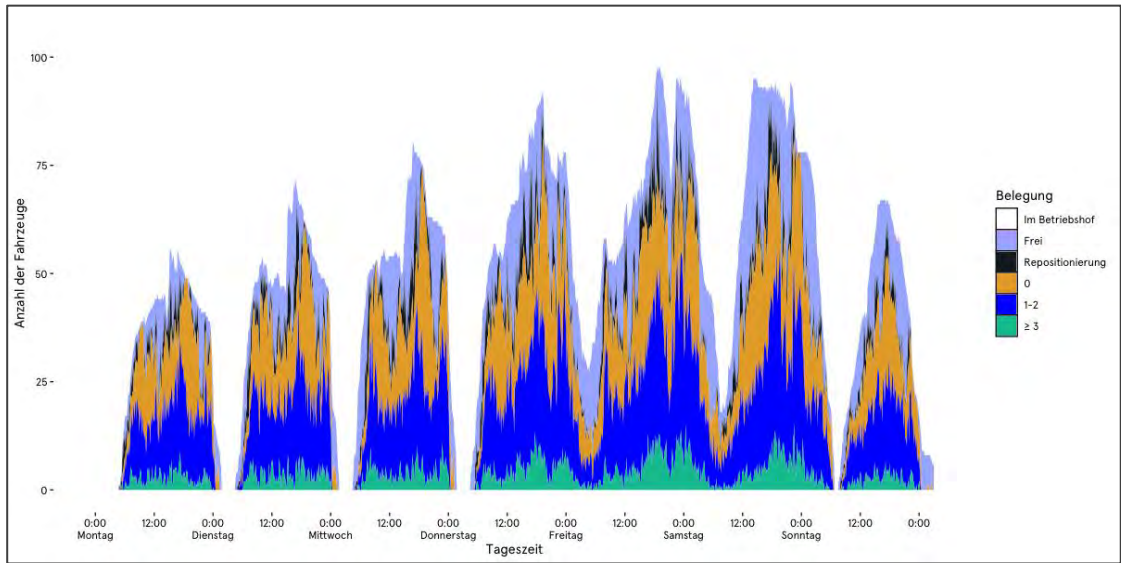


Abbildung 19: Belegungsgrade über den Verlauf der Woche im Nordwest-Szenario

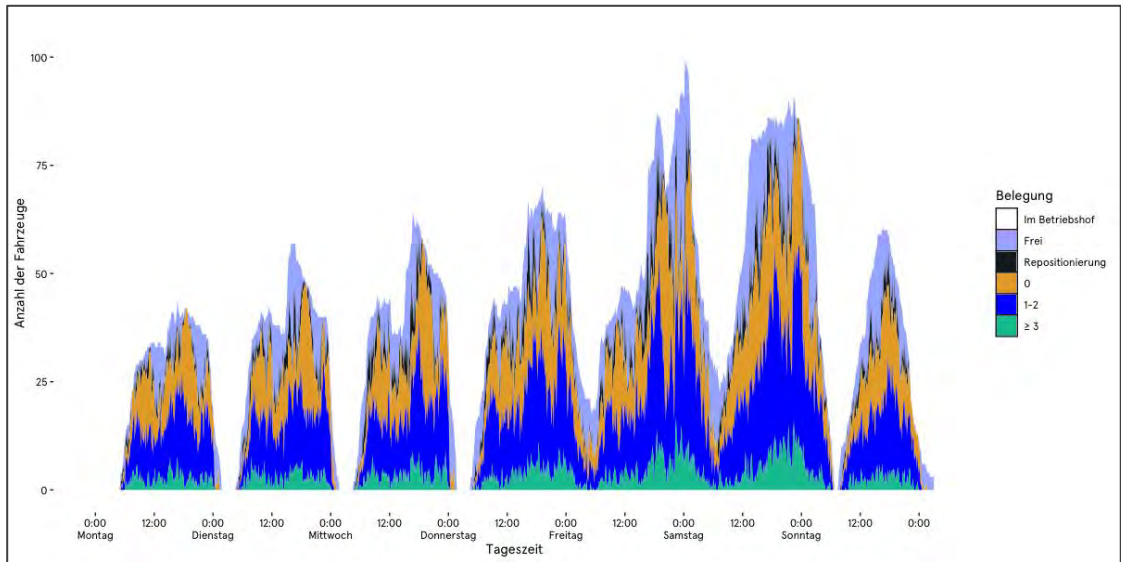


Abbildung 20: Belegungsgrade über den Verlauf der Woche im Mittlerer Westen Szenario

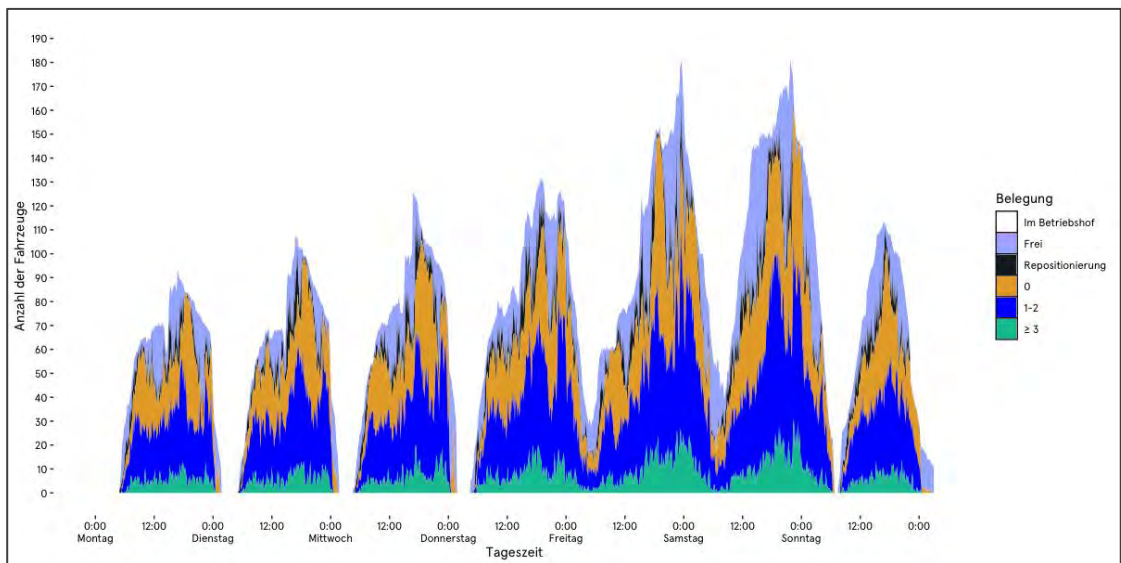


Abbildung 21: Belegungsgrade über den Verlauf der Woche im Herzstück-Szenario

3.2.2 Szenarien unter Anwendung von Tarif 2

Im Allgemeinen haben Szenarien mit Tarif 2 immer eine höhere Nachfrage im Vergleich zu Szenarien mit Tarif 1. Es werden etwa 20% mehr ODM-Fahrten nachgefragt. Dies liegt daran, dass der Grundpreis in Tarif 2 für Inhaber:innen einer ÖV-Tickets vollständig erlassen wird. Dies zieht mehr Fahrgäste, die bereits den öffentlichen Verkehr nutzen an, ODM zu nutzen. Insgesamt erhalten etwa 65% der ODM-Buchungen in Szenarien mit Tarif 2 einen der definierten Rabatte.

In den Szenarien, die mit Tarif 2 simuliert worden, sind die Gruppen relativ klein. Dies liegt daran, dass eine Einzelbuchung in Tarif 2 für Personen mit ÖV-Tickets deutlich günstiger ist. Dies führt dazu, dass der Anteil der Einzelbuchungen in Tarif 2 im Vergleich zu Szenarien mit Tarif 1 höher ist und weniger Gruppenbuchungen stattfinden.

Die Ergebnisse der Flottensimulation für die Szenarien mit Tarif 2 sind in Tabelle 6 sowie Tabelle 7 dargestellt. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die Szenarien in Tarif 2 im Vergleich zu Tarif 1 zum einen verkehrlich effizienter im Sinne der Poolingquote (höher) und Leerkilometer (niedriger) werden, da mit steigender Nachfrage das Teilen von Fahrten wahrscheinlicher wird. Zum anderen wird der Service in Bezug auf Besetzung und durchschnittlicher Besetzung aber ineffizienter, was daran liegt, dass die durchschnittliche Gruppengröße in Tarif 2 geringer ist. Der Durchschnittserlös pro Buchung ist in Tarif 2 geringer als in Tarif 1. Gleichzeitig muss mehr Nachfrage bedient werden, was sich in einer höheren Anzahl an Fahrer:innenstunden widerspiegelt. Konsequenterweise liegt der Erlös je Fahrer:innenstunde zwischen 12% und 20% niedriger als in Tarif 1. Insgesamt werden also mehr Fahrer:innenstunden benötigt, die stärker subventioniert werden müssen als in Tarif 1, was sich stark auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt. Zudem müssen in diesen Szenarien größere Flotten vorgehalten werden, um der Nachfrage gerecht zu werden.

Da das Bedienegebiet Mittlerer Westen erst spät im Laufe des Projekts als zusätzliche Variante untersucht wurde, wurde Tarif 2 dort nicht betrachtet.

Tabelle 6: Servicequalität Tarif 2, Werte für eine typische Woche

	Fahrten	Bedien- -quote	Durchschnittl . Reisezeit	Durchschnittl. Umweg	Durchschnittl. Wartezeit
Südwest	15.994	91%	11:37 min	10%	7:00 min
Nordwest	30.581	93%	12:36 min	12%	6:52 min
Mittl. West.	-	-	-	-	-
Herzstück	50.542	93%	14:02 min	14%	6:51 min

Tabelle 7: Betriebliche Kennzahlen Tarif 2, Werte für eine typische Woche

	Fahrer- stunden	Erlöse €	Fahrten pro Fahrerstunde	Erlös pro Fahrerstunde	Benötigte Flottengröße	Strom- verbrauch kW
Südwest	4.343 h	53.860 €	3,7 1/h	12.41 €/h	80-85	24.734 kW
Nordwest	8.247 h	103.849 €	3,7 1/h	12,63 €/h	130-135	50.674 kW
Mittl. West.	-	-	-	-	-	-
Herzstück	13.893 h	183.847 €	3,6 1/h	13,30 €/h	200-205	81.981 kW

3.2.3 Preis-Sensitivitätsanalyse Herzstück

Gemäß den Ergebnissen in 2.2.1 haben wir festgestellt, dass das Herzstück Szenario mit Tarif 1 eine vielversprechend hohe Nachfrage und Erlöse pro Person aufweist, jedoch rund 200 Fahrzeuge benötigt werden, um der Nachfrage gerecht zu werden. In diesem Abschnitt haben wir

verschiedene Grundpreise und Distanzpreise getestet, um die Preis-Sensitivität von Tarif 1 im Herzstück-Bereich zu zeigen. Tabelle 8 zeigt die Nachfrageschätzung, die aus der Preis-Sensitivitätsanalyse resultiert. Im Allgemeinen nimmt die Nachfrage linear ab, wenn der Grund- und Distanzpreis höher werden. Mit steigenden Preisen wird die durchschnittliche Gruppengröße größer. Dies ist verständlich, da teure Szenarien für Einzelbuchungen nicht attraktiv sind. Die durchschnittlichen Einnahmen pro Person sind in den „teureren“ Szenarien naturgemäß höher. Gleichzeitig führen die teureren Tarife häufiger zur Anwendung der Preisgrenze für Taxifahrten.

Tabelle 8: Überblick Nachfrage bei Variation des Fahrpreises im Herzstück auf Basis von Tarif 1

Tarif (€)	Alle ODM-Fahrten	Gruppengröße	∅ Erlös p.P.	Taxi Capping Anwendung
3.70 0.7/km	46.784	1.45	4.34€	6.2%
3.70 0.9/km	40.794	1.49	4.64€	6.8%
3.70 1.1/km	35.560	1.52	4.97€	7.4%
4.00 0.7/km	44.797	1.46	4.53€	6.9%
4.00 0.9/km	38.624	1.50	4.84€	7.4%
4.00 1.1/km	34.268	1.53	5.14€	8.0%
4.30 0.7/km	42.322	1.48	4.70€	7.5%
4.30 0.9/km	36.388	1.52	5.01€	8.1%
4.30 1.1/km	32.193	1.56	5.25€	8.9%

3.2.4 Variante Szenarien von Tarif 1a/b

Aufbauend auf den Ergebnissen der Preis-Sensitivitätsanalyse haben wir, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, zwei weitere Variantenszenarien basierend auf Tarif 1 simuliert.

Tarif 1a wurde auf den Südwest- und Nordwest-Bereich angewendet und beinhaltet den Rabatt außerhalb der fest definierten Spitzenzeiten. Wie erwartet hat sich aufgrund des Rabattes auf den Grund- und Leistungspreis an Wochentagen in Tarif 1a die Gesamtnachfrage in beiden Bedienebenen erhöht. Im Vergleich zum Szenario mit dem Standardtarif 1 hat die Nachfrage bei Tarif 1a um 25% zugenommen.

Tarif 1b (mit deutlich größerem Preisaufschlag zu den Spitzenzeiten) führt zu einer geringeren Nachfrage im Herzstück. Die Nachfrage an Freitag- und Samstagabenden hat sich deutlich verringert. Es ist zu beachten, dass die durchschnittliche Gruppengröße in Tarif 1b größer wird. Dies lässt sich damit erklären, dass der hohe Distanzpreis nur pro Buchung gezahlt werden muss. Daher hat ein hoher Distanzpreis weniger Auswirkungen auf große Gruppen.

Die Ergebnisse der Flottensimulation mit den Tarifvarianten 1a/b sind in den folgenden Tabellen dargestellt. Für die Szenarien Südwest und Nordwest mit dem Tarif 1a wird deutlich, dass nun deutlich mehr Fahrten bedient werden. Jedoch müssen nun auch deutlich mehr Fahrer:innenstunden bereitgestellt werden, was die Kosten steigen lässt. Gleichzeitig steigen die Erlöse durch die Rabattierung nicht im selben Maße. Dadurch sinken auch die Erlöse pro Fahrer:innenstunde in Tarif 1a deutlich. Insgesamt werden also mehr und teurere Fahrer:innenstunden benötigt. Aus verkehrlicher Sicht steigt die Effizienz in Tarif 1a geringfügig, da auch die Nachfragedichte zunimmt und mehr Fahrten gepoolt stattfinden können.

Im Herzstück mit Tarif 1b würden nun theoretisch um die 100 Fahrzeuge ausreichen, um die Nachfrage zu bedienen. Da gerade die zuvor nachfragestärkste Zeit nun weniger Nachfrage aufweist, reduziert sich die wöchentliche Poolingquote im Vergleich zum Basistarif 1 merklich. Gleichzeitig bleibt die durchschnittliche Besetzung hoch. Das lässt sich damit erklären, dass die durchschnittliche Gruppengröße signifikant höher ist als in den vorherigen Tarifvarianten. Es werden also weniger, aber durchschnittlich größere Gruppen befördert.

Tabelle 9: Serviceeffizienz Tarif 1a/b, Werte für eine typische Woche

	Gefahrene km.	Leer-km.	Anteil Leer-km.	Personen-kilometer	Besetzt-zahl	Besetzung Durchsch.	Pooling-quote
Südwest	93.448 km	31.492 km	34%	102.691 km	1,65	1,10	49%
Nordwest	197.155 km	62.394 km	32%	225.066 km	1,67	1,14	57%
Mittl. West.	-	-	-	-	-	-	-
Herzstück	156.625 km	54.047 km	35%	193.095 km	1,88	1,23	52%

Tabelle 10: Betriebliche Kennzahlen Tarif 1a/b, Werte für eine typische Woche

	Fahrer-stunden	Erlöse	Fahrten pro Fahrer-stunde	Erlös pro Fahrer-stunde	Benötigte Flottengröße	Strom-verbrauch
Südwest	4.786	59.393 €	3,6	12.54 €/h	70-75	27.791 kWh
Nordwest	8.875 h	108.786 €	3,7	12,24 €/h	100-105	44.338 kWh
Mittl. West.	-	-	-	-	-	-
Herzstück	7.837 h	165.869 €	4,0	21,4 €/h	100-105	46.599 kWh

3.2.5 Stadtweit autonome Szenarien

Im autonomen Szenario steht der ODM-Dienst für das gesamte Münchner Stadtgebiet zur Verfügung. Wie in Tabelle 11 gezeigt, steigt die Anzahl der ODM-Fahrten auf rund 100.000 pro Woche. Neben dem Standardtarif 1 haben wir auch Tarif 1 mit reduziertem Grundpreis und Distanzpreis getestet (siehe Kapitel 3.1.2), basierend auf der Annahme, dass die Tarife durch eine angemessene Reduzierung des Personals erheblich gesenkt werden können. Mit dem günstigeren Tarif wird der ODM-Dienst deutlich attraktiver und erreicht einen Modal Split von 0,75%.

Tabelle 11: Servicequalität stadtweit autonome Szenarien, Werte für eine typische Woche

	Fahrten	Bedien-quote	Durchsch. Reisezeit	Durchsch. Umweg	Durchsch. Wartezeit	Pooling-quote
Tarif 1	98.508	99%	16:05 min	14%	5:35 min	74%
Tarif 1 reduziert	151.402	98%	17:14 min	15%	6:00 min	81%

Tabelle 12: Serviceeffizienz stadtweit autonome Szenarien, Werte für eine typische Woche

	Gefahrene Kilometer	Leer-kilometer	Anteil Leer-kilometer	Personen-kilometer	Besetzt-zahl	Besetzung Durchschnitt
Tarif 1	511.633 km	97.341 km	19%	798.964 km	1,92	1,56
Tarif 1 reduziert	857.289 km	149.297 km	17%	1.311.388 km	1,85	1,53

Im günstigeren Tarif werden auch Einzelfahrten deutlich attraktiver, weshalb die durchschnittliche Gruppengröße sinkt. Der reduzierte Tarif spiegelt sich auch im reduzierten Erlös pro Person wider.

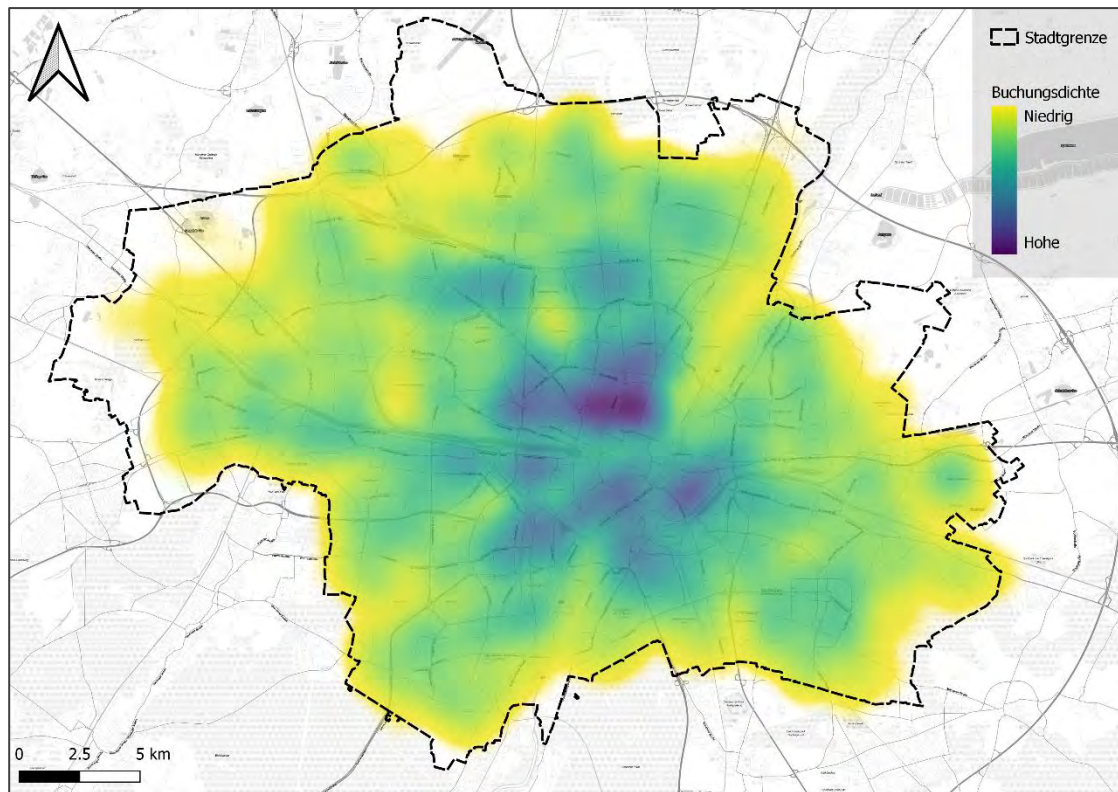


Abbildung 22: Dichtekarte des Startorts der ODM-Buchungen in Stadtweit Szenarien

Die Ergebnisse der Flottensimulation werden in Tabelle 11 und Tabelle 12 dargestellt. Für die Bedienung der Nachfrage werden hier keine Fahrer:innenstunden ermittelt, die Fahrzeuge können dynamisch im System verwendet werden. Da die Nachfrage und das Bediengebiet deutlich größer sind, wird jedoch eine größere Flotte an Fahrzeugen benötigt. Für den regulären Tarif 1 im stadtweiten Gebiet wurden 300 Fahrzeuge angenommen, für den reduzierten Tarif 1 wurde mit 450 Fahrzeugen simuliert. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die hohe Nachfrage, die Poolingquote sowie die Besetzung ansteigen, da die Wahrscheinlichkeit, Fahrten zusammenzulegen steigt. Durch das große Gebiet sind auch längere Fahrten möglich, die gut mit anderen kurzen Fahrten gebündelt werden können. Da die Fahrzeuge in diesen Simulationen nur zum Laden zu den Hubs oder Pausenorten fahren und nicht für Fahrer:innenpausen oder Schichtwechsel, sinkt der Leerkilometeranteil beträchtlich. Für andere operative Aufgaben, wie Wartung, Reinigung oder Abfahrtskontrollen ist die Annahme hier, dass dies während der Ladevorgänge passiert, um unnötige Standzeiten zu vermeiden

Die durchschnittliche Reisezeit ist ebenfalls höher als in den bisherigen Szenarien, da jetzt auch längere Fahrten möglich sind. Im reduzierten Tarif steigt der Durchschnitt nochmals, da längere Fahrten nun erschwinglich werden. Dass die Besetzungszahl sowie durchschnittliche Besetzung im reduzierten Tarif trotz höherer Poolingquote kleiner sind als im Basistarif, lässt sich dadurch erklären, dass die durchschnittliche Gruppengröße im reduzierten Tarif signifikant geringer ist.

Aufgrund der Unsicherheiten über die Kosten eines autonomen Services wurden keine weiteren betrieblichen Kennzahlen untersucht, da es bisher noch nicht abzusehen ist, welche Kosten in einem großskalierten System anfallen. Dies betrifft insbesondere Kosten für die Hardware, Wartung, Ausfallwahrscheinlichkeiten sowie Fernüberwachung.

4 Konzeptionelle Anforderungen & Service Elemente

4.1 Kundenzentrierte Service Elemente

Um das Nutzungserlebnis für Kund:innen so attraktiv wie möglich zu gestalten und damit aktiv Reisende aus dem privaten PKW zum Umstieg zu überzeugen, bedarf es auch eines Kund:innen-zentrierten Gesamterlebnisses. Grundsätzlich ist dafür die hohe Verfügbarkeit des Services eine Grundvoraussetzung (wie bereits erläutert). Zusätzlich gibt es jedoch weitere Anforderungen, die einen ODM-Service aus Endkund:innen bzw. Reisenden-Sicht attraktiv machen. Dazu kann unter anderem gehören:

- Buchungs-Plattform mit kundenorientiertem Design und einfachem Buchungsprozess
- Buchung für Dritte über eine Website ohne Login
- Verbindliche Vorreservierung von Fahrten
- Vollständig barrierefreie Anwendung inkl. Navigation für Sehbehinderte
- Verschiedene Serviceklassen und Optionen (z. B. Express, Rollstuhl oder Kindersitz).
- Kundenpräferenzoptionen (z. B. hinsichtlich der Gehgeschwindigkeit zum Einstiegsort)
- Angepasste Preise für Kinder und Schwerbehinderte
- Einlösung und Verwaltung von Gutscheinen, insbesondere bei Verspätung und Ausfall
- Treueprogramm mit Schwerpunkt auf nachhaltige Mobilität
- Anzeige von Reiseinformationen auf dem Bildschirm im Fahrzeug, ggf. inkl. Anschlussinformationen am Zielort (falls ÖPNV-Haltestelle)
- B2B-Portal (z. B. für Arbeitgeber oder lokale Unternehmen).
- Möglichkeit zur Buchung über Apps von Drittanbietern (über API) und Integration in die lokal-spezifische Mobilitätsplattformen (MVG0 und MVV-App)

4.2 Operationszentrierte Service Elemente

Zusätzlich gibt es eine ganze Reihe an Anforderungen, die erfüllt sein sollten, um eine ODM-Flotte von relevanter Größe zu betreiben. Wir beziehen uns hier explizit auf Flottengrößen, die die üblichen Erprobungsprojekte mit einer Anzahl von 5 bis 20 Fahrzeuge übersteigen. In diesen Flottengrößen sind die Anforderungen an Betrieb und insbesondere Nachfrage-optimierte Aussteuerung sehr gering und können in der Regel händisch oder durch pragmatische Telefonkommunikation erfolgen. Dies ändert sich, wenn sich die Flottengröße in Richtung Hundert Fahrzeuge und mehr orientiert. Hier sind performante Prozesse und automatische (digitale) Prozesse unerlässlich, um die gestiegenen Anforderungen zu erfüllen. Zu den zusätzlichen Anforderungen, die der operative Betrieb einer großen ODM-Flotte mit sich bringt, zählen u.a.

Infrastruktur und Asset Management

- Ein großer, skalierter Service ist insgesamt komplexer, mit einem höheren administrativen und infrastrukturellen Aufwand
- Mehr Fahrzeuge bedeutet i.d.R. auch mehr Betriebshöfe (ODM-Service profitiert zusätzlich von verteilten Betriebshöfen). Dies erhöht die Komplexität in Bezug auf Steuerung der Fahrzeuge und Personal über mehrere Standorte.
- Kleinbetrieb ohne Ladeinfrastruktur (LIS) möglich (Nutzung öffentlicher LIS). Bei hunderten Fahrzeugen eigene LIS erforderlich und auch Stellflächen zum Laden
- Infrastrukturelle Make-or-Buy-Entscheidungen sind anders zu bewerten (z.B. eigene Waschanlage vs. externe Nutzung)
- Flächensuche und Anforderungen an Bau wird komplexer (z.B. höhere Stromverfügbarkeit, Brandschutzanforderungen, etc.)
- Höhere administrative und wiederkehrende Fahrzeugaufgaben wie bspw. Anmeldung, Inspektionen und TÜV nach BO-Kraft
- Absolut mehr Unfälle
- Höhere Anforderungen an Mobilfunknetzabdeckung und Redundanzen in den Betriebshöfen und im Service-Gebiet
- Größerer Service geht vermutlich mit mehr Stops und anderen virtuellen Haltepunkten (dezentrale Pausenorte) einher. Sicherstellung von geeigneter Nutzung des öffentlichen

Raums sowie Automatisierung und Professionalisierung des Stop-Managements notwendig

- Zugangsbeschränkungen und Kontrollen auf den Betriebshöfen
- Vertragsmanagement mit Werkstätten, um wiederkehrende Fahrzeugaufgaben abzudecken und Service-Level-Agreements (SLA) zu implementieren
- Ggfs. Notwendigkeit für Ersatzteilmanagement bspw. Reifen

Digitalisierungsanforderung & Integration der Prozesse

- Performance und KPI-Tracking muss professionell und zielgenau aufgesetzt, verwaltet und in Entscheidungen übersetzt werden
- Hoher Digitalisierungsgrad der Prozesse erforderlich, um bessere Steuerung und Effizienz des Betriebs zu ermöglichen
- Nahtlose Integration von Digitalbestandteilen und Prozessen ist notwendig, um Abläufe in dieser Komplexität und Größe effizient zu erledigen
- Ggfs. Höherer Aufwand für die Einrichtung von Konzession durch größeren Einschnitt in bestehende Personenbeförderungsstrukturen

Fahrer:innen- und Schichtmanagement

- Professionelle Schichtplanung erforderlich bei hoher Fahrerzahl
- Professionelle HR-Abteilung erforderlich
- Automatisierte Dokumentation von Zuordnung von Fahrern auf Fahrzeuge auch für Haftungsfragen
- System für digitale Schlüssel und Zugangsberechtigungen
- Dezentrale Pausen- (und Lade-) Standorte
- Automatisierte Abfahrtskontrolle
- Klar strukturierte, dokumentierte und kommunizierte operative Prozesse sind erforderlich. Daraus ergeben sich höhere Anforderungen an Prozessmanagement und an Training, Onboarding und Kommunikation.
- Digitale Unterstützung ist noch wichtiger, um manuelle und analoge Prozesse zu minimieren - große Effizienzverluste bei unzureichendem Tooling oder Prozessbeschreibungen
- Strukturiertes Auswahlverfahren von Fahrer:innen, inklusive ärztlichen Eignungstests, P-Schein, Prüfungen und Trainings
- Digitale und qualifizierte Zeiterfassung, um Arbeitszeitgesetze auch beim Einsatz einer großen Menge an Fahrpersonal sicherzustellen

Operativer Betrieb

- Höhere Anforderungen an eine Leitstelle durch höhere Anzahl von Fahrzeugen, Fahrer:innen, Kund:innenanfragen, Stops und Pausenorten
- Verlässliche digitale Lösungen und robuste Systeme
- Höhere Anfälligkeit bei stadtweiten Verkehrsproblemen
- Professionalisiertes Customer Service Management inkl. Fundsachenmanagement
- Dynamische und flexible Zuweisung von Fahrzeugen zu Fahrtanfragen, die bis kurz vor Abholung des Fahrgastes nicht zwingend fix sein muss, da sich die optimale Zuweisung zwischenzeitlich ändern kann

Digitale und automatisierte Lösungen notwendig zum Management der Flotte

- Fleet Map und Aussteuerung der Flotte; automatische Alerts bei Auffälligkeiten (z.B. Service Abbrüche)
- Komplett automatisierte Nachfragevorhersage und Rebalancing-Prozesse
- Automatisiertes ein- und ausstempeln zur Erhöhung der Fahrer:Innenproduktivität
- Automatisierte Allokation von Lade und Pausenstandorten
- Voll digitalisierte Erfassung von Fahrzeugschäden
- Automatisierte Prozesse zur Anfrage von Pausen durch Fahrer

4.3 Ein kurzer Blick in die Zukunft: Zusätzliche Anforderungen an autonome Flotten

Während die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen sich lange auf die tatsächliche Funktion des ‚Selbstfahrens‘ fokussierte, rücken seit einigen Jahren vermehrt auch die vielfältigen Aspekte des eigentlichen Betriebs mit Reisenden in den Fokus. Mit zunehmender technologischer Reife des eigentlichen Selbstfahrsystems geht es nun also stärker darum diese technologische Errungenschaft auch in ein produktives Werkzeug für sinnvolle Mobilitätslösungen zu transformieren. Dies ist eine Aufgabe, deren Komplexität und Umfang im Rahmen dieses Berichts nur oberflächlich gestreift werden kann. Daher beschränken wir uns hier auf die Beschreibung von vier großen Bereichen, die einen wichtigen Einfluss auf den Erfolg von autonomen Flotten im urbanen öffentlichen Verkehr haben werden. Dabei ist zu beachten, dass autonome Fahrzeuge nicht etwa in einer binären Logik von 0 auf 100 springen werden, wobei 100 für ein flächendeckend verfügbares großes bzw. stadtweites Szenario steht. Viel mehr wird es eine Phase der inkrementellen Einführung geben, in denen autonome Fahrzeuge nach und nach weitere Gebiete und Situationen ausreichend sicher abbilden können. Die ersten autonomen Fahrdienste mit echten Kund:innen (z.B. in San Francisco oder Chandler) bestätigen dies. Auch aufgrund verbleibender Beschränkungen der Operational Design Domain (ODD), bleibt mittelfristig eine begrenzte Service-Area zur Verfügung, die ggf. eine Ergänzung mit nicht autonomen Fahrzeugen erforderlich macht. Nur so lässt sich eine Einführung im Kund:innenbetrieb gewährleisten, ohne dass Kund:innen aufgrund von fehlender Verfügbarkeit oder Abdeckung dem Service den Rückenkehren.

4.3.1 Volle Effizienzpotentiale heben

Viele sprechen von den großen Kostenersparnissen, die autonome Fahrzeuge im Betrieb, v.a. durch den Wegfall der Fahrer:innenkosten, mit sich bringen werden. Dies ist unbestritten, jedoch nur ein Teil der großen Versprechung, die ein autonomer Service mit sich bringt. Heutige Services sind in ihrem permanenten Zusammenbringen von Nachfrage und Angebot durch die starre Struktur von Fahrer:innenschichten eingeschränkt. Anders gesagt, kurze Nachfragespitzen von 30 bis 90 Minuten, wie Sie regelmäßig im Wochenverlauf auftreten, lassen sich nicht vereinbaren mit Fahrer:innenschichten, die in der Regel mindestens vier, häufig auch mehr Stunden dauern. Die einzigen Optionen sind regelmäßiges Überangebot, also zu viele Fahrzeuge auf der Straße, oder eine sinkende Verfügbarkeit, da in Spitzennachfragezeiten nicht ausreichend Fahrzeuge verfügbar sind. Dies ändert sich radikal, wenn durch die Einführung von autonomen Fahrzeugen das gesamte Konzept der Schichtplanung abgeschafft wird. Autonome Fahrzeuge können innerhalb weniger Minuten, perspektiv ‚mit einem Mausklick‘, aktiviert oder ausgeschaltet werden. Dies erlaubt ein deutlich dynamischeres und damit balanciertes Zusammenbringen zwischen Nachfrage und Angebot. Wenn die Technologie des autonomen Fahrens nun mit intelligenten Operations Konzepten, die eine dezentrale Struktur von Betriebshöfen umsetzt, kombiniert wird, ist ein Szenario, in dem immer nur genau soviel Fahrzeuge auf der Straße sind, wie tatsächlich gerade benötigt werden, realistisch. Ab hier hätten wir ein nahezu perfekt optimiertes System, das Wirtschaftlichkeit, Kund:innennutzen und verkehrliche Ziele perfekt in Einklang bringen kann. Doch auch hierfür benötigt es entsprechend intelligente Digitalprodukte, die diese komplexe Art der Optimierung umsetzen können.

Frühere Simulationsstudien weisen auf eine signifikante Effizienzsteigerung dezentraler, autonomer Services im Vergleich zu heutigen fahrer:innenbasierten System hin. Neben der deutlichen Reduzierung von Leerkilometern kann der flexiblere Einsatz von Fahrzeugen auch die durchschnittliche Besetzung steigern, wie in Abbildung 23 dargestellt. Die Abbildung zeigt verschiedene Effizienzparameter (gefahrte Kilometer, Leerkilometeranteil, Besetzungsgrad, Effizienz η nach Liebchen et al.¹⁸) eines Services jeweils für einen autonomen (blaue Kurven) und einen fahrer:innen-basierten Service (orangene Kurven), in Abhängigkeit von der Anzahl der Lade-/Pausenorte im Servicegebiet. Es wird ersichtlich, dass die Effizienz eines autonomen Services grundlegend besser abschneidet. Gleichzeitig profitieren insbesondere autonome Services von einer größeren Anzahl an dezentralen Lade- und Pausenorten.

¹⁸ Liebchen, C., Lehnert, M., Mehlert, C., Schiefelbusch, M. Ridepooling-Effizienz messbar machen. Betriebliche Effizienzgrößen für Ridepooling-Systeme. In: Der Nahverkehr (9) 2020. S. 18-21.

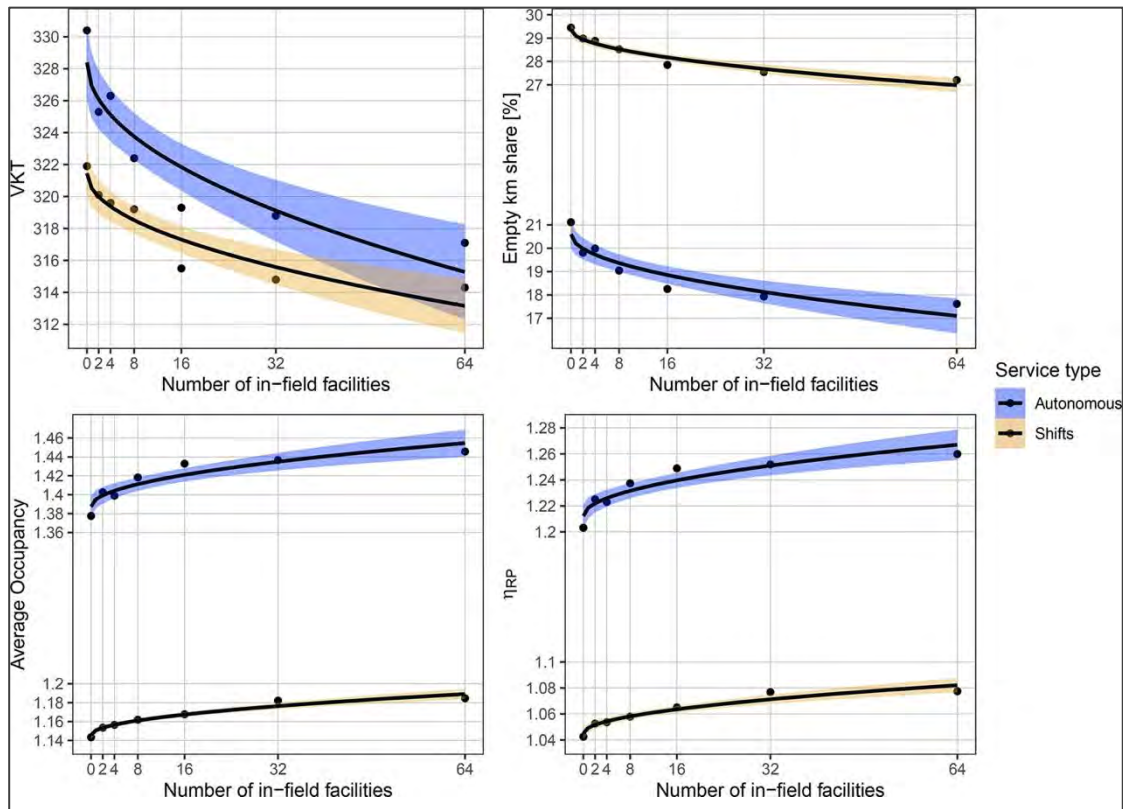


Abbildung 23: Einfluss der Anzahl dezentraler Lade-/Pausenorte auf gefahrene Kilometer (VKT, in 1000km, links oben), den Leerkilometeranteil (Empty km share, rechts oben), die durchschnittliche Besetzung (Average Occupancy, links unten) und auf die Systemeffizienz η (rechts unten) – jeweils für einen autonomen (blau) und einem fahrerInnenbetrierten Service (orange)¹⁹.

4.3.2 Sicherheit & Regulatorik

Die Gesetzgebung und Sicherheits- bzw. Zulassungs- und Dokumentationsansprüche an autonome Fahrzeuge entwickeln sich parallel zur Technologie. Je nach Einsatzgebiet und Einsatzzweck können die rechtlichen Anforderungen sehr komplex sein. Dabei ist es essenziell, auch um das Vertrauen der Öffentlichkeit zu gewinnen bzw. zu erhalten, dass alle erforderlichen Maßnahmen getroffen und entsprechend dokumentiert sind.

4.3.3 Fahrernebenaufgaben & Grenzfälle

Durch autonome Fahrzeuge wird der/die Fahrer:in das Fahrzeug ‚für immer‘ verlassen. Erst jetzt wird klar, dass der/die Fahrer:in im täglichen Betrieb deutlich mehr Aufgaben erfüllt, als ‚nur‘ das Fahrzeug zu steuern. Die Fahrer:innen interagieren mit den Fahrgästen, können bei Fragen oder Problemen unterstützen, stellen sicher, dass die richtige Anzahl an Personen zu- oder einsteigt und übernehmen wichtige Sicherheitsfunktionen während der Fahrt, wie z.B. die Anschnallkontrolle – Dies sind nur ein paar wenige Beispiele. Auch bei seltenen, aber in der Regel kritischen Situationen wie z.B. medizinische Notfälle an Bord, Gewalt oder Belästigung zwischen Fahrgästen oder Feuer an Board, ist der/die Fahrer:in entweder durch entsprechende Prozesse und Schulungen als kompetente Instanz vor Ort oder bringt wenigstens unmittelbar menschliche Intuition in die Situation ein. In autonomen Fahrzeugen, müssen als diese Aufgaben durch Systeme erbracht werden, die keinen unmittelbaren Zugriff auf das Fahrzeug selbst haben. Auch hier bedarf es entsprechend durchdachter, getesteter und erwiesenermaßen sicherer Systeme, um die vielfältigen Fahrer:innennebenaufgaben produktiv abzubilden.

¹⁹ Zwick, F. Kuehnel, N und Hörl, S. Shifts in perspective: Operational aspects in (non-)autonomous ride-pooling simulations. Transportation Research Part A: Policy and Practice (165) 2022. S. 300-320. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.09.001>

4.3.4 Kund:inneninteraktion

Ein autonomes Fahrzeug ist gerade in den ersten Jahren, eine für viele Menschen unvorstellbare technologische Errungenschaft. Gerade in Deutschland, einem Land, in dem das Fahren eines PKWs tief in der Kultur und Geschichte verwurzelt ist, ist die enge Begleitung von neuen Kund:innen extrem wichtig. Unsicherheiten, Ängste und Fragen rund um die Verlässlichkeit und das generelle Verhalten eines solchen autonomen Fahrzeuges müssen professionell und zeitnah (bzw. in Echtzeit) adressiert werden können. Dies ist der sicherere Weg, um Fahrgäste von der neuen Technologie zu überzeugen und somit eine breite Nutzung zu ermöglichen. Hier spielt jedoch nicht nur die unmittelbare Kommunikation im Fahrzeug eine Rolle. Fahrgäste sollten bereits vorher im richtigen Maße aufgeklärt werden.

Ansprechpartner*innen

MOIA

Dr. Nico Kühnel
nico.kuehnel@moia.io
+49 173 640 84 48

Dr. Benjamin Scher
benjamin.scher@moia.io
+49 172 414 36 39

dmo digital
mobilities
consultants

Dr. Martina Dörnemann
doernemann@digitalmobilities.com
+ 49 176 83 19 99 72

Martin Röhrleef
roehrleef@digitalmobilities.com
+ 49 175 433 15 43

TUM

Prof. Dr. Rolf Moeckel
rolf.moeckel@tum.de
+ 49 89 289 22699

Dr. Qin Zhang
qin.zhang@tum.de
+ 49 89 289 22698

5 Anlagen

Basis Verkehrsmittelwahlmodell

Ein Multinomiales Logit-Modell (MNL) wurde entwickelt, das den Taximodus einschließt, um den Modal Split abzuschätzen. Das Modell wurde auf der Grundlage der täglichen Reisedaten geschätzt, die aus der deutschen Haushaltsverkehrserhebung "Mobilität in Deutschland 2017" (MiD2017) erhoben wurden. Um das Verkehrsverhalten derjenigen, die innerhalb der ODM-Bediengebiete leben, besser darzustellen, haben wir nur die Reisedaten verwendet, die in der Stadt München und ihrer Umgebung (Landkreis München, Starnberg, Freising, Erding, Dachau, Ebersberg, Fürstenfeldbruck und Erding) stattfinden.

Das multinomiale Logit-Modell wurde angewendet, um die Verkehrsmittelwahl anhand von Reiseattribute (z. B. Reisezeit, Reisekosten, Reiseanfangszeit) und Reisendenattributen (z. B. Alter, Fahrzeugbesitz) zu bestimmen. Die Nutzen der Verkehrsmittel werden erwartungsgemäß je nach Zweck unterschiedlich sein. Beispielsweise könnten Personen bei Freizeitreisen längere Reisezeiten eher akzeptieren als bei Arbeitsreisen. Daher werden Reisezwecke mit Reisezeit und Reisekosten interagiert. Die Verkehrsmittelwahl umfassen Autofahrer:in, Mitfahrer:in, Taxi, öffentlichen Verkehr (einschließlich Bus, Straßenbahn, U-Bahn und Zug), zu Fuß und Fahrrad. Zu Fuß wurde als Basismodus gewählt, gegenüber dem die Nutzen der anderen Modi verglichen werden. Daher beträgt der Koeffizient für Zu Fuß Gehen 0 für alle nicht-alternativspezifischen Attribute.

Die Koeffizienten der Verkehrsmittelattribute wurden mithilfe von Apollo geschätzt, einer Open-Source-Software, die für Maximum-Likelihood-Schätzungen diskreter Wahlmodelle entwickelt wurde. Die Schätzungen gewährleisten ein Mindestvertrauensniveau von 95%, um signifikante Korrelationen der unabhängigen Variablen zu vermeiden. Die Schätzungsergebnisse des Basis Verkehrsmittelwahlmodells werden in den folgenden Tabellen dargestellt.

	Car Driver		Car Passenger	
	Estimate	P-value	Estimate	P-value
Alternative specific constant	-1.25	0 ***	-3.03	0 ***
Start hour of the trip: before 5 a.m. or after 9 p.m.	-1.01	0 ***	-0.57	0.007 **
Day of week: Friday	0.10	0.024 *	0.24	0 ***
Day of week: Saturday	-	-	0.70	0 ***
Day of week: Sunday	-0.82	0 ***	-	-
Household autos: no autos	-	-	-1.29	0 ***
Age group: 0 - 17 years old	-	-	1.56	0 ***
Age group: over 70 years old	-0.17	0 ***	0.11	0.045 *
Trip purpose: Work	0.63	0 ***	-0.63	0 ***
Trip purpose: Education	-1.82	0 ***	-1.02	0 ***
Trip purpose: Recreation	-0.22	0.008 **	0.24	0.006 **
Travel time (in hour)	-1.73	0 ***	-1.73	0 ***
x Work trip	-0.35	0.001 ***	-0.35	0.001 ***
x Education trip	-1.08	0 ***	-1.08	0 ***
x Recreation trip	0.98	0.006 **	0.98	0.006 **
Travel cost	-0.31	0 ***	-0.31	0 ***
x Recreation trip	0.06	0.003 **	0.06	0.003 **

	Public Transport		Taxi	
	Estimate	P-value	Estimate	P-value
Alternative specific constant	-2.30	0 ***	-3.50	0 ***
Start hour of the trip: before 5 a.m. or after 9 p.m.	-0.58	0.001 **	2.47	0 ***
Day of week: Friday	0.09	0.051 .	-0.81	0.026 *
Day of week: Saturday	-0.35	0 ***	-0.73	0.015 *
Day of week: Sunday	-1.07	0 ***	-3.35	0.001 ***
Household autos: no autos	0.57	0 ***	-	-
Age group: 0 - 17 years old	-	-	-1.77	0 ***
Age group: over 70 years old	-	-	-0.33	0.30
Trip purpose: Work	1.52	0 ***	-	-
Trip purpose: Education	0.71	0 ***	-	-
Trip purpose: Recreation	0.50	0 ***	-	-
Travel time (in hour)	-0.14	0.049 *	-1.73	0 ***
x Work trip	-0.35	0.001 ***	-0.35	0.001 ***
x Education trip	-1.08	0 ***	-1.08	0 ***
x Recreation trip	-	-	0.98	0.006 **
Travel cost	-0.31	0 ***	-0.31	0 ***
x Recreation trip	0.06	0.003 **	0.06	0.003 **

	Cycle		Walk (Reference mode)	
	Estimate	P-value	Estimate	P-value
Alternative specific constant	-1.47	0 ***	0	
Start hour of the trip: before 5 a.m. or after 9 p.m.	-0.91	0 ***	0	
Day of week: Friday	-	-	0	
Day of week: Saturday	-0.16	0 ***	0	
Day of week: Sunday	-0.55	0 ***	0	
Household autos: no autos	0.19	0 ***	0	
Age group: 0 - 17 years old	0.19	0 ***	0	
Age group: over 70 years old	-0.33	0 ***	0	
Trip purpose: Work	1.35	0 ***	0	
Trip purpose: Education	0.30	0.001 **	0	
Trip purpose: Recreation	0.51	0 ***	0	
Travel time (in hour)	-2.55	0 ***	-2.67	0 ***
x Work trip	-0.35	0.001 ***	-0.35	0.001 ***
x Education trip	-1.08	0 ***	-1.08	0 ***
x Recreation trip	1.07	0 ***	1.24	0 ***
Travel cost	0		0	
x Recreation trip	0		0	

Verkehrsmittelwahlmodell mit ODM-Modus

Um den Einfluss von ODM auf die Verkehrsmittelwahl zu modellieren, wurde das oben beschriebene Modell erweitert, um die Verkehrsmittelwahl in einem futuristischen Szenario mit ODM in der Auswahl zu schätzen. Ein inkrementeller Logit-Ansatz (Koppelman 1983) wurde

verwendet, um den Einfluss von ODM zu modellieren. Bei diesem Ansatz werden beobachtete Sensitivitäten vergleichbarer Referenzmodi verwendet, wobei angepasste Variablen wie Wartezeit und Reisezeit berücksichtigt werden, um das Verhalten für bisher nicht beobachtete Angebote abzuschätzen. Wenn ein neuer Modus eingeführt wird, muss ein Referenzmodus ausgewählt werden, von dem die Parameter für den neuen Modus kopiert oder angepasst werden. Taxi wurde als Referenzmodus für ODM gewählt, da beide on-demand-Dienste sind und eine ähnliche Bequemlichkeit bieten. Es wird erwartet, dass ähnliche Nutzermerkmale für Taxi und ODM gelten. Die Utility Funktion für Taxi und ODM sind nachfolgend dargestellt:

$$U_{Taxi} = \beta_0 + \beta_1 \cdot c_{Taxi} + \beta_2 \cdot t_{Taxi} \dots$$

$$U_{ODM} = \beta_0 + \beta_1 \cdot c_{ODM} + \beta_2 \cdot t_{Taxi} \dots$$

In den obigen Funktionen repräsentieren t die Reisezeit, c die Reisekosten, X_1 bis X_n verschiedene andere Attribute, die die Nutzenwerte beeinflussen. Die Koeffizienten β_0 bis β_n geben an, wie stark sich die einzelnen Attribute auf den Nutzen auswirken. Je höher der Nutzenwert ist, desto attraktiver ist das entsprechende Verkehrsmittel für den Nutzer.

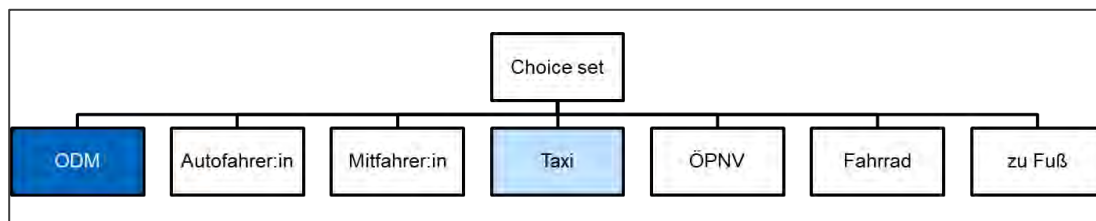


Abbildung I: Inkrementelles Logit Modell (der hinzugefügte Modus ODM ist dunkelblau und sein Referenzmodus Taxi hellblau hervorgehoben)

Flottenoptimierung in MATSim

Die mit MITO ermittelte Nachfrage wird für MATSim so aufbereitet, dass jede Fahrt einem Agenten entspricht, der eine Quell- sowie eine Zielaktivität geplant hat, die mit einem Fahrtweg verbunden werden. Die DRT-Erweiterung in MATSim arbeitet so, dass der Fahrgast bei Beendigung der Quellaktivität zum nächstgelegenen virtuellen Haltepunkt läuft (die Zuweisung eines optimalen Haltepunktes kann in der Realität auch Teil der Optimierung sein). Erst bei Erreichen des Haltepunktes stellt der Agent die eigentliche Fahrtanfrage an das Optimierungssystem. In der Realität geschieht dies i.d.R. bereits vor dem eigentlichen Zugangsweg. Die Nachfrage ist also in der Simulation zeitlich leicht nach hinten verschoben. Da die Wartezeiten in den allermeisten Fällen höher als die Zugangszeiten sind (und der Fahrgast in der Realität erst nach der Buchung und während der Wartezeit losläuft), hat dies ansonsten keinen weiteren Einfluss auf die Optimierungsergebnisse. Abbildung II veranschaulicht den Ablauf in der Simulation.

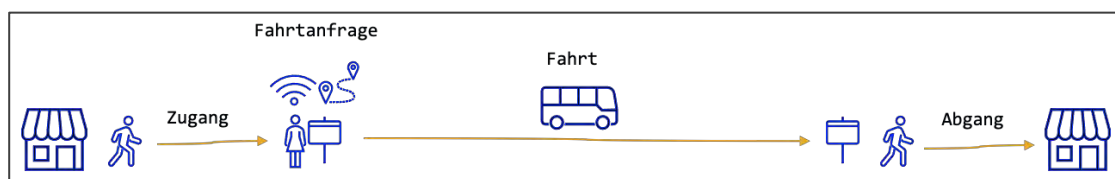


Abbildung II: Veranschaulichung des Buchungs- und Fahrtverlaufs in MATSim

Die Fahrtzuweisung in MATSim erfolgt standardmäßig mithilfe eines Greedy-Algorithmus, der für jede Fahrtanfrage zum Anfragezeitpunkt individuell und einmalig entscheidet, welches Fahrzeug zuständig sein soll. Komplexere Algorithmen realer Anbieter können das resultierende „sequential decision making problem“ gegebenenfalls verringern, indem in periodischen Abschnitten immer die gesamte Flotte gleichzeitig optimiert wird. Dabei können auch einmal getroffene Fahrtzuweisungen vor Abholung des Fahrgastes revidiert werden, falls sich zwischenzeitlich eine bessere Verteilung von Fahrzeugen zu Fahrtanfragen ergeben sollte.

Bei der Optimierung ist zu beachten, dass MATSim mit Zeitfenstern arbeitet. Insbesondere wird für jede Fahratanfrage jeweils eine späteste Zustiegszeit (t_{pu}) sowie eine späteste Ankunftszeit (t_{do}) berechnet.



Abbildung III24: Veranschaulichung der Zeitfenster

Der späteste Zustieg t_{pu} wird berechnet mit:

$$t_{pu} = t_0 + t_{maxWait}$$

wobei t_0 den Zeitpunkt der Fahratanfrage darstellt und $t_{maxWait}$ ist die maximale Wartezeit. Die späteste Ankunftszeit t_{do} ist definiert als:

$$t_{do} = t_0 + \min(t_{direkt} + t_{maxDetour}, \alpha * t_{direkt} + \beta)$$

t_{direkt} bezieht sich hier auf die direkte PKW-Reisezeit ohne Umwege. Diese darf maximal um $t_{maxDetour}$ überschritten werden, was einer maximalen absoluten Umwegezeit entspricht und in dieser Untersuchung auf 20 Minuten festgelegt wird. α ist der relative Umwegfaktor, der auf die direkte Reisezeit angewandt wird. Wenn α beispielsweise 1,3 beträgt, darf eine eigentlich zehnmütige Direktfahrt in einem ODM System bis zu drei Minuten Umweg erfahren. Zusätzlich gibt es einen konstanten Offset β , aus zwei Gründen: zum einen muss die Wartezeit, die bei Zustandekommen des „Vertrags“ zwischen Fahrgast und Betreiber noch nicht bekannt ist in irgendeiner Form bei der spätesten Ankunftszeit berücksichtigt sein. Zum anderen ist es zweckmäßig, eine über den relativen Umweg hinausgehende Verspätung zu erlauben, um insbesondere kurze Fahrten poolen zu können. Bei einer 10-minütigen Fahrt wären von drei Minuten Umweg bei Einplanung eines weiteren Fahrgastes mit einer Haltedauer von einer Minute nur zwei Minuten übrig, ohne dass bereits eigentliche Umwege gefahren wurden. In dieser Untersuchung wurde der relative Umwegfaktor α auf die vereinbarten 30% Umweg gesetzt ($\alpha = 1,3$). Die Konstante β wurde auf 10 Minuten gesetzt, um einer angemessenen Wartezeit und Spielraum zum Poolen auch für kurze Fahrten Rechnung zu tragen. Der Algorithmus optimiert also vor allem anhand des vereinbarten Zeitfensters t_{do} und weniger auf die genaue Einhaltung eines relativen Umweges. Umgekehrt impliziert dies, dass die maximale Wartezeit durch t_{do} „gekappt“ wird. Bei einer angenommenen Direktfahrt von 10 Minuten, die um 10:00 Uhr angefragt werden würde, wäre $t_{do} = 10:00 \text{ Uhr} + \min(30 \text{ min}, 13 \text{ min} + 10 \text{ min}) = 10:23 \text{ Uhr}$. Bei zehn Minuten Wartezeit entspräche der maximale Umweg dann 30%. Gleichzeitig wäre die maximale Wartezeit implizit gegeben mit 13 Minuten, wenn der Fahrgast danach ohne Umwege bedient werden würde (dies liegt dann in etwa in den vom VDV vorgeschlagenen Rahmen von maximal 15 Minuten Wartezeit in dichten Siedlungsgebieten).

Die für die spätere reale Umsetzung vorgeschlagenen maximalen Wartezeiten von 30 Minuten kommen in der Simulation folgerichtig nicht vor, da t_{do} dies erst bei ca. 67 Minuten Direktfahrt erlauben würde (in diesem Fall wären relativer Umweg ($67 * 0,3 = 20 \text{ min}$) und konstanter Umweg (10 min) zusammen 30 min). Grundsätzlich ließe sich die Optimierung in MATSim auch umbauen, sodass Wartezeit und Umweg als eigenständig optimiert werden. In einem ersten Versuch führte dies dazu, dass die erlaubten Wartezeiten von bis zu 30 Minuten deutlich besser ausgenutzt wurden - gleichzeitig sanken Poolingquote und Belegungsgrad - das System ähnelte immer mehr einem reinen Ride-Hailing bzw. Taxi-Dienst. Die Ergebnisse wären also sowohl aus Betreiber- als auch aus Kundensicht weniger wünschenswert. Das liegt vor allem daran, dass der Algorithmus in MATSim standardmäßig Umweg-Zeitverluste der Fahrzeuge minimiert. Insofern ist es für den Algorithmus immer besser, Fahratanfragen „nach hinten zu schieben“, weil ihre Wartezeit es erlaubt, als Umwege durch Pooling zu planen. Dem kann entgegengewirkt werden, indem man die Wartezeit als zusätzliche Kostenkomponente in die Optimierungsfunktion aufnimmt, jedoch kommt dann die Frage auf, wie stark die Gewichtung zwischen Wartezeit und Umwegezeit der Fahrzeuge ausfallen soll. Letztendlich ist der Pooling-Algorithmus auch eine Kernfunktion des

jeweiligen Software-Anbieters. Im Zuge der Anbieterneutralität wurde daher mit der Standard-Implementierung der MATSim open-source-Logik simuliert. In der Praxis hat sich gezeigt, dass reale Ride-pooling Services damit gut abgebildet werden können.

Repositionierung

Ein wichtiger Faktor von on-demand Systemen ist die Verfügbarkeit von Fahrtangeboten. Da die Systeme so ausgelegt sind, dass es Randbedingungen gibt, unter denen Fahrten stattfinden müssen (insb. Wartezeit und max. Umwege), folgt daraus, dass Fahrten bei Nichterfüllung i.d.R. abgelehnt werden. Um die Ablehnungsquote gering zu halten, sollte daher geachtet werden, dass die Randbedingungen für möglichst viele Kunden effizient eingehalten werden können. Die räumliche Struktur der Nachfrage hat einen großen Einfluss darauf, wie schnell und ob ein Fahrzeug eine Anfrage innerhalb der Wartezeit bedienen kann. Da die Nachfragerelationen nie gleichmäßig verteilt sind, kann es naturgemäß zu räumlichen Agglomerationen von Fahrzeugen kommen, so, dass es Gebiete gibt, die überversorgt sind, während es in anderen Gebieten folgemäßig zu wenig Fahrzeuge gibt, um Fahrgäste rechtzeitig zu bedienen. Ein intuitives Beispiel ist der Tagesanfang, in dem alle Fahrzeuge in den Betriebshöfen starten. Wenn nun ein Fahrgast am Rand des Servicegebiets eine Fahrthanfrage stellt, kann es dazu kommen, dass kein Fahrzeug rechtzeitig innerhalb der erlaubten Wartezeit oder ohne Verletzung der Randbedingungen anderer Fahrgäste den Fahrgast mitnehmen kann, woraufhin die Anfrage abgelehnt wird. Deshalb ist es zweckmäßig, dass Fahrzeuge ohne Fahrtauftrag sich kontinuierlich strategisch repositionieren, um für zukünftig erwartbare Fahrthanfragen bereit zu stehen. Dadurch kann die Verfügbarkeit und Bedienquote signifikant verbessert werden, zum Preis einer etwas erhöhten Anzahl von Leerkilometern, da die Repositionierung i.d.R. nur von „leeren“ Fahrzeugen ohne Fahrthanfrage durchgeführt wird.

Es gibt viele Methoden und Strategien zur strategischen Repositionierung. Für die hier beschriebene Untersuchung wurde auf den Standard-Algorithmus des MATSim-Frameworks zurückgegriffen²⁰. Vereinfacht ausgedrückt wird die Simulation hier in mehreren Iterationen wiederholt, wobei die Ablehnungen von Fahrthanfragen und deren räumliche Positionierung gespeichert wird. In der jeweils nachfolgenden Iteration wird die Information der vorhergehenden Iteration genutzt, um abzuschätzen, wo es zuvor Ablehnungen gab. Mithilfe dieser Information werden dann strategische Repositionierungen berechnet, um die Ablehnungen zu minimieren. Die Information vorangehender Ablehnungen kann als Nachfrageabschätzung interpretiert werden, d.h., es wird abgeschätzt, wo es mehr Nachfrage als Angebot gibt und wo durch Repositionierung nachgesteuert werden muss. Die Repositionierung hat jedoch auch Grenzen bei hoch ausgelasteten Systemen (z. B. zu Nachfragespitzen), da in diesem Fall nicht ausreichend Fahrzeuge zur Repositionierung bereitstehen. Die Repositionierung findet sowohl im fahrer:Innenbasierten System (dann nur bei aktiver Schicht) als auch im autonomen System Anwendung.

²⁰ Bischoff, J. Maciejewski, M. Proactive empty vehicle rebalancing for Demand Responsive Transport services. *Procedia Computer Science* (170) 2020. S. 737-744
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.162>

Realistische Reisezeiten

MATSim wird aus Gründen der Laufzeiten in dieser Studie „nur“ in als reine Flottensimulation verwendet. Eine gleichzeitige Umlegung des Straßenverkehrs würde die Rechenzeit empfindlich verlängern, ohne größeren Erkenntnisgewinn und der gleichzeitigen Herausforderung zusätzlicher Kalibrierung. Eine Simulation rein anhand der erlaubten Geschwindigkeiten ohne Hintergrundverkehr würde hingegen die Ergebnisse stark verfälschen, da die Fahrten unrealistisch schnell bedient werden könnten. Immerhin gilt München als eine der staureichsten Städte Deutschlands²¹. Um dennoch realistische Reisezeiten auf dem Straßennetz zu erhalten, gibt es in MATSim auch die Option, zeitabhängige Reisezeiten pro Straße extern einzuspielen. In diesem Sinne wurden daher Daten eines Navigations- und Routenprovider verwendet, die mithilfe eines open source-Algorithmus auf das MATSim Netz gematcht wurden.²² Der Datensatz enthält Geschwindigkeitsverteilungen für einen typischen Wochentag für jede Straße und Stunde. Darauf basierend wurden zeitabhängige Reisezeiten für MATSim erstellt, in dem sich die Reisezeit pro Netzwerkkante in jeder Stunde ändert. Dabei wurde jeweils der Median der Verteilungen pro Stunde genommen und die Daten des typischen Wochentages auf alle Tage der Woche übertragen. Eine Limitierung dieses Ansatzes ist, dass der typische Wochentag vermutlich schlechter für das Wochenende geeignet ist. Da aber insbesondere am nachfragestarken Samstag die Nachfrage in der Nacht am höchsten ist, wo gleichzeitig die Abweichungen der zeitabhängigen Reisezeiten von der ungestauten Reisezeit am geringsten sind, sollte der Einfluss relativ gering sein. Im Zweifel würden die Reisezeiten am Wochenende eher pessimistisch abgebildet werden, was zu einer leichten Unterschätzung der Effizienz führen kann.

Abbildung IV sowie Abbildung V zeigen beispielhaft die resultierenden Geschwindigkeiten im Netzwerk um 10 Uhr morgens und abends. Die mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge liegt beispielsweise im Herzstück bei ca. 27 km/h, was sehr nah an den Ergebnissen früherer Studien zu Ride-pooling in München liegt²³. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass dies nur die reine Fahrzeit berücksichtigt, ohne Haltezeiten.

²¹ Siehe z.B.: [https://www.sueddeutsche.de/muenchen/muenchen-stau-verkehr-ranking-hauptstadt-1.5729254#:~:text=M%C3%BCnchen%20heute&text=M%C3%BCnchen%20rankt%202022%20mit%2074,46%20Stunden%20\(40\)%20Stauzeit](https://www.sueddeutsche.de/muenchen/muenchen-stau-verkehr-ranking-hauptstadt-1.5729254#:~:text=M%C3%BCnchen%20heute&text=M%C3%BCnchen%20rankt%202022%20mit%2074,46%20Stunden%20(40)%20Stauzeit).

²² Yang, C., Gidofalvi, G. Fast map matching, an algorithm integrating hidden Markov model with precomputation. International Journal of Geographical Information Science, 32:3, 2018, S. 547-570, DOI: 10.1080/13658816.2017.1400548

²³ Engelhardt R., Dandl, F., Bilali, A., Bogenberger, K. Quantifying the benefits of autonomous on-demand ride-pooling: a simulation study for Munich, Germany. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), IEEE (2019), S. 2992-2997 doi: 10.1109/ITSC.2019.8916955.

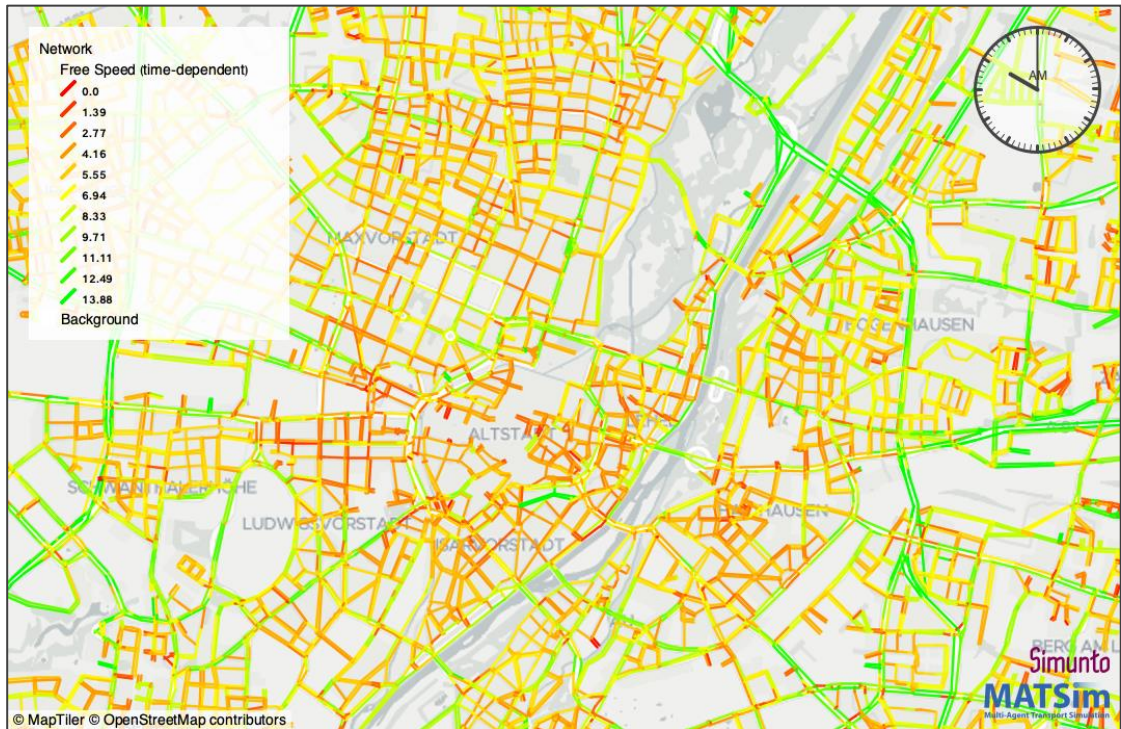


Abbildung IV: Zeitabhängige Reisezeiten 10 Uhr morgens. Werte in Meter/Sekunde, umgerechnet in 5km/h Intervallen

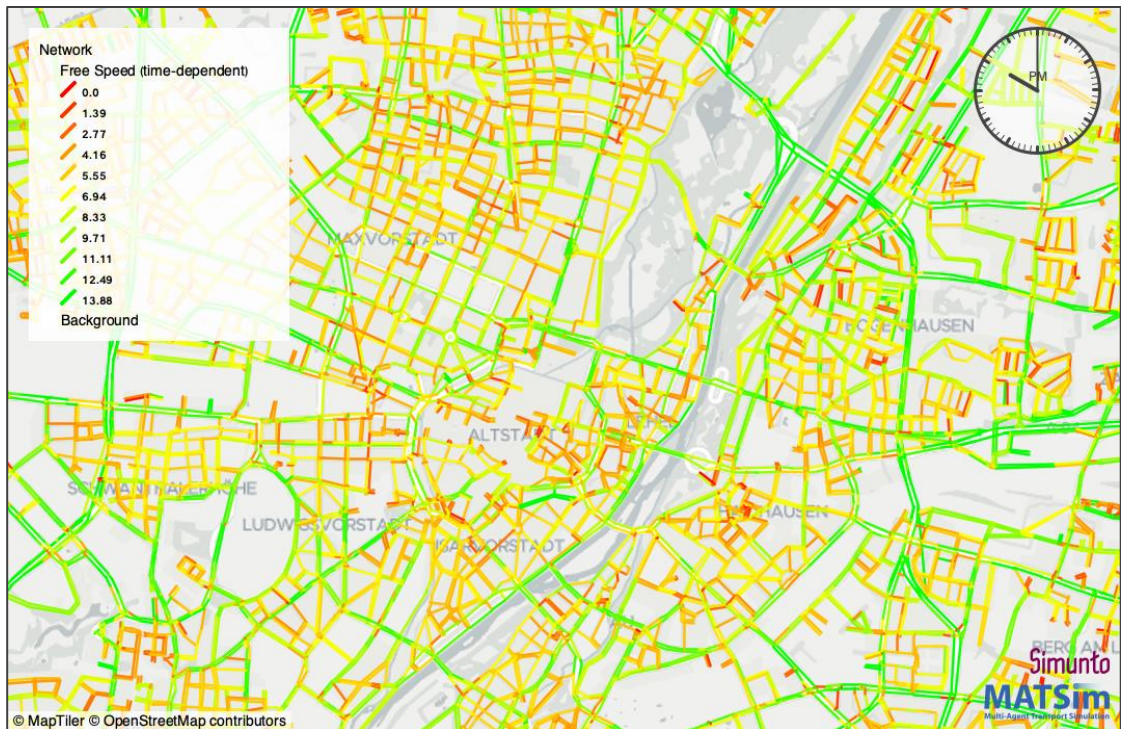


Abbildung V: Zeitabhängige Reisezeiten 10 Uhr abends. Werte in Meter/Sekunde, umgerechnet in 5km/h Intervallen

Schichtplanung

Ein on-demand Service steht und fällt mit einer effektiven Angebots- und Nachfragebalance. Anders als im Linienverkehr mit festem Takt, müssen Schichtpläne deutliche flexibler gestaltet werden, um Nachfragespitzen und -täler abzufangen. Zugleich sind auch fahrer:innenbasierte on-

demand Verkehre mit angestellten Fahrer:innen darauf angewiesen, Schichtpläne Wochen im Voraus zuzuweisen. Deshalb sind eine vorrausschauende Nachfrageabschätzung sowie maßgeschneiderte Schichtplanung unerlässlich.

Die Nachfragemodellierung in dieser Untersuchung folgt bestimmten zeitlichen Mustern und muss mit einem angemessenen Angebot an verfügbaren FahrerInnen bedient werden. Da ein on-demand System wie hier entworfen ein komplexes System ist, ist eine Schichtplanung nicht trivial, da Nachfrage nicht eins-zu-eins in eine Anzahl an benötigten Fahrzeugen übersetzbar ist und von vielen Faktoren abhängt (z.B.: räumliche Relation der Nachfrage, Distanz zu betrieblicher Infrastruktur wie hubs und Pausenorte, Staulevel, u.v.m.). Zum anderen müssen verschiedene Randbedingungen erfüllt sein (Rüst-, Pausen- und Lenkzeiten; Betriebszeiten). Zu diesem Zweck wurde eine Methodik entwickelt und angewendet, um für eine gegebene Nachfrage zu einem passenden Schichtplan zu gelangen. Diese besteht im Grundsatz aus drei Schritten:

- Flottensimulation mit gegebener Nachfrage in MATSim für einen *autonomen* Service, d.h. Fahrzeuge gelten als jederzeit verfügbar
- Basierend auf der Simulation mit einem autonomen Service werden die Ergebnisse genutzt, um abzuschätzen, wie viele Fahrzeuge zu jeder Zeit gleichzeitig im Einsatz waren. Mithilfe dieser Information wird mit einer einfachen Heuristik ein initialer Schichtplan erstellt, der sicherstellt, dass die Anzahl der gleichzeitig aktiven Schichten möglichst der Anzahl an gleichzeitig aktiven Fahrzeugen im autonomen Service entspricht, zuzüglich einem leichten Überhang um dem Bedarf an Pausen und erhöhter Leerfahrten durch Ein- und Ausrückfahrten gerecht zu werden
- Dieser initiale Schichtplan wird dann innerhalb einer weiteren Simulation mit MATSim iterativ optimiert. In diesem Fall läuft die Simulation über mehrere hundert Iterationen und simuliert dieselbe Woche mit der gleichen Nachfrage erneut. Zwischen den Iterationen wird das Ergebnis der vorangehenden Iteration bewertet und stochastisch, aber zielgerichtet verändert (z.B. durch das Einfügen neuer Schichten mit erhöhter Wahrscheinlichkeit dann, wenn es viele Ablehnungen gab). Wenn der veränderte Schichtplan in der nächsten Iteration „besser“ (insb. durch niedrigere Kosten, weniger Ablehnungen oder höhere Einnahmen) ist, wird er als aktuelle Lösung gespeichert. Falls die Lösung schlechter ist, wird sie nur mit abnehmender Wahrscheinlichkeit akzeptiert. Dieser „Simulated Annealing“-Algorithmus führt dann zu einem approximierten Ergebnis, dass alle Randbedingungen erfüllt. Eine genauere Beschreibung ist in einem kurzen Artikel erläutert²⁴.

Abbildung VI verdeutlicht den Prozess des dritten Schritts (hier wurde der initiale Schichtplan komplett zufällig erstellt). Zuletzt ist zu erwähnen, dass die Lösung nicht unbedingt global optimal sein muss. Das ist aber auch nicht notwendig, da es nicht zielführend ist, einen Schichtplan an dieser Stelle der Betriebskonzeption bis in das letzte Detail auf eine gegebene Nachfrage hin zu optimieren, da die exakte Nachfrage für eine bestimmte Woche in der Realität nicht genau vorhergesagt werden kann.

²⁴ N. Kuehnel, S. Arora, F. Zwick, Q. Zhang. Simulated Annealing in a Co-Evolutionary, Agent-Based Transport Modeling Framework – The Example of Ride-Pooling Driver Supply Optimization. Angenommen für hEART 2023. Preprint verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25985.74088>

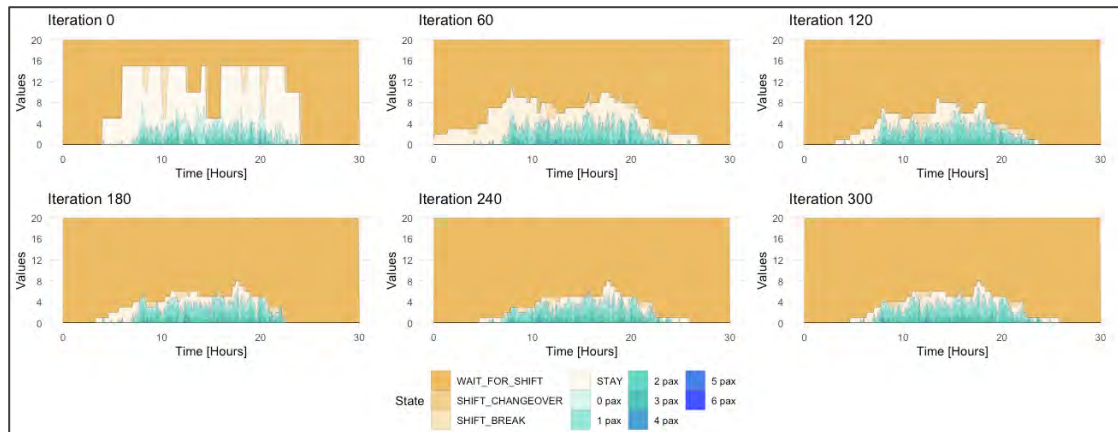


Abbildung VI: Beispielhafte Veranschaulichung des iterativen Schichtplanungsprozesses. Zu sehen sind die Zustände der Fahrzeuge über einen Tag, für mehrere Iterationen. Während in der Iteration Null noch zu viele FahrerInnenschichten geplant sind (sehr viele Fahrzeuge markiert als „STAY“, d.h. mit aktiver Schicht aber ohne Fahrtauftrag), passt sich der Schichtplan über die Iterationen an, sodass am Ende die Nachfrage mit deutlich weniger Angebot bedient werden kann.