



Agentenbasierte Simulation autonom fahrender Rufbusse im Nordwesten Berlins

Gregor Leich

Matrikelnummer xxxxxx

E-mail: gregor.leich@campus.tu-berlin.de

Studiengang Planung und Betrieb im Verkehrswesen

Masterarbeit

betreut durch

Prof. Dr. Kai Nagel

M.Sc. Joschka Bischoff

Technische Universität Berlin

Institut für Land- und Seeverkehr

Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik

Berlin, 26. September 2017

Eidesstattliche Erklärung

Die selbstständige und eigenhändige Anfertigung versichere ich an Eides statt.

.....

Datum / Unterschrift

Zusammenfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wird der Ersatz herkömmlicher Linienbusse durch autonom fahrende Rufbusse in einem Stadtteil im Nordwesten Berlins simuliert und bewertet. Während herkömmliche Linienbusse konzessionsrechtlich räumlich und zeitlich gebunden sind, verkehren Rufbusse ohne feste Linienwege, Fahrpläne oder Haltestellen. Anstatt dessen werden Fahrgäste nur nach vorheriger Anmeldung befördert und dies von Haustür zu Haustür zur vom Fahrgast gewünschten Zeit. Mit der Entwicklung autonomer Fahrzeuge entfallen die Fahrerkosten, die bisher den Einsatz vieler kleiner Rufbusse anstelle weniger großer Linienbusse erschweren.

Der Einsatz der Rufbusse wurde in der agentenbasierten Simulation MATSim untersucht, welche dazu angepasst werden musste. Im Ergebnis der Simulation zeigte sich eine nur geringfügige Reduktion der Reisezeiten durch den Einsatz der Rufbusse gegenüber den Linienbussen. Aufgrund der Haustürbedienung sinken die Gehzeiten deutlich, während die Fahrzeiten ansteigen. Zudem sind die Wartezeiten auf die Rufbusse auch in Schwachlastzeiten relativ hoch, weil der Tourenplanungsalgorithmus in der verwendeten MATSim-Erweiterung „DRT-Contribution“ stets den Fahrzeugeinsatz und somit die Kosten minimiert. Dadurch hat die Anzahl der Fahrzeuge nur einen geringen Einfluss auf die Rufbusreisezeit und bewirkt nur eine Änderung der Anzahl der Rufbusfahrtwünsche, die nicht innerhalb bestimmter zeitlicher Qualitätskriterien bedient werden können und deshalb abgewiesen werden.

Die Kostenrechnung unterliegt großen Unsicherheiten, weil autonome Fahrzeuge noch nicht marktreif sind. Die erwartete Kostenersparnis durch einen bedarfsgesteuerten Betrieb konnte nicht nachgewiesen werden. Die Kosten steigen stattdessen um etwa 5 % bis 39 % im Vergleich zum autonomen Linienbus.

Der Nutzen wurde auf Basis der Reisezeiterparnis und der abgewiesenen Fahrtwünsche berechnet. Für den Einsatz von 150 Rufbussen mit einer Kapazität von je vier Personen ergibt sich ein günstiges Nutzen-Kosten-Verhältnis. Um dieses weiter zu verbessern, wäre eine Relocation-Strategie, die Möglichkeit zur Vorbestellung von Fahrten und eine Änderung der Funktionsweise der zeitlichen Qualitätskriterien wünschenswert.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Grundlagen flexible Bedienungsweisen	3
2.1 Räumliche Kategorisierung flexibler Bedienungsweisen nach Kirchhoff .	4
2.2 Betriebsweise Rufbus	5
3 Umsetzung in MATSim	7
3.1 DRT-Contribution	8
3.2 AV-Contribution	11
4 MATSim-Szenario des Untersuchungsgebietes	15
4.1 ÖPNV im Nullfall	18
4.2 ÖPNV im Planfall	20
5 Simulationsergebnisse	21
5.1 Auswahl der untersuchten Planfälle	21
5.2 Auswertung aus Kunden- und Betreibersicht	24
5.3 Berechnung der Kosten	31
5.3.1 Kosten der Rufbusse	32
5.3.2 Kosten der Linienbusse	34
5.4 Bewertung der Planfälle	38
6 Fazit	42
Literaturverzeichnis	VI
Anhang	VIII

Abbildungsverzeichnis

1	Räumliche Einteilung der Betriebsform von flexiblen Bedienungsweisen .	4
2	Fahrzeugauslastung 200 Rufbusse Kapazität 4 Personen, $\beta = 10min$, $t_{max}^{wait} = 10min$	11
3	Lage des Untersuchungsgebietes in Berlin	15
4	Abgrenzung des Untersuchungsgebietes und Aktivitätenorte	16
5	ÖPNV-Liniennetze im Nullfall und im Planfall	19
6	Fahrgastzahlen 2007	20
7	Fahrzeugauslastung 1000 Rufbusse Kapazität 4 Personen	22
8	Fahrzeugauslastung 75 Rufbusse Kapazität 12 Personen	23
9	Mittlere Gesamtreisezeiten in den ausgewählten Planfällen	24
10	Fahrzeugauslastung in den ausgewählten Planfällen	26
11	Rufbus-Wartezeiten im Tagesverlauf im Planfall D2D_200_Cap4	27
12	Rufbus-Fahrt-Bestellungen im Tagesverlauf im Planfall D2D_200_Cap4 .	28
13	Abgelehnte Fahrtwünsche im Tagesverlauf in den ausgewählten Planfällen	29
14	Rufbusfahrten im Planfall D2D_200_Cap4	IX
15	Abgewiesene Rufbusfahrten und Fahrzeugpositionen im Planfall D2D_150_Cap4	X
16	Direkte Distanz versus tatsächliche gefahrene Strecke mit Umweg im Planfall D2D_200_Cap4	XI
17	Direkte Fahrzeit versus tatsächliche Fahrzeit mit Umweg im Planfall D2D_200_Cap4	XII
18	Geplante Rufbuswartezeiten versus tatsächliche Rufbuswartezeit im Plan- fall D2D_200_Cap4	XIII

Tabellenverzeichnis

1	Bezeichnungen für flexible Bedienungsformen	3
2	Vergleich Linienverkehr mit Rufbus	5
3	Experimentelle Ermittlung der DRT-Contribution Parameter in Bischoff u. a. (2017)	9
4	Experimentelle Ermittlung der DRT-Contribution Parameter für das Un- tersuchungsgebiet	10
5	Takte der Bus- und Bahnlinien im Untersuchungsgebiet	18
6	Untersuchte Fahrzeuggrößen und -anzahlen	21
7	Reisezeiten und zurückgelegte Entfernungen der Rufbuslegs	25
8	Fahrleistung der Rufbusse	30
9	Fahrleistung der Rufbusse inklusive 10 % Fahrzeugreserve	32
10	Betriebskosten je Rufbus der Kapazität 8 Personen	32
11	Betriebskosten je Rufbus der Kapazität 4 Personen	33
12	Jährliche Kosten der Rufbusse	34
13	Anzahl der in den Planfällen eingesparten Linienbusse	34
14	In den Planfällen eingesparte Fahrleistung der Linienbusse	34
15	Mittlere Fahrplangeschwindigkeit der Linienbusse	35
16	Jährliche Nutzen der Rufbusse	39
17	Jährliche Kostendifferenz Planfall-Nullfall	39
18	Nutzen-Kosten-Differenzen und Nutzen-Kosten-Verhältnisse	40

Abkürzungsverzeichnis

CSV	Comma-separated values (Dateiformat .csv)
HVZ	Hauptverkehrszeit
MIV	motorisierter Individualverkehr
NKD	Nutzen-Kosten-Differenz
NKV	Nutzen-Kosten-Verhältnis
NVZ	Nebenverkehrszeit
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
SVZ	Schwachverkehrszeit
VDV	Verband deutscher Verkehrsunternehmen

1 Einleitung

Im Mai 2017 machte die kanadische Stadt Innisfil¹ Schlagzeilen: Anstatt einen normalen Omnibusbetrieb aufzubauen, schloss die Stadt einen Vertrag mit Uber ab. Das Unternehmen wird für jede von ihm vermittelte geteilte Taxifahrt im Stadtgebiet einen Zuschuss von der Stadt erhalten und soll so als Ersatz eines klassischen ÖPNV-Systems dienen.²

Während im Falle von Innisfil zuvor nur ein sehr geringes ÖPNV-Angebot vorhanden war, treten Fahrdienst-Vermittler wie Uber in anderen Städten zunehmend in Konkurrenz mit vergleichsweise gut ausgebauten ÖPNV-Netzen. Dies betrifft beispielsweise New York City, wo 2016 erstmals seit 2013 die Anzahl der U-Bahnfahrergäste zurückging, während die Anzahl ggf. geteilter Taxifahrten seit 2014 nicht nur wächst, sondern sich dieses Wachstum zudem stetig beschleunigt. Betrachtet man alle Verkehrsmodi außer dem motorisiertem Individualverkehr (MIV), so weisen Fahrdienst-Vermittler wie Uber in New York City nun das stärkste absolute Wachstum bezüglich der Wegezahl auf, während zuvor über zwei Jahrzehnte hinweg die U-Bahn die Hauptlast des Verkehrswachstums trug. Ein wesentlicher Grund hierfür sind die gesunkenen Fahrpreise, die nun nur noch etwa bei dem zweifachen einer U-Bahnfahrt liegen, während zuvor nur herkömmliche Taxis zu etwa dem 4,5-fachen Preis einer U-Bahnfahrt angeboten wurden.³

Eine weitere drastische Kostensenkung geteilter Taxifahrten wird sich mit der Inbetriebnahme von autonom fahrenden Straßenfahrzeugen ergeben, da dann die Fahrerkosten entfallen werden, welche bisher noch etwa 43% der Gesamtkosten (Betriebs- und Investitionskosten) ausmachen.⁴ Der Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) erwartet für diesen Fall eine Abwanderung von Fahrgästen insbesondere von „schwächeren Linien“ wie Bussen zu Schwachlastzeiten hin zu Ridesharing-Anbietern⁵, sodass dort nur die Fahrgäste, die sich den Fahrpreis der Ridesharing-Anbieter nicht leisten können, im herkömmlichen ÖPNV verbleiben werden.⁶

Werden also geteilte autonome Taxis weite Teile des klassischen ÖPNV ersetzen? Die Kostenvorteile autonomer Fahrzeuge kann sich auch der ÖPNV zu nutze machen, in dem dieser derartige Fahrzeuge beispielsweise als Zubringer zum übergeordneten Netz von S- und U-Bahnen einsetzt. Wo bisher große Fahrzeugeinheiten eingesetzt werden, um die Personalkosten gering zu halten, könnten dann viele kleine Fahrzeuge ein deutlich dichteres Angebot anbieten, ohne unverhältnismäßig hohe Fahrerkosten zu verursachen.

¹36 000 Einwohner

²Vgl. Smith (2017), S. 6.

³Vgl. Schaller (2017), S. 17ff.

⁴Vgl. Frank u. a. (2008), S. 22.

⁵Anbieter bzw. Vermittler für geteilte Taxifahrten wie z.B. Uber

⁶Vgl. VDV (2009), S. 11f.

Der Einsatz vieler kleiner Fahrzeugeinheiten begünstigt zudem die Abkehr von starr nach Fahrplan verkehrenden Linien hin zu flexiblen Bedienungsweisen wie dem Rufbus. Solche flexiblen Bedienungsweisen passen das Fahrtenangebot an den tatsächlichen Bedarf an. Dadurch bieten sich dem Betreiber Potenziale zur Kostenreduktion, während die Fahrgäste möglicherweise von verkürzten Wartezeiten sowie Zu- und Abgangswegen profitieren könnten.

Inwieweit die letztgenannten Effekte tatsächlich eintreten könnten, soll im Rahmen dieser Masterarbeit für ein Gebiet im Nordwesten Berlins untersucht werden. Dazu wird dort der Ersatz der normalen Omnibusse im Linienbetrieb durch Rufbusse mit der agentenbasierten Verkehrssimulation MATSim simuliert. Anschließend werden die Ergebnisse aus MATSim aus der Sicht des Betreibers und aus der Sicht der Fahrgäste analysiert.

In der vorliegenden Masterarbeit werden zunächst flexible Bedienungsweisen allgemein und die Ausprägung Rufbus im speziellen in Kapitel 2 betrachtet. Anschließend wird in Kapitel 4 das Untersuchungsgebiet und das dortige ÖPNV-Angebot vorgestellt. Es folgt die Umsetzung in MATSim in Kapitel 3 und die Diskussion der Simulationsergebnisse in Kapitel 5. Abschließend wird im Kapitel 6 ein kurzes Fazit gezogen und ein Ausblick auf mögliche Folgeuntersuchungen aufgezeigt.

2 Grundlagen flexible Bedienungsweisen

„Flexible Bedienungsweisen“ ist nur ein Begriff von vielen (siehe Tabelle 1), mit denen Betriebsformen im ÖPNV bezeichnet werden, die nicht dem herkömmlichen Linienverkehr entsprechen. Der Verband deutscher Verkehrsunternehmen definiert flexible Bedienungsformen wie folgt:

„Flexible Bedienungsweisen: sind dadurch gekennzeichnet, dass ihnen wenigstens eines der Charakteristiken des konventionellen Linienverkehrs fehlt, nämlich konzessionsrechtlich räumlich und zeitlich gebunden zu sein.“⁷

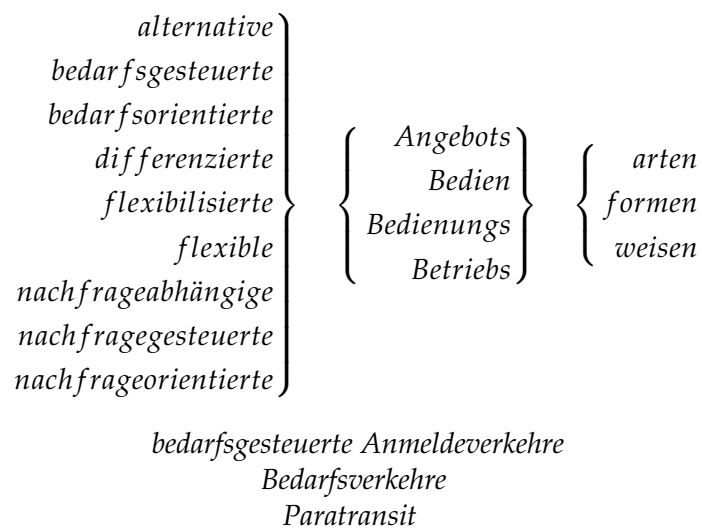


Tabelle 1: Bezeichnungen für flexible Bedienungsformen (Eigene Darstellung nach VDV (2009), S. 23)

Der VDV beschreibt flexible Bedienungsweisen, wie den Rufbus, hauptsächlich als ein Mittel, um in Räumen oder Zeiten schwacher Nachfrage ein wirtschaftlich noch vertretbares ÖPNV-Angebot zu schaffen.⁸ Die gewählten Praxisbeispiele stammen überwiegend aus dem ländlichen Raum und Kleinstädten.⁹

Analog zu der großen Zahl an Begriffen gibt es auch viele verschiedene Ausprägungen von flexiblen Bedienungsweisen. Der VDV stellt in VDV (2009) zahlreiche Einsatzbeispiele vor und unternimmt den Versuch einer Kategorisierung dieser Ausprägungen. Ein Aspekt bei der Kategorisierung ist die räumliche Einteilung der Betriebsform, bei der auch der VDV auf die in Kirchhoff (1987) eingeführten Formen zurückgreift.

⁷VDV (2009), S. 11f.

⁸Vgl. VDV (2009), S. 25.

⁹Vgl. VDV (2009), S. 7ff.

2.1 Räumliche Kategorisierung flexibler Bedienungsweisen nach Kirchhoff

Kirchhoff unterscheidet die vier Betriebsformen „Linienbetrieb“, „Tourenbetrieb“, „Richtungsband“ und „reiner Bedarfsbetrieb (Flächenbetrieb)“ (siehe Abbildung 1).

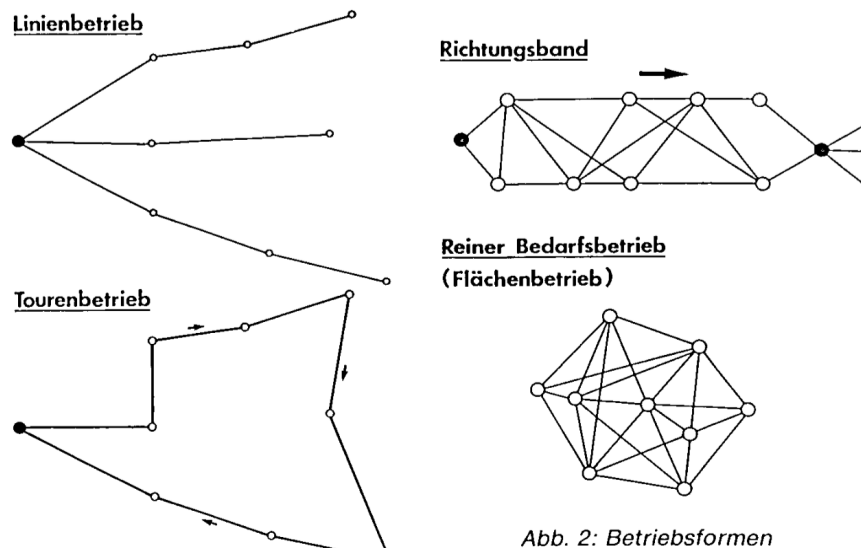


Abb. 2: Betriebsformen

Abbildung 1: Räumliche Einteilung der Betriebsform von flexiblen Bedienungsweisen nach Kirchhoff (Quelle: Kirchhoff (1987), S. 20)

Beim Linienbetrieb und beim Tourenbetrieb verkehren die Fahrzeuge auf einer festen Route und bedienen vorab festgelegte Haltestellen immer in der gleichen Reihenfolge. Während beim Linienbetrieb durch möglichst direkte Verbindungen eine hohe Attraktivität erreicht werden soll, werden beim Tourenbetrieb die Haltestellen auf dem kürzestmöglichen Gesamtweg bedient, um die Kosten zu minimieren. Deshalb ist der Linienbetrieb besser geeignet, wenn entlang einer Linie hohe Nachfragekonzentrationen bestehen. Besteht dagegen eine hohe Nachfrage zwischen einem zentralen Punkt und vielen gestreut liegenden Punkten, welche jeweils nur einen geringen Verkehrsanteil aufweisen, ist der Tourenbetrieb günstiger.¹⁰

Im Gegensatz zum Linien- und Tourenbetrieb gibt es beim Richtungsband und beim Flächenbetrieb keine feste Route mit vorab festgelegten Haltestellen. Das Richtungsband ähnelt insofern dem Linienbetrieb, als die Abfahrtszeit an der Anfangshaltestelle und die Richtung festgelegt sind. Es werden jedoch nur die Haltestellen angefahren, an denen ein Fahrtwunsch angemeldet wurde. An den Zwischenhaltestellen und an der Endhaltestelle können daher keine exakten Ankunftszeiten, sondern nur bestimmte Zeitintervalle angegeben werden. Beim Flächenbetrieb gibt es im Gegensatz zum Richtungsband keine festgelegte Richtung. Laut Kirchhoff ist die Steuerung des Flächenbetriebes sehr aufwendig, da sowohl Einstiegs- als auch Ausstiegshaltestelle bei der

¹⁰Vgl. Kirchhoff (1987), S. 20f.

Anmeldung des Fahrtwunsches angegeben und bei der Routenbildung berücksichtigt werden müssen. Diese Aussage stammt jedoch aus dem Jahr 1987 als Computer und moderne Kommunikationsmittel wie z.B. Mobilfunk noch nicht im heutigen Ausmaß zur Verfügung standen.¹¹

2.2 Betriebsweise Rufbus

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll die Anwendung der Betriebsform Rufbus entsprechend der Einteilung in VDV (2009) untersucht werden. Ein Vergleich dieser Betriebsform mit dem herkömmlichen Linienbus wird in Tabelle 2 vorgenommen.

herkömmlicher Linienbus	Rufbus
Fahrtweg vorab festgelegt (liniengebunden)	Fahrtweg nicht vorab festgelegt: Flächenbedienung
Vorab festgelegte, ausgeschilderte Haltestelle wird stets angefahren	Keine vorab festgelegten Haltestellen - Abholung / Ausstieg „an der Haustür“ bei vorheriger Anmeldung
Fahrplan vorab veröffentlicht und wird in der angegebenen Zeit (z.B. Mo-Fr an Schultagen) stets gefahren, unabhängig von jeweiligem Bedarf	ohne vorab veröffentlichten Fahrplan - Bedienung innerhalb bestimmter Zeitgrenzen (z. B. werktags von 6:00-22:00 Uhr) nur nach vorheriger Anmeldung eines Bedarfs)
Standard(gelenk)bus oder Midibus	Pkw (Taxi)
Normaltarif mit Einbettung in die Tarifgemeinschaft	Zuschlag zum Normaltarif mit Einbettung in die Tarifgemeinschaft
Betreiber ist Inhaber der Linienverkehrsgenehmigung oder Subunternehmer (Busunternehmer)	Betreiber ist Inhaber der Linienverkehrsgenehmigung oder Subunternehmer (Busunternehmer oder Taxi-/Mietwagenunternehmer)

Tabelle 2: Vergleich Linienverkehr mit Rufbus (Eigene Darstellung auf Basis von VDV (2009), S. 38ff.)

Abweichend von der eigenen Definition eines „idealtypischen“ Rufbusses stellt der VDV allerdings nur Fotos von Minibussen als Beispiele für Rufbusses dar.¹² Insofern sollte die in Tabelle 2 wiedergegebene Definition nicht zu streng interpretiert werden. Für die Zwecke dieser Masterarbeit wird von der oben genannten Definition im Punkt Tarifgestaltung abgewichen. Da es sich nicht um ein zusätzliches Angebot, sondern um den Ersatz eines herkömmlichen Linienbusses handelt, soll der Normaltarif mit Einbettung in die Tarifgemeinschaft angewendet werden. Die Rufbusse bieten zwar durch die flexibel wählbare Abfahrtszeit und durch die Abholung bzw. den Ausstieg an der Haustür zusätzlichen Komfort. Allerdings verbleibt nach dem Ersatz der Linienbusse durch Rufbusse keine Alternative ohne Zuschlag. Deshalb wird im Rahmen dieser Masterarbeit eine Zusatzgebühr als schwer vermittelbar erachtet und deshalb verworfen.

¹¹Vgl. Kirchhoff (1987), S. 21.

¹²Vgl. VDV (2009), S. 67.

Während bei den vom VDV genannten Beispielen die Rufbusse noch mindestens 60 min vor Abfahrt telefonisch bestellt werden müssen, zeigen Unternehmen wie Uber und Lynx, dass auch eine instantane Buchung über Smartphones möglich ist.

3 Umsetzung in MATSim

Kern dieser Masterarbeit ist die Simulation des Rufbusverkehrs mit der Multiagentensimulation von Verkehr MATSim¹³. Diese in Java geschriebene Open-Source-Software bietet sich für die Untersuchung an, da sie leicht erweiterbar ist und sowohl ein Szenario für das Untersuchungsgebiet, das heißt die nötigen Eingabedaten, als auch ein Programmteil zur Simulation von Rufbussen in MATSim bereits zur Verfügung steht.

MATSim basiert auf der Simulation von Agenten und deren Tagesplänen, welche aus Aktivitäten wie „arbeiten“ und „einkaufen“ sowie Fahrten zwischen den Aktivitätenorten bestehen. Für die Fahrten stehen verschiedene Verkehrsmittel zur Verfügung. Im gegebenen Szenario sind dies zu Fuß gehen („walk“), Fahrrad („bike“), Pkw („car“) und ÖPNV („pt“). Allerdings schließt das Routing für das Verkehrsmittel „pt“ immer auch Fußwege im Vor- und Nachlauf zur Bus- bzw. Bahnfahrt sowie Umsteigewege an Umstiegshaltestellen mit ein („transit_walk“). Falls für den zu routenden Weg keine geeigneten Bus- oder Bahnverbindungen gefunden werden, kann auch ein direkter Fußweg vom Start bis zum Ziel zurückgegeben werden. In dieser Masterarbeit schließt das Routing für „pt“ auch die Rufbusse mit ein, welche innerhalb des Untersuchungsgebietes im Vor- und Nachlauf für die Fahrt zwischen der Haustür und Haltestellen des regulären ÖPNV-Netzes sowie für Fahrten mit Start und Ziel innerhalb des Rufbus-Einsatzgebietes¹⁴ genutzt werden können.

Nach Abschluss eines Simulationstages werden die ausgeführten Pläne bewertet und ggf. verändert. Die veränderten Pläne werden in der nächsten Iteration ausgeführt. Dieser Prozess aus Generierung, Simulation und abschließender Bewertung der Tagespläne bildet eine Iteration und wird wiederholt, bis die Bewertung der zuletzt ausgeführten Pläne im Vergleich zu den in der vorherigen Iteration ausgeführten Plänen nur noch geringfügig ansteigt, da sie die Pläne dem Optimum angenähert haben. Für alle untersuchten Varianten wurden 101 Iterationen (0. bis 100. Iteration) durchgeführt, wobei nur in den ersten 80 Iterationen (0. bis 79. Iteration) neue, veränderte Tagespläne generiert wurden.¹⁵ In den anschließenden 20 Iterationen wird nur innerhalb der zuvor bereits ausgeführten Tagesplan der beste gewählt.

Die Agenten können in diesem Szenario nicht das Verkehrsmittel, sondern nur ihre Route und ihre Abfahrtszeit wechseln. Leider ist das Szenario nicht auf die Verkehrsmittelwahl hin kalibriert worden, sodass sich diese nicht verlässlich abbilden lässt. Sowohl Radfahrer als auch Fußgänger werden lediglich teleportiert. Der Verkehr von Pkw sowie

¹³Horni u. a. (2016)

¹⁴Siehe grün umrandete „av_operation_area“ in Abbildung 4.

¹⁵Von drei zur Verfügung stehenden Algorithmen wird genau ein Algorithmus zur Erstellung neuer Pläne gewählt. Mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 10 % werden „TimeAllocationMutator“ (Veränderung der Abfahrtszeiten) oder „ReRoute“ (Generierung einer neuen Route mit dem gleichen Verkehrsmittel) gewählt. Andernfalls wird der beste bereits getestete Tagesplan wiedergewählt.

Linien- und Rufbussen wird hingegen in einem Verkehrsflussmodell simuliert, sodass Staueffekte abgebildet werden können.

Neben dem eigentlichen MATSim-Projekt wurden für diese Masterarbeiten auch mehrere Erweiterungen, sogenannte Contributions verwendet. Dabei handelt es sich um die DRT-Contribution, welche die Bestellung und den Betrieb von Rufbussen abbildet und die AV-Contribution, dessen spezieller Router es ermöglicht Rufbusfahrten anstelle der standardmäßigen Fußwege im Vor- und Nachlauf zum ÖPNV zurückzugeben. Diese beiden Contributions binden wiederum weitere Contributions als Abhängigkeiten ein. Darunter ist die DVRP-Contribution (Dynamic Vehicle Routing Problem)¹⁶, welche zur Tourenplanung der Rufbusse dient.

3.1 DRT-Contribution

Bei der DRT-Contribution (Demand Responsive Transport) handelt es sich um eine Erweiterung für MATSim, mit der geteilte Taxifahrten und damit auch Rufbusse abgebildet werden können. Eine genaue Beschreibung und ein Einsatzbeispiel geben die Entwickler dieser Erweiterung in Bischoff u. a. (2017). Sowohl Haustür-zu-Haustür-Betrieb als auch stationsgebundener Betrieb kann damit simuliert werden.

Eine Rufbusfahrt wird in dem Moment bestellt, in dem ein Fahrgast an der Haustür zur Abfahrt bereit steht. Die Bestellung enthält den exakten Start- und Zielort der Fahrt. Anschließend wird geprüft, ob die Bestellung unter Einhaltung bestimmter Qualitätskriterien erfüllt werden kann oder zurückgewiesen werden muss. Dazu wird je nach Einstellung des Parameters „k-nearest vehicles“ bei allen ($k = 0$) oder bei den k -nächsten Fahrzeugen geprüft, ob diese die Bestellung bedienen können. Dabei wird die Einhaltung der Qualitätskriterien sowohl für den zusätzlichen Fahrgast als auch für die bereits im Fahrzeug befindlichen Fahrgäste sichergestellt. Das heißt, wenn der Umweg zur Bedienung eines weiteren Fahrgastes so groß ist, dass ein Qualitätskriterium für einen bereits an Bord befindlichen Fahrgast verletzt wird, dann kann der zusätzliche Fahrgast von diesem Fahrzeug nicht bedient werden. Unter den Fahrzeugen, die die neu bestellte Fahrt bedienen können, wird jenes gewählt, dessen Betriebszeit sich durch die zusätzliche Fahrt am wenigsten verlängert. Kann kein Fahrzeug die Fahrt unter Einhaltung der Qualitätskriterien bedienen, so wird die Bestellung abgewiesen. In diesem Fall wird der Agent, der die Fahrt bestellt hat, für den Rest dieser Iteration aus der Simulation entfernt und führt keine weiteren Elemente seines Tagesplans mehr aus.¹⁷

Die Bestellung einer Fahrt im voraus ist nicht möglich, es werden lediglich unmittelbar zu bedienende Anfragen entgegen genommen. Dadurch buchen die Agenten ihre Fahrt erst in dem Moment, in dem sie ihre vorhergehende Aktivität vollendet haben. Bei der

¹⁶Vgl. Horni u. a. (2016), S. 146.

¹⁷Vgl. Bischoff u. a. (2017), S. 2.

vorhergehenden Aktivität kann es sich um eine echte Aktivität wie „home“ oder „work“ handeln, aber auch um den Ausstieg aus einem ÖPNV-Fahrzeug (eine sogenannte „pt interaction“ Aktivität). Durch die fehlende Möglichkeit zur Vorbestellung verlängern sich die Wartezeiten.

Bei den oben genannten Qualitätskriterien handelt es sich um die maximale Wartezeit t_{max}^{wait} und die maximale Gesamtreisezeit t_{max}^r , welche anhand der Parameter α und β und der direkten Fahrzeit ohne Umwege und ohne Wartezeiten t_{direct}^r wie folgt berechnet wird:¹⁸

$$t_{max}^r = \alpha * t_{direct}^r + \beta$$

Die maximale Gesamtreisezeit t_{max}^r schließt dabei die Wartezeit und die Fahrzeit inklusive der Umwege zur Bedienung anderer Fahrgäste mit ein. α und β begrenzen dadurch nicht nur das Ausmaß der Umwege zur Bedienung anderer Kunden, sondern schränken zusätzlich zum Parameter t_{max}^{wait} die maximal zulässigen Wartezeiten weiter ein.

α	β [mm:ss]	t_{max}^{wait} [mm:ss]	t_{avg}^{wait} [mm:ss]	t^r [mm:ss]	d^{direct} [km]	d^{detour} [km]	d^T [km]	d^U [km]	ρ
1,1	12:00	15:00	04:21	18:54	7,48	1,37	196 180	238 143	0,01
1,3	08:00	15:00	04:09	18:33	7,49	1,23	196 729	233 954	0,02
1,3	10:00	15:00	04:25	19:26	7,48	1,55	194 062	243 265	0,01
1,5	04:00	15:00	03:52	18:21	7,56	1,14	195 764	229 676	0,03
1,5	06:00	15:00	04:11	19:08	7,51	1,41	193 402	238 993	0,02
1,5	08:00	15:00	04:25	19:54	7,49	1,70	191 094	247 194	0,01
1,7	02:00	15:00	03:51	18:58	7,64	1,31	192 988	233 242	0,04
1,7	04:00	15:00	04:09	19:40	7,53	1,59	191 723	243 544	0,02
1,7	06:00	15:00	04:27	20:35	7,50	1,89	190 082	252 603	0,01
1,9	02:00	15:00	04:09	20:11	7,57	1,73	189 162	246 340	0,03

Tabelle 3: Experimentelle Ermittlung der DRT-Contribution Parameter in Bischoff u. a. (2017), alle Werte für Fahrzeuge mit der Kapazität 4 Personen (Eigene Darstellung auf Basis von Bischoff u. a. (2017), S. 5)

In Bischoff u. a. (2017) haben die Autoren verschiedene Parameterkombinationen für t_{max}^{wait} , α und β mit verschiedenen Fahrzeugkapazitäten jedoch stets gleicher Fahrzeuganzahl getestet (siehe Auszug in Tabelle 3). Dabei zeigte sich, dass mit steigendem β nicht nur die mittleren Umwege sondern auch die mittleren Wartezeiten signifikant zunehmen. Dabei überlagern sich zwei Effekte. Einerseits können mit großzügigeren zulässigen Rufbusreisezeiten Fahrtwünsche bedient werden, die zuvor wegen Verletzung der Qualitätskriterien abgewiesen wurden (Anteil ρ der abgewiesenen Fahrten an den gesamten Fahrtwünschen sinkt). Diese zusätzlichen Fahrten spiegeln sich in einer leicht vergrößerten Passagier-Verkehrsleistung d^U wider¹⁹ und erhöhen die durchschnittliche

¹⁸Vgl. Bischoff u. a. (2017), S. 2

¹⁹Zur Berechnung der Passagier-Verkehrsleistung d^U wird die während einer Passagierfahrt zurückgelegte Weglänge (inklusive Umwege) für alle Fahrten aufsummiert. Dadurch steigt d^U auch, wenn zwar die exakt gleichen Fahrten zwischen den gleichen Start- und Zielorten gefahren werden, jedoch die Umwege

Wartezeit t_{avg}^{wait} . Obwohl mehr Fahrgastfahrten durchgeführt werden, sinkt die von den Fahrzeugen zurückgelegte Distanz d^T , weil durch die schwächeren Randbedingungen größere Umwege d^{detour} möglich werden und somit mehr Optimierungspotenzial genutzt werden kann.

Damit entsteht ein Zielkonflikt zwischen niedrigen Wartezeiten einerseits und der Reduktion des Anteils abgewiesener Fahrten (Fahrtwunschnichtbedienungsrate ρ) andererseits. Bei niedrigen Werten von t_{max}^{wait} , α und β werden zahlreiche Fahrtwünsche abgewiesen, was die abgewiesenen Fahrgäste schädigt. Setzt man die genannten Parameter jedoch höher, so steigen durch die Optimierung der Routen zur Reduktion des Fahrzeugeinsatzes auch die Wartezeiten und Umwege im Mittel an, ohne dass dies in diesem Ausmaß zwingend erforderlich wäre, um weitere Fahrtwünsche zu bedienen. Diese erhöhten Warte- und Fahrzeiten sind aus Fahrgastsicht ebenfalls störend.

Das Szenario des Untersuchungsgebietes (siehe Kapitel 4) erfordert eine hohe Rechenzeit je Simulationslauf. Daher wurden nur wenige Parameterkombinationen getestet. Deshalb wurden ausgehend von $\alpha = 1,5$, $\beta = 10min$ und $t_{max}^{wait} = 10min$ mehrere Werte für β und t_{max}^{wait} getestet. Bei allen Testläufen wurden 200 Rufbusse mit einer Kapazität von jeweils vier Passagieren eingesetzt.

α	β [mm:ss]	t_{max}^{wait} [mm:ss]	t^{wait} [mm:ss]	t^r [mm:ss]	d^{direct} [km]	d^{detour} [km]	d^T [km]	d^U [km]	ρ
1,5	10:00	10:00	06:18	17:34	4,87	1,21	49 715	105 170	0,05
1,5	10:00	12:00	07:26	18:28	4,94	1,08	54 809	109 795	0,01
1,5	12:00	12:00	07:48	19:30	4,95	1,36	53 090	114 739	0,01
1,5	15:00	15:00	10:02	22:21	4,94	1,56	52 808	118 462	0,01

Tabelle 4: Experimentelle Ermittlung der DRT-Contribution Parameter Untersuchungsgebiet (Eigene Darstellung)

Anhand der Tabelle 4 ist erkennbar, dass bereits bei $\alpha = 1,5$, $\beta = 10min$ und $t_{max}^{wait} = 10min$ etwa jeder 20. Fahrtwunsch abgewiesen wird. Eine weitere Erhöhung der Fahrzeugzahl zur Reduktion der Fahrtwunschnichtbedienungsrate ρ und zur Reduktion der Wartezeiten erscheint nicht zweckmäßig, da selbst in den Spitzenzeiten selten alle Fahrzeuge gleichzeitig im Einsatz sind (siehe Abbildung 2).

Da mit niedrigeren Werten für t_{max}^{wait} , α und β noch weniger Fahrtwünsche bedient werden könnten, wurden nur höhere Werte für t_{max}^{wait} , α und β getestet. In Tabelle 3 ist ersichtlich, dass höhere α -Werte als 1,5 tendenziell zu höheren Gesamtreisezeiten t^r führen. Daher, und in Anbetracht der hohen Rechenzeiten, wurden nur t_{max}^{wait} und β variiert. Dabei sorgte bereits eine geringe Erhöhung von t_{max}^{wait} auf zwölf Minuten bei gleichbleibendem β für eine hinreichend geringe Fahrtwunschnichtbedienungsrate ρ von 0,01 bei einer nur geringfügigen Erhöhung der Gesamtreisezeit t^r . Deshalb wurde für alle folgenden

angestiegen sind. Da mehrere Passagiere einen Rufbus teilen können, kann d^U größer als d^T sein.

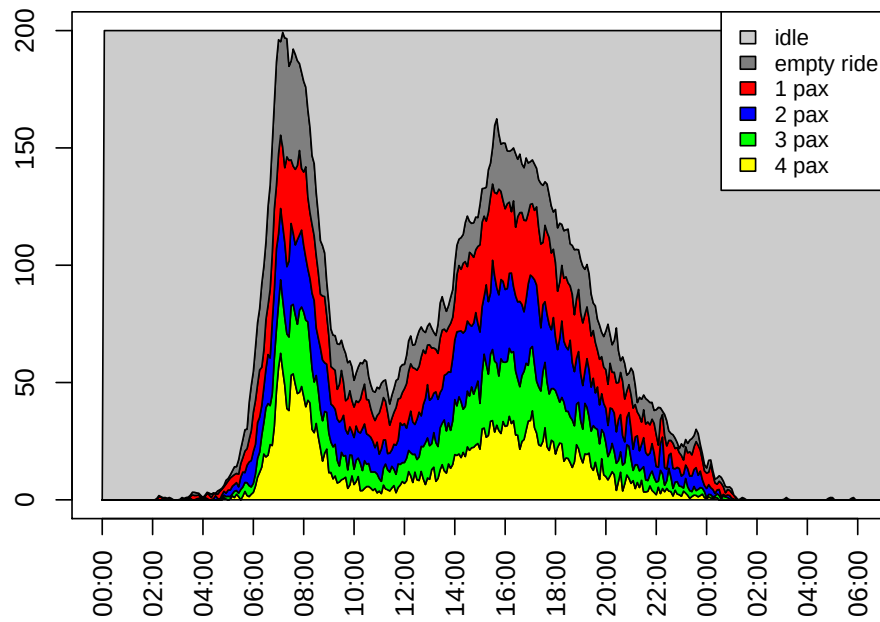


Abbildung 2: Fahrzeugauslastung 200 Rufbusse Kapazität 4 Personen, $\beta = 10min$, $t_{max}^{wait} = 10min$ (eigene Darstellung)

Simulationsläufe die Parameterkombination $\alpha = 1,5$, $\beta = 10min$ und $t_{max}^{wait} = 12min$ verwendet.

Die Rufbusse werden in der 0. Iteration zufällig über das Rufbuseinsatzgebiet verteilt und starten in den nachfolgenden Iterationen immer dort, wo sie sich am Ende der letzten Iteration befunden haben. Analog dazu bleiben auch während der Iterationen die Fahrzeuge immer auf dem Straßenabschnitt („Link“), auf dem die letzte Fahrt endete, bis das Fahrzeug den Auftrag zur Beförderung eines anderen Passagiers erhält. Eine Relocation-Strategie, die leere Fahrzeuge in nachfragestarke Gebiete verlagert, um dort Fahrtwünsche schneller bedienen zu können, war zum Zeitpunkt der Simulationen noch nicht in der DRT-Contribution verfügbar.

3.2 AV-Contribution

Die AV-Contribution erweitert den Standard-ÖPNV-Router um die Möglichkeit andere Verkehrsmittel als „transit_walk“ (Fußweg) im Vor- und Nachlauf zum eigentlichen ÖPNV zu verwenden. In diesem Fall werden so die Rufbusse in ÖPNV-Routen eingebunden. Für Fahrten, die nicht mit dem Verkehrsmittel „pt“ (ÖPNV) durchgeführt werden, werden andere Router eingesetzt, die keine Wege mit Rufbussen zurückgeben können. Die Tagespläne der Agenten werden vor Beginn der Iteration festgelegt.

Nur für Reiseteilabschnitte, sogenannte „Legs“²⁰, für die der Router das Verkehrsmittel Rufbus gewählt und in den Tagesplan geschrieben hat, werden in der Simulation tatsächlich Rufbusse genutzt. Dadurch eignet sich das Routing auch zur Steuerung des Rufbus-Bedienungsgebietes, indem nur für Legs innerhalb des Bedienungsgebietes das Verkehrsmittel Rufbus zurückgegeben wird. Fahrtwünsche außerhalb des Bedienungsgebietes würden zwar von der DRT-Contribution bedient werden, treten jedoch nicht auf, da sie während des Routings ausgeschlossen werden.

Dazu musste die AV-Contribution erweitert werden.²¹ Die Klassen „FixedDistanceBasedVariableAccessModule“ und „FlexibleDistanceBasedVariableAccessModule“ wurden in einer neuen Klasse „DistanceBasedVariableAccessModule“ mit der gleichen Funktionalität zusammengefasst. Innerhalb des Config-Files, der Konfigurationsdatei für das Szenario, kann ein Pfad zu einer Shape-Datei angegeben werden, die das Einsatzgebiet der Rufbusse umgrenzt. Mithilfe des ebenfalls im Config-File angegebenen Schlüssels wird dieses Gebiet von der Klasse „DistanceBasedVariableAccessModule“ ausgelesen. Diese Klasse gibt für den Vor- bzw. Nachlauf zum ÖPNV ein Leg und dessen Verkehrsmittel zurück.

Zunächst wird geprüft, ob sich Start und Ziel dieses Weges innerhalb des Betriebsgebietes befinden. Falls ja, dann wird anhand der Weglänge das Verkehrsmittel gewählt. Beträgt dieser Weg weniger als die Mindestlänge von Rufbusfahrten von 300 m (konfigurierbar), so wird ein Fußweg zurückgegeben („transit_walk“). Für solche sehr kurzen Strecken sollen keine Rufbusse benutzt werden können, da die aufwendige Anfahrt des Fahrzeuges einem geringem Nutzen für den Fahrgast gegenüber steht. Auf einem kurzen Weg ist der Fahrzeuvorteil des Rufbusses gegenüber einem Fußweg gering, zudem fallen Wartezeiten auf den Rufbus an. Aufgrund des großen Haltestellenabstandes können auch die derzeit im Untersuchungsgebiet verkehrenden Linienbusse nicht für derartig kurze Wege genutzt werden.

Zwischen 300 m und 1000 m Weglänge wird zufällig zwischen Fußweg und Rufbusfahrt ausgewählt. Im Laufe der Iterationen wird beim Rerouting diese zufällige Auswahl wiederholt, sodass beide Verkehrsmittel getestet werden können. Beträgt die Strecke dagegen mehr als 1000 m (konfigurierbar), so wird eine Rufbusfahrt zurückgegeben, da derartig lange Fußwege aufgrund der geringen Geschwindigkeit viel Zeit in Anspruch nehmen und somit unattraktiv sind. In den meisten Fällen würden sich die Agenten

²⁰Eine Reise von einem Ort A zu einem Ort B besteht in MATSim aus mindestens einem Leg. Insbesondere ÖPNV-Reisen bestehen jedoch meist aus mehreren Legs, beispielsweise einem Leg für den Fußweg von A zur Bushaltestelle, einem Leg für die Busfahrt zum nächsten Bahnhof, einem Leg für den Fußweg im Bahnhof während des Umstiegs, einem Leg für die Bahnfahrt und einem Leg für den Fußweg vom Zielbahnhof nach B. Zwischen diesen Legs finden sogenannte „pt interaction“-Aktivitäten statt.

²¹Die Erweiterungen können im Branch „variableAccessAreaRestricted“ des MATSim-Projektes auf Github eingesehen werden: <https://github.com/matsim-org/matsim/tree/variableAccessAreaRestricted/contribs/av/src/main/java/org/matsim/contrib/av/intermodal/router>

später für einen Tagesplan mit einer Rufbusfahrt anstelle dieses Fußweges entscheiden. Falls Start oder Ziel des Legs außerhalb des Rufbuseinsatzgebietes liegen, wird immer ein Fußweg zurückgegeben.

Während der ersten Simulationsläufe ergaben sich durchweg unplausible Ergebnisse, die auf die der Erweiterung zugrunde liegenden Programmteile zurückgeführt werden konnten. Die Fehlersuche und -behebung nahm sehr viel Zeit in Anspruch, da die Komplexität des Codes und die Rechenzeiten (mehrere Tage) recht hoch sind. In der übernommenen `VariableAccessTransitRouterImpl` befand sich ein Fehler bei der Wegkostenberechnung für Vor- und Nachläufe.

Zudem werden Fußwege nicht im Straßennetz geroutet, sondern nur anhand ihrer Luftliniendistanz bewertet. Daher wurden zum Teil Bushaltestellen gewählt, die aufgrund von Gewässern gar nicht fußläufig aus dem Untersuchungsgebiet heraus erreichbar sind (siehe 4.1). Die Lösung bestand darin, während des Routings die Zu- und Abwege aus dem Untersuchungsgebiet zu den Koordinaten dieser Haltestellen mit einer Art Straffahrzeit zu belegen, sodass diese Haltestellen sehr unattraktiv erscheinen. Dazu kann in der Konfiguration der AV-Contribution ein Pfad („`coords2TimeSurchargeFile`“) zu einer Datei mit Koordinaten und den dort anzuwendenden Fahrzeitzuschlägen angegeben werden.

Anschließend wurde festgestellt, dass in den Planfällen (mit Rufbussen) viele Agenten mehr Zeit mit dem Warten auf den ÖPNV verbringen als im Nullfall (ohne Rufbusse). Dies erklärte sich dadurch, dass viele Agenten von der häufig verkehrenden U-Bahnlinie U6 auf die seltener verkehrende S-Bahnlinie S25 wechselten (siehe Tabelle 5). Die höheren Wartezeiten werden beim Routing offenbar nicht berücksichtigt. Beim Rerouting gab es nur wenig Variation zwischen den in den einzelnen Iterationen zurückgegebenen Routen, sodass meist keine Routen unter Nutzung der U-Bahn in den resultierenden Plänen auffindbar waren. Damit die Agenten sowohl S-Bahn-Routen als auch U-Bahn-Routen beim Routing erhalten und im Laufe der Iterationen die bessere dieser beiden Alternativen wählen können, wurde das Konzept der Koordinaten mit Straffahrzeiten erweitert. In jeder Iteration wird zufällig bestimmt, ob an allen betreffenden S-Bahnhöfen gleichzeitig oder an keinem S-Bahnhof eine Straffahrzeit zum Zu- bzw. Abweg zugeschlagen wird. Dadurch können diese S-Bahnhöfe zeitweilig sehr unattraktiv gemacht werden, sodass Routen mit der U-Bahn zurückgegeben werden. Innerhalb der „`coords2TimeSurchargeFile`“-Datei kann festgelegt werden, ob ein an einer Koordinate wirkender Fahrzeitzuschlag immer oder nur in zufällig ausgewählten Iterationen gelten soll.

Sowohl in der Simulation des Nullfalls als auch bei der Simulation der Planfälle mit Rufbussen werden die DRT- und die AV-Contribution eingesetzt. Im Nullfall wird jedoch das Verkehrsmittel „`drt`“ (Rufbus) im Config-File aus der Konfiguration der AV-

Contribution entfernt, sodass der ÖPNV-Router keine Rufbuslegs zurückgibt. Die Rufbusflotte besteht im Nullfall aus einem Fahrzeug. Da der Router keine Rufbuslegs erzeugt hat, blieb dieses eine Fahrzeug erwartungsgemäß ungenutzt. Dadurch bleibt das Setup der Simulation in Java identisch, sodass sich daraus keine unerwünschte Unterschiede ergeben können.

4 MATSim-Szenario des Untersuchungsgebietes

Als Grundlage für die Verkehrssimulation mit MATSim wurde vom Betreuer dieser Masterarbeit ein vorhandenes MATSim-Szenario für Berlin und Umland mit Stand etwa 2008 zur Verfügung gestellt. Es beinhaltet ein Straßennetz, ein „Population“-File mit Agenten und deren Tagesplänen sowie eine „TransitVehicles“-Datei und eine „TransitSchedule“-Datei zur fahrplanbasierten Simulation des ÖPNV.

Die Sample-Size beträgt 100%, das heißt jeder Agent soll eine Person abbilden. Nur mit einer derartig hohen Sample-Size lassen sich Rufbusse realistisch abbilden, da andernfalls ein Agent mehrere Personen repräsentieren müsste. Bei einem 10%-Sample würde ein Agent also 10 Personen darstellen und Fahrzeuggrößen unter 10 Personen Kapazität ließen sich nicht mehr abbilden. Zudem ginge der Charakter geteilter Fahrt verloren, da ein Fahrzeug mit 10 Personen Kapazität bereits mit einem Agenten voll ausgelastet wäre und keine weiteren Fahrgäste mitbefördern und somit keine geteilten Fahrten anbieten könnte.

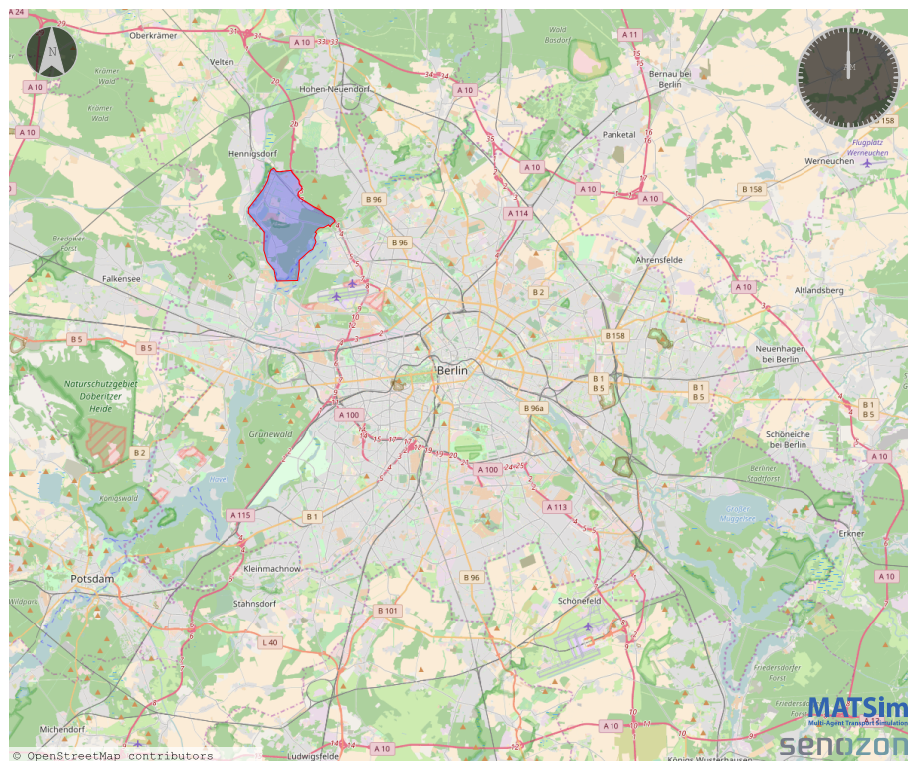


Abbildung 3: Lage des Untersuchungsgebietes in Berlin (eigene Darstellung basierend auf OpenStreetMap)

Innerhalb dieses gegebenen Berlin-Szenarios wurde ein Teilgebiet im Nordwesten Reinickendorfes für die Untersuchung gewählt (siehe Abbildungen 3 und 4). Es umfasst in etwa die Ortsteile Heiligensee und Konradshöhe sowie einige Waldgebiete des Ortsteils

Tegel. Das Gebiet lässt sich leicht vom Rest des Szenarios abgrenzen, da es im Westen und Süden von Wasser sowie im Norden und Osten von Waldflächen umgeben ist. Dadurch gibt es nur wenige Straßen und Buslinien, die in das Gebiet hinein oder aus diesem hinaus führen.

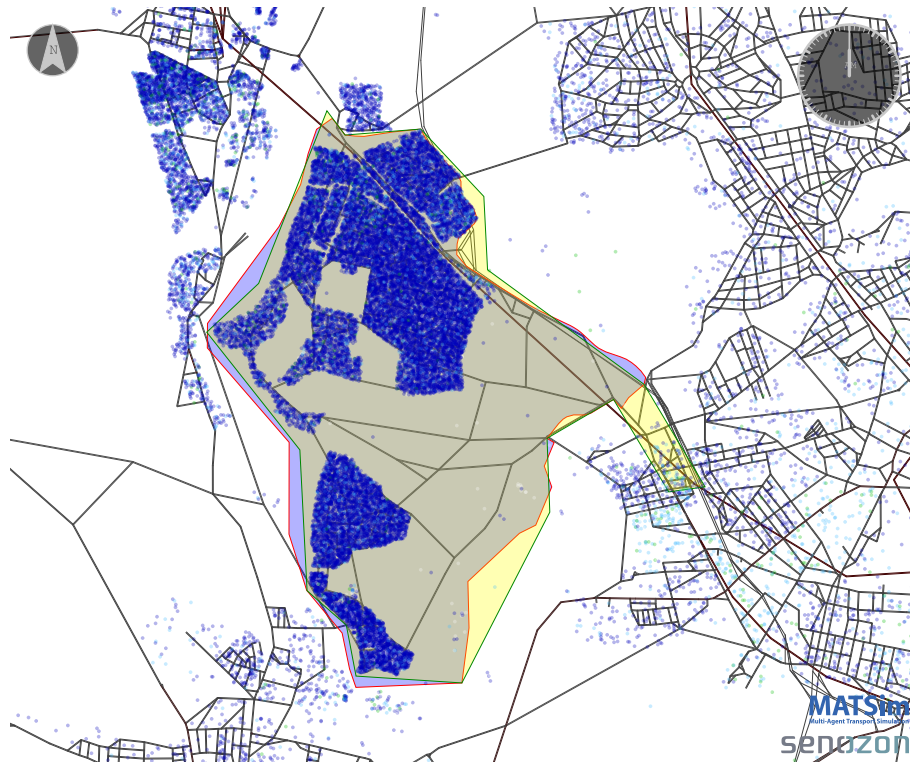


Abbildung 4: Abgrenzung des Untersuchungsgebietes, anhand dessen die Population gefiltert wurde (rot), und des Einsatzgebietes der Rufbusse (grün) und Aktivitätenorte („home“-Aktivitäten in blau; eigene Darstellung)

Um die zur Simulation benötigte Rechenzeit zu verkürzen, wurden alle Agenten aus dem „Population“-File entfernt, welche weder im Untersuchungsgebiet eine Aktivität ausüben noch dieses mit dem Auto durchqueren. Dazu wurde das zu betrachtende Untersuchungsgebiet zunächst in einer Shape-Datei möglichst genau definiert („study area“, siehe rote Umgrenzung in Abbildung 4). Für den Einsatz als Rufbus-Einsatzgebiet wurde diese Fläche um das Zentrum von Tegel mit dem U-Bahnhof Alt-Tegel und dem S-Bahnhof Tegel erweitert und in einer anderen Shape-Datei abgelegt („av operation area“, siehe grüne Umgrenzung in Abbildung 4).²² Dieses Shape wird bei jedem Routing einer ÖPNV-Fahrt verwendet, um festzustellen, ob die Rufbusse als Zu- bzw. Abbringer

²²Von einer Erweiterung des Einsatzgebietes um den S-Bahnhof Hennigsdorf wurde abgesehen, da im Nullfall keine Buslinie aus dem Untersuchungsgebiet dorthin verkehrt. Insofern würde dies eine Angebotsenerweiterung darstellen und nicht bloß den Ersatz einer vorhandenen Buslinie. Das Ergebnis würde verzerrt, da sich der Effekt der Angebotsausweitung mit dem Effekt des Ersatzes der Linienbusse durch Rufbusse überlagern würde. In einem späteren Schritt könnte man eine derartige Angebotsausweitung getrennt untersuchen.

zulässig sind. Dazu wird geprüft, ob sowohl die Start- als auch die Zielkoordinate des Weges vom letzten Aktivitätenort zur Starthaltestelle- bzw. von der Zielhaltestelle zum nächsten Aktivitätenort sich beide innerhalb dieses Shapes befinden. Deshalb wird dieses Shape-File sehr oft verwendet. Durch eine Vereinfachung dieses Shapes, das heißt eine Verringerung der Anzahl der Knoten und Kanten aus denen die Umgrenzungslinie besteht, kann die Rechenzeit verkürzt werden. Daher unterscheidet sich das Einsatzgebiet der Rufbusse leicht vom Untersuchungsgebiet, anhand dessen die Population gefiltert wurde.

Die durchfahrenden Autonutzer stellen sicher, dass innerhalb des Untersuchungsgebietes Staus auftreten und die Busse bzw. Rufbusse auf eine realistische Geschwindigkeit verlangsamen. Außerhalb des Untersuchungsgebietes wird nur ein Teil der dort verkehrenden Agenten simuliert, sodass dort unrealistisch niedrige Fahrzeiten auftreten können. Theoretisch kann diesem Problem beispielsweise durch „NetworkChangeEvent“ abgeholfen werden, welche die „Freespeed“-Geschwindigkeit, also die Geschwindigkeit im unbelasteten Netz, so weit reduzieren, als wenn die entfernten Agenten dort noch verkehren würden. Leider stellte sich das zur Verfügung gestellte „NetworkChangeEvent“-File jedoch insoweit als unbrauchbar heraus, als dass z.B. auf der am Rand des Untersuchungsgebietes verlaufenden Autobahn A111 nur eine sehr geringe und damit praktisch wirkungslose Einschränkung der „Freespeed“ hinterlegt ist. Dadurch verlagern nun viele Autofahrer ihre Route von der im Untersuchungsgebiet gelegenen Ruppiner Chaussee auf die parallele Autobahn A111. Allgemein erscheinen die hinterlegten „NetworkChangeEvent“ wenig plausibel, so ist auch auf vielen weiteren Straßen einschließlich sogar der Stadtautobahn A100 in Höhe Kaiserdamm zur morgendlichen Hauptverkehrszeit (z.B. 8:00 Uhr) nur eine sehr geringe Einschränkung des „Freespeed“-Werts hinterlegt. Auf besagter A100 wird dafür gegen 14:00 die „Freespeed“ auf etwa 10 km/h beschränkt, obwohl eine derartige Beschränkung eher zu anderen Tageszeiten zu erwarten gewesen wäre.

Das „Population“-File enthält rund 50.000 Agenten, deren Aktivitätenorte (soweit sie sich innerhalb des Kartenausschnittes befinden) in Abbildung 4 dargestellt sind. Die Ortsteile Heiligensee und Konradshöhe haben jedoch nur rund 18.000 bzw. 6.000 Einwohner.²³ Insgesamt gibt es damit deutlich mehr Agenten im Szenario, als die zu betrachtenden Stadtteile Einwohner haben. Anhand der blau gekennzeichneten „home“-Aktivitäten²⁴ in Abbildung 4 ist erkennbar, dass es sich bei den zusätzlichen Agenten insbesondere um Bewohner von Hennigsdorf handelt, die im Untersuchungsgebiet eine Aktivität ausüben oder dieses mit dem Pkw durchfahren. Insofern erscheint die Anzahl der Agenten und die Verteilung von deren Aktivitätenorten plausibel.

Das Straßennetz wurde insofern an die Rufbusse angepasst, als dass an den S-Bahnhöfen

²³Vgl. o.A. (2017a) und o.A. (2017b).

²⁴Diese Aktivität wird am Wohnort ausgeübt zeigt somit den Wohnort des Agenten an.

Heiligensee, Schulzendorf und Tegel sowie am U-Bahnhof Alt-Tegel spezielle Rufbuswendeschleifen angeordnet wurden, die von den Koordinaten des Bahnhofs zum nächsten Knoten im Straßennetz und wieder zurück führen. Dadurch können die Fußwege beim Umstieg vom Rufbus in das normale ÖPNV-Netz bzw. umgekehrt reduziert werden. Dies ist nötig, da die Rufbusse ihre Fahrgäste immer am Mittelpunkt der Kante entlassen, an der die Fahrgäste ein- oder aussteigen möchten. Dagegen steigen in MATSim Fahrgäste des normalen Linienbusses immer an den Koordinaten der Bushaltestelle ein und aus, unabhängig davon wo sich der Linienbus und die Kante, an der der Bus hält, tatsächlich befinden. Wenn nun ein Fahrgast z.B. von einem Linienbus in eine S-Bahn umsteigen möchte und die Koordinaten der Bushaltestelle und die des S-Bahnhofes übereinstimmen, geht MATSim von einem Umsteigeweg von 0 m Länge und 0 s Dauer aus. Dagegen würde beim Rufbus ein Umsteigeweg von den Koordinaten des S-Bahnhofes zum Mittelpunkt der nächstgelegenen Kante berechnet werden. Durch die zusätzlichen Kanten der Rufbuswendeschleifen kann dieser zusätzlich berücksichtigte Umsteigeweg zumindest reduziert werden und verzerrt so in geringerem Ausmaß die Simulationsergebnisse.

4.1 ÖPNV im Nullfall

Das ÖPNV-Angebot im Nullfall besteht aus allen Fahrten (Departures), die in der gegebenen Transit-Schedule-Datei des Berlin-Szenarios hinterlegt sind. Darunter sind insbesondere die Buslinien 124, 133, 222 und 324, die das Untersuchungsgebiet erschließen und mit dem südlich davon gelegenen Zentrum von Tegel verbinden. Dort befinden sich auch der U-Bahnhof Alt-Tegel der U6 sowie der S-Bahnhof Tegel der S-Bahnlinie S25. Zudem verkehren dort weitere Buslinien.

Anhand der in Abbildung 6 dargestellten Fahrgastzahlen ist erkennbar, dass entlang der Buslinien im Untersuchungsgebiet (124, 133, 222 und 324) die Querschnittsbelastung in Richtung des Zentrums von Tegel zunimmt und diese Busse also hauptsächlich als Zubringer dorthin genutzt werden. Diese Konzentration der Nachfrage auf das Zentrum von Tegel zeigte sich auch bei der Simulation der Rufbusse (siehe Abbildung 14).

Zeitraum (ca.)	Bus 124	Bus 133	Bus 222	Bus 324	S25	U6
SVZ morgens (ca. 5:30)	20	20	20	30	20	10
HVZ morgens (ca. 8:00)	20 ^{a,b}	10	10 ^b	30	20	5
NVZ mittags (ca. 12:00)	20	20	20	30	20	5
HVZ nachmittags (ca. 17:00)	20 ^{a,b}	20	10 ^b	30	20	5
SVZ abends (ca. 21:00)	20	20	20	-	20	10

Tabelle 5: Takt in min.

^a: U Alt-Tegel - S Heiligensee / Ruppiner Chaussee 10-min-Takt;

^b: zusätzliche Verstärkerfahrten

(Eigene Darstellung)

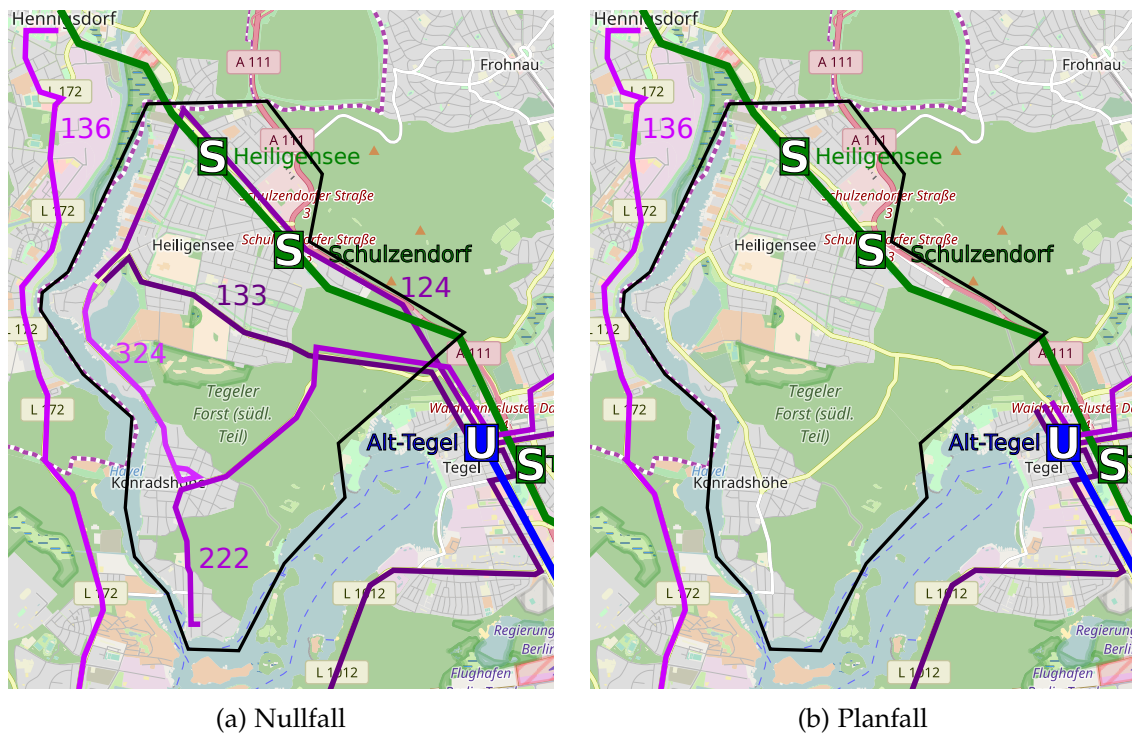


Abbildung 5: ÖPNV-Liniennetz im Nullfall und im Planfall (jeweils eigene Darstellung basierend auf OpenStreetMap)

Während die Buslinien 124, 133 und 222 ganztägig im 10- bis 20-Minuten-Takt verkehren, verkehrt die Linie 324 dagegen nur von etwa 5:30 bis 20:30 Uhr und dies nur im 30-Minuten-Takt (siehe Tabelle 5). Im Falle der Buslinie 324 mit ihrem geringen Fahrtenangebot und der fehlenden Durchbindung ins Zentrum von Tegel ist besonders gut erkennbar, welches Potenzial für die Fahrgäste ein Ersatz durch Rufbusse bietet.

Außer diesen Buslinien durchquert auch die S-Bahnlinie S25 den östlichen Rand des Untersuchungsgebietes und hält dort an den beiden Bahnhöfen Schulzendorf und Heiligensee, an denen Übergang zur Buslinie 124 besteht. Die genannte S-Bahnlinie stellt auch die einzige ÖPNV-Verbindung vom Untersuchungsgebiet Richtung Norden (u.a. Hennigsdorf) dar. Direktverbindungen Richtung Osten oder Westen bestehen dagegen nicht.

Die S-Bahnlinie S25 verkehrt ganztägig nur im 20-Minuten-Takt und damit deutlich seltener als die U-Bahnlinie U6 und die abschnittsweise zur S25 parallel verlaufende Buslinie 124. Dies könnte erklären, warum viele Fahrgäste trotz der geringeren Fahrzeit der S25 mit dem Bus ins Zentrum von Tegel fahren und warum die U6 deutlich mehr Fahrgäste aufweist als die S25 (siehe Abbildung 6).

In der Nähe des Untersuchungsgebietes verkehrt außerdem die Buslinie 136, die aus dem Untersuchungsgebiets heraus nicht fußläufig erreichbar ist, da sie von diesem

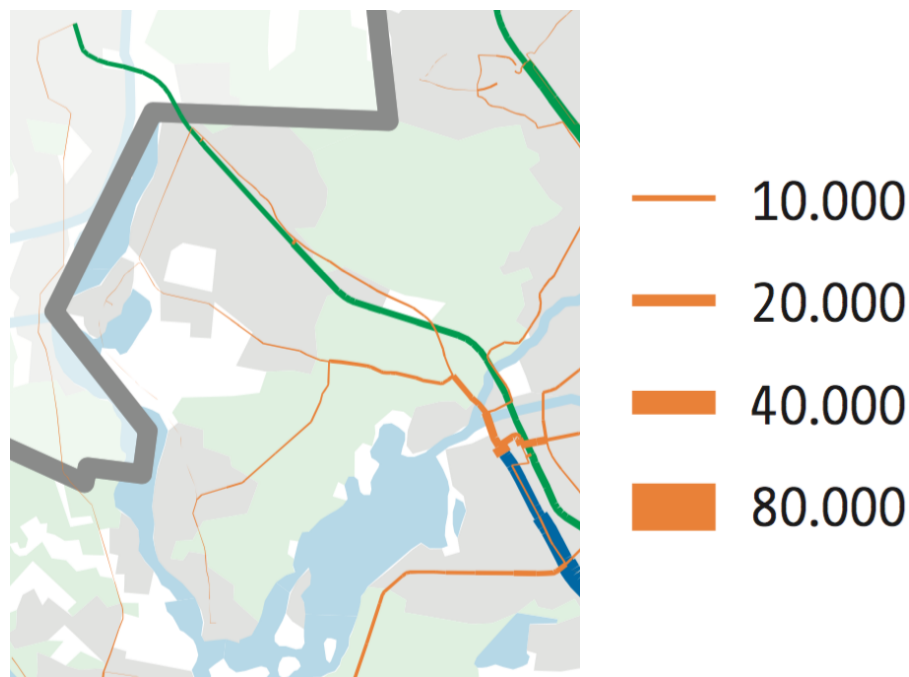


Abbildung 6: durchschnittliche werktägliche Anzahl an Fahrgästen auf Grundlage der Verkehrserhebung 2007: (orange: Bus; grün: S-Bahn, blau: U-Bahn; eigene Darstellung basierend auf o.A. (2013), S. 54.)

durch die Havel getrennt ist. Diese Linie muss trotzdem in der Simulation gesondert betrachtet werden, da der Routing-Algorithmus allein anhand der Luftliniendistanz die nächsten Haltestellen sucht und dabei diese im Weg befindlichen Wasserflächen nicht berücksichtigt. Daher wurden innerhalb des Routers in der AV-Contribution bestimmte Haltestellen der Linie 136 und weiterer Buslinien mit einer Art Straffahrzeit belegt, sodass Zu- und Abwege aus dem Untersuchungsgebiet zu diesen Haltestellen sehr unattraktiv erscheinen. Dadurch werden diese Haltestellen nicht genutzt (siehe Kapitel 3.2).

4.2 ÖPNV im Planfall

Im Planfall verkehren alle ÖPNV-Linien unverändert bis auf die Buslinien im Untersuchungsgebiet. Die vollständig innerhalb des Untersuchungsgebietes verkehrende Linie 324 wird eingestellt. Die ausbrechenden Linien 124, 133 und 222 (sowie N22 und N24) werden bis zur ersten Zwischenendstelle außerhalb des Untersuchungsgebiet zurückgezogen. Dabei handelt es sich um die Haltestelle „An der Mühle / Karolinenstraße“, an der bereits im Nullfall einige Fahrten aus Richtung Tegel enden. Insofern besteht dort bereits eine Wendemöglichkeit für Busse, die gegebenenfalls nur noch ausgebaut werden müsste.

5 Simulationsergebnisse

Im folgenden sollen die Ergebnisse der Simulation analysiert und die untersuchten Planfälle (Rufbusverkehr) im Vergleich mit dem Nullfall (herkömmlicher Linienbusverkehr) bewertet werden. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der simulierte Betriebstag repräsentativ für alle Tage eines Jahres ist, das heißt z.B., dass die Fahrleistung pro Jahr genau dem 365,25-fachen der Fahrleistung an diesem simulierten Betriebstag entspricht.

5.1 Auswahl der untersuchten Planfälle

Zunächst wurden zahlreiche verschiedene Planfälle, das heißt Kombinationen von Fahrzeugkapazitäten und Fahrzeuganzahlen, simuliert (siehe Tabelle 6). Von diesen simulierten Planfällen sollen einige zielführend erscheinende Fälle ausgewählt und in den folgenden Unterkapiteln näher analysiert werden.

Bezeichnung Planfall	Anzahl Fahrzeuge	Kapazität je Fahrzeug [Personen]	Nichtbedienungsrate ρ	mittlere Gesamt-reisezeit Rufbus t^r [mm:ss]
D2D_50_Cap20	50	20	0.35	18:10
D2D_75_Cap12	75	12	0.19	17:58
D2D_100_Cap12	100	12	0.09	17:55
D2D_100_Cap8	100	8	0.10	17:56
D2D_120_Cap8	120	8	0.05	18:05
D2D_150_Cap8	150	8	0.02	18:13
D2D_150_Cap4	150	4	0.05	18:15
D2D_200_Cap4	200	4	0.01	18:28
D2D_400_Cap1	400	1	0.05	17:40
D2D_1000_Cap4	1000	4	0.00	17:42

Tabelle 6: Untersuchte Fahrzeuggrößen und -anzahlen, Fahrtwunschnichtbedienungsrate ρ und Summe aus Rufbuswarte- und -fahrzeit t^r (Eigene Darstellung)

Damit die Fahrgäste das neue Angebot akzeptieren, sollte in den Planfällen im Mittel keine signifikante Verschlechterung gegenüber dem Nullfall auftreten. Dies betrifft insbesondere die Ablehnung von Fahrtwünschen im Rufbusverkehr, woraus sich das Ausschlusskriterium Nichtbedienungsrate ρ ergibt. Analog zur Ablehnung von Fahrtwünschen beim Rufbus werden jedoch auch beim herkömmlichen Linienbus aufgrund von Fahrtausfällen, Verspätungen und überfüllten Fahrzeugen nicht alle Fahrtwünsche bedient. Deshalb werden zunächst nur alle Planfälle mit $\rho > 5\%$ aussortiert. Die Nichtbedienungsrate wird später in der Bewertung der verbliebenen Planfälle in Kapitel 5.4 berücksichtigt.

In Tabelle 6 ist erkennbar, dass sich die Reisezeiten im Rufbus t^r zwischen den einzelnen Planfällen nur geringfügig unterscheiden. Deshalb werden keine Planfälle aufgrund der

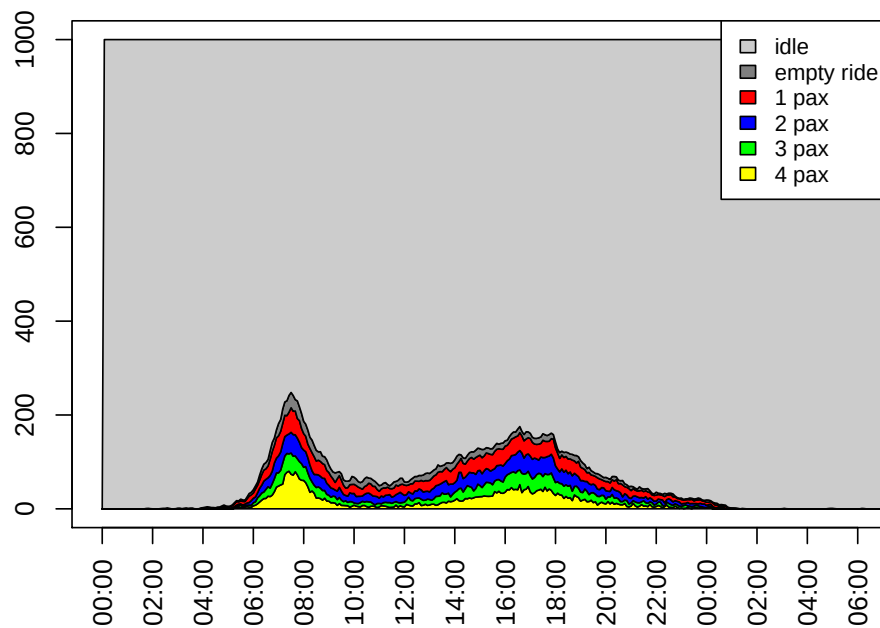


Abbildung 7: Fahrzeugauslastung 1000 Rufbusse Kapazität 4 Personen (eigene Darstellung)

Reisezeiten ausgeschlossen.

Aus Betreibersicht sind u.a. die Investitionskosten ein wichtiges Ausschlusskriterium. Betrachtet man die Planfälle D2D_400_Cap1 und D2D_1000_Cap4, so fällt auf, dass sie trotz erheblich größerer Fahrzeugflotten und damit verbundenen Investitionskosten nur sehr geringe Reisezeitverkürzungen t' relativ zu den anderen Planfällen ermöglichen. Im Planfall D2D_400_Cap1 beträgt die Kapazität eines Fahrzeuges nur eine Person, dadurch entspricht dieser Planfall einem ungeteilten Taxiverkehr. Obwohl dadurch Umwege zur Beförderung weiterer Passagiere entfallen, verringert sich die Reisezeit der Rufbusse im Vergleich zum Planfall mit der größten Reisezeit D2D_200_Cap4 nur um weniger als eine Minute. Die Fahrzeit im Fahrzeug sinkt zwar von etwa 662 s auf rund 537 s, jedoch steigt gleichzeitig die Wartezeit von 446 s auf 522 s an.

Der Planfall D2D_1000_Cap4 stellt ein Extrembeispiel dar, das aufzeigt, welche Nichtbedienungsrate ρ und welche Rufbusreisezeiten t' mit übergroßem Mitteleinsatz überhaupt erreichbar sind. Während die Nichtbedienungsrate auf 0 sinkt, verringert sich die Rufbusreisezeit nur um etwa eine Minute gegenüber dem Planfall mit der größten Reisezeit. Im Planfall D2D_1000_Cap4 optimiert der Taxi-Einsatz-Algorithmus den Fahrzeugeinsatz so, dass nie mehr als nur etwa 250 Fahrzeuge tatsächlich im Einsatz sind (siehe Abbildung 7). Dazu werden weiterhin zahlreiche Fahrten geteilt. Die 750 überzähligen Fahrzeuge sorgen für eine größere Fahrzeugdichte im Untersuchungsgebiet. Im Hinblick auf das Fehlen einer Relocation-Strategie ist dies hilfreich, um jeden Fahrtwunsch tatsächlich bedienen zu können, da so im gesamten Gebiet unbenutzte

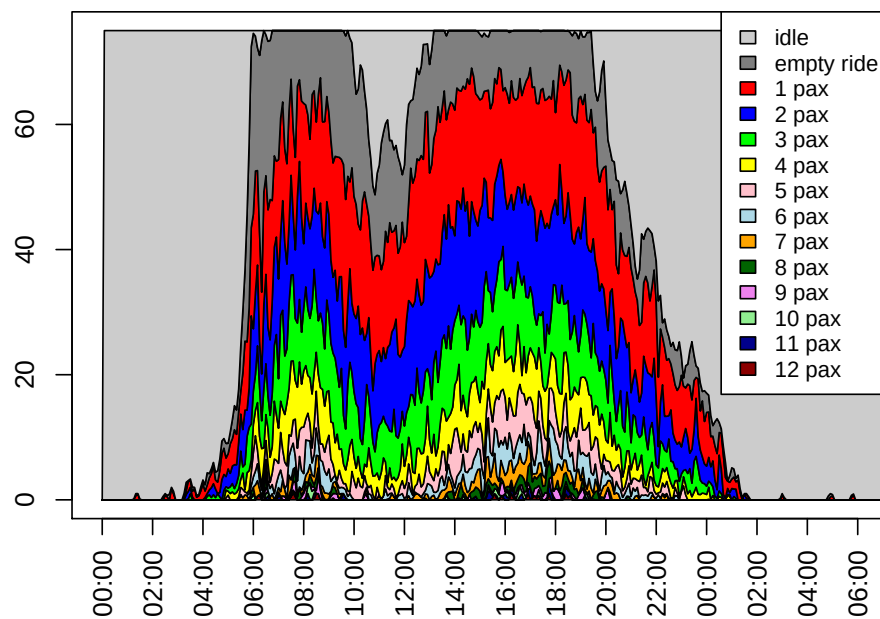


Abbildung 8: Fahrzeugauslastung 75 Rufbusse Kapazität 12 Personen (eigene Darstellung)

Fahrzeuge bereit stehen.

Insgesamt zeigte sich, dass Fahrzeuge mit mehr als acht Plätzen nicht zweckmäßig sind, da nur sehr selten mehr als acht Plätze belegt werden. Im Planfall D2D_75_Cap12 (siehe Abbildung 8) wird dies offensichtlich: Obwohl fast alle Fahrzeuge über weite Tageszeiträume im Einsatz sind und fast jeder fünfter Fahrtwunsch abgewiesen werden muss, sind nur maximal drei Fahrzeuge mit mindestens neun Personen besetzt. Außerdem ergibt sich aus der hohen Nichtbedienungsrate die Notwendigkeit mehr Fahrzeuge einzusetzen, um ein für die Kunden akzeptables Angebot zu schaffen. Dadurch sinkt die Fahrzeugauslastung und somit auch die Wahrscheinlichkeit, dass mehr als acht Personen gleichzeitig ein Fahrzeug belegen.

Dagegen sind im Planfall D2D_120_Cap8 mit 120 Achtsitzern in den Spitzenzeiten jeweils etwa 25 Fahrzeuge mit mehr als vier, sowie rund zehn Fahrzeuge mit mehr als sechs Personen besetzt (siehe Abbildung 10a). Dies ergibt einen Anteil von 17% bzw. 8% der Fahrzeuge, der eher vertretbar scheint. Deshalb sollten Achtsitzer nicht aus der Auswertung entfernt werden.

Aufgrund der Ausschlusskriterien Nichtbedienungsrate und Investitionskosten für die Fahrzeugflotte verbleiben nur die Planfälle D2D_120_Cap8, D2D_150_Cap8, D2D_150_Cap4 und D2D_200_Cap4 in der Auswertung.

5.2 Auswertung aus Kunden- und Betreibersicht

Die in Kapitel 5.1 ausgewählten Planfälle sollen nun näher untersucht und mit dem Nullfall verglichen werden. Aus Kundensicht sind niedrige Reisezeiten sowie ein niedriger Anteil nicht bedienter Fahrtwünsche erstrebenswert. Aus Betreibersicht sind dagegen möglichst niedrige Kosten erstrebenswert. Die genaue Kostenberechnung folgt in Kapitel 5.3, beruht jedoch auf der Fahrleistung und der damit verbundenen Fahrzeugauslastung, welche hier analysiert werden sollen.

Im folgenden soll die Gesamtreisezeiten, also die Reisezeiten von der Abfahrt an einem Aktivitätenort bis zur Ankunft am Zielort unter Nutzung der Rufbusse, herkömmlicher ÖPNV-Linien und/oder „transit_walk“-Fußwege betrachtet werden. Diese Gesamtreisezeiten werden nur für die Wege²⁵ ausgewertet, die vom Router für das Verkehrsmittel ÖPNV geroutet wurden und deren Start oder Ziel sich im Untersuchungsgebiet befinden. Dies schließt auch reine Fußwege und reine Rufbusfahrten mit ein, sofern der Router keine geeigneten Abfahrten im herkömmlichen ÖPNV-Netz für den betreffenden Weg gefunden hat.

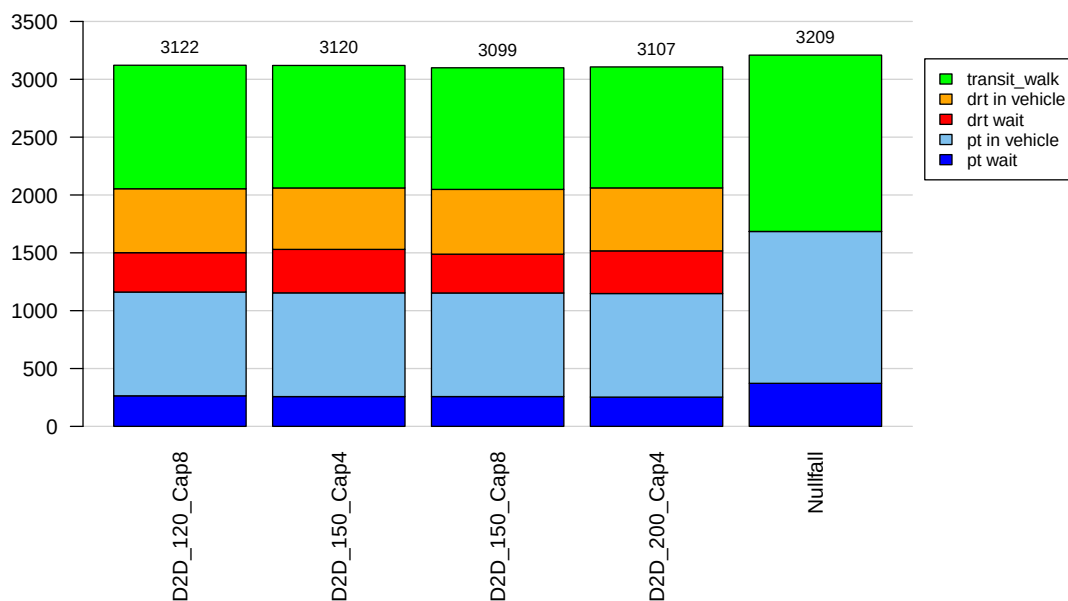


Abbildung 9: Mittlere Gesamtreisezeiten in s und deren Aufteilung in Wartezeiten („wait“) und Fahrzeiten („in vehicle“) für Rufbuslegs („drt“), restliche ÖPNV-Legs („pt“) und Fußwege („transit_walk“) in den ausgewählten Planfällen (eigene Darstellung)

Ein problematischer Aspekt bei der Auswertung der Gesamtreisezeiten ist, dass nicht alle Wege in allen Planfällen vollendet wurden, da einige Rufbusfahrtwünsche abge-

²⁵Ortsveränderungen von einer echten Aktivität zu einer anderen echten Aktivität wie „home“ oder „work“

wiesen wurden. In der Folge entfallen auch alle weiteren im Tagesplan des betroffenen Agenten vorgesehenen Wege. Dieses Problem kann in jedem Planfall andere Wege betreffen. Würde man diese Wege bei den nicht betroffenen Planfällen und dem Nullfall noch mit in die Bewertung einbeziehen, so ergäben sich verzerrte Ergebnisse, da unterschiedliche Wegezahlen und unterschiedliche Weglängen bei den einzelnen zu vergleichenden Planfällen vorlägen. Beispielsweise könnten in einem Planfall zufälligerweise einige sehr lange Wege betroffen sein, sodass deren Entfall in der Auswertung niedrigere mittlere Reisezeiten in diesem Planfall bewirkt, ohne dass dies auf die Eigenheiten dieses Planfalls zurückzuführen wäre. Deshalb werden in der Auswertung nur die 18 761 Wege betrachtet, die in allen miteinander zu vergleichenden Planfällen auch vollendet wurden.²⁶ Der negative Nutzen durch abgelehnte Rufbusfahrtwünsche geht dagegen getrennt in die Bewertung ein.

In Abbildung 9 sind die mittleren Gesamtreisezeiten dargestellt. Diese liegen in allen Planfällen mit 3099 s bis 3122 s, also etwa 52 Minuten, nur geringfügig unter der mittleren Gesamtreisezeit im Nullfall von 3209 s. Erwartungsgemäß verringern sich Fußwegezeiten sowie Fahr- und Wartezeiten im übrigen ÖPNV deutlich in den Planfällen. Dafür kommen Fahr- und Wartezeiten für die Rufbusse hinzu. Die Summe aus ÖPNV- und Rufbusreisezeiten steigt gegenüber dem Nullfall deutlich an. Dies lässt sich mit den hohen Wartezeiten auf die Rufbusse und den Umwegen für die Haustürbedienung erklären. Die Haustürbedienung zahlt sich wiederum in einer Verringerung der Fußwege aus. Die Verkürzung der Gesamtreisezeit um im Mittel etwa eineinhalb Minuten gegenüber dem Nullfall beruht somit allein auf der Abnahme der Gehzeiten.

Planfall	t_{avg}^{wait} [mm:ss]	t_{p95}^{wait} [mm:ss]	t_{avg}^r [mm:ss]	d^{direct} [km]	d^{detour} [km]	d^T [km]	d^U [km]	ρ
D2D_120_Cap8	06:50	11:40	18:05	4,96	1,18	44 684	105 268	0,05
D2D_150_Cap8	06:47	11:40	18:13	4,97	1,19	46 454	111 023	0,02
D2D_150_Cap4	07:32	11:44	18:15	4,92	1,07	51 646	103 254	0,05
D2D_200_Cap4	07:26	11:44	18:28	4,94	1,08	54 809	109 795	0,01

Tabelle 7: Reisezeiten und zurückgelegte Entfernungen der Rufbuslegs (Eigene Darstellung)

Betrachtet man nur alle Rufbusfahrten,²⁷ so fällt der geringe Schwankungsbereich der Ergebnisse für die einzelnen Planfälle auf (siehe Tabelle 7). Sowohl die mittleren Wartezeiten t_{avg}^{wait} als auch das 95%-Quantil der Wartezeiten t_{p95}^{wait} und die mittleren Rufbusreisezeiten t_{avg}^r unterscheiden sich nur um wenige Sekunden. Dies kommt vermutlich

²⁶Von den insgesamt 102 691 gemessenen Wegen in den Planfällen D2D_120_Cap8, D2D_150_Cap8, D2D_150_Cap4 und D2D_200_Cap4 und dem Nullfall verbleiben so 93 805 Messwerte in der Auswertung.

²⁷Es werden alle durchgeführten Rufbusfahrten betrachtet, auch die Fahrten, welche aufgrund der zuvor für die Auswertung der Gesamtreisezeiten beschriebenen Gründe dort aus der Wertung ausgeschlossen wurden. Je nach Planfall schwankt die Anzahl aller durchgeführten Rufbusfahrten um etwa 18 000.

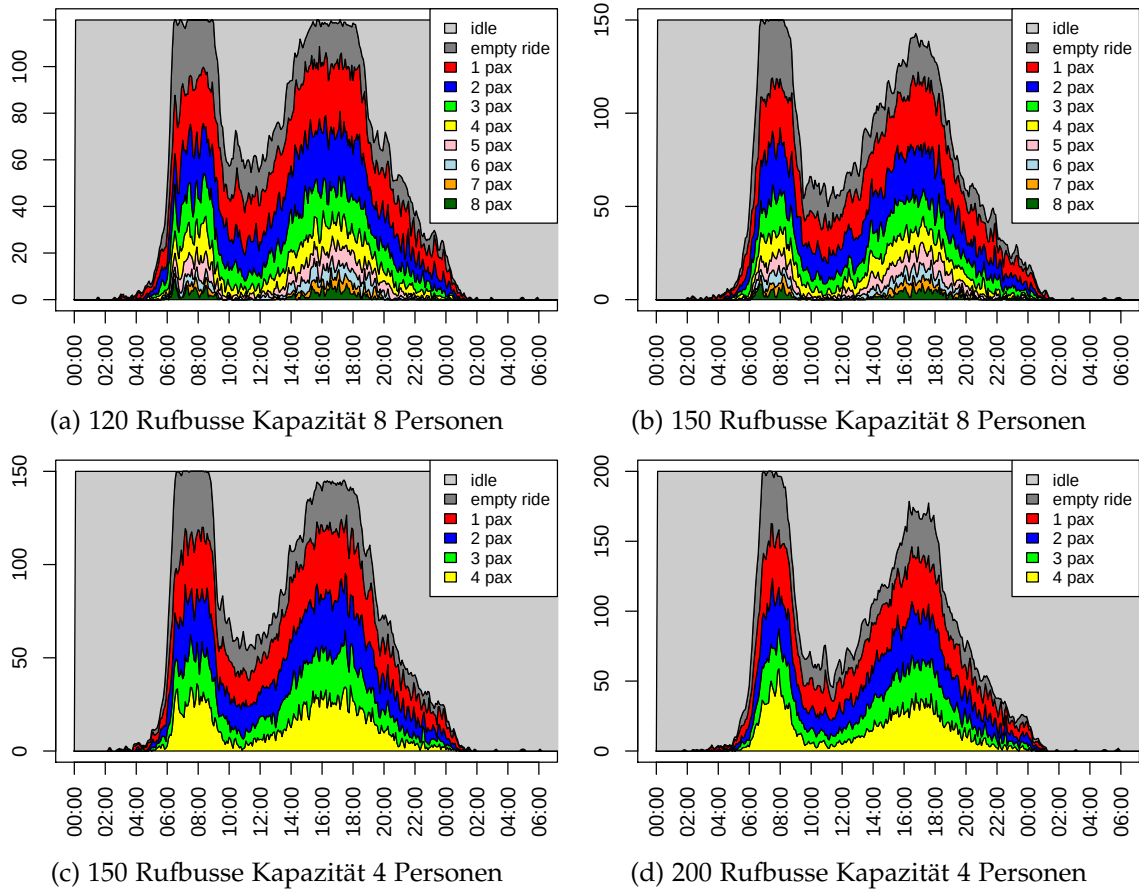


Abbildung 10: Fahrzeugauslastung in den ausgewählten Planfällen (eigene Darstellung)

durch die eingesetzten zeitlichen Qualitätskriterien α , β und t_{max}^{wait} zu Stande, welche für alle Planfälle identisch sind (siehe Kapitel 3.1). Bietet die Fahrzeugflotte nicht genügend Kapazität, so können diese Qualitätskriterien nicht erfüllt werden und es werden Fahrten abgelehnt. Bietet die Flotte dagegen eine übermäßig große Kapazität, so versucht der Tourenplanungsalgorithmus die Fahrten auf wenige stark genutzte Fahrzeuge zu konzentrieren und die restlichen Fahrzeuge abzustellen (siehe Planfall mit 1000 Fahrzeugen in Abbildung 7). Deshalb unterscheiden sich die Planfälle vor allem in ihren Fahrtwunschrichtbedienungsraten ρ und weniger in den erzielten Rufbusreisezeiten.

Trotzdem gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen den Planfällen mit Achtsitzern und denen mit Viersitzern. Erwartungsgemäß fallen bei den Achtsitzern größere Umwege an, um mehr Fahrten zu bündeln. Dadurch steigt die Fahrzeit im Rufbus an und nur entsprechend geringere Wartezeiten können zugelassen werden, um trotzdem das Qualitätskriterium maximale Rufbusreisezeit t_{max}^r zu halten. Deshalb ergeben sich rund 40 s niedrigere mittlere Wartezeiten t_{avg}^{wait} relativ zu den Viersitzern. Durch die stärkere Bündelung der Fahrten ist dafür die von den Achtsitzern zurückgelegte Fahrleistung d^T (Fahrtstrecke der gesamten Flotte) geringer als die der Viersitzer (siehe



Abbildung 11: Mittelwert (rot), Median (blau) sowie 5%-Quantil (grün) und 95%-Quantil (gelb) der Wartezeiten im Tagesverlauf für den Planfall D2D_200_Cap4 (eigene Darstellung)

Tabelle 7).

Die Verringerung der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge zur Effizienzsteigerung wird noch einmal deutlich, wenn man die Fahrzeugauslastung betrachtet (siehe Abbildung 10). Nur in den Spitzenstunden werden nahezu alle Fahrzeuge eingesetzt. In der Mittagszeit fällt dagegen die Anzahl der tatsächlich in Betrieb stehenden Rufbusse auf rund 60 und passt sich damit der Anzahl der Fahrtwünsche an, welche von etwa 950 zwischen 6:30 und 7:00 Uhr auf rund 250 zwischen 10:30 und 11:00 fällt (siehe Abbildung 12). Dagegen bleiben der Mittelwert, der Median und das 95%-Quantil der Wartezeit nahezu konstant (siehe Abbildung 11). Dabei liegt das 95%-Quantil der Wartezeit nahe der maximal zulässigen Wartezeit von 12 min. Das zulässige Maximum wird also auch in Schwachlastzeiten ausgeschöpft, um den Fahrzeugeinsatz zu reduzieren.

Selbst in Schwachlastzeiten ist noch ein signifikanter Anteil der Fahrzeuge mit drei oder mehr Personen besetzt und fast im gesamten Tagesverlauf sind zu jeder Zeit mehr Rufbusse mit mehreren Personen besetzt als nur mit einer Person. Sogar in den frühen Morgenstunden und am Abend gelingt dem Tourenplanungsalgorithmus eine Bündelung von Fahrten und der Einsatz von geteilten Fahrzeugen mit einer Kapazität von zwei oder mehr Personen ist sinnvoll. Dagegen fällt in den Planfällen mit Achtsitzern

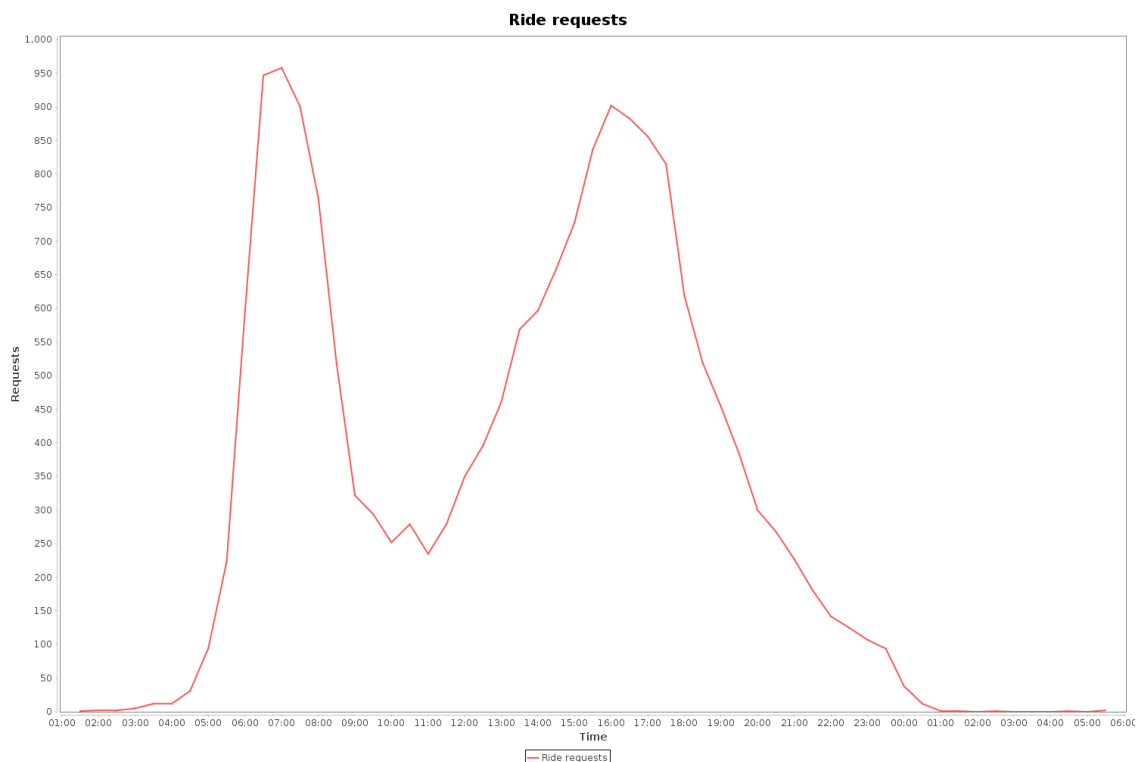


Abbildung 12: Anzahl der Rufbus-Fahrt-Bestellungen im Tagesverlauf für den Planfall D2D_200_Cap4 (eigene Darstellung)

auf, dass diese nur in den Spitzenzeiten von etwa 6:00 bis 9:00 Uhr und circa 14:00 bis 19:00 Uhr signifikant ihren Größenvorteil nutzen können. Vielleicht könnte man in weiteren Studien gemischte Flotten aus Vier- und Achtsitzern testen, wobei die Achtsitzer nur in den Spitzenzeiten zum Einsatz kommen.

Die mittleren Wartezeiten von rund sieben Minuten erscheinen im Vergleich recht hoch: In den Simulationen in Bischoff u. a. (2017) ergaben sich Werte um circa vier Minuten (siehe Tabelle 3). Ähnlich dazu sind die mittleren Wartezeiten, die Uber-Taxis in Philadelphia im Jahr 2016 erreicht haben: unter drei Minuten im Stadtzentrum und drei bis fünf Minuten in den restlichen Bezirken.²⁸ In Bischoff u. a. (2017) liegt die Erklärung jedoch auf der Hand: Die Qualitätskriterien α , β und t_{max}^{wait} sind strenger gewählt und zudem ist die Fahrzeugflotte sehr großzügig dimensioniert, sodass selbst in der Spitzenstunde über drei Viertel aller Fahrzeuge ungenutzt bleiben. Durch die große Fahrzeuganzahl steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich bereits ein Fahrzeug in der Nähe befindet. Die niedrigen Wartezeiten bei Uber in Philadelphia lassen sich möglicherweise ebenfalls über eine überdimensionierte Fahrzeugflotte sowie darüber hinaus über vermutlich andere Tourenplanungsalgorithmen mit anderen Qualitätskriterien erklären.

Insgesamt bleibt der Eindruck, dass in der DRT-Contribution die Rufbusreisezeiten nur

²⁸Vgl. Laughlin (2017).

relativ geringfügig von der eingesetzten Fahrzeugflotte (Anzahl und Kapazität je Fahrzeug) beeinflusst werden und sich vielmehr direkt aus der Wahl der Parameter α , β und t_{max}^{wait} ergeben. Die Flottengröße wirkt dagegen auf die Nichtbedienungsrate ρ .

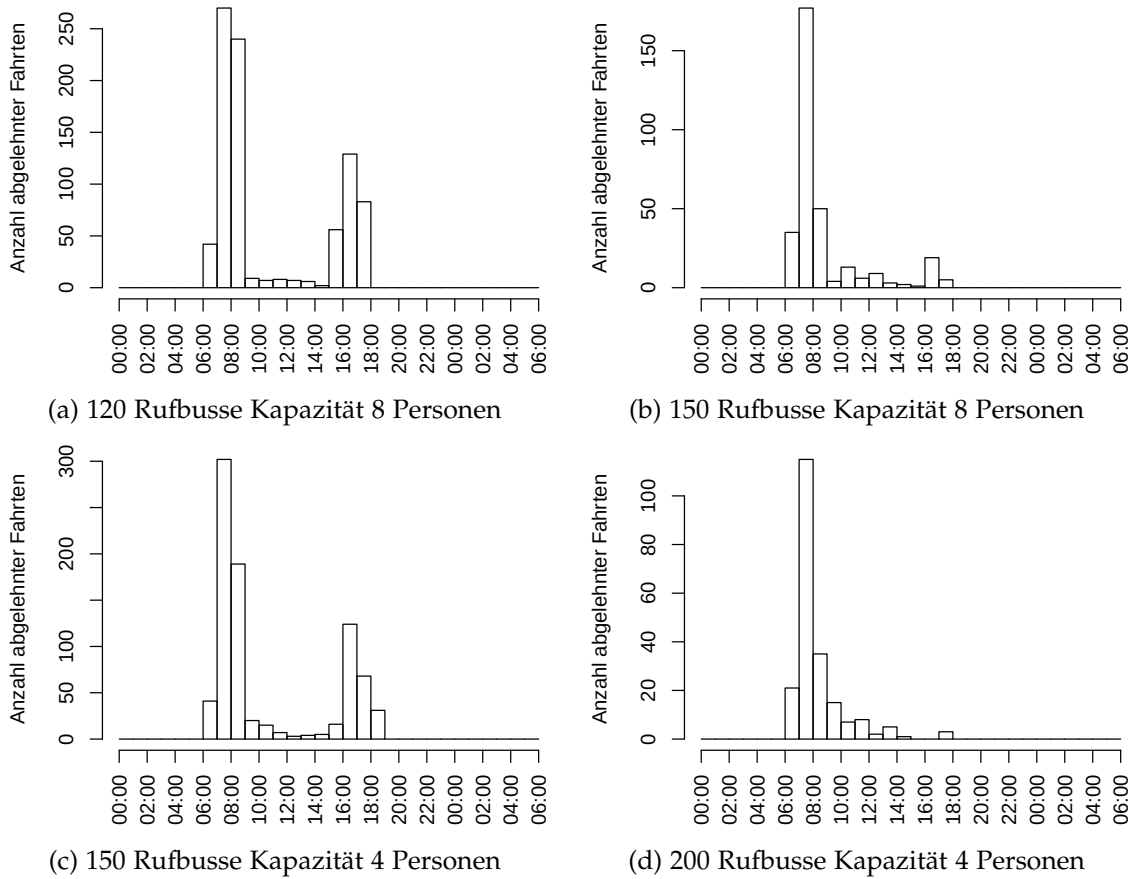


Abbildung 13: Abgelehnte Fahrtwünsche im Tagesverlauf in den ausgewählten Planfällen (eigene Darstellung)

In Abbildung 13 ist die Verteilung der abgelehnten Fahrtwünsche über den Tag dargestellt. Nicht bediente Fahrtwünsche treten zwar gehäuft in den Hauptverkehrszeiten auf. Jedoch gibt es auch einzelne abgelehnte Fahrtwünsche in den Schwachlastzeiten. Insofern kann das knappe Dimensionieren der Fahrzeugflotte nicht alle unbedienten Fahrtwünsche erklären. Vielmehr stellt das Fehlen einer Relocation-Strategie eine weitere Ursache dar.

Dies zeigt sich insbesondere beim Planfall D2D_150_Cap4. Bei diesem werden in der nachmittäglichen Spitzenstunde von 16:00 bis 17:00 nicht alle 150 Fahrzeuge eingesetzt, obwohl im Planfall D2D_200_Cap4 zur gleichen Zeit über 170 Fahrzeuge eingesetzt werden und somit eine ausreichend hohe Nachfrage besteht (siehe Abbildung 10). In der Abbildung 15 im Anhang ist erkennbar, dass die meisten abgelehnten Fahrten im Zentrum von Tegel beginnen sollten, die meisten ungenutzten Fahrzeuge sich jedoch in

den westlichen Randgebieten des Einsatzgebietes befinden. Dadurch können sie das Zentrum von Tegel nicht innerhalb der zulässigen maximalen Reisezeit erreichen. Nur wenn ein Fahrtwunsch in der Gegenrichtung bedient wird, kehrt ein Fahrzeug nach Tegel zurück und kann wieder vier Personen ab Tegel befördern. Werden dagegen Achtsitzer eingesetzt, reicht ein Fahrtwunsch Richtung Tegel aus, um in Tegel nicht nur vier, sondern acht Sitzplätze bereitzustellen. Dies könnte erklären, warum im Planfall D2D_120_Cap8 auch in der nachmittäglichen Hauptverkehrszeit alle Fahrzeuge im Einsatz sind.

Planfall	d_{gesamt}^T [km]	d_{mittel}^T [km]	d^E [km]	e^D	d^U [km]	λ
D2D_120_Cap8	44 684	372,367	7 452	0,17	105 268	0,53
D2D_150_Cap8	46 454	309,694	7 769	0,17	111 023	0,52
D2D_150_Cap4	51 646	344,303	9 496	0,18	103 254	0,61
D2D_200_Cap4	54 809	274,046	10 110	0,18	109 795	0,61

Tabelle 8: Fahrleistung der Rufbusse pro Betriebstag (Eigene Darstellung)

Abschließend soll die Fahrleistung der Rufbusse aus Betreibersicht beleuchtet werden. Dazu wird der Anteil der Leerfahrten an der Fahrleistung e^D und das in Bischoff u. a. (2017) eingeführte Maß λ berechnet. λ bezeichnet das Verhältnis zwischen der von den Fahrzeugen insgesamt erbrachten Fahrleistung und der Summe der von den Agenten angefragten Beförderungsleistung:

$$\lambda = \frac{d^T}{\sum_{r \in N} d_r^{direct}}$$

Für ungeteilte Fahrten ist λ bei privaten Pkw ohne Umwegfahrten gleich eins und für alle ungeteilten Taxifahrten immer größer eins, da Leerfahrten auftreten. Dagegen ist bei geteilten Fahrten $\lambda < 1$ möglich und sollte angestrebt werden.²⁹

In allen betrachteten Planfällen ist λ deutlich kleiner als eins, das heißt es konnten viele Fahrten gebündelt werden, ohne große Umwege oder Leerfahrten in Kauf nehmen zu müssen (siehe Tabelle 8). Dabei weisen die beiden Planfälle mit Achtsitzern naturgemäß kleinere e^D und λ auf als die Planfälle mit Viersitzern, da mehr Fahrten gebündelt werden können und müssen, um die Nachfrage zu bewältigen. Im Vergleich mit den Ergebnissen von Bischoff u. a. (2017) liegt der Anteil der Leerfahrten mit 0,17 bzw. 0,18 doppelt so hoch, da zwar die mittlere Umwegstrecke je bedientem Fahrtwunsch etwas geringer ausfällt, jedoch die Fahrten insgesamt kürzer sind. Zudem ist die Flotte knapper dimensioniert, sodass sich vermutlich das nächste verfügbare Fahrzeug im Mittel weiter entfernt befindet und eine längere Leerfahrt absolvieren muss. Dagegen fällt λ mit 0,52 bis 0,61 deutlich geringer und damit günstiger aus als im Szenario in Bischoff

²⁹Vgl. Bischoff u. a. (2017), S. 3.

u. a. (2017), da offensichtlich mehr Fahrten gebündelt werden konnten. Vermutlich liegt dies am kleineren Einsatzgebiet, in dem viele Fahrten in einem kleinen Teilgebiet, dem Zentrum von Tegel, beginnen oder enden.

In Abbildung 16 im Anhang sind die tatsächlich gefahrenen Strecken in Relation zur direkten Fahrstrecke dargestellt. Für die meisten Rufbusfahrten ist die tatsächlich zurückgelegte Strecke maximal doppelt so lang wie der direkte Weg. Es gibt jedoch auch einige Ausreißer, bei denen einer direkten Distanz von unter 2 000 m eine tatsächlich gefahrene Distanz von über 10 000 m gegenüber steht. Ähnlich verhält es sich bei dem Verhältnis von direkten zu tatsächlichen Fahrzeiten (siehe Abbildung 17), wo in den meisten Fällen die tatsächliche Fahrzeit weniger als dem 2,5-fachen der direkten Fahrzeit entspricht. Da es sich um Punktwolken mit zahlreichen Messwerten handelt, lässt sich nur schwer erkennen wie häufig solche großen Umwege tatsächlich vorkommen. Insofern sind die in Tabelle 7 gegebenen Mittelwerte aussagekräftiger. Es gibt jedoch einige Ausreißer, wie tatsächlich gefahrene Fahrzeiten über 5 000 s und Strecken über 20 000 m, das heißt über 83 Minuten bzw. 20 km. In Anbetracht der maximalen direkten Fahrstrecken von rund 1000 s bzw. 8 500 m erscheinen diese Ausreißer sehr groß.

Auch beim Vergleich der geplanten mit den tatsächlichen Wartezeiten (siehe Abbildung 18) tritt bei den meisten Fahrten maximal eine Verdopplung auf. Es gibt jedoch auch hier Ausreißer, die einer Verzehnfachung entsprechen. Zudem treten tatsächliche Wartezeiten größer als eine Stunde auf und damit weit mehr als die in der Planung zulässigen 12 Minuten. Dies lässt sich am ehesten noch durch Staus erklären.

5.3 Berechnung der Kosten

Um die verschiedenen Planfälle miteinander vergleichen zu können, benötigt man Angaben zu den Betriebskosten. Dabei besteht das Problem, dass derartige autonom fahrende Pkw und Busse noch nicht existieren. Bis autonome Fahrzeuge ihre Einsatzreife erlangen kann sich außerdem die Antriebstechnologie ändern, z.B. könnten batteriegepeiste Elektroautos den herkömmlichen Dieselantrieb verdrängt haben. Dadurch entstehen große Unsicherheiten bei den Kostenannahmen.

Während Anschaffungskosten und -wartungskosten anhand heute existierender Fahrzeugmodelle abgeschätzt werden können, können Reinigungskosten, Kosten für Aufsichtspersonal und damit verbundene Overheadkosten nur schwer abgeschätzt werden. Durch das Fehlen des Fahrers verringert sich die soziale Kontrolle, sodass möglicherweise Vandalismus und Verunreinigungen zunehmen. Zudem wird möglicherweise zusätzliches Aufsichtspersonal benötigt, z.B. falls Fahrgäste andere Fahrgäste belästigen oder die Türen der autonomen Fahrzeuge blockieren. Deshalb sollen hier nur Anschaffungs-, Energie- und Wartungskosten berücksichtigt werden.

5.3.1 Kosten der Rufbusse

Prinzipiell kommen als Beispiele für die Rufbusse Pkw-Modelle in Frage, die zur Zeit als Taxi genutzt werden. Allerdings müsste zumindest ein Teil der autonomen Rufbusse auch rollstuhlgerecht sein, was normale als Taxi eingesetzte Pkw im allgemeinen nicht sind. Dem Rollstuhlfahrer müsste ermöglicht werden ohne fremde Hilfe ein- und auszusteigen. Dadurch werden sich die autonomen Rufbusse von den heutigen Pkw zusätzlich unterscheiden, sodass ein weiterer Unsicherheitsfaktor bei den Kostenannahmen besteht.

Da Elektroautos noch relativ neu auf dem Markt sind und noch nicht in großen Serien produziert werden (vor allem nicht als Achtsitzer), werden für die Kostenparameter herkömmliche Dieselfahrzeuge herangezogen. Als Viersitzer das Modell Skoda Octavia Combi 1.6 TDI (5E) und als Achtsitzer das Modell Ford Transit / Tourneo Custom 2.0 TDCI (FAC). Es wird eine Betriebsreserve von 10 % der Fahrzeuge angesetzt, sodass sich die tatsächliche Fahrleistung je Fahrzeug geringfügig reduziert.

Planfall	Fahrzeugtyp	Anzahl	Fahrleistung pro Tag [km]	Fahrleistung pro Jahr [km]
D2D_120_Cap8	Ford Transit	132	338,515	123 642,6
D2D_150_Cap8	Ford Transit	165	281,54	102 832,5
D2D_150_Cap4	Skoda Octavia	165	313,003	114 324
D2D_200_Cap4	Skoda Octavia	220	249,1327	90 995,73

Tabelle 9: Fahrleistung der Rufbusse (inklusive 10 % Fahrzeugreserve) pro Betriebstag (Eigene Darstellung)

Fahrleistung [km/a]	Versicherung [€/a]	KFZ Steuer [€/a]	Kraftstoff [€/a]	Wartung [€/a]	Σ Betriebskosten [€/a]
100 000 ^a	1 830	278	7 524	2 000	11 632
102 832,5 ^b	1 830	278	7 737	2 057	11 902
110 000 ^a	1 830	278	8 276	2 200	12 584
120 000 ^a	1 830	278	9 029	2 400	13 537
123 642,6 ^b	1 830	278	9 302	2 473	13 883

Tabelle 10: Betriebskosten pro Jahr und je Rufbus der Kapazität 8 Personen (Ford Transit / Tourneo Custom 2.0 TDCI (FAC) (Baujahr ab 2016))

^a Vgl. o.A. (2017e).

^b Interpolation

(Eigene Darstellung)

Die jährlichen Kapitalkosten der Rufbusse K_{Kapital} sollen nun nach Frank u. a. (2008) berechnet werden. Alle Parameter wurden soweit nicht anders angegeben von Frank u. a. (2008) übernommen. Der Restwert R eines Fahrzeuges wird abweichend mit 0 und nicht 5 % angenommen. Der Zinssatz p lässt sich nur schwer abschätzen, da weder bekannt ist wann genau autonome Fahrzeuge marktreif sein werden noch welcher Zinssatz dann

Fahrleistung [km/a]	Versicherung [€/a]	KFZ Steuer [€/a]	Kraftstoff [€/a]	Wartung [€/a]	Σ Betriebskosten [€/a]
90 995,73 ^b	1 261	152	3 838	2 548	7 799
100 000 ^a	1 261	152	4 218	2 800	8 431
110 000 ^a	1 261	152	4 640	3 080	9 133
114 324 ^b	1 261	152	4 822	3 201	9 436
120 000 ^a	1 261	152	5 062	3 360	9 835

Tabelle 11: Betriebskosten pro Jahr und je Rufbus der Kapazität 4 Personen (Skoda Octavia Combi 1.6 TDI (5E) (Baujahr ab 2014))

^a Vgl. o.A. (2017e).

^b Interpolation

(Eigene Darstellung)

herrschen wird. Als Kompromiss zwischen der derzeitigen Niedrigzinsphase und der Angabe 5 % nach Frank u. a. (2008) wird ein Zinssatz von 3 % gewählt. Die Lebensdauer eines Rufbusses wird mit 5 Jahren angesetzt, da die Berechnung auf Pkw beruht, die tendenziell auf eine geringere Laufleistung ausgelegt sind als etwa Lkw oder Linienbusse. Der Kaufpreis eines Ford Transit / Tourneo Custom 2.0 TDCI (FAC) beträgt 28 211,75€ und der eines Skoda Octavia Combi 1.6 TDI (5E) 18 845 €. ³⁰ Die Berechnung wird im folgenden beispielhaft für den Planfall D2D_200_Cap4 durchgeführt, die Ergebnisse für die anderen Planfälle befinden sich in Tabelle 12.

$$K_{\text{Kapital}} = n_{\text{Fzg}} * \left(\frac{(K_{\text{Anschaffung}} - R) * (1 + p)^{ND} * p}{(1 + p)^{ND} - 1} + R * p \right)$$

$$n_{\text{Fzg}} = 220 \text{ (Anzahl Fahrzeuge)}$$

$$K_{\text{Anschaffung}} = 18845\text{€ (Anschaffungskosten je Rufbus)}$$

$$R = 0 \text{ (Restwert je Fahrzeug)}$$

$$p = 0,03/a \text{ (Zinssatz pro Jahr)}$$

$$ND = 5a \text{ (Nutzungsdauer in Jahren)}$$

$$K_{\text{Kapital}} = 220 * \left(\frac{(18845 - 0) * (1 + 0,03)^{12} * 0,03}{(1 + 0,03)^{12} - 1} + 0 * 0,03 \right)$$

$$K_{\text{Kapital}} = 822978\text{€}/a$$

Die Betriebskosten, die Kapitalkosten und deren Summe (Gesamtkosten) sind für die einzelnen Planfälle in Tabelle 12 dargestellt. Der Planfall D2D_150_Cap4 ist mit Abstand am günstigsten, danach folgt bereits der andere Planfall mit Viersitzern D2D_200_Cap4. Alle Planfälle mit Achtsitzern sind deutlich teurer als diese beiden Planfälle mit Viersitzern.

³⁰Vgl. o.A. (2017d).

Planfall	Fahrzeugtyp	Betriebskosten [€/a]	Kapitalkosten [€/a]	Gesamtkosten [€/a]
D2D_120_Cap8	Ford Transit	1 832 556	813 142	2 645 698
D2D_150_Cap8	Ford Transit	1 963 830	1 016 428	2 980 258
D2D_150_Cap4	Skoda Octavia	1 556 940	678 957	2 235 897
D2D_200_Cap4	Skoda Octavia	1 715 780	905 276	2 621 056

Tabelle 12: Jährliche Kosten der Rufbusse (Eigene Darstellung)

5.3.2 Kosten der Linienbusse

Als zu ersetzende Linienbusse werden Scania Gelenkbusse angenommen, wie sie die BVG ab dem Jahr 2014 in Betrieb genommen hat. Deren Kaufpreis beträgt 321 000 € je Stück.³¹ In den Fahrplandaten sind sowohl Gelenkbusse als auch Doppeldecker enthalten (im Falle der Linie 324 sogar ein Minibus), vereinfachend wird allerdings nur von Gelenkbussen ausgegangen.

Linie	Takt HVZ [min] [min]	Fahrzeitverkürzung pro Richtung [min] pro Richtung [min]	Anzahl eingesparte Fahrzeuge
124	20 bzw. 10 ^a	19 bzw. 11 ^a	2 bzw. 1-2 ^a
133	10	13	3
222	10 ^b	11	3
324	30	9	1

Tabelle 13: Anzahl der in den Planfällen eingesparten Linienbusse

^a: U Alt-Tegel - S Heiligensee / Ruppiner Chaussee 10-min-Takt;

^b: zusätzliche Verstärkerfahrten

(Eigene Darstellung)

Die Anzahl der gegenüber dem Nullfall eingesparten Gelenkbusse wird anhand der Taktraten in der Hauptverkehrszeit und der Fahrzeitverkürzung überschlagen (siehe Tabelle 13). Im Falle der Linie 124 ist bei einer Fahrzeitverkürzung von 11 min nicht klar, ob dies zur Reduktion des Fahrzeugeinsatzes um ein oder um zwei Busse genügt. Es wird zur sicheren Seite entschieden, sodass nur von einem Fahrzeug ausgegangen wird. Damit ergibt sich eine Summe von zehn eingesparten Linienbussen.

Linie	Fahrleistung im Nullfall [km]	Fahrleistung in den Planfällen [km]	Einsparung [km]
124	3 687	2 345	1342
133	2 442	1 656	786
222	2 905	1 657	1248
324	231	0	231
Σ	9265	5658	3358

Tabelle 14: In den Planfällen eingesparte Fahrleistung pro Tag der Linienbusse (Eigene Darstellung)

³¹Vgl. Kurpjuweit (2017).

Die Fahrleistung der Linienbusse wurde anhand des Fahrplans berechnet und ist in Tabelle 14 dargestellt. Daraus ergibt sich eine Jahresfahrleistung von $3358 \text{ km} * 365,25 = 1226510 \text{ km}$. Vereinfacht betrachtet entspricht dies im Mittel 122 651 km je eingespartem Gelenkbus.

Linie	Entfernung (circa) [km]	Fahrzeitverkürzung pro Richtung [min]	Geschwindigkeit [km/h]
124	6,4	19	25,3
133	5,8	13	26,8
222	8,0	11	34,9
324	3,0	9	20,0

Tabelle 15: Mittlere Fahrplangeschwindigkeit der Linienbusse (Eigene Darstellung)

Die jährlichen Kapital-, Versicherungs-, Antriebs-, Instandhaltungs- und Reifenkosten der Linienbusse K_{Kapital} , $K_{\text{Versicherung}}$, K_{Antrieb} , $K_{\text{Instandhaltung}}$ und K_{Reifen} sollen nun nach Frank u. a. (2008) berechnet werden. Alle Parameter wurden soweit nicht anders angegeben von Frank u. a. (2008) übernommen. Wie bei den Rufbussen wird der Restwert R eines Fahrzeuges abweichend zu 0, die Betriebsreserve zu 10 % und der Zinssatz p zu 3 % angesetzt. Die mittleren Fahrplangeschwindigkeiten v_{Fahrplan} wurden in Tabelle 15 je Linie berechnet. In Anbetracht der geringen Fahrtenzahl wird die Linie 324 vernachlässigt und nur der Mittelwert der Linien 124, 133 und 222 bestimmt. Dieser beträgt rund 29 km/h.

$$K_{\text{Kapital}} = n_{\text{Fzg}} * \left(\frac{(K_{\text{Anschaffung}} - R) * (1 + p)^{ND} * p}{(1 + p)^{ND} - 1} + R * p \right)$$

$$n_{\text{Fzg}} = 11 \text{ (Anzahl Fahrzeuge)}$$

$$K_{\text{Anschaffung}} = 321000 \text{€ (Anschaffungskosten je Gelenkbus)}$$

$$R = 0 \text{ (Restwert je Gelenkbus)}$$

$$p = 0,03/a \text{ (Zinssatz pro Jahr)}$$

$$ND = 12a \text{ (Nutzungsdauer in Jahren)}$$

$$K_{\text{Kapital}} = 11 * \left(\frac{(321000 - 0) * (1 + 0,03)^{12} * 0,03}{(1 + 0,03)^{12} - 1} + 0 * 0,03 \right)$$

$$K_{\text{Kapital}} = 354731 \text{€}/a$$

$$K_{\text{Versicherung}} = n_{\text{Fzg}} * k_{\text{Versicherung}}$$

$$n_{\text{Fzg}} = 11 \text{ (Anzahl Fahrzeuge)}$$

$$k_{\text{Versicherung}} = 2200\text{€}/a \text{ (Jährliche Versicherungskosten je Gelenkbus)}$$

$$K_{\text{Versicherung}} = 11 * 2200\text{€}/a$$

$$K_{\text{Versicherung}} = 24200\text{€}/a$$

$$K_{\text{Antrieb}} = \frac{V_{\text{Mittel}}}{100} * l_{\text{Fahrplan}} * k_{\text{Antriebskosten}}$$

$$v_{\text{Fahrplan}} = 29\text{km}/h$$

$$V_{\text{Mittel}} = \max(45; 71,7 - 0,83 * v_{\text{Fahrplan}})l/100\text{km} = 47.63l/100\text{km}$$

(mittlerer Treibstoffverbrauch Gelenkbus Stadtverkehr)

$$l_{\text{Fahrplan}} = 1226510\text{km}/a \text{ (Jährliche Fahrplankilometer)}$$

$$k_{\text{Antriebskosten}} = 1,134\text{€}/l \text{ (Kostensatz je Liter Diesel (inkl. Schmierstoffe))}^{32})$$

$$K_{\text{Antrieb}} = \frac{47,63l}{100} * 1226510\text{km}/a * 1,134\text{€}/l$$

$$K_{\text{Antrieb}} = 662468\text{€}/a$$

$$K_{\text{Instandhaltung}} = w * a * k_{\text{Personal, Instandhaltung}} * f_g * F_G * (0,35 + 0,65 * \frac{N}{60000})$$

$$w = 1 \text{ (Personal-Kennzahl nach VDV 881)}$$

$$a = 1,3 \text{ (Faktor zur Berücksichtigung von Sonderausstattungsmerkmalen)}$$

$$k_{\text{Personal, Instandhaltung}} = 40000\text{€}/\text{Mann und Jahr (Personalkostensatz)}$$

$$f_g = 0,82 \text{ (Faktor zur Berücksichtigung der Fahrplangeschwindigkeit } v_{\text{Fahrplan}} = 29\text{km/h})$$

$$n_{\text{Fzg}} = 11 \text{ (Anzahl Fahrzeuge)}$$

$$A_{\text{Gelenk}} = 1 \text{ (Anteil von Gelenkbussen)}$$

$$F_G = n_{\text{Fzg}} * A_{\text{Gelenk}} * 1,3 = 11 * 1 * 1,3 = 14,3$$

(Anzahl größennormierte Fahrzeuge)

$$N = 111500,9\text{km} \text{ (Jahreslaufleistung je Fahrzeug)}$$

$$K_{\text{Instandhaltung}} = 1 * 1,3 * 40000\text{€} * 0,82 * 14,3 * (0,35 + 0,65 * \frac{111500,9}{60000})$$

$$K_{\text{Instandhaltung}} = 949948,7\text{€}/a$$

$$K_{\text{Reifen}} = k_{\text{Reifen}} * l_{\text{Fahrplan}}$$

$$k_{\text{Reifen}} = 0,12\text{€}/\text{km} \text{ (Kosten für das Reifenmanagement je Fahrplankilometer bei } v_{\text{Fahrplan}} = 29\text{km/h})$$

$$l_{\text{Fahrplan}} = 1226510\text{km}/a \text{ (Jährliche Fahrplankilometer)}$$

$$K_{\text{Reifen}} = 0,12\text{€}/\text{km} * 1226510\text{km}/a$$

$$K_{\text{Reifen}} = 147181\text{€}/a$$

Insgesamt ergibt sich damit bei den Kapital- und Betriebskosten der Linienbusse eine Einsparung von 1 740 197 € pro Jahr:

$$K_{\text{gesamt, Linienbusse}} = K_{\text{Kapital}} + K_{\text{Versicherung}} + K_{\text{Antrieb}} + K_{\text{Instandhaltung}} + K_{\text{Reifen}}$$

$$K_{\text{gesamt, Linienbusse}} = 354731\text{€}/a + 22000\text{€}/a + 662468\text{€}/a + 949948,7\text{€}/a + 147181\text{€}/a$$

$$K_{\text{gesamt, Linienbusse}} = 2138529\text{€}/a$$

Fahrerkosten wurden nicht angesetzt, denn sobald autonom fahrende Rufbusse

Marktreife erlangt haben, werden wahrscheinlich auch fahrerlose Gelenkbusse verfügbar sein.

5.4 Bewertung der Planfälle

Abschließend sollen nun die Planfälle bewertet und mit dem Nullfall verglichen werden. Dabei gehen Reisezeitverkürzungen und nicht bediente Fahrten als (ggf. negative) Nutzen ein und werden den im Kapitel 5.3 berechneten Kosten gegenüber gestellt. Weitere mögliche Nutzen etwa aus der Änderung des Energieverbrauchs und der Emissionen werden nicht betrachtet.³³ Bereits die Kostenberechnung ist mit großen Unsicherheiten behaftet, weil autonome Rufbusse noch nicht marktreif sind. Deshalb sind alle nachfolgenden Ergebnisse mit großer Vorsicht zu betrachten und eher als grobe Tendenzen zu interpretieren

Die abgewiesenen Fahrtwünsche gehen als negativer Nutzen in die Bewertung mit ein. Das Abweisen eines Fahrtwunsches bedeutet zunächst, dass dieser nicht innerhalb der zeitlichen Qualitätskriterien (siehe Kapitel 3.1) bedient werden kann. Unter diesen Kriterien ist unter anderem eine maximale Wartezeit von 12 min. In der Realität würden die abgewiesenen Kunden vermutlich in kurzen Zeitabständen immer wieder einen Rufbus bestellen, bis sie bedient werden, sich für ein anderes Verkehrsmittel entscheiden oder die Fahrt abbrechen. Dabei würden eventuell nicht alle der zunächst abgewiesenen Fahrtwünsche bei der erneuten Bestellung bedient werden. Falls sie bedient werden besteht die Möglichkeit, dass in der Folge andere Fahrtwünsche abgelehnt werden müssten. Die Simulation bildet dieses Verhalten leider nicht ab, da sie nicht bediente Agenten aus der Simulation entfernt. Damit die abgewiesenen Fahrten trotzdem in die Bewertung mit eingehen, wird im folgenden angenommen, dass in Anlehnung an die maximale Wartezeit von 12 min eine abgewiesene Fahrt den gleichen Nutzen wie eine 12-minütige Reisezeitverlängerung hat.

Bei der Berechnung des Nutzens aus der Reisezeitverkürzung geht nur die gemessene Reisezeitverkürzung inklusive der vollen Wartezeit auf den Rufbus ein. Da der Rufbus die Fahrgäste an der Haustür abholt, wäre es denkbar, die Wartezeit im Haus von der Reisezeit abzuziehen, weil diese Wartezeit am letzten Aktivitätenort zur Verlängerung dieser Aktivität genutzt werden könnte. Dadurch könnte das Fehlen der Möglichkeit zur Vorbestellung ausgeglichen werden. Allerdings beginnt nicht jede Rufbusfahrt an einem Ort, an dem eine echte Aktivität³⁴ ausgeführt wird. Wenn beispielsweise ein Agent von der U-Bahn in den Rufbus umsteigt, kann er die Wartezeit am U-Bahnhof nicht für eine im Tagesplan hinterlegte echte Aktivität nutzen.

Der Nutzen in einem Planfall besteht somit aus dem Nutzen der Reisezeitverkürzungen

³³Weitere Eigenschaften wie der Energieverbrauch lassen sich noch schlechter abschätzen

³⁴Mit echten Aktivitäten sind alle Aktivitäten außer „pt interaction“ gemeint.

U^r abzüglich dem negativen Nutzen aus nicht bedienten Fahrten U^b . Beide werden mit dem Zeitwert für ÖV-Fahrten aus dem Bundesverkehrswegeplan 2015 zu $u^t = 4,83\text{€}/h$ monetarisiert.³⁵

$$\begin{aligned}
 U^r &= \Delta t_{ges}^r * u^t \\
 U^b &= n^{Fahrten,abgewiesen} * 12min * u^t \\
 U^{Planfall} &= U^r + U^b \\
 U^{Planfall} &= \Delta t_{ges}^r * u^t - n^{Fahrten,abgewiesen} * 12min * u^t
 \end{aligned}$$

Planfall	$t_{ges,Tag}^r$ [h]	$\Delta t_{ges,Jahr}^r$ [h]	$n^{Fahrten,abgewiesen}$	U^r [€/a]	U^b [€/a]	$U^{Planfall}$ [€/a]
D2D_120_Cap8	16 268	-166 258	859	803 024	-302 875	500 149
D2D_150_Cap8	16 153	-208 287	324	1 006 027	-114 239	891 788
D2D_150_Cap4	16 257	-170 017	825	821 182	-290 887	530 295
D2D_200_Cap4	16 192	-194 045	212	937 237	-74 749	862 488
Nullfall	16 723	/	/	/	/	/

Tabelle 16: Jährliche Nutzen der Rufbusse (Eigene Darstellung)

In Tabelle 16 ist das Ergebnis der Nutzenberechnung dargestellt. Es zeigt sich der große Einfluss der nicht bedienten Fahrtwünsche auf den Gesamtnutzen. Die beiden Planfälle mit großzügig dimensionierter Fahrzeugflotte und dementsprechend geringer Zahl abgewiesener Fahrtwünsche (D2D_150_Cap8 und D2D_200_Cap4) weisen deutlich höhere Nutzen auf als die beiden anderen Planfälle.

Planfall	Gesamtkosten Planfall [€/a]	Differenz Gesamtkosten Planfall-Nullfall [€/a]
D2D_120_Cap8	2 645 698	507 169
D2D_150_Cap8	2 980 258	841 729
D2D_150_Cap4	2 235 897	97 368
D2D_200_Cap4	2 621 056	482 527

Tabelle 17: Jährliche Kostendifferenz Planfall-Nullfall (Eigene Darstellung)

Diesen Nutzen steht die Differenz der Gesamtkosten von den Planfällen zum Nullfall gegenüber (siehe Tabelle 17). Die Kosten steigen in allen Planfällen gegenüber dem Nullfall an, sodass der Betreiber kein Interesse an der Weiterverfolgung eines Rufbusbetriebes haben dürfte, sofern sich keine zusätzlichen Einnahmen etwa durch Subventionen oder Tarifzuschläge generieren lassen.³⁶ Lediglich im Planfall D2D_150_Cap4 ist der Kostenzuwachs vergleichsweise gering und entspricht nur etwa 4,6 % der Kosten

³⁵Vgl. Axhausen u. a. (2015), S. 116.

³⁶Da keine Änderung der Verkehrsmittelwahl in der Simulation zugelassen wurde, konnten Einnahmesteigerungen durch zusätzliche Fahrgäste nicht abgebildet werden.

Planfall	Nutzen [€/a]	Kosten [€/a]	NKD [€/a]	NKV [€/a]	ρ
D2D_120_Cap8	500 149	507 169	-7 020	0,99	0,05
D2D_150_Cap8	891 788	841 729	50 059	1,06	0,02
D2D_150_Cap4	530 295	97 368	432 927	5,45	0,05
D2D_200_Cap4	862 488	482 527	379 961	1,79	0,01

Tabelle 18: Jährliche Nutzen-Kosten-Differenzen (NKD) und Nutzen-Kosten-Verhältnisse (NKV) sowie die Fahrtwunschnichtbedienungsrate ρ (Eigene Darstellung)

im Nullfall. Dagegen beträgt die Kostensteigerung im Planfall D2D_150_Cap8 etwa 39 %. Bei der gegebenen Nachfrage im Untersuchungsgebiet lassen sich also keine Kostenreduktionen durch den Einsatz kleinerer Fahrzeuge realisieren. Vermutlich gelingt dies eher in Gebieten mit schwächerer Nachfrage.

Die zusätzlichen Kosten des Rufbusbetriebes könnten durch Tarifizuschläge finanziert werden, weil durch die Haustürbedienung und die freie Wahl der Abfahrtszeit mehr Komfort geboten wird. Einige bestehende Rufbusbetriebe in Deutschland erheben solche Zuschläge.³⁷ Da jedoch die einzige fahrkostenneutrale Alternative in Form der herkömmlichen Linienbusse eingestellt würde und somit ein Zwang zur Zahlung eines Zuschlages entstünde, könnten solche Zuschläge auf Akzeptanzprobleme stoßen.

Aus den Kostendifferenzen zum Nullfall lassen sich nun Nutzen-Kosten-Differenzen (NKD) und Nutzen-Kosten-Verhältnisse (NKV) berechnen (siehe Tabelle 18). In allen Planfällen außer D2D_120_Cap8 sind die NKD und das NKV größer 0 bzw. größer 1. Damit ist nur der Planfall D2D_120_Cap8 unwirtschaftlich. Allerdings ist das NKV im Planfall D2D_150_Cap8 sehr niedrig, sodass dieser nicht weiterverfolgt werden sollten. Der Planfall D2D_150_Cap4 sticht durch sein sehr hohes NKV von 5,45 hervor. Zudem ist dieser aus Betreibersicht sehr günstig, da sich die Kosten in diesem Planfall am wenigsten erhöhen. Allerdings weist er mit 0,05 den höchsten Anteil nicht bedienter Fahrtwünsche auf, wodurch die Akzeptanz durch die Kunden gefährdet sein kann. Außerdem ist die Kostenkalkulation mit starken Unsicherheiten behaftet, sodass dieses sehr hohe NKV nicht verlässlich ist.

Eine nur geringfügig geringere NKD weist der Planfall D2D_150_Cap8 auf. Dieser hat auch die niedrigste Nichtbedienungsrate ρ und kann dadurch eine höhere Akzeptanz bei den Kunden erreichen. Das NKV ist mit 1,79 akzeptabel.

Aus gesamtwirtschaftliche Sicht erscheinen beide Planfälle sinnvoll und könnten weiterverfolgt werden, sobald autonom fahrende Rufbusse marktreif sind. Bei der Entscheidung zwischen diesen beiden Planfällen muss zwischen den zu subventionierenden Kosten und der Akzeptanz durch die Kunden abgewogen werden, da mangelnde Ak-

³⁷Vgl. VDV (2009), S. 65ff.

zeptanz die Umsetzung des Projektes behindern und zu Fahrgastverlusten führen kann. Denkbar wäre zunächst nur 150 Viersitzer anzuschaffen (Planfall D2D_150_Cap4, mit Reserve 165 Fahrzeuge) und je nach Annahme des Angebots durch die Bevölkerung ggf. weitere Fahrzeuge zu ergänzen.

6 Fazit

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, den Ersatz der herkömmlichen Linienbusse durch Rufbusse in einem Stadtteil Berlins zu simulieren und zu bewerten. Rufbusse gehören zu den flexiblen Bedienungsweisen und sind weder an feste Linienverläufe noch an Fahrpläne oder feste Haltestellen gebunden und verkehren rein bedarfsabhängig von Haustür zu Haustür (siehe Kapitel 2).

Für die agentenbasierte Simulation wurde MATSim mit der DRT-Contribution und der AV-Contribution eingesetzt (siehe Kapitel 3). Letztere wurde erweitert, um den Betrieb der Rufbusse auf das Untersuchungsgebiet einzuschränken. Es wurden mehrere Planfälle definiert, die sich durch die Anzahl und die Kapazität der Rufbusse unterscheiden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass Fahrzeuge mit einer Kapazität von mehr als acht Personen nur sehr selten mit mehr als acht Personen besetzt sind. Deshalb wurden nur Planfälle mit Acht- und Viersitzern weiterverfolgt (siehe Kapitel 5.1).

Die Reisezeiten im Rufbus, das heißt die Summe aus Warte- und Fahrzeiten im Rufbus, unterscheiden sich nur geringfügig zwischen den verschiedenen Planfällen. Ursache hierfür ist die Implementation der Rufbusse in der DRT-Contribution (siehe Kapitel 3.1). Dieser versucht die Fahrzeugeinsatzzeiten zu minimieren und akzeptiert nur Fahrtwünsche, die innerhalb bestimmter zeitlicher Qualitätskriterien bedient werden können. Alle anderen Fahrtwünsche werden abgewiesen. Dadurch wird in Zeiten geringer Nachfrage der Fahrzeugeinsatz minimiert, anstatt weniger Fahrten zu bündeln und mithilfe der ungenutzten Fahrzeuge die Warte- und Fahrzeiten zu reduzieren. In Zeiten großer Nachfrage und bei zu knapp dimensionierten Fahrzeugflotten können die zeitlichen Qualitätskriterien nicht für alle Fahrtwünsche eingehalten werden, sodass Fahrten abgewiesen werden. Deshalb unterscheiden sich die Planfälle vor allem durch den Anteil der nicht bedienten Fahrtwünsche, während die Reisezeit direkt von der Wahl der zeitlichen Qualitätskriterien abhängt.

Betrachtet man Reiseketten über die Fahrt mit dem Rufbus hinaus, das heißt inklusive anschließender Fußwege und Fahrten im herkömmlichen ÖPNV, dann ergibt sich in den Planfällen nur eine geringe Gesamtreisezeitverkürzung gegenüber dem Nullfall ohne Rufbusse (siehe Kapitel 5.2). Die Summe der Fahr- und die Wartezeiten über die gesamte Reisekette steigt an, dieser Anstieg wird jedoch durch verringerte Gehzeiten überkompensiert. Die Haustürbedienung verringert einerseits drastisch Fußwege und Gehzeiten, führt jedoch andererseits zu größeren Umwegfahrten und somit zu höheren Fahrzeiten. Zudem sind die Wartezeiten auf die Rufbusse recht hoch, da keine Vorbestellung möglich ist und der Tourenplanungsalgorithmus den Fahrzeugeinsatz und damit die Kosten optimiert.

Die Berechnung der Betriebs- und Kapitalkosten unterliegt starken Unsicherheiten, da

noch keine autonomen Fahrzeuge marktreif sind und somit deren Kostensätze nur anhand heute produzierter Pkw und Vans abgeschätzt werden können. Vergleicht man autonome Linienbusse und autonome Rufbusse, so fällt der Betrieb der Rufbusse je nach Planfall zwischen ca. 5 % und 39 % teurer aus. Es können also keine Kosten eingespart werden.

In die Berechnung des Nutzens gingen Reisezeitverkürzungen und negativer Nutzen durch nicht bediente Fahrtwünsche ein. Für die zwei Planfälle mit Viersitzern ergaben sich akzeptable Nutzen-Kosten-Differenzen und Nutzen-Kosten-Verhältnisse. Der Planfall mit 150 Rufbussen mit einer Kapazität von je vier Personen weist das höchste Nutzen-Kosten-Verhältnis von 5,45 auf. Diese Ergebnisse stehen allerdings unter Vorbehalt der großen Unsicherheiten bei den Kostensätzen der Fahrzeuge.

In einem Gebiet mit schwächerer Nachfrage könnte das Nutzen-Kosten-Verhältnis für die Rufbusse günstiger ausfallen.

Ausblick

Als nächste Schritte zur weiteren Untersuchung des Themas empfehlen sich Erweiterungen der DRT-Contribution. Das Entfernen von nicht durch Rufbusse bedienten Agenten aus der Simulation ist ungünstig für die Auswertung, da so keine Reisezeit für den abgebrochenen Weg berechnet werden kann und alle nachfolgenden Wege des Agenten ausfallen. Eine Möglichkeit wäre, zunächst nicht bediente Fahrtwünsche nach Ablauf einer gewissen Zeitspanne erneut anzumelden, bis der Agent bedient wird.

Alternativ könnten die zeitlichen Qualitätskriterien verändert werden. Im Hinblick auf die hohen Wartezeiten in Schwachlastzeiten wäre es wünschenswert, zwei maximale Wartezeiten definieren zu können, einen Soll- und einen Höchstwert. Der Tourenplanungsalgorithmus würde dann im Normalfall die Fahrten so optimieren, dass der Sollwert nicht überschritten wird und dazu ggf. mehr Fahrzeuge einsetzen als bisher, anstatt nur die Fahrleistung zu minimieren. Falls ein Fahrtwunsch nicht innerhalb des Sollwerts bedient werden kann, wird geprüft, ob innerhalb des großzügiger gefassten Höchstwertes eine Bedienung möglich ist. Dieser Höchstwert soll dann nur noch die Schwelle symbolisieren, ab der ein Fahrgast lieber zu Fuß läuft oder seinen Tagesplan anderweitig ändert, anstatt auf einen Rufbus zu warten. Mit dem Sollwert könnten dagegen die im Hinblick auf den notwendigen Fahrzeugeinsatz zumutbaren Wartezeiten reguliert werden. Ein niedrigerer Sollwert würde so zu sinkenden Wartezeiten und steigenden Betriebskosten führen. Der Höchstwert könnte deutlich höher gesetzt werden als der Sollwert und die derzeit implementierte maximale Wartezeit t_{max}^{wait} (siehe Kapitel 3.1), sodass mehr Fahrtwünsche bedient werden, ohne die mittleren Wartezeiten zu steigern. Um das Nutzen-Kosten-Verhältnis zu verbessern, könnten Vorbestellungen implemen-

tiert werden. Dadurch würden die Wartezeiten sinken, ohne dass notwendigerweise höhere Kosten anfallen. Außerdem würde der Einsatz einer Relocation-Strategie den Fahrzeugeinsatz möglicherweise effizienter gestalten und zu weniger abgewiesenen Fahrtwünschen führen.

In dieser Masterarbeit wurde der Einsatz gemischter Flotten aus Fahrzeugen mit verschiedenen Kapazitäten noch nicht untersucht. Mit einem geeigneten Tourenplanungsalgorithmus könnten die kapazitätsstarken Fahrzeuge in Gebieten und Relationen mit im Augenblick starker Nachfrage operieren, während kleinere Fahrzeuge die übrigen Gebiete und Relationen bedienen.

Außerdem könnte der Rufbusbetrieb an Stationen gebunden werden, sodass sich die Fahrten besser bündeln lassen. Dies hätte jedoch auch längere Fußwege und somit höhere Gehzeiten zur Folge. Bisher ergaben sich die größten Nutzen der Rufbusse gerade durch die Verkürzung der Gehzeiten.

Weitere noch nicht betrachtete Aspekte sind die Verkehrsmittelwahl und induzierter Verkehr. Der Komfortgewinn durch Rufbusse könnte neue Fahrgäste anlocken und von anderen Verkehrsmitteln abwerben. Dies kann auch den bestehenden Linienbus betreffen. Denkbar wäre, dass z.B. Google oder Uber autonome Rufbusse in Konkurrenz zu den herkömmlichen Linienbussen einsetzen. Deren Betriebskosten wären zwar vermutlich ebenfalls höher als die der Linienbussen, allerdings könnten sie diese Kosten auf die Fahrpreise umlegen. Fahrgäste mit hoher Zahlungsbereitschaft könnten trotz der höheren Fahrpreise vom Linienbus zu den geteilten Taxis bzw. Rufbussen eines privaten Unternehmens wechseln. Dadurch würden die Fahrgastzahlen der Linienbussen sinken und den Linienbusbetrieb unwirtschaftlich machen. Trotzdem müsste im Sinne der Daseinsvorsorge für die sozial Schwachen weiterhin eine subventionierte Grundversorgung sichergestellt werden, z.B. durch einen ausgedünnten Linienbusverkehr oder die Subvention eines privaten Rufbusdienstleisters wie Uber im kanadischen Innisfil.

Literaturverzeichnis

- [Axhausen u.a. 2015] AXHAUSEN, K. ; EHREKE, I. ; GLEMSER, A. ; HESS, S. ; JÖDDEN, C. ; NAGEL, K. ; SAUER, A. ; WEIS, C.: *Schlussbericht: FE-Projekt-Nr. 96.996/2011 - Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung*. 2015 <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2015-zeitkosten-pv.pdf>. – letzter Zugriff 31.07.2017
- [Bischoff u.a. 2017] BISCHOFF, J. ; MACIEJEWSKI, M. ; NAGEL, K.: *City-wide Shared Taxis: A Simulation Study in Berlin*. (2017). <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2017/17-11/BischoffMaciejewskiNagel2017SharedTaxiITSC.pdf>. – letzter Zugriff 17.07.2017
- [Frank u.a. 2008] FRANK, P. ; FRIEDRICH, M. ; SCHLAICH, J.: Betriebskosten von Busverkehren schnell und genau ermitteln. In: *Der Nahverkehr* (2008), Nr. 11, S. 15–22
- [Horni u.a. 2016] HORNI, A. ; NAGEL, K. ; AXHAUSEN, K.W.: *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. 2. Auflage. London : Ubiquity Press, 2016 <http://dx.doi.org/10.5334/baw>
- [Kirchhoff 1987] KIRCHHOFF, P.: *Verbesserung des ÖPNV im ländlichen Raum durch planerische und technische Maßnahmen*. Der Nahverkehr. o. O. : Alba Fachverlag, 1987 (6). – 19–25 S.
- [Kurpjuweit 2017] KURPJUWEIT, K.: Neue Busse der BVG - Mit Fußbodenheizung durch Berlin. In: *Tagesspiegel* (2017). <http://www.tagesspiegel.de/berlin/neue-busse-der-bvg-mit-fussbodenheizung-durch-berlin/10813416.html>. – letzter Zugriff 12.09.2017
- [Laughlin 2017] LAUGHLIN, Jason: As Uber grows, SEPTA to rethink bus service. In: *Philly.com* (2017). <http://www.philly.com/philly/business/transportation/as-uber-grows-septa-to-rethink-bus-service-20170721.html>. – letzter Zugriff 28.08.2017
- [o.A. 2013] o.A.: *Berliner Verkehr in Zahlen*. o.O. : Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin, 2013 https://www.berlin.de/senuvk/verkehr/politik_planung/zahlen_fakten/download/Mobilitaet_dt_komplett.pdf. – letzter Zugriff 29.05.2017
- [o.A. 2017a] o.A.: *Der Ortsteil Heiligensee*. o.O. : Bezirksamt Reinickendorf von Berlin, 2017 <http://www.berlin.de/ba-reinickendorf/ueber-den-bezirk/ortsteile/heiligensee/>. – letzter Zugriff 18.07.2017
- [o.A. 2017b] o.A.: *Der Ortsteil Konradshöhe*. o.O. : Bezirksamt Reinickendorf von Berlin, 2017 <http://www.berlin.de/ba-reinickendorf/ueber-den-bezirk/ortsteile/konradshoehe/>. – letzter Zugriff 18.07.2017

- [o.A. 2017c] o.A.: *Deutschland | Statistiken Preisfixing*. o.O. : o.V., 2017 <https://benzinpreis.de/statistik.phtml>. – letzter Zugriff 24.09.2017
- [o.A. 2017d] o.A.: *MeinAuto.de Neuwagen: Top-Preise & Rabatte im Ausland*. o.O. : o.V., 2017 <http://www.meinauto.de>. – letzter Zugriff 10.09.2017
- [o.A. 2017e] o.A.: *Unterhaltskosten Auto: Versicherung, Verbrauch, Kfz-Steuer, Wartung*. o.O. : o.V., 2017 <http://www.autokostencheck.de>. – letzter Zugriff 24.09.2017
- [Schaller 2017] SCHALLER, Bruce: *UNSUSTAINABLE? - The Growth of App-Based Ride Services and Traffic, Travel and the Future of New York City*. New York : o. V., 2017 <http://schallerconsult.com/rideservices/unsustainable.pdf>. – letzter Zugriff 28.08.2017
- [Smith 2017] SMITH, C.: A Canadian Town Wanted a Transit System. It Hired Uber. In: *New York Times* (2017), 5. <https://www.nytimes.com/2017/05/16/world/canada/a-canadian-town-wanted-a-transit-system-it-hired-uber.html>. – letzter Zugriff 13.07.2017
- [VDV 2009] VDV: *Differenzierte Bedienung im ÖPNV: Flexible Bedienungsweisen als Baustein eines marktorientierten Leistungsangebotes*. 2. Auflage. o. O. : Eurailpress in DVV Media Group, 2009. – 22–29, 64–81 S.

Anhang

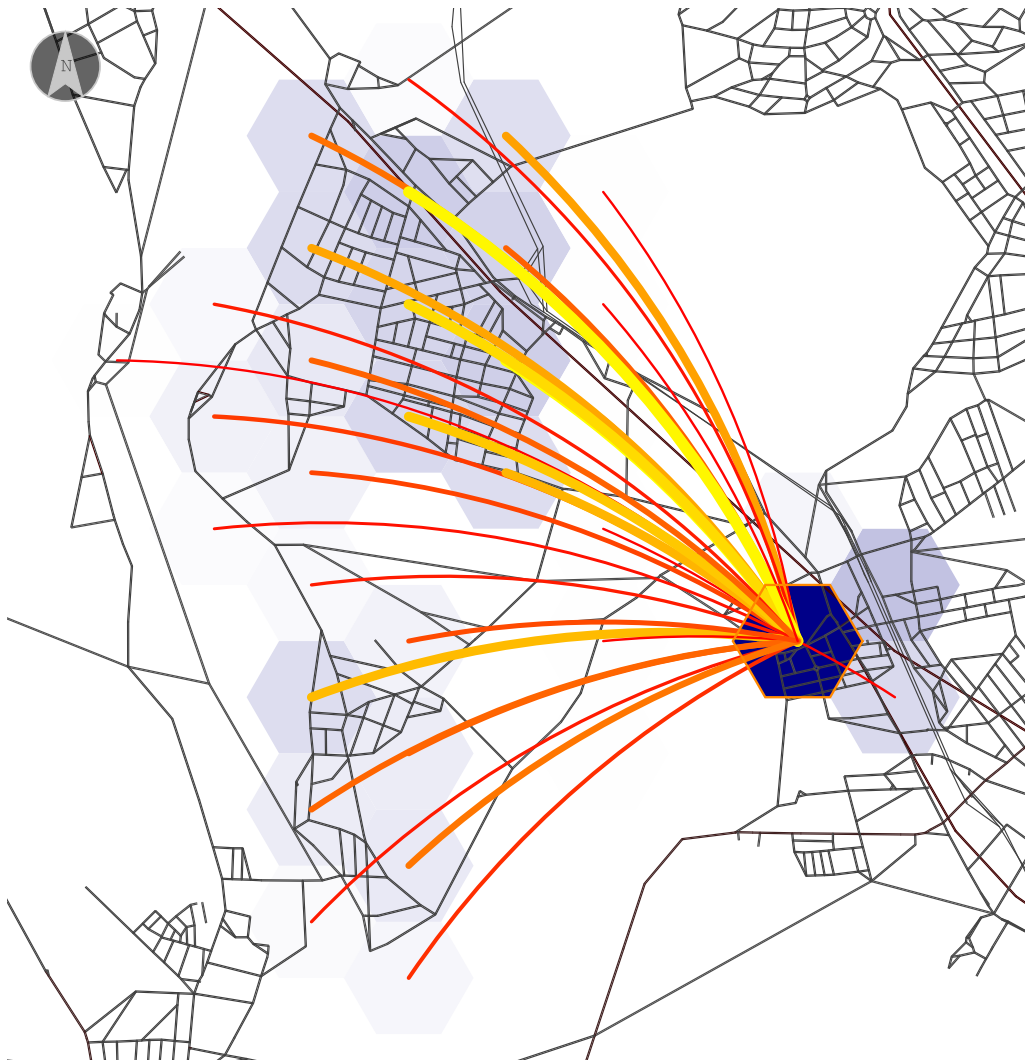


Abbildung 14: Rufbusfahrten im Planfall D2D_200_Cap4: Die Farbe der hexagonalen Zonen steht für die Anzahl der dort (im Laufe des gesamten Tages) beginnenden Rufbusfahrten, wobei weiß für 0 und dunkelblau für das Maximum von etwa 5 000 Fahrten steht. Die Linien zeigen die Verkehrsströme von den Zonen im Untersuchungsgebiet zur am stärksten frequentierten Zone im Zentrum von Tegel dar und variieren zwischen rot für 0 Fahrten und gelb für 500 Fahrten (eigene Darstellung)



Abbildung 15: Abgewiesene Rufbusfahrten und Fahrzeugpositionen im Planfall D2D_150_Cap4: Die Farbe der hexagonalen Zonen steht für die Anzahl der dort zwischen 16:00 und 17:00 Uhr beginnenden Rufbusfahrten, die abgewiesen wurden. Dabei steht weiß für 0, blau für 10 und die violette Zone für das Maximum von 113. Die farbigen Kreise und Pfeile stellen die Fahrzeugpositionen zum Zeitpunkt 16:30 Uhr dar. Dabei stellen die grünen Kreise Rufbusse mit 0 Passagieren dar, also entweder ungenutzte oder auf einer Leerfahrt befindliche Fahrzeuge. Die orangen bis roten Pfeile stellen mit 1 ODER 2 BIS 4? zwei bis vier Personen besetzte Fahrzeuge dar. (eigene Darstellung)

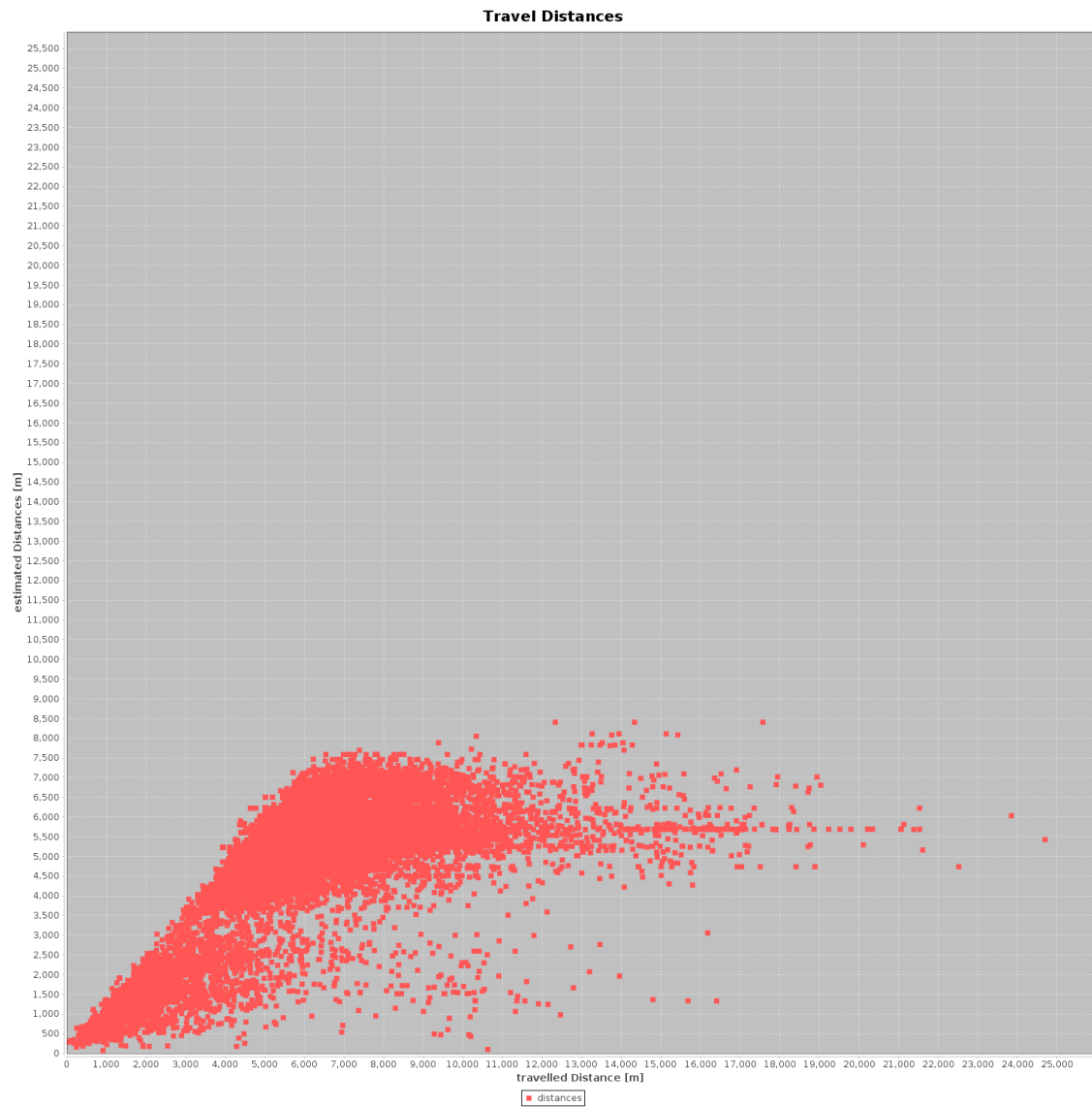


Abbildung 16: Direkte Distanz versus tatsächliche gefahrene Entfernung mit Umweg im Planfall D2D_200_Cap4 (eigene Darstellung)

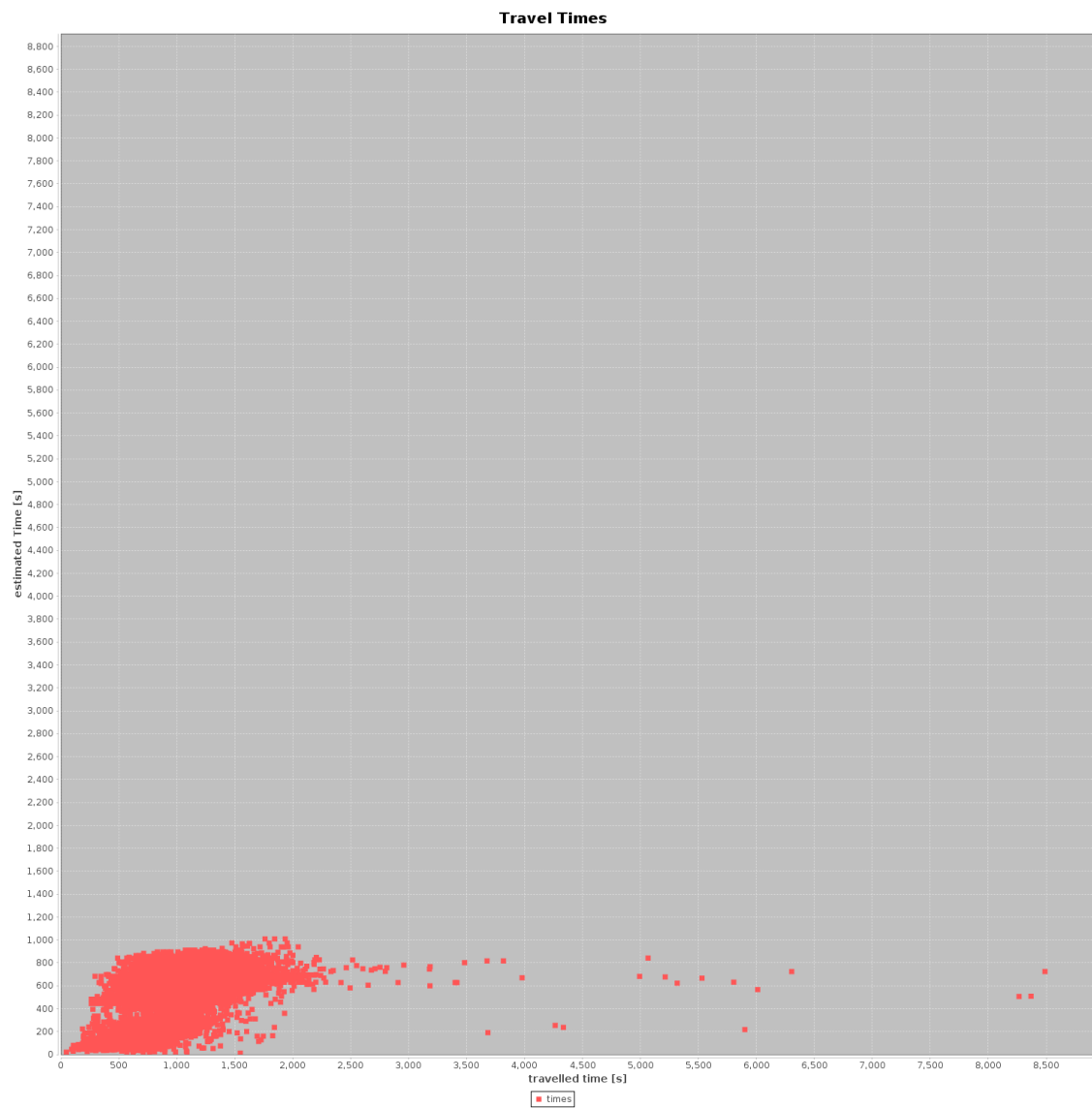


Abbildung 17: Direkte Fahrzeit versus tatsächliche Fahrzeit mit Umweg im Planfall D2D_200_Cap4 (eigene Darstellung)

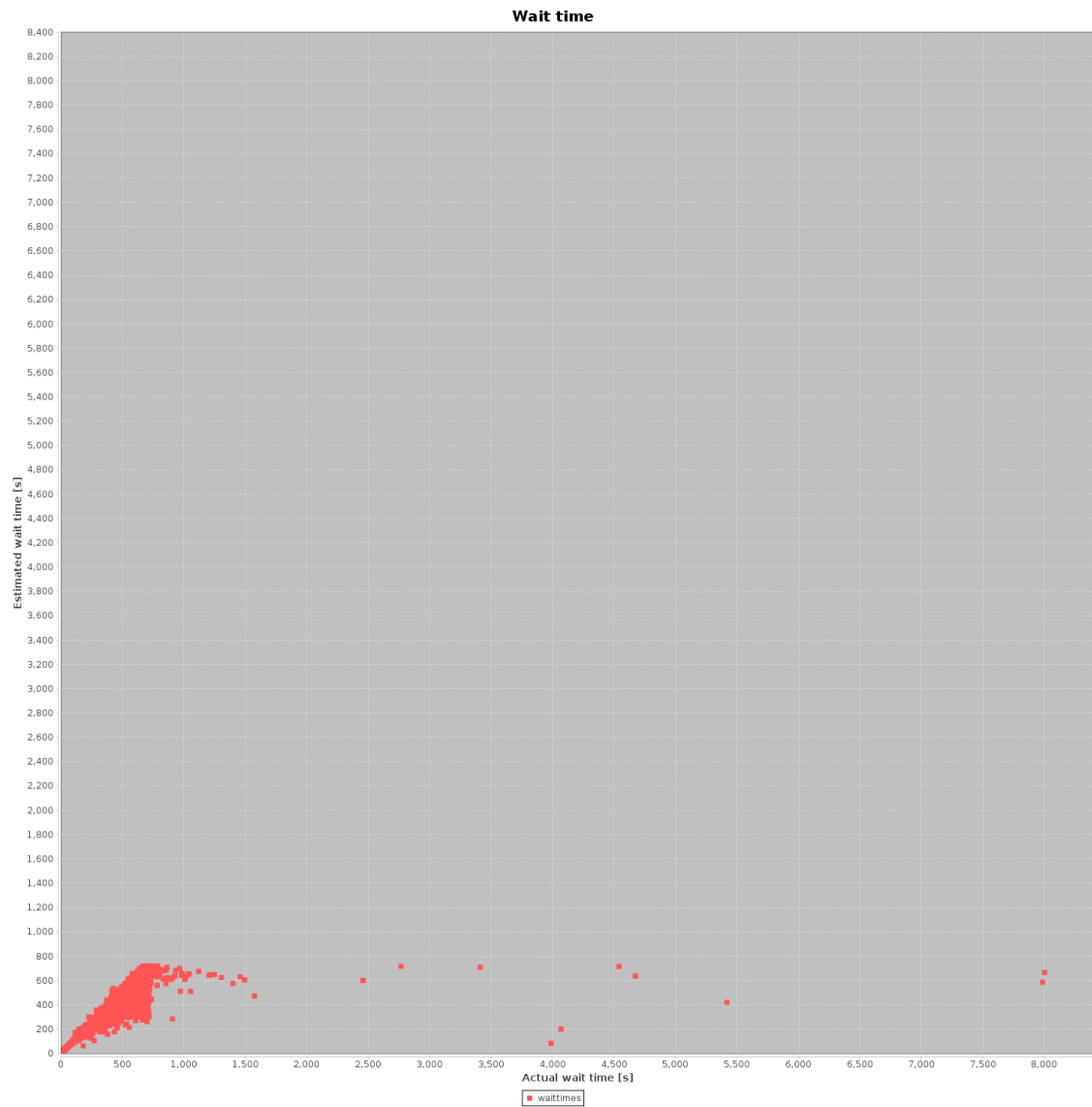


Abbildung 18: Geplante Rufbuswartezeiten versus tatsächliche Rufbuswartezeit im Planfall D2D_200_Cap4 (eigene Darstellung)