

Diplomarbeit

(Diploma Thesis)

**Raumprogramm für den Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen:  
Transformation und Anpassung an die Anforderungen  
des kollektiven automatisierten Fahrens**

**Spatial program for Zurich Tiefenbrunnen station:  
Transformation and adaptation to the requirements  
of collective automated driving**

ausgeführt zum Zwecke des akademischen Grades Diplom-Ingenieur; eingereicht an der  
Technischen Universität Wien, Fakultät für Architektur und Raumplanung

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of Diplom-Ingenieur at the  
Technical University of Vienna, Faculty of Architecture and Planning

eingereicht von

Fynn Sebastian Kleine-Möllhoff

e12042935

Betreuer: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Martin Berger

Institut für Raumplanung

Forschungsbereich Verkehrssystemplanung

Technische Universität Wien

Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Wien, am 22.10.2024



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# ABSTRACT

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wird die Implementierung eines automatisierten Zubringersystems im öffentlichen Verkehr am Fallbeispiel des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen untersucht. Angesichts zunehmender Urbanisierung, steigender Verkehrsbelastung und deren negativer Folgen bieten kollektiv genutzte automatisierte Shuttles als Zubringer zum höherrangigen öffentlichen Verkehr eine vielversprechende Lösung, um sowohl die Erreichbarkeit zu verbessern als auch den Fahrzeugbestand und den damit verbundenen Flächenbedarf zu reduzieren.

Methodisch wird zunächst anhand einer GIS-Analyse der Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen definiert. Auf Grundlage empirischer Daten zur Bevölkerung wird anschließend das Nachfragepotenzial für ein automatisiertes Zubringersystem ermittelt. Darauf aufbauend wird die Anzahl der Shuttles berechnet, die notwendig sind, um diese Nachfrage zu decken.

Die Anzahl der Haltepositionen, die für den Betrieb zur Morgenspitzenstunde notwendig sind, wird zunächst in einem statischen Betriebsmodell bestimmt. Über die Anwendung der Erlang-C-Formel werden Störungen im Betriebsablauf berücksichtigt ( und eine realitätsnähere Abschätzung vorgenommen. Überprüft und konkretisiert wird diese Abschätzung durch eine Simulation, die einen höheren Detaillierungsgrad der Inputfaktoren zulässt.

Ziel der Arbeit ist es, die benötigten Shuttles und Haltepositionen zu bestimmen sowie den Flächenbedarf des Systems zu quantifizieren und diesen mit dem Flächenpotenzial im Nahbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen abzugleichen.

This thesis examines the implementation of an automated feeder system in public transport using Zurich Tiefenbrunnen station as a case study. In view of increasing urbanisation, rising traffic congestion and its negative consequences, collectively used automated shuttles as feeder services to higher-ranking public transport offer a promising solution for improving accessibility and reducing the number of vehicles and the resulting space demand.

Methodologically, the catchment area of Zurich Tiefenbrunnen station is first defined using a GIS analysis. The demand potential for an automated feeder system is then determined on the basis of empirical data on the population. Based on this, the number of shuttles required to meet this demand is calculated.

The number of stops required for operation during the morning peak hour is first determined in a static operating model. By applying the Erlang C formula, disruptions in the operating process are taken into account and a more realistic estimate is made. This estimate is checked and specified by a simulation, which allows a higher level of detail of the input factors.

The aim of the work is to determine the required shuttles and stopping positions as well as to quantify the space requirements of the system and to compare these with the space potential in the vicinity of Zurich Tiefenbrunnen station.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Implementierung eines automatisierten Zubringersystems im öffentlichen Verkehr am Fallbeispiel des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen. Die „letzte Meile“, also die Strecke zwischen einem Verkehrsknotenpunkt und dem Ziel der Reise (bzw. dem Ursprung einer Reise und dem Verkehrsknotenpunkt), stellt oft eine Herausforderung in der öffentlichen Verkehrsplanung dar. Sie wird nicht immer ausreichend durch konventionelle Transportmittel abgedeckt, da für die nötige, dicht getaktete Feinverteilung bzw. Sammlung der Fahrgäste ein immenser Fahrzeug- und Personalaufwand nötig wäre. Gerade diese letzte Meile (bzw. die Einfachheit ihrer Überwindung), ist jedoch maßgeblich für die Attraktivität und damit die Nutzung des öffentlichen Verkehrs (Kåresdotter et al. 2022, S. 120, Lesh 2013, S. 64).

Eine Lösung für dieses „Letzte-Meile-Problem“ könnten automatisierte Fahrzeuge sein, welche diese im Shuttlebetrieb bedienen. Dieses Szenario wird im Bericht des Planungsdachverbandes Region Zürich und Umgebung (RZU) skizziert. Die kollektiv genutzten Fahrzeuge befördern Fahrgäste zum jeweils nächstgelegenen Verkehrsdrehkreuz, von wo aus dann der weitere Weg angetreten wird bzw. umgekehrt: Nach Ankunft am Verkehrsknotenpunkt werden die Fahrgäste mit Shuttles zu ihren jeweiligen Zielen feinverteilt. Möglich würde dies durch die Einsparung von Fahrpersonal. In diesem hypothetischen Szenario würde der motorisierte Individualverkehr vollständig durch multimodale Wegeketten mit automatisierten Shuttles am Start- bzw. Endpunkt ersetzt.

Das Erkenntnisinteresse der Arbeit ist es, die Anzahl der benötigten Shuttles und Haltepositionen für ein automatisiertes Zubringersystem zum Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen zu quantifizieren und zu überprüfen, ob die notwendigen Flächenreserven im Nahbereich des Bahnhofs für die Implementierung dieser Infrastruktur vorhanden sind. Bewertungsgrundlage ist dabei

die Morgenspitze zwischen 07:00 und 08:00 Uhr. Um die Auswirkungen der Shuttlegröße auf den Flächenbedarf zu untersuchen, werden zwei verschiedene Szenarien berechnet und anschließend miteinander verglichen:

- Szenario „4er-Shuttle“: In diesem Szenario werden ausschließlich Shuttles mit einer Kapazität von 4 Personen eingesetzt.
- Szenario „8er-Shuttle“: In diesem Szenario werden ausschließlich Shuttles mit einer Kapazität von 8 Personen eingesetzt.

Um dieses Erkenntnisinteresse zu erreichen, wird zunächst über eine GIS-Analyse (mittels QGIS) der Einzugsbereich des Bahnhofs ermittelt. Dabei werden Puffer unterschiedlicher Distanzbereiche (bis 300 m, 300-500 m, 500-750 m, 750-1000 m) um den Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen und die umliegenden Bahnhöfe erstellt. Anschließend wird ein Voronoi-Diagramm erstellt, um den Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen gegenüber denen anderer Bahnhöfe abzugrenzen. Die Kombination aus den Distanzpuffern und dem Voronoi-Diagramm ergibt den Einzugsbereich.

Weiterhin werden zunächst statistische Daten ausgewertet, die Aufschluss über die potenzielle Nutzung des Systems geben, und, soweit möglich und relevant, in das GIS-Modell integriert, sodass sie räumlich verortet sind. Dazu zählen die Anzahl der Einwohner\*innen im Einzugsbereich, demografische Daten, Mobilitätsgrad und die Verkehrsmittelwahl nach Distanz. Weiterhin werden Substitutionswahrscheinlichkeiten, also die Wahrscheinlichkeit, dass ein bisheriges Verkehrsmittel durch das automatisierte Zubringersystem ersetzt wird, angenommen.

Darüber hinaus werden die Angebotsfaktoren einbezogen. Dazu werden zunächst die Streckenlängen ermittelt, die sich aus der Tiefe des Korridors zuzüglich eines Umwegfaktors ergeben. Basierend auf der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit, der Anzahl der Haltepunkte zum Fahrgastwechsel und der dafür benötigten Zeit ergibt sich die Umlaufzeit, die ein Shuttle für die Vollendung einer Fahrt benötigt. Zusätzlich muss die Zeit ermittelt werden, die ein Shuttle

an der Station verweilt, entweder zum Halten für den Fahrgastwechsel oder um den Takt einzuhalten. Ein Standardtakt von 180 Sekunden wurde festgelegt, um die Wartezeiten gering zu halten und die Anbindung an den Bahnhof attraktiv zu gestalten. In Fällen, in denen dieser Takt die Nachfrage, insbesondere während der Morgenspitzenstunde, nicht vollständig abdeckt, wird der Takt entsprechend angepasst und verdichtet.

Aus den Nachfrage- und Angebotsfaktoren wird im Anschluss die, für den Betrieb notwendige Anzahl der Shuttles und anschließend der Haltepositionen berechnet. Diese werden zunächst anhand eines statischen Modells berechnet, welches eine (theoretische) Untergrenze für die Anzahl der Haltestellen liefert. Anschließend wird die Erlang-C-Formel verwendet, um zu berechnen, wie viele Haltepositionen nötig sind, damit in 95 % der Fälle ein Shuttle bei der Ankunft an der Station eine freie Haltestelle vorfindet. Die Ergebnisse der Erlang-C-Formel werden durch eine Simulation, die einen höheren Detaillierungsgrad der Inputfaktoren zulässt, überprüft und konkretisiert.

Im letzten Schritt wird der Flächenbedarf des Shuttle-Systems berechnet. Dabei wird zwischen Abstellflächen für Randzeiten und dem Flächenbedarf während der Spitzenstunde unterschieden. Für die Spitzenstunde werden die Flächen für die Haltestellen, den Perron, die Fahrstreifen und die Zu- und Abfahrten berücksichtigt.

Als Ergebnis ergibt sich, dass für das Szenario „4er-Shuttle“, in dem nur 4-Personen-Shuttles eingesetzt werden, 65 Shuttles benötigt werden, während im Szenario „8er-Shuttle“ mit 8-Personen-Shuttles 47 Shuttles benötigt werden. Es müssen also im Szenario „4er-Shuttle“ 38,3 % mehr Fahrzeuge eingesetzt werden als im Szenario „8er-Shuttle“.

Die Anzahl der benötigten Haltepositionen unterscheidet sich nur geringfügig zwischen den beiden Szenarien: Im Szenario „4er-Shuttle“ werden 14 Haltepositionen benötigt, im Szenario „8er-Shuttle“ hingegen 15. Dass im Szenario „8er-Shuttle“ trotz der geringeren Anzahl an

Shuttles mehr Haltepositionen benötigt werden, ist auf die längeren Haltezeiten an der Station zurückzuführen. 8-Personen-Shuttles befördern mehr Fahrgäste pro Fahrzeug und haben somit längere Haltezeiten zum Fahrgastwechsel. Diese längeren Haltezeiten führen dazu, dass sich mehr Shuttles gleichzeitig in der Station aufhalten und somit trotz der deutlich geringeren Anzahl an Shuttles eine Halteposition mehr erforderlich ist.

Der Flächenbedarf für die Abstellfläche beträgt 704 m<sup>2</sup> im Szenario „4er-Shuttles“ und 687 m<sup>2</sup> im Szenario „8er-Shuttles“. Die Abstellflächen fallen in beiden Szenarien ungefähr gleich aus, da der größere Flächenverbrauch je Shuttle im Szenario „8er-Shuttles“ durch die höhere Anzahl an 4er-Shuttles ausgeglichen, bzw. leicht übertroffen wird.

Der Flächenbedarf der Station beträgt 667,5 m<sup>2</sup> im Szenario „4er-Shuttles“ und 928 m<sup>2</sup> im Szenario „8er-Shuttles“. Der Flächenbedarf der Station ist also für das Szenario „8er-Shuttle“ deutlich größer als für das Szenario „4er-Shuttle“. Dies liegt zum einen daran, dass im Szenario „8er-Shuttle“ eine Halteposition mehr benötigt wird. Zum anderen benötigen die größeren Fahrzeuge im Szenario „8er-Shuttle“ pro Fahrzeug mehr Fläche, weshalb die Haltepositionen größer dimensioniert sind als im Szenario „4er-Shuttle“. In der Folge sind auch die Haltekanten länger, was wiederum längere Perrons und Fahrstreifen bedeutet. Aus diesen Gründen fällt der Flächenverbrauch für die Station im Szenario „8er-Shuttle“ knapp 40 Prozent größer aus als im Szenario „4er-Shuttle“.

Abschließend wurden die ermittelten Flächenbedarfe mit dem Flächenpotenzial am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen verglichen. Dieser Vergleich zeigt, dass der Flächenbedarf für den Betrieb eines solchen Systems grundsätzlich gedeckt werden könnte. Allerdings konnte auch gezeigt werden, dass der Flächenverbrauch je nach Szenario keine oder nur geringe Flächeneffizienzvorteile gegenüber dem Bestand bietet. Dies jedoch vor dem Hintergrund einer deutlichen Steigerung der Erreichbarkeit aufgrund dichter Takte und einer deutlich verbesserten Abdeckung, sodass die Effizienz der Flächennutzung deutlich verbessert wird.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Abstract</b> .....	<b>I</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1. Einführung in das Themenfeld .....	2
1.2. Problemstellung.....	4
1.3. Forschungsanlass .....	5
1.4. Abgrenzung und Fokussierung der Arbeit .....	7
1.5. Forschungsfragen.....	8
1.6. Struktur der Arbeit .....	9
<b>2. Zuordnung von Methoden und Forschungsfragen</b> .....	<b>11</b>
<b>3. Forschungs- und Planungsstand: Automatisiertes Fahren und Verkehrsknoten</b> .....	<b>12</b>
3.1. Literatur-Review: Automatisiertes Fahren und Verkehrsknotenpunkte .....	12
3.2. Grundlagen des automatisierten Fahrens.....	14
3.2.1. Stufen des automatisierten Fahrens.....	16
3.2.2. Fahrzeugvarianten für den Einsatz im kollektiven automatisierten Verkehr .....	16
3.2.3. Erkenntnisse zur Wirkung automatisierter Fahrzeuge aus internationalen Studien .....	17
3.2.3.1. Ergebnisse der Studie „Urban Mobility System Upgrade“ .....	18
3.2.3.2. Ergebnisse der „MEGAFON“-Studie.....	20
3.2.3.3. Identifikation gemeinsamer Trends der internationalen Studien.....	22
3.3. Grundlagen zu Verkehrsknotenpunkten.....	23
3.3.1. Das schweizer Modell der Verkehrsdrehscheibe .....	25
3.3.2. Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf Verkehrsdrehscheiben.....	26
<b>4. Fallbeispiel Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen</b> .....	<b>28</b>
4.1. Begründung der Auswahl .....	29
4.2. Bestandsaufnahme .....	31
4.3. Betriebskonzept.....	34
4.3.1. Linienführungsmodelle .....	34
4.3.2. Fahrzeugtyp- und -größen.....	36
4.3.3. GIS-Analyse zur Definition des Einzugsbereiches.....	38
4.3.3.1. Definition der Einzugsbereiche über Distanzpuffer .....	39
4.3.3.2. Abgrenzung der Einzugsbereiche über Voronoi-Diagramm.....	40
4.3.3.3. Erstellung von Korridoren und Distanzsektoren.....	43
4.4. Berechnung des Nachfragepotenzials im Einzugsbereich.....	45
4.4.1. Erläuterung der Datengrundlage.....	45
4.4.2. Einwohner*innen je Distanzsektor .....	46
4.4.3. Demografische Verteilung der Einwohner*innen je Distanzsektor .....	48
4.4.4. Mobilitätsgrad.....	50

4.4.5. Anteil Binnenpendler*innen.....	53
4.4.6. Verkehrsmittelwahl nach Distanz.....	54
4.4.7. Substitutionswahrscheinlichkeiten .....	56
4.5. Berechnung des Shuttlebedarfs im Zubringersystem.....	58
4.5.1. Streckenlängen der Shuttlelinien .....	59
4.5.2. Umlaufzeit je Shuttlelinie.....	60
4.5.3. Festlegung und Gewährleistung des Standardtaktes .....	61
4.5.4. Warte- und Haltezeiten im Shuttlebetrieb .....	62
4.5.5. Ermittlung der Beförderungskapazität und Anpassung der Shuttleanzahl .....	63
4.5.6. Taktanpassung an den Bedarf.....	65
4.5.7. Zusammenfassung: Berechnung des Shuttlebedarfs .....	66
4.6. Bestimmung der Anzahl an Haltepositionen und des Flächenbedarfs .....	70
4.6.1. Anzahl Haltepositionen.....	70
4.6.1.1. Berechnung der Mindestanzahl an Haltepositionen im statischen Modell.....	72
4.6.1.2. Erlang-C-Formel zur Berücksichtigung variierender Ankunftszeiten.....	74
4.6.1.3. Simulation zur Konkretisierung der notwendigen Anzahl an Haltepositionen .....	76
4.6.1.4. Gegenüberstellung der Ergebnisse .....	82
4.6.2. Flächenbedarf .....	83
4.6.2.1. Fahrzeugabstellfläche .....	84
4.6.2.2. Stationsgröße .....	85
4.6.2.3. Machbarkeitsstudie: Flächenbedarf am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen .....	89
<b>5. Beantwortung der Forschungsfragen .....</b>	<b>94</b>
<b>6. Reflexion der Arbeit.....</b>	<b>100</b>
<b>7. Weiterer Forschungsbedarf .....</b>	<b>102</b>
<b>8. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>104</b>

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 01: Struktur der Arbeit (eigene Darstellung nach Lutz 2017, S. 12). .....	10
Abb. 02: Reduktion des Fahrzeug- und Stellplatzbedarfs nach Studie (eigene Darstellung nach Friedrich und Hartl 2016, ITF 2015). .....	23
Abb. 03: Verortung Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen (Kanton Zürich 2024) .....	28
Abb. 04: Nahbereich Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen (Kanton Zürich 2024).....	29
Abb. 05: Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen, Bellerivestraße, Zürichsee (eigenes Fotoarchiv). .....	30
Abb. 06: Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen, Vorplatz (eigenes Fotoarchiv).....	31
Abb. 07: Park-and-Ride Anlage, Autowaschanlage (eigenes Fotoarchiv).....	32
Abb. 08: Flächenverteilung Ist-Zustand, Status quo (eigene Darstellung nach Kanton Zürich 2024).....	33
Abb. 09: Distanzpuffer (eigene Darstellung nach Kanton Zürich 2024).....	40
Abb. 10: Voronoi-Diagramm (eigene Darstellung nach Kanton Zürich 2024).....	41
Abb. 11: Distanzpuffer nach Überlagerung mit Voronoi-Diagramm (eigene Darstellung nach Kanton Zürich 2024).....	42
Abb. 12: Distanzsektoren (eigene Darstellung nach Kanton Zürich 2024).....	44
Abb. 13: Demografie Kreis 8 und Gesamtstadt Zürich (Eigene Darstellung nach Stadt Zürich 2023). .....	48
Abb. 14: Altersgruppen je Distanzsektor im Korridor 1 (eigene Darstellung nach Stadt Zürich 2023). .....	49
Abb. 15: Anteil der Bevölkerung ab 6 Jahren, der pro Tag im Verkehr unterwegs ist unterteilt nach Werktagen, Samstag und Sonntag (Eigene Darstellung nach ARE 2015, S. 18). .....	50
Abb. 16: Anteil der Bevölkerung ab 6 Jahren, der pro Tag (Montag bis Sonntag) im Verkehr zunterwegs ist unterteilt nach Alter (Eigene Darstellung nach ARE 2015, S. 18). .....	51
Abb. 17: Mobilitätsgrad im Tagesverlauf nach Altersklasse (eigene Darstellung nach ARE 2015, S. 18).....	52
Abb. 18: Anteil mobiler Personen nach Altersgruppe zwischen 07:00 Uhr und 08:00 Uhr (Eigene Darstellung nach ARE 2015, S. 18). .....	53
Abb. 19: Anteil mobiler Personen Je Korridor zwischen 07:00 Uhr und 08:00 Uhr (Eigene Darstellung nach ARE 2015, S. 18). .....	54
Abb. 20: Verkehrsmittelwahl nach Distanzklassen (eigene Berechnung nach Heller 2021, S. 25). .....	55
Abb. 21: Verkehrsmittelwahl nach Distanz in Korridor 1 (eigene Berechnung).....	56
Abb. 22: Benötigte Shuttle zur Gewährleistung des Standardtaktes (eigene Berechnung).....	63
Abb. 23: Benötigte Shuttle zur Deckung der Nachfrage (eigene Berechnung). .....	65
Abb. 24: Anzahl benötigter Fahrzeuge nach Szenario (eigene Berechnung). .....	66
Abb. 25: Vergleich Nachfrage Zubringerfahrten und benötigte Shuttle nach Szenario (eigene Berechnung).....	67
Abb. 26: Benötigte Shuttle zur Deckung der Nachfrage (eigene Berechnung). .....	68
Abb. 27: Ø benötigte Shuttle nach Takt (eigene Berechnung). .....	69

Abb. 28: Erforderliche Anzahl an Haltepositionen zur Spitzenstunde zwischen 07:00 und 08:00 Uhr im statischen Modell (eigene Berechnung).....	73
Abb. 29: Anzahl nötiger Haltepositionen nach Service-Level (eigene Berechnung). ....	76
Abb. 30: Simulationsaufbau (eigene Darstellung nach SWZ o. J.). ....	78
Abb. 31: Anzahl Shuttle nach Berechnungsmethode und Service-Level (eigene Darstellung nach SWZ o. J.). ....	79
Abb. 32: Gegenüberstellung Anzahl Haltepositionen nach Berechnungsmethode (eigene Darstellung). ....	81
Abb. 33: Flächenbedarf zum Abstellen der Shuttle-Flotte zu Randzeiten (eigene Berechnung). ....	85
Abb. 34: Flächenbedarf zum Abstellen der Shuttle zu Randzeiten, Szenario „4er-Shuttle“ (eigene Berechnung).....	86
Abb. 35: Flächenbedarf zum Abstellen der Shuttle zu Randzeiten, Szenario „8er-Shuttle“ (eigene Berechnung).....	86
Abb. 36: Flächenbedarfe des Shuttle-Systems am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen (Eigene Berechnung). ....	88
Abb. 37: Flächenverbrauch nach Zweck, Status quo (eigene Darstellung nach Kanton Zürich 2024).....	90
Abb. 38: Flächenverbrauch nach Zweck, Szenario „4er-Shuttle“ (eigene Darstellung nach Kanton Zürich 2024).....	92
Abb. 39: Flächenverbrauch nach Zweck, Szenario „8er-Shuttle“ (eigene Darstellung nach Kanton Zürich 2024).....	93

# TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 01: Abgrenzung und Fokussierung der Arbeit (eigene Darstellung).....	7
Tab. 02: Leit- und Forschungsfragen der Arbeit (eigene Darstellung).....	8
Tab. 03: Zuordnung der Methoden zur Beantwortung der Forschungsfragen (eigene Darstellung).....	11
Tab. 04: Schwerpunkte des Literatur-Reviews (eigene Darstellung) .....	12
Tab. 05: Anwendung der Snowballing Methode zum Literatur-Review (eigene Darstellung nach Wohlin 2014) .....	13
Tab. 06: Stufen des automatisierten Fahrens (eigene Darstellung nach SAE International 2021) ....	15
Tab. 07: Vor- und Nachteile automatisierter Fahrzeuge (Eigene Darstellung nach Mitteregger et al. 2021, S. 138, Mörner 2018, 49 ff.).....	16
Tab. 08: Szenarien der Studie „MEGAFON“ (eigene Darstellung nach Friedrich und Hartl 2016, S. 10).....	20
Tab. 09: Analyisierte Szenarien der Studie „MEGAFON“ (eigene Darstellung nach Friedrich und Hartl 2016, S. 10).....	21
Tab. 10: Zusammenfassung Fahrzeuggrößen (eigene Darstellung nach Zoox 2024). .....	36
Tab. 11: Zusammenfassung Betriebskonzept (eigene Darstellung). .....	37
Tab. 12: Beschreibung und Zweck der Datengrundlage (eigene Darstellung). .....	45
Tab. 13: Einwohner*innen im Einzugsgebiet nach Distanzsektor (eigene Berechnung nach BFS 2019).....	47
Tab. 14: Substitutionswahrscheinlichkeiten bisher genutzter Verkehrsmittel durch kaF (eigene Annahme). .....	57
Tab. 15: Anzahl der Personen im Zubringerverkehr zum Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen, werktags zwischen 07:00 und 08:00 Uhr (Eigene Berechnung).....	59
Tab. 16: Weglänge Shuttlelinie nach Korridor (eigene Berechnung nach Mennicken et al. 2023, S. 190).....	60
Tab. 17: Takt je Korridor nach Szenario (eigene Berechnung). .....	64
Tab. 18: Zusammenfassung der Berechnung des Shuttlebedarfs (eigene Berechnung).....	70
Tab. 19: Übersicht der Input-Faktoren je Berechnungsmethode (eigene Darstellung). .....	80
Tab. 20: Detaillierungsgrade je Berechnungsmethode (eigene Berechnung).....	82
Tab. 21: Flächenbedarf eines abgestellten Shuttle (eigene Abschätzung nach Zoox 2024).....	84
Tab. 22: Flächenbedarf Fahrzeug im Stand (eigene Abschätzung nach Zoox 2024) .....	87

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

aF .....	automatisiertes Fahren
APA .....	American Planning Association
ARE .....	Bundesamt für Raumentwicklung
BAV .....	Bundesamt für Verkehr
BFS.....	Bundesamt für Statistik
FGSV .....	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
GIS .....	geografisches Informationssystem
ITF.....	International Transport Forum
kaF .....	kollektives automatisiertes Fahren
LiDAR.....	Light Detection and Ranging-Sensor
MaaS.....	Mobility-as-a-Service
MIV .....	motorisierter Individualverkehr
NHTSA.....	National Highway Traffic Safety Administration
OECD .....	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
ÖV.....	Öffentlicher Personennahverkehr
RZU.....	Planungsdachverband Zürich und Umgebund
SAE .....	Society of Automotive Engineers
SPNV .....	schienengebundener Personennahverkehr
SVG.....	Straßenverkehrsgesetz
SWZ.....	Simulationswissenschaftliches Zentrum Clausthal-Göttingen
UVEK.....	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VDV .....	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 1. EINLEITUNG

Die Vision von automatisierten Fahrzeugen wird von führenden Automobilherstellern und Technologieunternehmen begeistert propagiert. „It will take a few more years to introduce fully autonomous cars,” so die Volvo Car Corporation im Jahr 2022 (Volvo Car Group 2022). Auch die Audi AG stellt in Aussicht, dass „automatisierte Fahrzeuge 2030 Teil der Mobilitätslandschaft sein werden” (Audi AG 2023). Elon Musk, Geschäftsführer von Tesla Inc., behauptete bereits 2019: „I think we will be feature complete for self-driving this year” (ARK Invest 2019). In der Schweiz hat Swisscom 2015 das erste selbstfahrende Auto, allerdings lediglich zu Forschungs- und Entwicklungszwecken, auf die Straße gebracht (Swisscom 2015).

Entwicklungen im Bereich des automatisierten Fahrens werden maßgeblich von zwei großen Industriezweigen vorangetrieben: der Fahrzeugindustrie und der IT-Industrie (Oehry et al. 2020, S. 58). Entsprechend werden vor allem die individuellen Vorteile eines automatisierten Fahrzeugs kommuniziert: Zum einen die Privatsphäre, die entspanntes Reisen mit Familie oder Freunden ermöglicht und zum anderen Tätigkeiten, die zu Zeiteinsparungen führen, wie Arbeiten, das Abhalten von Meetings oder das Schlafen während der Fahrt. Auch im politischen Diskurs zum automatisierten Fahren werden vor allem die vermeintlichen Vorteile in den Vordergrund gestellt, wobei neben den individuellen Aspekten vermehrt die gesellschaftlichen Vorteile hervorgehoben werden. Regelmäßig genannt werden die Reduktion von Verkehrsunfällen, die Vermeidung von Staus, die optimierte Fahrweise und die damit verbundene Abnahme klimaschädlicher Emissionen sowie die bessere Einbindung von Personengruppen, die bislang in ihrer Mobilität eingeschränkt waren (Dangschat und Stickler 2020, S. 57). So überwiegen im Diskurs

zum automatisierten Fahren die (möglichen) Vorteile (Dangschat und Stickler 2020, S. 53). Gleichzeitig werden Bedenken hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Sicherheit der Technologie geäußert (Fraedrich und Lenz 2015, S. 647 zit. n. Frost & Sullivan 2006). Auch ethische (Goodall 2014), strafrechtliche (Feldmann 2024) und haftungsrechtliche (Steege 2022) Fragen sind bis dato noch nicht abschließend geklärt.

Die Fokussierung auf die technische, rechtliche und ökonomische Machbarkeit birgt erhebliche Risiken. Sobald technische Standards festgelegt, rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen und ökonomische Entscheidungen getroffen sind – insbesondere in einem langfristig planenden Wirtschaftssektor wie der Automobilindustrie – entsteht erheblicher Druck auf die politischen Entscheidungsträger\*innen und in der Folge auf die Planung, die räumlichen Voraussetzungen für deren Umsetzung zu schaffen. So besteht die Gefahr, dass privatwirtschaftliche Akteure ihre Interessen vorantreiben und eine Wiederholung der autozentristischen Planung der vergangenen Jahrzehnte erfolgt. Planer\*innen sollten daher unbedingt vermeiden, auf Gewissheit darüber zu warten, wie automatisierte Fahrzeuge exakt funktionieren und eingesetzt werden. Stattdessen muss die Verkehrsinfrastruktur frühzeitig in einer Weise entwickelt werden, die nachhaltige Mobilitätsmodi unterstützt (Mitteregger et al. 2020, S. 155, Schlossberg et al. 2018, S. 14, Wellik und Kockelman 2020, S. 201).

Dementsprechend reicht die bloße Fokussierung auf technische, rechtliche und ökonomische Fragestellungen in einer Zeit, in der die Raumplanung zunehmend von der Notwendigkeit geprägt ist, ökologischen und sozialen Anforderungen gerecht zu werden, nicht aus. Es bedarf, im Gegensatz zur lange Zeit betriebenen sektoralen Planung des Verkehrsträgers Straße, mit dem eindimensionalen Ziel, motorisierte Fahrzeuge möglichst schnell und mit wenig

Widerständen zu bewegen in welcher andere Verkehrsteilnehmer\*innen nur nachrangig oder gar nicht berücksichtigt wurden (Schlossberg et al. 2018, S. 2), einer integrierten Planung, von Verkehrsinfrastruktur, Mobilität und Siedlungsentwicklung, die sich den zugrunde liegenden gesellschaftlichen Mobilitätssystemen annimmt (Dangschat und Stickler 2020, S. 64, Vallée und Gertz 2021, S. 54). Die Raumplanung muss sich also trotz und gerade wegen dieser bisher nicht vollständig geklärten Fragen damit auseinandersetzen, wie das automatisierte Fahren in die Mobilität und die Gestaltung von städtischen und ländlichen Räumen integriert werden kann. Diese Überlegungen können die Grundlage für einen notwendigen gesellschaftlichen und demokratischen Diskurs über die erstrebenswerte Art der Implementierung des automatisierten Fahrens bilden, dessen Ergebnisse wiederum die Leitbilder und Zielvorgaben für die technische, rechtliche und ökonomische Entwicklung darstellen.

Für den Planungsraum Zürich und Umgebung wurde durch den Planungsdachverband Region Zürich und Umgebung (RZU) im Grundlagenbericht „Räumlich-differenzierte Auswirkungen des automatisierten Fahrens“ (RZU 2023) bereits ein Zielbild für die Implementation automatisierten Fahrens skizziert. Dabei kommt dem automatisierten Fahren, insbesondere im Hinblick auf die Förderung des kollektiven automatisierten Fahrens, eine besondere Funktion zu. Die Schwerpunktsetzung, das automatisierte Fahren ausschließlich kollektiv zu nutzen und private, individuell genutzte Fahrzeuge im Verkehrssystem nicht mehr vorzusehen, würde eine revolutionäre Veränderung des derzeit vorherrschenden Verkehrssystems bedeuten und eine Situation darstellen, die umfassende Änderungen in der Mobilität, im Raum und im Nutzer\*innenverhalten erfordert (Del Duce

et al. 2020, S. 88). Die Auswirkungen einer so umfassenden Transformation würden erhebliche Veränderungen im Verkehr, in der zugehörigen Infrastruktur, im Raumbedarf sowie in der Raumwirkung mit sich bringen, weshalb die vertiefte Untersuchung dieser Auswirkungen ein besonderes Forschungsinteresse darstellt. Bereits heute haben Umsteigepunkte eine große Bedeutung für die Mobilität und Stadtentwicklung (Danilina und Teplova 2018, S. 6, Pshinko et al. 2022, S. 201). Sie verbinden den öffentlichen Nahverkehr untereinander und integrieren als Verkehrsdrehscheiben Mobilitätsangebote wie Carsharing, Veloverleihsysteme und Ladepunkte für Elektromobilität und, von besonderem Interesse in dieser Arbeit, potenziell automatisierte Fahrzeuge. Aufgrund ihres multimodalen Angebotes und damit hoher Erreichbarkeit weisen diese Punkte regelmäßig eine hohe Nutzungsdichte sowie Lagegunst auf (Vallée und Gertz 2021, S. 61–62). Mit der Entwicklung des automatisierten Fahrens, insbesondere im Bereich des kollektiven Verkehrs, gewinnen die genannten Punkte zusätzlich an Bedeutung. Denn durch die Bündelung des bisherigen MIV werden die Verknüpfungspunkte eine noch zentralere Funktion im Verkehrssystem einnehmen. Diese Entwicklung ist daher aus raumplanerischer Sicht von großem Interesse.

## 1.1. EINFÜHRUNG IN DAS THEMENFELD

Technische Innovationen gehen stets mit einer Ambivalenz von Nutzen und Risiken sowie positiven und negativen Auswirkungen einher (Redlich et al. 2018, S. 26 zit. n. Renn 2014) Ihre Entwicklung und Anwendung steht in einem Spannungsfeld von Fortschritt, Risiken, Verantwortung und der Gefahr eines Kontrollverlusts über die Konsequenzen ihrer Anwendung stehen, wie an Technologien wie der Atomenergie, Gentechnik, Informations- und

Kommunikationstechnologien, aber eben auch Robotern und autonomen Systeme deutlich wird (Redlich et al. 2018, S. 26).

Oftmals betrachten Ingenieur\*innen und Entscheidungsträger\*innen Technik als Selbstzweck, ein Instrument des Fortschritts um des Fortschritts willen. Dabei werden die Fragen und Bedürfnisse derjenigen, welche diese Technologien letztendlich nutzen sollen, häufig vernachlässigt oder erst spät berücksichtigt (Redlich et al. 2018, S. 39). Ein Faktor, der die Akzeptanz und Akzeptabilität neuer Technologien beeinflusst, ist die Wahrnehmung der Unsicherheit bezüglich ihrer gegenwärtigen und zukünftigen Auswirkungen auf Menschen, Gesellschaft und Umwelt. Insbesondere gilt dies für Technologien, die als potenziell stark disruptiv eingeschätzt werden (Oehry et al. 2020, 25 ff.). Teile der Forschung erwarten, dass automatisierte Fahrzeuge zu erheblichen Veränderungen in Mobilitätsmustern und städtischer Entwicklung führen könnten, ähnlich wie bei der ersten Einführung des Autos, der U-Bahn oder der Straßenbahn (Baumgardner et al. 2019, S. 12, Stead und Vaddadi 2019, S. 126) und wie diese positive oder negative Veränderungen mit sich bringen können (Litman 2023, S. 70).

Für die gesellschaftliche Akzeptanz neuer Technologien ist es daher unerlässlich, dass die Kontrolle über diese Auswirkungen gesichert ist (Redlich et al. 2018, S. 36). Dies gilt besonders für automatisierte Fahrsysteme, die, sobald sie eingeführt werden, einen erheblichen Einfluss auf den Alltag der Menschen haben werden. Um die Technologie so zu gestalten, dass sie den tatsächlichen Anforderungen und Bedürfnissen der Gesellschaft entspricht, muss diese umfassend informiert und in der Lage sein, fundierte Entscheidungen zu treffen. Dies erfordert eine gesamtgesellschaftliche Entscheidungskompetenz, indem Bürgerinnen und Bürger mit den notwendigen Informationen

ausgestattet werden (Redlich et al. 2018, S. 39). Sie müssen also befähigt sein, informierte und verantwortungsvolle Entscheidungen zu treffen um diese über demokratische Prozesse in die Politikgestaltung und Rechtsetzung einzubringen.

Die Diplomarbeit leistet einen Beitrag zur Untersuchung einer möglichen Implementierung eines automatisierten und kollektive genutzten Shuttle-Systems, als Zubringer zum höherrangigen ÖV. Als Untersuchungsraum wurde der Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen gewählt.

Grundsätzlich weist das Aufkommen automatisierter Fahrzeuge eine relativ lange Vorlaufzeit auf, sodass ungewöhnlich viel Zeit zur Verfügung steht, um die Nutzung der Technologie zu planen und vorzubereiten, bevor sie weit verbreitet eingesetzt wird. Diese Zeitspanne bietet die Möglichkeit, notwendige infrastrukturelle, rechtliche und gesellschaftliche Anpassungen zu erkennen und umzusetzen (Wellik und Kockelman 2020, S. 186).

Aus der Perspektive der Kantone und Städte eröffnet das automatisierte Fahren zahlreiche Chancen, darunter die Möglichkeit, die Erschließungsqualität und Erreichbarkeit zu verbessern. Wenn Modelle des automatisierten Fahrens zu einer Reduktion der Fahrzeuganzahl im urbanen Raum führen, können dadurch Parkflächen eingespart werden. Zudem ermöglicht die Automatisierung Effizienzsteigerungen und Kapazitätserhöhungen auf den Straßen, was potenziell eine Reduktion von Fahrstreifen bzw. Fahrbahnbreiten ermöglicht. In der Folge ist mit Flächengewinnen zu rechnen, die dann anderen Nutzungen zugeführt werden können (EBP 2017, 4). Diese Chance soll im Rahmen dieser Diplomarbeit genutzt werden, um die zukünftige Entwicklung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖV) und

des motorisierten Individualverkehrs (MIV) zu beleuchten. Die Arbeit bietet eine vertiefende Analyse und Darstellung städtebaulichen und verkehrsinfrastrukturellen Bedarfe kollektiver automatisierter Fahrsysteme, indem die Flächenwirkung eines solchen Systems abschätzt und simuliert wird.

## 1.2. PROBLEMSTELLUNG

In den städtischen Ballungszentren haben die Verkehrsmittel bereits heute ihre Kapazitätsgrenzen erreicht (Schweizerischer Bundesrat, KdK, BPUK, SSV, SGV 2012, S. 53). Gleichzeitig wird für die Schweiz ein Bevölkerungswachstum um 19,5 % von 8,62 Millionen im Jahr 2020 auf 10,44 Millionen im Jahr 2050 erwartet (Bundesamt für Statistik (BFS) 2020, S. 10), wobei dieses Wachstum in Agglomerationsräumen überdurchschnittlich ansteigen wird. Für den Kanton Zürich wird beispielsweise ein Anwachsen der ständigen Wohnbevölkerung um 29 % von 1 554 000 auf 2 003 000 Personen prognostiziert (BFS 2020, S. 53). Aufgrund der begrenzten Raumverhältnisse ist der weitere Ausbau der Straßen- und Schienennetze allerdings nur eingeschränkt möglich. Daher ist es notwendig, umweltschonende und zugleich wirtschaftliche Lösungen zu entwickeln, die eine effizientere Nutzung der bestehenden Netze ermöglichen (Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) 2021, S. 11). Das übergeordnete Ziel der Verkehrsinfrastrukturplanung des Bundes besteht aus diesem Grund darin, die Leistungsfähigkeit des Gesamtverkehrssystems durch Effizienzgewinne zu erhöhen (ARE 2021, S. 3–4, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) 2017, S. 10).

Die heutigen stark zersiedelten Strukturen und die intensive Nutzung des Pkw zur Verbindung von Arbeitsplätzen, Freizeit- und

Einkaufsmöglichkeiten führen zu erheblichen Verkehrsbelastungen. Diese Belastungen manifestieren sich in Form von Lärm- und Abgasemissionen, die sowohl die Lebensqualität in urbanen Gebieten beeinträchtigen als auch die Umwelt schädigen (Vallée und Gertz 2021, S. 54–55). Da es keine Möglichkeit gibt, sich aus dem Stau „herauszubauen“ und dies ohne Zweifel zu umso höheren Belastungen führt, beginnen Städte, die Vorteile des Gehens, Velofahrens und des öffentlichen Verkehrs wiederzuentdecken. Es steht außer Frage, dass Straßenverbesserungen zu induziertem Verkehr, also einem Anstieg des Verkehrsaufkommens, führen und Reisezeiten nur kurzfristig gemindert werden. Städte gehen daher heute vermehrt dazu über, die Flächenaufteilung und -zuweisung so anzupassen, dass die Nutzung von nicht-automobilen Modi gefördert wird (Cervero 2002, S. 17, Schlossberg et al. 2018, S. 2). Dies geschieht beispielsweise durch die Begrenzung der Siedlungsfläche nach außen bei gleichzeitiger Nachverdichtung nach innen und einer Nutzungsmischung (Kanton Zürich 2018, S. 40) anstelle der tradierten Nutzungstrennung, wie sie im Sinne der Charta von Athen angestrebt wurde.

Zudem bedeuten die Belastungen aus dem Verkehr, insbesondere Lärm- und Abgasbelastungen, eine erhebliche Einschränkung der Lebens- und Aufenthaltsqualität. Eine erhöhte Verkehrsdichte impliziert neben einer verstärkten sozialen Trennwirkung auch eine signifikant erhöhte Lärmbelastung sowie eine intensivere Feinstaubbelastung. Bei Geschwindigkeiten oberhalb von 30 km/h dominieren die Reifen-Fahrbahn-Geräusche die Lärmemissionen von Fahrzeugen. Bedingt durch das durchschnittlich höhere Gewicht eines Elektrofahrzeugs, das auf die Batterie zurückzuführen ist, liegen diese Lärmemissionen im Durchschnitt sogar über denen von

verbrennungsmotorgetriebenen Fahrzeugen (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu 2010, S. 9). Analog verhält es sich mit dem Reifenabrieb. Feinstaubbelastungen entstehen bei modernen Verbrennungsmotorfahrzeugen nur zu einem geringen Teil durch die Verbrennung selbst, sondern hauptsächlich durch den Reifenverschleiß. Folglich sind die Feinstaubesparungen durch Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Verbrennungsmotorfahrzeugen vernachlässigbar. Aufgrund des durchschnittlich höheren Gewichts eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs im Vergleich zu einem Fahrzeug derselben Klasse mit Verbrennungsmotor fällt diese Bilanz regelmäßig sogar negativ aus (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) 2020, S. 8).

Das einfache Austauschen von konventionellen Fahrzeugen durch automatisierte Fahrzeuge kann daher keine sinnvolle und erstrebenswerte Strategie für die Stadt- und Verkehrsplanung darstellen. Insofern stehen Städte und Regionen heute vor der wesentlichen Herausforderung einer nachhaltigen Entwicklung der Verkehrssysteme. Anerkennend, dass das Konzept der „autogerechten Stadt“ zur Zerstörung urbaner Strukturen geführt hat, sind Gegenkonzepte erforderlich, die eine stärkere Nutzungsmischung, eine auf den öffentlichen Verkehr ausgerichtete Siedlungsentwicklung und die erhebliche Förderung des Umweltverbundes aus ÖV, Fuß- und Veloverkehr anstreben (Vallée und Gertz 2021, S. 54). Daher ist die Funktion und Bedeutung des öffentlichen Verkehrs für die zukünftige Stadtgestaltung und die Integration automatisierter Fahrzeuge von essentieller Bedeutung. Es besteht zum einen das Risiko, dass automatisierte Fahrzeuge in direkter Konkurrenz zum öffentlichen Verkehr stehen, während gleichzeitig die Chance besteht, dass sie beispielsweise als Zubringer zum und vom ÖV-Netz fungieren und

somit eine signifikante Verbesserung der ÖV-Erreichbarkeit gewährleisten. Um eine effektive Zusammenarbeit zwischen automatisierten Fahrzeugen und dem öffentlichen Verkehr sowie anderen effizienten Verkehrsträgern zu gewährleisten, sind gezielte politische Weichenstellungen erforderlich (Fulton et al. 2017, S. 35, Stead und Vaddadi 2019, S. 132).

Diese Weichenstellungen können jedoch nur auf der Grundlage eines breiten politischen und gesellschaftlichen Konsenses getroffen werden. Um einen solchen politisch-demokratischen Konsens über die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge zu finden, müssen die Bevölkerung sowie die Diskursteilnehmer\*innen wie Politiker\*innen, Planer\*innen und Beamte\*innen mit dem nötigen Wissen ausgestattet sein (Redlich et al. 2018, S. 39). Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird in einer ersten Annäherung untersucht, wie groß die Flächenbedarfe eines solchen Systems sein könnten. Die Beschäftigung mit der Thematik ermöglicht es, die potenziellen Vorteile der autonomen Mobilität vollständig auszuschöpfen und das Zusammenwirken zwischen Bevölkerung, Städten, Entwicklern automatisierter Fahrzeuge sowie der Forschungsgemeinschaft zu verbessern (Gavanas 2019, S. 9).

### 1.3. FORSCHUNGSANLASS

Indirekter Anlass für die Bearbeitung der Thematik ist die Teilrevision des Straßenverkehrsgesetz (SVG) durch das Schweizer Parlament im März 2023.

Die bestimmungsgemäße Nutzung von Automatisierungssystemen im Straßenverkehr war gemäß der bis dahin gültigen Schweizer Rechtslage nicht zulässig. So hatte die fahrzeugführende Person gemäß SVG „das Fahrzeug ständig so zu beherrschen, dass sie ihren Vorsichtspflichten nachkommen kann“ (UVEK 2018, S. 4–5). In der Folge bedeutete

dies, „dass die fahrzeugführende Person die Lenkvorrichtung nicht loslassen darf“ (UVEK 2018, S. 4–5). Daher durften Fahrzeuge mit Automatisierungssystemen in der Schweiz bisher lediglich im Rahmen von Versuchsfahrten mit speziellen Ausnahmegewilligungen betrieben werden (UVEK 2018, S. 4–5).

Mit der Revision wurden einige Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens mit dem Ziel geregelt, das automatisierte Fahren zu ermöglichen. Gegenstand der Gesetzesänderung sind (unter anderem) „einerseits Fahrzeuge, die nach wie vor eine fahrzeugführende Person benötigen, aber gewisse Streckenabschnitte selbständig zurücklegen können, ohne dauernd von der fahrzeugführenden Person überwacht werden zu müssen. Andererseits werden Fahrzeuge erfasst, die so konzipiert sind, dass sie ganz ohne fahrzeugführende Person verkehren können“ (UVEK 2018, S. 2).

Diese Neubewertung des automatisierten Fahrens hat für die Schweiz weitreichende Folgen. In den kommenden Jahren stellt sich die Frage, in welcher Art und Weise automatisiertes Fahren technologisch machbar sowie verkehrs- und raumplanerisch sinnvoll ist. Angestoßen durch die Erarbeitung und Verabschiedung der Änderung des SVG, hat der RZU einen Grundlagenbericht über die möglichen Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf den Raum Zürich und Umgebung in Auftrag gegeben (RZU 2023).

Der Bericht „Räumlich-differenzierte Auswirkungen des automatisierten Fahrens“ (RZU-Bericht) untersucht die räumlichen und verkehrlichen Auswirkungen der Einführung automatisierter Fahrzeuge im Gebiet des Planungsverbandes Region Zürich und Umgebung. Das Ziel des Forschungsprojekts ist es, die verkehrlich-räumlichen Entwicklungspotenziale aufzuzeigen, die sich durch die schrittweise

Verbreitung des automatisierten Fahrens ergeben. Im Bericht werden verschiedene Teilbereiche untersucht, darunter potenzielle Betriebsgebiete, Befahrbarkeitsanalysen, Erreichbarkeitsanalysen, Flächenbedarfe und veränderte raumplanerische Zielsetzungen. Der Schwerpunkt der Untersuchung im RZU-Bericht liegt auf dem Personenverkehr in Form des kollektiven automatisierten Fahrens (kaF) als Ergänzung zum öffentlichen Verkehr (RZU 2023, S. 15).

Der Bericht des RZU ist von besonderem Interesse, da das Szenario der Einführung automatisierter Fahrzeuge in kollektiver Nutzung bei gleichzeitiger Abschaffung des motorisierten Individualverkehrs einen stark disruptiven Ansatz in der Transformation des Verkehrssektors verfolgt. Im Sinne des Berichts wird dabei ausdrücklich nicht das bloße Ersetzen konventioneller, privater Fahrzeuge durch automatisierte Fahrzeuge oder deren teilweiser Ersatz durch automatisiertes Car- oder Ridesharing angestrebt, sondern die Implementierung kollektiv genutzter Fahrzeuge. Diese sollen zur Erweiterung des bestehenden öffentlichen Nahverkehrs beitragen. Die Einsatzmöglichkeiten umfassen die Ergänzung des ÖV durch Zubringerdienste („letzte Meile“), bei denen die Distanz zwischen der nächstmöglichen Haltestelle und dem endgültigen Ziel überbrückt wird, sowie flexible Korridor-Routen, die dynamisch an die Echtzeit-Nachfrage angepasst werden können. Automatisierte Fahrzeuge könnten aufgrund der wegfallenden (Fahr)personalkosten und ihrer höheren Verfügbarkeit den öffentlichen Verkehr durch kleinere Einheiten mit häufigerer Taktfrequenz ergänzen, was zu einer verbesserten Erreichbarkeit führen würde.

Im RZU-Bericht werden mehrere Szenarien des kollektiven automatisierten Fahrens vorgestellt. Es wird das kollektive automatisierte Fahren auf der letzten Meile sowie die

Nutzung der Autobahn betrachtet, da hier die verkehrlichen und baulichen Bedingungen eine verhältnismäßig frühe Umsetzung des automatisierten Fahrens ermöglichen. Zudem soll die kollektive Nutzung automatisierter Fahrzeuge den Schienenverkehr ergänzen, indem automatisierte Shuttles Fahrten aus einem Quellgebiet stets zur nächstgelegenen Verkehrsdrehscheibe durchführen ermöglichen (RZU 2023, S. 20, S. 133).

Das RZU-Szenario bildet die Grundlage dieser Arbeit mit der Annahme, dass 100 % des MIV durch kollektiv genutzte, automatisierte Fahrzeuge ersetzt wird.

Im Bericht wird als weiterer Forschungsbedarf benannt: „Die Integration von Verkehrsdrehscheiben am Übergang vom niederrangigen zu höherrangigen automatisierten Angebotsformen und deren Integration in Erreichbarkeits- oder Verkehrsmodellierungen stellt eine weitere Aufgabe für die Forschung dar“ (RZU 2023, S. 91).

Hier knüpft diese Diplomarbeit an, indem sie sich mit der konkreten Planung und Umsetzung eines automatisierten Zubringersystems im Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen beschäftigt. Sie untersucht

nicht nur die Anzahl der benötigten Shuttles und Haltepositionen, sondern auch, ob die entsprechenden Flächenbedarfe am Bahnhof gedeckt werden könnten. Die Arbeit liefert somit einen Beitrag zur Beantwortung der im RZU-Bericht formulierten Forschungsfragen.

#### 1.4. ABGRENZUNG UND FOKUSSIERUNG DER ARBEIT

Die vorliegende Arbeit betrachtet die Planung und Umsetzung eines automatisierten Zubringersystems für den Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen. Die Erarbeitung basiert auf der Annahme, dass bis dahin automatisiertes Fahren technisch und infrastrukturell vollumfänglich möglich sein wird. Der RZU-Bericht geht von dieser Möglichkeit für das Jahr 2050 aus.

Im Fokus dieser Arbeit steht die Untersuchung einer Verkehrsdrehscheibe mit der Integration eines automatisierten Shuttle-Systems als Verbindung zwischen niederrangigen und höherrangigen Verkehrssystemen. Der Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen wird als konkretes Fallbeispiel für die Untersuchung eines automatisierten Zubringersystems herangezogen.

Tab. 1: ABGRENZUNG UND FOKUSSIERUNG DER ARBEIT (EIGENE DARSTELLUNG).

Aspekt	Eingrenzung
<b>Gegenstand der Arbeit</b>	Untersuchung des Flächenbedarf für die Implementierung automatisierter Zubringersysteme im öffentlichen Verkehr, am Fallbeispiel des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen.
<b>Zeithorizont</b>	Es wird kein spezifischer Zeitpunkt betrachtet, jedoch wird ein Zeitpunkt angenommen, an dem automatisierte Fahrzeuge des Level 5 voll funktionsfähig sind.
<b>Datenbasis</b>	Die Arbeit knüpft an den RZU-Bericht an, welcher von einem vollständigen Ersatz des MIV durch kollektiven automatisierten Verkehr ausgeht, zur urbanen Mobilität und Infrastruktur.
<b>Referenzszenario</b>	Der Einzugsbereich umfasst einen Radius von 1.000 m um den Bahnhof bzw. bis zu den Einzugsbereichen der umliegenden Bahnhöfe.
<b>Räumliche Abgrenzung</b>	Anhand des direkten Vorplatzes des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen wird ermittelt, ob genügend Fläche für die Implementierung der Haltepositionen vorhanden ist.

Räumlich ist die Arbeit auf zwei Bereiche fokussiert. Zum einen wird ein Radius von 1000 m rund um den Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen untersucht, um die potenziellen Einsatzgebiete und die Erreichbarkeit des Shuttle-Systems zu analysieren. In diesem Zusammenhang werden zudem die angrenzenden Bahnhöfe und Verkehrsdrehscheiben betrachtet, um eine bessere Integration in das übergeordnete Verkehrssystem zu gewährleisten. Die Betrachtung des Einzugsbereichs ermöglicht es, das Mobilitätsverhalten im Umkreis des Bahnhofs zu verstehen und die potenzielle Nachfrage für ein automatisiertes Zubringersystem abzuschätzen. Zum anderen wird der unmittelbare Nahbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen genauer analysiert. Hierbei wird untersucht, ob der notwendige Flächenbedarf für die

Implementierung eines automatisierten Shuttle-Systems mit den vorhandenen Flächen am Bahnhof realisierbar ist. Insbesondere die dafür benötigten Haltepositionen stehen im Mittelpunkt. Die Arbeit überprüft, ob diese Infrastruktur mit den gegebenen räumlichen Bedingungen am Bahnhof integriert werden könnte (Tab. 1).

## 1.5. FORSCHUNGSFRAGEN

Im Folgenden werden die Forschungsfragen dieser Arbeit vorgestellt (Tab. 2). Sie befassen jeweils sich mit den Auswirkungen der Implementierung von kaF in Verkehrsdrehscheiben. Ziel ist es, durch die gewonnenen Erkenntnisse ein besseres Verständnis für die Potenziale und Risiken von kaF im Hinblick auf eine nachhaltige und zukunftsorientierte Mobilität in urbanen und regionalen Räumen zu entwickeln.

Tab. 2: LEIT- UND FORSCHUNGSFRAGEN DER ARBEIT (EIGENE DARSTELLUNG).

	Leitfrage		Forschungsfrage
L1	Wie viele Fahrzeuge werden für die Umsetzung eines automatisierten Zubringersystems in kollektiver Nutzung im Einzugsbereich des Bahnhofes Zürich Tiefenbrunnen benötigt?	F1	Wie lässt sich der Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen bestimmen?
		F2	Welche Faktoren beeinflussen die potenzielle Nachfrage nach kaF im Einzugsgebiet des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen?
		F3	Welches Nachfragepotenzial für kaF besteht im Einzugsgebiet des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen?
		F4	Wie kann die Anzahl notwendiger automatisierter Shuttles ermittelt werden, unter der Voraussetzung, dass ein attraktives Angebot für die Nutzer*innen geschaffen und gleichzeitig die Nachfrage effizient gedeckt wird?
L2	Wie viele Haltepositionen werden für die Umsetzung eines automatisierten Zubringersystems in kollektiver Nutzung am Bahnhofes Zürich Tiefenbrunnen benötigt?	F5	Welche Berechnungsmethoden sind geeignet, um die Anzahl der benötigten Haltepositionen an der Verkehrsdrehscheibe zu bestimmen? Welche Vor- und Nachteile bieten die Methoden?
L3	Wie groß ist der Flächenverbrauch eines automatisierten Zubringersystems in kollektiver Nutzung am Bahnhofes Zürich Tiefenbrunnen?	F6	Wie unterscheidet sich der Flächenverbrauch für das Zubringersystem zu Spitzenstunden bzw. zu Randzeiten je Szenario?
		F7	Ließe sich das Zubringersystem im Hinblick auf den Flächenbedarf am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen implementieren?

## 1.6. STRUKTUR DER ARBEIT

Im Folgenden wird der strukturelle Aufbau der Arbeit erläutert (Abb. 1). Die Arbeit ist in verschiedene Teile untergliedert, deren Zusammenhang im Folgenden kurz beschrieben wird.

Die Arbeit beginnt mit einer Einleitung (Kapitel 1), die das Thema einführt, die Problemstellung (Kapitel 1.2) und den Forschungsanlass (Kapitel 1.3) beschreibt sowie die Forschungsfragen formuliert (Kapitel 1.5). Dieses Kapitel legt den Grundstein für die gesamte Arbeit, indem die Problemstellung zur Erarbeitung der Forschungsfragen genutzt wird und so den Kontext für die nachfolgenden Analysen und Untersuchungen schafft.

Anschließend (Kapitel 2) wird die Methodik der Arbeit vorgestellt. Hier werden die Methoden der Arbeit zusammengefasst und den Forschungsfragen zugeordnet.

Es folgen die theoretischen Grundlagen des automatisierten Fahrens (Kapitel 3.2). Wichtige Begriffe werden definiert und differenziert, die verschiedenen Automatisierungsstufen erläutert sowie die relevanten technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge im öffentlichen Verkehr dargestellt. Zudem werden relevante internationale Studien (Kapitel 3.2.3) betrachtet. Ein weiterer Schwerpunkt des Literatur-Reviews sind Verkehrsknotenpunkte (Kapitel 3.3). Von besonderem Interesse ist hier die Schnittstelle zwischen dem automatisierten Fahren und Verkehrsdrehscheiben.

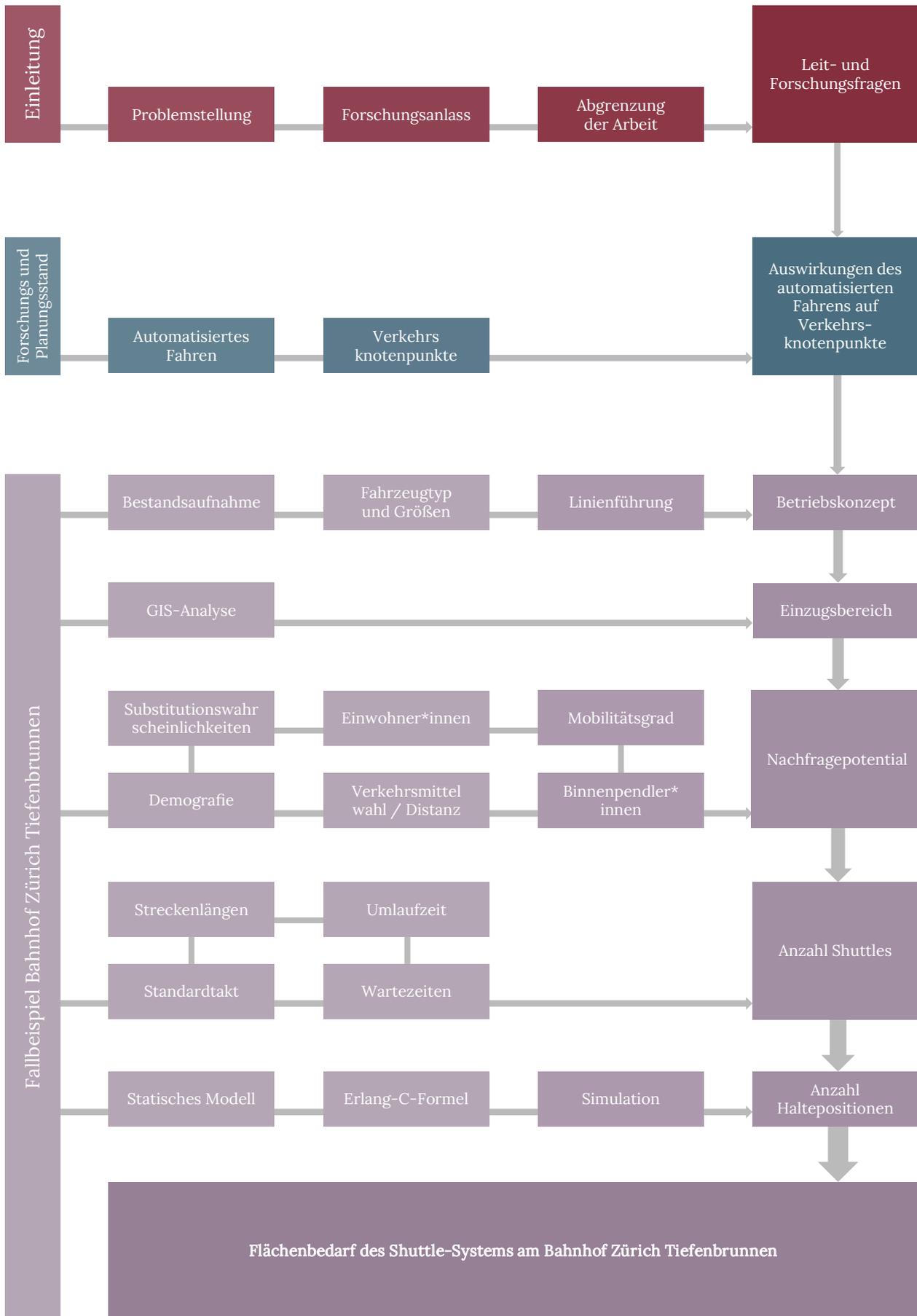
Das Fallbeispiel Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen wird vorgestellt und bildet den Hauptteil der Arbeit. Zunächst wird die Auswahl des Bahnhofs als Untersuchungsraum begründet (Kapitel 4.1). Anschließend wird das Betriebskonzept des geplanten Zubringersystems vorgestellt (Kapitel 4.3), einschließlich der Linienführung

(Kapitel 4.3.1) und der Spezifikationen der eingesetzten Fahrzeuge (Kapitel 4.3.2). Zusammen mit der Auswertung statistischer Daten und der Analyse mit geografischen Informationssystemen (GIS) (Kapitel 4.3) ermöglicht dies eine Abschätzung des Nachfragepotenzials (Kapitel 4.4) sowie der Beförderungskapazität des Systems (Kapitel 4.5.5). Aus der Gegenüberstellung dieser Faktoren wird die Anzahl der benötigten Shuttles berechnet (Kapitel 4.5.6, 4.5.7).

Auf Grundlage dieser berechneten Anzahl an benötigten Shuttles erfolgt die Dimensionierung des Flächenbedarfs (Kapitel 4.6). Es wird der Flächenbedarf für das Abstellen ungenutzter Fahrzeuge zu Randzeiten (Kapitel 4.6.1.2) ebenso behandelt wie die Anzahl der Haltepositionen (Kapitel 4.6.6.1) am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen und die daraus resultierende Größe der Station (Kapitel 4.6.2.2). Letzteres wird anhand vorgestellter Berechnungsmodelle (Kapitel 4.6.1) ermittelt und verglichen. Darauf aufbauend kann anschließend geprüft werden, ob dieser Flächenbedarf am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen gedeckt werden könnte (Kapitel 4.6.2.3).

Kapitel 5 und 6 schließen die Arbeit ab, indem die Forschungsfragen zusammenfassend beantwortet und die Erkenntnisse in den Kontext der Fragestellungen gestellt werden. Anschließend folgt eine umfassende Reflexion der Ergebnisse (Kapitel 6), in der diese kritisch analysiert und hinsichtlich ihrer Aussagekraft beleuchtet werden. Dabei wird auf die Stärken und Schwächen der Untersuchung eingegangen sowie auf Einschränkungen, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Schließlich wird auf den zukünftigen Forschungsbedarf eingegangen (Kapitel 7), wobei offene Fragen und fehlende Datengrundlagen identifiziert werden, die in weiterführenden Studien vertieft bzw. untersucht werden sollten.

ABB. 1: STRUKTUR DER ARBEIT (EIGENE DARSTELLUNG NACH LUTZ 2017, S. 12).



## 2. ZUORDNUNG VON METHODEN UND FORSCHUNGSFRAGEN

Die Methoden umfassen eine umfassende Literaturrecherche, die Erhebung und Analyse statistischer Daten, die Anwendung einer GIS-Analyse sowie spezifische Berechnungsmethoden und Simulationen. Diese Methoden bieten eine Grundlage für die fundierte Analyse der potenziellen Nachfrage nach einem automatisierten Zubringersystem im Einzugsgebiet des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen.

Zunächst erfolgte eine umfangreiche Literaturrecherche in wissenschaftlichen Datenbanken wie „CatalogPlus“ und „Google Scholar“ mit dem Ziel relevante Studien zum Thema automatisiertes Fahren und Verkehrsknoten und insbesondere der thematischen Schnittmenge zu identifizieren. Diese wurde durch die „Snowballing“-Methode ergänzt, bei der wiederum die Quellen der identifizierten Literatur gesichtet wird. So kann eine lückenfreie Übersicht über die wichtigsten

Quellen in den Themenbereichen erreicht werden. Ergänzend dazu wurden statistische und behördliche Daten herangezogen, um auf deren Grundlage die potenzielle Nachfrage nach einem automatisierten Zubringersystem zu quantifizieren.

In einer GIS-Analyse (QGIS) wird der Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen bestimmen und anschließend die statistischen Daten mit diesem Einzugsbereich, bzw. den erstellten Distanzsektoren (Kapitel 4.3.3.3), verknüpft. So kann die Nachfrage je Distanzsektor sowie je Korridor abgeschätzt werden und die benötigten Shuttle ermittelt werden. Im nächsten Schritt wurde die Erlang-C-Formel verwendet, um eine erste Annäherung an die Anzahl der benötigten Haltepositionen für das Shuttle-System erstellen. Die Erlang-C-Formel basiert jedoch auf Durchschnittswerten. Daher wurde zusätzlich eine Simulation mit einem Warteschlangensimulator durchgeführt, der die Eingabe linienspezifischer Aspekte wie Umlauf- sowie Warte- bzw. Bedienzeiten ermöglicht, um die Ergebnisse zu überprüfen und zu konkretisieren.

TAB. 3: ZUORDNUNG DER METHODEN ZUR BEANTWORTUNG DER FORSCHUNGSFRAGEN (EIGENE DARSTELLUNG).

Leitfrage	Forschungsfrage	Methode zur Beantwortung der Forschungsfrage
L1	F1	Kartenmaterial sowie Daten des öffentlichen Verkehrsnetzes; GIS-Analyse
	F2	Literatur Review zu Nachfragefaktoren und Review statistischer Daten zur lokalräumlichen Bestimmung der Nachfrageverteilung
	F3	Zusammenführung statistischer Daten und GIS-Analyse
	F4	Basiert auf dem Nachfragepotenzial nach F3; kombiniert mit dem erstellten Betriebskonzept (insb. Bestimmung der Shuttle-Größe sowie dem Standardtakt)
L2	F5	Basiert auf F3 und F4; Statische Berechnung sowie Abschätzung mit Erlang-C-Formel und Konkretisierung über Simulation
L3	F6	Basiert auf Forschungsfrage F5; Flächenvergleich je nach Szenario (4er-Shuttle / 8er-Shuttle); zu Spitzenstunden und Randzeiten; Vergleich mit Status quo
	F7	Basiert auf Forschungsfrage F5 und F6, Kartenmaterial und GIS-Analyse; Vergleich Flächenbedarf und lokales Flächenpotential

### 3. FORSCHUNGS- UND PLANUNGSSTAND: AUTOMATISIERTES FAHREN UND VERKEHRSKNOTEN

Dieses Kapitel gibt einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Forschung und Planung im Bereich des automatisierten Fahrens und dessen Integration in Verkehrsknotenpunkte.

Nach einer Erläuterung der angewandten Recherchemethodik werden wichtige Begriffe und Grundlagen des automatisierten Fahrens definiert, wie die Stufen der Automatisierung und verschiedene Fahrzeugmodelle. Anschließend werden internationale Studien vorgestellt, welche die Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf den Verkehr untersuchen, mit Fokus auf kollektive Nutzungsszenarien. Abschließend widmet sich das Kapitel dem Schweizer Modell der Verkehrsdrehscheibe und analysiert die

Herausforderungen und Potenziale, die sich durch die Integration automatisierter Fahrzeuge ergeben.

#### 3.1. LITERATUR-REVIEW: AUTOMATISIERTES FAHREN UND VERKEHRSKNOTENPUNKTE

Um einen Überblick über das Forschungsthema zu gewinnen, wurde zunächst eine umfassende Suche in wissenschaftlichen Datenbanken (CatalogPlus, SpringerLink, Google Scholar) durchgeführt. Diese initiale Recherche zielte darauf ab, relevante Studien unter den Schlagwörtern „autonomes Fahren“, „automatisiertes Fahren“, „geteiltes automatisiertes Fahren“ und „Verkehrsdrehscheiben“ sowie „Verkehrsknotenpunkte“ bzw. deren englischer Entsprechung, zu identifizieren. Dabei wurden spezifische Aspekte in Verbindung mit diesen Schlagwörtern recherchiert, darunter „Flächen“, „Stadtplanung“, „Raumplanung“, „Verkehrsinfrastruktur“ (Tab. 4).

TAB. 4: SCHWERPUNKTE DES LITERATUR-REVIEWS (EIGENE DARSTELLUNG).

Kapitel	Ziel der Literaturrecherche
3.2 Grundlagen des automatisierten Fahrens	Sichtung des aktuellen Forschungsstandes und sowie Definition und Abgrenzung von Begriffen
3.2.1 Stufen des automatisierten Fahrens	Fokus auf technische Normen und Standards zur Klassifikation der Automatisierungsstufen (z. B. SAE)
3.2.2 Fahrzeugvarianten für den Einsatz im kollektiven automatisierten Verkehr	Beschreibungen möglicher automatisierter Fahrzeuge für den ÖV. Analyse der Vor- und Nachteile nach Betriebskonzept.
3.2.3 Erkenntnisse zur Wirkung automatisierter Fahrzeuge aus internationalen Studien	Analyse internationaler Studien zu den räumlichen und verkehrstechnischen Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge. Vergleich von Fallstudien.
3.3 Grundlagen zu Verkehrsknotenpunkten	Forschung zur Gestaltung und Funktionsweise von Verkehrsknotenpunkten, insbesondere zur Integration neuer Mobilitätsformen wie automatisierte Shuttles.
3.3.1 Das Schweizer Modell der Verkehrsdrehscheibe	Überblick über das Schweizer Modell, verschiedene Typen und deren Merkmale. Prüfung, ob automatisiertes Fahren im gegenwärtigen Konzept berücksichtigt wird
3.3.2 Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf Verkehrsdrehscheiben	Untersuchung der Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf die Gestaltung und Funktionalität von Verkehrsdrehscheiben. Die Funktion von Verkehrsdrehscheiben als Knotenpunkte für den Übergang von automatisierten Fahrzeugen zum ÖV.

Die initiale Suche wurde in zwei Varianten durchgeführt: Ohne weitere Einschränkungen und mit der Beschränkung auf Quellen ab dem Jahr 2020. Dies ermöglichte die Sammlung relevanter sowie aktueller Literatur, die als Ausgangspunkt für die weitere systematische Literaturübersicht und die Anwendung der „Snowballing“-Methode (Wohlin 2014), diente. Die „Snowballing“-Methode wurde angewendet, um weitere Literatur anhand der Referenzen in den initial identifizierten Arbeiten zu ermitteln (Tab. 5). Konkret wurde das „Rückwärts-Schneeballverfahren“ eingesetzt, bei dem die Referenzlisten der bereits identifizierten relevanten Arbeiten systematisch untersucht wurden. Durch die Analyse dieser Referenzlisten konnten weitere relevante Studien identifiziert werden.

Die gefundenen Referenzen wurden auf ihre Relevanz für das Forschungsthema hin bewertet. Nur Studien, die thematisch passend waren, wurden in die weitere Analyse einbezogen.

Wichtige Kriterien für die Auswahl der Literatur waren zum einen eine möglichst aktuelle Literatur, da Informationen in einem sich schnell entwickelnden technischen Umfeld, wie dem automatisierten Fahren, schnell veralten und an Relevanz verlieren und zum anderen. Ein weiteres Kriterium war die inhaltliche Nähe zu den im RZU-Szenario beschriebenen Entwicklungen. Die relevante Literatur wurde anschließend dokumentiert und in einer Datenbank (Citavi) organisiert, um eine systematische Nachverfolgung zu ermöglichen. Die Literatur stammt aus unabhängigen Forschungsberichten, teilweise wurden Planungsdokumente herangezogen, die im Auftrag von Politik und Verwaltung erstellt wurden.

Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass die Literatur zum automatisierten Fahren im Sinne von technologischen Grundlagen, Normen und Standards eine breite Verfügbarkeit aufweist. Auch zur Implementation und den

TAB. 5: ANWENDUNG DER SNOWBALLING METHODE ZUM LITERATUR-REVIEW (EIGENE DARSTELLUNG NACH WOHLIN 2014).

Schritt	Beschreibung	
1	Initiale Suche	Umfassende Suche in wissenschaftlichen Datenbanken (CatalogPlus, SpringerLink, Google Scholar) mit den allgemeinen Schlagwörtern „autonomes Fahren,“ „automatisiertes Fahren,“ „shared autonomous vehicles“.
2	Spezifische Suche	Verfeinerung der Suche durch Kombination der allgemeinen Schlagwörter zu spezifischen Aspekten. Durchführung der Suche in zwei Varianten: ohne zeitliche Einschränkung und mit einer Einschränkung auf Quellen ab dem Jahr 2020.
3	Snowballing-Methode	Anwendung des „Rückwärts-Schneeballverfahrens“ auf die in Schritt 1 und 2 gefundenen Arbeiten, um weitere relevante Studien anhand der in den Referenzen aufgeführten Quellen zu identifizieren.
4	Relevanzbewertung	Überprüfung aller gefundenen Quellen (aus Schritt 1, 2 und 3) auf ihre Relevanz für das Forschungsthema.
5	Snowballing-Methode (2. Durchlauf)	Erneute Anwendung des „Rückwärts-Schneeballverfahrens“ auf die in Schritt 4 als relevant ausgewählten Studien, um sicherzustellen, dass keine wichtigen Quellen übersehen wurden.
6	Dokumentation und Organisation	Dokumentation und Organisation der relevanten Literatur in einer Datenbank (Citavi). Kategorisierung der ausgewählten Literatur in verschiedene Cluster basierend auf ihren inhaltlichen Schwerpunkten zur systematischen Verarbeitung und Nachverfolgung. Zusätzlich werden die Quellen in zwei Gruppen unterteilt: direkt verwendete Literatur (Quellen für die Argumentation) und Hintergrundliteratur (liefert Kontext und grundlegendes Wissen).

Wirkungen von automatisierten Fahrzeugen im allgemeinen Straßenverkehr ist umfangreiches Material vorhanden. Gleiches gilt für Forschungsarbeiten zu Verkehrsknoten und zur lokalräumlichen Organisation des öffentlichen Verkehrs. In der relevanten Schnittmenge aus automatisiertem Fahren als kollektiv genutztes Verkehrsmittel und der Implementierung an Verkehrsknotenpunkten konnte jedoch keine relevante Literatur identifiziert werden. Es musste festgestellt werden, dass die Forschung (und Entwicklung) hier noch in grundlegenden Machbarkeitsstudien und Pilotversuchen, insbesondere mit begrenzt operierenden einzelnen automatisierten Bussen bzw. Shuttles, stattfindet. Die systemische Implementierung von automatisierten Verkehrsdrehscheiben scheint noch kein Gegenstand aktueller Forschung zu sein (Dauer et al. 2024, S. 77, Liu et al. 2020, S. 540, Winter et al. 2018, S. 153).

Daraus ergibt sich ein dringender Forschungsbedarf in diesem Bereich. Besonders wichtig ist die Modellierung und das Erarbeiten von Erkenntnissen über die langfristigen Auswirkungen des automatisierten Fahrens. Dies sollte idealerweise geschehen, bevor Fahrzeuge serienreif sind, da mit der Verfügbarkeit der Fahrzeuge ein Handlungsdruck entsteht, sie auch in entsprechenden Verkehrssystemen einzusetzen. Daher müssen die Auswirkungen bereits bekannt sein, um fundierte Entscheidungen treffen zu können. Auch während der Entwicklungsphase sollten mögliche Betriebskonzepte berücksichtigt werden können, da die Gestaltung der Fahrzeuge von diesen Konzepten abhängen sollte. Idealerweise sollte sich die Fahrzeugentwicklung an den Bedürfnissen des öffentlichen Verkehrs orientieren, anstatt erst die Fahrzeuge zu entwickeln und dann die notwendige Infrastruktur anzupassen.

Aus diesem Grund ist die Erforschung der Auswirkungen bereits in einem frühen Stadium,

wenn eine praktische Umsetzung noch nicht absehbar ist, von großer Bedeutung. Diese Arbeit leistet einen ersten Beitrag dazu, indem zunächst die Anzahl an Fahrzeugen sowie der benötigte Flächenbedarf im Nahbereich eines Verkehrsknotens abgeschätzt werden. Darüber hinaus wird geprüft, ob dieser Flächenbedarf in einem urbanen Umfeld gedeckt werden kann oder ob er möglicherweise die verfügbaren Flächen im urbanen Raum deutlich übersteigt.

### 3.2. GRUNDLAGEN DES AUTOMATISIERTEN FAHRENS

Die Begriffe „selbstfahrend“, „autonom“ und „automatisiert“ werden regelmäßig synonym verwendet. Eine einheitliche Terminologie hat sich bislang nicht durchgesetzt. Grundsätzlich benötigt ein vollständig automatisiertes bzw. autonomes Fahrzeug keine\*n menschlichen Fahrer\*in mehr. Stattdessen navigiert es selbständig, sicher und effizient über das öffentliche Straßenverkehrsnetz, basierend auf einer komplexen Mischung aus Hard- und Software. Die Hardware umfasst im Wesentlichen Sensoren, hochauflösende Kameras und einen Light Detection and Ranging-Sensor (LiDAR). Die Software besteht aus Algorithmen zur Objekterkennung, Netzwerkanalysen und der „Erfahrung“ aus Millionen von kumulierten Fahrstunden anderer autonomer Fahrzeuge. Diese Daten werden kombiniert, um ein digitales Bild der Umgebung zu erstellen. Basierend darauf trifft das Fahrzeug selbständig Entscheidungen über die Streckenführung und erforderliche Fahrmanöver (Kim et al. 2024, S. 25, Riggs 2019, S. 5–6). Das Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software-Engineering differenziert zwischen autonomen und automatisierten Systemen auf Basis des Systemverständnisses. Ein System gilt als automatisiert, wenn sein Verhalten in einer bestimmten Situation genau vorhersehbar

ist. Besteht jedoch Unsicherheit über das Verhalten, wird von Autonomie gesprochen. Autonome Systeme erwecken oft den Eindruck von Intelligenz, da das unmittelbare Verständnis ihrer Funktionsweise fehlt (Adler 2019, S. 3). Für diese Diplomarbeit wird angenommen, dass die Fahrzeuge sämtliche, auch neue Fahrsituationen ohne menschliches Eingreifen selbstständig bewerten und bewältigen können, sodass der Begriff „autonomes Fahrzeug“ gemäß dieser Definition treffend wäre. Da diese Arbeit jedoch auf dem Szenario des RZU-Berichts basiert, werden dessen Begrifflichkeiten übernommen, weshalb hier ebenfalls der Begriff „automatisiertes Fahren“ verwendet wird.

Es herrscht eine große Unsicherheit bezüglich der Zukunft des automatisierten Fahrens.

Studien zum Einführungszeitraum variieren stark und reichen von optimistischen Prognosen einer baldigen Marktreife (Teng et al. 2023, S. 3692) bis hin zu Einschätzungen, die eine flächendeckende Einführung erst in Jahrzehnten (Litman 2023, S. 68) erwartet oder sogar Skepsis, ob automatisierte Fahrzeuge der Stufe 5 überhaupt realisierbar sind (Shladover 2018, S. 193). Einigkeit besteht dagegen über das hohe disruptive Potenzial des aF (Heinrichs 2015, S. 233). Zahlreiche Studien untersuchen vielfältige Aspekte, darunter Auswirkungen auf Verkehrssicherheit, Verkehrsfluss, Stadtplanung, Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft (Lang et al. 2016, S. 1), sowie zur Akzeptanz automatisierter Fahrzeuge (Benleulmi und Blecker 2017, Rödel et al. 2014), zur Gestaltung von Mensch-

TAB. 6: STUFEN DES AUTOMATISIERTEN FAHRENS (EIGENE DARSTELLUNG NACH SAE INTERNATIONAL 2021).

Level	Automatisierungsgrad	Beschreibung
0	Nicht automatisiert	Das Fahrzeug ist ggf. mit Warnsystemen und aktiven Sicherheitssystemen wie einem Antiblockiersystem oder einem Notbremsassistent ausgestattet. Der oder die Fahrer*in führen das Fahrzeug in allen Belangen selbst.
1	Fahrassistenz	Das System übernimmt entweder die Längsführung (Geschwindigkeit halten, Beschleunigen, Bremsen; Tempomat) oder die Quersführung (Lenken; Spurassistent) des Fahrzeugs. Alle anderen Fahraufgaben verbleiben bei dem/der Fahrer*in. Diese*r muss das System zudem dauerhaft überwachen und jederzeit die vollständige Kontrolle übernehmen können.
2	Teilautomatisiert	Das System kann sowohl die Quer- als auch die Längsführung des Fahrzeugs zeitweise oder in speziellen Situationen, wie zum Beispiel beim Überholen auf der Autobahn, übernehmen. Der Fahrer oder die Fahrerin muss das System jedoch ständig überwachen und jederzeit fähig sein, die Steuerung des Fahrzeugs sofort zu übernehmen.
3	Bedingt automatisiert	Wie auf Stufe 2 kann das Fahrzeug für eine gewisse Zeit oder in spezifischen Situationen die Quer- und Längsführung übernehmen. Eine dauerhafte Überwachung durch den/die Fahrer*in ist nicht erforderlich. Allerdings muss der/die Fahrer*in in der Lage sein, auf Aufforderung des Systems mit ausreichender Zeitreserve, die Kontrolle wieder zu übernehmen.
4	Hochautomatisiert	Das Fahrzeug kann in einem definierten Anwendungsfall wie beispielsweise dem Fahren auf der Autobahn, in georeferenzierten Zonen oder auf speziellen Fahrstreifen alle Situationen selbstständig bewältigen. Verlässt das Fahrzeug diesen Anwendungsfall muss rechtzeitig zur Übernahme der Fahraufgabe aufgefordert werden. Wird die Fahraufgabe nicht von dem/der Fahrer*in übernommen, nimmt das Fahrzeug selbstständig einen risikominimalen Zustand ein (z.B. durch Abstellen auf dem Pannestreifen der Autobahn).
5	Vollautomatisiert	Auf diesem Level ist vom Start bis zum Ziel kein*e Fahrer*in notwendig. Das Fahrzeug übernimmt die Fahraufgabe in jeder Umgebung und unter allen Bedingungen vollständig selbst. Steuerungs- oder Kontrolleinrichtungen wie Fahrpedale oder einem Lenkrad sind nicht mehr nötig.

Maschine-Kommunikation (Lanzer et al. 2020, Matthews et al. 2017) und zur Entwicklung von Entscheidungsalgorithmen (Aksjonov und Kyrki 2021, Wang et al. 2021). Für das spezifische RZU-Szenario des kollektiven automatisierten Fahrens liegen derzeit keine weitergehenden Forschungsdokumente vor. Ebenso fehlen konkrete Planungen oder Entwicklungsstrategien, die explizit darauf basieren.

### 3.2.1. STUFEN DES AUTOMATISIERTEN FAHRENS

Die Fahrzeugautomatisierung reicht von keiner Automatisierung bis hin zur vollständigen Automatisierung, bei der das Fahrzeug alle Fahraufgaben jederzeit ohne menschliche\*n Fahrer\*in ausführen kann. Diese vollautomatisierten Fahrzeuge sind der Hauptfokus dieser Arbeit. Da es jedoch zahlreiche Technologien gibt, die

unterschiedliche Grade der Teilautomatisierung darstellen wie z.B. Tempomat oder Spurhalteassistent, haben die amerikanische National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) und die Society of Automotive Engineers (SAE) ein Klassifizierungssystem entwickelt. Dieses System unterteilt automatisierte Technologien in sechs Stufen der Fahrzeugautomatisierung (Tab. 7) (SAE International 2021).

### 3.2.2. FAHRZEUGVARIANTEN FÜR DEN EINSATZ IM KOLLEKTIVEN AUTOMATISIERTEN VERKEHR

Bereits heute gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Angebotsformen bzw. Konzepten des automatisierten Fahrens, die sich in ihrer Funktionsweise und ihren Einsatzmöglichkeiten unterscheiden. Es gibt bereits automatisierte, schienengebundene Systeme, die teilweise schon im Einsatz sind, wie z. B. die Linien U2

Tab. 7: VOR- UND NACHTEILE AUTOMATISierter FAHRZEUGE (EIGENE DARSTELLUNG NACH MITTEREGGER ET AL. 2021, S. 138, MÖRNER 2018, 49 FF.).

Transportmittel	Vorteile	Nachteile
Automatisierte-Tramways	Hohe Kapazität, flexible Routenführung ohne Schieneninfrastruktur, geringe Initialkosten, geringere Lärmbelastung als bei schienenengebundenen Trams	Zuverlässigkeit und Kapazität geringer als bei herkömmlichen Straßenbahnen, weite Kurvenradien
Automatisierter (Multi)Gelenkbus	Hohe Kapazität, flexible Routenführung	Größerer Platzbedarf, eingeschränkte Manövrierfähigkeit und Routenführung, höherer Energieverbrauch und Wartungsaufwand als bei kleineren Bussen
Automatisierter Standardbus	Mittlere Kapazität, kosteneffizient, flexible Routenführung, benötigt kleinere Kurvenradien	Ineffizient bei geringem Fahrgastaufkommen, keine geringere Spurbreite als ein Gelenkbus
Automatisierter Minibus	Flexibel einsetzbar auch bei schmalen Straßenquerschnitten, höhere Auslastung bei geringer Nachfrage, energieeffizient aufgrund des geringeren Gewichts	Begrenzte Kapazität, mehr Fahrzeuge bei höheren Fahrgastzahlen nötig, ggf. begrenzte Batteriekapazität und damit Reichweite
Automatisierter Pkw	Flexibel, bei höheren Geschwindigkeiten effizienter als Minibus, Sitzplätze, sinnvoll vor allem für längere Strecken	Begrenzte Kapazität, nicht für den öffentlichen Transport geeignet, höhere Emissionen als Minicar
Automatisiertes Minicar	Sehr flexibel, geringer Flächenbedarf, Einsatzbereich in sonst fahrzeugfreien Stadtgebieten zur Erreichbarkeitsverbesserung für mobilitätseingeschränkte Personen denkbar	Sehr begrenzte Kapazität, nicht für den Massenverkehr geeignet, eingeschränkter Komfort

und U3 in Nürnberg (Stadt Nürnberg o. J.) oder der Skytrain des Düsseldorfer Flughafens (Flughafen Düsseldorf GmbH 2019). Weitere Beispiele sind spurgebundene Systeme wie die Pariser Metrolinien 4 und 14 (Bertrand 2024) oder diverse People Mover, insbesondere als Flughafenzubringer oder Terminal-Transfers wie das Skymetro am Züricher Flughafen (Wüthrich 2024).

**Automatisierte Pneutrams** (franz.: Tramway sur pneumatiques) sind straßengebundene Trams, die auf Reifen rollen und über eine physische oder virtuelle Spurführung verfügen. Sie stellen somit eine Zwischenstufe zwischen Bus und Straßenbahn dar. Die Fahrzeuge verfügen in der Regel über zwei oder drei Gelenke und bieten eine entsprechend hohe Fahrgastkapazität. Sie eignen sich besonders für stark frequentierte Routen und können auf Asphalt fahren, benötigen also keine Schienen. Aufgrund ihrer Länge sind sie jedoch nur auf Straßen mit entsprechenden Kurvenradien einsetzbar.

**Automatisierte Gelenkbusse** bieten ebenfalls eine hohe Fahrgastkapazität und werden im öffentlichen Nahverkehr in dicht besiedelten Gebieten genutzt. Durch ihre Größe sind sie auf entsprechende Straßenquerschnitte und Kurvenradien angewiesen, sodass sich ihr Einsatzbereich meist auf Hauptverkehrsstraßen beschränkt.

**Automatisierte Standardbusse** bieten eine mittlere Fahrgastkapazität, sind allerdings weniger als Gelenkbusse und können daher auch bei engeren Straßenquerschnitten, wie zum Beispiel in Wohngebieten, eingesetzt werden.

**Automatisierte Minibusse** oder Shuttles sind kleinere Fahrzeuge, die als Zubringer zum höherrangigen öffentlichen Verkehr genutzt werden können. Sie bieten eine hohe Flexibilität und können darüber hinaus skaliert und entsprechend der Nachfrage

eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit ist diese Fahrzeugvariante von Interesse. Eine genaue Beschreibung der, in dieser Arbeit angenommenen, Fahrzeuge findet sich in Kapitel 4.3.2.

**Automatisierte Pkw** eignen sich für einzelne Fahrgäste oder kleine Gruppen. Diese Fahrzeuge bieten hohe Flexibilität und sind ideal für individuelle Fahrten, bei denen Fahrgäste direkt von einem Punkt zum anderen transportiert werden oder mehrere Fahrgäste mit ähnlichem oder gleichem Start- und Zielort befördert werden.

**Automatisierte Minicars** oder Zweisitzer sind für kurze Strecken und einzelne Fahrgäste konzipiert. Diese kleinen Fahrzeuge können denselben Service wie automatisierte Pkw bieten, benötigen jedoch weniger Platz. Aufgrund ihrer kompakten Bauweise könnten die Fahrzeuge zur Beförderung von mobilitätseingeschränkten Personen eingesetzt werden, auch in Bereichen, die für herkömmliche Fahrzeuge unzugänglich sind, wie beispielsweise Fußgänger\*innenzonen (Bruck et al. 2021, S. 138, González-González et al. 2020, S. 11, Mörner 2018, 49 ff.

### 3.2.3. ERKENNTNISSE ZUR WIRKUNG AUTOMATISIERTER FAHRZEUGE AUS INTERNATIONALEN STUDIEN

Durch die Literaturrecherche und das Review internationaler Literatur wurde ein umfassender Überblick über bestehende Studien zum Thema automatisiertes Fahren erstellt. Von besonderem Interesse sind dabei die räumlichen Konsequenzen der Einführung automatisierten Fahrens. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass Studien zu den Folgen der Einführung automatisierter Fahrzeuge regelmäßig zwei gegensätzliche Zukunftsvisionen skizzieren: eine utopische und eine dystopische. Die Arbeiten zeigen auf, dass gegenwärtig und

in naher Zukunft Entscheidungen getroffen werden, deren Folgen unsere zukünftige Mobilität entweder zu einer Lösung bestehender Probleme entwickeln oder diese erheblich verschärfen könnten. In der utopischen Vision wird die Erweiterung der Mobilitäts Optionen und verbesserter Zugänglichkeit, die Reduktion von Verkehrsstaus und Umweltbelastungen, erhöhte Sicherheit, die Umnutzung von Stellplätzen und ein effizienterer öffentlicher Verkehr prognostiziert. In der dystopischen Vision hingegen wird eine intensivere Nutzung individueller Fahrzeuge und vermehrte Leerfahrten, zunehmende Zersiedelung durch erhöhten Komfort in automatisierten Fahrzeugen, Risiken durch Cyberattacken und Datenschutzverletzungen sowie eine Minderung der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel erwartet (Baumgardner et al. 2019, S. 15, Broaddus 2019, S. 213–214).

Genauer analysiert wurden solche Arbeiten, die den Zielvorstellungen der Entwicklung und Implementierung des automatisierten Fahrens denen des RZU-Berichts möglichst entsprechen. Dies schließt die größtmögliche Verdrängung des MIV durch kaF sowie andere umweltfreundliche und effiziente Verkehrsarten wie Fuß- und Veloverkehr ein. Trotz intensiver Recherche konnten keine Studien identifiziert werden, die exakt diese Parameter beleuchten. Daher wurde der Suchradius auf Studien erweitert, die Szenarien mit einem hohen Grad an Übereinstimmung aufweisen. Dabei rücken insbesondere Untersuchungen in den Mittelpunkt, die zwar nicht den kollektiven ÖV als Gegenstand haben, jedoch Szenarien berücksichtigen, die von einem 100 % automatisierten Ridesharing ausgehen.

Es konnten zwei wichtige Studien identifiziert werden, die sich mit der Implementierung geteilter automatisierter Fahrzeuge (im Modus Ridesharing) und deren Auswirkungen in unterschiedlichen städtischen Kontexten

(Lissabon und Stuttgart) befassen. Die Ergebnisse der Studien werden nach Aussagen zu den Auswirkungen auf den Flächenverbrauch sowie weiteren relevanten räumlichen Konsequenzen ausgewertet. Dabei treffen die Studien überwiegend keine direkten Aussagen zum Flächenbedarf, sondern erlauben vor allem Rückschlüsse darauf anhand der Anzahl der Fahrzeuge, des Bedarfs an Stellplätzen und der gefahrenen Kilometer.

### 3.2.3.1. ERGEBNISSE DER STUDIE „URBAN MOBILITY SYSTEM UPGRADE“

In der Studie wird der Einsatz von automatisierten Fahrzeugen in Lissabon, der Hauptstadt Portugals, modelliert. Die größte Stadt Portugals weist eine Bevölkerung von 565.000 Menschen auf. Im Metropolraum Lissabon, welcher sich über 18 weitere Gemeinden erstreckt, leben 2,8 Millionen Menschen, was ca. 25 % der Gesamtbevölkerung Portugals ausmacht (International Transport Forum (ITF) 2015, S. 13). In der Metropolregion Lissabon finden täglich über 5 Millionen Fahrten statt, wobei 55 % dieser Fahrten Arbeits- und Ausbildungswege sind. 1,2 Millionen Fahrten finden innerhalb der administrativen Grenzen der Stadt Lissabon statt. Diese Fahrten bilden die Datenbasis der Modellierung (ITF 2015, S. 13). Einschränkend ist festzuhalten, dass in der Studie die potenziellen Zuwächse in der Nutzer\*innenzahl durch Jugendliche, Senioren oder Personen mit eingeschränkter Mobilität, die von den automatisierten Mobilitätsangeboten profitieren könnten, nicht berücksichtigt werden (ITF 2015, S. 13).

Es wurden zwei Systemkonfigurationen für die automatisierte Mobilität untersucht. Einmal wurde das System als automatisiertes Carsharing-Modell ausgelegt, was Nutzer\*innen ermöglicht, sich ein Fahrzeug zeitlich nacheinander zu teilen (wie Carsharing,

in der Studie: „AutoVot“) und einmal wurde es als ein automatisiertes Ridesharing-Modell angelegt, bei welchem mehrere Fahrgäste dasselbe Fahrzeug gleichzeitig nutzen (wie Ridesharing, in der Studie: „TaxiBot“). Die betrachteten Szenarien fokussieren sich auf eine umfassende Implementierung von aF in Ergänzung zu hochrangigem öffentlichen Verkehrssystemen, jedoch ohne Busverkehr (ITF 2015, S. 18). Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die Szenarien der Studie, bei dem der ÖV durch ein AutoVot- oder TaxiBot-System ergänzt wird. Diese Szenarien entsprechen am ehesten den Zielvorstellungen des RZU-Berichts und sind daher von besonderem Interesse.

Die **Fahrzeuganzahl** (hier: Die Anzahl der Fahrzeuge im Straßenverkehr an einem durchschnittlichen Werktag) ließe sich in „TaxiBot+ÖV-Szenario“ um 90 % reduzieren, ohne dass sich dabei Startpunkt, Ziel und Reisedauer individueller Fahrten wesentlich verändern würden. Diese Reduktion bedingt allerdings eine vollständige oder nahezu vollständige Durchdringung der Fahrzeugflotte durch geteilte aFz. Liegt die Durchdringung nur bei 50 %, würde dies bereits eine geringe Zunahme der Fahrzeuganzahl (+ 2,4 %) bedeuten (ITF 2015, S. 19).

Die **Fahrleistung** steigt um 6,4 % im TaxiBot-ÖV-Szenario. Im AutoVot-ÖV-Szenario um 89,4 %. Der Anstieg der Verkehrsleistung ist darauf zurückzuführen, dass geteilte aFz den Busbetrieb gänzlich ersetzen würden, Die Verlagerung vom ÖV zu diesen neuen Mobilitätsformen trägt in den TaxiBot-Szenarien etwa 30 % und in den Carsharing-Szenarien fast 50 % zu den insgesamt gefahrenen Kilometern bei. Zusätzliche Fahrleistung entsteht durch Leerfahrten der Fahrzeuge und bei Ridesharing durch Umwege zum Aufnehmen und Absetzen von Fahrgästen (ITF 2015, S. 20).

**Stellplätze** gibt es in Lissabon 200.000. Davon sind 150.000 On-Street-Stellplätze, die sich direkt an den Straßen befinden und 50.000 Off-Street-Parkplätze, die sich abseits der Straße, zum Beispiel in Parkhäusern, Tiefgaragen oder auf speziellen Parkplätzen befinden. In sämtlichen betrachteten Szenarien lässt sich eine Verringerung der Standzeiten, in denen ein Fahrzeug nicht genutzt wird, feststellen. Der Anteil der Standzeiten pro Tag fällt vom Ausgangswert von 23 h bzw. 96 % des Tages auf ca. 6,5 h bzw. 27,2 % für das Szenario TaxiBot+ÖV. Sämtliche andere Szenarien bedeuten eine Abnahme der Nutzungszeit auf höchstens 39,4 % des Tages (ITF 2015, S. 27). Die Studie offenbart ein beachtliches Potenzial zur Reduktion von On-Street-Parkplätzen sowie von Off-Street-Parkplätzen, sofern vollständig automatisierte Fahrzeugflotten zum Einsatz kommen. So werden im Szenario TaxiBot+ÖV lediglich 8.901 Stellplätze benötigt. Im Szenario AutoVot+ÖV sind es 17.110 benötigte Stellplätze. In beiden Szenarien könnten die On-Street-Parkplätze vollständig und die Off-Street-Stellplätze zum überwiegenden Teil abgeschafft werden. Dies würde ein On-Street-Flächenpotenzial von 1.530.000 m<sup>2</sup> bedeuten, was nahezu 20 % der gesamten Straßenfläche Lissabons entspricht. In den Szenarien, bei denen die Fahrzeugflotten nur zu 50 % geteilt genutzt werden, zeigt sich, dass der Stellplatzbedarf hier nur leicht abnimmt oder sogar zunimmt (ITF 2015, S. 26).

Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnisse eindeutig schließen, dass Flotten aus gemeinsam genutzten, automatisierten Fahrzeugen das Potenzial haben, die heutigen Mobilitätsbedürfnisse mindestens in gleicher Qualität wie konventionelle Fahrzeuge zu erfüllen (ITF 2015, S. 19). Der Einsatz von geteilten, automatisierten Fahrzeugflotten zeigt ein enormes Transformationspotenzial. Die Anzahl der benötigten Fahrzeuge könnte

drastisch reduziert werden, was zu einer erheblichen Entlastung des Straßenverkehrs führen würde. Gleichzeitig könnte der Wegfall der Parkplätze Raum für andere Zwecke freigeben, wie beispielsweise Grünflächen, Fußgänger\*innenzonen oder andere neue Nutzungen. Die Studie unterstreicht zudem die Relevanz eines gut ausgebauten öffentlichen Verkehrssystems, da die positiven (im Sinne des RZU-Berichts) Auswirkungen der geteilten, automatisierten Fahrzeuge durch ein solches System verstärkt und negative Auswirkungen abgemildert werden.

### 3.2.3.2. ERGEBNISSE DER „MEGAFON“-STUDIE

Im Rahmen der MEGAFON-Studie (Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs) (Friedrich und Hartl 2016) werden Szenarien entworfen, in denen Fahrten, die derzeit mit privaten Fahrzeugen (No Sharing, NS) zurückgelegt werden, durch automatisierte Carsharing- (CS) und Ridesharing (RS)-Systeme

ersetzt werden. Je nach Szenario werden unterschiedliche Anteile von automatisiertem Car- und Ridesharing am Verkehrsaufkommen angenommen. Zusätzlich werden Szenarien betrachtet, in denen diese Dienste den schienengebundenen Personennahverkehr (SPNV) ergänzen. Das Laissez-Faire-Szenario, in dem die fortschreitende technologische Entwicklung im Bereich des automatisierten Fahrens ohne regulative oder sonstige Begleitmaßnahmen abläuft und die gegenwärtige Fahrzeugflotte lediglich durch aFz ersetzt wird, wird seitens der Studie nicht berücksichtigt. Die Autoren begründen dies damit, dass dies in jedem Fall das „offensichtlich negative“ Szenario sei (Friedrich und Hartl 2016, S. 7). Für jedes dieser Szenarien erfolgt eine Simulation hinsichtlich der dafür notwendigen Anzahl der Fahrzeuge und -fahrten, der Fahrzeugkilometer (Fahrleistung), der erforderlichen Stellplätze sowie des Energieverbrauchs. In der Studie werden die in Tab. 8 dargestellten Nutzungsvarianten bzw. Szenarien des aF angenommen.

TAB. 8: SZENARIEN DER STUDIE „MEGAFON“ (EIGENE DARSTELLUNG NACH FRIEDRICH UND HARTL 2016, S. 10).

Kürzel	Variante	Beschreibung
AV-NS	Private automatisierte Fahrzeuge im Modus private Nutzung	Privatbesitz, nur von Familienmitgliedern genutzt, keine Leerfahrten
AV-CS	Öffentliche automatisierte Fahrzeuge im Modus private Nutzung	Carsharing, sequenzielle Nutzung durch verschiedene Personen, Leerfahrten sind möglich, Größe eines konventionellen Pkw
AV-RS	Öffentliche automatisierte Fahrzeuge im Modus öffentliche Nutzung	Ridesharing, gleichzeitige Beförderung mehrerer Personen (bis zu 6), Leerfahrten sind möglich
SPNV	Schienengebundener Personennahverkehr	Fahrgäste werden mit öffentlichen, schienengebundenen Fahrzeugen befördert
SPNV + CS	SPNV und Carsharing im Vor- und/oder Nachlauf	SPNV und Carsharing im Vor- und/oder Nachlauf
SPNV + RS	SPNV und Ridesharing im Vor- und/oder Nachlauf	SPNV und Ridesharing im Vor- und/oder Nachlauf

Für die Studie gelten folgende Grundannahmen:

- Die Einführung von aFz führt zu keiner Veränderung der gesamten Verkehrsnachfrage.
- Die Auswahl des Verkehrsmittels wird nicht durch unterschiedliche Kosten der Nutzung beeinflusst.
- Es werden nur Wege betrachtet, die derzeit mit motorisierten Verkehrsmitteln bewältigt werden. Der Anteil der Wege, die zu Fuß oder mit dem Velo zurückgelegt werden, bleibt unverändert.
- Im SPNV wird von keinerlei Kapazitätsengpässen ausgegangen.
- Das konventionelle Bussystem wird vollständig durch automatisierte Fahrzeuge in der Größe eines konventionellen Pkw, ersetzt. Bestehende Buslinien mit festen Routen und Fahrplänen werden aufgelöst. Die Fahrgäste werden entweder direkt an ihr Ziel befördert oder zu einem Umstiegspunkt, an dem sie auf den SPNV umsteigen können (Friedrich und Hartl 2016, S. 9–11).

Den Zielvorstellungen des RZU entspricht am ehesten Szenario 2, in dem keine privaten Pkw genutzt werden und Wege ausschließlich mit dem SPNV und automatisiertem Ridesharing als Zubringer zurückgelegt werden (Szenario: 0 % AV-NS, 100 % AV-RS, SPNV). Das von den Zielvorstellungen am weitesten abweichende Szenario ist Szenario 7, bei dem sich der Großteil der Fahrzeuge weiterhin in Privatbesitz

und -nutzung befindet (Szenario: 75 % AV-NS, 25 % AV-CS, SPNV). Ein mittleres Szenario wird mit Szenario 6 simuliert, bei dem 50 % der Wege durch private aFz und 50 % durch den Modus Ridesharing abgedeckt werden (Friedrich und Hartl 2016, S. 13). Weiterhin finden sich Szenarien, in denen der SPNV vollständig durch Car- bzw. Ridesharing-Systeme ersetzt wird. In der schweizerischen Raum- und Verkehrsplanung sowie in den auf sämtlichen Planungsebenen und im RZU-Bericht verankerten Zielsetzungen zur Verkehrsverlagerung auf umweltfreundliche und effiziente Verkehrsträger nimmt der SPNV eine Schlüsselfunktion ein. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Ergebnisse der Szenarien mit SPNV dargestellt, während auf eine detaillierte Wiedergabe der Szenarien ohne SPNV, die erwartungsgemäß verstärkt negative Auswirkungen im Vergleich zu den Szenarien mit SPNV aufweisen, verzichtet wird (Friedrich und Hartl 2016, 24 ff.).

**Fahrzeuganzahl:** Am geringsten, allerdings dennoch um 14 %, wird die Fahrzeuganzahl im Vergleich zum Ist-Zustand in Szenario 7 reduziert, bei dem sich 75 % der Fahrzeuge in Privatbesitz befinden und 25 % der Wege mit Carsharing-Fahrzeugen zurückgelegt werden, die nur mit einer Person bzw. einer Fahrteinheit (Freunde, Familie mit selbem Start- und Zielort). Um 41,8 % wird der Fahrzeugbestand reduziert, wenn sich 50 % der Fahrzeuge in Privatbesitz befinden 50 % der Wege im Modus Ridesharing zurückgelegt werden (Szenario 6), also sich

Tab. 9: ANALYSIERTE SZENARIEN DER STUDIE „MEGAFON“ (EIGENE DARSTELLUNG NACH FRIEDRICH UND HARTL 2016, S. 10).

Szenario	Zusammensetzung	SPNV	AV-NoSharing	AV-Carsharing	AV-Ridesharing
2	0 % AV-NS, 100 % AV-RS, SPNV	Ja	0 %	0 %	100 %
6	50 % AV-NS, 50 % AV-RS, SPNV	Ja	50%	0 %	50 %
7	75 % AV-NS, 25 % AV-CS, SPNV	Ja	75 %	25 %	0 %

fremde Personen eine Fahrt mit ähnlichen Start- und Zielorten teilen. Am stärksten wird der Fahrzeugbestand in Szenario 2 reduziert, in dem 100 % aller Wege, welche nicht durch den SPNV abgedeckt werden können, mit automatisiertem Ridesharing zurückgelegt werden. Hier reduziert sich die Fahrzeugflotte um 92,9 % (Friedrich und Hartl 2016, S. 24). Einschränkend ist festzuhalten, dass sich die Angaben der Studie jeweils auf die am Tag bewegten Fahrzeuge beziehen. Fahrzeuge, die gar nicht bewegt wurden, werden nicht berücksichtigt. Dabei können diese Fahrzeuge als Lastspitzen-Reserve für Ridesharing-Systeme dienen, z. B. für den (Urlaubsverkehr). Über den Anteil dieser ungenutzten Fahrzeuge gibt die Studie jedoch keine Auskunft (Friedrich und Hartl 2016, S. 23).

**Stellplätze:** Die Anzahl der benötigten Stellplätze entspricht in etwa der Anzahl der vorhandenen Fahrzeuge, da diese nicht durchgehend genutzt werden und somit regelmäßig abgestellt werden müssen. Die Stellplatzanzahl gibt Aufschluss über den Flächenbedarf für das Abstellen der ungenutzten Fahrzeuge. In Szenario 2 werden lediglich 7,2 % der aktuell benötigten Stellplätze benötigt, was die stärkste Reduktion darstellt. In Szenario 6 werden noch über die Hälfte (58,2 %) der derzeit erforderlichen Stellplätze benötigt. Szenario 7 zeigt einen Bedarf von 85,9 % der Stellplätze im Vergleich zum Ist-Zustand (Friedrich und Hartl 2016, S. 34).

### 3.2.3.3. IDENTIFIKATION GEMEINSAMER TRENDS DER INTERNATIONALEN STUDIEN

Die Studien offenbaren gemeinsame Trends im Bereich des automatisierten Fahrens, aus denen sich sowohl Potenziale als auch Herausforderungen ableiten lassen. Im Folgenden werden die raumwirksamen Effekte der Einführung automatisierter Fahrzeuge dieser zusammengefasst und ihre Bedeutung für die Planungsräume abgeleitet.

**Fahrzeuganzahl:** In der Studie des ITF (Lissabon) wird aufgezeigt, dass bei vollständiger Einführung von automatisiertem Ridesharing in Verbindung mit einem effizienten öffentlichen Verkehrssystem eine Reduktion der Fahrzeuganzahl im Straßenverkehr (an Werktagen) um bis zu 90 % möglich ist (ITF 2015, S. 19). Ähnliche Ergebnisse zeigen sich in der MEGAFON-Studie, in der ein Szenario mit autonom betriebenem Ridesharing für alle nicht durch die Bahn bedienten Wege zu einer Reduktion des Fahrzeugbestands um 92,9 % führt (Friedrich und Hartl 2016, S. 24) (Abb. 2.).

Diese in den internationalen Studien weitgehend übereinstimmend ermittelten Ergebnisse verdeutlichen, dass ein immenses Reduktionspotenzial der Fahrzeuganzahl durch die Einführung von automatisierten Fahrzeugen in geteilter Nutzung ausgeht. Das RZU-Modell mit seinem Fokus auf die kollektive Nutzung von Fahrzeugen mit höherer Kapazität und Auslastung sowie der möglichst vollständigen Integration in den öffentlichen Verkehr lässt eine mindestens gleich starke Reduktion der Fahrzeuganzahl erwarten.

**Stellplatzbedarf:** In der Studie des ITF wird dargelegt, dass bei vollständiger Implementierung von automatisiertem Ridesharing in Verbindung mit dem öffentlichen Verkehr nur 4,45 % der gesamten Parkplätze in Lissabon benötigt würden. Unter der Berücksichtigung, dass drei Viertel der Parkplätze On-Street und ein Viertel Off-Street sind, könnten die On-Street-Parkplätze vollständig anderweitig genutzt werden. Von den Off-Street-Stellplätzen müssten nur 17,8 % genutzt werden, um diese Nachfrage zu befriedigen, was zur Folge hätte, dass 20 % des gesamten städtischen Straßenraumes anderweitig genutzt werden könnten (ITF 2015, S. 26). Die MEGAFON-Studie zeigt ähnliche Ergebnisse (Abb. 1). Im Szenario „100 % AV-Ridesharing + SPNV“ könnte der Bedarf

an Parkplätzen um 92,8 % auf nur 7,2 % des aktuellen Zustands reduziert werden (Friedrich und Hartl 2016, S. 34) (Abb. 2).

Zusammenfassend ist aF eine Chance, das Verkehrssystem positiv zu entwickeln. Voraussetzung ist immer ein leistungsfähiger öffentlicher Schienenverkehr, der als Grundlage für den öffentlichen Verkehr dient. Bei einem hohen Anteil von gemeinschaftlich genutzten Fahrzeugen kann sich darüber hinaus ein transformatives Potenzial ergeben, indem ein Großteil der Verkehrsfläche für ruhenden und fließenden Verkehr eingespart und infolgedessen mit anderen Nutzungen belegt werden kann (Friedrich und Hartl 2016, S. 64–65).

### 3.3. GRUNDLAGEN ZU VERKEHRSKNOTENPUNKTEN

Nachdem im vorherigen Kapitel der aktuelle Forschungs- und Planungsstand des automatisierten Fahrens umfassend beleuchtet wurde, widmet sich dieses Kapitel nun dem Stand dieser Technologie im Kontext von Verkehrsknotenpunkten bzw. Verkehrsdrehscheiben.

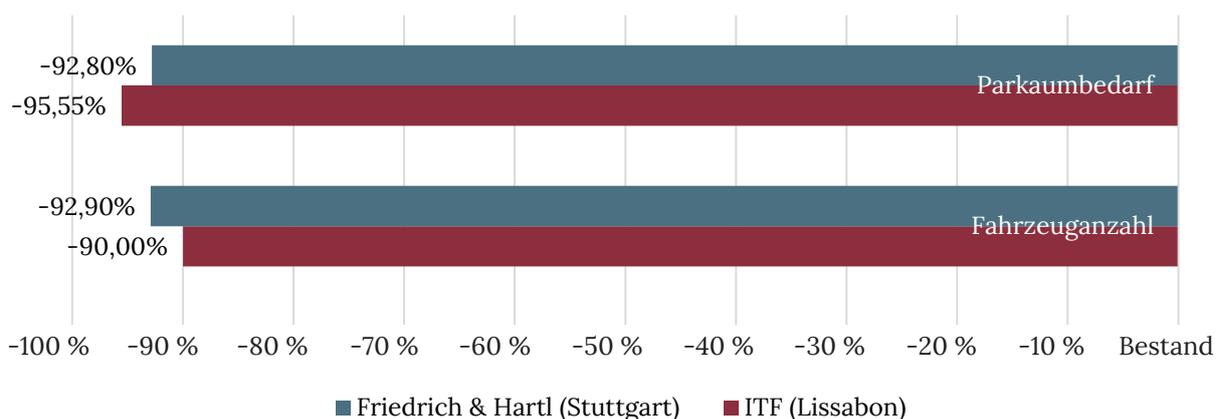
Verkehrsdrehscheiben, außerhalb des Schweizer Raums gewöhnlich als Verkehrsknotenpunkte oder -hubs bezeichnet,

sind punktuelle verkehrliche Infrastrukturen, an denen Verkehrsströme aus verschiedenen Startpunkten gebündelt und anschließend auf andere Verkehrsträger oder über einen weiteren Hub oder direkt zum Ziel weiterverteilt werden (Nickel et al. 2001, S. 96).

Automatisierte Shuttles könnten zukünftig eine wichtige Funktion bei der Anbindung verschiedener Standorte an Verkehrsknotenpunkte einnehmen. Als Zubringerdienste verbinden diese „Spokes“, also Wohngebiete, Gewerbegebiete, aber auch Einrichtungen wie Krankenhäuser oder Hochschulen mit „Hubs“, also Verkehrsdrehscheiben. Dabei bieten automatisierte Shuttles Vorteile gegenüber konventionellen Bussen: Sie bewältigen topographische und siedlungsstrukturelle Hindernisse besser und ermöglichen flexible Taktungen und dichtere Bedienfrequenzen, die mit konventionellen Bussen aufgrund von Personalmangel oder geringer Auslastung nicht umsetzbare wären. Sie sind daher ideal zur Feinverteilung und Überwindung der ersten bzw. letzten Meile (Ruhort et al. 2019, 23 ff.).

In der Literaturrecherche musste allerdings festgestellt werden, dass es zwar zahlreiche Literatur und Forschung zum Verkehrsaufkommen an Verkehrsknotenpunkten

ABB. 2: REDUKTION DES FAHRZEUG- UND STELLPLATZBEDARFS NACH STUDIE (EIGENE DARSTELLUNG NACH FRIEDRICH UND HARTL 2016, ITF 2015).



und zur Verknüpfung der Verkehrsströme gibt, da diese in Form von Bahnhöfen, U-Bahn-Stationen und Flughäfen „seit jeher“ wichtiger Bestandteil der Mobilität sind. Es fehlt jedoch an Erkenntnissen über die Integration neuer Angebotsformen wie automatisiertes Fahren und automatisierte Shuttles.

Es existieren Konzepte zur Integration von Verkehrsträgern als digitales Angebot, insbesondere in Form von Mobility-as-a-Service (MaaS) (Ruhrt et al. 2019, S. 13). MaaS ermöglicht es, alltägliche Wege optimal zu bewältigen, indem es den Fokus statt auf herkömmliche, besitzbasierte Mobilitätsformen auf den Zugang zu einer Vielzahl von Verkehrsmitteln legt. Im Mittelpunkt steht der Bedarf der Nutzer\*in, sein/ihr Ziel zu erreichen, nicht die oft eingeschränkten Möglichkeiten, die ihm zur Verfügung stehen. Durch die Kombination von ÖV, Carsharing, Ridesharing, Taxis, Mikromobilität, Leihfahrrädern usw. in einem digitalen Service, sollen nahtlose und widerstandslose Wechsel zwischen privaten und öffentlichen Angeboten möglich sein, um den einfachsten und besten Weg zum Ziel zu finden (Utriainen und Pöllänen 2018, S. 16) Wie allerdings ein MaaS-Konzept tatsächlich im Raum umgesetzt werden könnte, ist weitgehend spekulativ. Es existieren lediglich Designstudien zur Verkehrsknoten mit automatisierten Fahrzeugen, jedoch mangelt es diesen an fundierten Grundlagen die tatsächlich notwendigen Kapazitäten und Flächenprogramme für Verkehrsknotenpunkte unter Berücksichtigung automatisierter Fahrzeuge ermittelt hätten (American Planning Association (APA) 2020, Delft Design Labs 2020, Martin et al. 2021). Lediglich für das Design von „Ride Access Points“ gibt es erste Studien. Diese betreffen jedoch nur einzelne Haltepunkte und nicht Stationen mit mehreren Haltepositionen sowie Übergängen zu weiteren und höherrangigen Verkehrsmitteln (Hub et al. 2020, S. 566).

Das Design von Verkehrsknotenpunkten allerdings ist von Bedeutung für die Funktionalität und Effizienz eines (öffentlichen) Verkehrssystems. Die Gestaltung dieser Knotenpunkte stellt eine der relevantesten Herausforderungen im Verkehrsplanungsbereich dar (Danilina und Teplova 2018, S. 6, Pshinko et al. 2022, S. 201).

Ursächlich für den Mangel an detaillierten Untersuchungen zum Design von Verkehrsknotenpunkten ist vor allem, dass die notwendigen Grundlagen für solche Planungen selbst noch in der Entwicklung sind. So befindet sich die Forschung zur Nachfragemodellierung für Verkehrsknotenpunkte mit automatisierten Fahrzeugen noch in einem frühen Stadium. Etablierte Methoden fehlen bislang (Dauer et al. 2024, S. 77, Liu et al. 2020, S. 540, Winter et al. 2018, S. 153). Ein weiteres Hindernis ist der Mangel an detaillierten Daten, insbesondere zu Kurzstreckenfahrten im Nahbereich. Es fehlen beispielsweise Informationen darüber, ob diese Fahrten nur Teil einer Reise zwischen Verkehrsknotenpunkten sind oder ausschließlich innerhalb eines Knotenpunktes stattfinden (Xu et al. 2024, S. 19). Auch die Forschung zu automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr befasst sich derzeit primär mit grundlegenden Machbarkeitsfragen. Pilotversuche beschränken sich auf den Einsatz einzelner Shuttles, sodass die Erprobung und Erforschung von komplexen Systemen mit einer Vielzahl von Shuttles noch nicht absehbar ist (Hunsicker et al. 2017, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV) 2024, Wicki und Bernauer 2018). Der Fokus liegt daher aktuell auf der technischen Machbarkeit des automatisierten Fahrens im öffentlichen Verkehr, sodass die systemische Umsetzung und die Entwicklung entsprechender Konzepte für Verkehrsknotenpunkte noch unzureichend erforscht sind.

### 3.3.1. DAS SCHWEIZER MODELL DER VERKEHRSDREHSCHLEIBE

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Modell der Verkehrsdrehscheibe und analysiert deren zukünftige Funktionalität, insbesondere im Kontext der Einführung des automatisierten Fahrens. Zunächst wird ein grundlegender Überblick über das Schweizer Modell der Verkehrsdrehscheibe gegeben, einschließlich der verschiedenen Typen von Verkehrsdrehscheiben und ihrer spezifischen Merkmale.

Verkehrsdrehscheiben sind Knotenpunkte, an denen Verkehrsströme zusammengeführt, verschiedene Verkehrsmittel bereitgestellt, unterschiedliche Hierarchiestufen der Netze verknüpft und der Umstieg zwischen diesen ermöglicht wird. Dazu zählen der MIV, der ÖV auf Straße und Schiene, der Fuß- und Veloverkehr sowie Sharing-Optionen wie Bike- und Carsharing, Elektromobilität und Kleinstfahrzeuge. Von besonderer Relevanz ist dabei die Verknüpfung zwischen städtischen und ländlichen Räumen, indem eine möglichst nahtlose Verbindung hergestellt wird. Insbesondere Knotenpunkte mit Schienenverkehrsanbindung sind dabei essentiell (ARE 2021, S. 214, 2023, 5 ff., Kanton Zürich 2018, S. 40). Im Sinne einer nachhaltigen Mobilität sollen Lage, Funktionalität und Gestaltung der Verkehrsdrehscheiben einen Wechsel auf flächeneffiziente und emissionsarme Verkehrsmittel möglichst nahe an der Verkehrsquelle unterstützen (ARE 2021, 29 ff.). In der vorliegenden Diplomarbeit wird die Lage der Verkehrsdrehscheiben als gegeben betrachtet. Der Fokus liegt auf der Untersuchung der zukünftigen Funktionalität dieser Verkehrsdrehscheiben unter Berücksichtigung der Implementierung des automatisierten Fahrens und wie sich dies auf den Betrieb und die Gestaltung auswirken könnte. Es wird untersucht, welche

Anpassungen notwendig sein könnten, um die Ziele des nahtlosen Umstiegs und der nachhaltigen Mobilität bestmöglich zu gewährleisten. Die Handlungsebenen erstrecken sich dabei von der überörtlichen Planung über die höherrangige Verkehrsinfrastruktur bis hin zur lokalen Parkraumpolitik (Lage, Anzahl, Preis). Dies umfasst die Einbindung privater Akteure (Arbeitgeber\*innen, Freizeiteinrichtungen, Handel und Gewerbe) sowie die Feinverteilung in peripher gelegene Gebiete und die .kleinräumige Planung des Fuß- und Veloverkehrs (ARE 2021, 26 ff.). Basierend auf ihrer Lage und Funktion wird zwischen folgenden Typen von Verkehrsdrehscheiben unterschieden:

- Typ I bezeichnet die Hauptdrehscheibe einer großen Agglomeration, die sich im Hauptkern dieser befindet.
- Typ II beschreibt eine sekundäre Drehscheibe großer Agglomerationen, die im oder nahe am Hauptkern liegen.
- Typ III steht für die zentrale Drehscheibe weiterer Agglomerationen und ist im Kern einer mittelgroßen oder kleinen Agglomeration lokalisiert.
- Typ IV kennzeichnet die Drehscheibe eines regionalen Knotens, die entweder innerhalb eines Nebenkerns oder außerhalb einer Agglomeration eine zentrale Funktion einnimmt.
- Typ V, die MIV-Bündelungsdrehscheibe, befindet sich an unterschiedlichen Schnittstellen zwischen Nationalstraßen und ÖV-Haltstellen mit gutem Angebot und kann von „nah am Kern“ bis „außerhalb der Siedlung“ reichen (ARE 2021, S. 30–32).

Der Planungsraum Tiefenbrunnen lässt sich dem Typ II zuordnen. Die Typisierung von Verkehrsdrehscheiben ist jedoch nicht durch feste Kriterien definiert. Es

ist daher vorgesehen, diese lediglich als Ausgangspunkt zu nutzen. Im Rahmen eines regelmäßigen Austauschs zwischen den Verwaltungsebenen und unter Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsmittel und der Interessen aller Beteiligten sowie in Abstimmung mit der Siedlungsentwicklung sind die Verkehrsdrehscheiben im Detail bedürfnisorientiert zu planen (ARE 2021, S. 32). Insgesamt konnte zudem festgestellt werden, dass die Einbindung des automatisierten Fahrens bisher noch nicht Gegenstand von Planungen oder Strategien zu Verkehrsdrehscheiben ist. Es ist daher notwendig, die Chancen des automatisierten Fahrens zu nutzen und gleichzeitig auf die damit verbundenen Herausforderungen aufmerksam zu machen, um eine vorausschauende Planung im Hinblick auf die Integration des automatisierten Fahrens in Verkehrsdrehscheiben sicherstellen zu können.

### 3.3.2. AUSWIRKUNGEN DES AUTOMATISIERTEN FAHRENS AUF VERKEHRSDREHSCHLEIBEN

Verkehrsdrehscheiben sind als wichtiger Faktor für die Integration neuer Verkehrsangebote wie dem aF in den bestehenden ÖV identifiziert (RZU 2023, S. 113) Im Kontext des wachsenden Verkehrsaufkommens wird die Funktion von Verkehrsdrehscheiben auf lokaler Ebene betont. Diese müssen so gestaltet sein, dass sich der Umstieg von aF zum ÖV unkompliziert gestaltet und damit für die Nutzer\*innen möglichst attraktiv ist. Dies fördert die frühzeitige Nutzung effizienter Verkehrsmittel und fördert so die Integration der Technologie in den öffentlichen Verkehr. (ARE 2023, S. 6, RZU 2023, S. 152). Neue oder bestehende Standorte für Verkehrsdrehscheiben sollten daher im Hinblick auf das aF einer Neubewertung unterzogen werden. Insbesondere Standorte an Autobahnauffahrten bzw. -Abfahrten gewinnen an Relevanz, da diese regelmäßig

die frühestmöglichen Knotenpunkte für den Übergang von aF zum ÖV darstellen (RZU 2023, 91 ff.). Auch neue Technologien wie MaasS können das Potenzial von Verkehrsknotenpunkten steigern (ARE 2023, S. 28). Trotz des Schwerpunkts auf der digitalen Vernetzung lassen sich die Grundsätze von MaasS auch auf die räumliche Umsetzung von Verkehrsdrehscheiben mit automatisierten Shuttles anwenden. Dabei sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- **Multimodale Integration:** Ein umfassendes Angebot an Mobilitätsdienstleistungen, das öffentliche Verkehrsmittel, Sharing-Angebote (Carsharing, Bikeshaaring etc.), Ride-Hailing-Dienste und weitere Optionen umfasst. Darüber hinaus muss ein Verkehrsknotenpunkt auch ein zentraler Ort mit Dienstleistungen und Waren des täglichen Bedarfs sein, sodass die Anzahl der Wege reduziert wird, indem mehrere Erledigungen auf Teilwegen zusammengeführt werden können.
- **Intermodale Vernetzung:** Eine nahtlose Verbindung von physischer und digitaler Infrastruktur. Beispielsweise könnten Echtzeitinformationen über die Haltestellen des nächsten verfügbaren Shuttles direkt beim Verlassen eines Zuges bereitgestellt werden.
- **Intelligentes Mobilitätsmanagement:** Ein ganzheitliches System, das die effiziente Nutzung von Ressourcen gewährleistet, indem ein hohes Maß an Erreichbarkeit sichergestellt wird, gleichzeitig aber auch ein möglichst effizienter Betrieb gewährleistet wird.

Diese Ansprüche, insbesondere das umfassende Angebot an Mobilitätsdienstleistungen, die digitalen Informationssysteme sowie die Integration sonstiger Nutzungen (z. B. Lebensmittel, medizinische

Leistungen, Paketaufbewahrung) an der Verkehrsdrehscheibe, haben direkte Auswirkungen auf den Raum, konkret auf den unmittelbaren Nahbereich des Bahnhofs und den Vorplatz. Die verschiedenen Mobilitätsangebote sowie die zusätzlichen Dienstleistungen und die Nahversorgung müssen im Nahbereich untergebracht werden. Auch Details wie ein Echtzeit-Fahrgastinformationssystem erfordern physische Komponenten, die den vorhandenen Raum beanspruchen.

Mit der Implementierung automatisierter Shuttles würde sich der Vorplatz grundsätzlich verändern, da diese möglichst nahe am Bahnhof Ein- und Ausstiegspunkte benötigen, um die Wege für Fahrgäste so kurz wie möglich zu halten. Gleichzeitig könnte durch kürzere Taktungen der Shuttlesysteme ein erhöhtes Verkehrsaufkommen am Vorplatz entstehen, was potenziell zu einer verstärkten Barrierewirkung führen könnte. Dies könnte wiederum die Erreichbarkeit anderer Dienstleistungen und Angebote im Nahbereich beeinträchtigen, indem die Bewegungsfreiheit für Fußgänger und andere Verkehrsteilnehmer eingeschränkt wird.

Die Herausforderung bei der (Weiter-) Entwicklung von Verkehrsdrehscheiben im Kontext des automatisierten Fahrens besteht daher darin, diese unterschiedlichen Ansprüche zu organisieren. Es muss ein Gleichgewicht gefunden werden, das eine optimale Nutzung des Raums ermöglicht, ohne dabei die Zugänglichkeit und die Funktionsfähigkeit sowohl des Mobilitäts- als auch des Dienstleistungsangebots zu beeinträchtigen.

## 4. FALLBEISPIEL BAHNHOF ZÜRICH TIEFENBRUNNEN

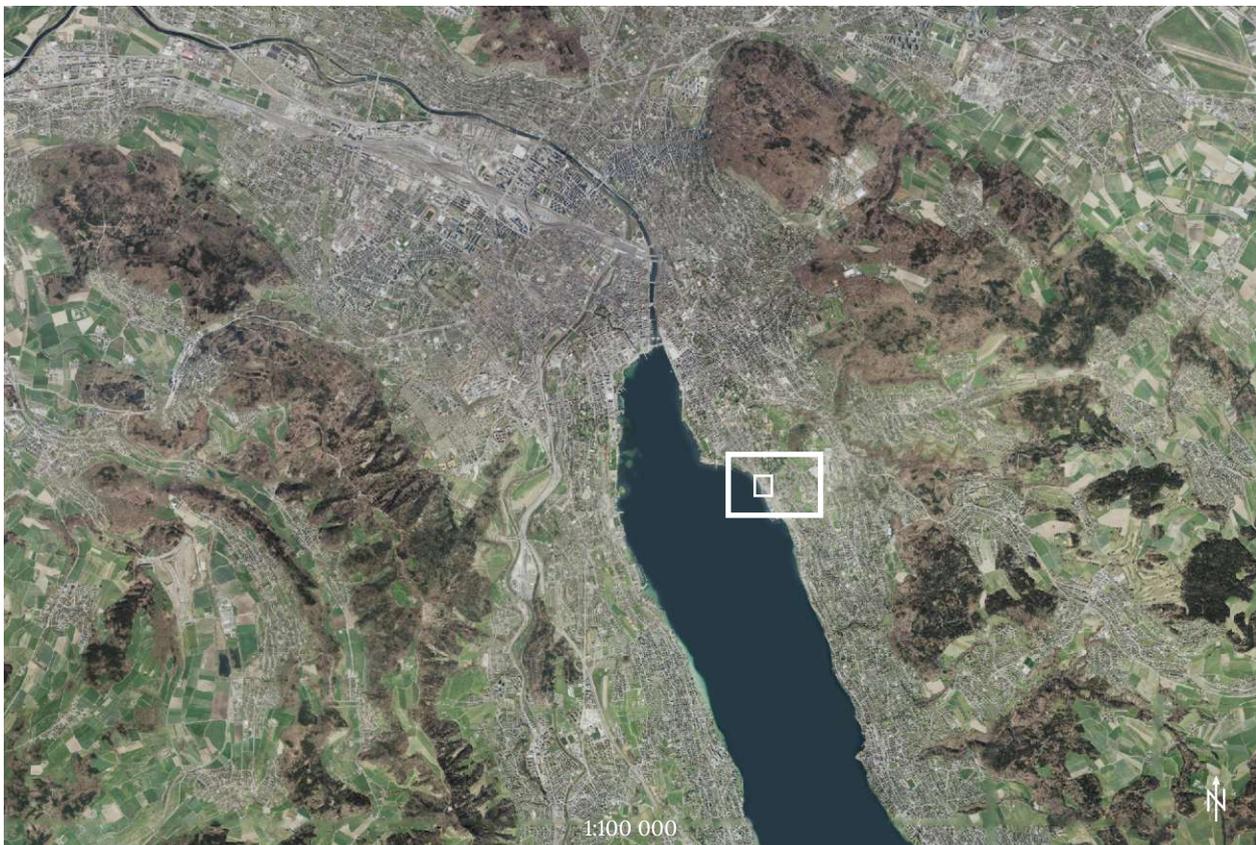
Dieses Kapitel bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Durch die Recherche konnte eindeutig festgestellt werden, dass es Forschungslücken im Bereich von Verkehrsdrehscheiben im Kontext des automatisierten Fahrens gibt. Als erster Ansatz, diese Lücken zu schließen, werden nun die formulierten Forschungsfragen beantwortet. Der Schwerpunkt liegt auf der spezifischen Untersuchung des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen im Kontext des automatisierten Fahrens. Dabei wird der Bahnhof als Verkehrsdrehscheibe analysiert, die eine zentrale Funktion im multimodalen Verkehrssystem der Region einnimmt.

Zunächst wird die Auswahl des Untersuchungsgebiets begründet. Ziel ist es, aufzuzeigen, wie die Implementierung

automatisierter Shuttles zu einer verbesserten Erreichbarkeit beitragen kann und welcher Flächenbedarf im Umfeld des Bahnhofs entsteht, um eine reibungslose und effiziente Nutzung sicherzustellen. Dafür erfolgt zunächst eine Bestandsaufnahme des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen. Darauf aufbauend wird ein Betriebskonzept für ein automatisiertes Zubringersystem entwickelt und die zugrundeliegenden Fahrzeuggrößen bestimmt.

Im nächsten Schritt wird der Einzugsbereich über eine GIS-Analyse ermittelt, gefolgt von der Darstellung der Angebotsfaktoren, wie beispielsweise die Linienlängen und die daraus resultierenden Umlauf- und Wartezeiten. Anschließend wird die Nachfrage quantifiziert, indem auf Grundlage der Einwohner\*innenzahl im Einzugsgebiet sowie mehrerer Faktoren wie Demografie, Mobilitätsgrad und der Substitutionswahrscheinlichkeit, also der Wahrscheinlichkeit, dass Menschen von einem

ABB. 3: VERORTUNG BAHNHOF ZÜRICH TIEFENBRUNNEN (KANTON ZÜRICH 2024).



derzeit genutzten Verkehrsmittel auf das Shuttlesystem umsteigen, eine Abschätzung vorgenommen wird.

Die so ermittelten Angebots- und Nachfragefaktoren ermöglichen dann die Bestimmung der notwendigen Anzahl an Shuttles. Diese Anzahl bildet die Grundlage für die Ermittlung der benötigten Haltestellen und in weiterer Folge für die Berechnung des Flächenbedarfs des Shuttlesystems.

#### 4.1. BEGRÜNDUNG DER AUSWAHL

Der Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen und sein Einzugsbereich stellen einen idealen Untersuchungsgegenstand dar, da er die Kriterien einer Verkehrsdrehscheibe erfüllt und gleichzeitig ein erhebliches Potenzial für die Weiterentwicklung der Forschung bietet. Die Funktion als Verkehrsdrehscheibe ist in diesem Kontext besonders relevant, da sie,

analog zum RZU-Modell, als Anlaufpunkt für automatisierte Shuttles dienen könnte, die Pendler\*innen aus dem Umland zum nächstgelegenen Bahnhof befördern, ohne tiefer in urbane Zentren vordringen zu müssen. Dieser Ansatz, Pendler\*innen möglichst effizient an den Stadtrandbahnhof zu bringen, ermöglicht es, am Beispiel Zürich Tiefenbrunnen wertvolle Erkenntnisse über die Integration automatisierter Verkehrssysteme in den suburbanen Raum zu gewinnen und diese in zukünftigen Arbeiten zu vertiefen.

- **Funktion als Verkehrsdrehscheibe:** Der Bahnhof stellt eine Verkehrsdrehscheibe dar und erfüllt damit die grundlegende Eignung als Untersuchungsgegenstand
- **Lage am Siedlungsrand:** Automatisierte Shuttles können spätestens hier halten, um Fahrgäste aus dem Umland in den SPNV zu überführen, ohne dass diese in die urbanen

Abb. 4: NAHBEREICH BAHNHOF ZÜRICH TIEFENBRUNNEN (KANTON ZÜRICH 2024).



Zentren vordringen müssen. Dies führt zu einer Entlastung des städtischen Verkehrs und entspricht dem Szenario des RZU-Berichts.

- **Übergangsraum:** Der Bahnhof liegt im Übergangsbereich zwischen urbanem und suburbanem Raum und eignet sich somit ideal zur Untersuchung der Integration automatisierter Fahrzeuge, da so erste Erkenntnisse über deren Implikationen für beide Raumtypen gewonnen werden können.
- **Heterogene Bevölkerungsdichte:** Der Standort bietet wertvolle Erkenntnisse durch die Analyse eines Gebiets mit unterschiedlicher Bevölkerungsdichte, was die Ergebnisse sowohl für dichter als auch für weniger besiedelte Regionen relevant macht.
- **Entwicklungspotenzial und Modellstandort** für weitere Forschung: Der Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen bietet Potenzial für zukünftige

städtebauliche Entwicklungen. Es könnten daher Flächen- und Raumprogramme auch für Nutzungen über das automatisierte Fahren selbst hinaus untersucht werden und so integrierte Entwicklungskonzepte unter Berücksichtigung des automatisierten Fahrens erstellt werden.

Die Lage des Bahnhofs am Stadtrand von Zürich bietet zudem viel Entwicklungspotenzial. So könnten langfristig detaillierte Flächen- und Raumprogramme sowie städtebauliche Entwicklungen, die den Übergang zwischen urbanem und suburbanem Raum berücksichtigen, in die Analyse einbezogen werden. Besonders aufschlussreich ist dabei die Untersuchung der Integration automatisierter Verkehrssysteme in Regionen mit unterschiedlicher Bevölkerungsdichte. Im Gegensatz zu einem homogen strukturierten Gebiet ermöglicht der Standort Zürich Tiefenbrunnen die Gewinnung wertvoller

ABB. 5: BAHNHOF ZÜRICH TIEFENBRUNNEN, BELLERIVESTRASSE, ZÜRICHSEE (EIGENES FOTOARCHIV).



Erkenntnisse, die sowohl für weniger als auch für dichter besiedelte Gebiete relevant sind und eignet sich daher als ideales Objekt für eine erste Studie dieser Art. Der Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen ist daher ein idealer Modellstandort für die (weitere) Untersuchung der Implementierung automatisierter Shuttles an einer Verkehrsdrehscheibe.

#### 4.2. BESTANDSAUFNAHME

Der Bahnhof Tiefenbrunnen liegt im Quartier Seefeld im südlichen Teil der Stadt Zürich, auf der (orographisch) rechten Seite des Zürichsees. Das Umfeld zeichnet sich durch eine vielfältige Bebauungsstruktur aus, die sowohl Wohnhäuser als auch Bürogebäude, Einzelhandelsgeschäfte und Dienstleistungsbetriebe umfasst. Der Bahnhof befindet sich im Übergangsbereich zwischen städtischem und suburbanem Raum und bildet somit eine wichtige Schnittstelle.

Die zukünftige Siedlungsentwicklung sieht eine mobilitätsorientierte Entwicklungsachse entlang der S-Bahnlinie vor. An den Verkehrsdrehscheiben sollen Zentren gebildet bzw. gefördert werden (Kantonsrat Zürich 2023, S. 33). Diese Arbeit liefert deshalb eine erste Abschätzung des Flächenbedarfs für ein Shuttle-System im Hinblick auf diese mögliche zukünftige Entwicklung.

Der Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen ist auf den Zürichsee ausgerichtet, wobei zwischen dem Bahnhofsgelände und dem Seeufer die vierspurige Bellerivestraße verläuft. Der Bahnhof Tiefenbrunnen umfasst das historische Bahnhofsgebäude aus dem 19. Jahrhundert und weitere untergeordnete Gebäude mit einer Bäckerei/Café und einem Kiosk. Direkt vor dem Bahnhofsgebäude liegt die Busstation, die Tramwendeschleife ist etwas versetzt. Das Bahnhofsumfeld ist durch eine

ABB. 6: BAHNHOF ZÜRICH TIEFENBRUNNEN, VORPLATZ (EIGENES FOTOARCHIV).



Park-and-Ride-Anlage, eine Autowaschanlage und der Bellerivestraße durch MIV-Infrastruktur geprägt

Der Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen erfüllt eine Hub-Funktion und stellt als solcher einen wichtigen Knotenpunkt dar, der Anbindungen an weitere Hubs bzw. die Verbindung von lokalen Quellen bzw. zu Fahrtzielen (Spokes) leistet. Dadurch übernimmt der Bahnhof die Aufgabe, (über)regionale Netzwerke zugänglich zu machen.

In der Analyse wurden ausschließlich Flächen des Vorplatzes betrachtet, die im Zusammenhang mit der Einführung eines Shuttle-Systems relevant sind. Das bedeutet, dass keine Flächen wie Gastronomie, Einkaufsmöglichkeiten oder Zugänge/Abgänge in die Aufstellung einbezogen wurden. Der Perron wurde nur in Bezug auf die Fläche berücksichtigt, die direkt an die Bushaltestelle grenzt, nicht jedoch die übrigen Bereiche des

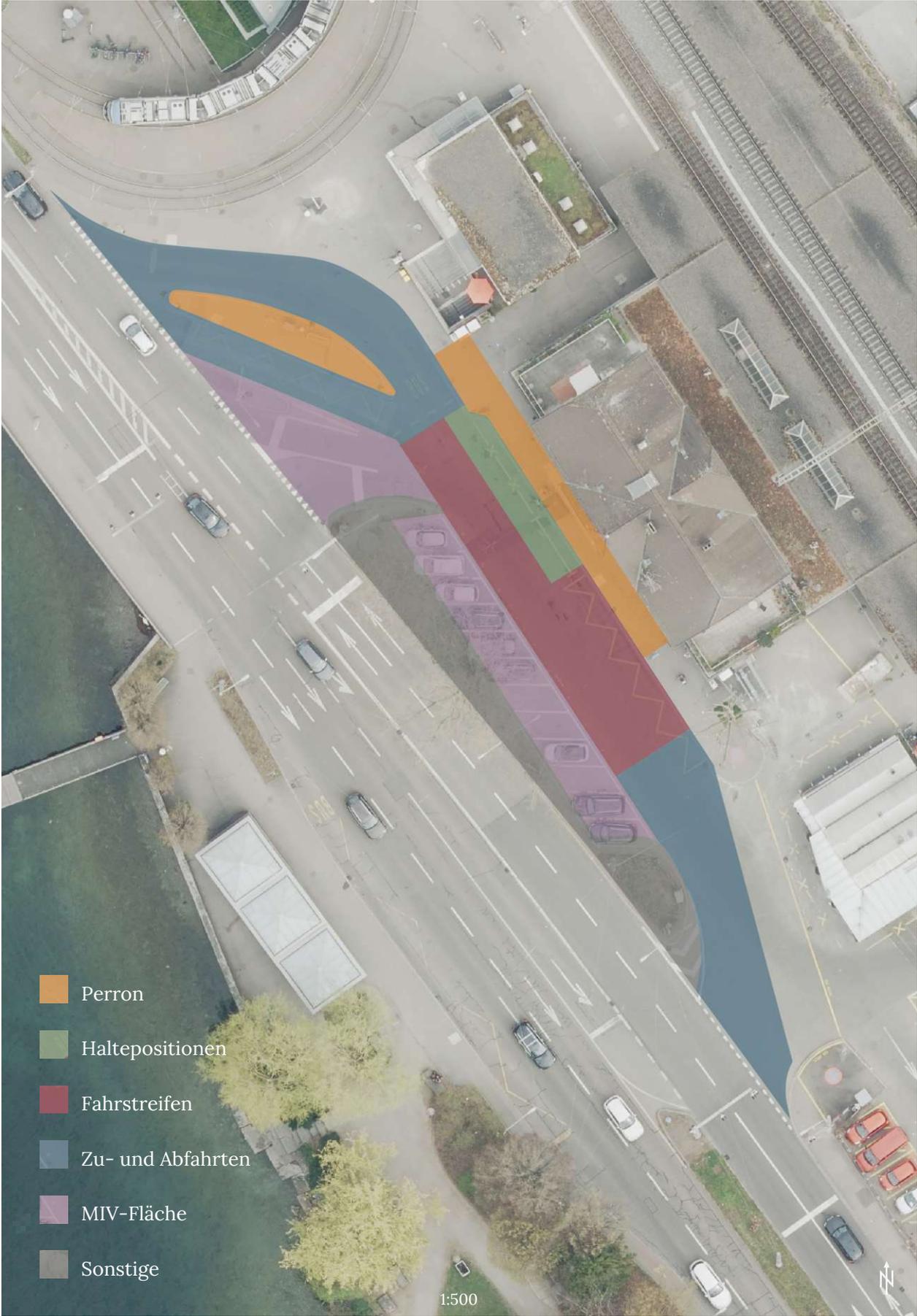
Bahnsteigs, die von Fußgänger\*innen genutzt werden. Es ist zu beachten, dass einige Flächen mehrere Funktionen erfüllen und eine exakte Abgrenzung der Nutzungsarten teilweise nicht möglich ist. Dies betrifft jedoch nur einen kleinen Teil der Gesamtfläche, sodass dennoch eine sinnvolle Flächenaufstellung erstellt werden konnte.

Den größten Anteil der Fläche nehmen die Zu- bzw. Abfahrten mit 346,0 m<sup>2</sup> ein, was auf die großen Schleppkurvenbereiche zurückzuführen ist, die für die Linienbusse erforderlich sind. Gefolgt wird dies von der MIV-Fläche mit 274,0 m<sup>2</sup>, welche sich auf Stellplätze direkt gegenüber des Bahnhofsgebäudes sowie auf die zweispurige Ausfahrt bezieht. Die Fahrstreifen, die für den Busbetrieb notwendig sind, benötigen 226,0 m<sup>2</sup>, während der Perron eine Fläche von 132,0 m<sup>2</sup> einnimmt. Den kleinsten Anteil bildet die Haltestelle selbst mit 59,0 m<sup>2</sup> (Abb. 8).

ABB. 7: PARK-AND-RIDE ANLAGE, AUTOWASCHANLAGE (EIGENES FOTOARCHIV).



Abb. 8: FLÄCHENVERTEILUNG IST-ZUSTAND, STATUS QUO (EIGENE DARSTELLUNG NACH KANTON ZÜRICH 2024).



### 4.3. BETRIEBSKONZEPT

Grundlegend für das Betriebskonzept ist das Szenario des RZU-Berichts, in dem automatisiertes Fahren technisch und infrastrukturell vollumfänglich möglich sein wird. Automatisierte Fahrzeuge sollen zur Erweiterung des bestehenden öffentlichen Nahverkehrs beitragen. Die Einsatzmöglichkeiten umfassen dabei die Ergänzung des ÖV durch Zubringerdienste für die „letzte Meile“, bei denen die Distanz zwischen der nächstmöglichen Haltestelle und dem endgültigen Ziel überbrückt wird.

Das Betriebssystem soll die Erreichbarkeit, also „die relative Leichtigkeit, mit der Personen Zugang zu Orten, Gütern und Erfahrungen haben, die für sie relevant sind“ (Cohen und Cavoli 2019, S. 136) verbessern. Dabei umfasst Erreichbarkeit vier Dimensionen. Die erste Dimension betrifft die zeitlichen Aspekte: Wann stehen Möglichkeiten zur Verfügung? Wie viel Zeit haben Personen für bestimmte Aktivitäten? Die zweite Dimension betrifft die individuellen Möglichkeiten: Welche Bedürfnisse und Fähigkeiten haben Personen? Hier sind Faktoren wie Alter, Einkommen und Gesundheitszustand von Interesse, da sie den Zugang zu Verkehrsmitteln und verschiedenen Standorten beeinflussen. Für diese Arbeit sind besonders die dritte und vierte Dimension relevant. Die dritte Dimension, das Verkehrssystem, beschreibt die infrastrukturellen Gegebenheiten: Wie einfach ist es, mit einem Verkehrsmittel von A nach B zu kommen? Zeitaufwand, Kosten, Komfort und Sicherheit sind hier relevante Faktoren. Die vierte Dimension betrifft die Flächennutzung. Diese bezieht sich auf die räumliche Verteilung von Möglichkeiten, wie Arbeitsplätzen, Geschäften sowie Gesundheits- und Freizeiteinrichtungen.

Durch ein Shuttle-System könnte die Erreichbarkeit zu verbessert werden, indem

kürzere Wartezeiten und eine schnellere Beförderung zum nächsten Verkehrsknoten ermöglicht werden, im Vergleich zum Fußweg oder konventionellen Bussen auch im Hinblick auf mobilitätseingeschränkte Menschen. Der Flächenverbrauch soll auf das nötige Minimum beschränkt werden, um unnötige Versiegelung zu vermeiden und insbesondere an zentralen Orten wie Verkehrsknotenpunkten Flächen für attraktivere Nutzungen zu schaffen bzw. diese nicht zu beanspruchen. Die weiteren Aspekte des Betriebskonzepts lassen sich wie folgt zusammenfassen, wobei die wichtigsten Punkte in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben und begründet werden.

#### 4.3.1. LINIENFÜHRUNGSMODELLE

Für die Integration automatisierter Fahrzeuge stellt sich die Frage nach dem optimalen Betriebskonzept für diese neuen Technologien. Dieses Kapitel untersucht verschiedene Konzepte, darunter ein Door-to-Door bzw. Hub-to-Hub-Modell sowie feste und flexiblen Linienführungen. Besonderes Augenmerk liegt zudem auf dem Konzept der Korridorlinien, das eine vielversprechende Kombination aus festen und flexiblen Routen darstellt.

**Door-to-Door:** Dieser Modus ermöglicht bequeme Verbindungen von Tür zu Tür, bei denen der Start- und Zielpunkt individuell gewählt werden kann. Zu den genutzten Verkehrsmitteln gehören Gehen, Velofahren und private Autofahrten. Während Fahrten mit dem Auto häufig von Parkplatz zu Parkplatz erfolgen, bieten Ride-Service-Dienste, wie sie gerade durch automatisierte Shuttles realisiert werden könnten, echte Tür-zu-Tür-Optionen. Die Bequemlichkeit des Door-to-Door-Modells und der individuellen Mobilität steht jedoch einem erhöhten Fahrzeugbedarf gegenüber. Insbesondere bei der Nutzung von automatisierten Fahrzeugen, die als Leerfahrzeuge gerufen werden, anstatt dass sich

die Nutzer\*innen selbst zum Verkehrsmittel begeben, könnte dies zu einem ineffizienten Ressourceneinsatz führen (ITF 2018, S. 48).

**Hub-to-Hub:** Hub-to-Hub-Dienste bieten eine optimierte Alternative zum Door-to-Door-Modell, indem sie festgelegte Knotenpunkte anfahren, an denen die Reisenden umsteigen oder ihre Fahrzeuge abstellen können. Car-Sharing- und Bike-Sharing-Stationen, die häufig an öffentlichen Verkehrsknotenpunkten platziert sind, ermöglichen häufig solche Verbindungen. Diese Verbindungen könnten durch automatisierte Shuttles bedient werden. Bei einer größeren Anzahl von Personen, welche diese fixen Verbindungen nutzen, wäre es jedoch sinnvoll, effizientere Lösungen wie Trams, U-Bahnen oder S-Bahnen zu implementieren, um die Verkehrsströme zu bündeln und eine höhere Effizienz zu gewährleisten (ITF 2018, S. 48).

**Feste Linienführung:** Feste Linien entsprechen der konventionellen Führung des öffentlichen Verkehrs, bei dem Fahrzeuge wie Busse und Straßenbahnen auf vorgegebenen Strecken verkehren. Diese Verkehrsform bietet eine hohe Planbarkeit und regelmäßige Fahrpläne, was insbesondere auf stark frequentierten Strecken sinnvoll ist. Durch die Bündelung von Verkehrsströmen in einem Fahrzeug wird eine hohe Flächeneffizienz erreicht. Insbesondere auf vielgenutzten Routen bietet sich dieses System als besonders effizient an, wenn (schienengebundene) Fahrzeuge auf eigenen Fahrstreifen eingesetzt werden (ITF 2018, S. 48).

**Flexible Linienführung:** Flexible Linien können aufgrund technischer Fortschritte, insbesondere durch die Kommunikation von Echtzeit-Daten, dynamisch an die jeweilige Nachfrage angepasst werden. Diese Art von Linienführung eignet sich besonders für die Nutzung automatisierter Fahrzeuge, da die Routen bedarfsgerecht angepasst und mit vergleichsweise geringen

(Personal-)Kosten viele kleine Fahrzeuge entsendet werden können. Der Vorteil liegt in der hohen Flexibilität. Jedoch führt die Vielzahl kleiner Gefäße und die Anpassung der Routen zu einem erhöhten Fahrzeugbedarf und einem höheren Fahrzeugkilometeraufkommen (ITF 2018, S. 48).

**Korridorlinien:** Korridorlinien stellen eine Mischung aus festen und flexiblen Routen dar. Sie bieten keinen Door-to-Door-Service, ermöglichen es allerdings, den Einzugsbereich einer Route zu erweitern, indem innerhalb des Korridors die Route abweichen kann. Insbesondere für ältere Menschen können dadurch die zurückzulegenden Fußwege verkürzt werden. Gleichzeitig sind weniger Fahrzeuge als bei einem Door-to-Door-Service notwendig, um ein hohes Mobilitätsniveau zu gewährleisten, da Fahrten weiterhin gebündelt werden.

In diesem Betriebskonzept ist es Nutzer\*innen möglich, die Shuttles für Teilstrecken innerhalb eines Korridors zu verwenden. Dies bietet zusätzliche Flexibilität, da Fahrten innerhalb der definierten Routen flexibel genutzt werden können, ohne dass die gesamte Strecke zurückgelegt werden muss. Dadurch werden sowohl die Kapazität als auch die Erreichbarkeit innerhalb des Korridors optimiert, was besonders für Personen mit eingeschränkter Mobilität oder bei kürzeren Strecken von Vorteil ist. Aufgrund dieser Möglichkeit werden die konventionellen Omnibuslinien nicht berücksichtigt, da diese Funktion von den automatisierten Fahrzeugen übernommen wird. Diese Herangehensweise orientiert sich an den Studien des ITF und von Friedrich und Hartl, in denen ebenfalls der Busverkehr durch automatisiertes Ridesharing ersetzt und durch hochrangige schienengebundene Verkehrssysteme ergänzt wird (Friedrich und Hartl 2016, S. 9–11, ITF 2015, S. 18).

Aufgrund der spezifischen Vorteile, die automatisierte Fahrzeuge bieten (geringere Betriebskosten, sodass mehr Fahrzeuge eingesetzt werden können; kleinere Einheiten sind nicht auf spezifische Straßenquerschnitte und Kurvenradien angewiesen und können somit auch in Wohngebieten effizient agieren, ohne auf festgelegte Linien angewiesen zu sein), erscheint das Betriebssystem der Korridorlinien als besonders geeignet. Diese Betriebsform entspricht am ehesten dem Zubringerprinzip des RZU-Berichts, wonach automatisierte Fahrzeuge zur Verbesserung der Erreichbarkeit genutzt werden sollen (RZU 2023, S. 61). Daher wird das Betriebssystem der Korridorlinien zugrunde gelegt. Diese Routen führen innerhalb eines definierten Korridors zum bzw. vom Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen und bieten zudem die Möglichkeit, auch für Teilstrecken flexibel genutzt zu werden. Die flexible Gestaltung innerhalb des Korridors ermöglicht eine effiziente und gleichzeitig anpassungsfähige Mobilitätslösung, welche die Vorteile von festen Routen mit der Flexibilität bedarfsorientierter Fahrten kombiniert.

#### 4.3.2. FAHRZEUGTYP- UND GRÖSSEN

Fraglich ist, welche Art von automatisierten Fahrzeugen für den Shuttle-Betrieb im Sinne

des kollektiven automatisierten Fahrens als Zubringer zum höherrangigen ÖV am besten geeignet ist. Dafür lassen sich Randbedingungen definieren, die sich aus dem geplanten Einsatz ergeben.

Die Fahrzeuge sollen das bestehende Straßennetz nutzen, ohne dass zusätzliche Infrastrukturmaßnahmen erforderlich sind. Schienengebundene Fahrzeuge kommen daher nicht in Betracht. Zudem müssen die Fahrzeuge flexibel im Straßennetz einsetzbar sein, sodass ein Korridorbetrieb innerhalb eines definierten Bereichs möglich ist. Dies bedeutet, dass die Fahrzeuge in der Lage sein müssen, auf unterschiedlichen Straßentypen innerhalb eines Korridors zu verkehren. Herkömmliche Omnibusse sind aufgrund ihrer Größe für den flexiblen Einsatz im bestehenden Straßennetz, insbesondere in engen Straßen und Kreuzungen, ungeeignet. Daher liegt der Fokus auf kompakten Fahrzeugen, welche die Abmessungen eines konventionellen 3,5-Tonnen-Fahrzeugs nicht überschreiten. Diese Fahrzeuge, in der Schweiz als „schwere Personenkraftwagen bis 3,5 t“ (UVEK 2022) klassifiziert und umgangssprachlich als „Sprinter“ bekannt, gewährleisten dagegen eine - im Regelfall - unbehinderte und flexible Navigation im bestehenden Straßenraum.

Tab. 10: ZUSAMMENFASSUNG FAHRZEUGGRÖSSEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH ZOOX 2024).

Komponente	Zoox-Shuttle	4-Personen-Shuttle	8-Personen-Shuttle
Fahrzeugausmaße	3,63 m x 1,72 m	4,72 m x 1,80 m	6,60 m x 1,90 m
Sitzbereich	3,12 m <sup>2</sup>	3,12 m <sup>2</sup>	6,24 m <sup>2</sup>
Ein- und Ausstiegsbereich	1,61m <sup>2</sup>	1,61m <sup>2</sup>	2,15 m <sup>2</sup>
Karosserie	0,95 m <sup>2</sup>	1,25 m <sup>2</sup>	1,64 m <sup>2</sup>
Sonstiges	0,56 m <sup>2</sup>	0,56 m <sup>2</sup>	0,56 m <sup>2</sup>
Stellplatz Rollstuhl	-	1,95 m <sup>2</sup>	1,95 m <sup>2</sup>
Flächenbedarf Fahrzeug	6,24 m <sup>2</sup>	8,49 m <sup>2</sup>	12,54 m <sup>2</sup>

Ein weiteres Kriterium ist, dass das Shuttle-System nur dann einen deutlichen Attraktivitätsgewinn gegenüber dem herkömmlichen, liniengebundenen Omnibussystem aufweist, wenn Ein- und Ausstiegsvorgänge möglichst unkompliziert und die Fahrzeiten möglichst kurzgehalten werden. Viele Zwischenhalte und eine große Anzahl von Ein- und Ausstiegen stehen diesem Ziel entgegen. Daher ist eine hohe Fahrgastkapazität keine (prioritäre) Anforderung kleinere, flexiblere Fahrzeuge die Effizienz und Attraktivität des Systems steigern, indem sie weniger Zwischenstopps und schnellere Fahrten ermöglichen.

Das Shuttlesystem soll, im Vergleich zum konventionellen Pkw, verkehrstechnische Vorteile bieten. Eine Fahrtenbündelung muss daher möglich sein und der Besetzungsgrad deutlich über dem eines Pkw liegen. Ein

Referenzfahrzeug existiert bereits von der Firma Zoox. Dieses Fahrzeug zeichnet sich durch ein komfortables Platzangebot pro Person aus, trotz vergleichsweise geringer Fahrzeugabmessungen (3,63 m lang, 1,72 m breit). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass keine technischen Vorrichtungen zur Fahrzeugsteuerung oder eine entsprechende Ausrichtung des Fahrzeugs notwendig sind, da die Fahrzeuge automatisiert bzw. ferngesteuert agieren (Metz et al. 2024). Der Flächenverbrauch im Stand entspricht mit 6,24 m<sup>2</sup> ungefähr dem eines herkömmlichen Kleinwagens (Zoox 2024).

Zur Berechnung der Anzahl benötigter Shuttles (Kapitel 4.7) wird das Zoox-Fahrzeug als Referenz genutzt. Allerdings wird dieses für die konkreten Bedingungen adaptiert und zudem ein weiteres Modell entwickelt. Dies geschieht angesichts der Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung von Technologien, insbesondere

TAB. 11: ZUSAMMENFASSUNG BETRIEBKONZEPT (EIGENE DARSTELLUNG).

Aspekt Betriebskonzept	Erläuterung
Erweiterung des ÖV	Automatisierte Shuttles sind eine Ergänzung des bestehenden öffentlichen Nahverkehrs als Zubringerdienst („letzte Meile“).
Standardtakt	Zur Verbesserung der Erreichbarkeit durch kürzere Wartezeiten und schnellere Beförderung zum nächsten Verkehrsknotenpunkt wird ein Standardtakt von 180 Sekunden angenommen. Anpassungen des Taktes zur Gewährleistung der Beförderungskapazität bei einzelnen Linien möglich.
Fahrleistung zur Spitzenstunde	Gegenstand der Berechnung ist die Tagesspitzenstunde zwischen 07:00 und 08:00 Uhr.
Fahrzeuggößen	4-Personen-Shuttle und 8-Personen-Shuttle
Szenarien getrennt nach Fahrzeuggröße	„4er-Shuttle“ und „8er-Shuttle“: Berechnungen erfolgen jeweils für den ausschließlichen Einsatz von 4-Personen-Shuttles oder 8-Personen-Shuttles. Eine Differenzierung nach Korridor/Linie ist nicht Teil des Modells.
Fahrtenbündelung	Effiziente Nutzung, hoher Besetzungsgrad ist stärker gewichtet als kürzere Umlaufzeiten durch weniger Haltevorgänge
Matching-Qualität	90 % aller Fahrtenanfragen können mit einem passenden Fahrtangebot bedient werden.
Korridorbetrieb	Flexible Nutzung der Shuttles innerhalb eines definierten Korridors.
Linienlängen	Die Länge je Shuttle-Linie ergibt sich aus der Tiefe des Korridors zzgl. des Umwegfaktors von 1,343 (Mennicken et al. 2023, S. 190)
Fahrgeschwindigkeit	Die Fahrgeschwindigkeit wird für die Shuttles mit einem Durchschnitt von 20 km/h angenommen.

im Bereich des automatisierten Fahrens. Daher ist die Erstellung von Szenarien eine geeignete Methode, um mögliche Entwicklungspfade zu untersuchen und Handlungsoptionen zu bewerten. Szenarien sind besonders wertvoll für langfristige und unsichere Entwicklungen, bei denen es schwierig bis unmöglich ist, präzise Vorhersagen zu treffen. Szenarien bieten die Möglichkeit, verschiedene plausible Zukünfte zu entwerfen und daraus belastbare Schlussfolgerungen zu ziehen, die trotz ihres unsicheren Eintretens, Orientierung bieten können (Dieckhoff et al. 2014, S. 36, Gausemeier et al. 1995, S. 147).

Es wird daher ein weiteres Modell angenommen, das auf diesem Konzept basiert, jedoch die doppelte, also eine Kapazität für 8 Personen aufweist. Dazu wird der Sitzbereich, der im ursprünglichen Fahrzeug für 4 Personen auf 3,12 m<sup>2</sup> geschätzt wurde, aufgrund der Kapazität für nunmehr 8 Personen auf 6,24 m<sup>2</sup> verdoppelt. Der Ein- und Ausstiegsbereich wird um ein Drittel erweitert, um dem größeren Fahrgastaufkommen gerecht zu werden und die Ein- und Ausstiegszeiten nicht zu verlängern. Dieser nimmt nun 2,15 m<sup>2</sup> ein. Ein Stellplatz für einen Rollstuhl, der eine Fläche von 1,95 m<sup>2</sup> benötigt, wird ebenfalls addiert (Bundesamt für Verkehr (BAV) 2024, S. 16). Der Anteil der allgemeinen Fahrzeugtechnik (Sonstiges) bleibt unverändert bei 0,56 m<sup>2</sup>. Die Karosserie wächst proportional zur Fahrzeuggröße, was eine Fläche von 1,64 m<sup>2</sup> ergibt. Die Gesamtfläche des 4-Personen-Shuttles beträgt dann 8,49 m<sup>2</sup>, die des 8-Personen-Shuttles 12,54 m<sup>2</sup>. Der Rollstuhlstellplatz wird bei der Beförderungskapazität nicht berücksichtigt.

#### 4.3.3. GIS-ANALYSE ZUR DEFINITION DES EINZUGSBEREICHES

In der vorliegenden Arbeit wird die GIS-Analyse als Werkzeug eingesetzt, um den Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen zu

bestimmen und die potenziellen Nutzer\*innen eines automatisierten Zubringersystems zu quantifizieren. Die GIS-Analyse ermöglicht es, räumliche Daten und statistische Informationen präzise zu verarbeiten, zu visualisieren und zu analysieren. Durch diese Methode können georeferenzierte Daten, wie beispielsweise Bevölkerungszahlen oder Entfernungen, mit geografischen Standorten verknüpft werden, was die Grundlage für fundierte Planungsentscheidungen bildet.

Das Hauptziel der GIS-Analyse in dieser Arbeit ist es, den Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen zu definieren, um die räumliche Verteilung der potenziellen Nutzer\*innen des automatisierten Shuttle-Systems zu ermitteln. Dabei sollen verschiedene Erreichbarkeitsstufen analysiert werden, um festzustellen, wie viele Menschen in den unterschiedlichen Entfernungen zum Bahnhof wohnen und welche Gebiete potenziell durch das Shuttle-System bedient werden können. Diese Analyse ist wichtig, um die Nachfrage nach dem Shuttle-System zu bewerten und die Kapazitäten sowie den optimalen Flächenbedarf für Haltestellen und Haltepositionen zu planen.

Die GIS-Analyse ist in diesem Kontext besonders geeignet, da sie die Möglichkeit bietet, komplexe räumliche Zusammenhänge zu visualisieren und zu quantifizieren. Sie ermöglicht eine präzise räumliche Abgrenzung und Berechnung des Einzugsbereichs und liefert dadurch eine fundierte Grundlage für die weiteren Planungen. Der Einsatz eines GIS-Systems ist notwendig, um die Daten auf einer räumlichen Ebene zu verknüpfen und die Ergebnisse der Analyse in verständlicher Form darzustellen.

In dieser Arbeit wird die GIS-Analyse verwendet, um den Einzugsbereich des Bahnhofs zu bestimmen, die Erreichbarkeitsstufen festzulegen und durch räumliche Verknüpfung von Bevölkerungsdaten mit den

geografischen Einzugsbereichen die Anzahl der Einwohner\*innen zu ermitteln, die in den jeweiligen Entfernungsbereichen wohnen.

Zunächst wird der Einzugs- bzw. Planungsbereich für den S-Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen bestimmt. Wie in der Bestandsaufnahme in Kapitel 5.2 erläutert, stellt der Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen auch Start- bzw. Endhaltestellen für die Tramlinien 2 und 4 dar. Personen, die das Shuttle nutzen, um die Tram zu erreichen, haben somit dasselbe Ziel bzw. denselben Ausgangspunkt ihrer Shuttle-Fahrt wie jene, die zur S-Bahn umsteigen. Dies hat daher keine wesentlichen Auswirkungen auf die Shuttle-Linien, die Anzahl der Nutzer\*innen oder den Einzugsbereich. Lediglich im Nahbereich der Tramlinien könnte die Nutzung des Shuttles leicht überschätzt werden. Aufgrund der vergleichsweise geringen Auswirkungen und der erheblichen Verkomplizierung der Potenzialabschätzung wird auf eine detaillierte Berücksichtigung dieser Effekte verzichtet.

Der Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen wurde als Mittelpunkt für die Erstellung des Einzugsbereichs gewählt. Anschließend wurden konzentrische Puffer um den Bahnhof Tiefenbrunnen erstellt, welche die Erreichbarkeit in verschiedenen Entfernungsstufen darstellen (bis 300 m, 300-500 m, 500-750 m, 750-1000 m). Um den Einflussbereich des Bahnhofs Tiefenbrunnen gegenüber anderen Bahnhöfen abzugrenzen, wurde ein Voronoi-Diagramm erstellt. Jeder Punkt innerhalb eines Voronoi-Polygons ist näher am zugehörigen Bahnhof als an jedem anderen. Die Puffer wurden mit dem Voronoi-Diagramm verschnitten, um den Einzugsbereich des Bahnhofs Tiefenbrunnen zu definieren und Überschneidungen mit den Einzugsbereichen anderer Bahnhöfe zu vermeiden. Das Vorgehen wird im Folgenden detailliert dargestellt.

#### 4.3.3.1. DEFINITION DER EINZUGSBEREICHE ÜBER DISTANZPUFFER

Die Punktdaten der Bahnhöfe wurden in QGIS importiert. Diese Punktdaten dienen als Grundlage für die Erstellung von Puffer und Voronoi-Polygonen. In der Literaturanalyse zu den Puffern rund um ÖV-Haltestellen, die unterschiedliche Erreichbarkeitsgrade abbilden, konnte festgestellt werden, dass verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Größe dieser Puffer existieren. Obwohl die konkreten Werte variieren, bewegen sich allerdings innerhalb eines ähnlichen Bereichs (ARE) 2010, S. 14, Yang et al. 2021, S. 3). Aufgrund dieser uneinheitlichen Befunde konnte keine allgemeingültige Schlussfolgerung bezüglich der idealen Größe eines Puffers gezogen werden. Es werden daher die vom Amt für Raumentwicklung festgelegten Klassifizierungen als Grundlage verwendet: Bis 300 m, 300 bis 500 m, 500 bis 750 m und 750 bis 1000 m, wobei die Erreichbarkeitsqualität mit jeder Entfernungsstufe abnimmt (ARE 2010, S. 14). Die Analyse zur Festlegung der Puffer ergab, dass eine Ausdehnung über 1000 m hinaus nicht zweckmäßig ist. Die bestehende S-Bahn-Infrastruktur bietet bereits eine hohe Versorgungsdichte, sodass bei einem angenommenen maximalen Weg von 1000 m zur nächsten Haltestelle nahezu keine unversorgten Räume verbleiben.

In der aktuellen Analyse sind die Distanzpuffer gestapelt angelegt, was dazu führen könnte, dass eine Einheit (ein\*e Einwohner\*in) sowohl dem 750 m- als auch dem 1000 m-Puffer zugeordnet wird (Abb. 9). Um konzentrische, nicht-gestapelte Puffer um die Bahnhöfe zu generieren, wurden die Puffer mittels Differenzbildung voneinander abgegrenzt und so Mehrfachring-Puffer erstellt.

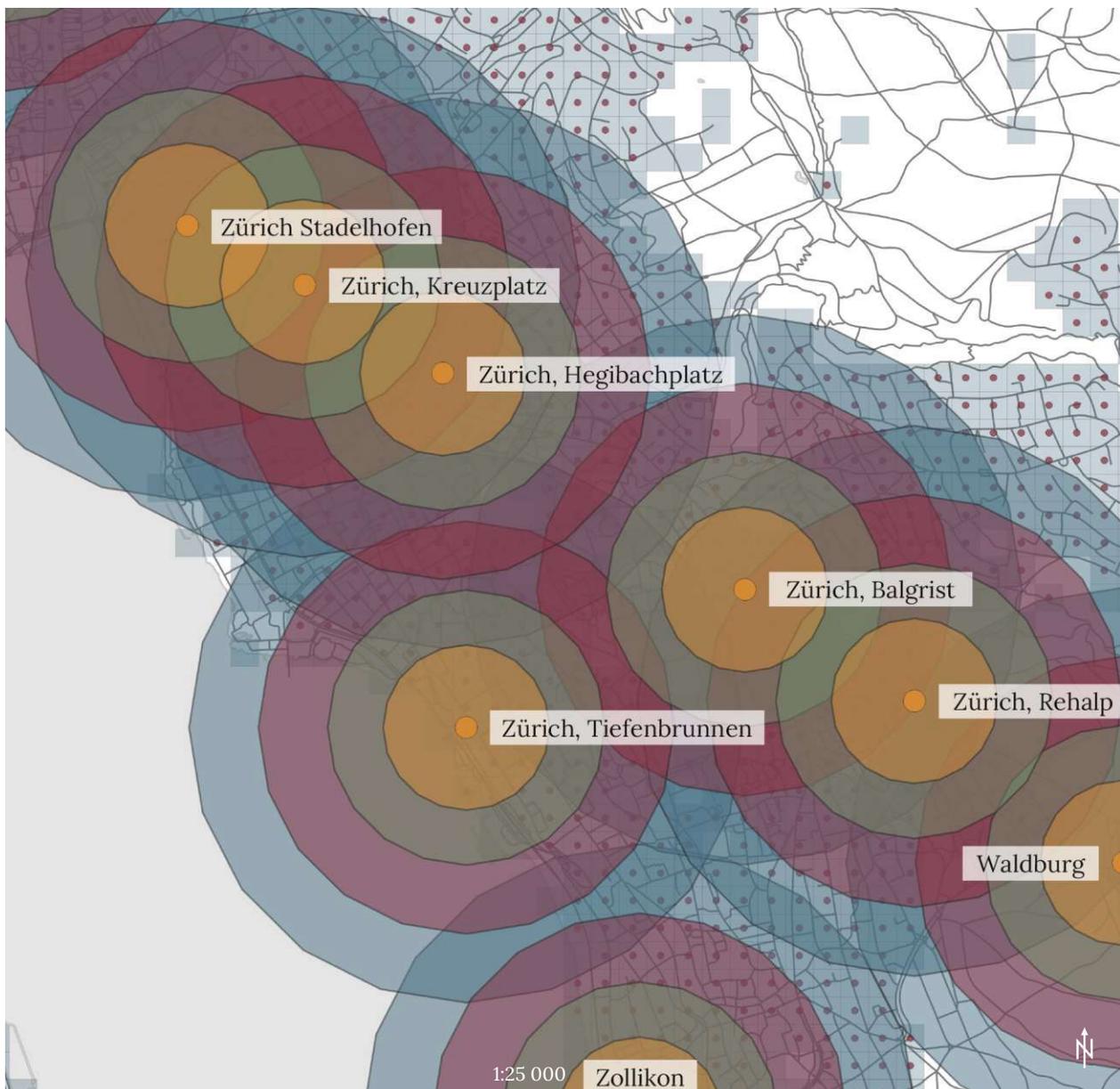
#### 4.3.3.2. ABGRENZUNG DER EINZUGSBEREICHE ÜBER VORONOI-DIAGRAMM

Um den Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen zu bestimmen, wurden in einer GIS-Analyse alle umliegenden Bahnhöfe verortet. Anschließend wurde ein Voronoi-Diagramm erstellt. Voronoi-Diagramme sind mathematische Konstruktionen, die den Raum in Zellen oder Polygone unterteilen, wobei jede Zelle einen Kern umgibt. Das Voronoi-Diagramm zeichnet sich dadurch aus, dass alle Punkte innerhalb einer Zelle näher an diesem, ihr

zugeordneten Kern liegen als an jedem anderen Kern (Boonprong et al. 2024, S. 2).

Im vorliegenden Fall repräsentieren diese Kerne den Bahnhof Tiefenbrunnen und die umliegenden S-Bahnhöfe. Die Polygone visualisieren somit die Räume, mit den jeweils kürzesten möglichen Abständen zum nächsten S-Bahnhof. Jeder Punkt innerhalb einer Zelle liegt also näher an dem ihr zugehörigen Bahnhof als an den Bahnhöfen der Nachbarzellen. Die Grenzlinien dieser Polygone markieren die Bereiche, in denen die

ABB. 9: DISTANZPUFFER (EIGENE DARSTELLUNG NACH KANTON ZÜRICH 2024).

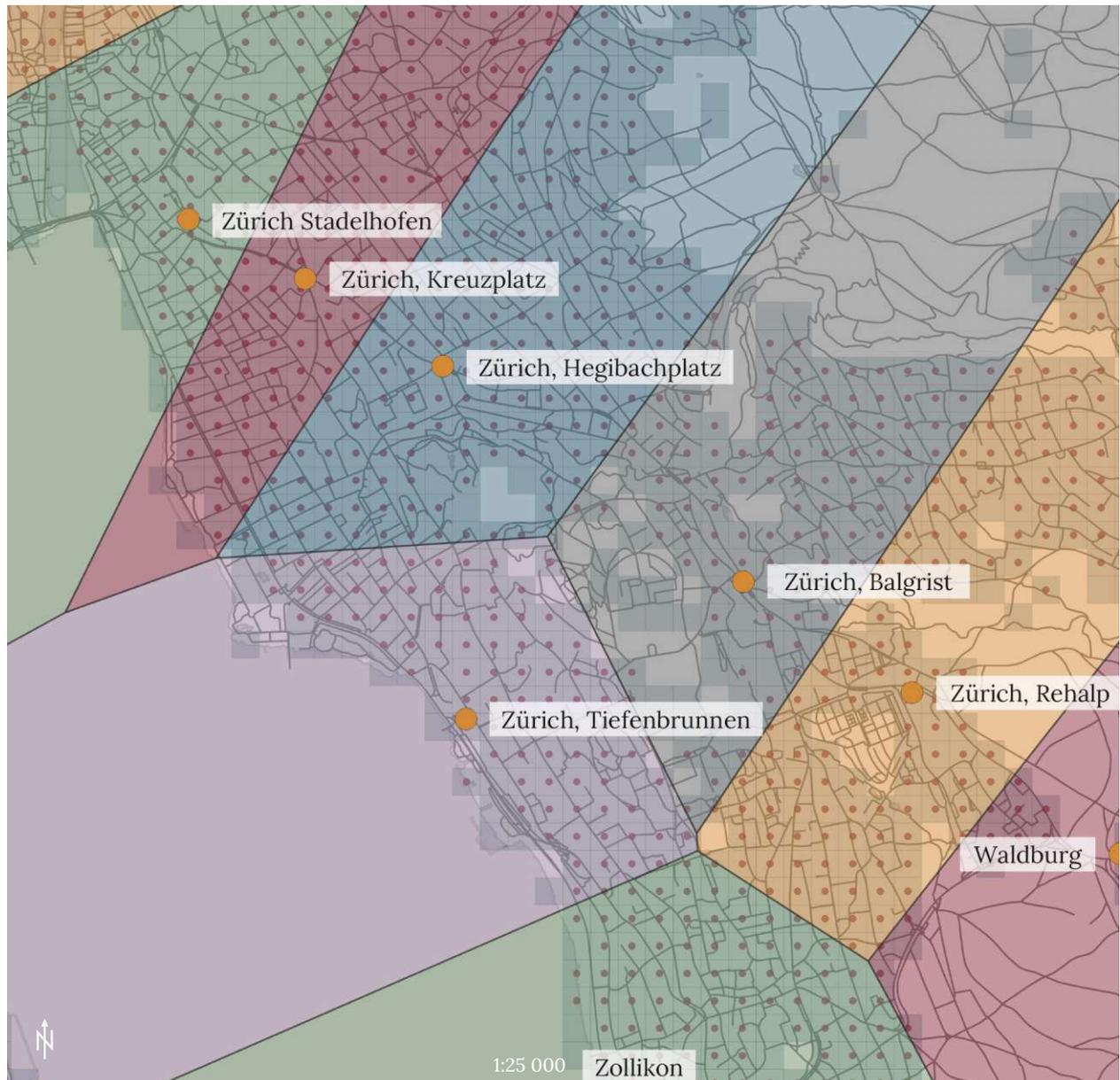


Entfernung zum jeweiligen Bahnhof der beiden aneinandergrenzenden Zellen gleich groß ist. Diese Grenzlinien definieren somit die maximale Ausdehnung des jeweiligen Einzugsgebietes eines Bahnhofs. Für die weitere Analyse dient das auf diese Weise ermittelte Einzugsgebiet des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen als Grundlage.

Einschränkend ist festzuhalten, dass die durchgeführte räumliche Analyse keine topografischen Gegebenheiten oder sonstigen Raumhindernisse berücksichtigt. Ermittelt werden die euklidischen Distanzen, also die

kürzeste Strecke entlang einer geraden Linie zwischen zwei Punkten (Luftlinienentfernung). Für eine weitergehende Analyse ist es empfehlenswert, die Voronoi-Polygone über eine Netzwerkanalyse zu bestimmen, da diese (je nach Komplexität) reale Gegebenheiten wie Straßenverläufe oder sonstige Raumhindernisse (Ampeln, Fußgänger\*innenüberwege und -unterführungen etc.) einbezieht und somit die tatsächlichen Gegebenheiten realistischer abbilden kann. Dies gilt insbesondere für das Planungsgebiet, das

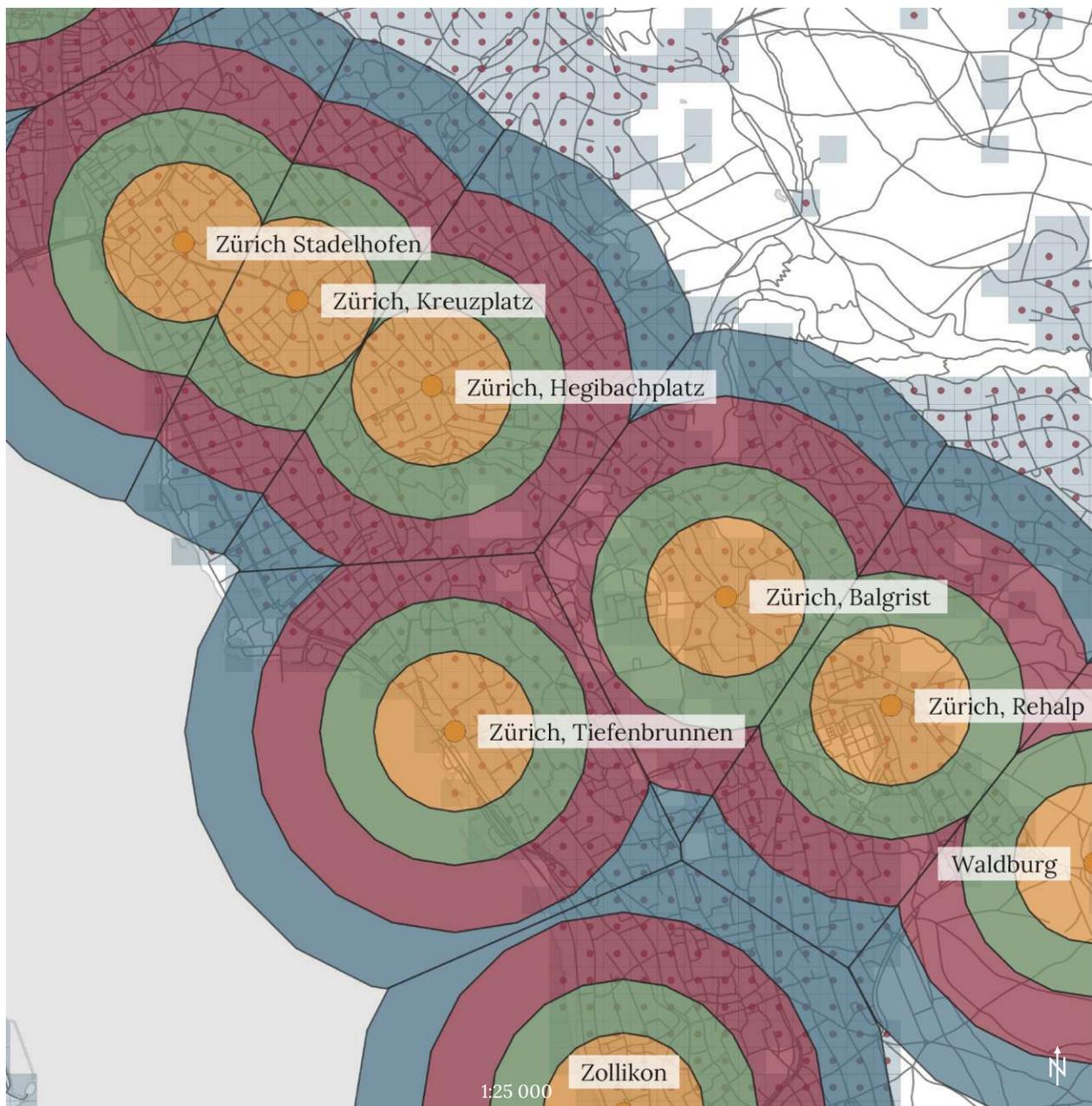
ABB. 10: VORONOI-DIAGRAMM (EIGENE DARSTELLUNG NACH KANTON ZÜRICH 2024).



durch eine deutlich ansteigende Topografie parallel zum Seeufer in Richtung Adlisberg sowie durch starke Raumbarrieren in Form der Bahnstrecke und der Bellerivestraße geprägt ist. Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass die Entfernung zur nächstgelegenen Station nicht zwangsläufig in der Reiserichtung liegt. In der Praxis zeigen Menschen gegebenenfalls eine geringere Bereitschaft, längere Strecken entgegen ihrer Reiserichtung zurückzulegen, selbst wenn

diese Entfernung kürzer ist. Stattdessen bevorzugen sie möglicherweise eine längere Strecke in der gewünschten Reiserichtung. Derlei subjektive Verhaltenstendenzen werden in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt (Ambrose et al. 2009, S. 266, Sun et al. 2014, S. 120). Eine präzisere Modellierung der Einzugsbereiche würde daher die Berücksichtigung von Faktoren wie der tatsächlichen Reiserichtung sowie der subjektiv empfundenen Reisezeit erfordern.

ABB. 11: DISTANZPUFFER NACH ÜBERLAGERUNG MIT VORONOI-DIAGRAMM (EIGENE DARSTELLUNG NACH KANTON ZÜRICH 2024).



Die Distanzpuffer, überschreiten die Konturen der Voronoi-Polygone. Um eine präzise räumliche Abgrenzung zu gewährleisten, wurden die Puffer entsprechend dieser Konturen zugeschnitten. Dies stellt sicher, dass die Puffer ausschließlich auf die Gebiete innerhalb der nächstgelegenen Einzugsbereiche der Bahnhöfe begrenzt sind und diese nicht überschreiten. Der Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen konnte dabei ermittelt werden, indem er jeweils durch die Einzugsbereiche der umliegenden Bahnhöfe begrenzt wird. Auf der Seeseite wird der Einzugsbereich durch den Zürichsee selbst begrenzt. In diesem Bereich wurde der Einzugsbereich nicht zugeschnitten, da sich im Gebiet des Zürichsees naturgemäß keine, für die Untersuchung, relevanten statistischen Daten vorfinden. Da die Mobilitätsdaten der Zürichsee-Schifffahrt im Gesamtkontext eine untergeordnete Rolle spielen, werden sie nicht berücksichtigt.

#### 4.3.3.3. ERSTELLUNG VON KORRIDOREN UND DISTANZSEKTOREN

Zur weiteren Differenzierung der Anzahl von Einwohner\*innen im Einzugsgebiet werden Korridore gebildet, die jeweils von einer automatisierten Shuttle-Linie bedient werden. Zur Vereinfachung werden die Korridore als radiale Anteile des Einzugsbereichs definiert. Bei der Festlegung der Einzugsbereiche wird berücksichtigt, dass kein Punkt im Einzugsgebiet mehr als 1000 m Entfernung zum Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen aufweist. Um ein attraktives Angebot im öffentlichen Verkehr zu gewährleisten, sollte die maximale Distanz, die ein Einwohner\*innen bis zu einer Shuttle-Station zurücklegt, deutlich unter dieser 1000-Meter-Marke liegen. Daher wird die maximal zurückzulegende Distanz auf ein Drittel dieser Strecke festgelegt. Dies entspricht einer maximalen Entfernung von 333 m zu einer Shuttle-Linie. Dieses Ziel wird annähernd

erreicht, wenn das kreisförmige Einzugsgebiet in zehn gleiche Teile unterteilt wird, indem der Vollwinkel von  $360^\circ$  durch zehn dividiert wird, sodass sich Kreissektoren mit jeweils einem Zentriwinkel von  $36^\circ$  ergeben. Innerhalb jedes dieser Kreissektoren wird nun eine Gerade vom Zentrum des Kreises zur äußeren Kreislinie gezogen, welche die theoretische Shuttle-Linie repräsentiert. Diese Gerade entspricht dem Radius des Kreises. Um die maximale Distanz eines Punktes innerhalb eines Kreissektors zur nächsten Shuttle-Linie zu bestimmen, wird die geometrische Beziehung innerhalb des Sektors herangezogen. Die maximale Entfernung tritt am äußeren Rand des Kreissektors auf, also am Kreisbogen dem Radius von  $r = 1000$  m und bei einem Peripheriewinkel des Sektors von  $\theta = \pm 18^\circ$ . Die senkrechte Entfernung  $D$  eines Punktes auf dem Kreisbogen zur Mittellinie des Sektors kann mittels der Sinusfunktion berechnet werden:

$$D = r \cdot \sin(\theta)$$

Wird  $\theta = \pm 18^\circ$  eingesetzt, so ergibt sich

$$1000\text{m} \cdot \sin(18^\circ) \approx 1000\text{m} \cdot 0,3090 = 309\text{m}$$

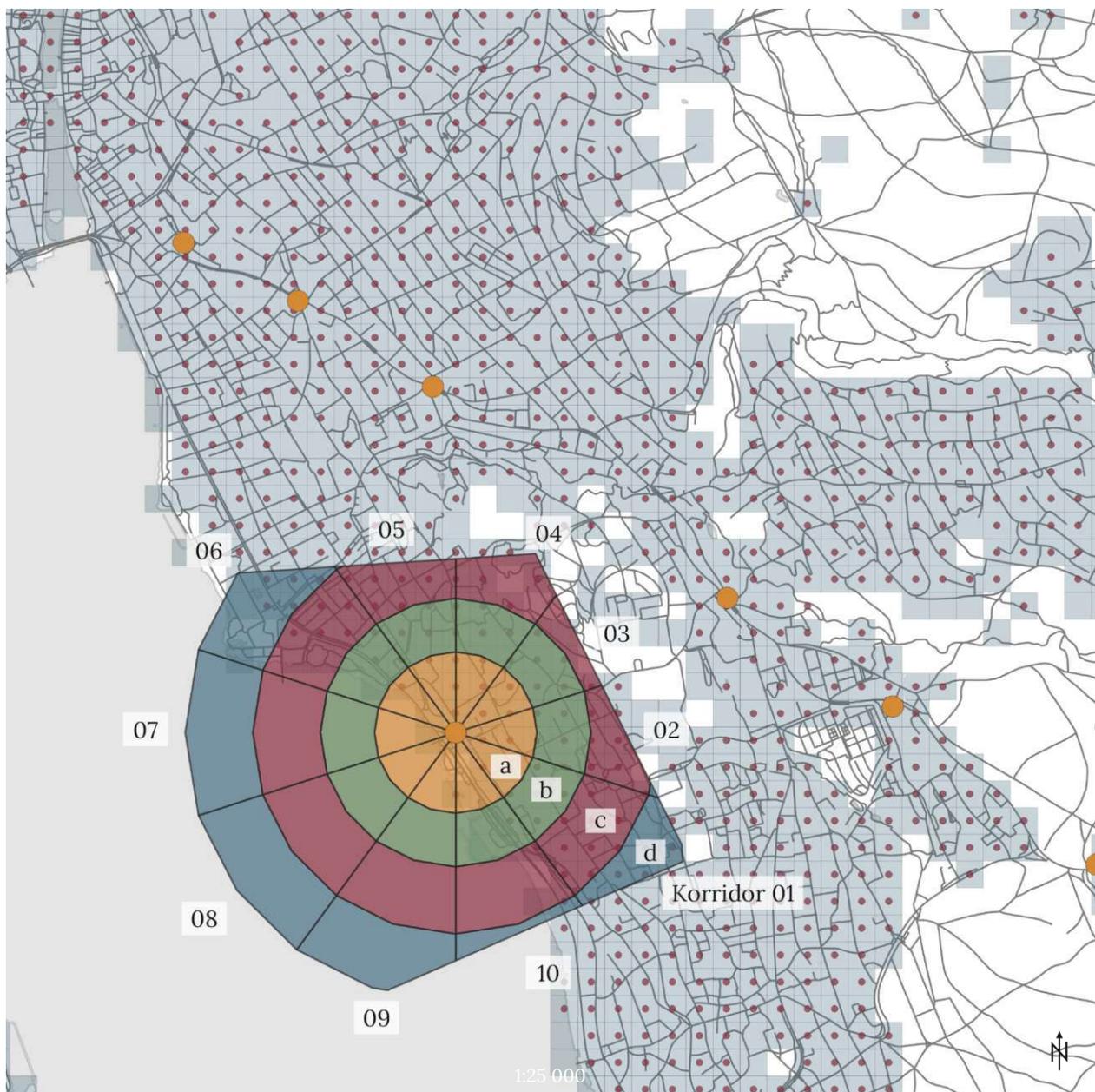
Damit beträgt die maximale Entfernung eines Punktes innerhalb eines Kreissektors zur nächsten Shuttle-Linie 309 m, was nahezu der festgelegten maximalen Entfernung von 333 m entspricht. Da die Shuttle-Linie für Einwohner\*innen von beiden Seiten entlang der Linie zugänglich ist, deckt sie eine maximale Breite von insgesamt  $2 \cdot 309 \text{ m} = 618 \text{ m}$  ab. Dies bedeutet, dass die Shuttle-Linien jeweils eine maximale Quer-Ausdehnung von 618 m abdecken.

Im QGIS wird die hergeleitete Unterteilung des Einzugsgebietes in zehn gleich große Kreissektoren umgesetzt. Ausgangspunkt sind die Ringpuffer um den Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen in den Abständen 0–300 m, 300–500 m, 500–750 m und 750–1000 m. Um die Korridore für die automatisierten Shuttle-Linien

zu definieren, werden diese Ringpuffer nun mit den Kreissektoren überlagert. Dazu werden vom Mittelpunkt des Bahnhofs aus Linien in festen Winkeln gezeichnet, um den Kreis in zehn gleich große Sektoren mit jeweils einem Zentriwinkel von  $36^\circ$  zu unterteilen. Dabei wird berücksichtigt, dass  $162^\circ$  als zwingender Startwinkel festgelegt ist, um die spezifischen topografischen Gegebenheiten zu berücksichtigen. Die Überlagerung der Kreissektoren mit den bereits erstellten Ringpuffern führt zu Flächeneinheiten,

die sowohl durch ihren Sektor (Korridor) als auch durch ihren Abstand zum Bahnhof (Distanzklasse) definiert sind. Dadurch entstehen insgesamt 30 Einheiten. Diese Anzahl ergibt sich, weil die äußeren Ringpuffer von 500-1000 m teilweise durch die Einzugsbereiche anderer Bahnhöfe beschnitten werden. In den äußeren Bereichen sind daher nicht alle Sektoren vollständig vorhanden, was zu einer Reduzierung der Anzahl der Einheiten in diesen Bereichen führt.

ABB. 12: DISTANZSEKTOREN (EIGENE DARSTELLUNG NACH KANTON ZÜRICH 2024).



#### 4.4. BERECHNUNG DES NACHFRAGEPOTENZIALS IM EINZUGSBEREICH

Die Nachfragequantifizierung basiert auf den in Kapitel 4.3.3.3 definierten Korridoren und Distanzsektoren sowie der im GIS-Modell integrierten Datenbasis zu Anzahl und Altersverteilung der Einwohner\*innen (Kapitel 4.4.2). Neben diesen demografischen Daten fließen die Anzahl der Binnenpendler\*innen, der Mobilitätsgrad zwischen 7:00 und 8:00 Uhr und die Verkehrsmittelwahl nach Distanz in die Berechnung ein. Für diese mobile Bevölkerungsgruppe werden zudem Substitutionswahrscheinlichkeiten angenommen, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass bisherige Verkehrsmittel durch kaF ersetzt werden.

Wichtige Einflussfaktoren, die in dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt wurden, sind die Topografie des Einzugsgebiets, die Preisgestaltung von kaF, sozioökonomische Faktoren, die soziale Akzeptanz der Technologie sowie die zukünftige Verfügbarkeit weiterer Alternativen. Die schrittweise Berechnung gewährleistet eine transparente und nachvollziehbare Darstellung des Berechnungsvorgangs.

##### 4.4.1. ERLÄUTERUNG DER DATENGRUNDLAGE

Um die notwendigen statistischen Grundlagen für die Analyse der potenziellen Nachfrage nach kaF im Einzugsgebiet des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen zu ermitteln, wurde eine systematische Erhebung relevanter Datenquellen durchgeführt. Bei der Auswahl der Daten wurde sich am Modell „Zur Abschätzung

TAB. 12: BESCHREIBUNG UND ZWECK DER DATENGRUNDLAGE (EIGENE DARSTELLUNG).

Kapitel der Verwendung	Art der Daten	Beschreibung	Zweck	Quelle
4.4.2	Hektarraster	Unterteilung der Schweiz in Hektare, denen Daten räumlich zugeordnet werden können	Grundlage für die Verortung der Anzahl der Einwohner*innen im Einzugsbereich und je Distanzsektor	BFS 2022
	Anzahl Einwohner*innen	Anzahl der Einwohner*innen in der Schweiz, unterteilt entsprechend des Hektarrasters	Anzahl der Einwohner*innen im Planungsbereich als Grundlage zur Ermittlung des Quellverkehrs zur Spitzenstunde	BFS 2019
4.4.3	Demografie	Demografische Verteilung der Einwohner*innen des Zürcher Kreises 8 (Riesbach)	Ermittlung des Anteils Einwohner*innen je Altersgruppe; Grundlage zur Berechnung des Mobilitätsgrades	BFS 2019
4.4.4	Mobilitätsgrad	Anzahl mobiler Personen je Werktag und Altersgruppe	Potenzielle Nutzer*innen sind zur MSP nur solche, die auch zur MSP mobil sind	ARE 2015, S. 18
4.4.5	Anteil Binnenpendler*innen	Anteil der Personen, die im selben Kreis wohnen und arbeiten	Die Nutzung eines (automatisierten) Zubringers ist für diese Personengruppe nicht relevant,	Stadt Zürich 2022.
4.4.6	Verkehrsmittelwahl nach Distanz	Je nach Entfernung zum Bahnhof unterscheidet sich der Anteil genutzter Verkehrsmittel;	Dient als Berechnungsbasis für Substitutionswahrscheinlichkeiten, welche zum Teil abhängig vom Ausgangsverkehrsmittel sind	Heller 2021, S. 25
4.4.7	Substitutionswahrscheinlichkeiten	Je nach Entfernung und Ausgangsverkehrsmittel unterscheidet sich die Wahrscheinlichkeit, auf kaF umzusteigen	Bestimmung des Anteils der Personen, die ihr bisher genutztes Verkehrsmittel durch die Nutzung eines automatisierten Shuttle-Systems ersetzen würden	Eigene Annahme

von Nachfragepotenzialen an Zugangsstellen einer regionalen SPNV-Strecke“ von (Kleine 2002) orientiert und dieses entsprechend den spezifischen Anforderungen dieser Arbeit angepasst.

Die anfängliche Recherche konzentrierte sich auf die Identifizierung von Datensätzen zu den Faktoren, welche die potenzielle Nachfrage nach kaF beeinflussen. Hierbei wurden relevante Quellen wie die statistischen Ämter der Stadt und des Kantons Zürich sowie Studien und Berichte von schweizerischen Behörden (z.B. Amt für Raumentwicklung und Amt für Statistik) herangezogen. Die Suche nach geeigneten Datensätzen erfolgte über die Online-Portale der jeweiligen Institutionen sowie durch gezielte Anfragen an die zuständigen Fachstellen.

Die identifizierten Datensätze wurden hinsichtlich ihrer Relevanz für das Forschungsthema bewertet. Ausschlaggebend waren dabei die räumliche und zeitliche Gültigkeit der Daten, die Detailliertheit der Informationen sowie die methodische Qualität der Erhebung. Nur Datensätze, welche diese Kriterien erfüllten, wurden in die weitere Analyse einbezogen. Beispielsweise wurden Datensätze aus der Zeit der Covid-19-Pandemie, soweit möglich, nicht berücksichtigt, da insbesondere im Verkehrsbereich ein erhebliches Risiko verzerrter Daten besteht.

Die relevanten Datensätze wurden anschließend dokumentiert und in einer Datenbank organisiert, um eine systematische Nachverfolgung und Auswertung zu ermöglichen. Die Erhebung der statistischen Grundlagen umfasste sowohl Primärdaten, wie etwa die Bevölkerungsstatistik der Stadt Zürich, als auch Sekundärdaten, wie Studien zum Mobilitätsverhalten. Die Kombination verschiedener Datenquellen ermöglichte eine umfassende Analyse der Einflussfaktoren auf die potenzielle Nachfrage nach kaF.

Die begrenzte Datenverfügbarkeit, insbesondere in Bezug auf das nähräumliche Mobilitätsverhalten, macht es notwendig, teilweise Daten aus vergleichbaren Gebieten heranzuziehen. Um diesen Mangel auszugleichen, wird durch die gezielte Auswahl und Erläuterung der wesentlichen Faktoren eine umfassende und transparente Basis geschaffen, um die Potenzialanalyse methodisch fundiert und nachvollziehbar durchzuführen und sicherzustellen, dass alle relevanten Aspekte berücksichtigt werden. Neben dem Einzugsbereich bildet die Nachfrage die Grundlage für die anschließenden Berechnungen und Bewertungen.

#### 4.4.2. EINWOHNER\*INNEN JE DISTANZSEKTOR

In diesem Schritt werden die Daten zur Bevölkerung in das Geoinformationssystem QGIS integriert. Zunächst erfolgt eine detaillierte Analyse der Daten um sicherzustellen, dass sie den inhaltlichen, räumlichen und zeitlichen Anforderungen entsprechen. Dabei zeigt sich, dass einige der Datensätze in ihrer ursprünglichen Form nicht direkt von QGIS gelesen werden können. Um eine reibungslose Integration zu gewährleisten, müssen diese Daten zunächst in ein kompatibles Format umgewandelt oder korrigiert werden. Daten, die in nicht lesbaren Formaten vorliegen, werden entsprechend in gängige GIS-Formate wie CSV, Shapefiles oder GeoPackages konvertiert. Dabei wird sichergestellt, dass sowohl die Struktur der Daten als auch die räumliche Referenzierung erhalten bleiben oder, wenn nötig, korrigiert werden. Dieser Schritt ist notwendig, um die Nutzbarkeit der Daten im GIS zu gewährleisten und eine fehlerfreie Analyse zu ermöglichen.

Grundlage der Daten ist das Hektarraster des Kompetenzzentrums für Geoinformation und digitale Bildverarbeitung des Schweizer Bundesamtes für Statistik, mit dem das Land

in jeweils ein Hektar (100 m × 100 m) große Quadrate bzw. Rastereinheiten unterteilt wird (BFS 2022). Statistische Daten mit räumlicher Verortung werden aggregiert für jede dieser Rastereinheiten bereitgestellt. Die Daten sind somit nicht punktgenau verfügbar, sondern geben jeweils die Anzahl der Arbeitsplätze, Einwohner\*innen etc. pro Hektar an. Für die Ermittlung der potenziellen Fahrten durch die Implementierung des kaF ist diese Aufteilung in Hektar jedoch ausreichend detailliert.

In nächsten Schritt werden die zuvor integrierten und aufbereiteten Datensätze mit den geografischen Objekten im GIS verknüpft, um eine detaillierte räumliche Analyse zu ermöglichen. Dabei werden geolokalisierte, statistische Daten der Einwohner\*innenzahl pro Hektar, den entsprechenden geografischen Flächen zugeordnet. Herangezogen wird die Statistik zur (ständigen) Wohnbevölkerung (STATPOP) (BFS 2019). Die Daten wurden auf die Anzahl der ständigen Wohnbevölkerung pro Rastereinheit (B19TOT) reduziert (Abb. 13).

Der Prozess der Verknüpfung erfolgt mittels einer räumlichen Zuordnung (Spatial Join), bei der jeder geografischen Einheit die passenden statistischen Informationen zugewiesen werden. Durch diese räumliche Verknüpfung wird sichergestellt, dass die für die Untersuchung relevanten Daten (z. B. Anzahl der Einwohner\*innen) in den spezifischen Einzugsgebieten der Bahnhöfe sichtbar und analysierbar sind. Die räumlichen Verknüpfungen ermöglichen zu kalkulieren, wie viele Einwohner\*innen sich in den einzelnen Flächeneinheiten, welche sich aus Entfernungsklasse und Korridor innerhalb des Einzugsbereiches des Bahnhofes Zürich Tiefenbrunnen, befinden.

Es ist anzumerken, dass die Verteilung der Daten zu den Einwohner\*innen im Grenzbereich der Polygone jeweils dem Polygon zugeordnet wird, das die größte Überschneidung mit dem entsprechenden Hektar des Hektarrasters aufweist. Diese Problematik tritt jedoch nur in Grenzbereichen auf und betrifft somit nur

Tab. 13: EINWOHNER\*INNEN IM EINZUGSGEBIET NACH DISTANZSEKTOR (EIGENE BERECHNUNG NACH BFS 2019).

Kreis- sektor	< 300 m		300 m - 500 m		500 m - 750 m		750 m - 1000 m	
	ID Einheit	Einwohner *innen	ID Einheit	Einwohner *innen	ID Einheit	Einwohner *innen	ID Einheit	Einwohner *innen
01	01a	102	01b	281	01c	320	01d	215
02	02a	229	02b	313	02c	146	02d	0
03	03a	150	03b	125	03c	34	03d	0
04	04a	179	04b	131	04c	191	04d	0
05	05a	89	05b	401	05c	1173	05d	0
06	06a	87	06b	448	06c	689	06d	422
07	07a	0	07b	0	07c	0	07d	0
08	08a	0	08b	0	08c	0	08d	0
09	09a	0	09b	0	09c	0	09d	0
10	10a	6	10b	3	10c	3	10d	10

einen geringen Teil der Daten. Darüber hinaus werden durch den unregelmäßigen Schnitt entlang des Hektarrasters die Rastereinheiten regelmäßig entweder dem einen oder dem anderen angrenzenden Einzugsbereich zugeordnet, sodass insgesamt ein überwiegend ausgleichender Effekt entsteht. Dieser Umstand kann daher insgesamt als vernachlässigbar angesehen werden.

#### 4.4.3. DEMOGRAFISCHE VERTEILUNG DER EINWOHNER\*INNEN JE DISTANZSEKTOR

Als Ausgangsdaten werden zunächst die Einwohner\*innen je Distanzsektor herangezogen. Diese ergeben sich aus der mit QGIS erstellten Kombination von Kreissektoren, welche den Korridoren entsprechen (basierend auf der Einteilung des Einzugsgebiets in Zentiwinkel) und den Distanzklassen (0-300 m, 300-500 m, 500-750 m, 750-1000 m um die Station Zürich Tiefenbrunnen).

Bei der Betrachtung der Verteilung der Einwohner\*innen auf die Distanzsektoren fällt zunächst auf, dass die Einwohner\*innenzahl je Distanzsektor stark variiert. Besonders im mittleren Entfernungsbereich ist eine hohe Einwohner\*innendichte festzustellen. Im Gegensatz dazu weisen einige Distanzsektoren keine oder fast kein Einwohner\*innen auf. Dies liegt darin begründet, dass diese überwiegend oder gänzlich im Bereich des Zürichsees verortet sind.

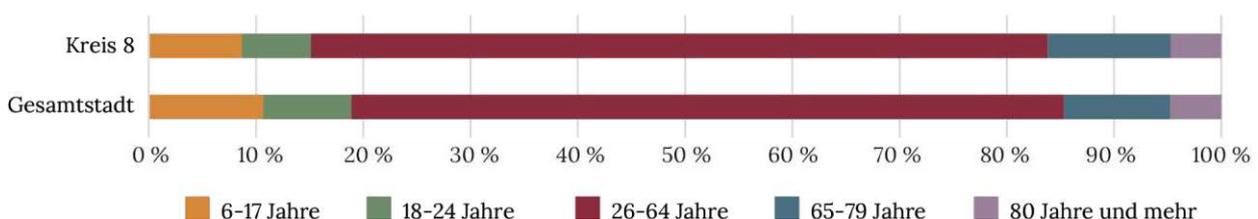
Die Berücksichtigung der Altersverteilung der Bevölkerung im Planungsgebiet ist relevant,

da in Verbindung mit dem Mobilitätsgrad so auf die tatsächlich absolvierten Wege zur relevanten Spitzenstunde geschlossen werden kann. Die Altersstruktur der Einwohner\*innen im Einzugsbereich bzw. in den einzelnen Distanzsektoren entspricht aller Wahrscheinlichkeit nach nicht der der Gesamtbevölkerung. Aus diesem Grund wurde die Bevölkerungsstatistik der Stadt Zürich sowie des Kreises 8, in dem das Planungsgebiet liegt, ausgewertet. Es zeigen sich leichte Abweichungen zur Gesamtstadt.

Bei der Betrachtung der Bevölkerungsverteilung nach Altersgruppen für die Gesamtstadt Zürich und den Kreis 8 (Riesbach) zeigt sich eine Überrepräsentation der mittleren Altersgruppen und älterer Menschen: Die Altersgruppen der 25- bis 64-Jährigen sowie der über 80-Jährigen sind im Kreis 8 stärker vertreten als in der Gesamtstadt. Im Gegensatz dazu besteht eine Unterrepräsentation von Kindern, Jugendlichen und jungen Erwachsenen: Die Altersgruppen der 6- bis 17-Jährigen sowie der 18- bis 24-Jährigen sind im Kreis 8 weniger stark vertreten.

Zur möglichst genauen Abbildung der lokalen Wohnbevölkerung wurden die Anteile dieser Altersgruppen spezifisch für den Kreis 8 (Riesbach) ausgewertet. Diese Einteilung dient dazu, demografische Unterschiede in den Distanzsektoren zu berücksichtigen und eine realistische Basis für die spätere Berechnung der Shuttle-Nutzung zu schaffen. Basierend auf den ausgewerteten Daten werden die Einwohner\*innen nach Altersgruppen für jeden Distanzsektor aufgeschlüsselt.

ABB. 13: DEMOGRAFIE KREIS 8 UND GESAMTSTADT ZÜRICH (EIGENE DARSTELLUNG NACH STADT ZÜRICH 2023).

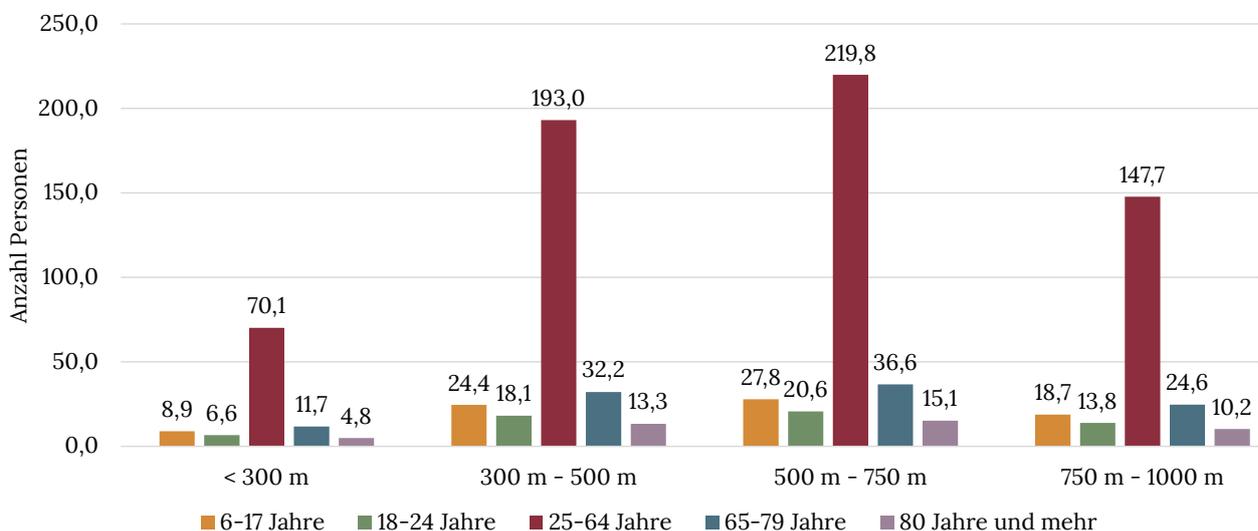


In Bezug auf die Altersverteilung ist zu erkennen, dass die Altersgruppe der 25–64-Jährigen in vielen Distanzsektoren dominiert. In Sektoren wie 01c und 05c ist diese Altersgruppe besonders stark vertreten, was auf einen bedeutenden Anteil potenzieller Shuttle-Nutzer\*innen zur Nutzung für Arbeitswege hindeutet. Die jüngeren Altersgruppen, insbesondere die 6–17-Jährigen und die 18–24-Jährigen, machen hingegen in den meisten Sektoren einen kleineren Teil der Bevölkerung aus. Dies liegt darin begründet, dass die Bevölkerung im Quartier im Durchschnitt älter ist als die Gesamtbevölkerung der Stadt Zürich. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verteilung älterer Menschen. In bestimmten Sektoren, wie 02c und 06d, gibt es eine signifikante Anzahl an Personen im Alter von 65–79 Jahren und 80 Jahren und älter. Insbesondere im Sektor 06c. Diese Bevölkerungsgruppe könnte besonders von einem Shuttle-System profitieren, welches eine dichtere Abdeckung als ein konventionelles Omnibussystem aufweist. Besonders ist die starke Besiedlung im mittleren Entfernungsbereich von 500 bis 750 m. Hier finden sich die höchsten Einwohner\*innenzahlen, was teilweise auf den radialen Zuschnitt der Sektoren und

hauptsächlich auf die zunehmend aufgelockerte Bebauung im weiteren Entfernungsbereich zurückzuführen ist.

In Bezug auf die Altersverteilung ist zu erkennen, dass die Altersgruppe der 25–64-Jährigen in vielen Distanzsektoren dominiert. In Sektoren wie 01c und 05c ist diese Altersgruppe besonders stark vertreten, was auf einen bedeutenden Anteil potenzieller Shuttle-Nutzer\*innen zur Nutzung für Arbeitswege hindeutet. Die jüngeren Altersgruppen, insbesondere die 6–17-Jährigen und die 18–24-Jährigen, machen hingegen in den meisten Sektoren einen kleineren Teil der Bevölkerung aus. Dies liegt darin begründet, dass die Bevölkerung im Quartier im Durchschnitt älter ist als die Gesamtbevölkerung der Stadt Zürich. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verteilung älterer Menschen. In bestimmten Sektoren, wie 02c und 06d, gibt es eine signifikante Anzahl an Personen im Alter von 65–79 Jahren und 80 Jahren und älter. Insbesondere im Sektor 06c. Diese Bevölkerungsgruppe könnte besonders von einem Shuttle-System profitieren, welches eine dichtere Abdeckung als ein konventionelles Omnibussystem aufweist. Besonders ist die starke Besiedlung im mittleren Entfernungsbereich von 500

ABB. 14: ALTERSGRUPPEN JE DISTANZSEKTOR IM KORRIDOR 1 (EIGENE DARSTELLUNG NACH STADT ZÜRICH 2023).



bis 750 m. Hier finden sich die höchsten Einwohner\*innenzahlen, was teilweise auf den radialen Zuschnitt der Sektoren und hauptsächlich auf die zunehmend aufgelockerte Bebauung im weiteren Entfernungsbereich zurückzuführen ist.

#### 4.4.4. MOBILITÄTSGRAD

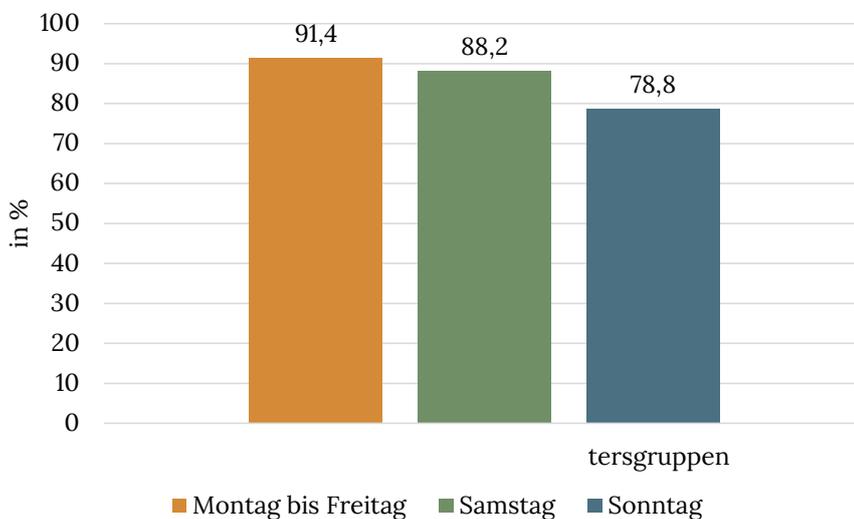
Der Mobilitätsgrad beschreibt den Anteil der Personen ab sechs Jahren, die an einem durchschnittlichen Tag mindestens einmal außer Haus sind und gibt somit Aufschluss darüber, wie viele Menschen täglich am Verkehr teilnehmen. Da das Verkehrsaufkommen im Tagesverlauf stark variiert, ist die Analyse des Verkehrsaufkommens zu Spitzenstunden bei der Dimensionierung der Anzahl an Haltepositionen maßgeblich, um spätere Überlastungen zu vermeiden (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2003, S. 78).

Um ein umfassendes Bild der Mobilität zu zeichnen, ist eine differenzierte Betrachtungsweise notwendig, die sowohl den Wochentag und die Uhrzeit als auch die Altersgruppe berücksichtigt. Eine solche Analyse ermöglicht es, die individuellen Mobilitätsmuster

der verschiedenen Bevölkerungsgruppen zu erfassen. So kann die Spitzenstunde präzise identifiziert und der Anteil der mobilen Bevölkerung zu dieser Zeit bestimmt werden. Diese Informationen sind essentiell, um das Verkehrsaufkommen realistisch zu ermitteln und die Verteilung des Mobilitätsgrades nach Altersklassen zu berücksichtigen.

Für Werktage zeigt sich, dass an einem durchschnittlichen Werktag etwa 91,4 % der Bevölkerung ab sechs Jahren im Verkehr unterwegs sind. Diese hohe Mobilitätsrate resultiert vor allem aus dem Anteil der sechs- bis 64-Jährigen, der einen Großteil der Bevölkerung ausmacht und regelmäßig Ausbildungs- oder Arbeitswege zurücklegt. Am Samstag sinkt dieser Wert leicht auf 88,2 %, was darauf hindeutet, dass an Wochenenden statt Ausbildungs- und Arbeitswegen vermehrt Einkaufs- und Freizeitverkehr dominiert. Am Sonntag fällt der Mobilitätsgrad noch stärker ab: An diesem Tag sind nur noch 78,8 % der Bevölkerung unterwegs, was möglicherweise auf eingeschränkte Einkaufsmöglichkeiten und damit verbundene reduzierte Wege zurückzuführen ist (ARE 2015, S. 18).

ABB. 15: ANTEIL DER BEVÖLKERUNG AB 6 JAHREN, DER PRO TAG IM VERKEHR UNTERWEGS IST UNTERTEILT NACH WERKTAGEN, SAMSTAG UND SONNTAG (EIGENE DARSTELLUNG NACH ARE 2015, S. 18).



Neben der Verteilung nach Wochentagen ist die Mobilität nach Altersklassen relevant. Die Angaben zum Mobilitätsgrad nach Altersgruppen sind jedoch nicht nach Werktagen und Wochenenden differenziert, sodass die Daten einen Wochendurchschnitt darstellen. Bei der Betrachtung des durchschnittlichen Mobilitätsgrades von Montag bis Sonntag, zeigt sich, dass jüngere Menschen tendenziell mobiler sind als ältere. In der Altersgruppe der 6- bis 17-Jährigen sind beispielsweise 90,8 % der Menschen an einem durchschnittlichen Tag im Verkehr unterwegs. In der Altersgruppe der 18- bis 24-Jährigen liegt der Anteil mit 92,3 % sogar noch etwas höher. Mit zunehmendem Alter nimmt der Mobilitätsgrad jedoch deutlich ab. Besonders in den Altersgruppen über 65 Jahren sinkt die Mobilität, was nachvollziehbar ist, da regelmäßige Wege zu Ausbildung oder Arbeit meist entfallen. Insbesondere in der Gruppe der über 80-Jährigen fällt der Anteil der täglich mobilisierten Personen stark ab (ARE 2015, S. 18).

Obwohl keine detaillierten Daten zur Mobilität nach Altersklassen an Werktagen vorliegen, lässt sich feststellen, dass die Mobilität an Werktagen im Durchschnitt der Mobilität der Bevölkerung entspricht, die sich größtenteils in Ausbildung oder Arbeit befindet – also der Altersgruppe von sechs bis 64 Jahren. Für diese

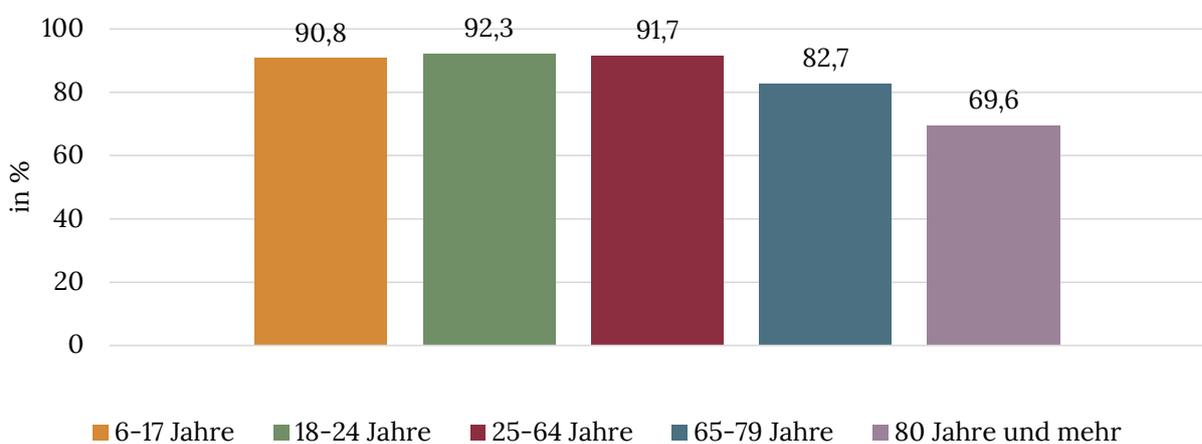
Gruppe kann daher angenommen werden, dass der Mobilitätsgrad während der Arbeitswoche konstant hoch ist. Für die älteren Altersgruppen ab 65 Jahren und insbesondere ab 80 Jahren, ist hingegen davon auszugehen, dass ihre Mobilitätsrate auch an Werktagen niedriger bleibt, was in der weiteren Modellierung der Mobilitätsraten nach Altersgruppen berücksichtigt wird.

Es ist zu beachten, dass die in dieser Analyse verwendeten Mobilitätsdaten nur Personen ab einem Alter von 6 Jahren berücksichtigen. Daher werden die Wege von Kindern unter 6 Jahren nicht in die Berechnung der Nutzer\*innenzahlen einbezogen. Dies führt zu einer leichten Unterschätzung der tatsächlichen Anzahl an Nutzenden.

Weiteren Aufschluss über den Mobilitätsgrad ergibt dessen Differenzierung im Tagesverlauf (Abb. 17) bei dessen Betrachtung zunächst deutlich wird, dass die Mobilität der Bevölkerung deutliche Schwankungen im Tagesverlauf aufweist und diese Mobilitätsverteilung eine starke Variabilität zwischen den Altersklassen aufweist. Deutlich hervor treten Spitzenzeiten am Morgen, Mittag und Nachmittag.

So sind im Zeitraum von 07:00 bis 08:00 Uhr sind durchschnittlich 29,4 % der

Abb. 16: ANTEIL DER BEVÖLKERUNG AB 6 JAHREN, DER PRO TAG (MONTAG BIS SONNTAG) IM VERKEHR UNTERWEGS IST UNTERTEILT NACH ALTER (EIGENE DARSTELLUNG NACH ARE 2015, S. 18).



Bevölkerung mobil. In der Altersklasse der 6- bis 17-Jährigen liegt dieser Anteil bei 48,7 %. In den Altersgruppen der 18- bis 24-Jährigen und der 25- bis 64-Jährigen sind in dieser Stunde jeweils 33,6 % bzw. 30,8 % unterwegs, was auf den Beginn des Arbeitstages und die Schulwege zurückgeführt werden kann. In der Altersgruppe der 65- bis 79-Jährigen nimmt der Anteil stark ab und liegt bei 13,1 %, während er bei den über 80-Jährigen bei 7,4 % liegt (ARE 2015, S. 18).

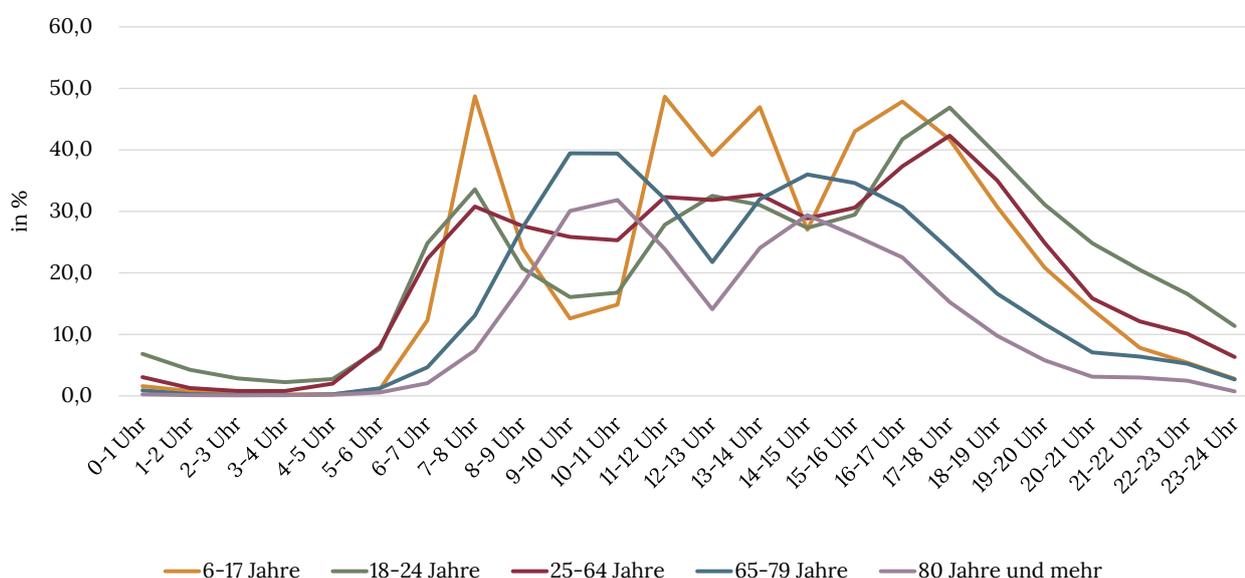
In der Mittagszeit von 13 bis 14 Uhr liegt die Mobilität ebenfalls hohem Niveau, wobei insgesamt 33,7 % der Bevölkerung unterwegs sind. Auffällig ist, dass der Anteil der 6- bis 17-Jährigen mit 46,9 % zu dieser Zeit am höchsten ist, was wahrscheinlich auf Bewegungen aufgrund des Schulschlusses zurückzuführen ist. In den sonstigen Altersgruppen schwankt der Mobilitätsgrad zwischen 31,0 % und 32,7 %. Es fällt zudem auf, dass der Anstieg bzw. Abfall der Mobilitätsrate nicht synchronisiert über die Altersklassen ausfällt (ARE 2015, S. 18).

Am späten Nachmittag, zwischen 17 und 18 Uhr, erreicht die Mobilität mit 38,5 % erneut einen Spitzenwert, was in allen Altersgruppen sichtbar ist. Der Anteil der mobilen Personen bleibt

bei den 6- bis 17-Jährigen mit 41,7 % weiterhin hoch, liegt jedoch in der Altersgruppe der 25- bis 64-Jährigen mit 42,3 % noch darüber. Auch bei den älteren Bevölkerungsgruppen bleibt die Mobilität auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Auffällig ist jedoch, dass die Mobilität in den Altersklassen unter 64 Jahren hier ansteigt, während der Mobilitätsgrad in der Altersklasse ab 65 Jahren bereits sinkt (ARE 2015, S. 18).

Es ist festzustellen, dass der Zeitraum von 07:00 bis 08:00 Uhr als auch die Mittagszeit und der frühe Abend einen ähnlich hohen Mobilitätsgrad aufweisen. Zu Mittag und am Abend sind die Bewegungen allerdings deutlich diffuser. Entscheidender Unterschied ist, dass der Zeitraum von 07:00 bis 08:00 Uhr einen ausschließlich und konzentriert steigenden Mobilitätsgrad aufweist, während zum Mittag und frühen Abend der Mobilitätsgrad je nach Altersgruppe ansteigend oder abfallend ist. Aufgrund dessen wird im Weiteren der Zeitraum von 07:00 bis 08:00 Uhr betrachtet. Die Erkenntnis, dass gerade zur Morgenspitzenstunde der Mobilitätsgrad besonders hoch und auf einen kurzen Zeitraum konzentriert ist, deckt sich mit Ergebnissen

ABB. 17: MOBILITÄTSGRAD IM TAGESVERLAUF NACH ALTERSKLASSE (EIGENE DARSTELLUNG NACH ARE 2015, S. 18).



anderer Studien (Gerike et al. 2020b, S. 38, Park et al. 2003, Sarkar et al. 2017).

Die soeben ermittelten Anteile der mobilen Personen je Altersgruppe und Distanzsektor werden weiter nach ihrem Mobilitätsgrad im Zeitraum von 07:00 bis 08:00 Uhr unterteilt (Abb. 18). Daraus ergeben sich spezifische Mobilitätsprofile je Distanzsektor und Altersgruppe, die Rückschlüsse auf die potenzielle Nutzung des Shuttle-Systems in der Morgenspitzenstunde zulassen.

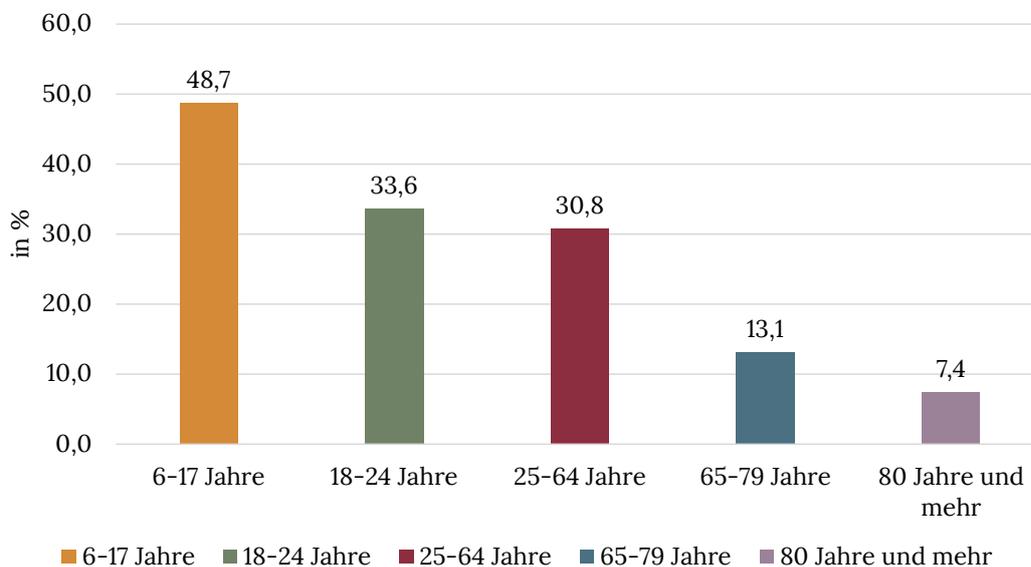
Die Überlagerung zeigt, dass die Altersgruppe der 25–64-Jährigen in nahezu allen bewohnten Distanzsektoren die meisten mobilen Personen darstellt. Dies liegt vor allem daran, dass diese Gruppe zahlenmäßig die größte Bevölkerungsgruppe ist. Obwohl die Altersgruppe der 6–17-Jährigen einen deutlich höheren Mobilitätsgrad aufweist, bleibt sie aufgrund der insgesamt geringeren Anzahl an Einwohner\*innen in dieser Altersgruppe dennoch weniger bedeutend. Die Mobilität älterer Menschen (65–79 Jahre und 80 Jahre und mehr) ist in allen Sektoren deutlich geringer im Vergleich zu den jüngeren Altersgruppen.

#### 4.4.5. ANTEIL BINNENPENDLER\*INNEN

Im Zürcher Kreis 8, der eine Wohnbevölkerung von 17.860 Personen zählt, haben 1.890 Menschen ihren Arbeitsplatz ebenfalls innerhalb des Kreises (Stadt Zürich 2022). Dies entspricht einem Anteil von 10,58 %. Aufgrund der kurzen Distanzen, die innerhalb des Kreises zurückgelegt werden müssen, ist es unwahrscheinlich, dass Pendler\*innen für ihren Arbeitsweg multimodale Optionen, insbesondere automatisierte Shuttles in Kombination mit S-Bahnen wählen. Es wird stattdessen davon ausgegangen, dass sie ihren Arbeitsplatz direkt entweder mit einem automatisierten Shuttle, zu Fuß, mit dem Velo oder der Tram erreichen. Geschätzt wird, dass 90 % der Pendler\*innen innerhalb des Kreises ihren Arbeitsweg ohne Umstieg auf eine S-Bahn bewältigen. Für eine präzisere Modellierung dieser Annahme wäre jedoch eine detaillierte Mobilitätserhebung notwendig.

In diesem Schritt werden die mobilen Personen (07:00 bis 08:00 Uhr) um diejenigen reduziert, die sowohl ihren Wohnsitz als auch ihren Ausbildungs- oder Arbeitsplatz im Kreis 8

ABB. 18: ANTEIL MOBILER PERSONEN NACH ALTERSGRUPPE ZWISCHEN 07:00 UHR UND 08:00 UHR  
(EIGENE DARSTELLUNG NACH ARE 2015, S. 18).



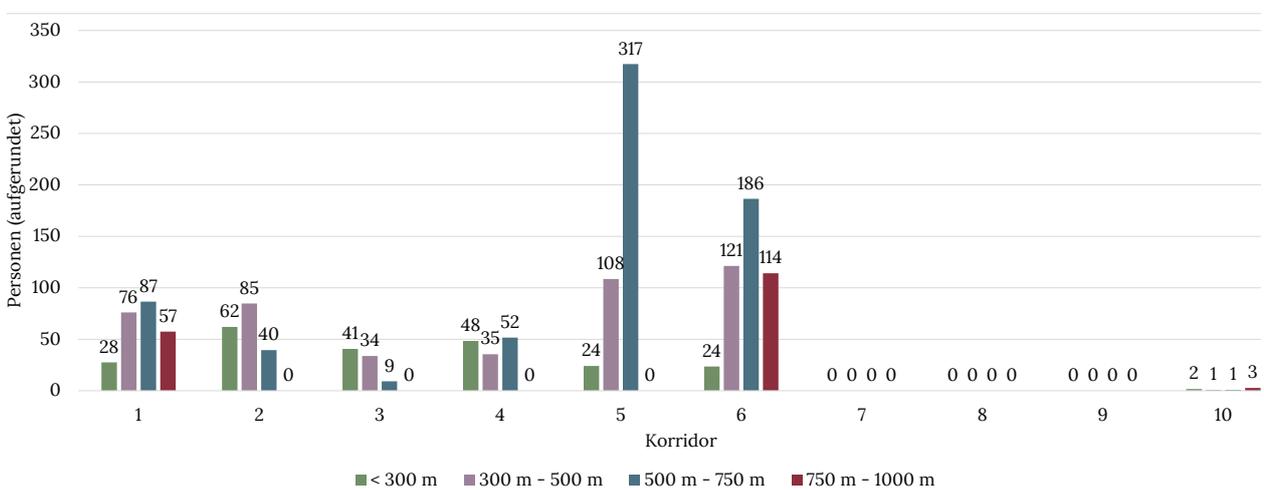
haben. Für die Altersgruppen 65–79 Jahre sowie 80 Jahre und älter wird angenommen, dass ein vergleichbarer Anteil der Wege innerhalb des Kreises stattfindet, weshalb diese ebenfalls als „Binnenpendler\*innen“ gewertet werden. Insgesamt betrifft dies 10,58 % der Einwohner\*innen des Kreises 8. Allerdings wird davon ausgegangen, dass ein Viertel dieser Personen das Shuttle-System trotzdem, zumindest für einen Teil ihres Weges, nutzen wird. Zur Anpassung der Bevölkerungszahlen wird der Anteil der Personen berechnet, die voraussichtlich kein Shuttle nutzen werden. Von den 10,58 % der Binnenpendler\*innen wird daher ein Anteil von 25 % abgezogen, was zu einem effektiven Reduktionssatz von 7,94 % führt. Die Berechnung für jede Zelle der Tabelle erfolgt durch Multiplikation der ursprünglichen Bevölkerungszahl mit dem Faktor 0,9207, der dem verbleibenden Anteil von 92,07 % entspricht. Die angepassten Bevölkerungszahlen dienen dazu, dass durch die Berücksichtigung des lokalen Pendler\*innenverhaltens eine Überbewertung der Shuttle-Nachfrage vermieden wird. Gleichzeitig stellt die Annahme, dass ein Teil der Binnenpendler\*innen das Shuttle dennoch nutzt, sicher, dass potenzielle Nutzer\*innen nicht unberücksichtigt bleiben.

Nach dieser Reduktion wurden die mobilen Personen pro Kreissektor bzw. Korridor summiert. Die aggregierte Darstellung der mobilen Personen pro Korridor ermöglicht eine vereinfachte und präzisere Berechnung der Shuttle-Nachfrage, zumal die mobilen Personen pro Kreissektor die letztlich relevante Größe zur Bedarfsermittlung darstellen (Abb. 19).

#### 4.4.6. VERKEHRSMITTELWAHL NACH DISTANZ

Der entfernungsabhängige Modal Split, regelmäßig erhoben als Verkehrsmittelwahl nach Entfernungsklassen, beschreibt die Veränderung der Verkehrsmittelpräferenzen in Abhängigkeit von der zurückzulegenden Distanz. Dabei zeigt sich, dass kurze Strecken vermehrt nicht-motorisiert zu Fuß oder mit dem Velo zurückgelegt werden, während mit zunehmender Entfernung der Anteil des ÖV sowie des MIV zunimmt (Gerike et al. 2020a, S. 4). Im Folgenden wird die Verteilung der Verkehrsmittel für die definierten Puffer analysiert. Ziel dieser Analyse ist es, Erkenntnis darüber zu gewinnen, welche Verkehrsmittel in den unterschiedlichen Zonen zu welchen Anteilen genutzt werden. Diese Verteilung bildet eine weitere Grundlage zur Modellierung des Substitutionspotenzials durch automatisierte Shuttles.

ABB. 19: ANTEIL MOBILER PERSONEN JE KORRIDOR ZWISCHEN 07:00 UHR UND 08:00 UHR  
(EIGENE DARSTELLUNG NACH ARE 2015, S. 18).



Die kleinräumige Aufteilung eines entfernungsabhängigen Modal Splits im urbanen Raum Zürichs wäre für die Modellierung im Sinne dieser Arbeit ideal. Entsprechende Daten sind allerdings nicht verfügbar. Die vorhandenen Daten beziehen sich (als geografisch nächste Einheit) auf die gesamte Schweiz und beinhalten damit große Anteile periurbaner und ländlicher Räume. Eine Verwendung dieser Daten würde zu deutlichen Verzerrungen führen, würden sie für die Modellierung im Kontext eines urbanen Raumes, wie des Planungsraumes, verwendet. Aus diesem Grund können die verfügbaren Daten zur Modellierung des Modal Splits im urbanen Raum Zürichs nicht verwendet werden.

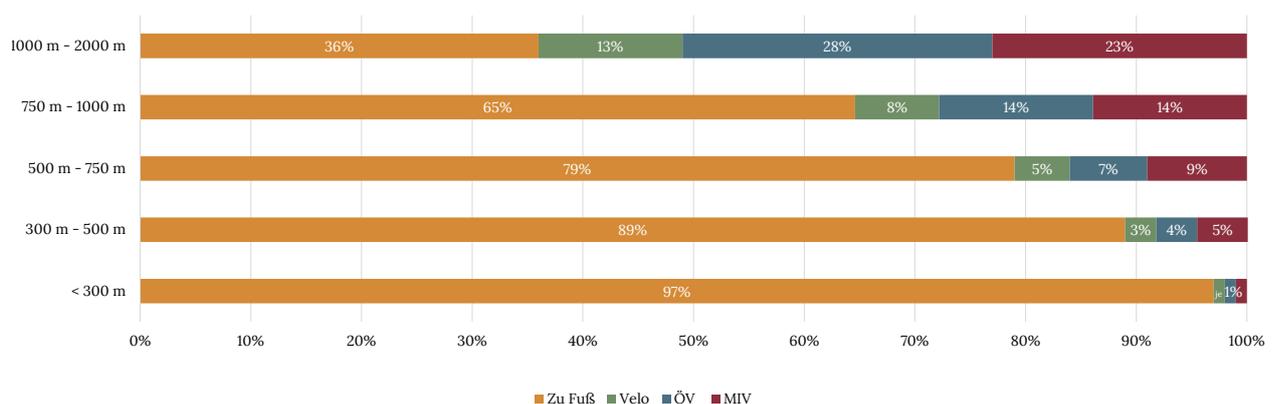
Stattdessen wird auf Daten aus dem Bericht „Aktive Mobilität in Wien“ (Heller 2021, S. 25) zurückgegriffen, in welchem ein vergleichsweise kleinräumiger entfernungsabhängiger Modal Split erhoben wurde. Da in vergleichbaren Studien die Auflösung der Entfernungsklassen 1000 m nicht unterschreitet, stellt die Erhebung aus Wien die detaillierteste verfügbare Datengrundlage dar. Obwohl Wien mit rund 2 Millionen Einwohner\*innen deutlich größer ist als Zürich mit etwa 400.000 Einwohner\*innen, ist anzunehmen, dass bei Entfernungen unter 1000 m die Wahl des Verkehrsmittels weniger von der vorhandenen Infrastruktur als vielmehr von individuellen Präferenzen abhängt.

Grundsätzlich zeigt sich, dass Distanzen unter 1000 m vor allem zu Fuß oder mit dem Velo überwunden werden. Beide Städte bieten zudem eine hohe Dichte an öffentlichen Verkehrsmitteln, sodass die Erreichbarkeit im Nahbereich der Wohnorte auf einem vergleichbaren Niveau angesiedelt werden kann.

Eine wesentliche Lücke in den Erhebungen zum entfernungsabhängigen Modal Split liegt jedoch in der Aufgliederung von Distanzen unter einem Kilometer. Für die fehlenden Entfernungsklassen erfolgt eine lineare Fortschreibung, analog zur oben vorgenommenen linearen Fortschreibung des Modal Splits für den Kanton Zürich (Abb. 20). Dies ermöglicht eine Annäherung an die tatsächliche Verkehrsmittelwahl für die Distanzen unter einem Kilometer.

Aus den Anteilen der Verkehrsmittel nach Entfernungskategorien lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen: Auf sehr kurzen Distanzen (< 300 m) dominiert der Fußverkehr mit einem Anteil von 97 % nahezu vollständig, während das Velo, der ÖV sowie der MIV in dieser Kategorie einen nur marginalen Anteil aufweisen. Bei Strecken von 300 m bis 500 m bleibt der Fußverkehr mit einem Anteil von 89 % das primär genutzte Verkehrsmittel. Die übrigen Verkehrsmittel zeigen in dieser Entfernungskategorie nur eine marginale Zunahme an Bedeutung. Mit steigender Distanz,

ABB. 20: VERKEHRSMITTELWAHL NACH DISTANZKLASSEN (EIGENE BERECHNUNG NACH HELLER 2021, S. 25).



insbesondere bei Strecken von 500 m bis 750 m, sinkt der Anteil des Fußverkehrs weiter auf 79 %, während der Anteil des Velos auf 5 % ansteigt. Parallel dazu nimmt die Nutzung des ÖV (Anteil 7 %) und des MIV (Anteil 9 %) zu, was auf deren zunehmende Relevanz bei mittleren Distanzen hindeutet. Dieser Trend setzt sich bei Entfernungen zwischen 750 m und 1000 m fort, wobei der Anteil des Fußverkehrs auf 65 % abfällt und der Veloanteil auf 8 % steigt. Ab dieser Distanz übersteigen jedoch die Anteile von ÖV und MIV, die jeweils 14 % betragen, die Velonutzung deutlich. In der Kategorie von 1000 m bis 2000 m wird ein signifikanter Rückgang des Fußverkehrs verzeichnet, der sich bei Distanzen über 1000 m nahezu halbiert. Das Velo erfährt zwar eine geringfügige Steigerung, allerdings zeigt der Anstieg des ÖV- und MIV-Anteils auf 28 % bzw. 24 %, dass diese Verkehrsmittel bei längeren Strecken erheblich an Bedeutung gewinnen.

Zusammenfassend bestätigt sich, dass der Anteil des Fußverkehrs mit zunehmender Entfernung kontinuierlich abnimmt. Das Velo weist zwar eine moderate Steigerung auf, jedoch scheint das Nutzer\*innenpotenzial frühzeitig ausgeschöpft zu sein. Bei längeren Distanzen

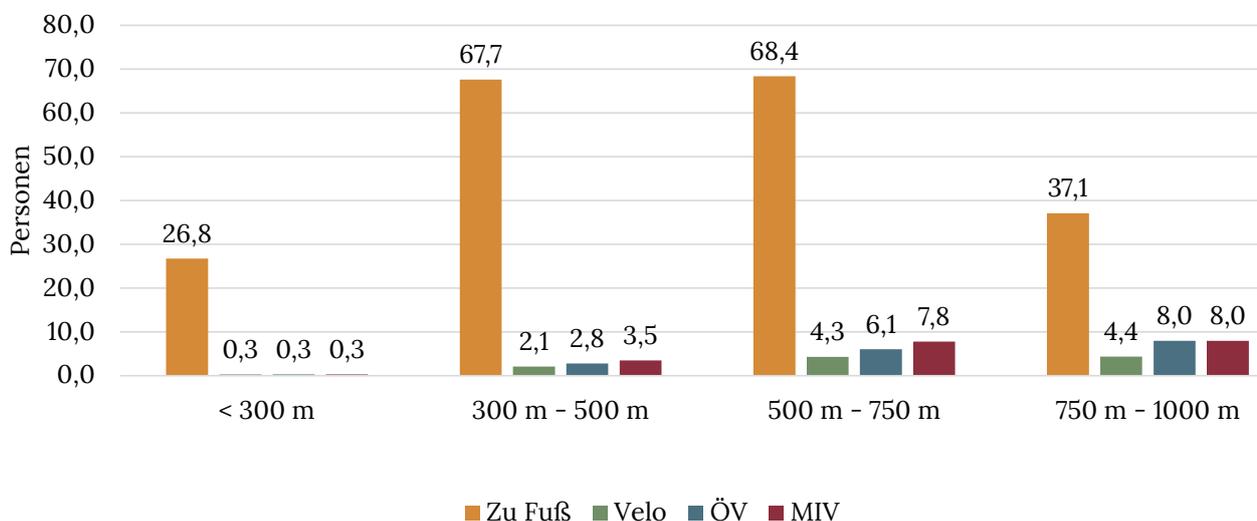
verschiebt sich die Verkehrsmittelwahl deutlich zugunsten des ÖV und MIV.

Die Anzahl der mobilen Personen in den jeweiligen Distanzsektoren wird mit den Verkehrsmittelpräferenzen je nach Entfernung verknüpft, um zu ermitteln, wie viele Menschen je Distanzsektor derzeit mit welchem Verkehrsmittel die Distanz zum Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen zurücklegen. Diese Verknüpfung ist wesentlich, da die Wahl des Verkehrsmittels stark von der zu überbrückenden Entfernung abhängt. So bevorzugen 97 % der Personen das Gehen bei Distanzen unter 300 Metern, während bei größeren Entfernungen (750–1000 Meter) der Anteil der ÖV-Nutzer\*innen und des MIV deutlich zunimmt.

#### 4.4.7. SUBSTITUTIONSWAHRSCHEINLICHKEITEN

Detaillierte Kenntnisse über die Verkehrsmittelwahl in Abhängigkeit von der Distanz sind besonders wichtig, da die Substitutionswahrscheinlichkeit, also die Wahrscheinlichkeit, dass jemand sein bisher genutztes Verkehrsmittel durch das Shuttle ersetzt, je nach Ausgangsverkehrsmittel und Entfernung variiert. Beispielsweise wird die

ABB. 21: VERKEHRSMITTELWAHL NACH DISTANZ IN KORRIDOR 1 (EIGENE BERECHNUNG).



Bereitschaft, auf das Shuttle umzusteigen, bei Fußgänger\*innen, die weniger als 300 Meter zurücklegen, gering sein, da in diesem Bereich das Gehen klar bevorzugt wird. Hingegen ist bei Personen, die den öffentlichen Verkehr oder den motorisierten Individualverkehr für mittlere bis größere Distanzen (500–1000 Meter) nutzen, die Wahrscheinlichkeit höher, dass sie das Shuttle als attraktive Alternative betrachten. Diese Differenzierung ist wichtig, um die potenzielle Nutzung des Shuttle-Systems realistisch einzuschätzen.

Grundlegend für die Verteilung ist, dass mit zunehmender Entfernung die Attraktivität von kollektiven automatisierten Fahrzeugen im Vergleich zu Alternativen wie Gehen oder Velofahren steigt. Dieser Effekt ist primär auf Faktoren wie physische Anstrengung, Zeitaufwand und Komfort zurückzuführen. Während kurze Strecken noch häufig zu Fuß oder mit dem Velo bewältigt werden, gewinnen Shuttles bei mittleren bis längeren Distanzen deutlich an Bedeutung und werden für viele Menschen zur bevorzugten Wahl. Im Folgenden wird die Begründung der gewählten Substitutionswahrscheinlichkeiten beschrieben:

Die Substitutionswahrscheinlichkeiten basieren auf dem hypothetischen Szenario einer vollständigen Substitution des MIV sowie

des konventionellen ÖV im Zubringerverkehr zu Verkehrsdrehscheiben durch ein flächendeckendes, automatisiertes Shuttle-System. Diese Transformation impliziert eine grundlegende Veränderung des Modal Splits, da die Verkehrsmittelwahl von Fußgänger\*innen, Velofahrer\*innen sowie ehemaligen MIV- und ÖPNV-Nutzer\*innen für Zubringerwege modifiziert wird und sich der Modal Split unter diesen neuen Gegebenheiten zusammensetzen wird.

Für jede Distanz (0–300 m, 300–500 m, 500–750 m, 750–1000 m) und jeden Korridor sowie für jedes Verkehrsmittel werden diese Wahrscheinlichkeiten angewandt. Die Substitutionswahrscheinlichkeit beschreibt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass Personen, die ursprünglich ein bestimmtes Verkehrsmittel genutzt hätten, stattdessen das Shuttle verwenden. Diese Wahrscheinlichkeiten variieren je nach Verkehrsmittel und zurückgelegter Distanz, wie aus der Tabelle ersichtlich. So haben beispielsweise Nutzer\*innen des MIV oder des ÖV in den Distanzen ab 300 m eine sehr hohe Substitutionswahrscheinlichkeit von bis zu 95 %, während Fußgänger\*innen bei kürzeren Distanzen (<300 m) mit geringerer Wahrscheinlichkeit auf das

Tab. 14: SUBSTITUTIONSWAHRSCHEINLICHKEITEN BISHER GENUTZTER VERKEHRSMITTEL DURCH KAF (EIGENE ANNAHME).

Distanzklasse	Substitutionswahrscheinlichkeiten			
	Zu Fuß → Shuttle	Velo → Shuttle	ÖV → Shuttle	MIV → Shuttle
< 300 m	10 %	5 %	70 %	30 %
300 m - 500 m	30 %	10 %	80 %	50 %
500 m - 750 m	70 %	20 %	90 %	70 %
750 m - 1000 m	90 %	30 %	95 %	90 %

Shuttle umsteigen. Durch die Anwendung dieser Substitutionspotenziale auf die bereits ermittelten Mobilitätsdaten pro Distanzsektor und Verkehrsmittel entsteht eine detaillierte Schätzung der Anzahl der Personen, die in der Stunde von 07:00 bis 08:00 Uhr eine Shuttlefahrt absolvieren. Dabei wird angenommen, dass jede Person in dieser Stunde eine Fahrt in eine Richtung unternimmt. Die Anwendung der Substitutionswahrscheinlichkeiten auf die Verkehrsmittelwahl pro Distanzsektor und Korridor ermöglicht eine präzise Abschätzung der tatsächlichen Shuttle-Nutzung.

Anschließend wurden, wie bereits bei der Berechnung der Binnenpendler\*innen, die mobilen Personen erneut nach Kreissektoren summiert. Dies dient dazu, die Anzahl der Personen zu ermitteln, die in der Stunde von 07:00 bis 08:00 Uhr eine Shuttlefahrt absolvieren. Diese Summierung nach Kreissektoren ermöglicht eine übersichtliche Darstellung der potenziellen Shuttle-Nutzer\*innen pro Korridor und bildet eine Grundlage für die weitere Abschätzung der Menge an benötigten Shuttles

#### 4.5. BERECHNUNG DES SHUTTLEBEDARFS IM ZUBRINGERSYSTEM

Die Bestimmung der Anzahl der benötigten Fahrzeuge hängt hauptsächlich von der Umlaufzeit, dem Takt, der Nachfrage und der Shuttlekapazität ab. Die Umlaufzeit setzt sich aus der Streckenlänge, der durchschnittlichen Geschwindigkeit, der Anzahl und Dauer der Halte und der Störungsreserve und zusammen. Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass die Shuttles den Linientakt einhalten. Neben der Shuttleanzahl ist die Kapazitätsplanung an den Verkehrsknotenpunkten bedeutend. Es muss ausreichend Fläche bereitgestellt werden,

damit wartende und ankommende Fahrzeuge störungsfrei operieren können. Engpässe oder Verzögerungen sind zu vermeiden, was nicht nur die Shuttles betrifft, sondern auch den Fahrgastfluss an den Haltestellen. Ein weiterer Faktor ist die Störungsreserve, die als zeitlicher Puffer dient, um mögliche Verspätungen im Linienbetrieb auszugleichen. Dabei ist es wichtig, dass die Verweilzeiten an den Stationen sowie die Takte des Systems genau aufeinander abgestimmt sind, um einen reibungslosen Ablauf zu garantieren. Die Taktung der Shuttles muss ebenfalls optimiert werden. Der zeitliche Abstand zwischen den Fahrten sollte so gewählt werden, dass er die Nachfrage bestmöglich abdeckt, ohne dabei überflüssige Leerlaufzeiten für die Fahrzeuge zu verursachen. In diesem Zusammenhang werden auch die Betriebsstrategien relevant, da die Anzahl der Haltepunkte und die Fahrgastverteilung die Effizienz des Systems beeinflussen. Die detaillierte Berechnung all dieser Faktoren, einschließlich der optimalen Anzahl der Shuttles, der Takte und des Flächenbedarfs, wird im Kapitel umfassend beschrieben. Dort werden die relevanten Einflussgrößen sowie die einzelnen Berechnungsschritte zur genauen Dimensionierung des Systems erläutert.

Die Abschätzung des Shuttlebedarfs für den Linienbetrieb ist ein Faktor für die Ermittlung des Flächenbedarfs an den Verkehrsdrehscheiben. So kann sichergestellt werden, dass sowohl ausreichend Kapazitäten zur Beförderung der Fahrgäste bereitgestellt werden als auch der vorhandene Raum effizient genutzt wird und kein unnötiges Verkehrsaufkommen entsteht. Daher ist eine genaue Analyse der Nachfrage und des Shuttlebedarfs unerlässlich, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Fahrgastkapazität, Fahrzeuganzahl und Flächennutzung zu gewährleisten.

Darüber hinaus beeinflusst die richtige Dimensionierung des Shuttlebedarfs nicht nur die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge, sondern auch den Linientakt und damit die Verweilzeiten der Shuttles an den Verkehrsdrehscheiben. Insbesondere bei automatisierten Shuttles, die sinnvollerweise in einem dichten Takt verkehren, ist es wichtig, den Flächenbedarf so zu planen, dass genügend Platz für wartende und ankommende Fahrzeuge vorhanden ist, ohne Engpässe oder Verzögerungen zu verursachen. Je nach Fahrzeuggröße (4-Personen- oder 8-Personen-Shuttles) und Takten ist ein variierender Flächenbedarf zu erwarten.

Die Anzahl der benötigten Shuttles zur Deckung der Nachfrage unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Korridoren, da sowohl die Nachfrage als auch die Größe des Korridors variiert. Durch eine gezielte Analyse lässt sich für jeden Korridor feststellen, ob der Einsatz von Shuttles mit geringerer oder höherer Kapazität effizienter ist, um die Nachfrage mit möglichst wenigen Fahrten zu bewältigen.

Die Berechnung ermöglicht somit, eine fundierte Abschätzung der insgesamt benötigten Shuttles im gesamten Einzugsbereich vorzunehmen und gleichzeitig aufzuzeigen, wie diese optimal auf die verschiedenen Korridore verteilt werden sollten. Ziel ist es, den Shuttlebetrieb sowohl fahrzeug- als auch flächeneffizient zu gestalten, bei einer gleichzeitig dichten Taktung, um ein möglichst attraktives Angebot zu schaffen.

#### 4.5.1. STRECKENLÄNGEN DER SHUTTLELINIEN

Zunächst werden die Längen der Shuttle-Linien ermittelt, die neben der Anzahl der zu befördernden Personen eine wesentliche Einflussgröße darstellen. Je nach Linienlänge könnte zum einen der Fall eintreten, dass die Shuttle-Linie so lang ist, dass die Umlaufzeit länger ist als die Gesamtzykluszeit der Shuttles. Zum anderen könnten zwar die Shuttles ausreichend sein, um den Takt dauerhaft einzuhalten, wenn jedoch mehr Fahrten nachgefragt werden, als Shuttles im Umlauf sind, muss deren Anzahl erhöht werden. Andernfalls könnten nicht alle Fahrtanforderungen bedient werden.

Tab. 15: ANZAHL DER PERSONEN IM ZUBRINGERVERKEHR ZUM BAHNHOF ZÜRICH TIEFENBRUNNEN, WERKTAGS ZWISCHEN 07:00 UND 08:00 UHR (EIGENE BERECHNUNG).

Korridor	je Korridor	im Einzugsbereich
1	141,9	
2	68,2	
3	22,9	
4	54,8	
5	267,2	
6	277,0	835,4
7	0	
8	0	
9	0	
10	3,4	

Die Vorgehensweise zur Bildung der Korridore ist in Kapitel 7.1.4 beschrieben. Das Einzugsgebiet für das Shuttle-System ist als ein Radius von 1000 m um den Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen definiert. Dieser Radius stellt den äußeren Rand des Einzugsbereichs dar, wobei die Luftlinie die direkte Entfernung ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Streckenführung des Shuttles angibt. Teilweise überschneiden sich die Einzugsbereiche des Shuttles mit denen „benachbarter“ S-Bahn-Stationen. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Effekt, dass Personen im Einzugsbereich von zwei Shuttles unterschiedlicher S-Bahnstationen liegen, ausgleicht. Daher wird dieser Aspekt nicht weiter berücksichtigt.

Da Shuttles nicht der Luftlinie folgen, sondern auf Straßen und Wegen verkehren, wird ein Umwegfaktor angewendet. Dieser dient dazu, die Abweichung der tatsächlichen Fahrstrecke von der Luftliniendistanz zu schätzen. Dabei wird die tatsächliche Fahrdistanz nicht exakt ermittelt, sondern durch den Umwegfaktor angenähert. Diese Methode ermöglicht eine praxisnahe Schätzung der realen Fahrstrecken

im Einzugsbereich, ohne dass eine umfassende Netzwerkanalyse des gesamten Planungsgebiets erforderlich ist.

Gestützt wird sich dabei auf den Umwegfaktor von 1,343, wie er von Mennicken et al. (2023, S. 190) als Durchschnittswert für europäische Städte ermittelt wurde. Darüber hinaus wird ein zusätzlicher Umwegfaktor von 10 % angewendet, um den weiteren Aufwand zu berücksichtigen, der in Kauf genommen wird, um innerhalb des Korridors Fahrplananforderungen zu erfüllen. Die ermittelte Weglänge wird anschließend mit einem Faktor von 2 multipliziert, um sowohl die Distanz für den Hin- als auch den Rückweg des Shuttles im Korridor zu berücksichtigen.

#### 4.5.2. UMLAUFZEIT JE SHUTTLELINIE

Die Fahrzeit (eines Shuttles) ergibt sich aus der zurückzulegenden Weglänge ( $s$ ) und der Durchschnittsgeschwindigkeit ( $v$ ) eines Fahrzeugs. Für die Shuttlebusse, welche sowohl auf siedlungsorientierten Straßen als auch teilweise auf verkehrsorientierten Hauptstraßen verkehren erscheint eine Fahrgeschwindigkeit von 30 km/h realistisch.

Tab. 16: WEGLÄNGE SHUTTLELINIE NACH KORRIDOR (EIGENE BERECHNUNG NACH MENNICKEN ET AL. 2023, S. 190).

Korridor	Tiefe [m]	Weglänge für Hin- und Rückweg [m]
1	968,6	2861,9
2	788,3	2329,0
3	628,1	1855,7
4	728,9	2153,7
5	765,9	2263,0
6	999,3	2952,4
7	71,2	210,4
8	78,6	232,1
9	192,8	569,7
10	783,9	2316,1

Allerdings müssen Sicherheitsaspekte, wie das Reduzieren der Geschwindigkeit an Kreuzungen oder beim Abbiegen, berücksichtigt werden. Darüber hinaus sind Beschleunigungsvorgänge des Shuttles ebenfalls nicht einbezogen. Daher wird für die weitere Berechnung eine durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h angenommen, um sich realistischen Verkehrsbedingungen anzunähern.

$$t_{\text{Fahrzeit}} = \frac{s}{v}$$

Für die Umlaufzeit ist neben der reinen Fahrzeit auch die benötigte Haltezeit für Zwischenhalte ( $t_{\text{zwischenhalt}}$ ) von Bedeutung. Diese ergibt sich aus der Zeit, die das Fahrzeug benötigt, um vollständig zum Stillstand zu kommen ( $t_{\text{stopp}}$ ) und der Anzahl an Fahrgästen die ein- bzw. aussteigen ( $n_{\text{einaus}}$ ) multipliziert mit der benötigten Zeit für den Ein- bzw. Ausstieg ( $t_{\text{einaus}}$ ) pro Fahrgast (Fahrgastwechselzeit). Tirachini (2013, S. 10) gibt diese Zeiten für ein unbesetztes Shuttle mit 6,47 Sekunden für den Halt sowie 1,46 Sekunden pro einsteigendem Fahrgast an. Für den konventionellen ÖV gibt die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 15 bzw. 30 Sekunden für einen Zwischenhalt an (FGSV 2003, S. 79). Die Haltedauer für die Shuttles liegt damit darunter, was aufgrund der kleineren Gefäßgröße, als realistisch eingeschätzt wird. Im vorliegenden Betriebskonzept wird angenommen, dass das Shuttle nicht direkt an den Standorten der Personen hält, sondern die Haltepositionen so wählt, dass jeweils 1-2 Personen an einem gemeinsamen Punkt ein- oder aussteigen. Dies führt zu einer Bündelung der Haltevorgänge und reduziert die Anzahl der notwendigen Halte. Bei einer Matching-Quote (Kapitel 4.5.5) von 90 % bedeutet dies für ein 4-Personen-Shuttle dies, dass bei einer Annahme von 1,5 einsteigenden Personen pro Halt drei Zwischenhalte erforderlich wären. Und bei einem 8-Personen-Shuttle fünf Zwischenhalte.

$$t_{\text{zwischenhalt}} = t_{\text{stopp}} + n_{\text{einaus}} \times t_{\text{einaus}}$$

Am Ziel der Fahrt, der Verkehrsdrehscheibe, ist zusätzlich ein (End)Halt notwendig, an dem alle Fahrgäste das Fahrzeug verlassen und neue hinzusteigen. Die Haltedauer an diesem Punkt ( $t_{\text{endhalt}}$ ) wird entsprechend länger sein, da an dieser Station alle Fahrgäste das Fahrzeug verlassen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass an diesem zentralen Punkt auch neue Fahrgäste einsteigen werden, was den Aufenthalt um diese verlängert.

$$t_{\text{endhalt}} = t_{\text{stopp}} + n_{\text{einaus}} \times t_{\text{einaus}}$$

Weiterhin wird eine Störungsreserve von 15 Sekunden angenommen, um mögliche Fahrtverzögerungen ausgleichen zu können. Diese Zeit wird zur Umlaufzeit hinzugerechnet. Unberücksichtigt bleiben Ein- und Ausstiegsvorgänge von Personen, die das Shuttle nur für einen Teil des Weges nutzen. Die Umlaufzeit (eines Shuttles) setzt sich damit aus der Fahrzeit und der Zeiten für die Zwischenhalte sowie den Endhalt zusammen und ist somit von der zurückzulegenden Weglänge, der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit sowie der Anzahl der Haltepositionen und der Anzahl der Ein- bzw. Ausstiegsvorgänge an diesen Halten abhängig.

$$t_{\text{umlauf}} = t_{\text{fahrzeit}} + \sum t_{\text{zwischenhalt}} + t_{\text{endhalt}} + t_{\text{stoerung}}$$

#### 4.5.3. FESTLEGUNG UND GEWÄHRLEISTUNG DES STANDARDTAKTES

Der Takt einer Linie wird bei der Linienplanung fest vorgegeben. Dabei handelt es sich um den festen zeitlichen Abstand, in dem die Shuttles unabhängig von ihrer Anzahl oder der Umlaufzeit einhalten sollen. Für die Modellierung wird der Takt von 180 Sekunden vorgegeben. Dieser Takt wurde gewählt, um eine hohe Attraktivität des Shuttlesystems zu gewährleisten und die Vorteile von

automatisierten Fahrzeugen, insbesondere hinsichtlich der Betriebskosten, optimal auszuschöpfen. So ist der Takt, im Vergleich zu herkömmlichen öffentlichen Verkehrsmitteln, insbesondere zu vergleichbaren Omnibuslinien, relativ dicht und stellt damit eine attraktive und schnelle Möglichkeit dar, zum Bahnhof zu gelangen. Um festzustellen, wie viele Fahrzeuge erforderlich sind, um den vorgegebenen Takt ( $T$ ) einer Linie zu gewährleisten, muss zunächst die Umlaufzeit eines Fahrzeugs durch den vorgegebenen Takt geteilt werden, um die Anzahl der Fahrzeuge zu bestimmen, die erforderlich sind, um sicherzustellen, dass in den regelmäßigen Abständen ein Fahrzeug abfährt.

$$n_{shuttle,min} = \left\lceil \frac{t_{umlauf}}{T} \right\rceil$$

Da Bruchteile von Fahrzeugen nicht eingesetzt werden können, muss das Ergebnis immer auf die nächste ganze Zahl aufgerundet werden. Würde abgerundet, könnte ein Shuttle den Start- bzw. Endpunkt nicht rechtzeitig erreichen, um im nächsten vorgesehenen Taktschritt abzufahren. Dies würde eine zusätzliche Lücke zwischen dem letzten Shuttle eines Fahrzyklus und dem ersten Shuttle des nächsten Fahrzyklus verursachen. Wird aufgerundet, sind genügend Shuttles im Einsatz, um den vorgegebenen Takt einzuhalten. Es wird daher folgende Anzahl an Shuttles benötigt, damit auf jeder Linie alle 180 Sekunden ein Shuttle abfährt (Abb. 22).

Allerdings ist, aufgrund des Aufrundens, die Gesamtzykluszeit ( $t_{zyklus} = n_{shuttle} \times T$ ), also die Zeit, bis alle Fahrzeuge den Takt einmal komplett durchlaufen haben nun länger als die Umlaufzeit. Das bedeutet, dass ein Shuttle früher am Startpunkt ankommt, bevor es gemäß des Linientaktes wieder abfahren muss. Es muss also nach Abschluss eines Umlaufes warten, bevor es im (nächsten) Taktschritt abfahren kann.

#### 4.5.4. WARTE- UND HALTEZEITEN IM SHUTTLEBETRIEB

Fraglich ist, wie lang diese Wartezeit ausfällt. Dazu wird die Differenz zwischen der Gesamtzykluszeit und der Umlaufzeit berechnet. Die Differenz entspricht der Wartezeit.

$$t_{wartezeit} = t_{zyklus} - t_{umlauf}$$

Die Wartezeit muss länger sein als die Zeit, die das Shuttle für einen Zwischen- oder den Endhalt benötigt, einschließlich des Fahrgastwechsels. Wäre die Wartezeit kürzer als die Zeit, die für den Halt und den Ein- und Ausstieg der Fahrgäste erforderlich ist, könnten diese Vorgänge nicht oder nicht vollständig abgeschlossen werden. Es ist daher essenziell, dass die Wartezeit mindestens so lang ist wie die Zeit für den längstmöglichen Haltevorgang, um einen kontinuierlichen Betrieb sicherzustellen.

Wie oben dargestellt ergibt sich die Zeit für den Fahrgastwechsel (bei Vollausslastung) aus der Zeit, die das Shuttle benötigt, um vollständig zum Stillstand zu kommen und die Türen zu öffnen und die eigentliche Zeit des Ein- und Aussteigens der Fahrgäste (Haltezeit) sowie die Zeit für das Schließen der Türen und die Wiederaufnahme der Fahrt. Liegt diese Wartezeit (zur Wiedereingliederung in den Takt) und der Haltezeit (für den Fahrgastwechsel), folgt, dass das Shuttle diese Haltezeit zwingend abwarten muss und erst mit dem darauffolgenden Taktschritt abfahren kann.

Um dieses Problem zu lösen, sind mehrere Korrekturen denkbar. Ziel ist zu garantieren, dass die Wartezeit stets länger ist als die Haltedauer. So kann die Haltedauer und damit der Vorgang des Haltens sowie des Fahrgastwechsels innerhalb der Wartezeit stattfinden. Eine Option wäre, den Takt anzupassen oder die Umlaufzeit der jeweiligen Linie zu optimieren, beispielsweise durch eine Anpassung der Streckenführung.

Allerdings sind sowohl der oben begründete Standardtakt sowie die Streckenlänge keine variablen Größen im Rahmen dieser Arbeit. Wenn also eine Änderung des Taktes oder der Streckenführung nicht möglich ist, bleibt die Erhöhung der Anzahl der eingesetzten Shuttles. Zusätzliche Fahrzeuge können diese andernfalls „verpassten“ Taktschritte bedienen. Die Anzahl der benötigten Fahrzeuge muss demnach erhöht werden, bis die Wartezeit größer (oder gleich) der Haltezeit ist.

$$t_{\text{wartezeit}} \geq t_{\text{haltezeit}}$$

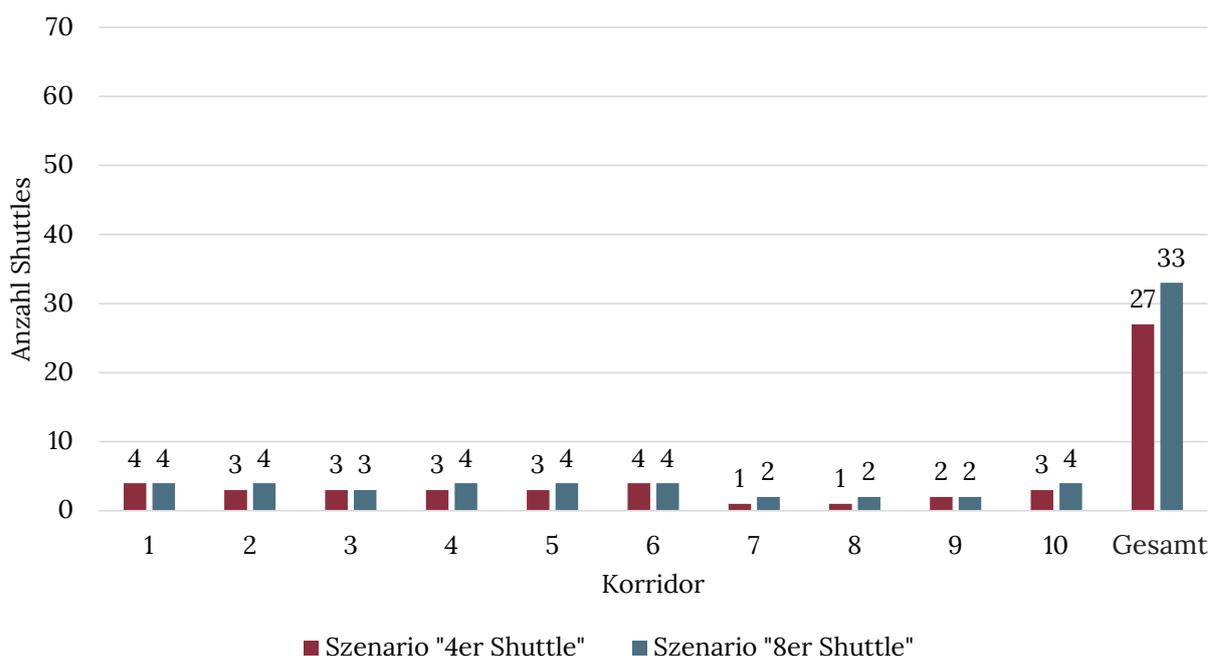
Weiterhin, in dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt, wäre eine zusätzliche Mindestaufenthaltsdauer eines Shuttles, um sicherzustellen, dass Fahrgäste genügend Zeit haben, das Fahrzeug zu erreichen und einzusteigen, bevor es wieder abfährt. Insbesondere für Personen mit eingeschränkter Mobilität, ältere Menschen oder Eltern mit kleinen Kindern würde eine verlängerte Haltedauer gewährleisten, dass diese Fahrgäste das Fahrzeug erreichen können ohne den Eindruck haben, gegenüber anderen Fahrgästen

benachteiligt zu sein. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass eine längere Haltedauer zur allgemeinen Fahrgastzufriedenheit beitragen würde. Wenn Fahrzeuge nach nur kurzem Halt abfahren, könnte der Eindruck entstehen, das Shuttle knapp verpasst zu haben, auch wenn dies nur ein psychologischer Effekt ist. Ein länger wartendes Fahrzeug würde schließlich die durchschnittliche Gesamtbeförderungszeit verlängern.

#### 4.5.5. ERMITTLUNG DER BEFÖRDERUNGSKAPAZITÄT UND ANPASSUNG DER SHUTTLEANZAHL

Die Beförderungskapazität eines Shuttlesystems beschreibt, wie viele Personen pro Stunde unter Berücksichtigung der Anzahl und Größe der eingesetzten Fahrzeuge sowie des Taktes, in dem sie verkehren, transportiert werden können. Zur Berechnung wird zunächst die Anzahl der Fahrten ermittelt, die ein Shuttle innerhalb einer Stunde absolvieren kann. Diese ergibt sich aus dem Verhältnis der verfügbaren Zeit (in einer Stunde) zur Dauer eines Umlaufes zuzüglich Wartezeiten an der Station.

ABB. 22: BENÖTIGTE SHUTTLE ZUR GEWÄHRLEISTUNG DES STANDARDTAKTES (EIGENE BERECHNUNG).



$$n_{\text{fahrten}} = \left( \frac{3600}{t_{\text{umlauf}} + t_{\text{wartezeit}}} \right) \times n_{\text{shuttle}}$$

Die Qualität des Matchings, also die Erfolgsquote bei der Zuteilung von Fahrten, hat einen direkten Einfluss auf die Anzahl der beförderten Personen pro Shuttle. In diesem Fall wird von einer hohen Matching-Qualität ( $Q_m$ ) von 90 % ausgegangen, was bedeutet, dass die meisten Fahrtenanforderungen ( $n_{\text{nachfr}}$ ) erfolgreich einem verfügbaren Shuttle zugeordnet werden. Die Anzahl der beförderten Personen pro Shuttle hängt außerdem von der Größe des Shuttles. Die Beförderungskapazität ( $K$ ) des Systems bzw. einer Linie ( $K_{\text{linie}}$ ) berechnet sich als Produkt der Anzahl der Fahrten pro Stunde, der eingesetzten Shuttles und der durchschnittlichen Anzahl an Personen pro Fahrt. Dieser Wert wird anschließend mit der Nachfrage verglichen, um zu ermitteln, ob genügend Kapazitäten vorhanden sind, um die Fahrtenanforderungen im betrachteten Zeitraum (in diesem Fall in der Stunde zwischen 07:00 und 08:00 Uhr) zu decken.

$$K_{\text{linie}} = \left( \frac{3600}{t_{\text{umlauf}} + t_{\text{wartezeit}}} \right) \times n_{\text{shuttle}} \times Q_m$$

Liegt die Kapazität über der Anzahl der Fahrtenanforderungen, sind ausreichend Shuttles vorhanden, um alle Fahrgäste im betrachteten Zeitraum zu befördern. Es besteht keine Notwendigkeit, die Anzahl der Shuttles zu erhöhen oder andere Optimierungsmaßnahmen zu ergreifen. Theoretisch könnte sogar die Anzahl der Shuttles reduziert werden, allerdings würde dies dazu führen, dass der vorgegebene Standardtakt nicht mehr gewährleistet werden könnte. Liegt die Kapazität dagegen unter der Anzahl der Fahrtenanforderungen, reichen die vorhandenen Shuttles nicht aus, um alle Fahrgäste im betrachteten Zeitraum zu befördern. In diesem Fall müssen Optimierungsmaßnahmen ergriffen werden, um die Gesamtkapazität des Systems zu erhöhen.

Die Fahrgastzuteilung könnte optimiert werden, um die durchschnittliche Auslastung zu erhöhen, die Kapazität der Shuttles durch größere Fahrzeuge gesteigert oder die Umlaufzeit durch eine Verkürzung der Streckenführung reduziert

TAB. 17: TAKT JE KORRIDOR NACH SZENARIO (EIGENE BERECHNUNG).

Korridor	Linientakt im Szenario „4er-Shuttle“	Linientakt im Szenario „8er-Shuttle“
1	60	180
2	180	180
3	180	180
4	180	180
5	30	60
6	30	60
7	180	180
8	180	180
9	180	180
10	180	180

werden. Da jedoch im Rahmen dieser Arbeit die Streckenlänge und Shuttle-Modelle festgelegt sind und eine höhere Matching-Qualität als unrealistisch betrachtet wird, bleibt die einzige Lösung die Erhöhung der Shuttleanzahl.

Um die minimal benötigte Anzahl an Shuttles zu berechnen, mit denen alle Fahrplanforderungen im betrachteten Zeitraum erfüllt werden können, muss zunächst die unbediente Nachfrage ermittelt werden. Dies ist die Differenz zwischen der aktuellen Kapazität der Linie und der Anzahl der nachgefragten Fahrten im Korridor. Die Anzahl der zusätzlich benötigten Shuttles ergibt sich dann, indem die Anzahl der Fahrplanforderungen durch die Anzahl der beförderten Personen pro Shuttle pro Stunde geteilt wird. Das Ergebnis muss aufgerundet werden, da nur ganze Shuttles eingesetzt werden können.

$$n_{shuttle} = \left\lceil \frac{n_{nachfr}}{K_{shuttle/h}} \right\rceil$$

Alternativ zur dichteren Taktfolge könnten auch mehrere Shuttles parallel starten. Diese

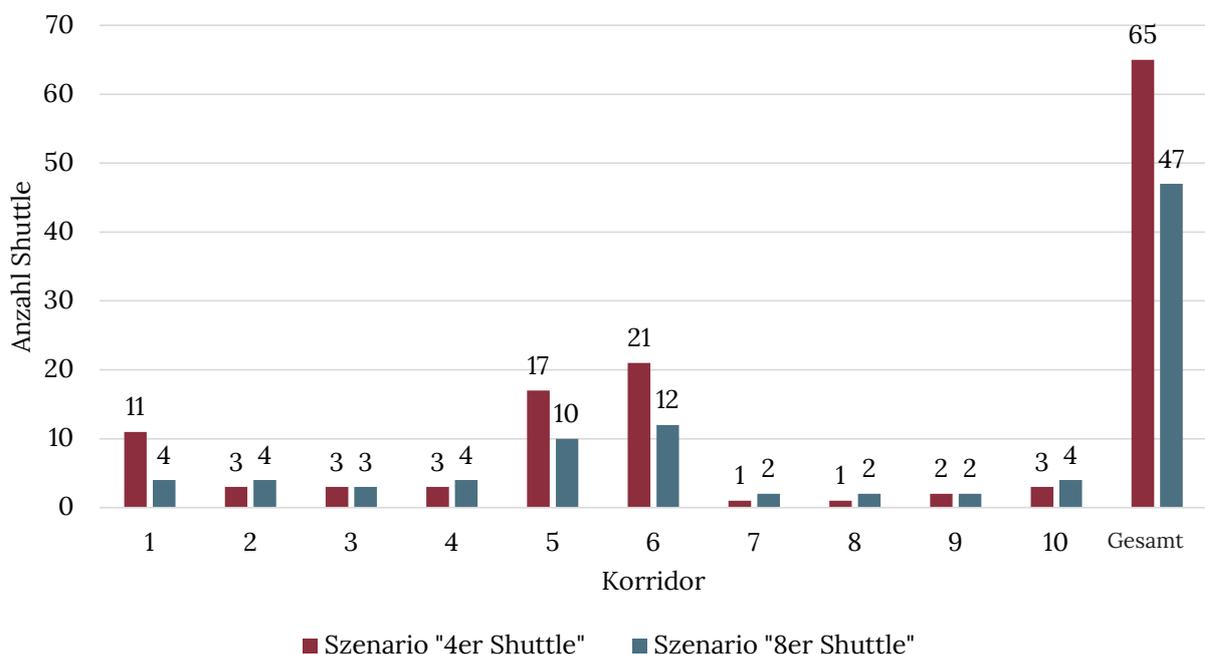
Möglichkeit wird in der Arbeit jedoch nicht weiter behandelt, da in diesem Fall von einer erhöhten Anzahl an Shuttles in der Station ausgegangen werden muss. Im Gegensatz dazu kann bei der Verkürzung des Taktes die Anzahl der Shuttles an der Station auf einem Minimum gehalten werden, während gleichzeitig die durchschnittliche Wartezeit und damit die Reisezeit für die Fahrgäste reduziert wird.

#### 4.5.6. TAKTANPASSUNG AN DEN BEDARF

Da die Beförderungskapazität bei einem Takt von 180 Sekunden in einigen Bereichen unzureichend ist, muss die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge erhöht werden. Die daraus resultierende Taktzeit wird durch die Anzahl der Shuttles und die Länge der Umlaufzeit bestimmt. Diese rein theoretische Optimierung führt jedoch zu ungünstigen und unpraktikablen Takten.

$$T = \frac{t_{umlauf} + t_{wartezeit}}{n_{shuttle}}$$

ABB. 23: BENÖTIGTE SHUTTLE ZUR DECKUNG DER NACHFRAGE (EIGENE BERECHNUNG).



Der ursprünglich anvisierte Takt von 180 Sekunden wird schrittweise um jeweils 30 Sekunden reduziert. So ergeben sich mögliche Takte von 150, 120, 90, 60 und 30 Sekunden. Für jede Linie wird anschließend der nächstkleinere, übliche Takt unterhalb des theoretischen Takts ermittelt und zugeordnet. Diese schrittweise Reduzierung des Takts gewährleistet den Transport aller Fahrgäste innerhalb des vorgegebenen Zeitraums. Gleichzeitig wird die Abweichung vom Standardtakt minimiert und ein klares, nachvollziehbares Muster für die Abfahrtszeiten beibehalten. Es ergibt sich der Takt je Linie entsprechend Tab. 17).

Wie bereits in Kapitel 4.5.3 dargestellt: Wird die Gesamtzykluszeit geringer als die Umlaufzeit, bedeutet dies, dass ein Shuttle erneut abfahren müsste, bevor es seine vollständige Runde inklusive der notwendigen Wartezeit abgeschlossen hat. Nachdem der „reduzierte Standardtakt“ wie beschrieben immer unter dem theoretisch berechneten Takt liegt, muss die Anzahl der Shuttles wiederum so lange erhöht werden, bis der neue, reduzierte Takt eingehalten werden kann. Die notwendige Erhöhung der Shuttleanzahl wird, wie oben

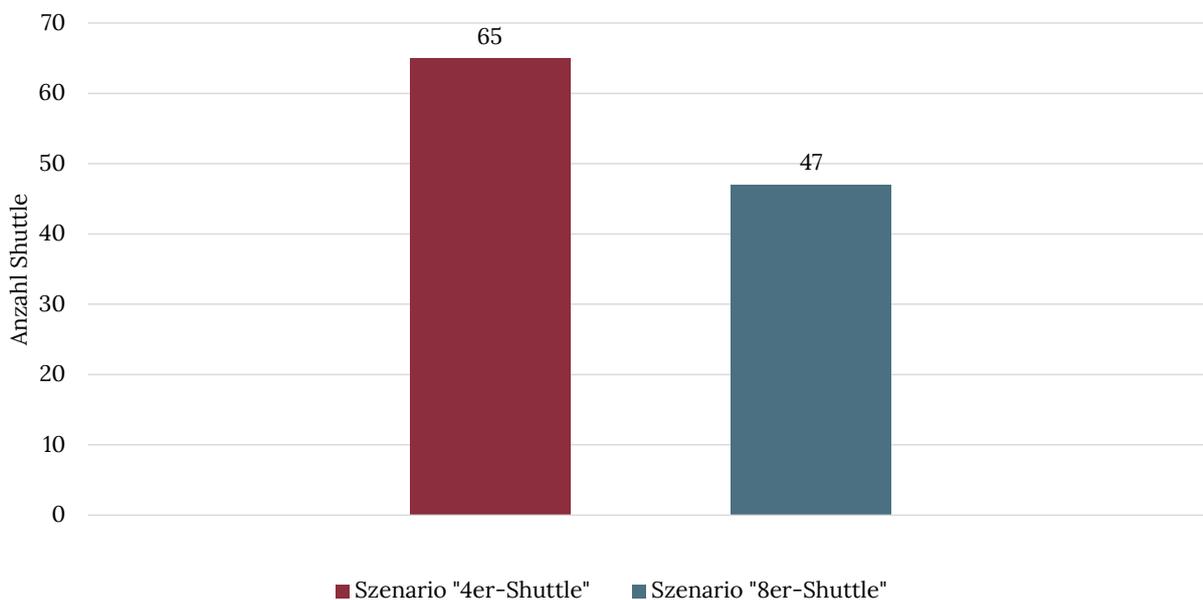
dargestellt, berechnet. Es zeigt sich im Vergleich zur benötigten Anzahl an Shuttle, um lediglich den Standardtakt einzuhalten, nicht jedoch die Fahrplananforderungen befriedigen zu können, eine deutliche Erhöhung der Anzahl notwendiger Shuttles auf diesen Linien.

Nachdem die neuen Takte und die angepasste Anzahl der Shuttles den einzelnen Linien zugeordnet wurden, müssen nun die Wartezeiten entsprechend des Vorgangs in Kapitel 4.5.4 aktualisiert werden. Sollten die zustandekommenden Wartezeiten so kurz sein, dass die notwendige Wartezeit nicht mehr gewährleistet werden kann, muss, ebenfalls wie bereits oben vorgenommen, die Anzahl der eingesetzten Shuttles schrittweise erhöht werden.

#### 4.5.7. ZUSAMMENFASSUNG: BERECHNUNG DES SHUTTLEBEDARFS

Zunächst wurde die Nachfrage ermittelt, anschließend erfolgte die Bestimmung der Beförderungskapazität pro Shuttle. Mit der Berechnung der Umlaufzeit je Shuttle konnte anschließend die Beförderungskapazität je Linie

ABB. 24: ANZAHL BENÖTIGTER FAHRZEUGE NACH SZENARIO (EIGENE BERECHNUNG).



pro Stunde berechnet werden. Aufbauend wurde geprüft, ob die resultierende Anzahl an Shuttles ausreicht, um sowohl die Nachfrage zu bedienen als auch den vorgegebenen Standardtakt einzuhalten. Hat sich dies als nicht ausreichend herausgestellt, wurde der Standardtakt auf den erforderlichen Mindesttakt für diese Linie reduziert. Im letzten Schritt wurde die Anzahl der tatsächlich notwendigen Shuttles je Linie und damit die insgesamt erforderliche Anzahl für den Betrieb eines automatisierten Shuttlesystems kollektiver Nutzung am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen evaluiert. Im Folgenden wird das Vorgehen zusammenfassend dargestellt.

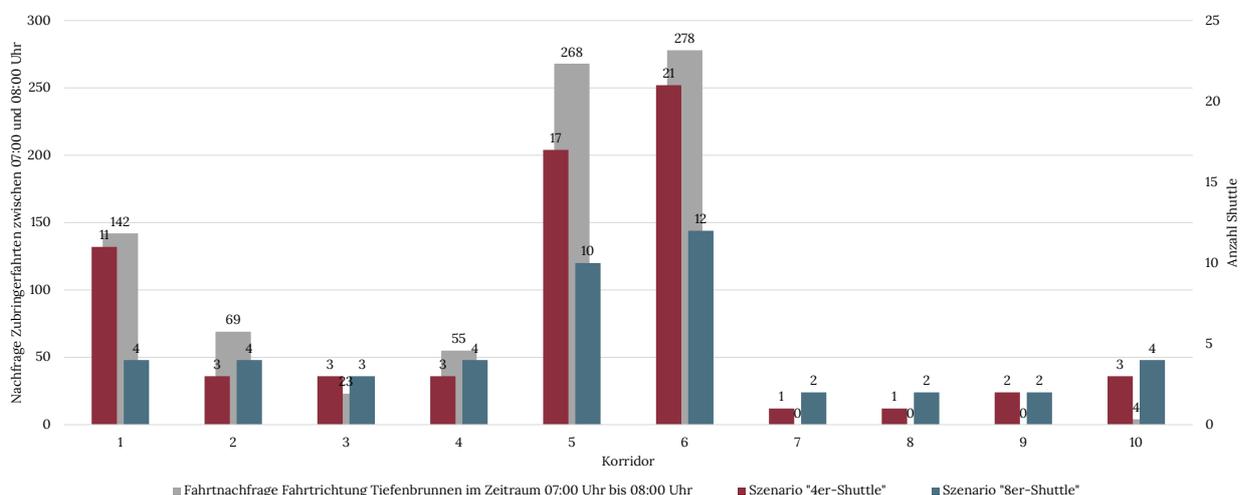
Für die Szenarien „4er-Shuttles“ und „8er-Shuttles“ ergibt sich die folgende Anzahl an Shuttles, unterschieden nach Linie sowie summiert zur Gesamtanzahl der benötigten Shuttles nach Szenario. Dabei zeigt sich, dass für das Szenario „4er-Shuttles“ 65 Fahrzeuge benötigt werden, was 38,3 % mehr sind als im Szenario „8er-Shuttles“, in dem 47 Shuttles benötigt werden (Abb. 24).

Bei tiefergehender Betrachtung zeigt sich, dass vor allem die Korridore mit hoher Fahrtnachfrage deutliche Unterschiede in der Anzahl der benötigten Fahrzeuge aufweisen.

Zum einen liegen sie grundsätzlich deutlich über der Anzahl an Fahrzeugen in Korridoren mit geringerer Nachfrage, zum anderen ist hier die Differenz zwischen den 4er- und 8er-Shuttles besonders ausgeprägt.

Insgesamt zeigt sich, dass die 4er-Shuttles bei hoher Nachfrage deutlich ineffizienter sind, da sie weniger Beförderungskapazität bieten, was durch einen höheren Takt und damit mehr Fahrzeuge ausgeglichen werden muss. Es ergibt sich daher der logische Zusammenhang, dass ein höherer Takt der Linie auch mehr benötigte Fahrzeuge bedeutet. In dieser Untersuchung zeigt sich dieser Effekt jedoch nur auf solchen Linien, bei denen die Fahrtnachfrage die Beförderungskapazität im Standardtakt überschreitet, sodass dieser verkürzt werden muss und mehr Fahrzeuge zum Einsatz kommen. Besonders deutlich wird dieser Effekt an Korridor 1. Hier liegt die Fahrtnachfrage auf einem mittleren Niveau, sodass diese mit 8er-Shuttles noch bedient werden kann, die 4er-Shuttles jedoch eine zu geringe Beförderungskapazität aufweisen. In letzterem Szenario müssen daher Fahrzeuge hinzugefügt werden, um diese Kapazität bereitzustellen. So ergibt sich, dass statt 4 Fahrzeugen (Szenario 8er-Shuttle) gleich 11 Fahrzeuge (Szenario 4er-Shuttle) eingesetzt werden müssen (Abb. 25).

ABB. 25: VERGLEICH NACHFRAGE ZUBRINGERFAHRTEN UND BENÖTIGTE SHUTTLE NACH SZENARIO (EIGENE BERECHNUNG).



Der Kippunkt, an dem der Einsatz kleinerer Shuttles zu einem unverhältnismäßig hohen Bedarf an zusätzlichen Fahrzeugen führt, liegt mit den gegebenen Szenarien und Rahmenbedingungen dieser Arbeit bei 130 Fahrplananfragen für den Korridor 1. Während bis zu 129 Fahrplananfragen lediglich sieben Fahrzeuge benötigt werden, steigt der Bedarf bei 130 Anfragen sprunghaft auf elf Fahrzeuge an. Dieser abrupte Anstieg verdeutlicht die Sensitivität des Systems gegenüber geringfügigen Veränderungen der Nachfrage und birgt das Risiko einer immensen Ineffizienz, sollten diese bei der Betriebsplanung nicht berücksichtigt werden.

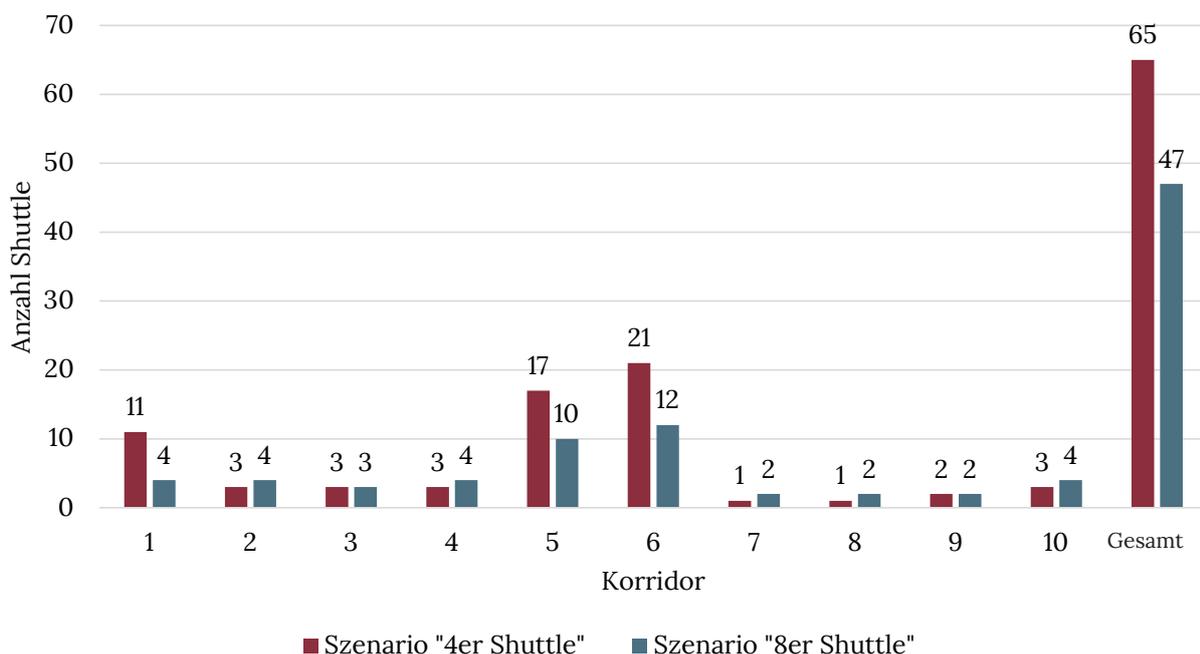
Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass es aus Komfortgründen gesellschaftlich oder politisch gewünscht wäre, den Takt zu erhöhen, um Wartezeiten für die Fahrgäste zu verkürzen. In einem solchen Fall müsste mit einer deutlichen Zunahme der benötigten Fahrzeuge gerechnet werden, was wiederum zu einer sinkenden Auslastung pro Shuttle führen und steigenden Kosten für das Shuttle-System zur Folge hätte.

Der Vergleich der beiden Szenarien „4er-Shuttle“ und „8er-Shuttle“ verdeutlicht den Einfluss der Shuttlegröße auf die Anzahl der benötigten Fahrzeuge. Wie auch intuitiv zu erwarten ist, führt der Einsatz größerer Shuttles zu einer Reduktion der benötigten Fahrzeuge bei gleicher Nachfrage (Abb. 26).

Auf der anderen Seite zeigt sich, dass größere Shuttles bei geringerer Nachfrage keine Effizienzvorteile bieten und tendenziell sogar mehr Shuttles benötigt werden, wenn auch auf niedrigem Niveau. Der Grund dafür liegt im Standardtakt und den längeren Warte- und Haltezeiten der größeren Shuttles. Solange die Shuttles im Standardtakt genügend Kapazität bieten bzw. die Nachfrage so gering ist, dass keine zusätzlichen Shuttles benötigt werden und der Takt nicht dichter sein muss, würde zunächst die gleiche Anzahl an Fahrzeugen ausreichen.

Allerdings ist die Warte- bzw. Haltezeit am Start- bzw. Endpunkt für die größeren Shuttles von längerer Dauer, da eine ausreichende zeitliche Reserve eingeplant werden muss,

ABB. 26: BENÖTIGTE SHUTTLE ZUR DECKUNG DER NACHFRAGE (EIGENE BERECHNUNG).



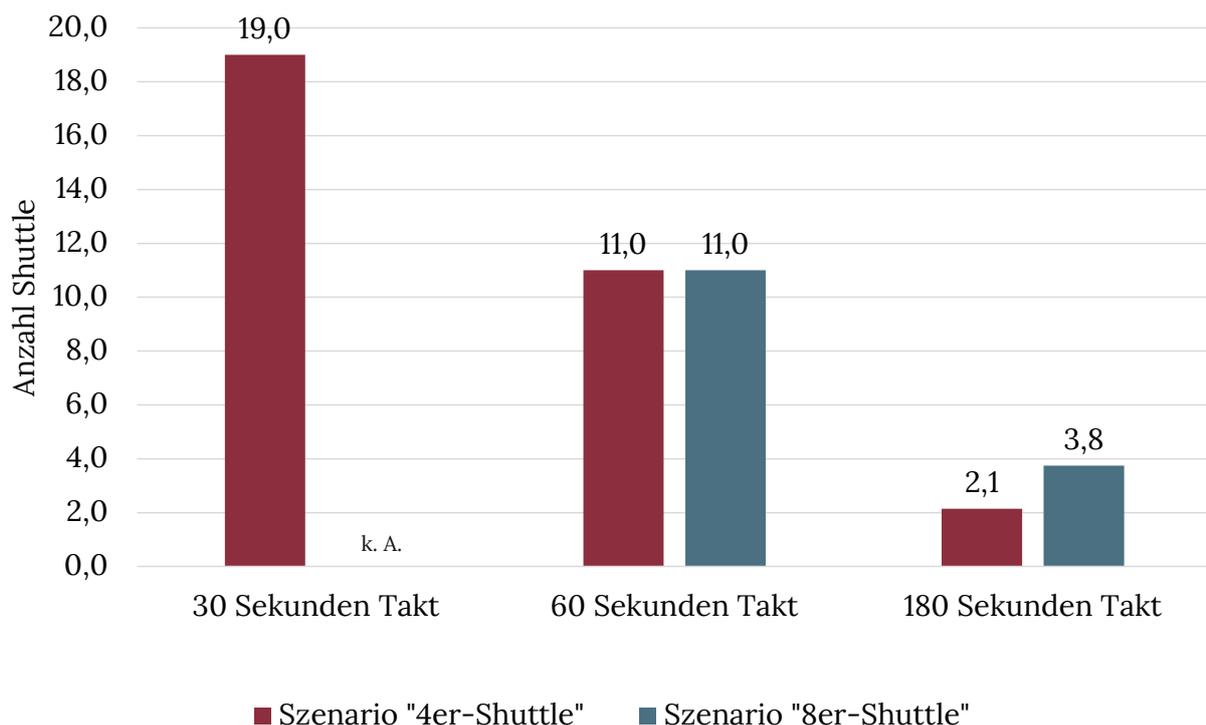
um bei voller Auslastung des Shuttles den Ein- und Ausstiegsvorgang zu gewährleisten. Im Durchschnitt liegt diese Wartezeit im Szenario „4er-Shuttle“ bei 72,8 Sekunden und im Szenario „8er-Shuttle“ bei 139,1 Sekunden. Im Szenario „8er-Shuttles“ ist es daher wahrscheinlicher, dass ein Fahrzeug länger in der Station verbleibt und daher nicht sofort wieder in den Takt eingegliedert werden kann. Aus diesem Grund wird öfter ein weiteres Fahrzeug benötigt werden, um den Standardtakt einzuhalten. Während also größere Shuttles bei hoher Nachfrage tendenziell effizienter sind, kann ihr Einsatz bei geringer Nachfrage zu Ineffizienzen führen.

Der Vergleich der beiden Szenarien „4er-Shuttle“ und „8er-Shuttle“ verdeutlicht den Einfluss der Shuttlegröße auf die Anzahl der benötigten Fahrzeuge. Wie auch intuitiv zu erwarten ist, führt der Einsatz größerer Shuttles zu einer Reduktion der benötigten Fahrzeuge bei gleicher Nachfrage.

Auf der anderen Seite zeigt sich, dass größere Shuttles bei geringerer Nachfrage keine Effizienzvorteile bieten und tendenziell sogar mehr Shuttles benötigt werden, wenn auch auf niedrigem Niveau. Der Grund dafür liegt im Standardtakt und den längeren Warte- und Haltezeiten der größeren Shuttles. Solange die Shuttles im Standardtakt genügend Kapazität bieten bzw. die Nachfrage so gering ist, dass keine zusätzlichen Shuttles benötigt werden und der Takt nicht dichter sein muss, würde zunächst die gleiche Anzahl an Fahrzeugen ausreichen.

Allerdings ist die Warte- bzw. Haltezeit am Start- bzw. Endpunkt für die größeren Shuttles von längerer Dauer, da eine ausreichende zeitliche Reserve eingeplant werden muss, um bei voller Auslastung des Shuttles den Ein- und Ausstiegsvorgang zu gewährleisten. Im Durchschnitt liegt diese Wartezeit im Szenario „4er-Shuttle“ bei 72,8 Sekunden und im Szenario „8er-Shuttle“ bei 139,1 Sekunden. Im Szenario „8er-Shuttles“ ist es daher

ABB. 27: Ø BENÖTIGTE SHUTTLE NACH TAKT (EIGENE BERECHNUNG).



wahrscheinlicher, dass ein Fahrzeug länger in der Station verbleibt und daher nicht sofort wieder in den Takt eingegliedert werden kann. Aus diesem Grund wird öfter ein weiteres Fahrzeug benötigt werden, um den Standardtakt einzuhalten. Während also größere Shuttles bei hoher Nachfrage tendenziell effizienter sind, kann ihr Einsatz bei geringer Nachfrage zu Ineffizienzen führen.

#### 4.6. BESTIMMUNG DER ANZAHL AN HALTEPOSITIONEN UND DES FLÄCHENBEDARFS

In diesem Kapitel werden die notwendigen Haltepositionen an der Verkehrsdrehscheibe, die als Start- und Endpunkt der Linien dienen, mithilfe verschiedener Berechnungsmethoden

ermittelt. Anschließend wird der Flächenverbrauch für diese Haltepositionen analysiert, und zwar sowohl während der Randzeiten, wenn die meisten Fahrzeuge abgestellt sind, als auch während des Maximalbetriebs zur Spitzenstunde. Abschließend wird evaluiert, ob sich dieser Flächenbedarf am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen decken ließe.

##### 4.6.1. ANZAHL HALTEPOSITIONEN

Die Anzahl der benötigten Haltepositionen an der Verkehrsdrehscheibe wird durch die Verweildauer der Shuttles an der Haltestelle und die Anzahl der Shuttles bestimmt, die während dieser Zeit die Station erreichen. Dies hängt von der Anzahl der Linien und deren

Tab. 18: ZUSAMMENFASSUNG DER BERECHNUNG DES SHUTTLEBEDARFS (EIGENE BERECHNUNG).

Berechnungsschritt	Faktoren
1. Ermittlung der Nachfrage nach Shuttle-Fahrten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anzahl der Einwohner*innen im Korridor (Kapitel 4.3.3.3, 4.4.1, 4.4.2)</li> <li>Demografische Verteilung im Planungsbereich (Kapitel 4.4.3)</li> <li>Mobilitätsgrad (Kapitel 4.4.4)</li> <li>Anzahl der Binnenpendler*innen (Kapitel 4.4.5)</li> <li>Verkehrsmittelwahl nach Distanz (Kapitel 4.4.6)</li> <li>Substitutionswahrscheinlichkeit (Kapitel 4.4.7)</li> </ul>
2. Ermittlung der Beförderungskapazität je Shuttle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Festlegung der Shuttlegrößen (Kapitel 4.3.2)</li> <li>Bestimmung der Matching-Qualität (Kapitel 4.3)</li> </ul>
3. Berechnung der Fahrzeit pro Shuttle	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umlaufzeit je Linie (Kapitel 4.5.1, 4.5.2)</li> <li>Berücksichtigung der Störungsreserve (Kapitel 4.5.2)</li> <li>Haltezeit für das Ein- und Aussteigen der Fahrgäste (Kapitel 4.5.4)</li> </ul>
4. Berechnung der Shuttle-Kapazität pro Stunde	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anzahl der Fahrten pro Shuttle pro Stunde (Kapitel 4.5.5)</li> <li>Berücksichtigung der Matching-Qualität (Kapitel 4.3)</li> </ul>
5. Vergleich der Shuttle-Kapazität mit der Nachfrage	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abgleich der berechneten Shuttle-Kapazität mit der ermittelten Nachfrage (Kapitel 4.5.5)</li> <li>Anpassung der Shuttle-Anzahl, falls die Kapazität nicht ausreicht (Kapitel 4.5.6)</li> </ul>
6. Bestimmung der endgültigen Shuttle-Anzahl	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verifizierung, dass sowohl die Beförderungskapazität als auch der Takt für jede Linie gewährleistet ist (Kapitel 4.5.4)</li> <li>Ermittlung der insgesamt notwendigen Anzahl an Shuttles für den Betrieb eines automatisierten Shuttlesystems kollektiver Nutzung am Bahnhof Tiefenbrunnen (Kapitel 4.5.6)</li> </ul>

Takt ab. Zur Ermittlung der optimalen Anzahl wird zunächst ein statisches Modell genutzt, welches eine theoretische Untergrenze liefert. Anschließend wird die Erlang-C-Formel angewendet, um die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, dass ein Shuttle bei Ankunft keine freie Halteposition vorfindet. Die Ergebnisse der Erlang-C-Formel werden durch eine Simulation überprüft, die eine realitätsnahe Abschätzung unter Berücksichtigung von Takt, Verweildauer und Linienanzahl ermöglicht. Die detaillierte Aufschlüsselung und Berechnung der einzelnen Schritte wird im Folgenden dargestellt.

Die Kapazität einer Haltestelle wird durch die Anzahl der Haltepositionen sowie die Dauer der Haltevorgänge bestimmt. Grundsätzlich sollte die Anzahl der Haltepositionen möglichst gering gehalten werden, damit der Flächenbedarf minimiert und die trennende Wirkung ausgedehnter Haltestellenbereiche reduziert wird. Zudem werden Wege für die Fahrgäste kurz gehalten sowie die Orientierung erleichtert (FGSV 2003, S. 78). Kurze Wege sind besonders wichtig bei Haltestellen für automatisierte Shuttles mit dichtem Takt und kurzen Haltezeiten, um den Fahrgästen ein rechtzeitiges Erreichen des Shuttles zu ermöglichen.

Zur Berechnung der nötigen Haltepositionen sind die Verweildauer der Shuttles an der betreffenden Haltestelle sowie die Anzahl der Shuttles, die während dieser Verweildauer die Station erreichen, von Bedeutung. Wie viele Shuttles innerhalb dieses Zeitraums an der Haltestelle eintreffen, hängt von der Anzahl der Linien, welche diese Haltestelle bedient, sowie vom Takt dieser Linien ab.

Die Anzahl der notwendigen Haltepositionen wird mithilfe mehrerer Berechnungen schrittweise ermittelt. Zunächst wird die Anzahl der erforderlichen Haltepositionen im statischen Modell berechnet. Dieses Modell beschreibt einen theoretisch denkbaren Betriebsablauf,

bei dem die Takte der Linien so aufeinander abgestimmt sind, dass möglichst wenige Fahrzeuge gleichzeitig in der Station ankommen. Dabei werden sämtliche Abweichungen vom regulären Takt vernachlässigt; lediglich die Störungsreserve bleibt in der Berechnung berücksichtigt.

Das statische Modell liefert eine theoretische Untergrenze für die Anzahl der benötigten Haltepositionen. Diese kann als Referenz dienen, um die minimale Infrastruktur zu ermitteln, die bei optimal abgestimmten Fahrplänen erforderlich wäre. Die ideale Berechnung zeigt Potenziale für eine bessere Abstimmung der Takte auf. Durch gezielte Anpassungen des Fahrplans lässt sich die gleichzeitige Ankunft mehrerer Shuttles minimieren und die Anzahl der benötigten Haltepositionen reduzieren.

Um die Anzahl der benötigten Ressourcen in einem realistischeren Betriebsszenario zu ermitteln, wird ferner die Erlang-C-Formel angewendet. Diese Formel ermöglicht die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Teil eines Systems (in diesem Fall ein Shuttle) eine warten muss, bevor eine benötigte Ressource (in diesem Fall eine Halteposition) verfügbar wird.

In diesem Fall besteht die Zielvorgabe darin, dass Shuttles eine freie Halteposition vorfinden. Die Wahrscheinlichkeit dafür wird mit 95 % vorgegeben, sodass nur eines von zwanzig Shuttles bei Ankunft keine freie Halteposition vorfindet. Zusätzlich werden Berechnungen mit variierten Wahrscheinlichkeiten durchgeführt, um die Auswirkungen auf die benötigte Anzahl an Haltepositionen zu analysieren. Abweichend von der Erlang-C-Formel ist hier also nicht die Berechnung der Wahrscheinlichkeit relevant, dass ein Shuttle warten muss, sondern die Bestimmung der Anzahl der Haltepositionen, die erforderlich sind, um diese vorgegebene Wahrscheinlichkeit einzuhalten. Die Erlang-C-Formel wird dazu entsprechend umgeformt.

Um die Ergebnisse der Erlang-C-Formel auf Plausibilität zu überprüfen und eine weitergehende Analyse der betrieblichen Abläufe zu ermöglichen, werden die Berechnungen zuletzt durch eine Simulation getestet. Hierfür wird der Warteschlangensimulator des Simulationswissenschaftlichen Zentrums Clausthal-Göttingen (SWZ o. J.) genutzt. Dieser Simulator erlaubt eine realitätsnahe Abschätzung der benötigten Haltepositionen, da der spezifische Takt der Linien sowie die Verweildauer an der Halteposition für jede Linie eingegeben und simuliert werden können.

Die Ergebnisse der zuvor durchgeführten grundlegenden Berechnungen (Kapitel 4.4, 4.5), wie die Anzahl der Fahrzeuge pro Linie, der jeweilige Takt der Linien, die Wartezeiten sowie die Ankünfte pro Stunde, bilden jeweils die Ausgangswerte für die weitergehenden Berechnungen.

#### 4.6.1.1. BERECHNUNG DER MINDESTANZAHL AN HALTEPOSITIONEN IM STATISCHEN MODELL

Zunächst wurde die Berechnung der notwendigen Anzahl an Fahrzeugen im Shuttle-System durchgeführt, ohne dass ein Variationskoeffizient berücksichtigt wurde. Dies bedeutet, dass die Berechnungen auf der theoretischen Annahme basieren, dass sämtliche Shuttles zum optimalen Zeitpunkt starten und ankommen. Es wird angenommen, dass es keine Verzögerungen oder Schwankungen in den Ankunftszeiten gibt und die Abstände zwischen den ankommenden Fahrzeugen konstant bleiben.

Dieser Ansatz stellt ein statisches Modell dar, bei dem alle betrieblichen Einflüsse, wie Verkehrsbedingungen, Verzögerungen oder sonstige Faktoren, vollständig vernachlässigt werden. In einem solchen theoretischen Szenario wäre es möglich, dass das System stets nach einem perfekt

Ankunftsintervall je Linie: Um die Anzahl der Shuttles zu berechnen, die gleichzeitig an der Station warten oder sich dort aufhalten, wird das Verhältnis zwischen der Wartezeit der Shuttles an der Station und dem Takt der jeweiligen Linie herangezogen. Die Anzahl der Shuttles, die gleichzeitig an der Station sein können, wird dann durch das Verhältnis der Wartezeit zum Takt der jeweiligen Linie berechnet. Diese Berechnung liefert eine theoretische Anzahl an Shuttles, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt an der Station befinden.

$$n_{\text{haltepositionen}} = \frac{t_{\text{verweil}}}{T_{\text{linie}}}$$

Verweildauer: Der Zeitbedarf, den Shuttles an Haltestellen benötigen, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kapazität der jeweiligen Haltestelle. Die Verweildauer eines Shuttles an einer Haltestelle ergibt sich der Zeit, die für das Ein- und Aussteigen der Fahrgäste nötig ist, bzw., im Fall des Start- bzw. Endhaltes, der Wartezeit, bis sich ein Shuttle wieder in den Linien Takt eingliedern kann.

$$n_{\text{haltepositionen}} = \frac{t_{\text{verweil}}}{T_{\text{linie}}}$$

Verweildauer: Der Zeitbedarf, den Shuttles an Haltestellen benötigen, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kapazität der jeweiligen Haltestelle. Die Verweildauer eines Shuttles an einer Haltestelle ergibt sich der Zeit, die für das Ein- und Aussteigen der Fahrgäste nötig ist, bzw., im Fall des Start- bzw. Endhaltes, der Wartezeit, bis sich ein Shuttle wieder in den Linien Takt eingliedern kann.

$$T_{\text{verweil}} = T_{\text{ein/ausstieg}} + T_{\text{warten}}$$

Bei einem Takt von 180 Sekunden ergeben sich Verweildauern für die meisten Shuttle-Linien von ca. 100 Sekunden. Dabei wird die Wartezeit zur Wiedereingliederung in den Takt mit der Zeit für das Anhalten und den Ein- und Ausstieg der Fahrgäste abgeglichen. Liegt die Taktwartezeit über der für das Anhalten und

den Fahrgastwechsel benötigten Dauer, werden die Ein- und Ausstiegszeit sowie die Zeit für das Anhalten nicht weiter berücksichtigt, da diese Vorgänge bereits innerhalb der Taktwartezeit vollzogen werden.

$$T_{\text{warten}} = T_{\text{takt}} - T_{\text{ein/ausstieg}}$$

**Anzahl Haltepositionen:** Um die Anzahl der gleichzeitig an einer Haltestelle wartenden Fahrzeuge zu bestimmen, ist das Verhältnis zwischen dem mittleren Ankunftsintervall und der Verweildauer der Shuttles von Belang. Dabei gibt das Ankunftsintervall bzw. der Takt an, in welchen zeitlichen Abständen die Shuttles im Durchschnitt an der Haltestelle eintreffen, während die Verweildauer beschreibt, wie lange ein Shuttle an der Haltestelle bleibt, um Fahrgäste ein- und aussteigen zu lassen oder bis es sich wieder in den festgelegten Takt einfügen kann.

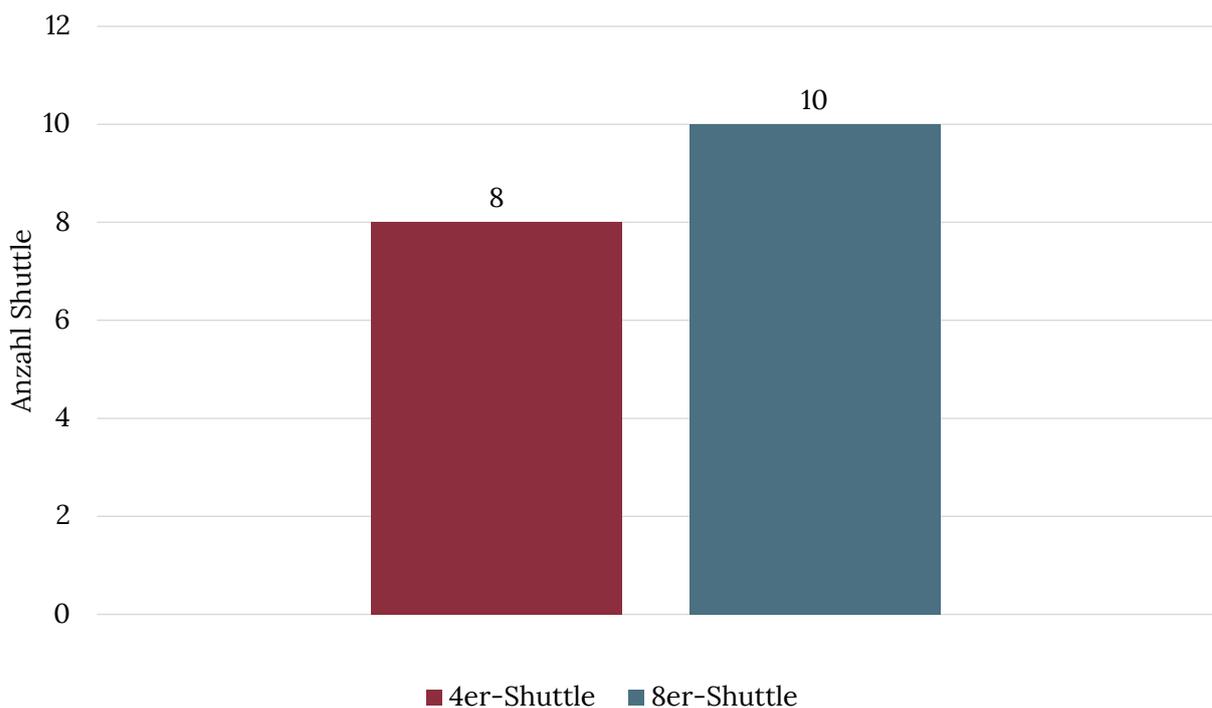
Ist die Verweildauer eines Shuttles an der Haltestelle länger als das Ankunftsintervall,

überlagert sich der Aufenthalt und die Ankunft einer oder mehrere Fahrzeuge. Die Berechnung der Anzahl der gleichzeitig wartenden Fahrzeuge erfolgt, indem die Verweildauer und das mittlere Ankunftsintervall in Bezug gesetzt werden:

$$N_{\text{shuttle}} = \left\lceil \frac{T_{\text{verweil}}}{I_{\text{ankunft}}} \right\rceil$$

Das Ergebnis zeigt die Anzahl der Shuttles, die sich gleichzeitig an der Haltestelle aufhalten (Abb. 28). Da Bruchteile von Fahrzeugen oder Haltepositionen in der Praxis selten vorkommen bzw. wenig sinnvoll erscheinen, wird deren Anzahl jeweils aufgerundet. Auf dieser Grundlage konnte für jede Linie berechnet werden, wie viele Shuttles während der jeweiligen Verweildauer die Station erreichen. Diese Werte wurden dann addiert, um die erforderliche Anzahl an Haltepositionen zu bestimmen, die im statischen Modell benötigt werden, um genügend Halteplätze zur Verfügung zu stellen.

ABB. 28: ERFORDERLICHE ANZAHL AN HALTEPOSITIONEN ZUR SPITZENSTUNDE ZWISCHEN 07:00 UND 08:00 UHR IM STATISCHEN MODELL (EIGENE BERECHNUNG).



Im Ergebnis ergibt sich eine Anzahl von 8 Haltepositionen für das Szenario „4er-Shuttle“ und 10 Haltepositionen für das Szenario „8er Shuttle“. Es zeigt sich, dass in diesem statischen Modell für kleinere Shuttles (4-Personen-Shuttles) aufgrund eines höheren Takts zwar mehr Fahrzeuge auf den Linien unterwegs sind. Ausschlaggebend für die Anzahl der Haltepositionen ist jedoch vor allem der längere Zeitbedarf für das Ein- und Aussteigen der Fahrgäste bei den 8-Personen-Shuttles. Diese Shuttles verweilen länger an der Station und da der Takt sowohl bei den 4-Personen-Shuttles als auch bei den 8-Personen-Shuttles auf den meisten Linien 180 Sekunden beträgt, erreichen während dieser Zeit mehr Fahrzeuge die Station, was zu den zusätzlichen Haltepositionen für die 8er-Shuttles führt.

Die bisherige Berechnung liefert lediglich eine theoretische Untergrenze für die Anzahl der benötigten Halteplätze. In realen Betriebsumgebungen lassen sich ideale Bedingungen, wie eine gleichmäßige Auslastung und perfekt abgestimmte Fahrpläne, jedoch kaum erreichen. Um eine praxisnahe und realistischere Dimensionierung zu gewährleisten, werden im Folgenden ergänzende Berechnungsmethoden herangezogen, die zusätzliche Einflussfaktoren berücksichtigen.

#### 4.6.1.2. ERLANG-C-FORMEL ZUR BERÜCKSICHTIGUNG VARIIERENDER ANKUNFTSZEITEN

Die Erlang-C-Formel ist ein etabliertes Verfahren zur Analyse von Warteschlangensystemen, in denen Kunden oder Einheiten (z.B. Anrufe in einem Callcenter, Aufträge in einem Produktionssystem oder ankommende Fahrzeuge) von mehreren Bedienern bedient werden. Sie ermöglicht die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass eine ankommende Einheit warten muss. Die Formel basiert auf der Annahme von exponentiell

verteilten Kundenankünften und ebenfalls exponentiell verteilten Bedienzeiten (Herzog 2021, S. 71).

In dieser Diplomarbeit wird die Erlang-C-Formel verwendet, um eine erste Abschätzung über die nötigen Haltepunkte für das Shuttle-System zu erlangen. Die Formel bietet den Vorteil einer einfachen Berechenbarkeit und liefert in vielen Fällen eine ausreichend genaue Abschätzung der fraglichen Komponente (Herzog 2021, S. 71).

Die Erlang-C-Formel hat jedoch auch Grenzen, da sie beispielsweise von einer unendlichen Größe des Warteraums und exponentiell verteilten Bedienzeiten ausgeht, was in der Praxis kaum möglich ist (Herzog 2021, S. 71). Um diese Aspekte nicht zu vernachlässigen und genauere Ergebnisse zu erzielen, werden die Ergebnisse daher lediglich als Ausgangspunkt für die folgende Simulation verwendet.

Um die Menge an benötigten Haltepositionen mithilfe der Erlang-C-Formel anzunähern, wird das Problem als Warteschlangenmodell betrachtet, bei dem die Shuttles an einer begrenzten Anzahl von Haltepositionen bedient werden müssen. Ziel ist es, die Anzahl der Haltepositionen abzuschätzen, um sicherzustellen, dass ankommende Shuttles immer eine freie Halteposition vorfinden.

Die Erlang-C-Formel eignet sich gut für Systeme, in denen Ankunfts- und Serviceprozesse unregelmäßig verlaufen, was in der Praxis auf ein Shuttle-System zutrifft. Tatsächliche Ankünfte und Abfahrten weichen in der Realität oft von den anvisierten und theoretisch möglichen Zeiten ab. Dies gilt insbesondere für das Shuttlesystem, da neben betriebsbedingten Störungen auch leichte Abweichungen von der Route aufgrund unterschiedlicher Fahrplanforderungen zu variierenden Weglängen und damit Umlaufzeiten führen.

Die Erlang-C-Formel wird verwendet, um die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, dass ein Shuttle, das an einer Halteposition ankommt, warten muss, bevor es bedient wird. Die allgemeine Formel lautet:

$$P_w = \frac{\frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} \cdot \frac{n}{n - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)}}{\sum_{k=0}^{n-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{k!} + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} \cdot \frac{n}{n - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)}}$$

Dabei ist:

- $P$  Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Shuttle warten muss, bevor es bedient werden kann.
- $\lambda$  Die durchschnittliche Ankunftsrate der Shuttles pro Zeiteinheit (z. B. die Anzahl der Shuttles, die pro Stunde ankommen).
- $\mu$  Die durchschnittliche Service-Rate an einem Haltepunkt, also die Anzahl der Shuttles, die pro Stunde abgefertigt werden können.
- $m$  Die Anzahl der verfügbaren Haltepunkte.

Die Erlang-C-Formel beschreibt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass bei einer gegebenen Anzahl an Haltepositionen ein ankommendes Fahrzeug eine freie Halteposition vorfindet. In diesem Fall wird die Wahrscheinlichkeit jedoch vorgegeben, dass ein Fahrzeug bei Ankunft an der Station eine freie Halteposition vorfindet. Angestrebt wird dabei eine Wahrscheinlichkeit von 95 %, wobei auch die Szenarien mit 50 %, 75 %, 90 % und 99 % getestet werden.

Da die Gleichung eine Summe und eine Fakultät enthält, lässt sich die Anzahl der benötigten Haltepositionen nicht direkt berechnen. Um die Anzahl der Haltepositionen zu ermitteln, wenn die Wahrscheinlichkeit für Wartezeiten sowie die Ankunfts- und Bedienzeiten bekannt sind, muss die Gleichung numerisch gelöst werden. Dies bedeutet, dass die Anzahl der Haltepositionen iterativ so lange erhöht wird, bis

die vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten erreicht oder überschritten werden.

$$f(N) = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{k=0}^{N-1} \frac{A^k}{k!} + \frac{A^N}{N!} \cdot \frac{1}{N - A}} - P_w$$

Nachdem die Werte für die Ankunftsrate sowie Bedienzeiten und die vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten, dass ein Shuttle nicht warten muss, in die Erlang-C-Formel eingesetzt werden, erfolgt die Berechnung der benötigten Haltepositionen für verschiedene Szenarien. Für jedes Szenario wird die Anzahl der Haltepositionen iterativ erhöht, bis die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten, dass ein Shuttle bei Ankunft eine freie Halteposition vorfindet, erfüllt sind.

Zunächst zeigt sich, dass, obwohl die 4er-Shuttles deutlich häufiger ankommen als die 8er-Shuttles (440 Mal in der Stunde gegenüber 280 Mal in der Stunde), das System für beide Shuttlegrößen nahezu die gleiche Anzahl an Haltepositionen benötigt. Diese Erkenntnis ist besonders überraschend, da intuitiv erwartet werden würde, dass die kleineren Shuttles aufgrund ihrer Menge und Fahrthäufigkeit deutlich mehr Haltepositionen benötigen. Die Erklärung liegt darin, dass die 4er-Shuttles zwar häufiger ankommen, jedoch kürzere Haltezeiten haben, während die 8er-Shuttles seltener ankommen, aber länger in der Station verweilen. Dies führt dazu, dass die Anzahl der benötigten Haltepositionen für beide Shuttletypen annähernd gleich ist.

Weiterhin zeigt sich, dass zwischen den Service Levels von 50 %, 75 %, 90 % und 95 % die Anzahl der benötigten Haltepositionen kontinuierlich aber moderat steigt. Diese moderaten prozentualen Anstiege verdeutlichen, dass nur geringfügig mehr Haltepositionen hinzugefügt werden müssen, um die Wahrscheinlichkeit,

dass ein ankommendes Fahrzeug warten muss, deutlich zu verringern. Beispielsweise müsste bei 10 Haltepositionen jedes zweite Fahrzeug warten, während bei 14 Haltepositionen nur jedes zwanzigste Fahrzeug warten müsste. Dies zeigt, dass mit einer vergleichsweise kleinen Erhöhung der Haltepositionen eine signifikante Verbesserung des Service Levels erreicht werden kann.

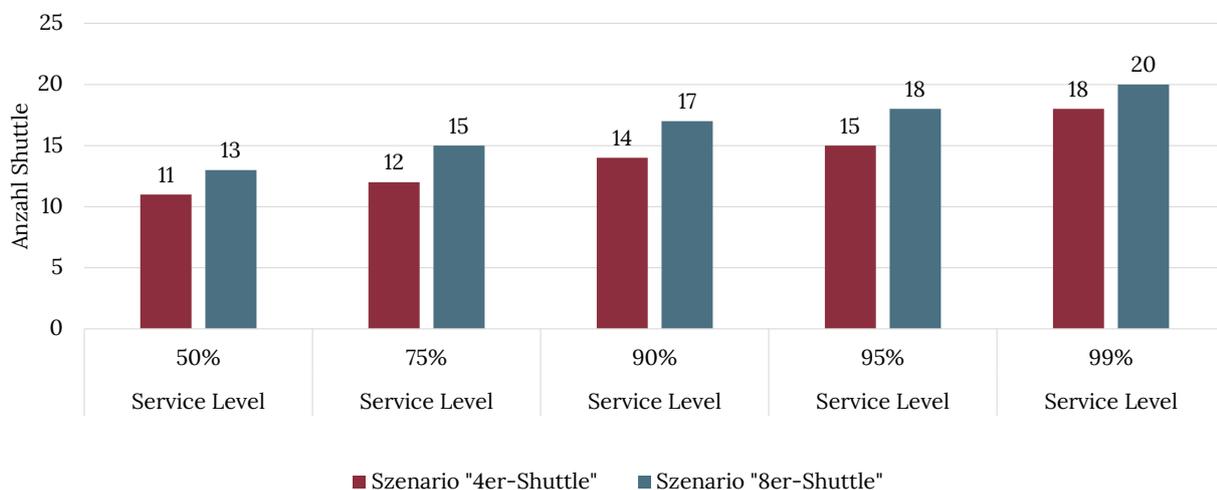
Allerdings gilt dies nur bis zu einem Service Level von etwa 95 %. Für sowohl die 4-Personen- als auch die 8-Personen-Shuttles scheint die Anzahl der benötigten Haltepositionen bei einem Service Level von etwa 95 % einen Sättigungspunkt zu erreichen. Zwischen den Service Levels von 95 % und 99 % zeigt sich für beide Shuttletypen ein deutlicher Anstieg bei den benötigten Haltepositionen. Dies deutet darauf hin, dass je näher das System einer nahezu perfekten Servicequalität von 99 % kommt, desto unverhältnismäßig mehr Ressourcen erforderlich sind. Das System kann höhere Serviceanforderungen bis zu 95 % mit relativ wenigen zusätzlichen Ressourcen erfüllen, aber darüber hinaus wird jede weitere Verbesserung der Effizienz zunehmend unverhältnismäßig zum Aufwand (Abb. 29).

#### 4.6.1.3. SIMULATION ZUR KONKRETISIERUNG DER NOTWENDIGEN ANZAHL AN HALTEPOSITIONEN

Der zentrale Bestandteil der Methodik dieser Arbeit ist die Simulation mit dem Warteschlangensimulator (Herzog 2021, S. 77, SWZ o. J.). Diese Simulation ermöglicht die Modellierung von Systemen mit mehreren Bedienstationen, wie beispielsweise Haltepositionen. Dabei werden Ankunftsdaten, Servicezeiten und die Anzahl der Bedienstationen berücksichtigt. Im Gegensatz zum Erlang-C-Modell, das lediglich mit gemittelten Ankunftsdaten und Verweilzeiten an den Haltepositionen über alle Linien arbeitet, ermöglicht der Warteschlangensimulator die Verwendung von detaillierteren Input-Daten, indem die Ankunftsdaten und Servicezeiten je Linie berücksichtigt werden. Dadurch wird der Anteil an Durchschnittswerten, die angenommen werden müssen, deutlich reduziert und präzisere Ergebnisse erzielt.

Der Warteschlangensimulator basiert auf der Warteschlangentheorie, welche die Dynamik von Warteprozessen in Systemen mit begrenzten Ressourcen untersucht. Mithilfe mathematischer Modelle lässt sich analysieren, wie Einheiten, wie z.B. Shuttles, in das System eintreten, bedient

ABB. 29: ANZAHL NÖTIGER HALTEPOSITIONEN NACH SERVICE-LEVEL (EIGENE BERECHNUNG).



werden und wie lange sie möglicherweise warten müssen, wenn alle Haltepositionen belegt sind (Herzog 2021).

In der praktischen Anwendung wird zunächst ein Modell des Shuttle-Systems erstellt, das die Anzahl der Haltepositionen, Ankunftsraten und Bedienzeiten der Shuttle-Linien berücksichtigt. Das Modell wird so aufgebaut, dass jede Shuttle-Linie separat abgebildet wird. Dies erlaubt es, statt auf Durchschnittswerte zu setzen, die unterschiedlichen Taktungen und Auslastungen jeder Linie individuell zu simulieren. Durch die detaillierte Modellierung der Systembedingungen können verschiedene Szenarien dargestellt werden, etwa wie sich eine Veränderung der Anzahl an Haltepositionen auf die Wartezeiten auswirkt.

Nach Abschluss der Simulation werden die Ergebnisse analysiert. Dabei stehen insbesondere Kennzahlen wie die Anzahl der wartenden Einheiten, die durchschnittliche Wartezeit sowie die Auslastung der Bedienstationen im Fokus.

Der Warteschlangensimulator wird in dieser Arbeit vor allem dazu genutzt, um genauere Erkenntnisse über die nötigen Haltepositionen zu gewinnen, die über die erste Abschätzung mit der Erlang-C-Formel hinausgehen. Diese detaillierteren Ergebnisse ermöglichen eine präzisere Einschätzung der erforderlichen Ressourcen und Kapazitäten, in diesem Fall der Haltepositionen. Besonders vorteilhaft ist dabei, dass verschiedene Szenarien simuliert werden können, um die Auswirkungen von Veränderungen an der Anzahl an Bedienstationen bzw. Haltepositionen im System zu testen.

In dieser Arbeit wird der Simulator genutzt, um die Ergebnisse der Annäherung mit der Erlang-C-Formel auf Plausibilität zu prüfen und weiter zu konkretisieren. Der Simulator ermöglicht eine differenziertere Nachbildung

der Systembedingungen, indem er Faktoren wie Ankunftsrate und Haltepositionen unter Berücksichtigung von Varianzen einbezieht. Besonders wichtig ist, dass der Simulator die einzelnen Shuttle-Linien separat abbilden kann, sodass bei der Berechnung auf Durchschnittswerte weitgehend verzichtet werden kann.

Zudem wird durch die Möglichkeit, die Linien separat zu betrachten, eine genauere Analyse des Systems ermöglicht, da die spezifischen Unterschiede zwischen den Linien berücksichtigt werden. Im Gegensatz zur Verwendung von Durchschnittswerten, erlaubt die Simulation eine präzisere Abbildung der Systemdynamik. Obwohl der Simulator das System vereinfacht darstellt, kann er dennoch zeigen, wie unterschiedliche Taktungen, Ankunftszeiten und Auslastungen die Warteschlangen und Haltepositionen beeinflussen. Dies ermöglicht fundiertere Annahmen über die Leistungsfähigkeit und potenzielle Engpässe im Shuttle-System. Besonders die individuelle Linienbetrachtung ermöglicht es, Unterschiede im Verhalten der Warteschlangen auf jeder Linie zu berücksichtigen, während die Erlang-C-Formel nur Durchschnittswerte für das gesamte System liefert. Insgesamt ermöglicht der Simulator eine konkretere Analyse, wie z.B. die Ermittlung der Wartezeiten pro Linie oder die Auslastung der Haltepositionen, was wertvolle Informationen für die Optimierung des Systems liefert.

Zunächst wird jede Linie als Quelle angelegt. Die Quelle entspricht dabei einer Shuttle-Linie, für die der jeweilige Linientakt als mittlere Zwischenankunftszeit angegeben wird. Dabei wird der Takt der Linie mit einer Abweichung von  $\pm 60$  Sekunden berücksichtigt. Die ausgehenden Shuttles werden nicht wieder in das System einbezogen, sodass sich aufbauende Folgeverspätungen nicht berücksichtigt werden. Diese und die Tendenz zu Verspätungen

werden im Modell nicht berücksichtigt, was in zukünftigen Analysen verbessert werden könnte.

Ein Verteiler sortiert die ankommenden Fahrzeuge nach dem First-Come-First-Serve-Prinzip und weist sie der nächsten verfügbaren Bedienstation zu.

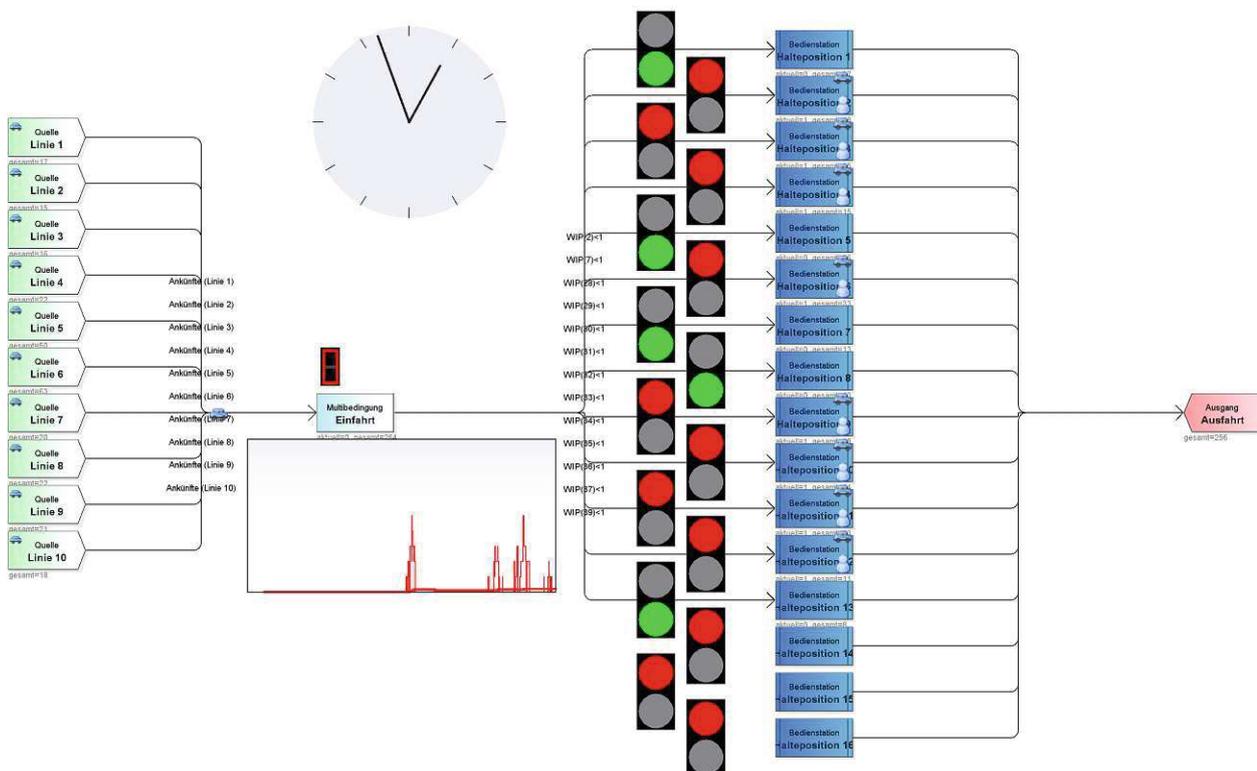
Die Implementierung der Bedienstationen, welche die Haltepositionen repräsentieren, erfolgt basierend auf den Ergebnissen der Annäherung mithilfe der Erlang-C-Formel mit eine Service-Level von 90 %. Das System wird also so ausgelegt, dass 90 % der ankommenden Shuttles sofort eine freie Halteposition finden, ohne warten zu müssen. Ursächlich dafür ist, dass der Simulator keine Auflösung der statistischen Daten über das 90 % Quantil hinaus zulässt. Für jede Bedienstation wird die in Kapitel 7.2.4 ermittelte Wartezeit der jeweiligen Shuttle-Linie als Bedienzeit verwendet. Für die weiteren Stationen, welche die Anzahl der Linien übersteigen, wird die durchschnittliche Wartezeit aller Linien als Bedienzeit

angenommen. Jede Haltestelle kann zu einem Zeitpunkt nur ein Shuttle bedienen.

Für jede Simulation wurden 10 Millionen Fahrten simuliert. Die Simulationen wurden für die Anzahl an Haltepositionen durchgeführt, die gemäß der Erlang-C-Formel ein Service-Level von 90 % garantieren soll, also dass maximal jedes 10. Shuttle warten muss. In der Analyse der Wartezeiten an den Haltepositionen bestätigt sich, dass mit zunehmender Anzahl an Haltestellen die durchschnittliche Wartezeit der Shuttles signifikant abnimmt.

Für das Szenario „4er-Shuttle“ betrug bei einer Konfiguration mit 11 Haltepositionen die mittlere Anzahl wartender Shuttles 0,2, was bedeutet, dass im Durchschnitt jedes fünfte Shuttle eine Wartezeit hatte. In seltenen Fällen betrug die maximale Anzahl der gleichzeitig wartenden Shuttles bis zu 18. Mit der Erweiterung auf 12 Haltepositionen verringerte sich die mittlere Anzahl wartender Shuttles auf 0,1. Dies bedeutet, dass im Durchschnitt nur jedes zehnte Shuttle

ABB. 30: SIMULATIONSAUFBAU (EIGENE DARSTELLUNG NACH SWZ O. J.).



warten musste. Auch in diesem Szenario konnte in Ausnahmefällen die maximale Anzahl wartender Shuttles 18 erreichen.

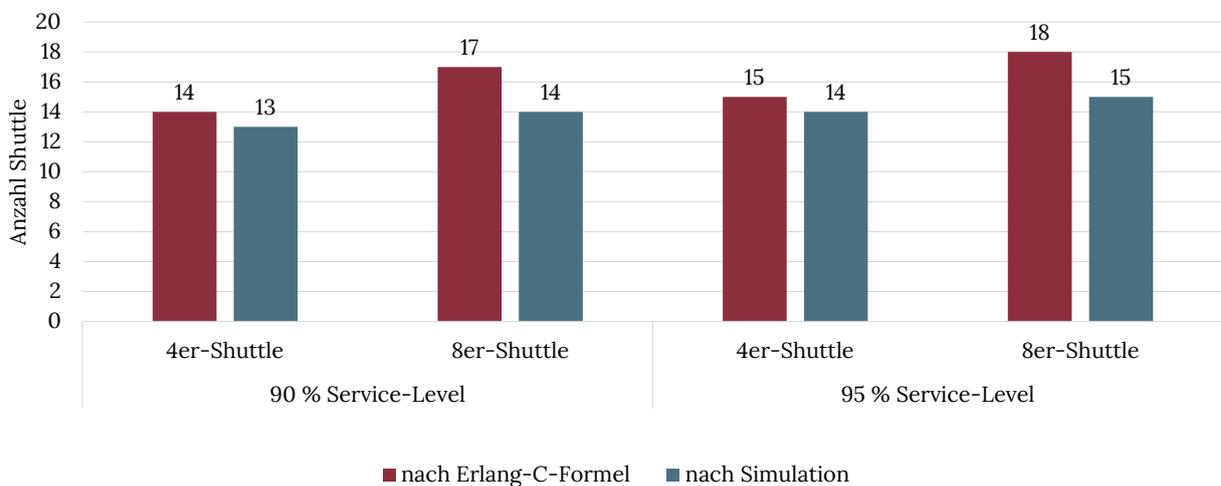
Bei einer weiteren Erhöhung auf 13 Haltepositionen zeigte sich ein deutlicher Rückgang der Wartezeiten. Die mittlere Anzahl wartender Shuttles betrug 0, was bedeutete, dass mindestens im 90 %-Quantil kein Shuttle warten musste. Allerdings konnten in seltenen Fällen bis zu 14 Shuttles gleichzeitig in der Warteschlange stehen. Während also bei 11 und 12 Haltepositionen noch regelmäßig Wartezeiten auftraten, wurde bei 13 Haltepositionen für 9 von 10 Shuttles keine Wartezeit mehr verzeichnet. Trotzdem traten in seltenen Extremfällen weiterhin längere Wartezeiten auf, wenn auch seltener und mit einer geringeren maximalen Anzahl wartender Shuttles.

Für das Szenario „8er-Shuttle“ ist die Auflösung der Auswertung zu gering, um genau zu bestimmen, ob und wie viele Shuttles bei einer Konfiguration mit 16 Haltepositionen tatsächlich warten mussten. Mit der Reduktion auf 15 sowie auf 14 Haltepositionen liegt dieser Anteil jedoch im Bereich der gelieferten statistischen Daten. Es zeigt sich, dass die mittlere Anzahl wartender Shuttles bei 0,1 liegt. Dies bedeutet, dass im Durchschnitt jedes 10.

Shuttle keine freie Halteposition direkt antrifft. In diesen Szenarien konnten in Ausnahmefällen bis zu 19 Shuttles bei 15 Haltepositionen bzw. bis zu 23 bei 14 Haltepositionen gleichzeitig warten. Bei nur 13 Haltepositionen erhöhte sich die mittlere Anzahl wartender Shuttles deutlich auf 0,3, was bedeutet, dass im Durchschnitt jedes 3. bis 4. Shuttle eine Wartezeit hatte. In seltenen Fällen mussten bis zu 21 Shuttles gleichzeitig warten.

Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse, dass bei 16 Haltepositionen das 90 %-Service-Level übererfüllt wurde, während bei 15 und 14 Haltepositionen etwa jedes 10. Shuttle eine Wartezeit hatte, was dem angestrebten 90 %-Service-Level entspricht. Bei 13 Haltepositionen verschlechterte sich die Situation deutlich, sodass etwa jedes 3. bis 4. Shuttle warten musste. Diese Ergebnisse zur maximalen Anzahl wartender Shuttles sind allerdings vor allem auf die hohe Anzahl simulierter Fahrten zurückzuführen, die 10 Millionen betragen. Dies entspricht 22.727 Spitzenstunden bzw. einer dauerhaften Hauptverkehrszeit über einen Zeitraum von 947 Tagen. Die maximal wartenden Shuttles sind daher vernachlässigbar für die Bestimmung der Anzahl an Haltepositionen.

ABB. 31: ANZAHL SHUTTLE NACH BERECHNUNGSMETHODE UND SERVICE-LEVEL (EIGENE DARSTELLUNG NACH SWZ O. J.).



Tab. 19: ÜBERSICHT DER INPUT-FAKTOREN JE BERECHNUNGSMETHODE (EIGENE DARSTELLUNG).

Berechnungs- methode	Input-Faktor	Wert	Erläuterung
<b>Statisches Modell</b>	Ankunftsintervall je Linie	Entspricht dem Takt der Linie (30 bis 180 Sekunden)	Zeitlicher Abstand je Linie in dem die Shuttles an der Haltestelle eintreffen.
	Bedienzeit je Linie	Je Linie, zwischen 39 und 209 Sekunden	Verweildauer der Shuttles je Linie an einer Halteposition.
<b>Erlang-C- Formel</b>	Mittleres Ankunftsintervall über alle Linien	8,18 Sekunden	Alle 8,18 Sekunden trifft durchschnittlich ein Shuttle an der Station ein.
	Bedienzeit	66,6 Sekunden	Durchschnittlich, über alle Linien, Verweildauer der Shuttles 66,6 Sekunden an einer Halteposition.
	Verteilung der tatsächlichen Ankünfte und Bedienzeiten	exponentiell verteilt	Die Ankunfts- und Bedienzeiten der Shuttles sind exponentiell verteilt, sie variieren zufällig, wobei kürzere Zeiten häufiger auftreten als längere.
	Akzeptierte Wartezeit bei Ankunft in [s]	0 Sekunden	Zielvorgabe für die maximale Wartezeit eines Shuttles bei Ankunft an der Station, bis ein Halteplatz frei wird.
	Service Level	50 %, 75 %, 90 %, 95 %, 99 %	Anteil der Fälle, in denen ein Shuttle längere als die akzeptierte Wartezeit bei Ankunft an der Station warten muss.
<b>Simulation</b>	Ankunftsintervall je Linie	Entspricht dem Takt der Linie (30 bis 180 Sekunden)	Zeitlicher Abstand je Linie in dem die Shuttles an der Haltestelle eintreffen.
	Bedienzeit je Linie	Je Linie, zwischen 39 und 209 Sekunden	Verweildauer der Shuttles je Linie an einer Halteposition.
	Verteilung der tatsächlichen Ankünfte und Bedienzeiten	exponentiell verteilt	Die Ankunfts- und Bedienzeiten der Shuttles sind exponentiell verteilt, sie variieren zufällig, wobei kürzere Zeiten häufiger auftreten als längere.
	Akzeptierte Wartezeit bei Ankunft in [s]	0 Sekunden	Zielvorgabe für die maximale Wartezeit eines Shuttles bei Ankunft an der Station, bis ein Halteplatz frei wird.
	Service Level	50 %, 75 %, 90 %, interpoliert auf 95 %	Anteil der Fälle, in denen ein Shuttle längere als die akzeptierte Wartezeit bei Ankunft an der Station warten muss. Interpolation für den 95 %-Fall, da Auswertungsdetails der Simulation nur für maximal 90 % Service-Level auslesbar.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass mit der Erhöhung der Anzahl an Haltepositionen die Wahrscheinlichkeit von Wartezeiten signifikant sinkt und bereits geringe Abweichungen relevant sind. Dies zeigt sich zum Beispiel bei der Reduktion der Haltepositionen von 14 auf 13 im Szenario „8er-Shuttle“, wo die Anzahl wartender Shuttles von etwa jedem 10. auf jedes 3. bis 4. Shuttle deutlich zunahm.

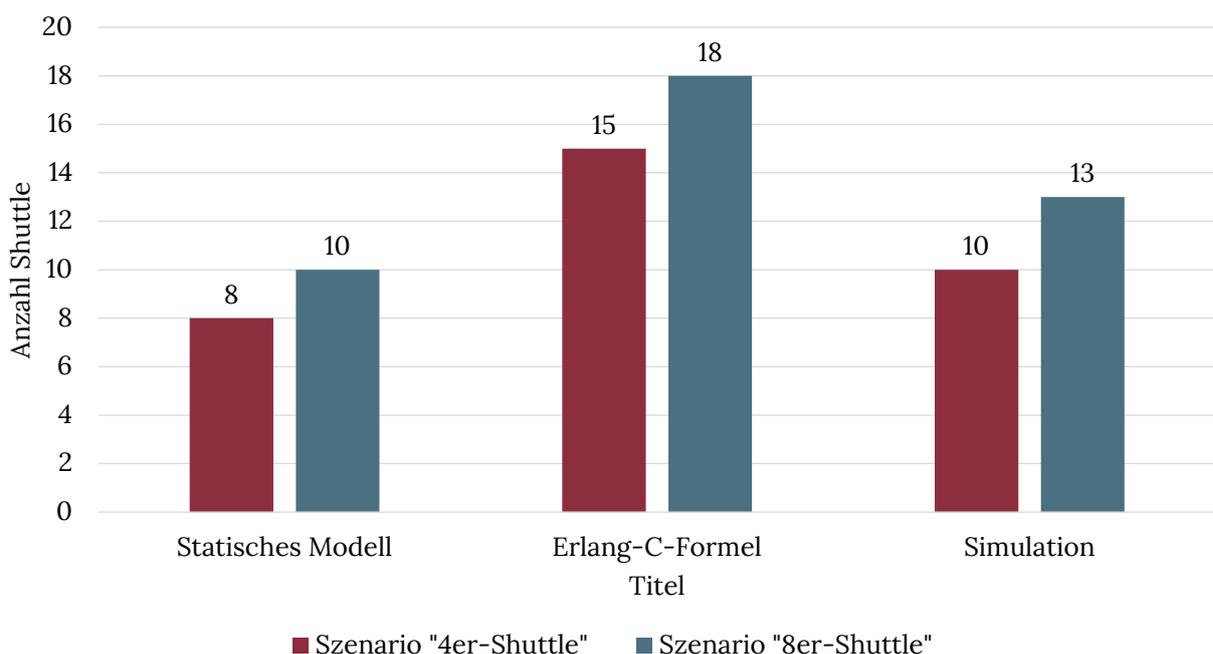
Einschränkend ist zu sagen, dass der Simulator keine tiefere Analyse der wartenden Shuttles zulässt. Die Auflösung des Simulators in Bezug auf den Anteil und die Wartezeiten reicht nur bis zum 10 %, 25 %, 50 %, 75 % und 90 %-Quartil und ermöglicht keine detaillierte Analyse der relevanten 95 %-Quantile sowie des interessanten 99 %-Quantils. Darüber hinaus ist die Genauigkeit der Auflösung auf eine Nachkommastelle beschränkt.

Dennoch zeigt sich, dass zumindest das 90 %-Service-Level gemäß dem Erlang-C-Modell bereits mit 13 Fahrzeugen erreicht wird, anstatt wie im Erlang-C-Modell mit 14 Fahrzeugen

im Szenario „4er-Shuttle“ und mit 14 Haltepositionen im Szenario „8er-Shuttle“, statt wie ursprünglich nach dem Erlang-C-Modell angenommen mit 17 Fahrzeugen. Die Simulation deutet somit darauf hin, dass eine Justierung der früheren Schätzung mit der Erlang-C-Formel nach unten hinsichtlich der benötigten Anzahl an Haltepositionen erforderlich ist (Abb. 32).

Entsprechend der Zielvorgabe, dass 95 % der Fahrzeuge eine freie Halteposition finden sollen, wird für das 95 %-Service-Level die optimale Anzahl an Haltepositionen ermittelt und der entsprechende Flächenbedarf berechnet. Da jedoch detailliertere Auswertungen der Simulation zum 95 %-Service-Level fehlen, wird die Verringerung der Haltepositionen basierend auf dem 90 %-Service-Level auf das 95 %-Service-Level korrigiert. Dies entspricht einer Reduktion von 7,14 % und damit von 15 auf (aufgerundet) 14 Haltepositionen bzw. 17,65 % und damit von 18 auf (aufgerundet) 15 Haltepositionen.

ABB. 32: GEGENÜBERSTELLUNG ANZAHL HALTEPOSITIONEN NACH BERECHNUNGSMETHODE (EIGENE DARSTELLUNG).



#### 4.6.1.4. GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Zur Ermittlung der optimalen Anzahl an Haltepositionen am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen wurden drei verschiedene Berechnungsmethoden angewandt. Die Vor- und Nachteile der Methoden sowie die Ergebnisse werden in verglichen.

**Das statische Modell** stellt die ungenaueste Methode zur Berechnung der benötigten Haltepositionen dar, da es auf der Annahme konstanter Ankunftsintervalle und Bedienzeiten basiert. Dabei werden mögliche Abweichungen, die im realen Betrieb regelmäßig auftreten, vollständig ignoriert. In der Praxis können Shuttles Verspätungen haben oder der Fahrgastwechsel unterschiedlich lange dauern, was das statische Modell nicht abbildet. Dadurch entsteht ein idealisierter Betriebsfall, in dem alle Prozesse störungsfrei und unter optimalen Bedingungen verlaufen, ein Szenario, das in der Realität nie erreicht werden kann.

Trotz dieser Schwächen liefert das statische Modell zumindest eine theoretische Untergrenze für die Anzahl der Haltepositionen. Diese kann von Interesse sein, wenn nur begrenzte Flächen zur Verfügung stehen und bereits das statische Modell ergibt, dass die vorhandene Fläche nicht ausreicht. Im Falle des Bahnhofes Zürich Tiefenbrunnen ergibt die Berechnung des statischen Modells eine Anzahl von 8 Haltepositionen für das Szenario „4er-Shuttle“ und 10 Haltepositionen für das Szenario „8er-Shuttle“.

Die Ungenauigkeit des statischen Modells wird durch die Anwendung der **Erlang-C-Formel** deutlich gemildert, da hier nicht nur das durchschnittliche Ankunftsintervall und die Bedienzeiten berücksichtigt werden, sondern auch Abweichungen in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung einfließen. Diese Verteilung wird exponentiell angenommen, was bedeutet, dass kürzere Abweichungen häufiger vorkommen, während längere seltener auftreten. In der Berechnung wurde vorgegeben,

TAB. 20: DETAILLIERUNGSGRAD JE BERECHNUNGSMETHODE (EIGENE BERECHNUNG).

Input-Faktor	Statisches Modell	Erlang-C-Formel	Simulation
Ankunftsintervall je Linie	✓	✗	✓
Bedienzeit je Linie	✓	✗	✓
Mittleres Ankunftsintervall	✗	✓	✗
Mittlere Bedienzeit	✗	✓	✗
(Exponentielle) Verteilung Ankunftsintervall und Bedienzeit	✗	✓	✓
Akzeptierte Wartezeit 0 Sekunden	✓	✓	✓
Service-Level 50 %	✗	✓	✓
Service-Level 75 %	✗	✓	✓
Service-Level 90 %	✗	✓	✓
Service-Level 95 %	✗	✓	○
Service-Level 99 %	✗	✓	✗

dass die akzeptierte Wartezeit eines Shuttles bei Ankunft null Sekunden beträgt und das Service-Level auf 95 % festgesetzt wird. Das bedeutet, dass 95 % der Shuttles sofort eine freie Halteposition finden sollen, ohne warten zu müssen. Zusätzlich wurden auch Service-Level-Szenarien von 50 %, 75 %, 90 % und 99 % getestet. Im Vergleich zum statischen Modell bietet das Erlang-C-Modell somit eine deutlich realistischere Darstellung der Ankunfts- und Bedienzeiten. Diese Modellierung ermöglicht also eine genauere Abschätzung der benötigten Haltepositionen, da Schwankungen im realen Betrieb, wie unregelmäßige Ankünfte und Abfahrten, mit einbezogen werden.

Basierend auf der Zielvorgabe, dass mindestens 95 % der Shuttles bei ihrer Ankunft eine freie Halteposition vorfinden, ergibt sich für das Szenario „4er-Shuttle“ bei Anwendung der Erlang-C-Formel eine benötigte Anzahl von 11 Haltepositionen, während für das Szenario „8er-Shuttle“ 14 Haltepositionen notwendig sind.

Die Simulation ermöglicht im Vergleich zur Erlang-C-Formel eine detailliertere und präzisere Analyse des Shuttle-Systems, indem er die individuellen Ankunftsintervalle und Bedienzeiten jeder Linie berücksichtigt und gleichzeitig die exponentielle Verteilung dieser Zeiten einbezieht, um realistische Abweichungen abzubilden. Diese Kombination der Stärken des statischen Modells (linienindividuelle Parameter) und der Erlang-C-Formel (stochastische Modellierung) gewährleistet sowohl eine präzise Abbildung der Linien als auch die Berücksichtigung einer Störung im Betriebsablauf (Wegen 2014, S. 34). Eine Einschränkung des verwendeten Simulators liegt jedoch in der fehlenden Auflösung hinsichtlich der Häufigkeit und Dauer, die Shuttles beim 95 %-Service-Level warten müssen, sodass die Ergebnisse für dieses Level durch Interpolation abgeleitet werden musste. Um die Genauigkeit der Analyse weiter zu erhöhen und diese

Lücke zu schließen, wäre für zukünftige Untersuchungen der Einsatz spezialisierterer Tools oder die Entwicklung neuer Modelle erforderlich. Trotz dieser Einschränkung bietet der Warteschlangensimulator die präziseste Methode zur Analyse des Shuttle-Systems, da er sowohl die Ankunfts- und Bedienzeiten je Linie, als auch deren Verteilung, berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Simulation (Abb. 32) zeigen, dass die Anzahl der benötigten Haltepositionen sowohl für die 4- als auch für die 8-Personen-Shuttles geringer ausfällt als in der Berechnung nach der Erlang-C-Formel. Für das Szenario „4er-Shuttle“ sind 10 Haltepositionen ausreichend, während im Szenario „8er-Shuttle“ 13 Haltepositionen benötigt werden.

#### 4.6.2. FLÄCHENBEDARF

Der Flächenbedarf nimmt eine zentrale Funktion bei der Integration eines automatisierten Shuttlesystems ein. Besonders kritisch ist die Verfügbarkeit von Flächen an Verkehrsknotenpunkten, die aufgrund ihrer guten Anbindung oft sehr dicht entwickelt sind oder ein hohes Entwicklungspotenzial aufweisen. Ausgedehnte Flächen für Infrastruktur, wie ein Shuttlesystem, müssen einerseits verfügbar sein, andererseits können sie das Potenzial dieser Gebiete erheblich einschränken.

Es ergeben sich zwei relevante Flächenbedarfe aus dem Betrieb eines Shuttle-Systems. Erstens ist der Flächenbedarf zu Spitzenzeiten von Bedeutung, wenn alle Fahrzeuge im Einsatz sind. Hierbei ist ausschlaggebend, wie groß die Fläche für den Start- bzw. Endpunkt der Linien sein muss, um sicherzustellen, dass genügend Haltepositionen zur Verfügung stehen und keine Überlastung der Station entsteht. Eine optimale Anpassung der Anzahl der Haltepositionen, basierend auf den oben beschriebenen Berechnungen, kann wertvolle

Fläche einsparen, die für andere Zwecke im Stadtraum genutzt werden könnte. Dies ermöglicht eine effizientere Flächennutzung und trägt zur nachhaltigen Stadtentwicklung bei, indem Raum für unterschiedliche städtische Anforderungen wie Wohnen, Arbeiten oder Freizeitaktivitäten erhalten bleibt. Für den Betrieb an der Verkehrsdrehscheibe sind zudem Zu- und Abgänge für Fahrgäste (Perrons) sowie Manövrierflächen und Ein- und Ausfahrten der Shuttles notwendig, die im Flächenbedarf berücksichtigt werden müssen. Zweitens ist der Flächenbedarf zu Randzeiten, insbesondere während der Nachtstunden, relevant, wenn große Teile der Flotte abgestellt werden müssen. In diesen Zeiten sind vor allem die Abstellflächen (inklusive Wartungsbereiche und notwendiger Infrastrukturfächen) für nicht benötigte Fahrzeuge von Bedeutung. Auch dieser Flächenbedarf wird ermittelt.

Für beide Berechnungen ist hauptsächlich der Flächenbedarf der Shuttles im Stand relevant. Der Flächenbedarf der Shuttles (4-Personen- oder 8-Personen-Shuttles) wird entsprechend der Erläuterungen aus Kapitel 4.3.2 als

Grundlage herangezogen und im Folgenden jeweils um relevante Abstandsbereiche ergänzt.

#### 4.6.2.1. FAHRZEUGABSTELLFLÄCHE

Für die Dimensionierung der Abstellfläche abseits der Spitzenstunden ist, wie viele Fahrzeuge insgesamt für den Betrieb benötigt werden. Besonders in den Nachtstunden ist davon auszugehen, dass ein Großteil der Shuttles nicht im Einsatz ist. Mit dem bestehenden Nachtnetz der ZVV wäre ein Anforderungssystem sinnvoll, bei dem nur die Anzahl an Shuttles eingesetzt, die tatsächlich angefordert wird. In jedem Fall ist davon auszugehen, dass ein erheblicher Teil der Flotte zur Randzeiten abgestellt werden muss. Zunächst wird daher davon ausgegangen, dass für pro Linie jederzeit ein Fahrzeug in der Station bereitgehalten wird. Auf Grundlage der Ermittlung der Gesamtzahl benötigter Shuttles (Kapitel 4.5.7) ergibt sich, dass 55 bzw. 37 Fahrzeuge zur Randzeit mit niedrigster Nachfrage abgestellt werden müssen.

Werden die Fahrzeuge abgestellt, können sie dicht neben- sowie vor- bzw. hintereinander

TAB. 21: FLÄCHENBEDARF EINES ABGESTELLTEN SHUTTLE (EIGENE ABSCHÄTZUNG NACH ZOOX 2024).

Komponente	Zoox	4-Personen-Shuttle	8-Personen-Shuttle
Fahrzeugausmaße	3,63 m x 1,72 m	4,47 m x 1,90 m	6,27 m x 2,00 m
Sitzbereich	3,12 m <sup>2</sup>	3,12 m <sup>2</sup>	6,24 m <sup>2</sup>
Ein- und Ausstiegsbereich	1,61 m <sup>2</sup>	1,61 m <sup>2</sup>	2,15 m <sup>2</sup>
Karosserie	0,95 m <sup>2</sup>	1,25 m <sup>2</sup>	1,64 m <sup>2</sup>
Sonstiges	0,56 m <sup>2</sup>	0,56 m <sup>2</sup>	0,56 m <sup>2</sup>
Stellplatz Rollstuhl	-	1,95 m <sup>2</sup>	1,95 m <sup>2</sup>
Flächenbedarf Fahrzeug	6,24 m <sup>2</sup>	8,49 m <sup>2</sup>	12,54 m <sup>2</sup>
Abstellabstand	-	1,31 m <sup>2</sup>	1,70 m <sup>2</sup>
Flächenausmaß	-	4,67 m x 2,10 m	6,47 m x 2,20 m
Flächenbedarf Fahrzeug abgestellt	-	9,84 m <sup>2</sup>	14,28 m <sup>2</sup>

positioniert werden, da präzise Haltevorgänge sowie Beschleunigungs- und Lenkmanöver möglich sind. Dadurch ist es möglich, einen vergleichsweise geringen Mindestabstand zu definieren, der weniger umfangreich ist als bei herkömmlichen Fahrzeugen. Ein Abstand von 20 cm zwischen den Fahrzeugen in alle Richtungen wird als ausreichend bewertet. Für ein abgestelltes Fahrzeug werden also die Ausmaße des Fahrzeugs selbst zuzüglich 20 cm Abstand zum nächsten Fahrzeug berücksichtigt.

Für die gesamte Fläche wird zudem einen Anteil von 30 % für infrastrukturelle Anforderungen wie Wartungsbereiche, Ladeeinrichtungen sowie Ein- und Ausfahrten addiert, sodass sich ein Flächenbedarf

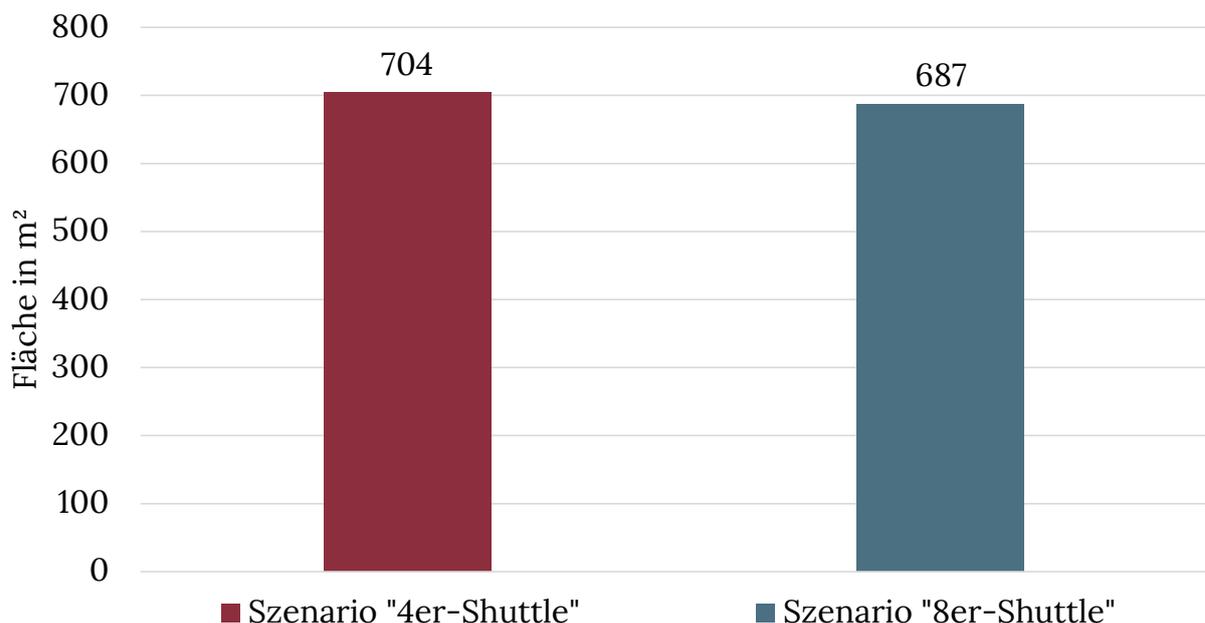
Es zeigt sich, dass der Flächenbedarf für das Abstellen der 4er- und 8er-Shuttles annähernd gleich ist (Abb. 33). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die 4-Personen-Shuttles zwar kleiner sind, jedoch in größerer Anzahl benötigt werden, um die gleiche Fahrgastkapazität zu gewährleisten. Die 8-Personen-Shuttles benötigen zwar pro Fahrzeug mehr Fläche, insgesamt werden

aber weniger Fahrzeuge benötigt. Dieser Ausgleichseffekt hat zur Folge, dass für das Abstellen der Fahrzeuge in beiden Szenarien annähernd gleich viel Fläche benötigt wird.

#### 4.6.2.2. STATIONSGRÖSSE

Für die nötige Fläche der Verkehrsdrehscheibe als Start- und Endpunkt der Linien ist relevant, wie groß die Shuttle-Station dimensioniert werden muss. Wie oben dargestellt, ergibt sich diese Dimensionierung aus der Anzahl der Shuttles, die während der Spitzenstunde gleichzeitig in der Station sind bzw. eine freie Halteposition benötigen. Jede Halteposition eines solchen Systems benötigt Fläche, weshalb eine Überdimensionierung der Shuttle-Stationen vermieden werden muss. Dies würde nicht nur die Kosten für Bau und Wartung steigern, sondern auch die allgemeine Zugänglichkeit und Nutzung des öffentlichen Raums beeinträchtigen. Allerdings kann eine zu geringe Bereitstellung von Flächen die Zuverlässigkeit des Systems einschränken. Es muss sichergestellt werden, dass genügend Haltepositionen zur Verfügung stehen, um das erwartete Service-Level zu gewährleisten

Abb. 33: FLÄCHENBEDARF ZUM ABSTELLEN DER SHUTTLE-FLOTTE ZU RANDZEITEN (EIGENE BERECHNUNG).



und das Shuttlesystem als attraktive Transportmöglichkeit zu etablieren.

In die finale Kalkulation des Flächenbedarfs der Haltepositionen fließt zusätzlich zur reinen Fahrzeugfläche auch ein Manövrierabstand ein. Um genügend Raum für sicheres Manövrieren an den Haltepositionen zu gewährleisten (insbesondere für das Herausfahren aus der Halteposition ohne Rückwärtsfahren) wird daher ein Abstand von 70 cm sowohl vorne als auch hinten berücksichtigt. Zudem wird seitlich auf beiden Seiten ein Abstand von jeweils 30 cm eingeplant. So ergibt sich insgesamt ein Flächenbedarf eines Shuttles und damit der nötigen Größe je Halteposition von  $14,67 \text{ m}^2$  ( $5,87 \text{ m} \times 2,50 \text{ m}$ ) für das 4-Personen-Shuttle und  $19,97 \text{ m}^2$  ( $7,67 \text{ m} \times 2,60 \text{ m}$ ) für das 8-Personen-Shuttle (Tab. 21).

ABB. 34: FLÄCHENBEDARF ZUM ABSTELLEN DER SHUTTLE ZU RANDZEITEN, SZENARIO „4ER-SHUTTLE“ (EIGENE BERECHNUNG).



Die Anzahl der nötigen Haltepositionen wurde in Kapitel 4.6.1.4 bestimmt. Es ergibt sich damit ein Flächenbedarf von (aufgerundet)  $206 \text{ m}^2$  für die Haltepositionen im Szenario „4er-Shuttle“ sowie (aufgerundet)  $300 \text{ m}^2$  für die Haltepositionen im Szenario „8er-Shuttle“.

Für den Perron, also die Fläche, die für den Zugang, das Warten sowie das Ein- und Aussteigen zum Shuttle benötigt wird, erfolgt die Dimensionierung entsprechend den Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs. Die Richtlinien sehen für einen einseitig genutzten Perron eine Mindestbreite von  $2,50 \text{ m}$  vor (Vallée et al. 2021, S. 321).

Um die benötigte Länge des Perrons zu bestimmen, muss zunächst die Länge der

ABB. 35: FLÄCHENBEDARF ZUM ABSTELLEN DER SHUTTLE ZU RANDZEITEN, SZENARIO „8ER-SHUTTLE“ (EIGENE BERECHNUNG).



Haltekante für die Shuttles ermittelt werden. Aus Gründen der Flächeneffizienz und zur Minimierung der Wege für die Nutzer\*innen wäre eine mindestens zweireihige Anordnung der Shuttles mit einem Zwischenperron sinnvoll. Für die Berechnung und eine bessere Vergleichbarkeit wird jedoch angenommen, dass die Fahrzeuge einreihig hintereinander angeordnet werden.

Für den **Perron**, also die Fläche, die für den Zugang, das Warten sowie das Ein- und Aussteigen zum Shuttle benötigt wird, erfolgt die Dimensionierung entsprechend den Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs. Die Richtlinien sehen für einen einseitig genutzten Perron eine Mindestbreite von 2,50 m vor (Vallée et al. 2021, S. 321).

Um die benötigte Länge des Perrons zu bestimmen, muss zunächst die Länge der Haltekante für die Shuttles ermittelt werden. Aus Gründen der Flächeneffizienz und zur Minimierung der Wege für die Nutzer\*innen wäre eine mindestens zweireihige Anordnung

der Shuttles mit einem Zwischenperron sinnvoll. Für die Berechnung und eine bessere Vergleichbarkeit wird jedoch angenommen, dass die Fahrzeuge einreihig hintereinander angeordnet werden.

Somit ergibt sich im Szenario „4er-Shuttle“ mit 14 Haltepositionen eine Länge der Haltekante von (aufgerundet) 83 m. Im Szenario „8er-Shuttle“ verteilen sich die Fahrzeuge auf 15 Haltepositionen mit einer Länge von (aufgerundet) 116 m. Die Perronlänge entspricht der Länge der Haltekante. Mit der Perronbreite von 2,50 m ergibt sich damit eine benötigte Fläche von 207,5 m<sup>2</sup> im Szenario „4er-Shuttle“ und (aufgerundet) 290 m<sup>2</sup> im Szenario „8er-Shuttle“ (Abb. 36).

Neben den Haltepositionen und dem Perron müssen auch die **Zu- und Abfahrten** sowie die **Fahrestreifen** zwischen den Haltepositionen geplant werden, um einen flüssigen Ablauf innerhalb der Station sicherzustellen. Bei einer Breite der Shuttles von 1,90 bzw. 2,00 m und unter Berücksichtigung der bereits eingeplanten

TAB. 22: FLÄCHENBEDARF FAHRZEUG IM STAND (EIGENE ABSCHÄTZUNG NACH ZOOX 2024).

Komponente	Zoox	4-Personen-Shuttle	8-Personen-Shuttle
Fahrzeugausmaße	3,63 m x 1,72 m	4,47 m x 1,90 m	6,27 m x 2,00 m
Sitzbereich	3,12 m <sup>2</sup>	3,12 m <sup>2</sup>	6,24 m <sup>2</sup>
Ein- und Ausstiegsbereich	1,61 m <sup>2</sup>	1,61 m <sup>2</sup>	2,15 m <sup>2</sup>
Karosserie	0,95 m <sup>2</sup>	1,25 m <sup>2</sup>	1,64 m <sup>2</sup>
Sonstiges	0,56 m <sup>2</sup>	0,56 m <sup>2</sup>	0,56 m <sup>2</sup>
Stellplatz Rollstuhl	-	1,95 m <sup>2</sup>	1,95 m <sup>2</sup>
Flächenbedarf Fahrzeug	6,24 m <sup>2</sup>	8,49 m <sup>2</sup>	12,54 m <sup>2</sup>
Manövrierabstand v/h	-	3,08 m <sup>2</sup>	3,22 m <sup>2</sup>
Manövrierabstand seitlich	-	3,10 m <sup>2</sup>	4,21 m <sup>2</sup>
Flächenausmaß	-	5,87 m x 2,50 m	7,67 m x 2,60 m
Flächenbedarf Fahrzeug in der Station	-	14,67 m <sup>2</sup>	19,97 m <sup>2</sup>

Rangierabstände erscheint eine Fahrspurbreite von 2,10 bzw. 2,20 m sinnvoll.

Benötigt werden Fahrstreifen entlang der Haltepositionen sowie Fahrstreifen für die Zu- und Abfahrten. Die Länge der Zu- und Abfahrten wird, den vor-Ort-Gegebenheiten entsprechend, auf jeweils 25 m geschätzt. Dabei wird angenommen, dass die Zu- und Abfahrten zur Hälfte einspurig und zur Hälfte zweispurig ausgeführt sind, um das Einfädeln der Shuttles nach dem Verlassen der Station zu ermöglichen.

Daraus ergibt sich im Szenario „4er-Shuttle“ eine Fläche von 174,3 m<sup>2</sup> für die Fahrstreifen entlang der Haltepositionen. Hinzu kommen 78,75 m<sup>2</sup> für die Zu- und Abfahrten, sodass insgesamt (aufgerundet) 254 m<sup>2</sup> benötigt werden. Im Szenario „8er-Shuttle“ werden 255,2 m<sup>2</sup> für die Fahrstreifen entlang der Haltepositionen benötigt. Zusammen mit 82,5 m<sup>2</sup> für die Zu- und Abfahrten ergibt sich eine Gesamtfläche von (aufgerundet) 338 m<sup>2</sup> (Abb. 36).

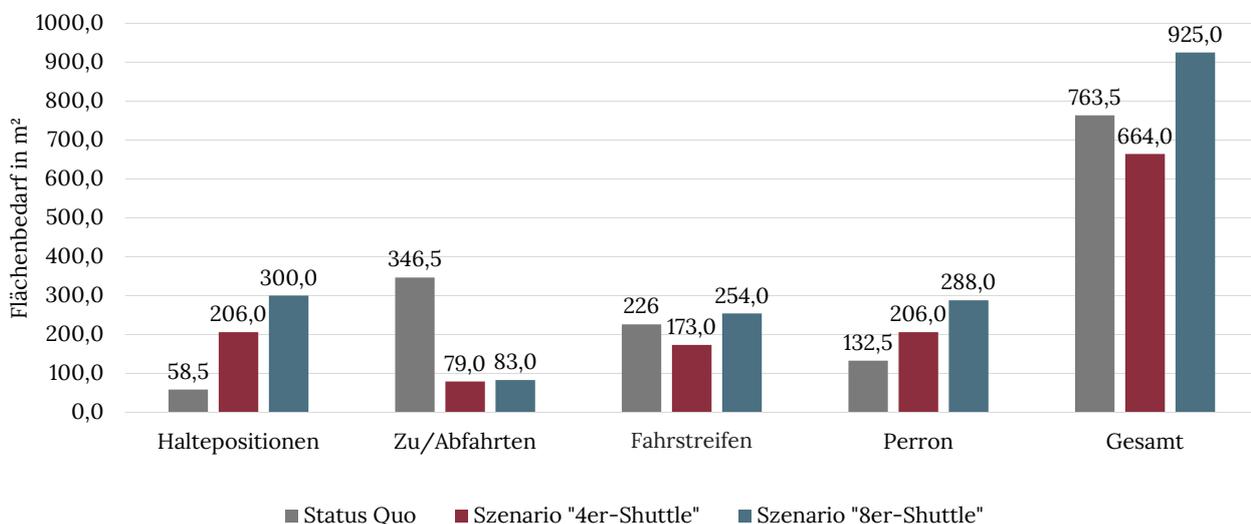
Der Gesamtflächenbedarf der Station an der Verkehrsdrehscheibe ergibt sich aus der Summe der Teilflächen (Abb. 36). Im Szenario „4er-Shuttle“, bei dem insgesamt 14 Haltepositionen benötigt werden, beträgt der

Gesamtflächenbedarf 667,5 m<sup>2</sup>. Dieser setzt sich wie folgt zusammen: Der Flächenbedarf für die 14 Haltepositionen beläuft sich auf 206 m<sup>2</sup>. Für den Perron, der den Zugang und die Wartebereiche der Nutzer\*innen abdeckt, wird eine Fläche von 207,5 m<sup>2</sup> veranschlagt. Die Fahrstreifen, die entlang der Haltepositionen verlaufen, erfordern eine zusätzliche Fläche von 174,3 m<sup>2</sup>. Zudem wird für die Zu- und Abfahrten eine Fläche von 78,75 m<sup>2</sup> eingeplant.

Im Szenario „8er-Shuttle“, bei dem insgesamt 15 Haltepositionen benötigt werden, ergibt sich ein höherer Gesamtflächenbedarf von 928 m<sup>2</sup>. Der Flächenbedarf für die 15 Haltepositionen beträgt 300 m<sup>2</sup>, was auf den größeren Abmessungen der 8-Personen-Shuttles zurückzuführen ist. Für den Perron wird eine Fläche von 290 m<sup>2</sup> benötigt, da mit den längeren Haltepositionen auch ein längerer Perron notwendig ist. Für die Fahrstreifen, die entlang der Haltepositionen verlaufen, wird eine Fläche von 255,3 m<sup>2</sup> eingeplant. Auch hier wird für die Zu- und Abfahrten eine Fläche von 82,5 m<sup>2</sup> veranschlagt, wobei dieselbe halb einspurige, halb zweispurige Konfiguration zum Einsatz kommt.

Es zeigt sich, dass die Größe der eingesetzten Shuttles unterschiedliche Auswirkungen auf

ABB. 36: FLÄCHENBEDARFE DES SHUTTLE-SYSTEMS AM BAHNHOF ZÜRICH TIEFENBRUNNEN (EIGENE BERECHNUNG).



den Flächenverbrauch für die Abstellflächen während der Randzeiten sowie auf die Flächen der Station hat, die während der Spitzenstunden benötigt werden, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten.

Der Flächenverbrauch für das Abstellen der Fahrzeuge zu Randzeiten ist in beiden Szenarien ähnlich. Anders verhält es sich jedoch mit dem Flächenbedarf der Stationen. Dieser unterscheidet sich deutlich. Während beim Abstellen der Fahrzeuge der ausgleichende Effekt der Größe der Fahrzeugflotte zum Tragen kommt, gilt dies für die Station bzw. die Anzahl der benötigten Haltepunkte nicht. Wie in Kapitel 4.5.1.4 erläutert, werden annähernd gleich viele (teilweise mehr) Haltepositionen im Szenario „8er-Shuttle“ und im Szenario „4er-Shuttle“ benötigt. Da die Halteflächen für 8-Personen-Shuttles größere Mindestmaße haben, benötigen diese bei annähernd gleicher Anzahl an Haltepositionen deutlich mehr Fläche. Dies wird zusätzlich verstärkt, da damit auch die Flächen für den Perron und die Fahrstreifen entlang der Haltepositionen entsprechend länger und damit größer, ausfallen müssen. Somit ergibt sich ein deutlicher Unterschied im Flächenbedarf. So benötigt die Station im Szenario „8er-Shuttle“ fast 40 % mehr Fläche als eine Station im Szenario „4er-Shuttle“.

Einschränkend ist zu erwähnen, dass im Rahmen der Diplomarbeit keine Detailplanung durchgeführt werden kann und nicht alle Flächen, die für einen tatsächlichen Betrieb relevant sind, berücksichtigt werden. Dennoch wurden die wichtigsten Flächen(anteile) dargestellt. Da weitere, für den Betrieb notwendige Einrichtungen in beiden Szenarien vorgesehen werden müssten, ermöglicht die Gegenüberstellung dennoch eine plausible Darstellung des Größenverhältnisses der Stationen, je nach Szenario. In weiterer Forschung müsste der Flächenbedarf genauer bestimmt werden, indem Flächenbedarfe, wie

z. B. die Gestaltung von Wartebereichen, die Integration von Informationssystemen und die Barrierefreiheit, konkretisiert werden.

#### 4.6.2.3. MACHBARKEITSSTUDIE:

##### FLÄCHENBEDARF AM BAHNHOF ZÜRICH TIEFENBRUNNEN

Zuletzt wird der bestehende Flächenbedarf (Status quo) mit den Bedarfen der Szenarien „4er-Shuttle“ und „8er-Shuttle“, die durch die Einführung eines automatisierten Shuttle-Systems entstehen, verglichen.

Für die Abstellflächen zeigt sich, dass am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen genügend Flächen verfügbar wären, in Form des derzeitigen Park-and-Ride-Parkplatzes. Von diesem würde in beiden Szenarien ca. 1/3 der Fläche benötigt werden. Grundsätzlich müsste ein Depot für automatisierte Shuttles allerdings nicht an der Station verortet sein, sondern könnte auch dezentral abgestellt werden bzw. ggf. auf größeren Sammeldepots für mehrere Verkehrsdrehscheiben. Eine Nachnutzung der Park-and-Ride-Fläche mit ggf. einer Bebauung aufgrund der guten Erreichbarkeit (wie derzeit tatsächlich vorgesehen) mit einem Depot im Erdgeschoss bzw. Untergeschoss könnte zudem eine Möglichkeit sein, die Fläche effizienter durch Mehrfachnutzung zu nutzen. Einschränkungen ergeben sich jedoch aufgrund fehlender Daten, sodass kein Vergleich zur benötigten Depotfläche für die derzeit genutzten Omnibusse gezogen werden kann.

Die Flächen für die Haltepositionen und den Perron fallen bei beiden Szenarien deutlich größer aus als im aktuellen Zustand. Im Szenario mit 4-Personen-Shuttles steigt der Flächenbedarf für die Haltepositionen von 59,0 m<sup>2</sup> im Status quo auf 205 m<sup>2</sup>, während im Szenario mit 8-Personen-Shuttles sogar 299 m<sup>2</sup> benötigt werden. Ursächlich ist hier, dass im Status quo nur ein Haltepunkt für

einen Bus vorgesehen ist sowie ein weiterer, insgesamt jedoch untergeordneter Bereich zum Verweilen von Bussen. Im Gegensatz dazu ist für den Betrieb des Shuttlesystems ein Perron durchgängig parallel zu den Haltepunkten notwendig, da aufgrund des Taktes nicht unterschieden werden kann zwischen verweilenden Fahrzeugen und Fahrzeugen, die Fahrgäste aufnehmen. Da die Tiefe des Perrons in etwa der der Haltepositionen entspricht und der Perron in gleicher Länge ausgebildet werden muss, ergibt sich daher ein Flächenbedarf von

zuvor 132 m<sup>2</sup> auf 205 m<sup>2</sup> im „4er-Szenario“ bzw. 288 m<sup>2</sup> im „8er-Szenario“.

Im Gegensatz dazu reduziert sich der Flächenbedarf für Zu- und Abfahrten signifikant, von 346,0 m<sup>2</sup> im Status quo auf 79 m<sup>2</sup> im 4er-Szenario und 82,5 m<sup>2</sup> im 8er-Szenario. Diese Verringerung begründet sich darin, dass die Shuttles durch ihre kompaktere Bauweise und bessere Manövrierfähigkeit sowie den (praktisch) entfallenden Schleppkurven weniger Platz für Zufahrten benötigen.

ABB. 37: FLÄCHENVERBRAUCH NACH ZWECK, STATUS QUO (EIGENE DARSTELLUNG NACH KANTON ZÜRICH 2024).



Der Bedarf an Fahrstreifen variiert zwischen den Szenarien: Während er im Szenario mit 4-Personen-Shuttles von 226 m<sup>2</sup> im Status quo auf 173 m<sup>2</sup> sinkt, steigt er bei den 8-Personen-Shuttles auf 253 m<sup>2</sup>. Dieser Unterschied erklärt sich ebenfalls aufgrund der insgesamt längeren Haltepositionen, weshalb entsprechend längere Fahrstreifen parallel zu diesen notwendig sind.

Die MIV-Fläche, welche den Raum für den motorisierten Individualverkehr umfasst, fällt nur im Status quo an, da in den Szenarien des kollektiven automatisierten Fahrens kein MIV mehr vorgesehen ist. Für den Status quo ergibt sich damit ein Bedarf von 274,0 m<sup>2</sup>, der in den Szenarien entfällt.

Insgesamt zeigt die Analyse, dass das Zubringersystem am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen im Hinblick auf den Flächenbedarf umsetzbar wäre. Jedoch ist eine Anpassung der Flächenplanung, insbesondere für den Perron und die Haltepositionen, erforderlich, um den erhöhten Platzbedarf der neuen Shuttle-Modelle zu berücksichtigen. Einschließlich der MIV-Flächen könnte Fläche eingespart werden; wird jedoch nur die Fläche, die für den ÖV-Betrieb notwendig ist, berücksichtigt, zeigt sich ein szenarioabhängiger Bedarf. Im Szenario „4er-Shuttle“ wird (jeweils gerundet) 13 % weniger Fläche benötigt, im Szenario „8er-Shuttle“ ergibt sich ein zusätzlicher Bedarf von 21 %. Die Gegenüberstellung zeigt jedoch auch, dass für den Betrieb eines 8er-Shuttles am Bahnhof genügend Flächenreserven vorhanden wären (Abb. 38,39). Zudem könnte die Bellerivestraße in ihren Ausmaßen, aufgrund des Wegfalls des MIV, deutlich reduziert werden. Diese Schlussfolgerung ist allerdings direkt an den Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen gekoppelt, andere Verkehrsdrehscheiben, insbesondere in zentraleren Lagen, weisen derartige Flächenreserven nicht auf. Zukünftig wäre daher die Untersuchung an anderen

Verkehrsdrehscheiben wichtig bzw. für den Bahnhof Tiefenbrunnen die Ausarbeitung eines detaillierten Flächennutzungskonzeptes.

ABB. 38: FLÄCHENVERBRAUCH NACH ZWECK, SZENARIO „4ER-SHUTTLE“ (EIGENE DARSTELLUNG NACH KANTON ZÜRICH 2024).



ABB. 39: FLÄCHENVERBRAUCH NACH ZWECK, SZENARIO „8ER-SHUTTLE“ (EIGENE DARSTELLUNG NACH KANTON ZÜRICH 2024).



## 5. BEANTWORTUNG DER FORSCHUNGSFRAGEN

Die Ergebnisse werden im Hinblick auf die zu Beginn formulierten Leit- und Forschungsfragen zusammengefasst, die der Arbeit zugrunde liegen. Die Einschränkungen der Forschungsergebnisse werden in Kapitel 6 dargestellt.

---

F1 Wie lässt sich der Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen bestimmen?

---

Der Einzugsbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen lässt sich durch eine **GIS-Analyse** bestimmen. Zunächst werden Punktdaten der Bahnhöfe in ein GIS-System (QGIS) importiert, um auf dieser Grundlage Distanzpuffer um den Bahnhof zu erstellen. Diese Puffer stellen verschiedene Erreichbarkeitsstufen (bis 300 m, 300 - 500 m, 500 - 750 m, 750 - 1000 m Entfernung vom Bahnhof) dar. **Eine maximale Distanz von 1000 m um den Bahnhof hat sich als sinnvoll erwiesen**, da damit nahezu der gesamte Raum durch mindestens einen Einzugsbereich abgedeckt ist. Dies führt jedoch zu Überschneidungen der Einzugsbereiche, sodass zusätzlich ein Voronoi-Diagramm des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen sowie der umliegenden Bahnhöfe erstellt wird. Das Diagramm teilt die Fläche um einen Bahnhof in Polygone auf, wobei jeder Punkt innerhalb eines solchen Polygons näher am jeweiligen Bahnhof liegt als an einem anderen, umliegenden Bahnhof. So wird sichergestellt, dass keine Überschneidungen mit den Einzugsbereichen anderer Bahnhöfe auftreten. Die Kombination aus Distanzpuffer und Voronoi-Diagramm ermöglicht so eine präzise Definition des Einzugsbereichs, einschließlich der Unterteilung in Distanzbereiche.

---

F2 Welche Faktoren beeinflussen die potenzielle Nachfrage nach kaF im Einzugsgebiet des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen?

---

Die potenzielle Nachfrage nach kollektiven genutzten, automatisierten Shuttles im Einzugsgebiet des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen wird von mehreren relevanten Faktoren bestimmt. Zum einen sind dies

Die Abschätzung der potenziellen Nachfrage nach kollektiven genutzten, automatisierten Shuttles im Einzugsgebiet des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen erfordert die Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren. Diese lassen sich in empirisch erhobene Daten und Modellierungsannahmen gliedern.

Zu den **empirischen Daten** zählt die **Demografie**. Hier ist zunächst die Anzahl der Einwohner\*innen (und damit Bevölkerungsdichte im Einzugsbereich) relevant, welche die Ausgangsdaten für die Abschätzung des Nachfragepotentials darstellt.

Ergänzend sind **Mobilitätsdaten** zu berücksichtigen. Der **Mobilitätsgrad**, also die Anzahl und die zeitliche Verteilung der Wege pro Person und Tag, gibt Aufschluss über die Verkehrsmittelnutzung im Tagesverlauf und ermöglicht es, die Verkehrsspitzenstunden zu identifizieren. Weiterhin lässt der zugrundeliegende Datensatz die Unterscheidung des Mobilitätsgrades nach **Altersgruppen** zu. Da jüngere und mittlere Altersgruppen (u. a.) aufgrund von werktäglichen Arbeits- und Ausbildungswegen eine höhere Mobilität aufweisen als ältere Menschen, ist dies unbedingt zu berücksichtigen. **Der Anteil der Binnenpendler\*innen**, die innerhalb desselben Gebiets wohnen und arbeiten, ist ebenfalls relevant, da diese Gruppe aufgrund kürzerer Wege seltener auf multimodale Verkehrsmittel wie kaF angewiesen sein dürfte.

**Die Verkehrsmittelwahl in Abhängigkeit der Distanz** ist ein weiterer wichtiger Faktor. Kurze Strecken werden oft zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt, während bei längeren Distanzen der ÖPNV und MIV dominieren. Diese Präferenzen, kombiniert mit der Distanz zum Bahnhof, beeinflussen die Wahrscheinlichkeit eines Wechsels zum Shuttle-System, da das Shuttle mit zunehmender Distanz insbesondere gegenüber dem bestehenden ÖPNV und MIV an Attraktivität gewinnt, während kürzere Strecken voraussichtlich weiterhin eher zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt werden.

Neben den empirischen Daten sind **Modellierungsannahmen** notwendig, um die potenzielle Nutzung von kaF abzuschätzen. Hier sind insbesondere die **Substitutionswahrscheinlichkeiten** relevant, also die Wahrscheinlichkeit, dass Menschen ihr bisher genutztes Verkehrsmittel durch kaF ersetzen. Diese Annahmen variieren je nach Distanz und bisherigem Verkehrsmittel und beruhen auf hypothetischen Überlegungen zur Attraktivität von kaF.

Die Kombination von empirischen Daten und Modellierungsannahmen ermöglicht eine robuste Abschätzung der potenziellen Nachfrage nach einem automatisierten Zubringersystem am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen.

---

F3 Welches Nachfragepotenzial für kaF besteht im Einzugsgebiet des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen?

---

**Insgesamt würden 835,4 Personen in der Morgenspitzenstunde zwischen 07:00 und 08:00 Uhr eine Shuttlefahrt zum Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen absolvieren. Die Nachfrage variiert jedoch stark zwischen den einzelnen Korridoren.**

Besonders hohe Nachfrage besteht in den Korridoren 5 und 6, mit jeweils 267,2 und 277,0 Personen, während in den weniger

dicht besiedelten Korridoren die Nachfrage zwischen 22,9 und 54,8 Personen liegt. Einige Korridore werden durch den Zürichsee begrenzt, weshalb hier keine Nachfrage entsteht. Für Verkehrsdrehscheiben in anderen städtischen Gebieten, ohne die direkte Lage am Zürichsee, könnten daher deutlich abweichende Einwohner\*innenzahlen und damit variierende Nachfragen auftreten.

---

F4 Wie kann die Anzahl notwendiger automatisierter Shuttles ermittelt werden, unter der Voraussetzung, dass ein attraktives Angebot für die Nutzer\*innen geschaffen und gleichzeitig die Nachfrage effizient gedeckt wird?

---

Für die Ermittlung der Anzahl der notwendigen automatisierten Shuttles ist **die Größe der Shuttles**, in diesem Fall für 4 bzw. 8 Personen, sowie die **Nachfrage, die Umlaufzeit und die Verweildauer** an den Stationen relevant. Zunächst müssen die **Streckenlängen** ermittelt werden, die sich in diesem Fall aus der Korridortiefe zuzüglich eines Umwegfaktors ergeben. Basierend auf der durchschnittlichen **Fahrgeschwindigkeit, der Anzahl der Haltepunkte** zum Fahrgastwechsel und der dafür benötigten Zeit ergibt sich die **Umlaufzeit**, die ein Shuttle für die Vollendung einer Fahrt benötigt. Zusätzlich muss die Zeit ermittelt werden, die ein Shuttle an der Station verweilt, entweder zum **Halten für den Fahrgastwechsel oder um den Takt einzuhalten**.

Ein **Standardtakt** von 180 Sekunden wurde festgelegt, um die Wartezeiten gering zu halten und die Anbindung an den Bahnhof attraktiv zu gestalten. In Fällen, in denen dieser Takt die Nachfrage, insbesondere während der Morgenspitzenstunde, nicht vollständig abdeckt, wird der **Takt entsprechend angepasst** und verdichtet. Abschließend muss geprüft werden, ob aufgrund der Streckenlänge, der Fahrgeschwindigkeit und der Zeit für (Zwischen-)Halte zusätzliche Shuttles erforderlich sind, um den Takt einzuhalten.

---

L1 Wie viele Fahrzeuge werden für die Umsetzung eines automatisierten Zubringersystems in kollektiver Nutzung im Einzugsbereich des Bahnhofes Zürich Tiefenbrunnen benötigt?

---

Die Untersuchung zur Bestimmung der Anzahl der benötigten Shuttles für ein automatisiertes Zubringersystem am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen hat wichtige Ergebnisse geliefert. Anhand detaillierter Berechnungen, welche die Fahrtnachfrage, die Beförderungskapazität und die Fahrzeiten der Shuttles berücksichtigen, konnte die optimale Anzahl der Fahrzeuge festgelegt werden. **Daraus ergibt sich, dass für das Szenario „4er-Shuttles“ 65 Fahrzeuge benötigt werden und für das Szenario „8er-Shuttles“ 47.**

Ein erwartbares, aber dennoch zentrales Ergebnis ist, dass die Anzahl der benötigten Shuttles stark von der Fahrtnachfrage in Kombination mit der Shuttlegröße abhängig ist. Bei einer hohen Nachfrage benötigen kleinere 4-Personen-Shuttles deutlich mehr Fahrzeuge, um die gleiche Beförderungskapazität zu gewährleisten wie größere 8-Personen-Shuttles. Dies konnte durch den Vergleich von Korridoren mit hoher Nachfrage gegenüber Korridoren mit niedrigerer Nachfrage verdeutlicht werden. Im Umkehrschluss erweisen sich die 8-Personen-Shuttles in Szenarien mit hoher Nachfrage als effizienter, da sie mit einer geringeren Anzahl an Fahrzeugen die gleiche Transportkapazität erreichen können.

Ein weiterer wichtiger Befund ist, dass zur Aufrechterhaltung der notwendigen Kapazität bei 4-Personen-Shuttles der Takt erheblich erhöht werden müsste. Dies würde zu einem deutlichen Anstieg der benötigten Fahrzeuge führen. Im Vergleich dazu könnten 8-Personen-Shuttles bei gleichbleibendem oder nur geringfügig verändertem Takt die erforderliche Kapazität bereitstellen. In der praktischen Anwendung wäre daher zu prüfen,

welche Linien, insbesondere solche mit hoher Nachfrage, besser von größeren Fahrzeugen bedient werden könnten, um die Anzahl der benötigten Shuttles zu minimieren und den Standardtakt weitgehend beizubehalten.

Darüber hinaus konnte identifiziert werden, dass es kritische Kippunkte gibt, bei denen der Bedarf an Shuttles sprunghaft ansteigt. Dies verdeutlicht die Sensitivität des Systems gegenüber kleinen Änderungen in der Nachfrage, insbesondere wenn diese in einem bestimmten Bereich liegen. Solche Sensitivitäten sollten bei der Planung und Anpassung des Systems berücksichtigt werden, um einen effizienten und störungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

---

F5 Welche Berechnungsmethoden sind geeignet, um die Anzahl der benötigten Haltepositionen an der Verkehrsdreh-scheibe zu bestimmen? Welche Vor- und Nachteile bieten die Methoden?

---

Die Ermittlung der Anzahl der benötigten Haltepositionen an einer Verkehrsdreh-scheibe kann mit drei unterschiedlichen Methoden erfolgen: dem statischen Modell, der Erlang-C-Formel und der Simulation.

**Das statische Modell** bietet eine einfache und schnelle Möglichkeit, die Anzahl der Haltepositionen zu berechnen. Es basiert auf der Annahme, dass alle Shuttles ideal im Takt ankommen und keinerlei betriebliche Störungen oder Verzögerungen auftreten. Der Vorteil dieser Methode liegt in ihrer schnellen und unkomplizierten Anwendbarkeit, da sie eine theoretische Untergrenze für die benötigten Haltepositionen liefert. Der Nachteil des statischen Modells liegt jedoch in der unrealistischen Annahme idealer Betriebsbedingungen. Verspätungen, unregelmäßige Ankünfte und variierende Fahrgastwechselzeiten, die im realen Betrieb vorkommen, werden nicht berücksichtigt. Dadurch liefert das Modell lediglich eine

theoretische Untergrenze für die Anzahl der Haltepositionen und ist für eine realistische Dimensionierung des Systems unzureichend. **Es kann hilfreich sein, um zu prüfen, ob eine Fläche überhaupt als Standort für eine Shuttle-Station in Frage kommt**, da dies ausgeschlossen werden kann, sollte sie nicht einmal für diese theoretische Untergrenze an Haltepositionen ausreichen.

Die **Erlang-C-Formel** berücksichtigt Abweichungen im Betrieb, wie Schwankungen in den Ankunfts- und Bedienzeiten. Sie beinhaltet zudem Zielvorgaben über die Wahrscheinlichkeit, dass ein Shuttle warten muss, bevor es eine freie Halteposition findet. Dadurch ist die Erlang-C-Formel deutlich besser geeignet, die tatsächlichen Betriebsbedingungen abzubilden als das statische Modell. Allerdings arbeitet die Formel mit gemittelten Werten für das gesamte System, was bedeutet, dass individuelle Unterschiede im Takt und in den Wartezeiten zwischen den Shuttle-Linien nicht berücksichtigt werden. Zudem basiert die Formel auf der Annahme, dass Ankunfts- und Bedienzeiten exponentiell verteilt sind, was in der Realität nicht immer der Fall ist. Diese Vereinfachungen schränken die Präzision der Methode ein. Dennoch ist sie **eine einfache Methode, um den Bedarf an Haltepositionen abzuschätzen und einen Ausgangswert für die Simulation zu liefern**. Im Zweifelsfall, ob eine Fläche ausreichend dimensioniert sein könnte, benötigt es jedoch genauere Methoden, um dies feststellen zu können.

**Die Simulation** stellt die präziseste Methode dar, da sie detaillierte Input-Daten indem die individuellen Ankunftsintervalle sowie Bedienzeiten jeder Linie berücksichtigt werden. Die Simulation kann Schwankungen im Betrieb besser abbilden und ermöglicht so die Analyse von spezifischen Szenarien und Extremfällen. Dies **erlaubt eine robuste Einschätzung, wie viele Haltepositionen erforderlich sind, um**

**einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten**. Der Nachteil der Simulation liegt in ihrem höheren Aufwand.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das statische Modell zwar eine erste grobe Abschätzung liefert, aber aufgrund seiner unrealistischen Annahmen nur begrenzt nützlich ist. Die Erlang-C-Formel bietet eine realistischere Berechnungsmethode, die Schwankungen im Betriebsablauf einbezieht, bleibt, aber aufgrund des Inputs von Mittelwerten, ebenfalls limitiert. Die Simulation liefert die präzisesten Ergebnisse, da sie linienspezifische Input-Faktoren berücksichtigt und damit den Betrieb am besten abbildet.

---

L2      Wie viele Haltepositionen werden für die Umsetzung eines automatisierten Zubringersystems in kollektiver Nutzung am Bahnhofes Zürich Tiefenbrunnen benötigt?

---

Nach der Ermittlung der Anzahl an **Haltepositionen im statischen Modell**, welches den Optimalfall abbildet (**5 Haltepositionen im Szenario „4er-Shuttle“ und 8 Haltepositionen im Szenario „8er-Shuttle“**) wurde anschließend mit der **Erlang-C-Formel** abgeschätzt, wie viele Haltepositionen erforderlich sind, damit in einem realistischeren Szenario, in dem Shuttle regelmäßig nicht zur erwarteten Zeit ankommen, 95 % der Shuttles sofort eine freie Halteposition finden. Daraus ergaben sich **15 Haltepositionen im Szenario „4er-Shuttle“ und 18 Haltepositionen im Szenario „8er-Shuttle“**. Diese Abschätzung wurde anschließend durch eine Simulation überprüft und verfeinert. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der separaten Betrachtung der einzelnen Shuttle-Linien, um auf Durchschnittswerte zu verzichten und die spezifischen Unterschiede zwischen den Linien zu berücksichtigen. Grundlage der Simulation war ebenfalls, dass 95 % der Zubringerfahrzeuge direkt eine freie Halteposition finden.

Die Simulationsergebnisse bestätigen die Erwartung, dass mit zunehmender Anzahl an Haltepositionen die Anzahl der Shuttles, die nicht sofort eine freie Halteposition finden, verringert wird. Analog zur Größe der Shuttles gibt es auch bei den Haltepositionen Kippunkte. So konnte gezeigt werden, dass beispielsweise eine Reduktion der Haltepositionen von 14 auf 13 im Szenario „8er-Shuttle“ zu einem deutlichen Anstieg wartender Shuttles führt. Dies unterstreicht die Sensitivität des Systems gegenüber kleinen Veränderungen in der Anzahl der Haltepositionen.

Die Simulation zeigt, dass für das Szenario „4er-Shuttle“ 14 Haltepositionen und für das Szenario „8er-Shuttle“ 15 Haltepositionen benötigt werden. Es zeigte sich deutlich, dass im realen Betrieb deutlich mehr Haltepositionen erforderlich sind als im theoretischen Optimalfall, nämlich die doppelte bis dreifache Anzahl. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass die Anzahl der benötigten Haltepositionen geringer ist als ursprünglich mit der Erlang-C-Formel geschätzt.

### Der Flächenbedarf für das Abstellen ungenutzter Shuttles während der Randzeiten beträgt 704 m<sup>2</sup> im Szenario „4er-Shuttles“ und 687 m<sup>2</sup> im Szenario „8er-Shuttles“.

Bei der Dimensionierung der Station an der Verkehrsdrehscheibe, die sich aus der notwendigen Beförderungskapazität des Systems zur **morgendlichen Spitzenstunde** ergibt, zeigt sich **im Szenario „4er-Shuttle“ mit 14 Haltepositionen ein Flächenbedarf von 667,5 m<sup>2</sup> und im Szenario „8er-Shuttle“ mit 15 Haltepositionen ein Flächenbedarf von 928 m<sup>2</sup>.**

---

F6      Wie unterscheidet sich der Flächenverbrauch für das Zubringersystem zu Spitzenstunden bzw. zu Randzeiten je Szenario?

---

Der Vergleich des Flächenverbrauchs zeigt, dass die Abstellflächen während der Rand- bzw. Nachtzeiten, in denen fast alle Fahrzeuge abgestellt werden, in beiden Szenarien nahezu gleich ausfallen. Die Stationsgrößen, die durch den Bedarf an Haltepositionen zur Morgenspitzenstunde bestimmt werden, variieren jedoch deutlich.

### Zu Randzeiten, wenn die Nachfrage gering ist und die meisten Shuttles abgestellt werden, gibt es kaum Unterschiede im Flächenverbrauch zwischen den Szenarien.

Der Platzbedarf für das Abstellen der Fahrzeuge beträgt etwa 704 m<sup>2</sup> im Szenario „4er-Shuttles“ und 687 m<sup>2</sup> im Szenario „8er-Shuttles“. Ursächlich dafür ist, dass die 4-Personen-Shuttles zwar weniger Platz pro Fahrzeug benötigen, aufgrund ihrer geringeren Kapazität aber in größerer Anzahl benötigt und dementsprechend abgestellt werden müssen.

### Zu Spitzenzeiten, insbesondere während der Morgenspitzenstunde, wird der Flächenbedarf

hauptsächlich durch die Anzahl und Größe der benötigten Haltepositionen an der Verkehrsdrehscheibe bestimmt. Im Szenario „4er-Shuttle“ werden 10 Haltepositionen benötigt, im Szenario „8er-Shuttle“ 13. Dabei beansprucht eine Halteposition für 4-Personen-Shuttles 5,87 m x 2,50 m und für 8-Personen-Shuttles 7,67 m x 2,60 m. Daraus resultiert, dass die größeren 8-Personen-Shuttles mehr Platz für Haltepositionen benötigen und dementsprechend auch längere Haltekanten aufweisen. Die längeren Haltekanten erfordern wiederum längere Perrons sowie Fahrstreifen, was den Flächenbedarf überproportional erhöht.

**Im Szenario „4er-Shuttle beträgt der Flächenbedarf daher 667,5 m<sup>2</sup>. Im Vergleich dazu wird im Szenario „8er-Shuttle mit 928 m<sup>2</sup> knapp 40 % mehr Fläche benötigt.**

---

F7    Liefere sich das Zubringersystem im Hinblick auf den Flächenbedarf am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen implementieren?

---

Der Flächenbedarf der Szenarien unterscheidet sich je nach betrachteter Fläche. Für die Abstellflächen wird in den Szenarien eine Fläche ähnlicher Ausdehnung benötigt, wobei sich im Szenario „4er-Shuttle“ ein Flächenbedarf von 704 m<sup>2</sup> und im Szenario „8er-Shuttle“ 687 m<sup>2</sup> ergibt. Das Abstellen der Fahrzeuge während der Randzeiten würde etwa 1/3 der aktuell verfügbaren Park-and-Ride-Fläche benötigen.

Die Gesamtfläche für Perron, Haltepositionen und Fahrstreifen beträgt im Status quo 417,0 m<sup>2</sup>. Im Szenario „4er-Shuttle“ steigt der Bedarf auf 583,0 m<sup>2</sup>, im Szenario „8er-Shuttle“ auf 840,0 m<sup>2</sup>. Die deutliche Zunahme des Flächenbedarfs in den Szenarien erklärt sich durch die notwendige Anzahl an Haltepositionen. Da die Shuttles häufiger und in dichterem Taktung ankommen und abfahren, ist in der Folge eine größere Anzahl an Haltepositionen erforderlich. Dadurch vergrößert sich die Fläche, die für den Ein- und Ausstiegsbereich benötigt wird, erheblich. Die längeren Perrons und Fahrstreifen sind eine direkte Folge der größeren Anzahl an Haltepositionen.

Im Gegensatz dazu reduziert sich der Flächenbedarf für Zu- und Abfahrten in den Szenarien im Vergleich zum Status quo. Diese Verringerung begründet sich darin, dass die Shuttles durch ihre kompaktere Bauweise und bessere Manövrierfähigkeit weniger Platz für Zu- bzw. Abfahrten benötigen. Die MIV-Fläche fällt nur im Status quo an, da in den Szenarien des kollektiven automatisierten Fahrens kein MIV mehr vorgesehen ist.

**Die Analyse zeigt, dass ein Zubringersystem mit automatisierten Shuttles am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen grundsätzlich umsetzbar wäre.**

Im Vergleich zum heutigen Zustand würde das Szenario mit kleineren 4er-Shuttles 13 % weniger Fläche beanspruchen, während größere 8er-Shuttles 21 % mehr Fläche bräuchten. Dies ist jedoch vor dem Hintergrund einer deutlichen Steigerung der Erreichbarkeit aufgrund dichterem Takte und einer deutlich verbesserten Abdeckung zu bewerten, sodass die Effizienz der Flächennutzung deutlich besser als im Bestand ausfällt. Durch den Wegfall des Individualverkehrs könnte zudem die Bellerivestraße (teilweise) rückgebaut werden, welche ein signifikantes Flächenpotenzial im Nahbereich des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen aufweist.

## 6. REFLEXION DER ARBEIT

Die vorliegende Arbeit hatte das Ziel, den Flächenbedarf für die Implementierung eines automatisierten Zubringersystems am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen zu analysieren und zu prüfen, ob eine solche Implementierung grundsätzlich möglich wäre. Mithilfe einer Kombination aus Literaturrecherche, Datenauswertung, GIS-Analyse, verschiedenen Berechnungsmethoden und einer Simulation konnte der räumliche Einzugsbereich sowie der Bedarf an Fahrzeugen, Haltepositionen und Flächen für die beiden Szenarien „4er-Shuttle“ und „8er-Shuttle“ bestimmt werden. Die Untersuchung zeigt, dass der Einsatz automatisierter Fahrzeuge in kollektiver Nutzung als Zubringer zum öffentlichen Verkehr im Einzugsgebiet des Bahnhofs Zürich Tiefenbrunnen im Hinblick auf den Flächenbedarf realisierbar ist. Allerdings basieren die Berechnungen auf Annahmen und Vereinfachungen, weshalb eine Verfeinerung der Methoden und der Datengrundlage für eine genauere Dimensionierung erforderlich ist.

Diese Arbeit untersucht den Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen als Fallbeispiel. **Da der Einzugsbereich sowohl dichtere als auch weniger dichte Korridore umfasst, lassen die Ergebnisse Rückschlüsse auf andere Gebiete mit unterschiedlicher Bevölkerungsdichte zu.** Im Rahmen dieser Arbeit war es aufgrund des erhöhten Erhebungs- und Modellierungsaufwands nicht möglich, weitere **Erkenntnisse durch die Modellierung zusätzlicher Verkehrsdrehscheiben** zu gewinnen. **Von besonderem Interesse wären ländliche Räume**, in denen ein hoher Anteil des motorisierten Individualverkehrs und größere Einzugsbereiche erwartet werden.

**Die Annahme einer vollständigen Substitution des motorisierten Individualverkehrs durch**

**kollektives automatisiertes Fahren stellt ein theoretisches Szenario dar**, das möglicherweise nicht der tatsächlichen Entwicklung entspricht. **Es könnte sein, dass anstelle einer vollständigen Substitution mit Shuttles ein weiterer Verkehrsträger hinzukommt, wodurch parallele Strukturen erforderlich wären.** Die genannten Flächenverbräuche gelten daher nur für dieses Szenario, in dem die Abstellflächen für automatisierte Shuttles auf der bisherigen Park-and-Ride-Fläche umgesetzt werden würden. Sollten beide Verkehrssysteme parallel existieren, müssten alternative Flächen identifiziert werden.

Methodische Herausforderungen traten insbesondere bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage auf. Dies liegt vor allem an der **begrenzten Verfügbarkeit kleinräumig detaillierter Daten.** Die üblichen statischen Erhebungen erfassen die Verkehrsmittelnutzung in Abhängigkeit von der Entfernung nicht ausreichend genau. Gerade im Nahbereich von 300 bis 1000 Metern, wo sich die Verkehrsmittelwahl stärker unterscheidet als bei größeren Entfernungen, wären genauere Erhebungen zur Verkehrsmittelwahl notwendig. Die zugrunde liegenden Daten basieren auf statistischen Erhebungen von 2018 bis 2024 und enthalten **keine Projektionen für den Zeitpunkt der technologischen Reife des automatisierten Fahrens.** Es wurde der gegenwärtige Zustand als Grundlage verwendet, ohne Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung oder des Modal Splits zu erstellen.

Ein wichtiger Punkt betrifft die Annahme im Modell, dass Menschen immer zum nächstgelegenen Hub fahren. **Ob die gewählte Route tatsächlich die kürzeste Fahrzeit oder die gewünschte Fahrtrichtung bietet, wurde in der Arbeit nicht berücksichtigt.** Zukünftige Untersuchungen sollten daher reale Fahrzeiten und Reiserichtungen der Nutzer\*innen einbeziehen.

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die **Einwohner\*innen als Basis für die Verkehrsnachfrage**. Um ein vollständigeres Bild der Verkehrsströme zu erhalten, sollten **zukünftige Studien nachfragefokussierter auch Daten zu Arbeitsplätzen, Kindergärten, Schulen und anderen relevanten Einrichtungen erheben**. Außerdem sollte der Einfluss des Ausbaus der (Rad-)Infrastruktur auf die Zahl potenzieller Shuttle-Nutzer\*innen untersucht werden. Weiterhin wurden **Pendler\*innen außerhalb des Einzugsbereichs**, insbesondere aus dem Kanton Zürich, **nicht berücksichtigt**, die am Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen vom Shuttle auf den ÖV umsteigen würden. Dieser Anteil potentieller Nachfrage sollte in weiteren Ausarbeitungen prioritär berücksichtigt werden.

Ein weiterer methodischer Aspekt ist die Berechnung der **Reisezeiten, die lediglich auf durchschnittlichen Geschwindigkeiten basiert**. Genauere Abschätzungen erfordern die **Erstellung von Fahrprofilen**, welche Bremsvorgänge, Beschleunigungen, Haltevorgänge und die Topografie berücksichtigen. Für die praktische Umsetzung der Ergebnisse ist eine detaillierte Netzanalyse notwendig, um optimale Linienverläufe der Shuttles festzulegen.

Die **Substitutionswahrscheinlichkeiten**, also die Wahrscheinlichkeit, dass Menschen vom individuellen Verkehr auf automatisierte Shuttles umsteigen, wurden konservativ angenommen. Um diese genauer zu bestimmen, sind weitere Erhebungen zur Verkehrsmittelwahl und zur Akzeptanz von automatisierten Shuttles in der Bevölkerung notwendig.

Die Taktung der Shuttles sollte ebenfalls überprüft werden. Derzeit fahren sie im Modell in regelmäßigen Abständen von maximal drei Minuten. Gerade im Schweizer Kontext müsste ein **Betrieb entsprechend dem Taktfahrplan** untersucht werden. Ein Batch-Betrieb, bei dem

mehrere Shuttles gleichzeitig mit optimierten Zielen abfahren, könnte ein sinnvolles Betriebskonzept darstellen.

Die vorliegende Arbeit hat die **Barrierefreiheit des Systems nur rudimentär berücksichtigt**, indem Platz für einen Rollstuhlstellplatz im Fahrzeug eingeplant wurde. Dieser könnte dynamisch installiert werden, beispielsweise durch wegklappbare Sitze. **Ein mögliches Fahrzeuglayout wäre daher zu entwickeln**. Weitere Anforderungen an die Barrierefreiheit oder notwendige Sicherheitsstandards, welche die Fahrzeuggröße beeinflussen könnten, wurden nicht berücksichtigt oder erhoben.

Zusammengefasst konnte die Arbeit zeigen, dass die Implementierung eines automatisierten Zubringersystems für den Bahnhof Zürich Tiefenbrunnen realisierbar wäre und somit eine vielversprechende Möglichkeit zur Verbesserung der Erreichbarkeit von Verkehrsknotenpunkten darstellt. Dennoch müssen die Limitationen dieser Arbeit berücksichtigt werden. Die Analyse basiert auf Vereinfachungen und Annahmen, die in zukünftigen Forschungsarbeiten überprüft und verfeinert werden sollten. Insbesondere die begrenzte Datenverfügbarkeit und die Notwendigkeit einer genaueren Modellierung der Verkehrsnachfrage erfordern weitere Untersuchungen.

## 7. WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Diese Diplomarbeit stellt eine erste Auseinandersetzung mit dem konkreten Flächenbedarf eines automatisierten Shuttle-Systems im Zubringerverkehr zum ÖPNV dar und beleuchtet die damit verbundenen komplexen Herausforderungen. Dabei zeigt sich, dass die Integration automatisierter Shuttles in bestehende Verkehrssysteme, insbesondere an Verkehrsdrehscheiben, ein vielschichtiges Forschungsfeld mit zahlreichen offenen Fragen ist. Um die Potentiale dieser Technologie in gesellschaftlichen Nutzen zu transferieren und eine erfolgreiche Implementierung zu ermöglichen, bedarf es weiterer Forschung.

**Ein klarer Forschungsbedarf besteht im Zusammenhang zwischen Verkehrsdrehscheiben und dem automatisierten Fahren.** Die bisherige Forschung konzentriert sich auf deren Einsatz als Taxi- bzw. Car- und Ridesharing-Konzept als Ergänzung oder Ersatz für das gegenwärtige Verkehrssystem. Dabei liegt der Fokus hauptsächlich auf der Veränderung der Fahrzeuganzahl, der benötigten Stellflächen und dem Flächenpotenzial sowie auf der Fahrzeugkilometerleistung einer Flotte automatisierter Fahrzeuge. Teilweise wird der ÖV in die Wirkungen des automatisierten Fahrens einbezogen; **die spezifischen Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf Verkehrsknotenpunkte** oder Verkehrsdrehscheiben sind dagegen kein Gegenstand der Forschung. Es besteht daher ein dringender Forschungsbedarf hinsichtlich des Zusammenhangs von Verkehrsdrehscheiben und automatisierten Fahrsystemen. Insbesondere die Auswirkungen unterschiedlicher Konzepte des automatisierten Fahrens auf Verkehrsknotenpunkte sollten Gegenstand zukünftiger Forschung sein. Eine differenzierte

Analyse verschiedener Konzepte würde die Identifizierung und Abwägung vorteilhafter und nachteiliger Konzepte und damit das frühzeitige Einschlagen des entsprechenden Entwicklungspfades ermöglichen. Das im RZU-Bericht skizzierte und als Ausgangspunkt für diese Diplomarbeit dienende Szenario einer vollständigen Substitution des MIV durch den Umweltverbund und automatisierter Shuttles (hier wäre grundsätzlich zu klären, ob automatisierte Shuttles dem Umweltverbund (Sahling 2022, S. 10) zuzurechnen sind) stellt dabei ein Maximalszenario dar. Um die Vor- und Nachteile dieses Ansatzes bewerten zu können, ist die **Entwicklung von Vergleichsszenarien auf Grundlage alternativer Shuttle-Konzepte und -Systeme** unbedingt notwendig. So könnten die jeweiligen Implikationen für Verkehrsdrehscheiben umfassend analysiert und Handlungsempfehlungen für die Gestaltung automatisierter Fahrzeugtypen und Mobilitätssysteme abgeleitet werden.

Zukünftige Studien sollten daher die Planung und den Betrieb von Shuttle-Systemen detaillierter untersuchen. Ein **detailliertes Fahrdiagramm**, welches das tatsächliche Fahrverhalten inklusive Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen abbildet, ist für realistische Simulationen unerlässlich. Hierbei sollten auch **weitere mögliche Shuttle-Größen** berücksichtigt und deren Auswirkungen analysiert werden. Die **Entwicklung eines Tools, das speziell auf die Ermittlung des Bedarfs an Haltepositionen und des Flächenverbrauchs automatisierter Shuttle-Systeme an Verkehrsdrehscheiben zugeschnitten ist**, wäre ein wertvolles Instrument für die praktische Planung.

Weiterhin stellen sich Forschungsfragen zu sozioökonomischen Aspekten. **Die Kosten eines Shuttle-Systems müssten bestimmt werden.** Gleichzeitig ist die soziale Gerechtigkeit zu gewährleisten, indem **die**

**Zugänglichkeit automatisierter Shuttles für alle Bevölkerungsgruppen** sichergestellt wird. Die durch den Ersatz von MIV durch ÖV und automatisierte Shuttles freiwerdenden **Flächenpotenziale sollten analysiert und Nutzungsstrategien entwickelt** werden.

Im Bereich der Governance stellen sich ebenfalls wichtige Forschungsfragen. Der **Datenschutz** der Fahrgäste muss gewährleistet werden, insbesondere im **Hinblick auf die Erhebung und Nutzung von Bewegungsdaten**. Es gilt, **Sicherheitsstandards für automatisierte Shuttles**, sowohl für die Verkehrs- und Fahrgastsicherheit, als auch die IT-Sicherheit zu definieren. Nachdem kein Fahrpersonal mehr eingesetzt werden würde, müsste ein umfassendes Notfallmanagement für Unfälle und technische Probleme entwickelt werden. **Die Ausarbeitung eines Leitfadens oder einer Richtlinie, ähnlich den Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs** (FGSV 2003), könnte die Umsetzungsplanung für ein automatisiertes Shuttle-System erheblich vereinfachen und die Einhaltung von Mindeststandards garantieren.

Forschung zur **räumlichen Aufteilung und Gestaltung von Stationen automatisierter Shuttle-Systeme** an Verkehrsdrehscheiben Gestaltung befassen, um den **Umstieg zwischen den Verkehrsmitteln** Nutzer\*innenfreundlich zu gestalten. Dabei sind auch die Auswirkungen der Stationsgestaltung auf die Nutzer\*innenerfahrung, insbesondere hinsichtlich dynamischer Haltepositionen, zu untersuchen. Weiterhin müsste untersucht werden, wie die **Barrierefreiheit eines Shuttle-Systems**, also die Barrierefreiheit der Fahrzeuge und der (Zwischen)Haltestellen sichergestellt werden kann.

Insgesamt zeigt sich ein immenser Forschungsbedarf im Bereich des automatisierten Fahrens, insbesondere im

Zusammenhang mit Verkehrsknotenpunkten bzw. Verkehrsdrehscheiben. Dieser ist notwendig, um nachhaltige Entwicklungspfade frühzeitig einschlagen zu können. Festzuhalten ist, dass die Entwicklung im Bereich des automatisierten Fahrens dynamisch und mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollten daher im Zuge technologischer und gesellschaftlicher Entwicklungen kontinuierlich überprüft und aktualisiert werden.

## 8. LITERATURVERZEICHNIS

- ADLER, RASMUS (2019): AUTONOM ODER HOCHAUTOMATISIERT? FRAUNHOFER IESE BLOG. HG. V. FRAUNHOFER IESE. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.IESE.FRAUNHOFER.DE/BLOG/AUTONOM-ODER-VIELLEICHT-DOCH-NUR-HOCHAUTOMATISIERT-WAS-IST-EIGENTLICH-DER-UNTERSCHIED/](https://www.iese.fraunhofer.de/blog/autonom-oder-vielleicht-doch-nur-hochautomatisiert-was-ist-eigentlich-der-unterschied/), ZULETZT AKTUALISIERT AM 29.01.2024, ZULETZT GEPRÜFT AM 17.05.2024.
- AKSIONOV, ANDREI; KYRKI, VILLE (2021): RULE-BASED DECISION-MAKING SYSTEM FOR AUTONOMOUS VEHICLES AT INTERSECTIONS WITH MIXED TRAFFIC ENVIRONMENT. IN: 2021 IEEE INTERNATIONAL INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS CONFERENCE (ITSC). 2021 IEEE INTERNATIONAL INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS CONFERENCE (ITSC). INDIANAPOLIS, IN, USA, 19.09.2021 - 22.09.2021: IEEE, S. 660-666.
- AMBROSE, JESSIE K.; BUKOVSKY, DANIEL J.; SEDLAK, TIMOTHY J.; GOEDEN, SCOTT J. (2009): DEVELOPING A TRAVEL ROUTE PLANNER ACCOUNTING FOR TRAFFIC VARIABILITY. IN: 2009 SYSTEMS AND INFORMATION ENGINEERING DESIGN SYMPOSIUM. 2009 SYSTEMS AND INFORMATION ENGINEERING DESIGN SYMPOSIUM (SIEDS). CHARLOTTESVILLE, VA, USA, 24.04.2009 - 24.04.2009: IEEE, S. 264-268.
- AMERICAN PLANNING ASSOCIATION (APA) (HG.) (2020): REGIONAL MOBILITY HUB STRATEGY. SAN DIEGO COUNTY AND IMPERIAL COUNTY, CALIFORNIA. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.PLANNING.ORG/AWARDS/2020/ACHIEVEMENT/REGIONAL-MOBILITY-HUB/](https://www.planning.org/awards/2020/achievement/regional-mobility-hub/), ZULETZT GEPRÜFT AM 07.10.2024.
- ARE, BUNDESAMT FÜR RAUMENTWICKLUNG (HG.) (2023): VERKEHRSDREHSCHLEIBEN. ERKENNTNISSE AUS VERSCHIEDENEN GRUNDLAGENSTUDIEN: SYNTHESBERICHT.
- ARK INVEST (2019): ARK INVEST. TASHA KEENEY (REGIE). ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://ARK-INVEST.COM/PODCAST/ON-THE-ROAD-TO-FULL-AUTONOMY-WITH-ELON-MUSK](https://ark-invest.com/podcast/on-the-road-to-full-autonomy-with-elon-musk/), ZULETZT GEPRÜFT AM 05.12.2023.
- ASTRA, BUNDESAMT FÜR STRASSEN (2024): STUFEN DER AUTOMATISIERUNG. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.ASTRA.ADMIN.CH/ASTRA/DE/HOME/THEMEN/INTELLIGENTE-MOBILITAET/STUFEN-DER-AUTOMATISIERUNG.HTML](https://www.astro.admin.ch/astro/de/home/themen/intelligente-mobilitaet/stufen-der-automatisierung.html), ZULETZT AKTUALISIERT AM 17.05.2024, ZULETZT GEPRÜFT AM 17.05.2024.
- AUDI AG (HG.) (2023): AUTONOMES FAHREN | AUDI.COM. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.AUDI.COM/DE/INNOVATION/FUTURE-TECHNOLOGY/AUTONOMOUS-DRIVING.HTML](https://www.audi.com/de/innovation/future-technology/autonomous-driving.html), ZULETZT AKTUALISIERT AM 05.12.2023, ZULETZT GEPRÜFT AM 05.12.2023.
- AXHAUSEN, KAY W.; LIVINGSTON, CLARISSA; HÖRL, SEBASTIAN; BRUNS, FRANK; FISCHER, REMO; TASNÁDY, BENCE (2020): AUSWIRKUNGEN DES AUTOMATISIERTEN FAHRENS; TEILPROJEKT 2; VERKEHRSCHE AUSWIRKUNGEN UND INFRASTRUKTURBEDARF.
- BAUMGARDNER, WILL; CASSIDY, CHRISTA; RUHL, MELISSA (2019): THE PROMISE OF SEAMLESS MOBILITY. IN: WILLIAM RIGGS (HG.): DISRUPTIVE TRANSPORT. DRIVERLESS CARS, TRANSPORT INNOVATION AND THE SUSTAINABLE CITY OF TOMORROW. LONDON, NEW YORK: ROUTLEDGE TAYLOR & FRANCIS GROUP (ROUTLEDGE EQUITY, JUSTICE AND THE SUSTAINABLE CITY SERIES), S. 11-20.
- BENLEULMI, AHMED ZIAD; BLECKER, THORSTEN (2017): INVESTIGATING THE FACTORS INFLUENCING THE ACCEPTANCE OF FULLY AUTONOMOUS CARS. EPUBLI. IN: PROCEEDINGS OF THE HAMBURG INTERNATIONAL CONFERENCE OF LOGISTICS (HICL). DOI: 10.15480/882.1449.
- BERTRAND, VALENTIN (2024): PARIS : APRÈS SIX ANS DE TRAVAUX, LE MÉTRO 4 EST OFFICIELLEMENT EN PILOTAGE AUTOMATIQUE. IN: FRANCE BLEU, 19.01.2024. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.FRANCEBLEU.FR/INFOS/TRANSPORTS/PARIS-APRES-SIX-ANS-DE-TRAVAUX-LE-METRO-4-EST-OFFICIELLEMENT-EN-PILOTAGE-AUTOMATIQUE-9834814](https://www.francebleu.fr/infos/transports/paris-apres-six-ans-de-travaux-le-metro-4-est-officiellement-en-pilotage-automatique-9834814), ZULETZT GEPRÜFT AM 11.07.2024.

- BOONPRONG, SORNKITJA; PUNTURASAN, NATHAPAT; VARNAKOVIDA, PARIWATE; PRECHATHAMWONG, WICHIE (2024): TOWARDS SUSTAINABLE URBAN MOBILITY: VORONOI-BASED SPATIAL ANALYSIS OF EV CHARGING STATIONS IN BANGKOK. IN: SUSTAINABILITY 16 (11), . DOI: 10.3390/su16114729.
- BROADDUS, ANDREA (2019): LEARNING FROM THE PAST AND AVOIDING FUTURE MISTAKES. IN: WILLIAM RIGGS (HG.): DISRUPTIVE TRANSPORT. DRIVERLESS CARS, TRANSPORT INNOVATION AND THE SUSTAINABLE CITY OF TOMORROW. LONDON, NEW YORK: ROUTLEDGE TAYLOR & FRANCIS GROUP (ROUTLEDGE EQUITY, JUSTICE AND THE SUSTAINABLE CITY SERIES), S. 207–2017.
- BRUCK, EMILIA M.; SCHEUVENS, RUDOLF; BERGER, MARTIN (2021): STEUERUNG UND GESTALTUNG VON RÄUMLICHEN SCHNITTSTELLEN DER MOBILITÄT. IN: MATHIAS MITTEREGGER, EMILIA M. BRUCK, AGGELOS SOTEROPOULOS, ANDREA STICKLER, MARTIN BERGER, JENS S. DANGSCHAT ET AL. (HG.): AVENUE21. POLITISCHE UND PLANERISCHE ASPEKTE DER AUTOMATISIERTEN MOBILITÄT. BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER VIEWEG, S. 133–158.
- BUNDESAMT FÜR RAUMENTWICKLUNG (ARE) (HG.) (2010): ERSCHLIESSUNG UND ERREICHBARKEIT IN DER SCHWEIZ MIT DEM ÖFFENTLICHEN VERKEHR UND DEM MOTORISIERTEN INDIVIDUALVERKEHR. GRUNDLAGENBERICHT.
- BUNDESAMT FÜR RAUMENTWICKLUNG (ARE) (HG.) (2015): MIKROZENSUS MOBILITÄT UND VERKEHR. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.ARE.ADMIN.CH/ARE/DE/HOME/MOBILITAET/GRUNDLAGEN-UND-DATEN/MZMV.HTML](https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/grundlagen-und-daten/mzmv.html), ZULETZT GEPRÜFT AM 15.09.2024.
- BUNDESAMT FÜR RAUMENTWICKLUNG (ARE) (HG.) (2021): MOBILITÄT UND RAUM 2050. SACHPLAN VERKEHR.
- BUNDESAMT FÜR STATISTIK (BFS) (HG.) (2019): STATISTIK DER BEVÖLKERUNG UND HAUSHALTE (STATPOP). ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.BFS.ADMIN.CH/BFS/DE/HOME/DIENSTLEISTUNGEN/GEOSTAT/GEODATEN-BUNDESSTATISTIK/GEBAEUDE-WOHNUNGEN-HAUSHALTE-PERSONEN/BEVOELKERUNG-HAUSHALTE-AB-2010.ASSETDETAIL.14716365.HTML](https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/dienstleistungen/geostat/geodaten-bundesstatistik/gebaeude-wohnungen-haushalte-personen/bevoelkerung-haushalte-ab-2010.assetdetail.14716365.html), ZULETZT AKTUALISIERT AM 2019, ZULETZT GEPRÜFT AM 10.09.2024.
- BUNDESAMT FÜR STATISTIK (BFS) (HG.) (2020): SZENARIEN ZUR BEVÖLKERUNGSENTWICKLUNG DER SCHWEIZ UND DER KANTONE 2020-2050.
- BUNDESAMT FÜR STATISTIK (BFS) (HG.) (2022): GEODATEN DER BUNDESSTATISTIK (GEOSTAT). ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.BFS.ADMIN.CH/BFS/DE/HOME/DIENSTLEISTUNGEN/GEOSTAT/GEODATEN-BUNDESSTATISTIK.HTML](https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/dienstleistungen/geostat/geodaten-bundesstatistik.html), ZULETZT GEPRÜFT AM 01.09.2024.
- BUNDESAMT FÜR STATISTIK (BFS) (HG.) (2023): MOBILITÄTSVERHALTEN DER BEVÖLKERUNG IM JAHR 2021. RESULTATE DES MIKROZENSUS. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.BFS.ADMIN.CH/ASSET/DE/24165365](https://www.bfs.admin.ch/asset/de/24165365), ZULETZT AKTUALISIERT AM 06.04.2023, ZULETZT GEPRÜFT AM 15.05.2024.
- BUNDESAMT FÜR VERKEHR (BAV) (HG.) (2024): LAYOUT VON LINIENBUSSEN. LEITFADEN. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.BAV.ADMIN.CH/DAM/BAV/DE/DOKUMENTE/LEITFAEDEN/STRASSE/LAYOUT-VON-LINIENBUSSEN.PDF.DOWNLOAD.PDF/BAV-LEITFADEN%20BEHIG-KONFORMES%20INNENLAYOUT%20LINIENBUSSE%20DEUTSCH.PDF](https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/leitfaeden/strasse/layout-von-linienbussen.pdf.download.pdf/bav-leitfaeden%20behig-konformes%20innenlayout%20linienbusse%20deutsch.pdf).
- CERVERO, ROBERT (2002): INDUCED TRAVEL DEMAND: RESEARCH DESIGN, EMPIRICAL EVIDENCE, AND NORMATIVE POLICIES. IN: JOURNAL OF PLANNING LITERATURE 17 (1), S. 3–20. DOI: 10.1177/088122017001001.
- COHEN, TOM; CAVOLI, CLÉMENCE (2019): AUTOMATED VEHICLES: EXPLORING POSSIBLE CONSEQUENCES OF GOVERNMENT (NON)INTERVENTION FOR CONGESTION AND ACCESSIBILITY. IN: TRANSPORT REVIEWS 39 (1), S. 129–151. DOI: 10.1080/01441647.2018.1524401.

- DANGSCHAT, JENS S.; STICKLER, ANDREA (2020): KRITISCHE PERSPEKTIVEN AUF EINE AUTOMATISIERTE UND VERNETZTE MOBILITÄT. IN: CHRISTINE HANNEMANN, FRANK OTHENGRAFEN, JÖRG POHLAN, BRIGITTA SCHMIDT-LAUBER, RAINER WEHRHAHN UND SIMON GÜNTNER (HG.): JAHRBUCH STADTREGION 2019/2020. SCHWERPUNKT: DIGITALE TRANSFORMATION. WIESBADEN, HEIDELBERG: SPRINGER VS (JAHRBUCH STADTREGION, 2019/2020), S. 53–74. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://LINK.SPRINGER.COM/CHAPTER/10.1007/978-3-658-30750-9\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-30750-9_3).
- DANILINA, NINA; TEPLOVA, IRINA (2018): TRAFFIC FLOW ORGANIZATION IN URBAN TRANSPORT TRANSIT HUBS. IN: IOP CONF. SER.: MATER. SCI. ENG. 365. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022015.
- DAUER, ARMANDO; DIAS, TERESA GALVÃO; SOUSA, JORGE PINHO DE; PRATA, BRUNO DE ATHAYDE (2024): CONFIGURATIONS AND FEATURES OF DEMAND RESPONSIVE TRANSPORTS. IN: TRANSPORTATION RESEARCH PROCEDIA 78, S. 71–78. DOI: 10.1016/j.trpro.2024.02.010.
- DEL DUCE, ANDREA; TRACHSEL, THOMAS; HOERLER, RAPHAEL (2020): AUSWIRKUNGEN DES AUTOMATISIERTEN FAHRENS; TEILPROJEKT 6: RÄUMLICHE AUSWIRKUNGEN. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://ETHZ.CH/CONTENT/DAM/ETHZ/SPECIAL-INTEREST/BAUG/IVT/IVT-DAM/VPL/PROJECTS/ASTRA-2018-002/AB1578-6.PDF](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/projects/ASTRA-2018-002/ab1578-6.pdf), ZULETZT GEPRÜFT AM 12.10.2023.
- DELFT DESIGN LABS (HG.) (2020): DESIGN OF A MOBILITY HUB AS PART OF LIVING AS A SERVICE CONCEPT. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://DELFTDESIGNLABS.ORG/PROJECTS/DESIGN-OF-A-MOBILITY-HUB-AS-PART-OF-LIVING-AS-A-SERVICE-CONCEPT/](https://delftdesignlabs.org/projects/design-of-a-mobility-hub-as-part-of-living-as-a-service-concept/), ZULETZT GEPRÜFT AM 07.10.2024.
- DIECKHOFF, CHRISTIAN; APPELRATH, HANS-JÜRGEN; FISCHEDICK, MANFRED; GRUNWALD, ARMIN; HÖFFLER, FELIX; MAYER, CHRISTOPH; WEIMER-JEHLE, WOLFGANG (2014): ZUR INTERPRETATION VON ENERGIESZENARIOEN. IN: ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT, S. 4–42.
- EBP (HG.) (2017): EINSATZ AUTOMATISierter FAHRZEUGE IM ALLTAG - DENKBARE ANWENDUNGEN UND EFFEKTE IN DER SCHWEIZ. SCHLUSSBERICHT GRUNDLAGENANALYSE (PHASE A). UNTER MITARBEIT VON FABIENNE PERRET, FRANK BRUNS, LORENZ RAYMANN, SIMON HOFMANN, REMO FISCHER, CHRISTOPH ABEGG ET AL. ZÜRICH.
- EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE UND KOMMUNIKATION (UVEK) (HG.) (2017): ZUKUNFT MOBILITÄT SCHWEIZ. UVEK-ORIENTIERUNGSRAHMEN 2040. BERN.
- EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE UND KOMMUNIKATION (UVEK) (HG.) (2018): VERORDNUNG ÜBER DAS AUTOMATISIERTE FAHREN. ERLÄUTERNDER BERICHT ZUR ERÖFFNUNG DES VERNEHMLASSUNGSVERFAHRENS. BERN.
- EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE UND KOMMUNIKATION (UVEK) (HG.) (2022): FAHRZEUGGRUPPEN DER TYPENGENEHMIGUNG. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.ASTRA.ADMIN.CH/DAM/ASTRA/DE/DOKUMENTE/HOMOLOGATION\\_VONFAHRZEUGEN/FAHRZEUGEINTEILUNG.PDF.DOWNLOAD.PDF/FAHRZEUGEINTEILUNG.PDF](https://www.astro.admin.ch/dam/astro/de/dokumente/homologation_vonfahrzeugen/fahrzeugeinteilung.pdf.download.pdf/fahrzeugeinteilung.pdf).
- FELDMANN, JAN (2024): STRAFRECHT UND AUTONOMES FAHREN (MANZWISSENSCHAFT).
- FLUGHAFEN DÜSSELDORF GMBH (HG.) (2019): SIEBEN MINUTEN ZUKUNFT. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.DUS.COM/DE-DE/ERLEBEN/DUSMOMENTE/SIEBEN-MINUTEN-ZUKUNFT](https://www.dus.com/de-de/erleben/dusmomente/sieben-minuten-zukunft), ZULETZT AKTUALISIERT AM 11.07.2024, ZULETZT GEPRÜFT AM 11.07.2024.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (2003): EMPFEHLUNGEN FÜR ANLAGEN DES ÖFFENTLICHEN PERSONENNAHVERKEHRS (EAÖ). AUSG. 2003. KÖLN: FGSV-VERL. (FGSV, 289).

- FRAEDRICH, EVA; LENZ, BARBARA (2015): GESELLSCHAFTLICHE UND INDIVIDUELLE AKZEPTANZ DES AUTONOMEN FAHRENS. IN: MARKUS MAURER, J. CHRISTIAN GERDES, BARBARA LENZ UND HERMANN WINNER (HG.): AUTONOMES FAHREN. TECHNISCHE, RECHTLICHE UND GESELLSCHAFTLICHE ASPEKTE. BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER VIEWEG (SPRINGER OPEN).
- FRIEDRICH, MARKUS; HARTL, MAXIMILIAN (2016): MEGAFON - MODELLERGEBNISSE GETEILTER AUTONOMER 10 FAHRZEUGFLOTTEN DES ÖFFENTLICHEN NAHVERKEHRS. SCHLUSSBERICHT. HG. V. INSTITUT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN. STUTTGART. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.ISV.UNI-STUTTGART.DE/VUV/PUBLIKATIONEN/DOWNLOADS/MEGAFON\\_ABSCHLUSSBERICHT\\_V028\\_20161212.PDF](https://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publikationen/downloads/megafon_abschlussbericht_v028_20161212.pdf), ZULETZT GEPRÜFT AM 12.02.2024.
- FROST & SULLIVAN (HG.) (2006): CUSTOMER DESIRABILITY AND WILLINGNESS TO PAY ACTIVE AND PASSIVE SAFETY SYSTEMS IN CANADA.
- FULTON, LEW; MASON, JACOB; MEROUX, DOMINIQUE (2017): THREE REVOLUTIONS IN URBAN TRANSPORTATION. HOW TO ACHIEVE THE FULL POTENTIAL OF VEHICLE ELECTRIFICATION, AUTOMATION AND SHARED MOBILITY IN URBAN TRANSPORTATION SYSTEMS AROUND THE WORLD BY 2050. DAVIS. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://STEPS.UCDAVIS.EDU/WP-CONTENT/UPLOADS/2017/05/ITDP-3R-REPORT-V6.PDF](https://steps.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2017/05/ITDP-3R-REPORT-V6.pdf), ZULETZT GEPRÜFT AM 09.02.2024.
- GAUSEMEIER, JÜRGEN; FINK, ALEXANDER; SCHLAKE, OLIVER (1995): SZENARIO-MANAGEMENT : PLANEN UND FÜHREN MIT SZENARIEN. IN: SZENARIO-MANAGEMENT (ISBN 3446181695).
- GAVANAS, NIKOLAOS (2019): AUTONOMOUS ROAD VEHICLES: CHALLENGES FOR URBAN PLANNING IN EUROPEAN CITIES. IN: URBAN SCIENCE 3 (2), S. 1-13. DOI: 10.3390/URBANSOCI3020061.
- GERIKE, REGINE; HUBRICH, STEFAN; LIESKE, FRANK; WITTIG, SEBASTIAN; WITTWER, RICO (2020A): MOBILITÄTSSTECKBRIEF FÜR SRV-STÄDTEPEGEL. DRESDEN.
- GERIKE, REGINE; HUBRICH, STEFAN; LIESKE, FRANK; WITTIG, SEBASTIAN; WITTWER, RICO (2020B): SONDERAUSWERTUNG ZUM FORSCHUNGSPROJEKT „MOBILITÄT IN STÄDTEN – SRV 2018“. STÄDTEVERGLEICH. DRESDEN.
- GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, ESTHER; NOGUÉS, SOLEDAD; STEAD, DOMINIC (2020): PARKING FUTURES: PREPARING EUROPEAN CITIES FOR THE ADVENT OF AUTOMATED VEHICLES. IN: LAND USE POLICY 91C, S. 104010. DOI: 10.1016/J.LANDUSEPOL.2019.05.029.
- GOODALL, NOAH J. (2014): ETHICAL DECISION MAKING DURING AUTOMATED VEHICLE CRASHES. IN: TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 2424 (1), S. 58-65. DOI: 10.3141/2424-07.
- HEINRICHS, DIRK (2015): AUTONOMES FAHREN UND STADTSTRUKTUR. IN: MARKUS MAURER, J. CHRISTIAN GERDES, BARBARA LENZ UND HERMANN WINNER (HG.): AUTONOMES FAHREN. TECHNISCHE, RECHTLICHE UND GESELLSCHAFTLICHE ASPEKTE. BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER VIEWEG (SPRINGER OPEN), S. 219-239.
- HELLER, JOCHEN (2021): AKTIVE MOBILITÄT IN WIEN. HG. V. MAGISTRATSABTEILUNG 18 - STADTENTWICKLUNG UND STADTPLANUNG. WIEN. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://BLOG.STADTENTWICKLUNG.WIEN.GV.AT/WP-CONTENT/UPLOADS/SITES/57/2021/03/VERT\\_AUSW\\_AKTIV\\_MOBILI\\_ENDB\\_21.01.2021.PDF](https://blog.stadtentwicklung.wien.gv.at/wp-content/uploads/sites/57/2021/03/VERT_AUSW_AKTIV_MOBILI_ENDB_21.01.2021.pdf).
- HERZOG, ALEXANDER (2021): SIMULATION MIT DEM WARTESCHLANGENSIMULATOR. MATHEMATISCHE MODELIERUNG UND SIMULATION VON PRODUKTIONS- UND LOGISTIKPROZESSEN. WIESBADEN, HEIDELBERG: SPRINGER GABLER (STUDIENBÜCHER WIRTSCHAFTSMATHEMATIK).

- HUB, FABIAN; WILBRING, MARC; KETTWICH, CARMEN; OEHL, MICHAEL (2020): DESIGNING RIDE ACCESS POINTS FOR SHARED AUTOMATED VEHICLES. AN EARLY STAGE PROTOTYPE EVALUATION. IN: CONSTANTINE STEPHANIDIS, MARGHERITA ANTONA UND STAVROULA NTOA (HG.): HCI INTERNATIONAL 2020 – LATE BREAKING POSTERS. 22ND INTERNATIONAL CONFERENCE, HCII 2020, COPENHAGEN, DENMARK, JULY 19–24, 2020, PROCEEDINGS, PART II. 1ST ED. 2020. CHAM: SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING; IMPRINT SPRINGER (SPRINGER eBook COLLECTION, 1294), S. 560–567.
- HUNSICKER, FRANK; KNEI, ANDREAS; LOBENBERG, GERNOT; LOHRMANN, DORIS; MEIER, ULRIKE; NORDHOFF, SINA; PFEIFFER, STEPHAN (2017): PILOTBETRIEB MIT AUTONOMEN SHUTTLES AUF DEM BERLINER EUREF-CAMPUS. ERFAHRUNGSBERICHT VOM ERSTEN TESTFELD ZUR INTEGRIERTEN URBANEN MOBILITÄT DER ZUKUNFT. IN: INTERNATIONALES VERKEHRSWESSEN.
- INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM (ITF) (HG.) (2018): THE SHARED-USE CITY. MANAGING THE CURB. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.ITF-OECD.ORG/SITES/DEFAULT/FILES/DOCS/SHARED-USE-CITY-MANAGING-CURB\\_5.PDF](https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/shared-use-city-managing-curb_5.pdf), ZULETZT GEPRÜFT AM 20.11.2023.
- ITF (HG.) (2015): URBAN MOBILITY SYSTEM UPGRADE. HOW SHARED SELF-DRIVING CARS COULD CHANGE CITY TRAFFIC. PARIS. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.ITF-OECD.ORG/SITES/DEFAULT/FILES/DOCS/15CPB\\_SELF-DRIVINGCARS.PDF](https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb_self-drivingcars.pdf), ZULETZT GEPRÜFT AM 12.02.2024.
- KANTON ZÜRICH (HG.) (2018): GESAMTVERKEHRSKONZEPT KANTON ZÜRICH 2018. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.ZH.CH/CONTENT/DAM/ZHWEB/BILDER-DOKUMENTE/THEMEN/MOBILITAET/MOBILITAETSPLANUNG/GESAMTVERKEHRSKONZEPT/KTZH\\_AFV\\_GVK\\_KANTON\\_ZUERICH\\_2018\\_2018.03.16.PDF](https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/mobilitaet/mobilitaetsplanung/gesamtverkehrskonzept/ktzh_afv_gvk_kanton_zuerich_2018_2018.03.16.pdf).
- KANTON ZÜRICH (HG.) (2024): GIS-ZH. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://MAPS.ZH.CH/](https://maps.zh.ch/), ZULETZT GEPRÜFT AM 07.10.2024.
- KANTONSRAT ZÜRICH (HG.) (2023): KANTON ZÜRICH RICHTPLAN. ZÜRICH.
- KÄRESDOTTER, ELISIE; PAGE, JESSICA; MÖRTBERG, ULLA; NÄSSTRÖM, HELENA; KALANTARI, ZAHRA (2022): FIRST MILE/ LAST MILE PROBLEMS IN SMART AND SUSTAINABLE CITIES: A CASE STUDY IN STOCKHOLM COUNTY. IN: JOURNAL OF URBAN TECHNOLOGY 29 (2), S. 115–137. DOI: 10.1080/10630732.2022.2033949.
- KIM, GUNZUNG; ASHRAF, IMRAN; EOM, JEONGSOOK; PARK, YONGWAN (2024): A NOVEL CYCLOIDAL SCANNING LiDAR SENSOR USING RISLEY PRISM AND OPTICAL ORTHOGONAL FREQUENCY-DIVISION MULTIPLE ACCESS FOR AERIAL APPLICATIONS. IN: IEEE ACCESS 12, S. 24–45. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3383810.
- KLEINE, SVEN (2002): ÜBERPRÜFUNG DES NACHFRAGEPOTENTIALS IM SCHIENENPERSONENNAHVERKEHR AN AUSGEWÄHLTEN ZUGANGSSTELLEN DER BAHNSTRECKE REHNA-SCHWERIN-PARCHIM ANHAND EINES PROJEKTBEZOGENEN MODELLS. IN: ECTL PETERPAN (8).
- LANG, NIKOLAUS; RÜSSMANN, MICHAEL; DAUNER, THOMAS; KOMIYA, SATOSHI; MOSQUET, XAVIER; DOUBARA, XANTHI; MEI-POCHTLER, ANTONELLA (2016): SELF-DRIVING VEHICLES, ROBO-TAXIS, AND THE URBAN MOBILITY REVOLUTION. IN: BCG GLOBAL, 2016. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.BCG.COM/PUBLICATIONS/2016/AUTOMOTIVE-PUBLIC-SECTOR-SELF-DRIVING-VEHICLES-ROBO-TAXIS-URBAN-MOBILITY-REVOLUTION](https://www.bcg.com/publications/2016/automotive-public-sector-self-driving-vehicles-robo-taxis-urban-mobility-revolution), ZULETZT GEPRÜFT AM 26.03.2024.
- LANZER, MIRIAM; BABEL, FRANZISKA; YAN, FEI; ZHANG, BIHAN; YOU, FANG; WANG, JIANMIN; BAUMANN, MARTIN (2020): DESIGNING COMMUNICATION STRATEGIES OF AUTONOMOUS VEHICLES WITH PEDESTRIANS: AN INTERCULTURAL STUDY. IN: 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMOTIVE USER INTERFACES AND INTERACTIVE VEHICULAR APPLICATIONS. AUTOMOTIVEUI '20: 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMOTIVE USER INTERFACES AND INTERACTIVE VEHICULAR APPLICATIONS. VIRTUAL EVENT DC USA, 21 09 2020 22 09 2020. NEW YORK, NY, USA: ACM, S. 122–131.

- LESH, MATTHEW CURTIS (2013): INNOVATIVE CONCEPTS IN FIRST-LAST MILE CONNECTIONS TO PUBLIC TRANSPORTATION. IN: JR. STEVEN L. JONES (HG.): URBAN PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEMS 2013. THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEMS. PARIS, FRANCE, NOVEMBER 17-20, 2013. RESTON, VA: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, S. 63-74.
- LITMAN, TODD (2023): AUTONOMOUS VEHICLE IMPLEMENTATION PREDICTIONS. IMPLICATIONS FOR TRANSPORT PLANNING. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.VTPI.ORG/AVIP.PDF](https://www.vtpi.org/avip.pdf), ZULETZT GEPRÜFT AM 08.01.2024.
- LIU, TAO; CEDER, AVISHAI; RAU, ANDREAS (2020): USING DEFICIT FUNCTION TO DETERMINE THE MINIMUM FLEET SIZE OF AN AUTONOMOUS MODULAR PUBLIC TRANSIT SYSTEM. IN: TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 2674 (11), S. 532-541. DOI: 10.1177/0361198120945981.
- LUTZ, FELIX (2017): BAHN 2050: SCHIENENVERKEHRSKONZEPT MIT ERSCHLIESSUNG DURCH SELBSTFAHRENDE AUTOS. DIPLOMARBEIT. ETH ZÜRICH.
- MARTIN, ROBERT; BRUCK, EMILIA M.; SOTEROPOULOS, AGGELOS (2021): TRANSFORMATIONS OF EUROPEAN PUBLIC SPACES WITH AVs. IN: MATHIAS MITTEREGGER, EMILIA M. BRUCK, AGGELOS SOTEROPOULOS, ANDREA STICKLER, MARTIN BERGER, JENS S. DANGSCHAT ET AL. (HG.): AVENUE21. POLITISCHE UND PLANERISCHE ASPEKTE DER AUTOMATISIERTEN MOBILITÄT. BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER VIEWEG, S. 159-178.
- MATTHEWS, MILECIA; CHOWDHARY, GIRISH V.; KIESON, EMILY (2017): INTENT COMMUNICATION BETWEEN AUTONOMOUS VEHICLES AND PEDESTRIANS. IN: ARXIV ABS/1708.07123.
- MENNICKEN, ESTELLE; LEMOY, RÉMI; CARUSO, GEOFFREY (2023): ROAD NETWORK DISTANCES AND DETOURS IN EUROPE: RADIAL PROFILES AND CITY SIZE EFFECTS. IN: ENVIRONMENT AND PLANNING B: URBAN ANALYTICS AND CITY SCIENCE 2024 (51), S. 174-194.
- METZ, CADE; HENRY, JASON; LAFFIN, BEN; LIEBERMAN, REBECCA; LU, YIWEN (2024): HOW SELF-DRIVING CARS GET HELP FROM HUMANS HUNDREDS OF MILES AWAY. IN: THE NEW YORK TIMES, 03.09.2024. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.NYTIMES.COM/INTERACTIVE/2024/09/03/TECHNOLOGY/ZOOX-SELF-DRIVING-CARS-REMOTE-CONTROL.HTML](https://www.nytimes.com/interactive/2024/09/03/technology/zoox-self-driving-cars-remote-control.html), ZULETZT GEPRÜFT AM 25.09.2024.
- MITTEREGGER, MATHIAS; BRUCK, EMILIA M.; SOTEROPOULOS, AGGELOS; STICKLER, ANDREA; BERGER, MARTIN; DANGSCHAT, JENS S. ET AL. (2020): AVENUE21. AUTOMATISierter UND VERNETZTER VERKEHR: ENTWICKLUNGEN DES URBANEN EUROPA. BERLIN: SPRINGER NATURE.
- MITTEREGGER, MATHIAS; BRUCK, EMILIA M.; SOTEROPOULOS, AGGELOS; STICKLER, ANDREA; BERGER, MARTIN; DANGSCHAT, JENS S. ET AL. (HG.) (2021): AVENUE21. POLITISCHE UND PLANERISCHE ASPEKTE DER AUTOMATISIERTEN MOBILITÄT. SPRINGER-VERLAG GMBH. BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER VIEWEG.
- MÖRNER, MORITZ VON (2018): SAMMELVERKEHR MIT AUTONOMEN FAHRZEUGEN IM LÄNDLICHEN RAUM. UNTER MITARBEIT VON MANFRED BOLTZE UND MARKUS FRIEDRICH. DARMSTADT: UNIVERSITÄTS- UND LANDESBIBLIOTHEK DARMSTADT.
- NICKEL, STEFAN; SCHÖBEL, ANITA; SONNEBORN, TIM (2001): HUB LOCATION PROBLEMS IN URBAN TRAFFIC NETWORKS. IN: JARKKO NIITYMÄKI UND MATTI PURSULA (HG.): MATHEMATICAL METHODS ON OPTIMIZATION IN TRANSPORTATION SYSTEMS. BOSTON, MA: SPRINGER (SPRINGER EBOOK COLLECTION MATHEMATICS AND STATISTICS, 48), S. 95-107.
- OECD (2020): NON-EXHAUST PARTICULATE EMISSIONS FROM ROAD TRANSPORT AN IGNORED ENVIRONMENTAL POLICY CHALLENGE. PARIS: OECD PUBLISHING. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://EBOOKCENTRAL.PROQUEST.COM/LIB/KXP/DETAIL.ACTION?DOCID=6638919](https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6638919).

- OEHRY, BERNHARD; JERMANN, JÖRG; BOHNE, SIMON; FRICK, ROMAN; ICKERT, LUTZ; GREINUS, ANNE ET AL. (2020): AUSWIRKUNGEN DES AUTOMATISIERTEN FAHRENS; TEILPROJEKT 1: NUTZUNGSSZENARIEN UND AUSWIRKUNGEN. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://ETHZ.CH/CONTENT/DAM/ETHZ/SPECIAL-INTEREST/BAUG/IVT/IVT-DAM/VPL/PROJECTS/ASTRA-2018-002/AB1578-1.PDF](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/projects/ASTRA-2018-002/ab1578-1.pdf), ZULETZT GEPRÜFT AM 12.10.2023.
- PARK, BYUNGKYU; LEE, DO-HOON; YUN, ILSOO (2003): ENHANCEMENT OF TIME OF DAY BASED TRAFFIC SIGNAL CONTROL. IN: SMC'03 CONFERENCE PROCEEDINGS. 2003 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS. CONFERENCE THEME - SYSTEM SECURITY AND ASSURANCE (CAT. No.03CH37483). SMC ,03 2003 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS. WASHINGTON, DC, USA, 5-8 Oct. 2003: IEEE, S. 3619-3624.
- PSHINKO, OLEKSANDR; CHARKINA, TATIANA; MARTENIUK, LARYSA; ORLOVSKA, OLEKSANDRA (2022): HUBS AS A KEY TOOL FOR IMPROVING THE QUALITY OF THE SERVICE AND DEVELOPMENT OF MULTIMODAL PASSENGER TRAFFIC. IN: TP 17 (1), S. 201-214. DOI: 10.20858/TP.2022.17.1.11.
- REDLICH, TOBIAS; WEIDNER, ROBERT; LANGENFELD, MARKUS (2018): UNSICHERHEITEN DER TECHNIKENTWICKLUNG ALS GESELLSCHAFTLICHES UND POLITISCHES HANDLUNGSFELD. IN: TOBIAS REDLICH (HG.): UNSICHERHEITEN DER TECHNIKENTWICKLUNG. 1ST ED. GÖTTINGEN: CUVILLIER VERLAG, S. 26-42.
- RENN, ORTWIN (2014): MIT SICHERHEIT INS UNGEWISSE. HG. V. BUNDESZENTRALE FÜR POLITISCHE BILDUNG (BPB). ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.BPB.DE/SHOP/ZEITSCHRIFTEN/APUZ/177759/MIT-SICHERHEIT-INS-UNGEWISSE/](https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/177759/mit-sicherheit-ins-ungewisse/).
- RIGGS, WILLIAM (2019): INTRODUCTION. IN: WILLIAM RIGGS (HG.): DISRUPTIVE TRANSPORT. DRIVERLESS CARS, TRANSPORT INNOVATION AND THE SUSTAINABLE CITY OF TOMORROW. LONDON, NEW YORK: ROUTLEDGE TAYLOR & FRANCIS GROUP (ROUTLEDGE EQUITY, JUSTICE AND THE SUSTAINABLE CITY SERIES), S. 3-10.
- RIJKSINSTITUUT VOOR VOLKSGEZONDHEID EN MILIEU (RIVM) (2010): EFFECT OF ELECTRIC CARS ON TRAFFIC NOISE AND SAFETY. UNTER MITARBEIT VON EDWIN VERHEIJEN UND JAN JABBEN. BILTHOVEN. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.RIVM.NL/BIBLIOTHEEK/RAPPORTEN/680300009.PDF](https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/680300009.pdf).
- RÖDEL, CHRISTINA; STADLER, SUSANNE; MESCHTSCHERJAKOV, ALEXANDER; TSCHELIGH, MANFRED (2014): TOWARDS AUTONOMOUS CARS. IN: LINDA NG BOYLE, PETER FRÖHLICH, SHAMSI IQBAL, GARY BURNETT, ERIKA MILLER UND YUQING WU (HG.): PROCEEDINGS OF THE 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMOTIVE USER INTERFACES AND INTERACTIVE VEHICULAR APPLICATIONS. AUTOMOTIVEUI ,14: 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMOTIVE USER INTERFACES AND INTERACTIVE VEHICULAR APPLICATIONS. SEATTLE WA USA, 17 09 2014 19 09 2014. NEW YORK, NY, USA: ACM, S. 1-8.
- RUHRORT, LISA; CANZLER, WEERT; KNIE, ANDREAS (2019): AUTONOMES FAHREN IM ÖFFENTLICHEN VERKEHR. CHANCEN, RISIKEN UND POLITISCHER HANDLUNGSBEDARF. HAMBURG. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.GRUENE-HAMBURG.DE/WP-CONTENT/UPLOADS/2019/04/AUTONOMES\\_FAHREN\\_GUTACHTEN\\_030419.PDF](https://www.gruene-hamburg.de/wp-content/uploads/2019/04/AUTONOMES_FAHREN_GUTACHTEN_030419.pdf), ZULETZT GEPRÜFT AM 14.02.2024.
- RZU (HG.) (2023): RÄUMLICH-DIFFERENZIERTE AUSWIRKUNGEN DES AUTOMATISIERTEN FAHRENS. UNTER MITARBEIT VON ANGELUS EISINGER, EVA-MARIA KOPF, MAREN PETER, SABINA UFFER, MARTIN BERGER, RUDOLF SCHEUVENS ET AL. PLANUNGSDACHVERBAND REGION ZÜRICH UND UMGEBUNG. ZÜRICH. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.MOBILITYPLATFORM.CH/FILEADMIN/MOBILITYPLATFORM/NORMENPOOL/21861\\_1747\\_INHALT.PDF](https://www.mobilityplatform.ch/fileadmin/mobilityplatform/normenpool/21861_1747_INHALT.pdf), ZULETZT GEPRÜFT AM 01.12.2023.
- SAE INTERNATIONAL (HG.) (2021): TAXONOMY AND DEFINITIONS FOR TERMS RELATED TO DRIVING AUTOMATION SYSTEMS FOR ON-ROAD MOTOR VEHICLES. J3016. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.SAE.ORG/STANDARDS/CONTENT/J3016\\_202104/](https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/), ZULETZT GEPRÜFT AM 06.12.2023.

- SAHLING, UDO (HG.) (2022): KLIMASCHUTZ UND ENERGIEWENDE IN DEUTSCHLAND. HERAUSFORDERUNGEN - LÖSUNGSBEITRÄGE - ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN. BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER SPEKTRUM. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTP://WWW.SPRINGER.COM/](http://www.springer.com/).
- SARKAR, SOMWRITA; CHAWLA, SANJAY; AHMAD, SHAMEEM; SRIVASTAVA, JAIDEEP; HAMMADY, HOSAM; FILALI, FETHI ET AL. (2017): EFFECTIVE URBAN STRUCTURE INFERENCE FROM TRAFFIC FLOW DYNAMICS. IN: IEEE TRANS. BIG DATA 3 (2), S. 181-193. DOI: 10.1109/TBDATA.2016.2641003.
- SCHLOSSBERG, MARC; RIGGS, WILLIAM; MILLARD-BALL, ADAM; SHAY, ELIZABETH (2018): RETHINKING THE STREET IN AN ERA OF DRIVERLESS CARS.
- SCHWEIZERISCHER BUNDESRAT, KdK, BPUK, SSV, SGV (HG.) (2012): RAUMKONZEPT SCHWEIZ. ÜBERARBEITETE FASSUNG. ÜBERARB. FASSUNG. SCHWEIZ. BERN.
- SHLADOVER, STEVEN E. (2018): CONNECTED AND AUTOMATED VEHICLE SYSTEMS: INTRODUCTION AND OVERVIEW. IN: JOURNAL OF INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS 22 (3), S. 190-200.
- SIMULATIONSWISSENSCHAFTLICHES ZENTRUM CLAUSTHAL-GÖTTINGEN (SWZ) (HG.) (O. J.): WARTESCHLANGENSIMULATOR. UNTER MITARBEIT VON ALEXANDER HERZOG. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.SIMZENTRUM.DE/FORSCHUNGSPROJEKTE/WARTESCHLANGENSIMULATION](https://www.simzentrum.de/forschungsprojekte/warteschlangensimulation), ZULETZT GEPRÜFT AM 01.10.2024.
- STADT NÜRNBERG (HG.) (O. J.): ECHTES PIONIERSTÜCK: NÜRNBERGS AUTOMATISCHE U-BAHN - DIGITALES NÜRNBERG. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.NUERNBERG.DE/INTERNET/DIGITALES\\_NUERNBERG/AUTOMATISCHE\\_UBAHN\\_NUERNBERG.HTML](https://www.nuernberg.de/internet/digitales_nuernberg/automatische_ubahn_nuernberg.html), ZULETZT AKTUALISIERT AM 11.07.2024, ZULETZT GEPRÜFT AM 11.07.2024.
- STADT ZÜRICH (HG.) (2022): WANDEL DER PENDLERMOBILITÄT: MEHR ZUPENDELNDE, MEHR ÖV. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.STADT-ZUERICH.CH/PRD/DE/INDEX/STATISTIK/PUBLIKATIONEN-ANGEBOTE/PUBLIKATIONEN/WEBARTIKEL/2022-06-16\\_WANDEL-DER-PENDLERMOBILITAET-MEHR-ZUPENDELNDE-MEHR-OEV.HTML](https://www.stadt-zuerich.ch/prd/de/index/statistik/publikationen-angebote/publikationen/webartikel/2022-06-16_wandel-der-pendlermobilitaet-mehr-zupendelnde-mehr-oev.html), ZULETZT GEPRÜFT AM 17.09.2024.
- STADT ZÜRICH (HG.) (2023): BEVÖLKERUNGSSTATISTIK DER STADT ZÜRICH. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.STADT-ZUERICH.CH/PRD/DE/INDEX/STATISTIK/THEMEN/BEVOELKERUNG/ALTER-GESCHLECHT/ALTER.HTML](https://www.stadt-zuerich.ch/prd/de/index/statistik/themen/bevoelkerung/alter-geschlecht/alter.html), ZULETZT AKTUALISIERT AM 2023, ZULETZT GEPRÜFT AM 17.09.2024.
- STEAD, DOMINIC; VADDADI, BHAVANA (2019): AUTOMATED VEHICLES AND HOW THEY MAY AFFECT URBAN FORM: A REVIEW OF RECENT SCENARIO STUDIES. IN: CITIES 92, S. 125-133. DOI: 10.1016/j.cities.2019.03.020.
- STEEGE, HANS (2022): TECHNIKREGULIERUNG - DER UMGANG MIT RISIKEN IM RECHT. ZUR HAFTUNG UND REGULIERUNG VON KÜNSTLICHER INTELLIGENZ UND DEM AUTONOMEN FAHREN IM STRASSENVERKEHR. IN: NEUE ZEITSCHRIFT FÜR VERKEHRSRECHT.
- SUN, DANIEL; ZHANG, CHUN; ZHANG, LIHUI; CHEN, FANGXI; PENG, ZHONG-REN (2014): URBAN TRAVEL BEHAVIOR ANALYSES AND ROUTE PREDICTION BASED ON FLOATING CAR DATA. IN: TRANSPORTATION LETTERS 6 (3), S. 118-125. DOI: 10.1179/1942787514Y.0000000017.
- SWISSCOM (HG.) (2015): SWISSCOM ZEIGT DAS ERSTE SELBSTFAHRENDE AUTO AUF SCHWEIZER STRASSEN | SWISSCOM. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.SWISSCOM.CH/DE/ABOUT/NEWS/2015/05/20150512-MM-SELBSTFAHRENDES-AUTO.HTML](https://www.swisscom.ch/de/about/news/2015/05/20150512-MM-selbstfahrendes-auto.html), ZULETZT GEPRÜFT AM 05.03.2024.
- TENG, SIYU; HU, XUEMIN; DENG, PENG; LI, BAI; LI, YUCHEN; AI, YUNFENG ET AL. (2023): MOTION PLANNING FOR AUTONOMOUS DRIVING: THE STATE OF THE ART AND FUTURE PERSPECTIVES 8 (6), S. 3692-3711. DOI: 10.1109/TIV.2023.3274536.

- TIRACHINI, ALEJANDRO (2013): BUS DWELL TIME: THE EFFECT OF DIFFERENT FARE COLLECTION SYSTEMS, BUS FLOOR LEVEL AND AGE OF PASSENGERS. IN: *TRANSPORTMETRICA A: TRANSPORT SCIENCE* 9 (1), S. 28–49. DOI: 10.1080/18128602.2010.520277.
- UTRIAINEN, RONI; PÖLLÄNEN, MARKUS (2018): REVIEW ON MOBILITY AS A SERVICE IN SCIENTIFIC PUBLICATIONS. IN: *RESEARCH IN TRANSPORTATION BUSINESS & MANAGEMENT* 27, S. 15–23. DOI: 10.1016/j.rtbm.2018.10.005.
- VALLÉE, DIRK; ENGEL, BARBARA; VOGT, WALTER (HG.) (2021): *STADTVERKEHRSPANUNG BAND 3. ENTWURF, BEMESSUNG UND BETRIEB. 3. AUFLAGE. BERLIN: SPRINGER VIEWEG (SPRINGER eBook COLLECTION).*
- VALLÉE, DIRK; GERTZ, CARSTEN (2021): INTEGRATION DER VERKEHRS- IN DIE STADTPLANUNG. IN: DIRK VALLÉE, BARBARA ENGEL UND WALTER VOGT (HG.): *STADTVERKEHRSPANUNG BAND 1. BERLIN, HEIDELBERG: SPRINGER BERLIN HEIDELBERG, S. 47–69.*
- VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN E. V. (VDV) (HG.) (2024): AUTONOME SHUTTLE-BUS-PROJEKTE IN DEUTSCHLAND. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.VDV.DE/LISTE-AUTONOME-SHUTTLE-BUS-PROJEKTE.ASPX](https://www.vdv.de/liste-autonome-shuttle-bus-projekte.aspx), ZULETZT GEPRÜFT AM 07.10.2024.
- VOLVO CAR GROUP (HG.) (2022): AUTONOMOUS DRIVE. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://GROUP.VOLVOCARS.COM/COMPANY/INNOVATION/AUTONOMOUS-DRIVE](https://group.volvocars.com/company/innovation/autonomous-drive), ZULETZT GEPRÜFT AM 05.12.2023.
- WANG, ZI-JIA; CHEN, XUE-MEI; WANG, PIN; LI, MENG-XI; OU, YANG-JIA-XIN; ZHANG, HAN (2021): A DECISION-MAKING MODEL FOR AUTONOMOUS VEHICLES AT URBAN INTERSECTIONS BASED ON CONFLICT RESOLUTION. IN: *JOURNAL OF ADVANCED TRANSPORTATION* 2021, S. 1–12. DOI: 10.1155/2021/8894563.
- WELLIK, TYLER; KOCKELMAN, KARA (2020): ANTICIPATING LAND-USE IMPACTS OF SELF-DRIVING VEHICLES IN THE AUSTIN, TEXAS, REGION. IN: *JTLU* 13 (1), S. 185–205. DOI: 10.5198/jtlu.2020.1717.
- WICKI, MICHAEL; BERNAUER, THOMAS (2018): DIE LINIE 12 IM ÖFFENTLICHEN MEINUNGSBILD. ZWISCHENBERICHT ZUR ERSTEN UMFRAGE ZUM PILOTVERSUCH EINES AUTOMATISIERTEN BUSBETRIEBS IN NEUHAUSEN AM RHEINFALL.
- WEGEN, LISBETH VON (2014): LANG LEBE DIE STÖRUNG IM BETRIEBSABLAUF. IN: *UND PLÖTZLICH DER LACHS, S. 2–46.* ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://GENIUS.COM/VON-WEGEN-LISBETH-LANG-LEBE-DIE-STORUNG-IM-BETRIEBSABLAUF-LYRICS](https://genius.com/von-wegen-lisbeth-lang-lebe-die-storung-im-betriebsablauf-lyrics), ZULETZT GEPRÜFT AM 21.10.2024.
- WINTER, KONSTANZE; CATS, ODED; CORREIA, GONÇALO; VAN AREM, BART (2018): PERFORMANCE ANALYSIS AND FLEET REQUIREMENTS OF AUTOMATED DEMAND-RESPONSIVE TRANSPORT SYSTEMS AS AN URBAN PUBLIC TRANSPORT SERVICE. IN: *INTERNATIONAL JOURNAL OF TRANSPORTATION SCIENCE AND TECHNOLOGY* 7 (2), S. 151–167. DOI: 10.1016/j.ijtst.2018.04.004.
- WOHLIN, CLAES (2014): GUIDELINES FOR SNOWBALLING IN SYSTEMATIC LITERATURE STUDIES AND A REPLICATION IN SOFTWARE ENGINEERING. IN: MARTIN SHEPPERD, TRACY HALL UND INGUNN MYRTVEIT (HG.): *PROCEEDINGS OF THE 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVALUATION AND ASSESSMENT IN SOFTWARE ENGINEERING. EASE ,14: 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVALUATION AND ASSESSMENT IN SOFTWARE ENGINEERING. LONDON ENGLAND UNITED KINGDOM, 13 05 2014 14 05 2014. NEW YORK, NY, USA: ACM, S. 1–10.* ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://DOI.ORG/10.1145/2601248.2601268](https://doi.org/10.1145/2601248.2601268).
- WÜTHRICH, CHRISTIAN (2024): SKYMETRO AM FLUGHAFEN ZÜRICH: SCHNELLER ZUM MIDFIELD-TERMINAL DANK LÄNGERER ZÜGE. IN: *ZÜRCHER REGIONALZEITUNGEN AG, 09.01.2024.* ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://WWW.ZUONLINE.CH/SKYMETRO-AM-FLUGHAFEN-ZUERICH-SCHNELLER-ZUM-MIDFIELD-TERMINAL-DANK-LAENGERER-ZUEGE-428919696330](https://www.zuonline.ch/skymetro-am-flughafen-zuerich-schneller-zum-midfield-terminal-dank-laengerer-zuege-428919696330), ZULETZT GEPRÜFT AM 11.07.2024.

XU, MENG; DI, YINING; ZHU, ZHENG; YANG, HAI; CHEN, XIQUN (2024): DESIGN AND ANALYSIS OF RIDE-SOURCING SERVICES WITH AUXILIARY AUTONOMOUS VEHICLES FOR TRANSPORTATION HUBS IN MULTI-MODAL TRANSPORTATION SYSTEMS. IN: TRANSPORTMETRICA B: TRANSPORT DYNAMICS 12 (1), ARTIKEL 2333869. DOI: 10.1080/21680566.2024.2333869.

YANG, HONGTAI; LI, XUAN; LI, CHAOJING; HUO, JINGHAI; LIU, YUGANG (2021): HOW DO DIFFERENT TREATMENTS OF CATCHMENT AREA AFFECT THE STATION LEVEL DEMAND MODELING OF URBAN RAIL TRANSIT? IN: JOURNAL OF ADVANCED TRANSPORTATION 2021, S. 1-19. DOI: 10.1155/2021/2763304.

ZOOX (HG.) (2024): VEHICLE. ONLINE VERFÜGBAR UNTER [HTTPS://ZOOX.COM/VEHICLE](https://zoox.com/vehicle), ZULETZT AKTUALISIERT AM 2024, ZULETZT GEPRÜFT AM 18.09.2024.