

Masterarbeit

ZUR ERLANGUNG DES TITELS **Master of Science** IM FACH:

International Area Studies

**Analyse und Bewertung von Demand Responsive Transportation (DRT) und
traditionellem Buslinienangebot: Eine Multi-Agenten Fallstudie über die
ländlich geprägte sächsische Kleinstadt Colditz.**



**MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT
HALLE-WITTENBERG**

Vorgelegt von:

Clemens SCHMIDT

MATRIKELNUMMER: 215235686

Betreut von:

M.Sc. Kathrin VIERGUTZ

Prof. Dr. Christine FÜRST

20. JULI 2018

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, **Clemens Schmidt**, geboren am 19. März 1988 in Pirna, dass die vorliegende Masterarbeit selbstständig sowie ohne jedwede unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der im Literaturverzeichnis angeführten Hilfsmittel angefertigt wurde.

Clemens Schmidt

Clemens Schmidt

Halle, 20.07.2018

Anmerkungen

Diese Masterarbeit wurde mit Daten des *Mitteldeutschen Verkehrsverbundes (MDV)*, der *Regionalbus Leipzig GmbH* und des *Landkreises Leipzig* erstellt. Großer Dank gilt *Joschka Bischoff*, *Gregor Leich* und *Michal Maciejewski* für Hinweise und Tipps im Umgang mit der Simulationssoftware MATSim, speziell mit den *dvrp*, *drt* und *av* Modulen. Außerdem möchte ich *Michael Rieser* von der *Simunto GmbH* danken für das kostenfreie Zurverfügungstellen einer 6-monatigen *VIA*-Lizenz. Schließlich möchte ich *Lisa Maria Bauer* für die mentale Unterstützung während der Erarbeitung dieser Masterarbeit und das formale Korrekturlesen danken.

Zusammenfassung

Diese Masterarbeit untersucht den ländlichen ÖPNV vor dem Hintergrund demografischer, ökologischer, räumlicher und wirtschaftlicher Aspekte. Dies erfolgt exemplarisch anhand einer Fallstudie zur sächsischen Kleinstadt Colditz. Angewandt wird die Methode der Multi-Agenten Simulationsanalyse, welche mit der Open Source Software MATSim umgesetzt wird. Es werden drei Szenarios für das Untersuchungsgebiet modelliert und anschließend miteinander verglichen. Das erste Szenario beinhaltet die Einführung eines traditionell fahrplanbasierten Linienbusses, um das Colditzer ÖPNV-Angebot über die bestehenden Regionalbuslinien hinaus zu erweitern. Das zweite und das dritte Szenario prüfen jeweils den Einsatz eines sogenannten DRT-Angebotes für Colditz. Im zweiten Szenario ist dieser DRT-Service zwar flexibel und nachfrageorientiert gestaltet, doch ist das Angebot nach wie vor an feste Haltestellen gebunden. Dies ist im dritten Szenario nicht mehr der Fall, wo ein DRT-Service in Form einer flexiblen Haustürbedienung untersucht wird. Der Vergleich zeigt, dass die meisten Agenten den ÖPNV stärker bei der Umsetzung eines DRT-Haustürservice nutzen, dicht gefolgt von der flexiblen DRT-Haltestellenbedienung. Die traditionelle Stadtbuslinie zieht hingegen eine deutlich geringere Anzahl von Agenten an. Die beiden flexiblen Bedienformen benötigen im Gegenzug deutlich mehr Fahrzeuge und legen eine größere Anzahl an Fahrzeugkilometern zurück. Die Leerfahrtenquoten sind bei den flexiblen DRT-Services hingegen geringer als bei der Stadtbuslinie. Weiterhin zeigt der Vergleich, dass die Agenten mit der Stadtbuslinie die längsten Warte- und Reisezeiten erfahren, die mehr als doppelt so hoch sind als die der flexiblen DRT-Haltestellenbedienung. Auch mit Blick auf die räumliche Erschließung sowie die ökologische Bilanz der drei Mobilitätsangebote erweist sich die flexible DRT-Haltestellenbedienung als beste der drei Alternativen. Diese Simulationsergebnisse bestätigen die Erkenntnisse anderer MATSim-Simulationen, die beim Vergleich von Linien- und DRT-Verkehren geringere Warte- und Reisezeiten für die Passagiere der DRT-Angebote feststellten. Das höhere Servicenniveau bedarf jedoch auch eines höheren Fahrzeugeinsatzes und generiert mehr Fahrzeugkilometer, sodass eine effiziente Zuteilung der verfügbaren Fahrzeuge zu den reisewilligen Kunden nicht automatisch finanzielle Entlastungen mit sich bringt. Die Flexibilisierung des ländlichen ÖPNV-Angebotes durch DRT-Services kann demnach nicht per se als Erfolgsstrategie angesehen werden; der Einsatz autonomer Fahrzeuge könnte die Erfolgchancen mitunter jedoch verbessern.

Abkürzungen

ABM	Agenten-basierte Modelle
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DRT	Demand Responsive Transportation
Fz-km	Fahrzeugkilometer
GTFS	General Transit Feed Specification
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs
IuK	Informations- und Kommunikationstechnologien
MATSim	Multi-Agent Transport Simulation
MDV	Mitteldeutscher Verkehrsverbund
MiD	Mobilität in Deutschland
MIV	Motorisierten Individualverkehr
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
ÖPNV	Öffentliche Personennahverkehr
OSM	OpenStreetMap
PAX	Persons approximately
PBerfG	Personenbeförderungsgesetz
SGB	Sozialgesetzbuch
SrV	System repräsentativer Verkehrsbefragungen
TU Berlin	Technischen Universität Berlin
VCD	Verkehrsclub Deutschland
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
2 Demand Responsive Transportation	3
3 Mobilität in den ländlichen Räumen	10
3.1 Die ländlichen Räume	10
3.2 Physische Raumüberwindung	11
3.3 Digitale Mobilität	14
3.4 Soziale, wirtschaftliche & politische Teilhabe	17
4 Methodik	18
4.1 Agenten-basierte Modellierung	18
4.2 MATSim	20
5 Fallstudie Colditz	27
5.1 Beschreibung der Untersuchungsregion	27
5.2 Datengrundlage des Simulationsmodelles	28
5.2.1 Infrastrukturdaten	28

5.2.2	Bevölkerungsdaten	30
5.2.3	Simulation des Mobilitätsverhaltens	31
5.2.4	Validierung der Simulation	35
5.3	Charakteristik & Simulationsergebnisse für drei Colditzer Szenarios	39
5.3.1	Stadtbuslinie Colditz	39
5.3.2	Haltestellenbasiertes DRT-Angebot für Colditz	43
5.3.3	Tür-zu-Tür DRT-Angebot für Colditz	46
5.4	Vergleich der drei Szenarios	48
6	Diskussion & Praxisbezug	54
6.1	Methodische Limitationen	54
6.2	Nachfrageschwacher aber kein disperser Raum	55
6.3	Zukünftiges Mobilitätsverhalten	56
6.4	Aspekte von DRT-Mobilität	57
7	Fazit	59
	Literaturverzeichnis	61
A	Masterarbeitsvereinbarung	73
B	Validierung des Simulationsansatzes	74
C	Beförderungsfälle Tarifzone 145	76
D	Beförderungsfälle & Fahrgäste	77
E	Fahrzeugeinsatz	78
F	Weitere Möglichkeiten der Kalibration	79
G	Simulation Stadtbuslinie	81

H Simulation DRT-Haltestellenbedienung	88
I Simulation DRT-Haustürbedienung	91

Abbildungsverzeichnis

2.1	Möglicher Reiseverlauf bei flexibler & nachfrageorientierter Bedienung . . .	5
2.2	Beispiele für autonome Fahrzeuge im Jahre 2018	6
3.1	Räumliche & zeitliche Flexibilisierung im ländlichen ÖPNV	13
3.2	Flexible Angebotsformen im ländlichen ÖPNV	13
3.3	Digitale - physische - virtuelle Mobilität	15
3.4	Smartphone-Nutzer in Deutschland 2009-2018	16
4.1	Der MATSim Kreislauf	21
4.2	Typischer Verlauf eines evolutionären Optimierungsprozesses	22
4.3	Prozess der Notenbildung in MATSim	23
4.4	MATSim Events für Passagiere	24
4.5	Dynamische Agenten in MATSim	25
5.1	Beispielagent aus der Agenten-Eingabedatei	34
5.2	Die räumlichen Relationen eines Beispielagenten	34
5.3	Zeiten & Wege eines Beispielagenten nach 100 Iterationen	35
5.4	Die Besetzung des Regionalbusnetzes zur Kalibrierung und Validierung des gewählten Simulationsansatzes	37
5.5	Die Abfahrtszeiten aller Agenten an allen Haltestellen zur Kalibrierung und Validierung des gewählten Simulationsansatzes	38
5.6	Linienführung der Stadtbuslinie Colditz-Zschadraß	40
5.7	Die räumliche Erschließung mit der Stadtbuslinie	42

5.8	Die räumliche Erschließung mit der flexiblen Haltestellenbedienung	46
5.9	Der Vergleich der drei Szenarios aus Sicht der Agenten	50
B.1	Verlauf der MATSim-Noten für die Kalibrierung & Validierung des Simulationsansatzes	74
B.2	Verlauf der logarithmischen Trendlinie der durchschnittlichen MATSim-Noten für die Kalibrierung & Validierung des Simulationsansatzes	75
F.1	Alle Agenten an der Haltestelle Colditz Sportplatz	79
F.2	Alle Transfers an der Haltestelle Colditz Sportplatz	80
G.1	Verlauf der MATSim Noten für die Simulation der Colditzer Stadtbuslinie	81
G.2	Zustiege, Ausstiege und die Gesamtzahl der Beförderten je Haltestelle, für die Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Colditz-Zschadraß	82
G.3	Nutzung der Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Colditz-Zschadraß	82
G.4	Zustiege zur und Ausstiege von der Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Colditz-Zschadraß	83
G.5	Räumlich-zeitliche Besetzung der Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Colditz-Zschadraß	83
G.6	Maximale Fahrzeugbesetzung in der Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Colditz-Zschadraß	84
G.7	Zustiege, Ausstiege und die Gesamtzahl der Beförderten je Haltestelle, für die Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Zschadraß-Colditz	84
G.8	Nutzung der Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Zschadraß-Colditz	85
G.9	Zustiege zur und Ausstiege von der Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Zschadraß-Colditz	85
G.10	Räumlich-zeitliche Besetzung der Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Zschadraß-Colditz	86
G.11	Maximale Fahrzeugbesetzung in der Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Zschadraß-Colditz	86
G.12	Die Stadtbuslinie als Abbringer zur Regionalbuslinie 619	87

H.1	Verlauf der MATSim-Noten für die Simulation der Colditzer DRT-Haltestellenbedienung	88
H.2	Fahrtenanfragen der Agenten an die DRT-Haltestellenbedienung	89
H.3	Wartezeiten bei der DRT-Haltestellenbedienung	89
H.4	Fahrzeugbesetzung für die DRT-Haltestellenbedienung	90
I.1	Verlauf der MATSim-Noten für die Simulation der Colditzer DRT-Haustürbedienung	91
I.2	Fahrtenanfragen der Agenten an die DRT-Haustürbedienung	92
I.3	Wartezeiten bei der DRT-Haustürbedienung	92
I.4	Fahrzeugbesetzung für die DRT-Haustürbedienung	93

Tabellenverzeichnis

5.1	Der Vergleich der drei Szenarios aus Anbietersicht	49
5.2	Der Vergleich der drei Szenarios aus ökologischer Sicht	51

Einleitung

Der Öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) in den ländlichen Räumen steht in Deutschland seit Jahren unter Druck. Dabei stehen die dienstleistenden Unternehmen und Nahverkehrskonzepte vor der Herausforderung Mobilitätssicherung, Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit gleichermaßen zu gewährleisten (Riesner, 2014, S. 42-43). Verschiedene gesamtgesellschaftliche Prozesse des demografischen Wandels haben zur Folge, dass der Schülerverkehr aufgrund von Schulstandortschließungen bzw. -zusammenlegungen immer weitere Wege zurücklegen muss, dass die potentielle Kundschaft durch die Landflucht in ihrer Gesamtzahl stetig abnimmt und dass durch den wiederum stetig steigenden Anteil an Senioren höhere Serviceansprüche an Barrierefreiheit und kleinere Haltestelleneinzugsbereiche gestellt werden. Sogenannte Demand Responsive Transportation (DRT)-Systeme haben deshalb das Ziel, den ÖPNV-Sektor zu flexibilisieren und somit weiterhin eine angemessene ÖPNV-Mobilität in den ländlichen Räumen zu gewährleisten. Diese Flexibilisierung kann sich in unterschiedlichen Ausprägungen vollziehen, z.B. durch ein Auskommen ohne festen Fahrplan oder feste Haltestellen (Viergutz & Brinkmann, 2018, S. 334). Zentral sind dabei die zahlreichen Möglichkeiten, die durch Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK) eröffnet werden. Idealtypisch kann man sich diese Systeme wie eine öffentlich-rechtliche Variante des *Uber*-Geschäftsmodells vorstellen: Kunden geben über eine Smartphone-App Fahrtenwünsche mit konkretem Start, Ziel sowie Uhrzeitangabe ein. Ein (eventuell sogar autonom fahrender) Kleinbus oder ein normales Automobil bedient alle Fahrtenwünsche, versucht dabei aber bestmöglich Anfragen zu bündeln.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist in erster Linie eine wissenschaftlich-theoretische Untersuchung von ÖPNV-Mobilität in den ländlichen Räumen und es wird die Frage gestellt: *Ist es vor dem Hintergrund demografischer, ökologischer, räumlicher und wirtschaftlicher Aspekte erstrebenswerter für ÖPNV-Kunden bzw. -Anbieter und auch aus gesamtgesellschaftlicher Sicht ein flexibel-nachfrageorientiertes Angebot (DRT) zu nutzen bzw. einzuführen gegenüber einem traditionellen und starren Linienbusangebot?* Dabei wird anhand eines Fallbeispiels - der sächsischen Kleinstadt Colditz - untersucht, wie in nachfrageschwachen Räumen zukünftig ein angemessenes Mobilitätsangebot von ÖPNV-Betreibern zur Verfügung gestellt werden kann. Diese Untersuchung wendet dazu die Methode der Multi-Agenten Analyse an und arbeitet mit der verkehrsplanerischen Simulationssoftware Multi-Agent Transport Simulation (MATSim). Die Masterarbeit trägt somit zur weiteren Evaluation dieser Open Source Software bei, indem sie erstmalig einen Vergleich zum traditionellen Buslinienangebot gegenüber einem DRT-Angebot in einem ausgewählten ländlichen Raum Deutschlands simuliert und damit gleichzeitig neues Wissen generiert.

Diese Untersuchung wurde in Zusammenarbeit mit drei Praxispartnern erstellt: *Mitteldeutscher Verkehrsverbund (MDV) GmbH, Regionalbus Leipzig GmbH* und dem *Landkreis Leipzig*. Zu diesem Zwecke wurde mit dem MDV eine Masterarbeitsvereinbarung (siehe Anhang A) getroffen und Daten wurden ausgetauscht. Insgesamt gab es drei Treffen mit allen Praxispartnern; am 12. Januar 2018 ein Vorbereitungstreffen, am 03. Mai 2018 eine Zwischenpräsentation mit Konkretisierungen des Untersuchungsgegenstandes und am 27. Juni 2018 eine Abschlusspräsentation. Die Praxispartner können diese wissenschaftlich-theoretische Untersuchung für Planungen in Colditz in Form einer *probabilistischen Folgenabschätzung* verwenden.

Der verbleibende Teil der Masterarbeit gliedert sich wie folgt: Zunächst wird das Prinzip des DRT (2), danach Mobilität in den ländlichen Räumen (3) beschrieben. Dann wird die Methode der Multi-Agenten Analyse allgemein (4.1) und MATSim im Speziellen (4.2) erklärt. Im fünften Kapitel findet sich die umfangreiche Fallstudie zur sächsischen Kleinstadt Colditz, wobei zuerst das Untersuchungsgebiet beschrieben (5.1) und das Colditzer Simulationsmodell (5.2) erklärt wird, danach folgen die Charakteristik sowie die Simulationsergebnisse für drei Szenarios (5.3) und anschließend deren Vergleich (5.4). Schließlich werden die Ergebnisse der Fallstudie diskutiert (6) und es wird ein Fazit (7) gezogen.

Demand Responsive Transportation

Die Begriffe Mobilität 4.0, flexible Bedienformen, individuell abrufbare Mobilitätskonzepte oder die im englischen Sprachgebrauch auch häufig verwendeten Formen des Ride-Sharing, Ride-Pooling, DRT, Mobility on demand und Shared Mobility „beschreiben im Wesentlichen haltstellen- und fahrplanlose Mobilitätskonzepte, die auf den aktuellen und individuellen Bedarf von Nutzern reagieren und bei denen Fahrtwünsche mehrerer Fahrgäste miteinander gebündelt werden“ (Lehnert et al., 2018, S. 7). Diese Masterarbeit wird aus Gründen der Einfachheit im Folgenden den Begriff DRT synonym für alle zeiten- und routenflexiblen Bedienformen verwenden.

DRT-Services sind keine Neuheit und in Deutschland spätestens seit den 1980iger Jahren in Form von *Anrufbussen* in ländlichen Räumen (Mehlert, 2001, S. 49-100), und international z.B. in England seit den 1960iger Jahren als *community car* (Ryley et al., 2014, S. 365) oder in den USA seit dem *Rehabilitation Act of 1973* in Form des *para-transit* für mobilitätseingeschränkte Personen (Ronald et al., 2015, S. 405) bekannt. Die heutigen wissenschaftlichen Diskussionen, Pilotprojekte von ÖPNV-Betreibern und Geschäftsmodelle von Firmen der *Sharing Economy* haben zum Ziel Mobilität *on demand*, also jederzeit abrufbar, zu untersuchen bzw. zur Verfügung zu stellen. Idealtypisch gelten bei *on demand Angeboten* folgende Merkmale (gemäß (Mehlert & Schiefelbusch, 2017, S. 10)):

- App-basiertes Buchen und Bezahlen
- Echtzeit-Disposition inklusive Fahrgastinformation

- Fahrtwunsch-Bündelung
- Free-Floating (door-to-door oder stop- to-stop)
- Verkehr mit Personenwagen oder kleineren Bussen

Es werden also Fahrtenanfragen von Kunden über eine Smartphone-App platziert sowie bezahlt und innerhalb eines maximalen Zeitrahmens in einem definierten Servicegebiet von einem Anbieter bedient. Diese Bedienung kann in Form eines Haustürservices erfolgen, indem Kunden von der eigenen Wohnung bis zur jeweiligen Wunschdestination (innerhalb des Bedienegebietes) und/oder umgekehrt transportiert werden. Die Bedienung kann sich jedoch auch auf das flexible Ansteuern bereits existenter Haltestellen oder virtueller Haltestellen (Haltezonen) beschränken (Lu et al., 2017). Der Unterschied zum Taxigewerbe ist der, dass nicht nur ein Passagier sondern mehrere Passagiere gleichzeitig transportiert werden können und dass dadurch Abweichungen vom direkten Kurs und somit zeitliche Verzögerungen in Kauf genommen werden müssen. Diese geteilten und im öffentlichen Auftrag durchgeführten Fahrten müssen somit sowohl rechtliche Rahmenbedingungen, klare Qualitätskriterien, die IuK- sowie technischen Möglichkeiten, Nutzereinstellungen, Emissionsaspekte und vieles mehr beachten, was DRT-Services in der Folge „notoriously complex“ (Fu, 2003, S. 81) gestaltet. Daher werden diese dem Leser dieser Masterarbeit zur besseren Einordnung nun näher erklärt.

Gemäß den *rechtlichen Rahmenbedingungen* dürfen DRT-Services derzeit in Deutschland über zwei Ausnahmeregelungen des Personenbeförderungsgesetz (PBerfG) *getestet* werden. Dies ist zum einen die Auffangklausel für typengemischte Verkehre, die DRT-Services der Rubrik der Linienverkehre zuordnet, weil beide eine öffentliche Verkehrsart darstellen. Nach § 2, Abs. 6 PBerfG „kann im Fall einer Beförderung, die nicht alle Merkmale einer Verkehrsart oder Verkehrsform erfüllt, eine Genehmigung nach denjenigen Vorschriften dieses Gesetzes erteilt werden, denen diese Beförderung am meisten entspricht, soweit öffentliche Verkehrsinteressen nicht entgegenstehen.“ (BMJV, 2017). Zum anderen besteht die Experimentierklausel (§ 2 Abs. 7 PBerfG), mit der neue Verkehrsarten für maximal vier Jahre erprobt werden können (Lehnert et al., 2018, S. 9). Einen DRT-Service dauerhaft bzw. regulär einzurichten ist derzeit nicht möglich, dazu müsste das PBerfG überarbeitet werden (Mehlert & Schiefelbusch, 2017, S. 12), was seit Jahren vielfach gefordert wird (Steinrück & Küpper, 2010, S. 37). Zudem sind weitere Vergabe- und Genehmigungsregularien sowohl vom Betreiber als auch von den Bestellern

bedarfsorientierter ÖPNV-Dienstleistungen zu beachten, wie das nationale & europäische Vergaberecht sowie die Sektoren-Verordnung (Mehlert & Karl, 2014, S. 23).

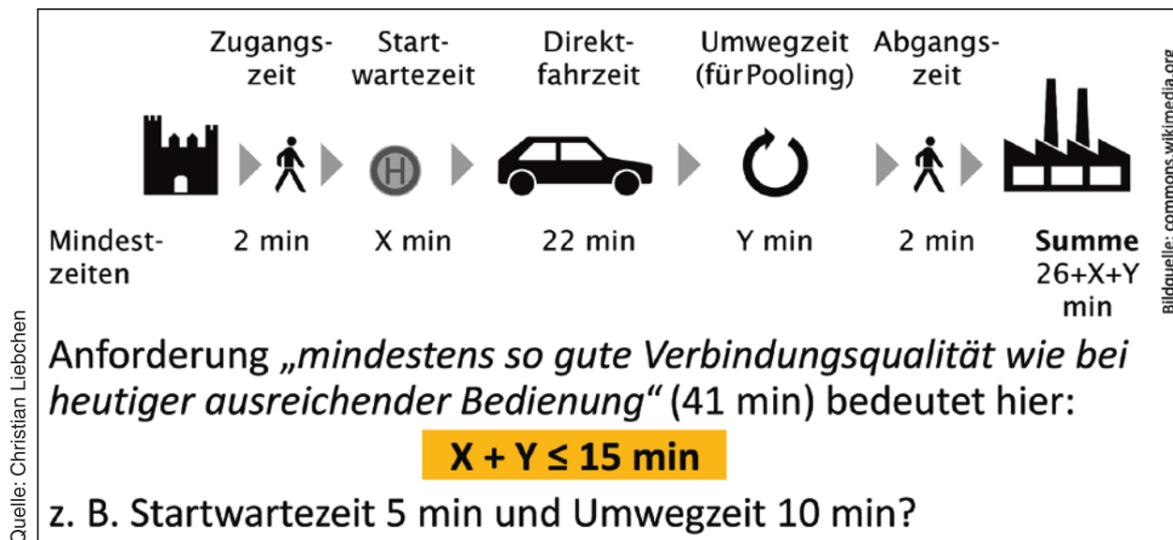


Abbildung 2.1: Möglicher Reiseverlauf einer DRT-Verbindung (Lehnert et al., 2018, S. 10).

DRT-Services müssen, wenn sie im Wirkungsbereich des ÖPNV angeboten werden, auch ÖPNV-relevanten *Qualitätskriterien* entsprechen. Traditionell fahrplanbasierte Angebote verfügen mit der DIN EN 13816 über eine Norm, die umfassend alle Aspekte der erforderlichen Dienstleistungsqualität regelt und Messinstrumente an die Hand gibt für insgesamt acht Dienstleistungskriterien: Verfügbarkeit, Zugänglichkeit, Information, Zeit, Kundenbetreuung, Komfort, Sicherheit und Umwelt (Normenausschuss Gebrauchstauglichkeit und Dienstleistungen (NAGD) im Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN), 2002). Eine solche Norm oder anderweitige Regelung der konkreten DRT-Leistungserbringung existiert derzeit ebenso wenig wie die bereits angesprochene dauerhafte Betriebserlaubnis. Kriterien müssen also erst noch formuliert werden, z.B. jene, die die Verbindungsqualität der Kunden gewährleisten. Die Abbildung 2.1 zeigt exemplarisch wie sich Wissenschaftler eine solche Regelung für DRT-Verbindungen vorstellen. Die Verbindungsqualität sollte sich gegenüber dem heutigen Standard in keinem Fall verschlechtern, das heißt, DRT-Kunden sollten keine ausufernden Wartezeiten und Umwege in Kauf nehmen müssen, die in der Summe ihre Verbindungen im Vergleich zu traditionellen ÖPNV-Angeboten verlängern. Vielmehr wird angestrebt eine Verringerung der Reisezeiten und somit eine Attraktivitätssteigerung von ÖPNV-Dienstleistungen zu erzielen. Für DRT-Services erscheinen zudem weitreichende Kriterien in Bezug auf die Fahrgastinformation (Viergutz & Brinkmann, 2018, S. 334-336) und die Zugänglichkeit

(Czioska et al., 2017, S. 4-5) erforderlich. Da diese Angebote größtenteils auf einer App-basierten Umsetzung fussen, sind z.B. klare Regelungen bezüglich der Informationen zu Ankunfts- bzw. Fahrtzeiten, die an Kunden im Vorfeld einer Anfrage übermittelt werden, erforderlich. Auf der Grundlage dieser präzisen Informationen wird der Kunde sich für oder gegen eine DRT-Fahrt entscheiden; daher sollten diese auch korrekt und verlässlich sein, um Servicequalität zu gewährleisten. Gleiches gilt für die präzise Information über Zu-/Ausstiegspunkte wenn ein haltestellenbasiertes System umgesetzt wird.

Der konkrete Einsatz der jeweiligen *IuK-Technologien* ist ein weiterer gewichtiger Punkt für die (erfolgreiche) Umsetzung von DRT-Services. Apps sollten intuitiv und für jede Altersgruppe gleichermaßen leicht bedienbar gestaltet sein, um einen möglichst niedrigschwelligen Zugang zu gewährleisten (Dickinson et al., 2015, S. 30-31). Zudem sind weitere Aspekte wie Datenschutz, Vertrauenswürdigkeit oder zulassungsbeschränkter Zugang bei der Einführung von Reiseinformations-/buchungs Apps zu beachten (Dickinson et al., 2017, S. 108-109). Unzureichende Informationen über die Datenverwendung, unübersichtliche Funktionen, fehlerhafte kartografische Visualisierung, abstürzende Buchungsvorgänge etc. sind Hürden, die potentielle und traditionelle ÖPNV-Kunden gleich beim ersten Mal und nach nur 10min (oder weniger) von der Nutzung eines DRT-Angebotes zurückschrecken lassen.



Abbildung 2.2: Links ist *Waymo's fahrerloses Taxi* zu sehen (Litman, 2018) und rechts der ebenfalls autonom fahrende *R+V Bus* (R+V Pressecenter, 2018)).

Mit Blick auf die *technischen Möglichkeiten* gehen mittel- bis langfristige Szenarios davon aus, dass DRT-Services erhebliche Kosten- und Servicevorteile durch den Einsatz von autonom fahrenden Fahrzeugen erwirtschaften und damit mehr Spielraum in der ÖPNV-Tarifgestaltung besteht. Ein mögliches Szenario ist, dass autonom fahrende Fahrzeuge in den Jahren 2020-2030 zwar technisch ohne weiteres möglich aber nach wie vor zu teuer und erst in den Jahren 2030-2040 erschwinglich sind und dass dann ca. 40% der Fahrten geteilt werden (Litman, 2018, S. 17-22). In den Abbildungen von 2.2 ist exempla-

risch zum einen *Waymo's fahrerloses Taxi* aus den USA zu sehen und zum anderen der seit Juni 2018 für den deutschen Straßenverkehr zugelassene und autonom fahrende *R+V Bus* mit einer Kapazität für 11 Fahrgäste. Dies ist also keine allzu ferne Zukunftsfantasie, sondern findet bereits rund um den Globus in zahlreichen Pilotprojekten Anwendung. Es gibt jedoch auch kritischere Stimmen, die prognostizieren, dass die Kostenvorteile durch die eingesparten Personalkosten (Fahrer) wiederum durch erhöhte Reinigungskosten für diese geteilten und autonom fahrenden Fahrzeuge (also ohne Personal, das gleichzeitig Aufsicht hält und somit Verschmutzung und Vandalismus entgegenwirkt) hinfällig und, wenn überhaupt, nur in ländlichen Räumen vorhanden sein werden (Bösch et al., 2018, S. 86).

Da kein DRT-Serviceangebot im vollumfänglichen Sinne bis dato umgesetzt ist (Rufbusse verkehren nur in Abendstunden oder wochenends und stellen im engeren Sinne kein DRT-Angebot dar), sind auch keine umfassenden Daten zu deren konkreter Nutzung bzw. Nichtnutzung vorhanden, wie dies für den traditionellen ÖPNV der Fall ist, mit Erhebungen wie Mobilität in Deutschland (MiD), Deutsches Mobilitätspanel (MOP) oder System repräsentativer Verkehrsbefragungen (SrV). Solche *Nutzereinstellungen* werden derzeit im Reallabor Schorndorf untersucht, in dem man mit Kunden eines Pilotprojektes aktiv in Austausch tritt (Müller et al., 2017, S. 42). Dabei sind mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), der Hochschule Esslingen, Knauss Linienbusse, der Stadtverwaltung Schorndorf, dem Verkehrs- und Tarifverbund Stuttgart und dem Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung der Universität Stuttgart sechs Partner am Reallabor beteiligt. Das 2016 gestartete Projekt hat schon früh sehr heterogene Kundenwünsche identifiziert, unter anderem in Bezug auf die einzusetzenden Fahrzeuge und deren Innenraumgestaltung sowie über den Mobilitätsdienst hinausgehende Serviceangebote wie WLAN und vieles mehr (Reallabor Schorndorf, 2017, S.1 5). Zum Teil konträre Anforderungen der verschiedenen Generationen und Nutzergruppen zeigen die Herausforderungen, denen sich ein öffentlich betriebenes DRT-Serviceangebot (in der näheren Zukunft) ausgesetzt sehen wird:

Während für die Senioren planbares Verhalten mit Voranmeldungszeiten von mehreren Tagen(!), Bestellung per Telefon und nicht per App, kurze Wege zum Bus, Sicherheit im Fahrzeug, kalkulierbare und geringe Tarife und eine Nutzung nur während der Tagstunden charakteristisch sind, spielen beispielsweise für die derzeitige ÖV-Nicht-Nutzer-Gruppe die Bedienzeit in den Abend- und Nachtstunden insbesondere am Wochenende und das bediente Einzugsgebiet eine wesentliche Rolle. (Lehnert et al., 2018, S. 11).

Vollumfänglich umgesetzte DRT-Massenservices implizieren eine Veränderung des uns bekannten Verkehrssystems (Levinson & Krizek, 2017, S. 112-113). Durch massenhaft geteilte Fahrten werden vor allem *positive Effekte für die Umwelt* erwartet. Die Verringerung des motorisierten Verkehrsaufkommens würde unter anderem die Abhängigkeit von fossilen Energien genauso senken wie die Flächenversiegelung für neue Straßen und Parkplätze und es bestehen große Hoffnungen bezüglich der zu erwartenden Emissionsreduktion im Personenverkehrssektor (Dia & Javanshour, 2017, S. 287-88). Simulationsanalysen haben jedoch aufgezeigt, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass DRT generell zu einem nachhaltigeren ÖPNV-Sektor führt, sondern „DRT needs to be considered in relative terms to the competing alternatives (typically bus or car)“ (Ryley et al., 2014, S. 371). Konkret werden die Emissionen von DRT vom jeweiligen Straßennetz (Prud’homme et al., 2012, S. 146) und der vorliegenden Siedlungsstruktur sowie dem übrigen Verkehr bestimmt (Fagnant & Kockelman, 2014, S. 12). Für die Analyse der Emissionen werden im Verkehrssektor traditionell *Kohlenstoffdioxid* (CO₂), *Feinstaub* (PM) und die sogenannten *Schadstoffe* - zusammengefasst als Kohlenstoffmonoxid (CO), verschiedene flüchtig organische Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO_x) - verwendet (Diana et al., 2007; Prud’homme et al., 2011).

Trotz aller bisher vorgestellten positiven Aspekte, die flexible Bedienformen beinhalten, sind diese kein Selbstläufer und in der Vergangenheit oft gescheitert: In Deutschland sind beispielsweise verschiedene Formen von Anrufbussen meist nach nur kurzen Betriebszeiten wieder eingestellt worden (Mehlert, 2001, S. 49-100) und auch international wurden 72 DRT-Projekte untersucht und davon elf gescheiterte detailliert beschrieben (Enoch et al., 2006, S. 5-11). Demnach sind die Hauptgründe für das Scheitern zu geringe bzw. unspezifische Marketingmaßnahmen, vor allem während der Einführung, und ein zu hoher Grad an Flexibilität, der einerseits von den Nutzern nicht gefordert wurde und andererseits zu hohe Kosten generierte. Dennoch herrscht viel Dynamik im DRT-Sektor, besonders seit der Gründung von *Uber Technologies Inc.* im Jahre 2009, welches über seine Online-Plattform private (und zum Teil gewerbliche) Fahrer mit Reisenden verbindet (*Ride Sharing*) und damit den traditionellen ÖPNV unter Druck setzt. Einige Autoren sehen für die Zukunft sogar eine „‘Uberisation’ of public transport“ (Hensher, 2017, S. 87) voraus, das heißt umfassende Mobilitätsdienstleistungen die verkehrsträgerunabhängig angeboten werden und digital gestützt sind (Fishman, 2012, S. 9). Tatsächlich wird *Uber*

von der kanadischen Kleinstadt Innisfil seit 2016 offiziell beauftragt und subventioniert, um *on demand* Mobilität für seine Bürger zur Verfügung zu stellen und somit kein eigenes und kostspieliges Nahverkehrsunternehmen unterhalten zu müssen (Smith, 2017). Beispiele für öffentlich betriebene DRT-Services in Deutschland sind *BerlKönig* in Berlin, *MyBus* in Duisburg, *LÜMO* in Lübeck, *FreYfahrt* in Freyung, das bereits angesprochene *Reallabor Schorndorf* und zum Teil kann auch das mit der *Deutschen Bahn* kooperierende *CleverShuttle* in Berlin, Hamburg, München und Leipzig darunter gezählt werden.¹ Von keinem dieser Beispiele stehen derzeit Daten zur Verfügung, weil sie alle erst in den letzten ein bis zwei Jahren eingeführt wurden oder erst 2018 starten.

Es ist dem Autor der vorliegenden Thesis nicht bekannt, dass reliable und valide Daten für einen Vergleich von traditionellem Linienbetrieb mit DRT-Service in Deutschland oder anderswo verfügbar sind. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass z.B. *Anrufbusse* nur sehr selektiv an Wochenendtagen oder Abendstunden verkehren oder der *paratransit* nur bestimmten Personen zu Gute kommt und dass beide Angebote keine DRT-Services im engeren Sinne darstellen. Daher fußen die Annahmen in den wissenschaftlichen und populärwissenschaftlichen Auseinandersetzungen derzeit - neben einigen qualitativen Untersuchungen - größtenteils auf *Simulationsanalysen*:

As a result, simulations are needed to estimate long-term viability. These simulations should incorporate a variety of factors in order to determine viability, for example, the street network layout and land-use, operator costs, pricing schemes, and (potential) demand for the proposed service. (Ronald et al., 2015, S. 405)

Speziell Agenten-basierte Simulationen (siehe Kapitel 4) bieten dabei den Vorteil, dass sie die Auswirkungen von angebotenen DRT-Services abschätzen können und somit ÖPNV-Betreibern Vorstellungen über die zu erwartenden Größenordnungen vermitteln, z.B. in Bezug auf die benötigte Fahrzeuganzahl oder Fahrzeugkilometer (Fz-km). In diesem Sinn wendet auch diese Masterarbeit zum Erlangen von *generischem Wissen* über DRT-Services in ländlichen, nachfrageschwachen Räumen eine Multi-Agenten Simulationsanalyse mit dem Fallbeispiel Colditz an.

¹Diese Auflistung hat nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Es existieren zahlreiche weitere Beispiele (Mehlert & Schiefelbusch, 2017). Ein privates Beispiel ist *Blablacar*, aber diese Masterarbeit untersucht DRT-Angebote für die tagtägliche Fortbewegung, eingesetzt von ÖPNV-Betreibern anstelle von traditionellen Linienverkehren.

Mobilität in den ländlichen Räumen

3.1 Die ländlichen Räume

Bis Mitte des 20. Jahrhunderts wurde nur von dem ländlichen Raum, als homogener Raumtyp zum Zwecke der dichotomen Abgrenzung zum urbanen Raum, gesprochen. Im heutigen Verständnis erkennt man die Vielfalt an und spricht von den *ländlichen Räumen*. Einerseits gleichen sich die Lebensstile der Land- und Stadtbevölkerungen zusehends an und andererseits sind ländliche Räume nur subjektiv als solche wahrnehmbar und diskursiv konstruiert (Küpper, 2016, S. 30). In der wissenschaftlichen Raumplanung werden ländliche Räume zumeist über die Kriterien Bevölkerungsdichte und Entfernung zu Großstädten abgegrenzt. Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2017) benutzt eine solche *Schwellwertmethode* und unterteilt in „ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen“ und „dünn besiedelte ländliche Kreise“.

Die Prozesse des modernen *demografischen Wandels* werden mit den vier Dimensionen Schrumpfung/Wachstum, Alterung, Singularisierung und Heterogenisierung erklärt (Wehrhahn & Sandner Le Gall, 2016, S. 64-85). In den ländlichen Räumen wirkt sich der demografische Wandel vor allem auf die Alterungs- und Schrumpfungsdimension aus. Dies führt zu einer massiven Dynamik der Anzahl an Senioren und einer starken Ausdünnung der sozialen Netze (Bucher & Schlömer, 2009, S. 52). Junge Menschen ziehen in urbane Räume, die zurückbleibende Bevölkerung wird immer älter und geringer, sodass auch das Infrastrukturangebot unter Druck gerät und abnimmt. Diesen Herausforderungen begeg-

net man unter anderem mit dem Konzept der *Selbstverantwortungsräume*, wobei über ein enormes ehrenamtliches Engagement in vielen ländlichen Räumen unterschiedlichste Aufgaben wie z.B. Bürgerbusse (Schiefelbusch & Bounin, 2017, S. 54-55) durch nichtstaatliche Akteure erbracht werden (Stielike, 2014, S. 73-74). Ehrenamtlich betriebene Bürgerbusse allein sind jedoch nicht in der Lage die im Artikel 72 Grundgesetz verankerte *Herstellung gleichwertiger Lebensverhältnisse* in Deutschland sicherzustellen. Ein angemessenes ÖPNV-Angebot zu gewährleisten stellt eine Daueraufgabe dar und es bedarf dafür nach wie vor professioneller Strukturen.

3.2 Physische Raumüberwindung

Der Begriff Mobilität wird im allgemeinen Sprachgebrauch mit Beweglichkeit von Menschen und Gütern assoziiert. Aber schon im lateinischen Ursprung des Wortes *movere* verbirgt sich eine mögliche weitere Übersetzung mit *beeinflussen*. Daher gibt es sowohl eine *räumliche Dimension* von Mobilität, die Fragestellungen zur konkreten physischen Raumüberwindung (horizontale Positionswechsel) thematisiert, als auch eine *soziale Dimension*, die auf die Möglichkeiten bzw. die Teilhabe am sozialen sowie wirtschaftlichen Leben (vertikale Wechsel) abzielt (Zoche et al., 2002, S. 8). Im Folgenden werden im Kontext der Verkehrswissenschaften/-geographie die physische und soziale Dimension sowie die digitale Mobilität spezifiziert.²

Mobilität im Sinne der physischen Raumüberwindung wird in den ländlichen Räumen vom Individualverkehr dominiert, vor allem vom Motorisierten Individualverkehr (MIV) (Fichtner & Wiegand, 2018, S. 124). In ländlichen Kreisen nutzen 46% den MIV als Fahrer und 16% als Mitfahrer; gemessen an der Verkehrsleistung entfallen sogar 58% auf MIV-Fahrer und 24% auf die MIV-Mitfahrer (Infas & DLR, 2010, S. 45). Bei diesen Anteilen verwundert es nicht, dass in den ländlichen Räumen oft Mobilität mit Verkehr gleichgesetzt bzw. verwechselt wird. Die Begriffe *Mobilität* und *Verkehr* grenzen sich wie folgt voneinander ab bzw. stehen in folgendem Zusammenhang:

Realisierte Mobilität ist realisierte Beweglichkeit, ist die Befriedigung von Bedürfnissen durch Raumveränderung (kurz: Mobilität). Verkehr ist das Instrument, das man dann für die konkrete Umsetzung der Mobilität benötigt. Verkehr umfasst Fahrzeuge, Infrastrukturen und die Verkehrsregeln und ist auch sehr gut messbar. (Becker et al., 1999, S. 71).

²Es existieren noch weitere Definitionen von Mobilität in anderen Fachrichtungen, für diese Masterarbeit werden jedoch nur die angesprochenen berücksichtigt.

Der ÖPNV Modal Split - der Anteil der zurückgelegten ÖPNV-Wege gemessen an allen Wegen zum Zwecke der physischen Raumüberwindungen - beträgt in den ländlichen Räumen gerade einmal 5% (Infas & DLR, 2010, S. 45). Dies ist einerseits „niedriger Bevölkerungsdichten und dementsprechend geringer Verkehrsplanung“ (Kagermeier, 2004, S. 20) geschuldet, andererseits den Herausforderungen demografischer Wandlungsprozesse (Steinrück & Küpper, 2010, S. 5-6). Aufgrund dieser enormen Herausforderungen konzentriert sich der ländliche ÖPNV vielerorts auf den *Schülerverkehr* - „das Rückgrat des ÖPNV“ (Steinrück & Küpper, 2010, S. 30) -, da dieser eine Pflichtaufgabe darstellt und bezuschusst wird (siehe dazu Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) (2018)). Doch trotz staatlicher Ausgleichszahlungen ist auch der Schülerverkehr mancherorts unter Druck aufgrund sinkender Schülerzahlen und disperser Siedlungsstrukturen. Der Begriff der *Remanzkosten* beschreibt das Dilemma der ÖPNV-Betreiber am besten: Die Leistung pro Nutzer verteuert sich durch Unteilbarkeiten und unausgeschöpfte Größenvorteile (Steinrück & Küpper, 2010, S. 30-31). Die Finanzierung des ÖPNV ist in Deutschland mit dem *Gesetz zur Regionalisierung des ÖPNV (Regionalisierungsgesetz, RegG)* allgemein geregelt und mit dem *Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG)* werden Finanzhilfen gestattet, wie zum Beispiel die Zuschussungen des jeweiligen Schülerverkehrs durch die Bundesländer (Winter, 2005, S. 7-10).

Der ländliche ÖPNV sollte nicht allein auf den Schülerverkehr reduziert werden, sondern er dient auch der Sicherung der *Daseinsvorsorge*, also dem Zweck der physischen Raumüberwindung für Gesundheits- und Nahversorgung der ländlichen Bevölkerung. „Menschen ohne Zugang zu einem Fahrzeug, Schulkinder, Jugendliche, ältere Menschen und Menschen mit physischen Mobilitätseinschränkungen“ (Riesner, 2014, S. 43) sind auf den ÖPNV angewiesen, um Bildungseinrichtungen und die nächstgelegenen Daseinsvorsorgestandorte zu erreichen (Wehmeier & Koch, 2010, S. 460ff). Für ÖPNV-Dienstleistungen werden daher seit mehr als drei Jahrzehnten unterschiedliche Formen der flexiblen Bedienung getestet und untersucht, um damit diesen spezifischen Herausforderungen in den ländlichen Räumen zu begegnen (BMVBS & BBSR, 2009a, 2009b). Die Abbildung 3.1 zeigt schematisch die bisherigen Formen der ÖPNV-Flexibilisierung in Deutschland. Der erste Rufbus startete 1977 in Friedrichshafen (Mehlert & Schiefelbusch, 2017, S. 7), gefolgt von zahlreichen weiteren flexiblen Formen der Bedienung. Die Palette der flexiblen Angebotsformen umfasst dabei den Anrufbus im Bedarfsfall (L-Bus), den Anrufbus im Richtungsbandbetrieb (R-Bus), das Anruf-Sammeltaxi im Richtungsband-

betrieb (R-AST), den Anrufbus im Flächenbetrieb mit Haustürbedienung (F-Bus) und den Anrufbus im Flächenbetrieb mit Haltestellenbedienung (RF-Bus) (BMVBS & BBSR, 2009a, S. 30-34). Die Unterschiede dieser Angebote können leicht anhand Abbildung 3.2 im Einzelnen nachvollzogen werden.

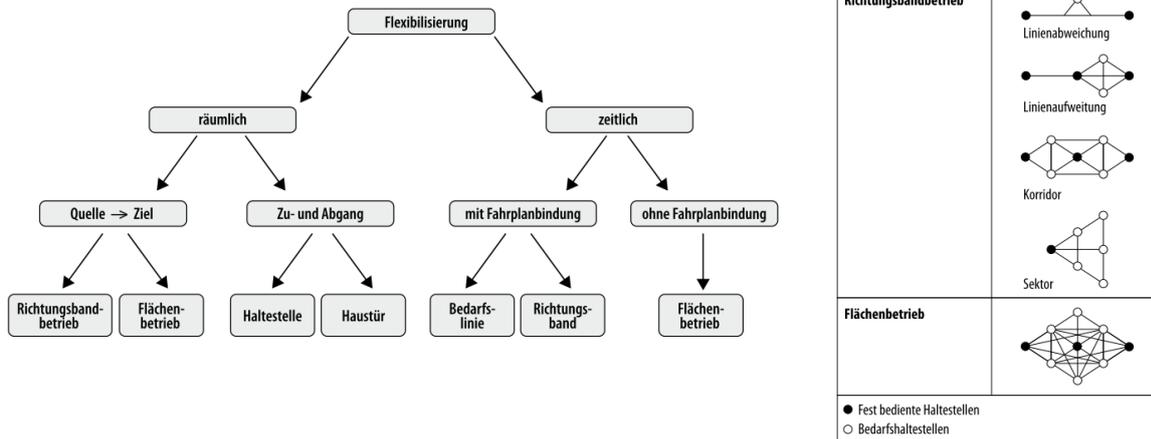


Abbildung 3.1: Links sind die Möglichkeiten der räumlichen & zeitlichen Flexibilisierung allgemein und rechts die Möglichkeiten der räumlichen Flexibilisierung (Originalquelle Mehlert 1998) des ÖPNV zu sehen (BMVBS & BBSR, 2009a, S. 26).

Betriebsform	Fahrplan	Anmel- dung	Zu- und Abgang			
			Haltestelle		Haustür	
			Einstieg	Ausstieg	Einstieg	Ausstieg
Linie	mit	ohne	Linienbus		Kombination nicht existent oder relevant	
Bedarfslinie	mit	mit	L-Bus			
Richtungs- band	mit	mit	R-Bus*			R-AST
Fläche	ohne	mit	R-AST		R-AST	
			RF-Bus		F-Bus	
			Taxi			

* in Einzelfällen auch Bedienung von abgelegenen Gehöften
AST = Anruf-Sammel-Taxi

Abbildung 3.2: Übersicht bestehender flexibler Angebotsformen (Originalquelle Sieber 2004) im ländlichen ÖPNV (BMVBS & BBSR, 2009a, S. 30).

Die Entwicklung von *on demand* ÖPNV-Mobilität wird in drei Phasen eingeteilt: die Phase der Großrechner (etwa 1970 bis 1985), die Phase der Personalcomputer, des Internets (etwa 1985 bis 2010) und die Phase des mobilen Internets und der Apps (seit etwa 2010) (Mehlert & Schiefelbusch, 2017, S. 7-10). DRT-Services sind Teil der dritten und derzeitigen Phase, die mit digitaler Unterstützung den Kunden deutlich dynamischere Mobilitätsangebote bieten kann, als dies mit einfachen Rufbussen etc. der Fall ist. Wie

bereits in Kapitel 2 erwähnt, sind Rufbusse und andere Formen flexibler Bedienung in den ländlichen Räumen zwar keine Neuheit, aber sie entsprechen im engeren Sinne auch nicht den hier untersuchten DRT-Services. Dieses Detail ist für den weiteren Verlauf der Masterarbeit zu berücksichtigen und soll deshalb an dieser Stelle noch einmal hervorgehoben werden:

Ein qualitativer Unterschied zu den bisherigen Formen besteht in der Ambition der neuen Anbieter: Der Rufbus, das Taxi, die Fahrgemeinschaft oder der Sozialfahrdienst sind entweder faktisch oder durch ihren rechtlichen Rahmen oder die Angebotsgestaltung als einer von mehreren Bausteinen im Gesamtangebot zu verstehen. Eine solche Einordnung ist den neuen Anbietern fremd; ihre Angebote bilden nach ihrem Selbstverständnis künftig eine Universallösung. (Mehlert & Schiefelbusch, 2017, S. 10-11)

3.3 Digitale Mobilität

Der Begriff der *digitalen Mobilität* ist mit den vielfältigen Möglichkeiten der IuK eng verbunden. Unter diesen Begriff fallen sowohl die *virtuelle Mobilität*, also beispielsweise Online Shopping (Luley, 2006), als auch die Unterstützung der *physischen Mobilität* mit Geräten und Apps, um beispielsweise multimodale Wegeketten zu ermöglichen, also die verkehrsträgerübergreifende und effiziente Nutzung verschiedener Verkehrsmittelangebote (Schmoll et al., 2014). Die Abbildung 3.3 zeigt den Zusammenhang zwischen digitaler - physischer - virtueller Mobilität schematisch auf. DRT-Services stellen eine Form der digitalen Mobilität dar:

Die digitale Mobilität ist die durch Technik unterstützte Bewegung in physischen und virtuellen Räumen. Sie unterstützt und erweitert die Möglichkeiten der Menschen mobil zu sein, indem sie eine höhere Flexibilität und mehr Bewegungsfreiheit für die Nutzer ermöglicht. Dies schließt auch die mobile Nutzung von Anwendungen und Diensten ein, deren Ziel nicht direkt die Unterstützung von Mobilität ist. (Schmoll et al., 2014, S. 7)

Die zunehmende Digitalisierung wird für den ÖPNV-Sektor prinzipiell als *Chance* gesehen (u.a. vom Verkehrsclub Deutschland (VCD) (o. J.)), da mit deren Hilfe in der mittel- bis langfristigen Zukunft flexible, kundenfreundliche, verkehrsträgerunabhängige sowie preiswerte öffentliche Mobilitätsangebote umgesetzt werden können, mit autonomen Fahrzeugen und vermutlich weitgehend CO₂-neutral (Nagel et al., 2018, S. 1-2). All dies trägt zur Attraktivitätssteigerung des Sektors bei und birgt das Potential Neukunden zu

gewinnen. Aktuell erleichtern bereits zahlreiche Apps und digitale Haltestellenanzeigen den Nutzern die Bedienung des ÖPNV (Viergutz, 2017, S. 70-75), sodass diese nicht mehr Abfahrts-, Linien- und Tarifpläne studieren müssen. Darüber hinaus gestaltet kostenfrei zur Verfügung gestelltes WLAN in Bussen und Zügen die Fahrt mit ÖPNV-Fahrzeugen attraktiv und kann dadurch z.B. Berufspendler vom MIV gewinnen, da diese nun während ihrer Fahrten gleichzeitig arbeiten können.

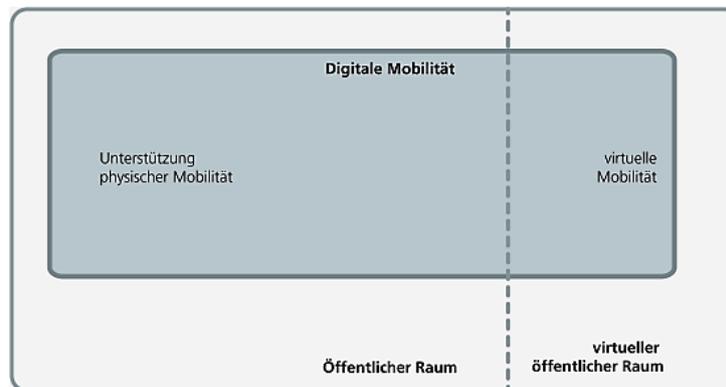


Abbildung 3.3: Zusammenhang digitale - physische - virtuelle Mobilität (Schmoll et al., 2014, S. 7).

Die Digitalisierung allgemein und vor allem auch die Nutzung von DRT-Services birgt jedoch auch *Risiken*. Ein Risiko ist z.B. der *gläserne Fahrgast*; „Ortsbezogene Daten machen eine Person in Verbindung mit den Diensten Planung, Ticketing, Zugang, On-Trip-Information etc. transparent.“ (VCD, o. J.). Der sensible Umgang mit den umfangreichen personalisierten Verkehrsdaten, die zwangsläufig bei der Nutzung von Informations- und Buchungs-Apps geniert werden, muss daher gewährleistet sein. Der Begriff *digital divide* steht zudem für die These, dass die Möglichkeit der Internetnutzung lediglich bestimmten Gruppen zugutekommt. Die Diskussion basiert hauptsächlich auf sozio-ökonomischen Indikatoren wie Alter, Geschlecht, Einkommen, Rasse und dem jeweiligen Wohnort (Velaga et al., 2012, S. 105). Die zunehmende Komplexität der Soft- und Hardware hat zur Folge, dass die technische Ausstattung, die Anbindung an Server, die Schnelligkeit der Prozesse und die Höhe der Kosten wichtige Faktoren der Nutzung des Internets bzw. von Apps sind, wohingegen als Gründe für die Nichtnutzung Alternativen zum Internet, finanzielle Gründe, grundsätzliche Ablehnung sowie qualifikatorische Hürden infrage kommen (Kubicek, 2003; Selwyn, 2003; Gerhards & Mende, 2004; Lanzke, 2010). Gemäß einer repräsentativen Studie nutzten im Jahre 2013 90% der ländlichen Einwohner ein Handy, aber nur 36% ein Smartphone (Ahrens, 2015, Tab. 3.8). Die Daten zur Smartphone-Nutzung in

Deutschland haben sich in den letzten Jahren aufgrund der Dynamik im IuK-Sektor erheblich geändert. In Abbildung 3.4 kann der stete Anstieg der Nutzerzahlen bis zu derzeit 57 Millionen entnommen werden; ein Anstieg von über 20 Millionen seit dem Jahr 2013. Aktuellere Daten zur konkreten Smartphone-Nutzung der ländlichen Bewohner konnten nicht gefunden werden, diese muss jedoch zwangsläufig, bei einer Einwohnerzahl von ca. 82 Millionen in Deutschland, ebenfalls gestiegen sein. Die sogenannten *navigational skills* beziehen sich auf das Know-how, sich über individuelle Lernprozesse, Manuals oder soziale Kontakte Informationen zur Nutzung des Internets zu beschaffen (Kubicek, 2003). Diese *navigational skills* sind besonders in älteren Bevölkerungsschichten schwächer ausgeprägt, sodass eine Benutzung zur selbstständigen Versorgung mittels Computer, Smartphone und Internet erschwert ist. Diese Gegebenheiten müssen bei der Diskussion und bei der Einrichtung flexibler und innovativer ÖPNV-Konzepte in Form von DRT (zumindest derzeit noch) bedacht werden. Es sollten keine Systeme eingeführt werden, die Personengruppen per se ausschließt, erst recht nicht die wichtige ÖPNV-Zielgruppe der Senioren (Aigner-Breuss & Braun, 2011, S. 193). Es sollte vielmehr neben der Bereitstellung einer App auch nach wie vor die Möglichkeit der Bestellung über Telefon bestehen, wenn öffentliche Mobilitätskonzepte jenseits des traditionellen Linienbusses umgesetzt werden (Mehlert & Karl, 2014, S. 31-32).

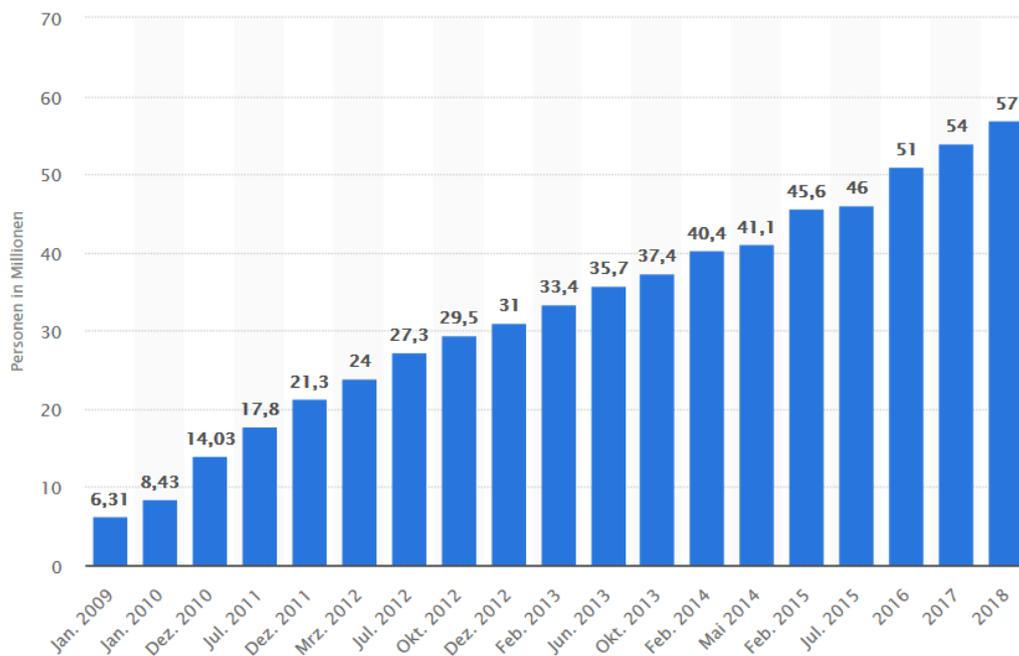


Abbildung 3.4: Smartphone-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2018 (in Millionen) (Statista, 2018).

3.4 Soziale, wirtschaftliche & politische Teilhabe

Die *soziale Dimension* von Mobilität im Kontext der Verkehrswissenschaften/-geographie zielt auf die Möglichkeiten des bzw. auf die Teilhabe am sozialen, wirtschaftlichen und auch politischen Leben ab. Im Gegensatz zur physischen Mobilität wird also nicht gefragt wie und wo Menschen mobil sind, sondern, ob sie überhaupt mobil sein können aufgrund der jeweiligen Rahmenbedingungen die ihnen gegeben sind.

Dabei kann der Begriff als Individualkategorie das Verhalten einzelner Individuen beschreiben, zum anderen als Systemkategorie die Eigenschaften eines gesellschaftlichen Systems beinhalten. [...] Auf der Systemebene ist Mobilität ein grundlegendes Bedürfnis der modernen Gesellschaft und Voraussetzung für die Teilhabe an sozialen, wirtschaftlichen und politischen Handlungen, die heute nicht mehr am zentralsten Punkt einer Gemeinschaft abgehalten werden, sondern aufgrund der Ausdifferenzierung der Gesellschaft vielfältige Verbindungsstrukturen mit sich gebracht und somit den Bedarf nach Raum- und Zeitüberwindungen geweckt haben. (Zoche et al., 2002, S. 8).

Die Fachdisziplinen *Bevölkerungsmobilität* und *Alltagsmobilität* untersuchen daher Mobilität als *Gut* an sich (FIS, 2017; Mehlhorn, 2001). In den ländlichen Räumen ist dieses Gut dominiert durch den MIV und der ÖPNV spielt eine untergeordnete Rolle (Wehmeier & Koch, 2010, S. 461-463). Wer folglich keinen Zugang zu einem Automobil hat, sei es dass er sich kein eigenes Automobil leisten kann oder keinen Führerschein besitzt, der kann schnell ausgeschlossen sein. Der ländliche ÖPNV leidet schließlich aufgrund der niedrigen Bevölkerungsdichten und den damit einhergehenden wirtschaftlichen Problemen der Betreiber unter dem sogenannten *accessibility problem*, welches zu sozialen Härtefällen und teils zur Isolation von Menschen führt, die in abgelegenen Regionen leben, welche vom ÖPNV nicht bedient werden können (Nutley, 2001). Kinder, Jugendliche und vor allem ältere Menschen sind jedoch oft auf das zur Verfügung stehende ÖPNV-Angebot angewiesen und dadurch in ihrer Teilhabe am gesellschaftlichen Leben beschränkt (Riesner, 2014, S. 42-43). Das jeweilige Angebot prägt eminent ihr Leben, vor allem mit Blick auf ihre Nahversorgungs- und Freizeitgestaltungsmöglichkeiten, da sie sich nach einem feststehenden Fahrplan mit gegebenen Zeiten und Orten richten müssen. Wenn Menschen in den ländlichen Räumen *on demand* Mobilität zur Verfügung gestellt wird, kann dies ihre soziale, wirtschaftliche & politische Teilhabe erhöhen, soweit sie diese denn auch nutzen möchten, Wahlmöglichkeiten im Hinblick auf Nahversorgung und Freizeitgestaltung überhaupt bestehen und der niedrighschwellige Zugang gewährleistet ist (siehe *digital divide* im Kapitel 3.3).

Methodik

4.1 Agenten-basierte Modellierung

Die vorliegende Arbeit wendet die Methode der Szenarioanalyse an. Szenarios sind *plausible Beschreibungen* über zukünftige Entwicklungen, basierend auf konsistenten Annahmen (Alcamo, 2008). Sie stellen dabei *hypothetische Folgen* von Ereignissen auf, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente aufmerksam zu machen. Darunter fallen explorative vs. normative, fore-casting vs. back-casting, qualitative vs. quantitative, process- vs. product-oriented Szenarios (van Notten, 2006). Die vorliegende Untersuchung ist in diesem Sinne ein exploratives, vorrausschauendes, quantitatives, produkt-orientiertes Szenario, welches mit Hilfe einer computergestützten Simulation durchgeführt wird.

Agenten-basierte Modelle (ABM) sind eine spezielle Technik der Szenarioanalyse und eignen sich besonders gut bei quantitativ-explorativen Fragestellungen. Sie unterscheiden sich stark von den vielfach verwendeten Methoden der klassischen Statistik. Bei letzteren wird die abhängige Variable durch eine oder mehrere unabhängige Variable(n) mit Hilfe von mathematischen Gleichungen beschrieben, die Daten werden extrapoliert und mit diesen (statischen) Werten werden Vorhersagen innerhalb von Vertrauensbereichen getätigt. Bei ABM-Simulationsmodellen ist der Ansatz jedoch ein anderer: Es wird versucht ein System abzubilden bzw. nachzustellen, mit all seinen Elementen, Prozessen und kausalen Zusammenhängen. Diese Simulationen können komplexe Systeme detailgenau studieren und auch Interaktionen zwischen mehreren (Teil-)Systemen untersuchen, beispielsweise

Interaktionen zwischen den Teilsystemen Mensch-Umwelt oder Mensch-Wirtschaft. ABMs versuchen Systeme, Beziehungen, (Langzeit-/Kurzzeit-) Effekte und Prozesse zu verstehen, indem sie Hypothesen testen oder generieren.

ABMs helfen Makrophänomene zu verstehen, indem vielfältige Interaktionen auf der Mikroebene nachgestellt werden (Holland, 1992). Konkret bedeutet dies Folgendes: Mit Hilfe der gesamten Bewegungen aller *Agenten*, welche die Mikroebene repräsentieren, also Individuen oder Haushalte, die sich nach gewissen Entscheidungsregeln in einem System bewegen, können auf der Makroebene Muster untersucht werden. Ein Agent ist ein Avatar, eine *virtuelle Kunstfigur*, der in einer *virtuellen Realität* Bewegungen vollführt, Entscheidungen trifft und vieles mehr, je nach Fragestellung. Somit entsteht ein *virtuelles Labor*, welches ein mechanistisches Verständnis von Prozessen aufweist (Dibble, 2006). Verschiedene Prozesse können im Folgenden an- und ausgeschaltet werden, um die Unterschiede zu studieren und Empfehlungen für gesellschaftliche, politische, wirtschaftliche und andere Akteure zu geben.

ABMs haben den Vorteil, dass räumliche Heterogenitäten genauso wie zeitliche Dynamiken und Rückkopplungen untersucht werden können, indem mehrere mögliche Szenarios miteinander verglichen werden. Nachteile sind die enorm großen Datenmengen, die benötigt werden bzw. die detaillierten Begründungen für plausible Annahmen bei unzureichender Datenverfügbarkeit. Zudem sind umfassende technische Fähigkeiten nötig, vor allem im Bereich Programmierung, um ABM-Szenarios zu konzipieren.

ABMs sind keine Seltenheit in den verschiedenen Disziplinen der Geo- und Raumwissenschaften (Heppenstall et al., 2012) und werden auch sehr häufig in der Verkehrsgeographie verwendet (Miller, 2017, S. 118-132). Dabei werden Fragestellungen untersucht, wie z.B. Änderungen des Mobilitätsverhaltens, in welchem Umfang Sharing-Angebote genutzt werden oder welche Infrastruktur geplant werden muss für den Fall einer Masenevakuierung bei Extremereignissen. Die vorliegende Arbeit untersucht explorativ die Effekte von Angebotserweiterungen im ländlich geprägten ÖPNV und generiert Hypothesen für die folgende **Fragestellung**:

Ist es vor dem Hintergrund demografischer, ökologischer, räumlicher & wirtschaftlicher Aspekte erstrebenswerter für ÖPNV-Kunden bzw. -Anbieter und auch aus gesamtgesellschaftlicher Sicht ein flexibel-nachfrageorientiertes Angebot (DRT) zu nutzen bzw. einzuführen gegenüber einem traditionellen & starren Linienbusangebot?

4.2 MATSim

MATSim ist eine Open Source Simulationssoftware³, die federführend von der Technischen Universität Berlin (TU Berlin) um den Lehrstuhl von Kai Nagel und der Eidgenössisch Technischen Hochschule Zürich um den Lehrstuhl von Kai Axhausen entwickelt und betreut wird (Nagel & Axhausen, 2016). Der *mikroskopische* Simulationsansatz wird mit der Programmiersprache JAVA umgesetzt und es wird eine *aktivitätsbasierte Herangehensweise* (Miller, 2017, S. 129-134) genutzt. Aktivitätsbasiert bedeutet dabei, dass jedem Agenten ein individueller Tagesplan zugewiesen wird und dieser Tagesplan Aktivitäten enthält wie beispielsweise Arbeit, Bildung, Einkaufen, Freizeit oder zu Hause sein. Die Aktivitäten finden an koordinatengenau hinterlegten Orten statt, sind mit Zeiten versehen und untereinander mit Wegen verbunden, wenn sie an unterschiedlichen Orten stattfinden. Es werden demnach konkrete Wegemuster nachgestellt, wie z.B. „Wohnen-Arbeit-Wohnen“, „Wohnen-Schule-Freizeit-Wohnen“ oder andere Muster. Simuliert wird typischerweise ein 24-Stunden-Tag und es können verschiedene Systembeschränkungen eingefügt werden, die die Agenten in einem gewissen geographischen Raum oder unter gewissen ökonomischen oder sonstigen Rahmenbedingungen handeln lassen. Die Simulationsergebnisse liegen am Ende in sehr hohem Detailgrad vor und es kann, falls erwünscht, jeder einzelne Agent auf der Mikroebene über den gesamten Tag sekunden- und koordinatengenau verfolgt werden. Die Menge aller Agenten wird *Population* genannt und stellt die Makroebene dar, welche von primärem Interesse für die meisten Studien und auch für diese Masterarbeit ist.

MATSim nutzt für die möglichst realistische Umsetzung der Simulationen einen *iterativen Prozess*, der auf dem Prinzip eines *co-evolutionären Algorithmus* basiert (Horni et al., 2016, S. 7). Iterativ heißt, dass in mehreren Durchläufen der einzelne Agent bzw. alle Agenten ihren Tag immer wieder und wieder durchlaufen, bis sie den optimalen Tagesablauf für sich gefunden haben. In jedem Durchlauf wird einem gewissen Teil der Agenten gestattet, beispielsweise seine Zeiten anzupassen, andere Routen oder Orte zu wählen oder den Verkehrsmodus zu wechseln. Die Abbildung 4.1 zeigt schematisch den Verlauf des iterativen Prozesses: Die Agenten führen anfänglich starre Tagespläne (*initial demand*) aus (*execution* oder auch öfters *mobsim* genannt, also die Mobilitätssimulation der Agenten, um von Aktivität zu Aktivität zu gelangen) und bekommen dafür eine Note (*scoring*).

³Geführt unter der General Public License (GNU) Version 2 vom Juni 1991 bei der Free Software Foundation. Siehe <https://github.com/matsim-org/matsim/blob/master/matsim/COPYING>.

Beim nächsten Durchlauf dürfen einige Agenten ihren anfänglichen starren Tagesplan anpassen und austesten, ob sie ihre Aktivitäten optimieren und/oder Wege minimieren können (*replanning*). Dies geschieht schlicht per trial and error, genauso wie Menschen, nachdem sie umgezogen sind oder eine neue Arbeitsstelle antreten, in den ersten Tagen ihre Wege solange austesten, bis die kürzeste, einfachste oder schnellste Variante gefunden wurde. Jeder Agent besitzt dabei eine Art Gedächtnis und merkt sich eine gewisse Zahl an ausgeführten Plänen, z.B. fünf Pläne aus 100 Iterationen. Je nach Strategie merken sich die Agenten dann z.B. nur die ausgeführten fünf Tagespläne mit den höchsten Punktzahlen und verwerfen alle anderen sofort, oder sie merken sich immer nur die letzten fünf Pläne, wählen zufällig fünf Pläne aus oder nutzen sonstige Strategien (Horni & Nagel, 2016, S. 40-41). Schließlich wird nach der erfolgreich durchgespielten Simulation einzig der Plan mit der besten Note untersucht (*analyses*) um Hypothesen zu testen oder zu generieren.

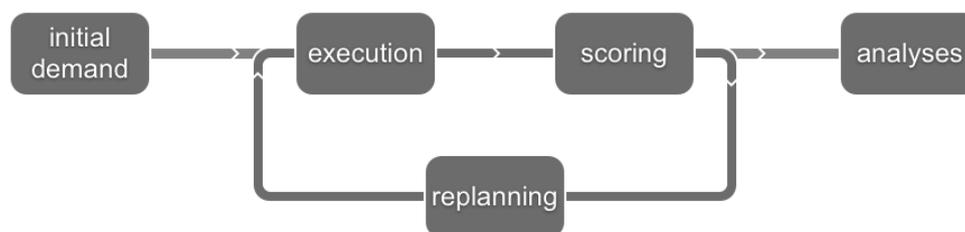


Abbildung 4.1: Der Kreislauf einer Simulation mit MATSim (Horni et al., 2016, S. 4).

Der iterative Prozess wird im Folgenden so lange ausgeführt bzw. der Tag von den Agenten so oft wiederholt, bis sich die durchschnittlichen Noten aller Agenten *stabilisieren* (Horni et al., 2009). Das heißt, es besteht keine vorgegebene Anzahl an nötigen Iterationen; stattdessen wird zur Orientierung der Verlauf der Funktion der Durchschnittsnoten herangezogen. Diese Durchschnittsnotenfunktion nimmt den typischen Verlauf eines evolutionären Optimierungsprozesses an (Abb. 4.2): In den anfänglichen Iterationen sind hohe durchschnittliche Punktgewinne zu beobachten, die sich dann allmählich dämpfen und schließlich gibt es eine lange Phase mit nur sehr geringen Verbesserungen (Eiben & Smith, 2003, S. 29-32). Der theoretische Hintergrund dieses Verhaltens findet sich sowohl in Hägerstraand's *Zeitgeographie* als auch im spieltheoretischen *Nash Gleichgewicht*. Nach Hägerstraand sind Individuen von räumlichen und zeitlichen Rahmenbedingungen in ihren Aktivitäten und Fortbewegungsmöglichkeiten begrenzt, z.B. durch Öffnungszeiten von Geschäften oder Sporteinrichtungen, die zur Verfügung stehende Verkehrsmittelwahl und vielem mehr (Hägerstraand, 1970). Aus diesem Grunde besteht unter den Individuen

Konkurrenz um „time slots to use the infrastructure“ (Horni et al., 2009, S. 87). Das heißt, dass einzelne Menschen ebenso wie die Agenten in MATSim ihre Tagespläne beispielsweise in Bezug auf die konkreten Zeiten anpassen, um nicht in Warteschlangen beim Einkaufen zu geraten oder bei vollen Bussen den Zustieg verwehrt zu bekommen. Mit dieser Konkurrenzsituation als Bedingung wird schließlich das Nash Gleichgewicht aus der mathematischen Spieltheorie für die Durchschnittsnotenfunktion angestrebt. Dies ist der Zustand, in dem keine individuelle Verbesserung durch einseitige Anpassungen mehr möglich ist. Dieses Gleichgewicht wird erreicht, wenn die Funktion der Durchschnittsnoten horizontal verläuft. Ein solches „(stochastic) user equilibrium“ (Horni et al., 2016, S. 8) kann mithilfe des co-evolutionären Algorithmus innerhalb der Simulation abgebildet werden, ein evolutionärer Algorithmus könnte dies nicht.

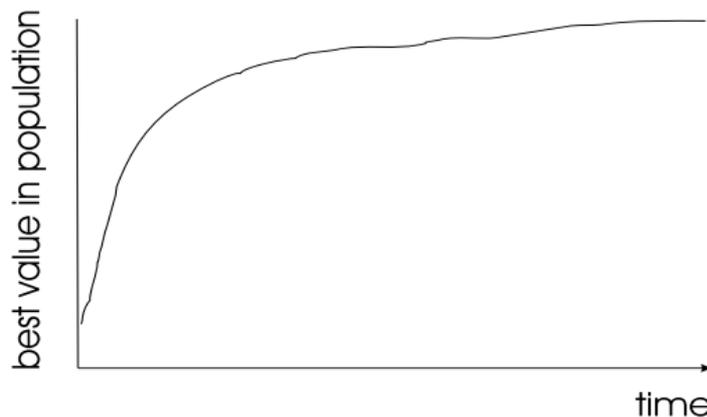


Abbildung 4.2: Typischer Verlauf einer Funktion von Durchschnittsnoten über mehrere Iterationen hinweg (Eiben & Smith, 2003, S. 30).

Der *optimale Tagesablauf bzw. Plan* wird durch eine ökonometrische Nutzenfunktion ermittelt, die dem (Tages-)Plan eines jeden Agenten Noten (*Scores*) auf der Grundlage des jeweiligen Nutzens gibt. Dabei gilt generell: Aktivitäten stiften positiven Nutzen, Wege stiften negativen Nutzen und Verspätungen werden mit Punktabzug sanktioniert. Das mikroökonomische Prinzip der *Grenznutzen* wird für die Benotung der Aktivitäten genutzt. Agenten konsumieren eine Aktivität solange, wie der Genuß einer weiteren Einheit dieser Aktivität unter der Aufbringung einer weiteren Zeiteinheit einen positiven, steigenden Nutzen erbringt. Wird der Grenznutzen einer Aktivität erreicht, beendet der Agent diese und wendet sich einer neuen Aktivität zu, die er über einen Weg erreicht. Alle Noten für alle ausgeführten Aktivitäten und Wege werden aufsummiert und ergeben eine Gesamtnote für den (Tages-)Plan. Eine ausführliche Beschreibung der Notenbildung

und Herleitung der geltenden *Charypar-Nagel Utility Function* findet sich in (Nagel et al., 2016). Die Abbildung 4.3 soll dem Leser dieser Arbeit schnell und einfach den Prozess der Notenbildung schematisch verdeutlichen: Jede Aktivität und auch die Wege erhalten individuelle Noten (oberer Teil der Grafik) und diese werden akkumuliert zur Note des gesamten, tatsächlich ausgeführten (Tages-)Planes (unterer Teil der Grafik). Die Noten für den Plan einer jeden Iteration konkurrieren schließlich miteinander und nur *ein* Plan (je nach gewählter Strategie) wird später für die Analyse verwendet. Agenten sind in diesem Sinne also Nutzenmaximierer (*homo oeconomicus*): sie fahren nicht zum reinen Selbstzweck stundenlang umher oder wählen extra lange Wege.

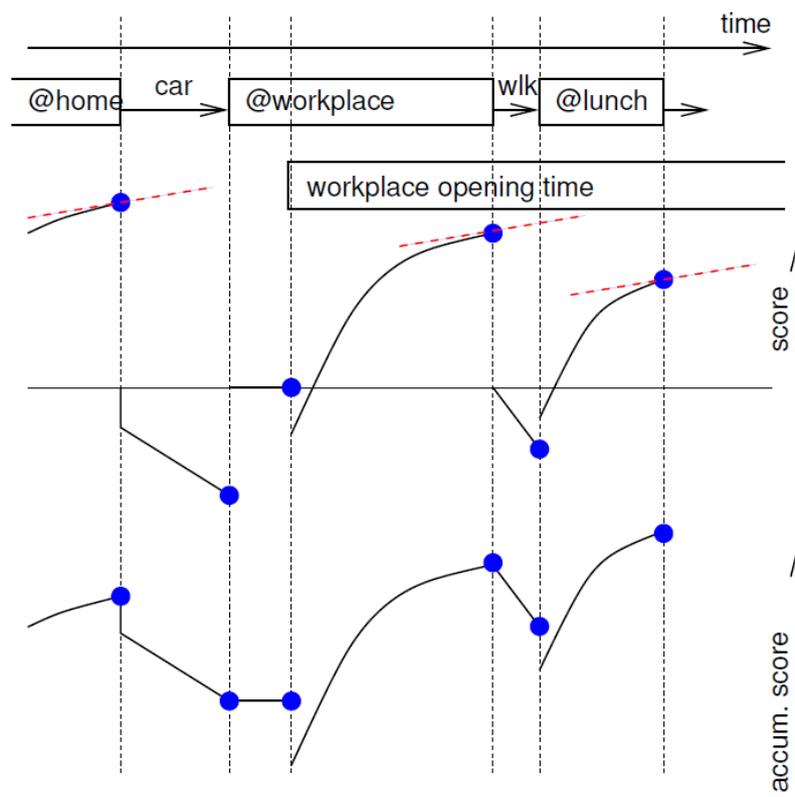


Abbildung 4.3: Gezeigt wird die individuelle Notenbildung (oben) und die aufsummierten Beiträge dieser zur Gesamtnote (unten). Die gestrichelte rote Linie zeigt den Grenznutzen an (Nagel et al., 2016, S. 27).

MATSim ist modular aufgebaut, das heißt je nach Fragestellung werden unterschiedliche Module genutzt. Für die Simulationen dieser Untersuchung sind dabei die *pt* (*public transit*)⁴ und *drt* (*demand responsive transportation*)⁵ Module erforderlich. Die beiden Module haben gemeinsam, dass Agenten sich in diesen Simulationen im *passenger mode* befinden. Das heißt konkret, dass Agenten sich nach einem Fahrplan richten (müssen)

⁴Zu finden unter: <https://github.com/matsim-org/matsim/tree/master/matsim/src/main/java/org/matsim/pt>.

⁵Zu finden unter: <https://github.com/matsim-org/matsim/tree/master/contribs/drt>.

und dass sie Fußwege zwischen den Aktivitätsorten und den Haltestellen zurücklegen. Die Abbildung 4.4 zeigt exemplarisch wie ein Agent den ÖPNV in MATSim nutzt. Für ÖPNV-Simulationen sind daher, neben den minimal benötigten Eingabedateien Netzwerkdatei (Straßen-/Wegenetz), Agentendatei und Simulationskonfigurationsdatei, ebenso eine Fahrplandatei und eine Fahrzeugdatei nötig (Rieser, 2016). Die Fahrplandatei enthält Informationen zu den Haltestellen, Linien, den genutzten Wegen der Linien und den Fahrplanzeiten. In der Fahrzeugdatei werden die Fahrzeuge nummeriert und deren Kapazitäten (Sitz-/Stehplätze) hinterlegt. Das *pt*-Modul wurde mit Marcel Riesers Dissertationsarbeit seit 2010 kontinuierlich in MATSim integriert und ist Teil der festen MATSim-Kernanwendung, daher sehr gut dokumentiert und auch vielfach getestet und validiert (Rieser, 2016, S. 110).

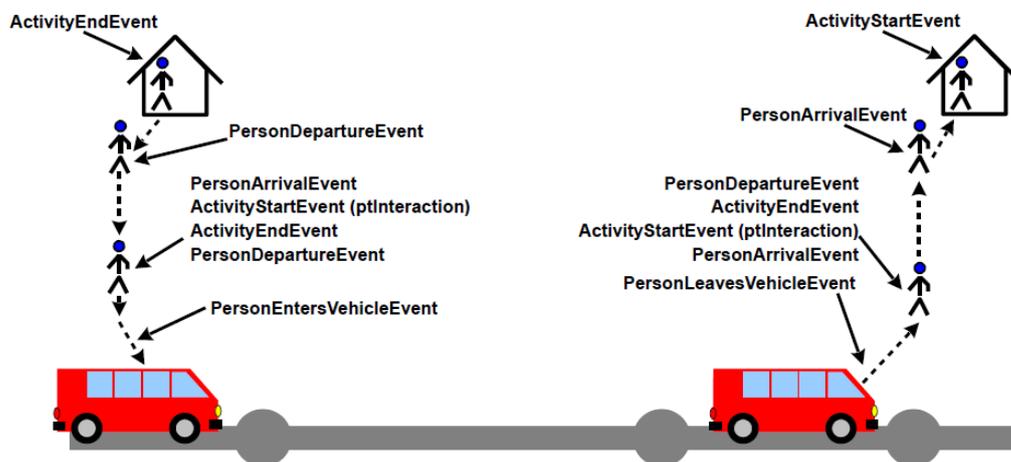


Abbildung 4.4: Gezeigt wird die Logik der *Events*-Kette, die MATSim mithilfe von JAVA einzeln und nacheinander für jeden Passagier des ÖPNV nutzt (Horni et al., 2017, S. 46).

Das *drt* Modul ist dagegen deutlich jüngeren Ursprungs und daher weit weniger ausgereift in Hinblick auf die Entwicklung der Algorithmen und auch deren Dokumentation. Grundlage ist das eher allgemein gehaltene *dvrp* (*dynamic vehicle routing problem*)⁶ Modul. Diese beiden Module sind nicht Teil der MATSim-Kernanwendung, sondern gelten als *Contributions*, also externe Beiträge zur Simulationssoftware. Hauptverantwortlich wurden bzw. werden die Module von Michal Maciejewski (Poznan University of Technology) und Joschka Bischoff TU Berlin geschrieben und betreut. Kernelement ist der sogenannte *dynamische Agent*, also ein Agent der keinen vordefinierten Tagesplan besitzt, den er in einem vorgegebenen Rahmen anpassen kann. Dynamische Agenten handeln hingegen

⁶Zu finden unter: <https://github.com/matsim-org/matsim/tree/master/contribs/dvrp>.

vollkommen flexibel bzw. sind während der Mobilitätssimulation reaktiv tätig (siehe Abb. 4.5) und stellen in diesem speziellen Fall die Fahrzeuge dar. Fahrzeuge wie üblicherweise Taxis, DRTs oder autonom fahrende Automobile reagieren jeweils auf die eintreffenden Anfragen und führen diese aus (Nagel et al., 2018). Sie haben, im Gegensatz zu den Linienverkehren im *pt*-Modul, keinen festen Fahrplan mit festen Routen und Abfahrtszeiten hinterlegt. Der Fahrplan (*schedule*) eines solchen dynamischen Fahrzeugs enthält die Aufgaben (*tasks*): *unplanned*, *planned*, *started*, *currenttask*, *completed* (Maciejewski, 2016, S. 147). Die dynamischen Fahrzeugagenten suchen die jeweiligen Routen ihrer Fahrten nach den eintreffenden Anfragen als sogenannte *least-cost paths*, also als die Wege mit den geringsten Kosten im Sinne von minimalen Umwegen und schnellstmöglicher Ankunft, realisiert über die euklidische Distanz oder über einen Dijkstra-Algorithmus (Jacob et al., 1999; Lefebvre & Balmer, 2007). Entscheidend ist schließlich auch die Zuordnungsmethode der dynamischen Agenten, also Fahrzeuge, zu den nachfragenden Agenten, also Passagieren. Mehrere *Heuristiken*⁷ für die Fahrzeugzuteilung sind dabei implementiert, wie beispielsweise die im Taxigewerbe verwendete Heuristik, dass das nächste freie Taxi die nächste Anfrage bedient oder eine Heuristik die stetige Nachfrage-Angebotsbalancierung durchführt (Maciejewski et al., 2016).

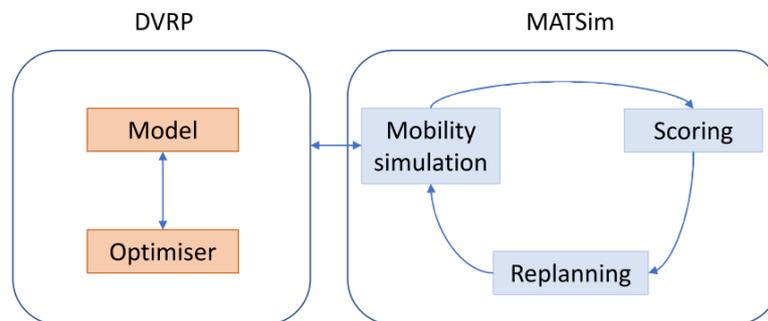


Abbildung 4.5: Die dynamischen Agenten werden innerhalb der Mobilitätssimulation des MATSim-Kreislaufes modelliert (Maciejewski et al., 2017, S. 71).

Konkret wird in den Simulationen dieser Untersuchung die Fahrzeugzuteilung gemäß der Heuristik *Fahrzeug schnellstmöglich beim Kunden* vorgenommen (Nagel et al., 2018, S. 5): Passagiere die DRT-Fahrten buchen haben eine **Zeitrestriktion** t^{max} hinterlegt, also eine maximale Zeit, die sie gewillt sind zu warten. Wenn Passagiere eine Anfrage stellen, wird als Erstes der neu eintreffende Fahrtenwunsch dem Fahrzeug zugeteilt, welches diesen Fahrtenwunsch mit dem niedrigsten Umweg innerhalb seiner bestehent geplanten

⁷Heuristiken sind zulässige, aber nicht unbedingt optimale Lösungen für Probleme bei denen eine unzureichende Informationslage herrscht.

Route bedienen kann. Dieser Fahrtenwunsch wird schließlich nur dann bedient, wenn die **Zeitrestriktion** t_r auf Seiten der bereits im Fahrzeug befindlichen Passagiere eingehalten wird (siehe nachstehende Gleichung). Dieses t_r berechnet sich aus der direkten Einzelfahrt t_{direkt}^r multipliziert mit einem maximalen Umwegfaktor Alpha und addiert mit einer maximal zusätzlichen Zeit Beta für Umwege-, Warte- und Zu-/Ausstiegszeiten (Bischoff et al., 2018, S. 3).

$$t_r = \alpha t_{direkt}^r + \beta$$

Die vorliegende Simulationsstudie nutzt das *pt*-Modul um eine von den Praxispartnern konzipierte Stadtbuslinie von Colditz (Kernstadt) zum Ortsteil Zschadraß innerhalb des bestehenden Regionalbusnetzes zu simulieren. Außerdem nutzt diese Untersuchung das *drt*-Modul, um zwei unterschiedliche Formen flexibler Bedienung zu simulieren. Damit werden die eintreffenden Anfragen gemäß gewisser Anbieter- und Passagierrestriktionen bedient.

Fallstudie Colditz

5.1 Beschreibung der Untersuchungsregion

Die sächsische Kleinstadt Colditz befindet sich am süd-östlichen Rand des Landkreises Leipzig, je ca. 40km südlich von Leipzig bzw. nördlich von Chemnitz und ca. 70km westlich von Dresden. Neben der Kernstadt, die direkt an der *Zwickauer Mulde* gelegen ist, gehören noch 25 weitere Ortsteile zum Gebietsstand von Colditz: Bockwitz, Collmen, Commichau, Erlbach, Erlln, Hausdorf, Hohnbach, Kaltenborn, Koltzschen, Lastau, Leisenau, Maaschwitz, Meuselwitz, Möseln, Podelwitz, Raschütz, Schönbach, Sermuth, Skoplau, Tanndorf, Terpitzsch, Zollwitz, Zschadraß, Zschetzsch und Zschirla (Colditz, o. J.). Die Ortsteile Erlln, Maaschwitz und Zschirla verfügen dabei über keinen Anschluss an den ÖPNV. Mit einer Bevölkerungsdichte knapp über 100 Einwohnern je km² gehört Colditz zu den ländlichen Räumen mit Verdichtungsansatz.

Gemäß Zensusdaten verfügt die Kleinstadt über eine Bevölkerung von 9.207 Personen (amtliche Einwohnerzahl), wobei 4.167 Personen direkt in der Kernstadt leben (Statistisches Landesamt Freistaat Sachsen, 2014b, S. 5). Für die nachfolgenden Simulationen wird jedoch die „europäische Definition für Personen am üblichen Aufenthaltsort [genutzt], d.h. für Personen mit Haupt- oder alleiniger Wohnung. Unberücksichtigt bleiben auch Personen ohne eigene Haushaltsführung in Gemeinschaftsunterkünften, sodass die Bevölkerung in Haushalten bzw. Familien stets geringer als die amtliche Einwohnerzahl ist“ (Statistisches Landesamt Freistaat Sachsen, 2014a, S. 3). Nach dieser Definition

gilt für Colditz eine Bevölkerungszahl von 8.967 Personen, wovon 1.760 unter 25 Jahre (19,6%) und 2.203 über 65 Jahre (24,5%) alt sind (Statistisches Landesamt Freistaat Sachsen, 2014a, S. 12). Es werden also nur Personen für die Simulationen berücksichtigt, die sich auch beständig in Colditz bewegen (Hauptwohnsitz) und die auch körperlich in der Verfassung sind eigenständig mobil zu sein (keine Bewohner von Alten-/Pflegeheimen).

Im Landkreis Leipzig gilt eine Beschäftigungsquote von 64,3% (Bundesagentur für Arbeit, 2018). Diese Zahl beinhaltet alle sozialversicherungspflichtig sowie geringfügig Beschäftigten im Alter zwischen 15-65 Jahren auf der Basis des Zensus und für den Monat Juni 2017. Für Colditz liegen keine detaillierteren Zahlen vor. Die größten Arbeitgeber der Stadt sind die *Anona Nahrungsmittel GmbH*, ein Nahrungsmittelbetrieb mit 400 Beschäftigten im Norden der Kernstadt (Pfeifer, 2016), die *Ferro Magmalor GmbH* im Süden der Kernstadt und das *Diakonie Krankenhaus* im Ortsteil Zschadraß (Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH, o. J.). Ansonsten finden sich weitere, deutlich kleinere Arbeitgeber um den Markt, Untermarkt sowie die Badergasse; alles vornehmlich Dienstleistungsgewerbe.

Die erfolgreiche Nutzung von DRT-Angeboten ist stark an den Einsatz von IuK gebunden. Daher ist für diese Untersuchung auch der Breitbandausbau und (vermutlich noch wichtiger) die flächenmäßige Abdeckung der Untersuchungsregion mit ausreichendem mobilen Datenvolumenempfang relevant. Eine Abfrage beim *Breitbandatlas des Bundes* (BMVI, o. J.) zeigte, dass im angestrebten Bedienegebiet ausreichende Übertragungsraten für Fahrtenanfragen über Apps zur Verfügung stehen.

5.2 Datengrundlage des Simulationsmodelles

Die Grundlage für das Colditzer ÖPNV-Simulationsmodell fußt auf den vier Schritten: Infrastrukturdaten, Bevölkerungsdaten, Simulation des Mobilitätsverhaltens und Validierung der Simulation. Diese vier Schritte werden im Folgenden näher erklärt.

5.2.1 Infrastrukturdaten

Das Colditzer ÖPNV-Simulationsmodell gibt ein *detailliertes räumliches Abbild* der Kleinstadt und seiner Ortsteile. Dafür wurden zum einen Kartendaten OpenStreetMap (OSM), Luftbilder), zum anderen aktuelle Daten über konkrete Infrastruktureinrichtungen (Ver-

einsdatenbank Colditz, Geoportal Landkreis Leipzig, Sächsische Firmendatenbank) verwendet und schließlich in zwei Exkursionen zum Teil auch selbst erhoben bzw. verifiziert.

Die *Wohnorte* der Agenten wurden zufällig im bebauten Bereich des Gebietsstandes verteilt. Das heißt, dass kein Agent in Wasser-, Wald- oder Feldflächen wohnt. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, dass keine Agenten in den Ortsteilen Erlbn, Maaschwitz und Zschirla platziert sind, da diese über keinen ÖPNV-Anschluss verfügen und daher keine tagtäglichen ÖPNV-Kunden darstellen können. Anfangs stand die Überlegung im Raum die Agenten noch detailgenauer im Gebäude zu platzieren, da OSM-Gebäudeshape-Dateien zur Verfügung standen. Allerdings beinhaltet diese Shape-Datei jegliche Gebäudetypen (Garagen, Stromumspannhäuser, Ställe, Wohngebäude etc.), ist nicht zu 100% verlässlich und es existieren auch nur aggregierte Zensusdaten, sodass am Ende Agenten in Gebäuden platziert worden wären, die eventuell in Wirklichkeit keine Wohngebäude sind.

Die *Arbeitsorte* der Agenten wurden detailgenau in Colditz und Zschadraß eingepflegt. Diese sind zum einen im Norden der Kernstadt zu finden, wo sich neben der *Anona Nahrungsmittel GmbH* weitere kleinere Handwerks- und Dienstleistungsfirmen und auch der Betriebshof der *Regionalbus Leipzig GmbH* niedergelassen haben. Zum anderen sind im Süden um den Standort der *Ferro Magmalor GmbH* und in der Innenstadt am und um den Marktplatz Arbeitsstandorte für arbeitende Agenten festgelegt worden. In Zschadraß wurde der Campus des *Diakonie Krankenhauses* als Arbeitsort definiert. Schließlich ist Colditz keine Insel, weswegen in den anliegenden Städten Bad Lausick, Grimma und Rochlitz ebenfalls Arbeitsorte hinterlegt wurden, jedoch nicht koordinatengenau sondern schlicht um die zentralen Bus-/Bahnhaltstellen herum. Diese Städte sind unter der Woche von Colditz aus mit Regionalbuslinien, mindestens im Zweistundentakt, erreichbar.

Die *Bildungseinrichtungen* der Agenten wurden analog zu den Arbeitsorten konzipiert. In Colditz sind koordinatengenau die Ober- und Grundschule in der Schul- bzw. Nicolaistraße platziert worden, genauso wie die Grundschule im Ortsteil Hausdorf sich an ihrem tatsächlichen Ort befindet. Sofern Agenten das Gymnasium, die Berufsschule oder eine Förderschule besuchen, müssen sie nach Bad Lausick oder Grimma fahren. Auch hier wurden, ebenso wie bei den Arbeitsorten, keine exakten Adressen verwendet; stattdessen wurden in diesen Städten Agenten für die Aktivität *Bildungseinrichtung* an die jeweils zentrale Bus-/Bahnhaltstelle entsandt, da konkrete Wege innerhalb von Bad Lausick oder Grimma für die Simulation nicht relevant sind.

Die *Einkaufs-/Erledigungsorte* der Agenten befinden sich ausschließlich in der Kernstadt sowie im Ortsteil Zschadraß. Sie wurden koordinatengenau eingepflegt; es handelt sich um insgesamt 23 Einträge: Apotheken, Ärzte, Banken (Sparkasse, Volksbank), Bäcker, Fleischer, Friseure, Gastronomien (Restaurant, Imbiss, Eisdielen), Lebensmittelgeschäfte (Lidl, Netto, Obstgeschäfte etc.). Auch die Stadtverwaltung mit dem Bürgeramt wurde als *Erledigungsort* aufgenommen.

Die *Freizeitorte* der Agenten sind analog zu den Einkaufs-/Erledigungsorten konzipiert. Insgesamt wurden neun Sportstandorte (Sporthalle etc.) bzw. Sportvereine (Fußball-/Judoverein etc.) eingepflegt, außerdem die Volkshochschule Muldental, die Stadtbibliothek und das Jugend Center Colditz.

Die Generierung des *Straßen- und Wegenetzes*, auf dem sich die Agenten und auch die Fahrzeuge fortbewegen, erfolgte durch *JOSM Version 13860*. Über die darin verfügbare MATSim-Erweiterung wurden die nötigen OSM-Rohdaten anhand der Overpass-API heruntergeladen. Diese Rohdaten wurden auf metrische Einheiten projiziert (EPSG:32633, bzw. WGS 84/UTM-Zone 33N) und in das für MATSim nötige xml-Format transformiert.

Die vom MDV zur Verfügung gestellte General Transit Feed Specification (GTFS) diente der Aufnahme von Daten zu *Haltestellen* und *Regionalbuslinien* in das Simulationsmodell. Ein GTFS-Feed ist eine *relationale Datenbank*, die aus mindestens sechs und maximal 13 CSV-Dateien besteht. Der vom MDV übermittelte Feed beinhaltete neun CSV-Dateien. Er wurde mit dem *Static GTFS Manager v1.4.3* bearbeitet, das heißt, nur die relevanten Haltestellen und Linien wurden extrahiert. Außerdem wurde für das traditionelle Buslinienangebot eine vom MDV geplante Stadtbuslinie neu erstellt und dem Feed hinzugefügt. Anschließend wurde dieser Feed mit Hilfe des *GTFS Feed Validator* erfolgreich validiert. Da MATSim als Eingabedatei stets das xml-Format benötigt und da exemplarisch ein Tag simuliert wird, wurde schließlich anhand des *pt2matsim*-Script von *Flavio Poletti* der **12. Juni 2018** in das xml-Format extrahiert und transformiert (Poletti, 2017). Es handelt sich um einen Dienstag innerhalb einer normalen Woche mit Schulbetrieb und keinerlei Feiertagen.

5.2.2 Bevölkerungsdaten

Die Bevölkerung wurde am Wohnort als einzelnes Individuum mikroskopisch modelliert und mit (sozio-)demografischen Attributen ergänzt. Diese synthetische Bevölkerung (al-

so die Agenten) versucht bestmöglich ein *statistisch repräsentatives Abbild* vom realen Colditz zu zeichnen. Dieses Abbild wurde auf Grundlage der vorgestellten Zensus- und Beschäftigungszahlen erstellt. Damit gehen 60% aller Agenten (Population) einer Beschäftigung nach, 20% der Population besuchen eine Bildungseinrichtung und weitere 20% der Population sind über 65 Jahre alt sind.

5.2.3 Simulation des Mobilitätsverhaltens

Simuliert wird das Mobilitätsverhalten der Agenten auf der Basis statistischer Mobilitäts-erhebungen und anhand der Simulationssoftware MATSim. Durch diese Modellierung entsteht ein *Abbild der Bewegungen der Bevölkerung* im öffentlichen Raum von Colditz. Dieses Abbild ist das vom Autor dieser Arbeit konzipierte Szenario und dessen Simulationsergebnisse sind *hypothetische Folgen*. Dies sollte bei der Verwendung dieser wissenschaftlich-theoretischen Masterarbeit in der Praxis bedacht werden.

Speziell für Colditz bzw. die ÖPNV-Kundschaft der *Regionalbus Leipzig GmbH* standen keine detaillierten Daten zum Mobilitätsverhalten zur Verfügung. Daher wurden allgemeingültige deutschlandweite Mobilitätserhebungen zu Rate gezogen: MOP, MiD, Socialdata und SrV. Socialdata wurde schließlich nicht verwendet, da in dieser Quelle für Kleinstädte nur Daten aus den 1990iger Jahren verfügbar waren (Socialdata, 2018). Aus den übrigen drei Quellen wurden die jeweils übereinstimmenden Daten extrahiert. Konkret wurde eine Population programmiert, die **im Durchschnitt 3,4 Wege** zurücklegt (Infas & DLR, 2010, S. 42).⁸ Genutzt wurden die Wegezwecke **Wohnen, Arbeit, Bildungseinrichtung, Freizeit** und **Einkaufen/Erledigungen** (Ahrens, 2015, Tab. 5.5); (Infas & DLR, 2010, S. 43); (Vortisch et al., 2012, S. 70). Die Startzeiten der Wege zu diesen Wegezwecken sind gemäß MiD (Infas & DLR, 2010, S. 136-141) und SrV (Ahrens, 2015, Tab. 8.1-8.2.1) programmiert. Auch die Aktivitätsmuster bzw. Wegeketten wurden schließlich aus SrV extrahiert (Ahrens, 2015, Tab. 13.1). Da keine Quelle-Ziel-Verkehre bekannt waren (Rodrigue et al., 2013, S. 341-342), wurden die Arbeitsorte und die Bildungseinrichtungen für die Agenten zufällig ausgewählt. Für den Fall, dass Agenten Einkaufen oder sonstige Erledigungen vollziehen bzw. eine Freizeitaktivität ausführen, wurde für sie die zu ihrem Wohnsitz nächstgelegene Adresse ausgewählt. Ausgehend von einer Gesamtbevölkerung von 8.967 Personen wurde schließlich der ÖPNV-Anteil extrahiert

⁸MiD 2017 wurde in den letzten Tagen der Bearbeitungszeit dieser Masterarbeit veröffentlicht und stand deshalb für die Simulationen noch nicht zur Verfügung.

und diesen Agenten als Verkehrsmodus *pt* oder *drt* zugewiesen, sodass sie beispielsweise nicht mit einem privaten Automobil reisen können. Der Programmierung der konkreten (Tages-)Pläne in der Agentendatei wurde folgendes Muster zugrunde gelegt:

- **20% der Agenten vom Typus 1 - Beschäftigte:** „Wohnen-Arbeit-Wohnen“. Die Agenten verlassen das Haus zwischen 06-09:00 Uhr und fahren zur Arbeit, wo sie sieben bis neun Stunden verbringen. Anschließend kehren sie nach Hause zurück.
- **20% der Agenten vom Typus 2 - Beschäftigte:** „Wohnen-Arbeit-Einkauf/Erledigung-Wohnen“. Die Agenten verlassen das Haus zwischen 07-09:00 Uhr und fahren zur Arbeit, wo sie vier bis sechs Stunden verbringen. Nach der Arbeit und einer 30-minütigen Pause gehen sie für ein bis zwei Stunden einkaufen oder Sonstiges erledigen und kehren schließlich nach Hause zurück.
- **20% der Agenten vom Typus 3 - Beschäftigte:** „Wohnen-Arbeit-Wohnen-Freizeit-Wohnen“. Die Agenten verlassen das Haus zwischen 06-08:00 Uhr, fahren zur Arbeit, wo sie sechs bis acht Stunden verbringen. Nach der Arbeit kehren sie für 30min bis max. eine Stunde nach Hause zurück, ehe sie für ein bis zwei Stunden einer Freizeitaktivität nachgehen. Danach erfolgt die Rückkehr nach Hause.
- **20% der Agenten vom Typus 4 - U25 Jährige:** „Wohnen-Bildungseinrichtung-Wohnen-Freizeit-Wohnen“. Die Agenten verlassen das Haus entweder um 06:30 Uhr oder um 08:30 Uhr, weil die Schule um 07:30 Uhr (1. Stunde) oder 09:30 Uhr (3. Stunde) beginnt. Sie bleiben für sechs Stunden in der Schule, also entweder bis 13:00 Uhr oder 14:30 Uhr. Danach fahren sie wieder nach Hause, ehe sie für ein bis zwei Stunden einer Freizeitaktivität nachgehen. Danach erfolgt die Rückkehr nach Hause.
- **20% der Agenten vom Typus 5 - Ü65 Jährige:** „Wohnen-Einkauf/Erledigung-Wohnen-Freizeit-Wohnen“. Die Agenten verlassen das Haus zwischen 08-10:00 Uhr, fahren für ein bis zwei Stunden einkaufen oder zu sonstigen Erledigungen. Über den Mittag sind diese Agenten zu Hause, ehe sie am Nachmittag für ein bis zwei Stunden einer Freizeitaktivität nachgehen. Danach erfolgt die Rückkehr nach Hause.

In dieser Population sind also sowohl klassische Arbeitnehmer als auch halbtags Arbeitende, Schüler und Senioren vertreten. Berufspendler sind nicht programmiert worden, da diese den ÖPNV nur nutzen, wenn er schneller, kostengünstiger und/oder stressfreiere Wege als der MIV ermöglicht (Boltze et al., 2002, S. 32). Tägliche Wege von Colditz nach Leip-

zig, Chemnitz oder Dresden wären dies in keinem Fall und würden pro Strecke mindestens zwei Umsteigevorgänge beinhalten. Ebenso wurden keine Arbeitslosen integriert, da die Arbeitslosenquote bei 6,0% liegt, wovon 1,8% arbeitslos nach Sozialgesetzbuch (SGB) III (Arbeitslosengeld I) und 4,1% arbeitslos nach SGB III (Arbeitslosengeld II, auch bekannt als *Harz IV*) sind (Bundesagentur für Arbeit, 2017). Die Arbeitslosen sind also einerseits in ihrer Anzahl gering, andererseits stellen sie keine konventionelle ÖPNV-Zielgruppe dar (Boltze et al., 2002, S. 32) und in absehbarer Zeit in Colditz auch keine potentiell immer wichtiger werdende Zielgruppe, im Gegensatz zum stetig steigenden Anteil an Senioren (Aigner-Breuss & Braun, 2011; BMVI, 2015; Wüst-Rocktäschel & Georgi, 2010). Weiterhin ist der Wegezweck „Kindereinrichtung“ im ÖPNV marginal (Ahrens, 2015, Tab. 18.1) und wurde deshalb nicht umgesetzt. Die genannten fünf Aktivitätsmuster (Ahrens, 2015, Tab. 13.1) wurden gewählt, da diese fünf am besten die prozentualen Verhältnisse der Wegezwecke wiedergeben (Ahrens, 2015, Tab. 18.1); (Infas & DLR, 2010, S. 43). Außerdem lässt es die Komplexitätsreduktion nicht zu alle möglichen Wegeketten mit der Simulation abzubilden, weshalb zwangsläufig generalisiert werden musste.

Die Abbildung 5.1 zeigt exemplarisch einen programmierten Agenten der Eingabedatei im xml-Format. Der „Agent-W-A-W-F-W-2“ verlässt sein Haus bzw. seine Wohnung kurz vor 08 Uhr und befindet sich 43min später an seinem Arbeitsplatz im Colditzer Südwesten. Er arbeitet dort für sieben Stunden 20 Minuten und kehrt danach nach Hause zurück um sich umzuziehen bzw. zu stärken, bevor er seiner Freizeitaktivität beim *Judoverein FSC* nachgeht. Diese vollzieht er für eine Stunde und kehrt dann 18:20 Uhr wieder nach Hause zurück, wo er für den restlichen Teil des Tages verbleibt. Die Abbildung 5.2 zeigt die räumlichen Relationen, die der in Abbildung 5.1 vorgestellte Agent aufweist. Dieser in Berufsbeschäftigung befindliche Agent, der am Nachmittag einer Freizeitaktivität nachgeht, bewegt sich nur in der Kernstadt, im Gegensatz zu vielen anderen Agenten, die beispielsweise in Grimma oder Bad Lausick arbeiten bzw. zur Schule gehen, oder die außerhalb der Kernstadt in einem anderen Ortsteil von Colditz wohnen. Die Abbildung 5.3 zeigt schließlich, dass nach dem iterativen Prozess der beste Tagesplan eine Punktzahl von knapp 77 Punkten erzielt und dass sich die anfänglich vorgegebenen Zeiten angepasst haben. Der Agent verlässt jetzt nicht mehr 07:53 Uhr das Haus (siehe 5.1) sondern 08:03 Uhr, da er für die Strecke von knapp 900m von seinem Wohnort zu seinem Arbeitsort nur knapp 18min zu Fuß benötigt und somit seine Aktivität „Wohnen“ verlängert, also z.B.

länger schläft. Dieser Beispielagent⁹ nutzt das bestehende ÖPNV-Angebot nicht, da für seine Wege keine Verbindungen existieren.

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<!DOCTYPE population SYSTEM "http://www.matsim.org/files/dtd/population_v6.dtd">
<population>
.....
  <person id="Agent-W-A-W-F-W-2">
    <plan selected="yes">
      <activity type="Wohnen" x="346740.1831145488" y="5666180.883489778" end_time="07:53:43" >
      </activity>
      <leg mode="pt" trav_time="00:43:32">
      </leg>
      <activity type="Arbeit" x="346105.36614189576" y="5665914.553119788" start_time="08:37:15" max_dur="07:20:19" end_time="15:57:34" >
      </activity>
      <leg mode="pt">
      </leg>
      <activity type="Wohnen" x="346740.1831145488" y="5666180.883489778" start_time="16:41:06" max_dur="00:38:29" end_time="17:19:35" >
      </activity>
      <leg mode="pt">
      </leg>
      <activity type="Freizeit" x="346902.0739010463" y="5666324.345482601" max_dur="01:00:42" end_time="18:20:17" >
      </activity>
      <leg mode="pt">
      </leg>
      <activity type="Wohnen" x="346740.1831145488" y="5666180.883489778" >
      </activity>
    </plan>
  </person>
.....
</population>

```

Abbildung 5.1: Ein Beispiel aus der Agenten-Eingabedatei, die die Aktivitätsorte und deren Zeiten sowie den Verkehrsmodus (*pt*) beinhaltet und im xml-Format geschrieben sein muss, damit sie in die MATSim-Simulationen eingespeist werden kann (eigene Darstellung).



Abbildung 5.2: Die räumlichen Relationen vom „Agent-W-A-W-F-W-2“ visualisiert in Orange und mit *VIA Betaversion 1.8.3* (eigene Darstellung).

⁹Dieser Agent ist ein Beispiel aus der Eingabedatei mit 146 Agenten, genutzt ausschließlich für die Kalibrierung und Validierung des Simulationsansatzes.

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<!DOCTYPE population SYSTEM "http://www.matsim.org/files/dtd/population_v6.dtd">

<population>
  ....
  <person id="Agent-W-A-W-F-W-2">
    <plan score="76.9982998232027" selected="yes">
      <activity type="Wohnen" link="43500" x="346740.1831145488" y="5666180.883489778" end_time="08:03:11" >
      </activity>
      <leg mode="transit_walk" trav_time="00:17:53">
        <route type="generic" start_link="43500" end_link="32764" trav_time="00:17:53" distance="894.9482267278618"></route>
      </leg>
      <activity type="Arbeit" link="32764" x="346105.36614189576" y="5665914.553119788" start_time="08:37:15" end_time="15:45:58" >
      </activity>
      <leg mode="transit_walk" trav_time="00:17:53">
        <route type="generic" start_link="32764" end_link="43500" trav_time="00:17:53" distance="894.9482267278618"></route>
      </leg>
      <activity type="Wohnen" link="43500" x="346740.1831145488" y="5666180.883489778" start_time="16:41:06" end_time="17:47:12" >
      </activity>
      <leg mode="transit_walk" trav_time="00:05:37">
        <route type="generic" start_link="43500" end_link="114091" trav_time="00:05:37" distance="281.20286188483345"></route>
      </leg>
      <activity type="Freizeit" link="114091" x="346902.0739010463" y="5666324.345482601" end_time="18:47:36" >
      </activity>
      <leg mode="transit_walk" trav_time="00:05:37">
        <route type="generic" start_link="114091" end_link="43500" trav_time="00:05:37" distance="281.20286188483345"></route>
      </leg>
      <activity type="Wohnen" link="43500" x="346740.1831145488" y="5666180.883489778" >
      </activity>
    </plan>
    <plan score="72.19685093362123" selected="no">
      ....
    </plan>
  </person>
  ....
</population>

```

Abbildung 5.3: Die tatsächlichen Zeiten und zurückgelegten Wege des besten Tagesplanes vom „Agenten-W-A-W-F-W-2“ nach dem iterativen Prozess mit 100 Durchläufen (eigene Darstellung).

5.2.4 Validierung der Simulation

Dieser Modellierungsansatz wurde schließlich anhand von Fahrgastzählungen, dem Fahrzeugeinsatz und qualitativen Aussagen der Praxispartner *kalibriert* und *validiert*. Der Schritt erfolgte zum Teil parallel zur vormals beschriebenen Simulation des Mobilitätsverhaltens und den jeweiligen Einstellungen in der Simulationskonfigurationsdatei. Für die folgende *Konfiguration* liefert die Simulation plausible Ergebnisse des Ist-Zustandes:

- 100 Iterationen wurden durchgeführt (siehe Anhang B).
- Die Agenten merken sich die fünf besten Pläne (höchste Punktzahl).
- Je Iteration erhielten 10% der Agenten die Erlaubnis ihre Zeiten innerhalb von 30min anzupassen und weitere 10% erhielten die Erlaubnis ihre Routen anzupassen. Für die restlichen 80% galt jeweils der punktemäßig beste Plan.
- Die Aktivität Bildungseinrichtung dauert minimal und typischerweise sechs Stunden, Arbeit minimal vier und typischerweise acht Stunden, Einkauf/Erledigungen sowie Freizeitaktivitäten minimal eine, typischerweise zwei Stunden.
- Die Agenten sind bereit max. 600m Fußweg zu ÖPNV-Haltestellen zurückzulegen. Sie suchen zuerst im Umkreis von 400m ihrer Aktivitätsorte eine Haltestelle und wenn

sie keine finden wird der Radius um weitere 200m ausgeweitet, gemäß den Vorgaben zur Haltestellenerschließung im Landkreis (Gauff Consultants, 2017, S. 4).

- Die Agenten planen max. einen Zeitpuffer von 15min für Linienwechsel ein (ZVNL et al., 2017, S. 63).
- Es gelten überdies die MATSim Standardeinstellungen zur Notenbildung (Nagel et al., 2016, S. 34).

Laut sechsmonatiger *Fahrgastzählungen* (Zeitraum 2017-2018) finden in der Tarifzone 145 (deren Zentrum Colditz ist) mit 95%iger Wahrscheinlichkeit an einem Wochentag im Durchschnitt 289 Beförderungsfälle statt (siehe Anhang C). Beförderungsfälle sind nicht gleich Personen, deshalb wurde sich mit dem Praxispartner darauf verständigt, dass es sich am Ende um ca. 120 Personen handelt, da einige Kunden durch Umsteigevorgänge ggf. doppelt gezählt werden (siehe Anhang D). Außerdem war der *Fahrzeugeinsatz* auf den einzelnen Strecken bekannt; z.B. verkehrt ein Midibus für max. 20 Personen zwischen Colditz und Rochlitz (siehe Anhang E).

Wenn also 1,6% von den 8.967 in Colditz lebenden Menschen zufällig extrahiert und ausschließlich mit ÖPNV-Wegen versehen werden, dann meint dies 146 Agenten bzw. potentielle ÖPNV-Kunden. Davon nutzen in der Simulation tatsächlich 104 Agenten das bestehende ÖPNV-Angebot mit im Durchschnitt 2,6 Fahrten je Agent (271 Beförderungsfälle). 42 Agenten nutzen das ÖPNV-Angebot gar nicht, weil entweder keine Haltestelle innerhalb von 600m für sie verfügbar ist, oder weil sie zu Fuß schneller an ihr Ziel gelangen als mit einem Bus; Letzteres ist sehr oft der Fall beim Agententypus 5 (Senioren), der sich ausschließlich in der Kernstadt und Zschadraß bewegt. Die Abbildung 5.4 zeigt die Besetzung im bestehenden Regionalbusnetz. Diese Besetzung, vor allem auch die Größenverteilung der einzelnen Linien, wurde von den Praxispartnern bestätigt: Die höchsten Besetzungsgrade weisen die vertakteten Linien 613, 619 und 620 auf, die Linien 621, 622, 625 und 626 hingegen verkehren nur gelegentlich und haben daher eine deutlich geringere Zahl an Beförderungsfällen. Die Linie 619 ist dabei am meisten frequentiert, da diese mindestens stündlich zwischen Colditz und dem davon nördlich gelegenen Grimma verkehrt und sich in Grimma beispielsweise das einzige Gymnasium in der Untersuchungsregion sowie viele Arbeitsplätze befinden.

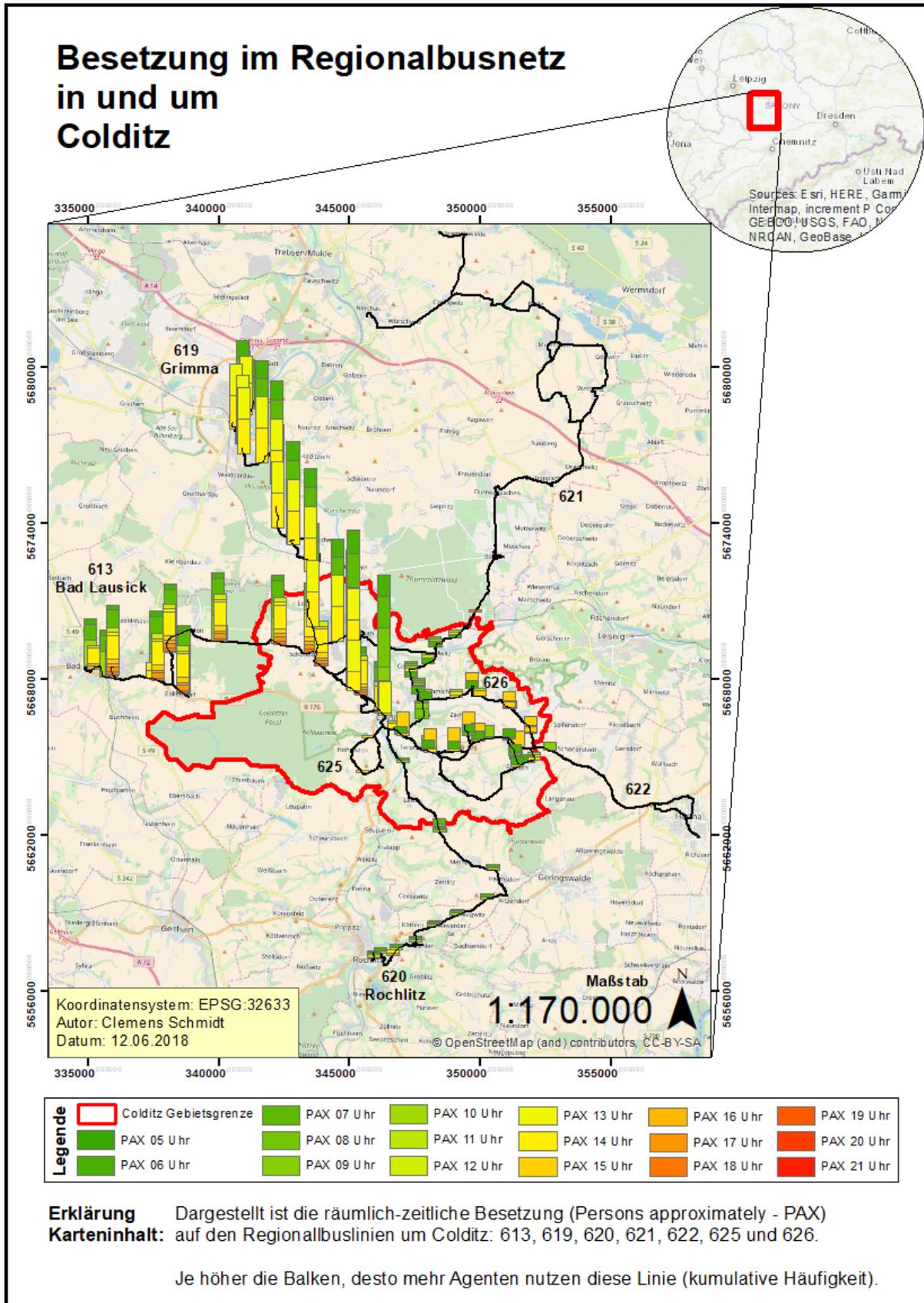


Abbildung 5.4: Die Besetzung des bestehenden Regionalbusnetzes zur Kalibrierung und Validierung des gewählten Simulationsansatzes (eigene Abbildung).

Der *geringere Anteil an Beförderungsfällen und beförderten Agenten* im Hinblick auf die (tatsächlichen) Vergleichswerte sind vor dem Hintergrund des Zuschnittes der Tarifzone 145 zu betrachten. Diese verläuft in nord-südlicher Ausrichtung von Mutzschen bis nach Colditz. Da die vorliegende Simulation aber das nördliche Gebiet der Tarifzone um Böhlen und Mutzschen nicht erfasst, können die Differenzwerte gänzlich auf die Linie 621 mit ihren insgesamt 12 Fahrten Colditz-Mutzschen angerechnet werden. Die Abbildung 5.5 zeigt den Tagesgang aller ÖPNV-nutzenden Agenten (Startzeiten der Wege) an allen Haltestellen im Untersuchungsgebiet. Dieser Tagesgang bewegt sich fast synchron zum Verlauf statistischer Mobilitätsenerhebungen bezüglich der Wege-Startzeiten der ÖPNV-Nutzer (Infas & DLR, 2010, S. 139).

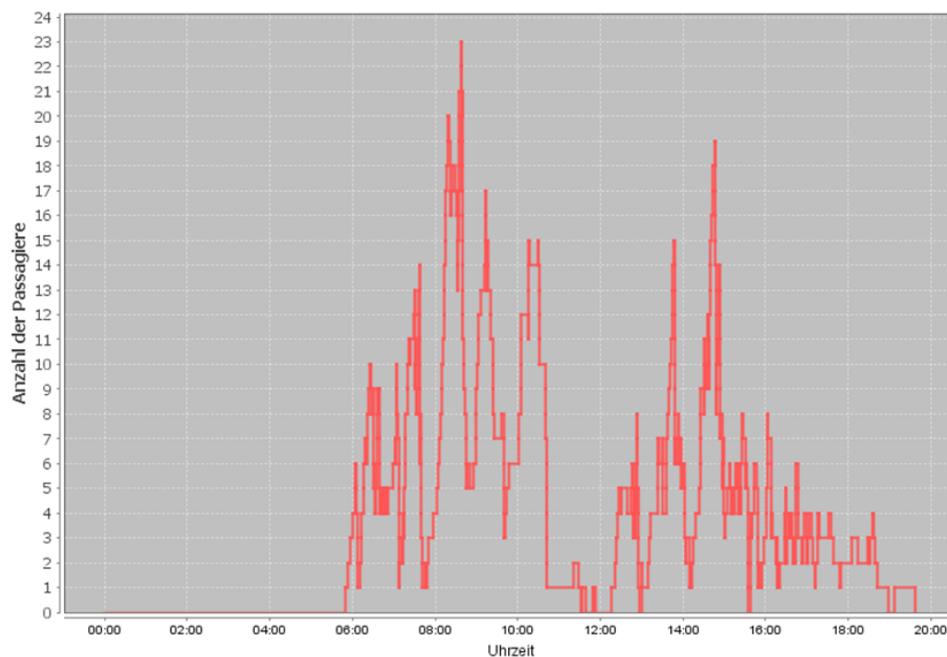


Abbildung 5.5: Der Tagesgang aller ÖPNV-nutzenden Agenten an allen Haltestellen wurde gemäß MiD-Daten (Infas & DLR, 2010, S. 139) validiert (eigene Abbildung auf der Grundlage der Simulation, erstellt mit VIA).

Diese Validierung zeigt also, dass das methodische Vorgehen des Simulationsansatzes durchaus die Situation der ÖPNV-Nutzer in Colditz *nachzeichnen* kann. Die Methode, und vor allem die Daten in Bezug auf Aktivitäten, Orte und Startzeiten der Agenten, könnten allerdings noch in sehr viel höherem Maße validiert und kalibriert werden, wären Daten, wie einzelne Haltestellenein-/ausstiege oder die spezifischen Wegemuster (siehe zu beiden Punkten Anhang F), das Geschlecht, das Alter der örtlichen ÖPNV-Nutzer oder vieles mehr, bekannt (Ronald et al., 2016). All dies würde die Ergebnisse der Simulation noch sehr viel realistischer gestalten; diese Informationen lagen aber dem Autor dieser

Arbeit und auch den Praxispartnern selbst nicht vor. Ungeachtet dessen sollte dem Leser dieser Arbeit jedoch die Illusion genommen werden, dass mit einer Simulation jemals die gesamte komplexe Realität als solche nachgestellt werden kann. Es müssen zwangsläufig immer begründete Annahmen getroffen bzw. statistische Werte aus der Vergangenheit genutzt werden und es wird stets statistische Ausreißer geben, die nicht abgebildet werden können. Daher der (wiederholte) Hinweis, dass die Ergebnisse dieser Simulation in der Praxis nur als *probabilistische Folgenabschätzungen*, sozusagen als Anhalts- bzw. Orientierungspunkte, und nicht als gegebene Werte genutzt werden sollten. Andere Szenarios mit anderen zugrundeliegenden Quellen können durchaus zu abweichenden Ergebnissen gelangen.

5.3 Charakteristik & Simulationsergebnisse für drei Colditzer Szenarios

In den folgenden drei Unterkapiteln werden jeweils die Simulationsergebnisse einer traditionell-fahrplangebundenen Stadtbuslinie, eines flexiblen, aber haltestellengebundenen, DRT-Angebotes und eines Tür-zu-Tür DRT-Angebotes dargelegt. Allen drei Simulationen ist gleich, dass der von den Praxispartnern vorgegebene Zielwert von 4% ÖPNV Modal Split, also **360 Agenten**, untersucht wird. Die übrigen Parameter aus der Validierung werden beibehalten. Außerdem sind alle drei Mobilitätsangebote in der Zeit von **06-20 Uhr** in Betrieb. Ansonsten unterscheiden sich die drei Simulationen in ihrem **Angebot** für die potentielle ÖPNV-Kundschaft teils erheblich und stellen für sich genommen *jeweils ein eigenes Szenario* dar.

5.3.1 Stadtbuslinie Colditz

Das *erste getestete Angebot* für potentiell ÖPNV-nutzende Agenten stellt eine traditionelle und somit fahrplangebundene Stadtbuslinie dar. Die geplante Linienführung wurde von den Praxispartner zur Verfügung gestellt (siehe Abb. 5.6) und in dieser Form in die Simulation eingearbeitet. Die Linie verkehrt von der Haltestelle Colditz Sportplatz bis zur Haltestelle Zschadraß Krankenhaus. Dabei werden insgesamt acht Haltestellen bedient, wovon drei bereits existente Regionalbushaltestellen sind und fünf Haltestellen neu einge-

richtet werden müssten (rot in Abb. 5.6). Die Linie verläuft über 3,5km und benötigt dafür 11min. Jeweils zur vollen und halben Stunde startet ein Bus ab Colditz Sportplatz und zur viertel sowie dreiviertel Stunde fährt dieser jeweils von Zschadraß Krankenhaus wieder zurück. Es fallen somit vier Fahrten pro Stunde an und insgesamt 56 Fahrten im Zeitraum von 06-20 Uhr. Der Fahrplan wurde so konzipiert, dass am zentralen Umsteigepunkt Colditz Sportplatz alle Anschlüsse gewährt werden können, das also keine Regionalbuslinien aus Colditz heraus bzw. nach Colditz hinein verpasst werden. Vom Betriebshof der *Regionalbus Leipzig GmbH* bis zur Haltestelle Colditz Sportplatz sind es 2,0km, die der Bus somit am Anfang seines Dienstes und am Ende jeweils zusätzlich zurücklegen muss. Die insgesamten Fz-km sind damit feststehend bzw. unabhängig von der tatsächlichen Nutzung und betragen 200 Fz-km. Weiterhin wurde von den Praxispartnern ein Mini-/Midibus als Fahrzeug vorgegeben, welcher eine Kapazität von 20 Plätzen aufweist (siehe Anhang A).

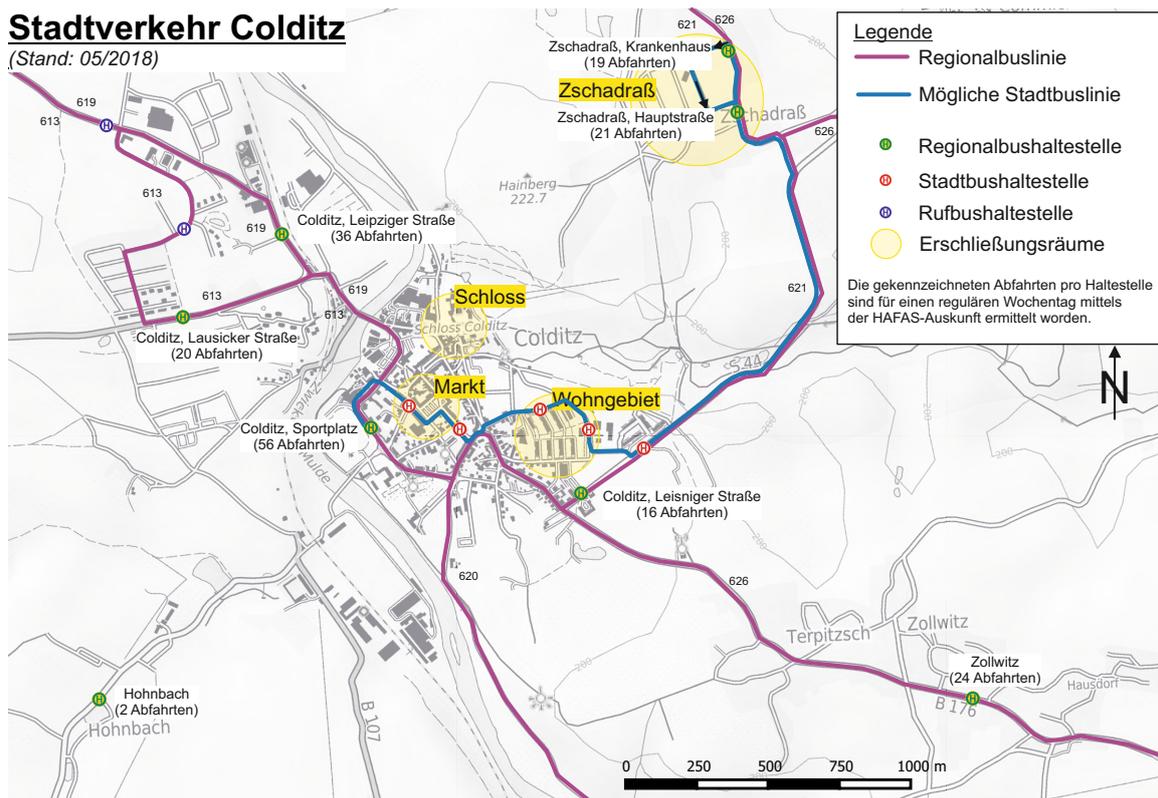


Abbildung 5.6: Von den Praxispartnern geplante Linienführung der Stadtbuslinie Colditz-Zschadraß (per Email vom MDV übermittelt am 18.05.2018). Zu sehen sind außerdem die geplanten zusätzlichen Haltestellen (blaue Rufbushaltestellen) für das haltestellenbasierte DRT-Angebot.

Mit 100 Iterationen (siehe Anhang G) wurden folgende Simulationsergebnisse erzielt: **Insgesamt** fallen 758 Beförderungsfälle an. Es nutzen 276 Agenten das komplette ÖPNV-Angebot der Untersuchungsregion, welches einen tatsächlichen Modal Split von 3,1% darstellt. 84 Agenten nutzen das ÖPNV-Angebot nicht und legen ihre Wege zu Fuß zurück. Am wenigsten nutzt der Agententypus 5 (Senioren) das Angebot, mit nur 26 Agenten von 72. Für diese Untersuchung relevanter ist jedoch die konkrete Nutzung der Stadtbuslinie.

Mit der **Stadtbuslinie** erfolgen 93 Beförderungsfälle. Dies sind 59 Agenten, wovon 10 Agenten ausschließlich die Stadtbuslinie nutzen und 49 Agenten die Linie in Verbindung mit den Regionalverbindungen in Anspruch nehmen. Konkret sind von den 59 Agenten 29% vom *Typus 2*, 27% vom *Typus 3*, je 15% vom *Typus 4 & 5* und die restlichen 14% zählen für den *Typus 1* (siehe Kapitel 5.2.3). Von den 93 Beförderungsfällen fallen 43 auf die Fahrtrichtung Colditz-Zschadraß, wobei die Linie am meisten für die Überbrückung der Distanz Zschadraß-Hauptstraße nach Colditz-Wettiner Ring (dort befinden sich die zwei Haltestellen *Wohngebiet* und *Jugend-/ Freizeitzentrum*) am Nachmittag zwischen 14-17 Uhr genutzt wird. Dies geschieht vor allem für Wege nach Hause oder zu bzw. von Einkaufs-/Erledigungs- und Freizeitaktivitäten. In diese Fahrtrichtung ist das Fahrzeug mit maximal acht und minimal null Agenten zum selben Zeitpunkt besetzt. Die übrigen 50 Beförderungsfälle finden in Fahrtrichtung Zschadraß-Colditz statt, wobei die Linie hierbei am meisten für die Überbrückung der Distanz Zschadraß-Hauptstraße nach Colditz-Innenstadt (Haltestelle *Nikolai-/Schulstr.*) am Vormittag 06-08 Uhr genutzt wird. Es handelt sich dabei vor allem um Wege zur Arbeit, den Bildungseinrichtungen und auch teils schon um Einkaufs-/Erledigungsaktivitäten. In diese Fahrtrichtung ist das Fahrzeug mit maximal 12 und minimal null Agenten zum selben Zeitpunkt besetzt. Die Stadtbuslinie dient, wenn für Transfers genutzt, am meisten der Regionalbuslinie 619 nach Grimma als Zu-/Abbringer. Für ausführliche grafische Analysen zu Stadtbuslinie siehe Anhang G.

Aus *Anbietersicht* ist hervorzuheben, dass es bei den 56 planmäßigen Fahrten an einem durchschnittlichen Wochentag keine Rückweisungen aufgrund von Kapazitätseinpassen im Mini-/Midibus gibt und dass davon 28 Fahrten Leerfahrten sind. Insgesamt werden also 102 von 200 Fz-km von Agenten nicht nachgefragt; dies entspricht einer Leerfahrtenquote von 51%. Wird die Betrachtungsweise der *Kunden*, in dem Fall der Agenten, eingenommen, dann stehen im Durchschnitt 05:55 (min:sek) Wartezeit und 05:48 Reisezeit im Bus zu Buche. Wird gewissermaßen der *gesamtgesellschaftliche Blick* auf dieses Angebot gerichtet, dann stellen sich Fragen nach räumlicher Erschließung und ökologischer

Bilanz. Die *räumliche Erschließung* mit den bestehenden Regionalbus- und den neu dazu gekommenen Stadtbushaltestellen kann in der Abbildung 5.7 grafisch leicht nachvollzogen werden. Der Südwesten von Zschadraß, sowie der Norden und der Südwesten von Colditz sind nicht mit Haltestellen erschlossen. Dies ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass im Norden der Kernstadt viele Agenten ihre Arbeitsaktivitäten vollziehen (z.B. *Anona* und andere Arbeitgeber) und im südwestlichen Teil von Colditz (Stadtteil Thumirnicht) sowie im südwestlichen Teil von Zschadraß viele Agenten wohnen. Wenn Agenten im 600m Umkreis von ihren jeweiligen Aktivitätsorten eine Haltestelle finden, dann legen sie in der Simulation ihre Wege mit dem ÖPNV zurück, wenn dies nicht der Fall ist laufen sie zu Fuß und nutzen das ÖPNV-Angebot nicht. Zum Beispiel muss auf dem Weg vom Wohnstandort eines Agenten zum Arbeitsort jeweils eine Haltestelle am Wohnort und eine Haltestelle am Arbeitsort innerhalb von maximal 600m fußläufig erreichbar sein, damit für den Agenten die Nutzung der Stadtbuslinie überhaupt in Frage kommt.

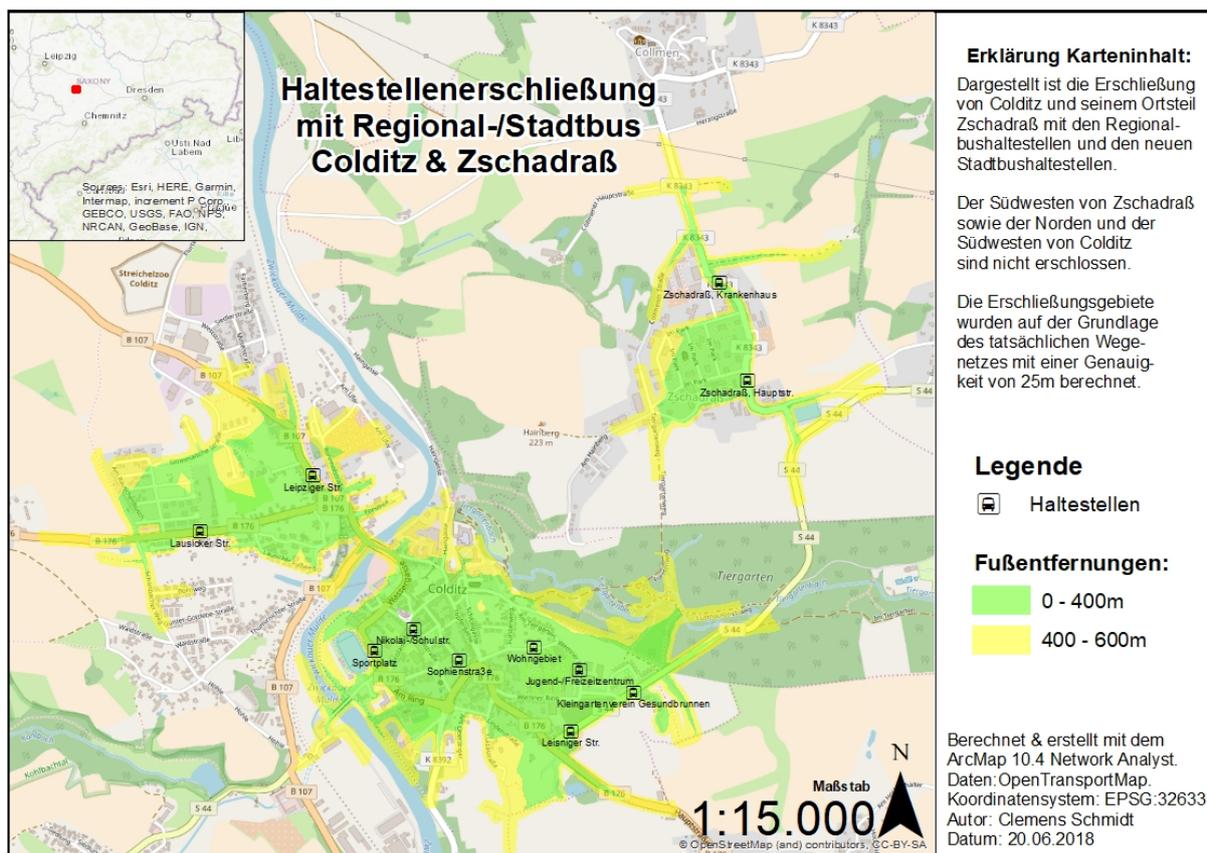


Abbildung 5.7: Die Erschließung der Colditzer Kernstadt und des Ortsteiles Zschadraß mit den für dieses Szenario zur Verfügung stehenden Haltestellen (eigene Abbildung).

Die *ökologische Bilanz* dieses Mobilitätsangebotes wurde pauschal mit Emissionsfaktoren gemäß dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA) berechnet

(Infras, 2018). MATSim verfügt zwar über ein eigenes *emissions* Modul, welches detaillierte Kalt- und Warmemissionen berechnen kann (Kickhöfer, 2016), dieses wurde aber nicht verwendet, da einerseits zu wenige Informationen über die konkret einzusetzenden konventionell angetriebenen Fahrzeugtypen vorlagen (keine Vorstellungen der Praxispartner speziell zu den DRT-Fahrzeugen) und weil andererseits der Szenariovergleich primär in die Zukunft blickt. Hier sollte bei der Umsetzung von innovativen Mobilitätslösungen auch darauf geachtet werden, saubere Technologien, wie Brennstoffzellen-, Elektro-, Hybrid- oder andere Antriebsformen, umzusetzen. Der Blick auf die ökologische Bilanz (aller drei Szenarios) ist also vor dem Hintergrund einer *kurzfristigen Umsetzung* zu betrachten (alle anderen Werte können kurz- und mittelfristig verwendet werden). Es wurden aus der HBEFA-Datenbank dazu die Emissionsfaktoren für das Jahr 2020 verwendet. Diese ergeben für den Typ *Linienbus* insgesamt 662,8g an Schadstoffen (siehe Kapitel 2), 242.618g CO₂ und 3,6g Feinstaub. Die Emissionen je befördertem Agent betragen 11,2g Schadstoffe, 4.112,2g CO₂ und 0,06g Feinstaub.

5.3.2 Haltestellenbasiertes DRT-Angebot für Colditz

Ein *vollkommen anderes Angebot* an potentiell ÖPNV-nutzende Agenten in Colditz wurde in Form eines routen- und zeitflexiblen DRT-Services getestet, welches aber nach wie vor nur feste Haltestellen bedient. Diese festen Haltestellen bestehen aus den vorhandenen Regionalbushaltestellen, sowie die im vorigen Angebot dargestellten Stadtbushaltestellen. Hinzu kommen zudem drei weitere Haltestellen: *Anona*, *Betriebshof* und *Thumirnicht*.

Die Simulationslogik im *drt* Modul ist aufgrund der *dynamisch reagierenden Agenten* etwas anders aufgebaut und somit auch deren Ergebnisse. Die Notenbildung und die Tagespläne der Agenten bleiben bestehen, außer dass auf allen Wegen innerhalb von Colditz und Zschadraß als Verkehrsmodus nun *drt* hinterlegt ist anstatt *pt*, wie es in der vorigen Simulation für alle Wege der Fall war und es in dieser Simulation nach wie vor für Wege außerhalb der Kernstadt und Zschadraß der Fall ist. Die Fahrzeuge des DRT-Angebotes sind *dynamische Agenten* die ohne festen Takt und Tagesablauf jeweils ad hoc auf Anfragen reagieren, im Gegensatz zu den statisch und vordefinierten Fahrten des klassischen Linienbusses. Deshalb wurde in den bisherigen MATSim-Simulationsstudien, welche DRT-Angebote untersuchten, jeweils auf den iterativen Prozess verzichtet und Agenten führten nur ihre vorprogrammierten anfänglichen Pläne aus, ohne diese in mehreren Durchläufen

anzupassen. Diese Einschränkung ist bekannt und akzeptiert, „since it causes only underestimation (not overestimation) of DRT performance“ (Navidi et al., 2017, S. 6). Die vorliegende Untersuchung behält jedoch den iterativen Prozess von MATSim bei, da Agenten für Wege außerhalb des DRT-Servicegebietes nach wie vor ihre Tagespläne optimieren sollen. Dies bedeutet jedoch auch Folgendes: wenn Agenten ihre Zeiten innerhalb von 30min anpassen dürfen, ändern sich die Anfragen an die dynamisch reagierenden DRT-Fahrzeuge in jeder Iteration und somit variiert auch das spezielle Routing der Fahrzeuge und Pooling von Anfragen. Daher wurden für diese Analyse die Durchschnittswerte der durchgeführten DRT-Fahrten aus den 100 Iterationen verwendet. Eine weitere Abweichung, die das *drt* Modul mit sich bringt, ist die Tatsache, dass je nach gewähltem Fahrzeugeinsatz und je nach Anfragerestriktionen nicht alle Anfragen bedient werden können und daher einige zurückgewiesen werden müssen. Deshalb wurden nur Simulationen berücksichtigt, die weniger als 5% Rückweisungsquote aufweisen, somit ist der DRT-Service ähnlich verlässlich wie der Linienbus (Bischoff et al., 2018, S. 3-4).

Es wurden die folgenden Simulationsparameter hinterlegt: Die Fahrzeuge sind normale Automobile mit einer Kapazität von vier Sitzplätzen (siehe Anhang A). Die Stoppzeit dieser DRT-Fahrzeuge wurde auf 30sek gesetzt, unter der Prämisse, dass jüngere Kunden kürzere Aus-/Einstiegszeiten benötigen als ältere Kunden. Dieser Wert lag anfangs bei 60sek, wurde aber auf der Zwischenpräsentation am 03. Mai 2018 mit den Praxispartnern gemeinsam auf 30sek festgelegt, da dies Erhebungen der Praxispartner zu Aus-/Einsteigevorgängen im ÖPNV von Leipzig und deren Umland ergeben haben. Die Zeitrestriktion t^{max} (siehe Kapitel 4.2) wurde auf 30min festgesetzt, vergleichbar mit dem Takt der Stadtbuslinie. Für die Zeitrestriktion t_r wurde Alpha (Umwegfaktor der Direktfahrt) auf 1,5 festgelegt. Dieser Wert erwies sich in vorherigen MATSim DRT-Simulationen als bester Kompromiss zwischen der Direktheit einerseits und der Teilung von Fahrten andererseits (Bischoff et al., 2017). Außerdem nutzen Unternehmen wie *CleverShuttle* (zumindest in Leipzig) diesen Umwegfaktor ebenfalls, gemäß den Informationen der Praxispartner. Beta (zusätzliche Zeit aufgrund von Warte-/Aus-/Einstiegszeiten) wurde in Absprache mit den Praxispartnern und im Hinblick auf die relativ kompakte Struktur des Bedienegebietes auf fünf Minuten festgelegt. Ansonsten gelten weiterhin die maximalen 600m Fußweg, die Kunden bereit sind zur nächsten Haltestelle zurückzulegen. Wenn die dynamischen DRT-Fahrzeuge einen Beförderungsfall *completed* haben (siehe Kapitel 4.2) und keine neue Anfrage besteht, dann verbleiben sie am letzten Ort, solange

bis ihnen eine neue Anfrage zugeteilt wird. Die Fahrzeuge *cruisen* also nicht umher auf der Suche nach Passagieren, wie dies z.B. bei Taxis der Fall ist, und es wurde auch kein „demand-supply balancing“ (Maciejewski et al., 2016, S. 70) angewandt, wie dies z.B. *Uber* umsetzt mit der preemptiven Verlegung von Fahrzeugen an Orte mit hoher Nachfrage. Der Untersuchungsraum dieser Simulation ist zu klein und zu nachfrageschwach, als dass solche Strategien spürbare Effizienzgewinne erbringen könnten.

Mit 100 Iterationen (siehe Anhang H) wurden folgende Simulationsergebnisse erzielt: **Insgesamt** fallen 1.129 Beförderungsfälle an. Es nutzen 340 Agenten das ÖPNV-Angebot der Untersuchungsregion, welches einen tatsächlichen Modal Split von 3,8% darstellt. 20 Agenten nutzen das ÖPNV-Angebot nicht und legen ihre Wege zu Fuß zurück. Vom Agententypus 5 (Senioren) nutzen nun 64 von insgesamt 72 Agenten das Angebot.

Ausschließlich mit dem **DRT-Service** erfolgen 458 Beförderungsfälle, dies ergibt 206 Agenten. Konkret sind darin 25% vom *Typus 5*, 24% vom *Typus 3*, je 23% vom *Typus 2 & 4* und die restlichen 4% zählen für den *Typus 1* (siehe Kapitel 5.2.3). Der Service wird am meisten am Nachmittag und am frühen Abend nachgefragt, wo Wege nach Hause oder zu bzw. von Einkaufs-/Erledigungs- und Freizeitaktivitäten anfallen (siehe Anhang H für grafische Analysen). Alle DRT-Fahrten repräsentieren eigenständige Wege, es finden keine DRT-Fahrten als Ab-/Zubringer zum Regionalverkehr statt.¹⁰

Aus *Anbietersicht* ist interessant, dass 644 Fz-km anfallen, wovon 239km leer durchgeführt werden; dies entspricht einer Leerfahrtenquote von 37%. Es kommt des Weiteren zu Kapazitätseinpässen bei den fünf Viersitzerfahrzeugen und es müssen 20 Anfragen (4%) aufgrund der vorgestellten Restriktionen zurückgewiesen werden (z.B. Fahrzeug bereits voll besetzt oder zu lange Warte- bzw. Umwegezeiten). Von den 20 Rückweisungen erfolgen bis auf zwei alle am späten Nachmittag/frühen Abend. Aus Sicht der *Kunden*, in dem Fall der Agenten, müssen im Durchschnitt 02:44 (min:sek) Wartezeit und 02:52 Reisezeit in den DRT-Fahrzeugen eingeplant werden. Es werden knapp 97% der Fahrten geteilt. Die *räumliche Erschließung* mit allen zur Verfügung stehenden Haltestellen kann in der Abbildung 5.8 grafisch nachvollzogen werden. Nach wie vor sind im Südwesten von Zschadraß und in einigen wenigen Teilen des Colditzer Nordens Wohngebiete nicht mit Haltestellen erschlossen. Viele Agenten, die im Norden der Kernstadt ihre Arbeitsaktivitäten vollziehen (z.B. bei *Anona* oder anderen Arbeitgebern) und die im südwestlichen Teil

¹⁰DRT-Fahrten als Ab-/Zubringer zu fahrplanbasierten Angeboten sind sehr schwer zu modellieren und extrem fehleranfällig (Leich & Bischoff, 2018).

von Colditz (Stadtteil Thumirnicht) wohnen, nutzen nun - im Gegensatz zum vorherigen Szenario - den ÖPNV in Form des DRT-Angebotes. Der Südwesten von Zschadraß bleibt hingegen unerschlossen und Agenten, die dort wohnen nutzen, nach wie vor nicht das zur Verfügung stehende Angebot. Die *ökologische Bilanz* dieses Mobilitätsangebotes ist ebenfalls anhand der Emissionsfaktoren für das Jahr 2020 berechnet worden, in diesem Fall aber für den Typ *PKW* (Infras, 2018). Es ergeben sich insgesamt 730,9g an Schadstoffen (siehe Kapitel 2), 98.247,4g CO₂ und 2,6g Feinstaub. Die Emissionen je befördertem Agent betragen 3,6g Schadstoffe, 476,9g CO₂ und 0,01g Feinstaub.

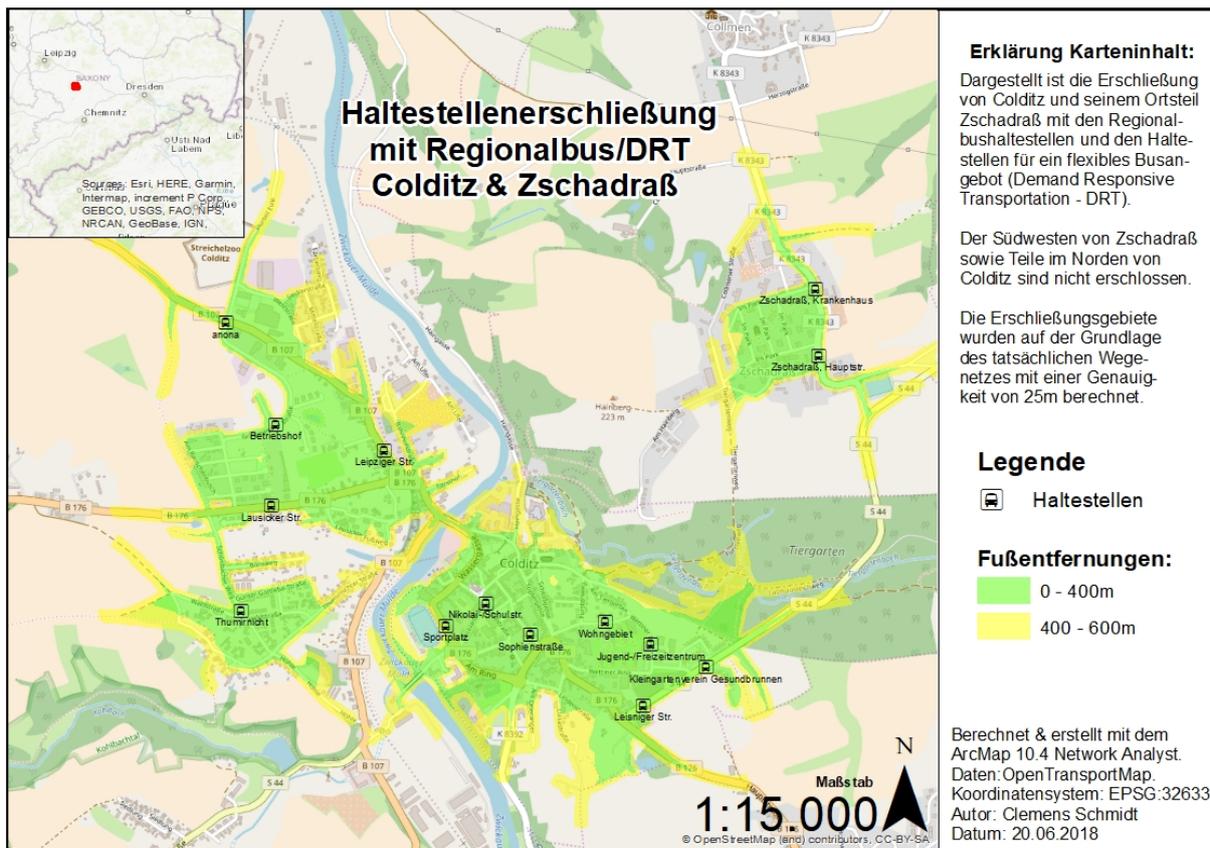


Abbildung 5.8: Die Erschließung der Colditzer Kernstadt und des Ortsteiles Zschadraß mit den für dieses Szenario zur Verfügung stehenden Haltestellen (eigene Abbildung).

5.3.3 Tür-zu-Tür DRT-Angebot für Colditz

Das *dritte mögliche Angebot* an potentiell ÖPNV-nutzende Agenten ist schließlich eine vollumfängliche Haustürbedienung. Agenten legen nun also in Colditz und Zschadraß ihre Wege nicht mehr zu Fuß zurück, es sei denn Fußmärsche erweisen sich als schneller im Vergleich zu geteilten Fahrten mit einem DRT-Fahrzeug. Ansonsten werden sie an ihrer

Haustür abgeholt und bis an den exakten Ort ihrer nächsten Aktivität befördert, müssen aber einen gewissen Umweg durch die Mitnahme von anderen Passagieren in Kauf nehmen.

Die Simulationslogik bleibt ebenso bestehen wie die Alpha-/Betawerte und das Fahrzeugverhalten (siehe Kapitel 5.3.2). Da die Agenten jetzt jedoch vor der Haustür abgeholt werden und somit keine Fußwege zu und auch keine Wartezeiten an Haltestellen mehr haben, wurde die Zeitrestiktion t^{max} (siehe Kapitel 4.2) auf 60min eingestellt. Hierbei spielt die Annahme eine Rolle, dass das Warten im eigenen Haus (oder anderen Standorten) weniger negativ behaftet ist, als das Warten an einer Haltestelle (Jara-Diaz & Tirachini, 2013) und Agenten deshalb diese höhere Wartezeit akzeptieren. Als Fahrzeugtyp wurde von den Praxispartnern für dieses Szenario ein Kleinbus vorgegeben mit einer Kapazität von max. 14 Plätzen (siehe Anhang A).

Bei 100 Iterationen (siehe Anhang I) wurden folgende Simulationsergebnisse erzielt: **Insgesamt** fallen 1.172 Beförderungsfälle an. Es nutzen 342 Agenten das komplette ÖPNV-Angebot der Untersuchungsregion, welches einen tatsächlichen Modal Split von 3,8% darstellt. 18 Agenten nutzen das ÖPNV-Angebot nicht und legen ihre Wege zu Fuß zurück. Insgesamt werden also zwei Agenten hinzugewonnen, im Vergleich zum vorherigen Szenario.

Ausschließlich mit dem **DRT-Service** erfolgen 512 Beförderungsfälle, dies bezeichnet 215 Agenten. Konkret sind darunter 25% vom *Typus 5*, je 24% vom *Typus 3 & 4*, 23% vom *Typus 2* und die restlichen 5% zählen für den *Typus 1* (siehe Kapitel 5.2.3). Der Service wird am meisten am Nachmittag und am frühen Abend nachgefragt, wo Wege nach Hause oder zu bzw. von Einkaufs-/Erledigungs- und Freizeitaktivitäten anfallen (siehe Anhang I für grafische Analysen). Es finden wieder keine DRT-Fahrten als Ab-/Zubringer zum Regionalverkehr statt.

Aus *Anbietersicht* ist entscheidend, dass 838 Fz-km anfallen, wovon 285 leer durchgeführt werden; die entspricht einer Leerfahrtenquote von 34%. Für gültige Simulationen (Rückweisungsquote unter 5%) sind mindestens 10 Fahrzeuge nötig. Dennoch kommt es zu Kapazitätseinpassen und es müssen 24 Anfragen (4%) zurückgewiesen werden. Diese Rückweisungen erfolgen jedoch nur aufgrund der Alpha- und Betawerte, sprich zu langen Umwege- bzw. Warte-/Aus-/Zustiegszeiten. Rückweisungen aufgrund von voll besetzten DRT-Fahrzeugen gibt es in diesem Szenario nicht; zu einer Zeit befinden sich sechs Agenten und zu einer anderen Zeit fünf Agenten im selben Fahrzeug, ansonsten ist die Besetzungsverteilung ähnlich wie im vorherigen Szenario. Fahrzeuge mit 14 Plätzen werden also

nicht benötigt, acht Plätze pro Fahrzeug sind vollkommen ausreichend (z.B. Van). Von den 24 Rückweisungen erfolgen, bis auf fünf am Morgen (06-08 Uhr), alle am späten Nachmittag/frühen Abend. Aus *Kundensicht* (Agenten) stehen im Durchschnitt 03:22 (min:sek) Wartezeit und 03:51 Reisezeit in den DRT-Fahrzeugen zu Buche. Es werden knapp 87% der Fahrten geteilt. Die *räumliche Erschließung* bedarf in diesem Szenario keiner eigenen Karte, denn sie ist bereits vollkommen (und alles wäre grün eingefärbt). DRT-Fahrzeuge steuern bei gültigen Anfragen jede Adresse innerhalb der Kernstadt und dem Ortsteil Zschadraß an. Daher nutzen in diesem Szenario nun auch Agenten die im Südwesten von Zschadraß wohnen, den ÖPNV. Die *ökologische Bilanz* dieses Mobilitätsangebotes wurde anhand der Emissionsfaktoren für das Jahr 2020 und für den Fahrzeugtyp *Lieferwagen/Leichtes Nutzfahrzeug* berechnet (Infras, 2018). Es ergeben sich insgesamt 737,4g an Schadstoffen (HC, CO, NO_x), 163.219,7g CO₂ und 17,6g Feinstaub. Die Emissionen je beförderten Agent betragen 3,4g Schadstoffe, 759,2g CO₂ und 0,08g Feinstaub.

5.4 Vergleich der drei Szenarios

Für einen durchschnittlichen Wochentag werden also bei gleicher Verteilung der Agenten, deren Aktivitäten, Wegemuster und Zeiten im jeweils selben Untersuchungsgebiet Angebotsveränderungen im Sinne von Erweiterungen durch drei mögliche Szenarios verglichen. Dabei wurden immer dieselben anfänglich vorprogrammierten Tagespläne der Agenten und auch dasselbe Wegenetz in die Simulationen eingespeist (siehe Kapitel 5.2). Lediglich die Fahrzeugdateien und die jeweiligen Konfigurationsdateien unterschieden sich. Der Vergleich untersucht wie die Agenten auf das jeweilige Angebot reagieren: Wird das zusätzlich geschaffene Angebot genutzt? Wenn dem so ist, in welchem Umfang und zu welchen Konditionen?

Tabelle 5.1 zeigt alle relevanten Simulationsergebnisse der drei Szenarios aus dem Blickwinkel des *ÖPNV-Anbieters*. Die benötigten Fahrzeuge, anfallende Fz-km, Beförderungsfälle und Agenten steigen jeweils sehr stark an mit einem zunehmenden Grad an Flexibilisierung bzw. Serviceausweitung. Einzig die Leerfahrtenquote verhält sich dem entgegengesetzt und sinkt mit dem Grad der Flexibilisierung. Die allgemeine Erkenntnis aus den drei Szenarios ist also, dass Agenten in der Simulation den ÖPNV verstärkt nutzen, wenn dieser auch in ihrem täglichen Wirkungskreis operiert, dass dafür aber auch deutlich mehr Fahrzeuge nötig sind und mehr Fz-km anfallen. Die Unterschiede zwischen den bei-

den flexiblen DRT-Angeboten sind im Hinblick auf die Agenten und die Leerfahrtenquote marginal, jedoch nicht hinsichtlich der Beförderungsfälle, der Fahrzeuganzahl und der Fz-km. Es werden in der Tat nur neun Agenten als Kunden hinzugewonnen und die Leerfahrten reduzieren sich um 3%, im Gegenzug sind aber doppelt so viele Fahrzeuge nötig, da die Beförderungsfälle ansteigen und im Haustürservice Agenten nun durchschnittlich 2,4 Fahrten mit DRT-Services durchführen, anstatt 2,2 in der Simulation mit flexibler Haltestellenbedienung.

Tabelle 5.1: Der Vergleich der drei Szenarios aus der Sichtweise des ÖPNV-Anbieters.

	Feste Stadtbuslinie	Flexible Haltestellenbedienung	Flexibler Haustürservice
Fahrzeuge:	1 Mini-/Midibus	5 PKW	10 Kleinbusse/Vans
Kapazität:	mind. 12 Plätze	mind. 4 Plätze	mind. 6 Plätze
Fz-km:	200	644	838
Beförderungsfälle:	93	458	512
Agenten:	59	206	215
Leerfahrten:	51%	37%	34%

Vor diesem Hintergrund erscheint es für den Anbieter wenig sinnvoll die flexible Haustürbedienung zur Verfügung zu stellen, da diese sowohl mit erheblichen fixen Mehrkosten durch den höheren Personalaufwand, als auch mit höheren Anschaffungskosten einhergeht. Ob aus Anbieterseite die Stadtbuslinie oder die flexible Haltestellenbedienung finanziell gesehen günstiger ist, kann diese Masterarbeit nur bedingt beurteilen. Gemäß den qualitativen Aussagen der Praxispartner würden zumindest die Anschaffungskosten für fünf PKW nicht über denen eines Mini-/Midibusses liegen, die fixen Personalkosten würden in diesem Fall jedoch um das Fünffache höher sein. Eine MATSim-Simulationsstudie zu automatisierten geteilten Taxis kam zu der Erkenntnis, dass autonom fahrende und geteilte Taxis in ihren Betriebskosten unter denen von konventionellen Linienbussen liegen (Leich & Bischoff, 2018). Bezieht man diese Erkenntnisse mit ein, könnte mittel- bis langfristig die flexible Haltestellenbedienung günstiger sein bei gleichzeitig höherem Servicegrad für die Kunden. Kurzfristig ist jedoch die einfache, schnelle und kostengünstiger umzusetzende Stadtbuslinie (eventuell mit verlängerter Linienführung in den Norden von Colditz) für den ÖPNV-Anbieter erstrebenswerter, um überhaupt ein Angebot auf diesem Markt zur Verfügung zu stellen.

Die Abbildung 5.9 zeigt aus dem Blickwinkel der *ÖPNV-nutzenden Agenten (Kunden)* die durchschnittlichen Wartezeiten und Reisezeiten im Fahrzeug für die drei Szenarios.

Die traditionell fahrplangebundene Stadtbuslinie weist die höchsten Werte aus Sicht der Passagiere auf, die flexible Haltestellenbedienung die niedrigsten.¹¹ Die Warte- und Reisezeit der Agenten beträgt mit der flexiblen Haltestellenbedienung weniger als die Hälfte der Zeit, die sie mit der Stadtbuslinie betragen würde. Der zusätzliche Grad an Serviceausweitung anhand der Haustürbedienung bewirkt, dass sich die Warte- und Reisezeiten durch die unendlich vielen Start- und Zielpunkte der Agenten wieder erhöhen im Vergleich zur flexiblen Haltestellenbedienung. Zu dieser Beobachtungen kamen auch andere MATSim-Simulationen zu geteilten Fahrten (Nagel et al., 2018). Aus Kundensicht ist die flexible Haltestellenbedienung ein sehr attraktives Angebot mit Blick auf Reise- und Wartezeiten, die flexible Haustürbedienung ist für viele Kunden aber gleichermaßen attraktiv, z.B. für körperlich stark eingeschränkte Personen und/oder Senioren.

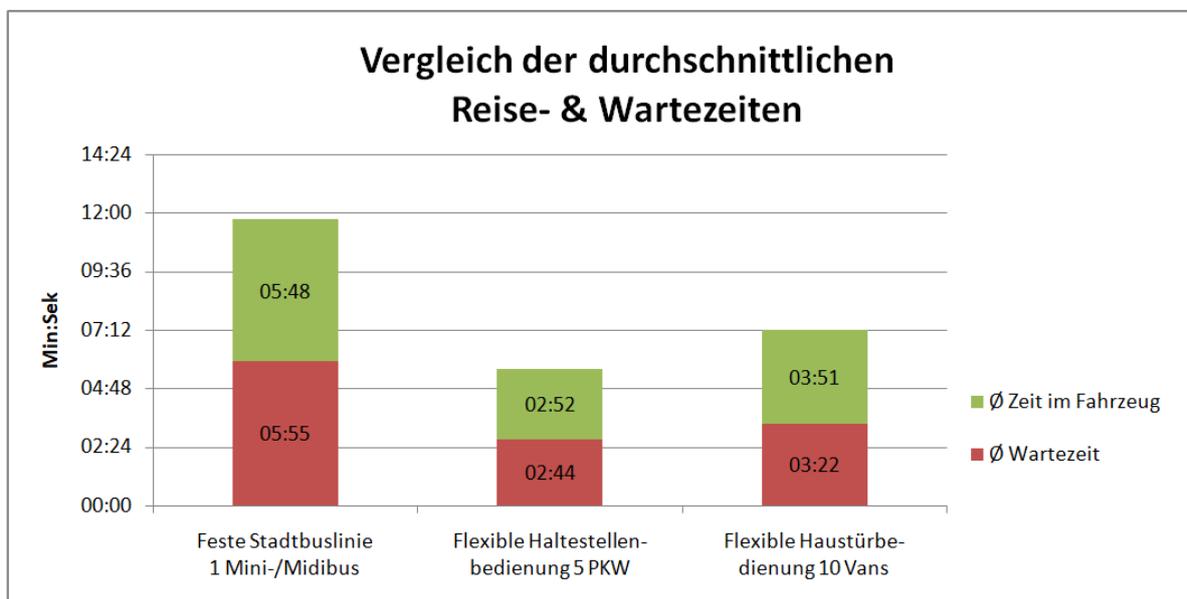


Abbildung 5.9: Der Vergleich der drei Szenarios aus der Sichtweise der ÖPNV-nutzenden Agenten (eigene Abbildung). Durchschnittswerte für die jeweilige Zahl der Agenten!

Schließlich bleibt der Blick aus *gesamtgesellschaftlicher Sicht* auf die drei unterschiedlichen Szenarios. Die *räumliche Erschließung* des Untersuchungsgebietes ist bei der flexiblen Haustürbedienung vollkommen, in den anderen beiden Szenarios existieren dagegen Erschließungslücken. Die Simulationen haben jedoch gezeigt, dass diese Lücken nur bei der Stadtbuslinie gravierend sind. Dort bleiben das im Colditzer Norden gelegene Gewerbegebiet und der Stadtteil Thumirnicht unerschlossen, wodurch sehr viele Agenten das

¹¹Bei den beiden DRT-Services zählen alle Agenten die DRT-Fahrten durchführen. Bei der Stadtbuslinie zählen 16 Agenten mit 25 Beförderungsfällen. Diese Zahl weicht vom Kapitel 5.3.1 ab, da für den Vergleich nur Fahrten ausschließlich mit der Stadtbuslinie berücksichtigt worden und keine Ab-/Zubringerfahrten zum Regionalverkehr. Dies ermöglicht den Vergleich mit den beiden DRT-Services.

theoretisch zur Verfügung stehende ÖPNV-Angebot nicht nutzen. In der Simulation legen diese Agenten ihre Wege zwangsläufig zu Fuß zurück, in der Realität wird dies jedoch auch zum Großteil mit dem Fahrrad oder dem MIV erfolgen. Das *accessibility problem* (siehe Kapitel 3.4) besteht also bei den beiden DRT-Services nicht, bei der Stadtbuslinie hingegen schon. Die Tabelle 5.2 zeigt die relevanten Werte aus *ökologischer Perspektive*, für den Fall, dass eines dieser Szenarios ab dem Jahr 2020 und mit konventionellen Antriebstechnologien umgesetzt werden würde. Die Emissionen wurden je Agent gerechnet (nicht je Beförderungsfall), weil aus gesamtgesellschaftlicher Sicht eine unbegrenzt mögliche ÖPNV-Mobilität kein erstrebenswertes Ziel ist (Becker et al., 2009). Denn auch die als *sauber* deklarierte ÖPNV-Mobilität verursacht Verkehr und es soll schließlich nicht mehr sondern weniger Verkehr durch ÖPNV-/DRT-Angebote erzielt werden (siehe Kapitel 2 & 3). Die flexible Haltestellenbedienung liefert auch hier, mit den zugrundeliegenden Fahrzeugtypen im Hinterkopf, die besten Argumente dieses Angebot umzusetzen. Die Stadtbuslinie weist mit großem Abstand die höchsten Emissionen auf, da bei diesem Angebot auch am wenigsten Agenten transportiert werden.

Tabelle 5.2: Der Vergleich der drei Szenarios aus ökologischer Sicht bei Verwendung konventioneller Antriebstechnologien und einer Umsetzung im Jahre 2020.

	Feste Stadtbuslinie	Flexible Haltestellenbedienung	Flexibler Haustürservice
Schadstoffe:	11,2g	3,6g	3,4g
CO ₂ :	4.112,2g	476,9g	759,2g
Feinstaub:	0,06g	0,01g	0,08g

Der hier vorgebrachte Vergleich ist ein *Vergleich zwischen Extremen*: Einerseits müssen sich Agenten im Szenario der Stadtbuslinie nach einem fest vorgegebenen Angebot richten, einem Angebot, das nur in einem bestimmten Teil der Stadt verfügbar ist und welches ihren Tagesablauf letztendlich mitbestimmt, da sie sich nach Abfahrtszeiten richten müssen. Die flexible Haustürbedienung ist das genaue Gegenteil davon. Hier müssen Agenten keinen Meter mehr zu Fuß gehen um in der Kleinstadt zu jedweden Arbeits-/Schul-/Freizeit-/Einkaufs- und Erledigungsorten zu gelangen. Auch brauchen sie sich nicht nach einem Fahrplan zu richten, sondern können jederzeit (*on demand*) mobil sein. In den Simulationen nutzen daher auch die meisten Agenten den ÖPNV mit dem zur Verfügung stehenden Haustürangebot, weil es sie schlicht dort abholt bzw. hinbringt, wo sie ihre Aktivitäten vollziehen. Ob echte Menschen sich genauso verhalten, wie die virtuellen Agenten, ist bisher jedoch nicht bekannt, da es nach wie vor keinen Vergleichs-

falls gibt. Zumindest ist dem Autor dieser Arbeit kein Vergleich von DRT-Simulation mit tatsächlicher DRT-Nutzung bekannt. Alle drei Szenarios haben jeweils nur die Simulationsergebnisse untersucht, die die geringsten Kosten für den ÖPNV-Anbieter beinhalten. Das heißt konkret, dass mit dieser Analyse keine DRT-Simulationen näher untersucht wurden, die einen höheren Fahrzeugeinsatz erfordern, dafür aber insgesamt geringere Fz-km und Leerfahrtenquoten generieren (Leich & Bischoff, 2018). Außerdem wurden in den DRT-Simulationen keine intermodalen Wegeketten modelliert, also keine DRT Zu- bzw. Abgänge zum fahrplangebundenen Regionalverkehr. MATSim verfügt zwar über einen solchen *intermodalen access/egress router* innerhalb des *autonomous vehicles (av)* Moduls, dieser wurde aber nicht verwendet, weil er bisher nur sehr spärlich getestet wurde und weil er auch nicht mehr vom MATSim-Team unterstützt wird; stattdessen wird derzeit neuer und leistungsfähigerer Router programmiert. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die hier vorgestellten DRT-Simulationsergebnisse noch etwas höher ausfallen, wenn zusätzliche Zu- bzw. Abbringerfahrten modelliert werden.

Bezogen auf die Fragestellung dieser Masterarbeit lassen sich folgende *kurzfristig orientierte Hypothesen* für das Colditzer Fallbeispiel aufstellen:

*Für die Colditzer **ÖPNV-Kunden** sind flexible und nachfrageorientierte Mobilitätsangebote deutlich attraktiver als ein fahrplangebundenes Angebot, da sie dadurch geringere Reise- und Wartezeiten während ihrer täglichen Wege erdulden müssen.*

*Für den **ÖPNV-Anbieter** in Colditz ist das fahrplangebundene Mobilitätsangebot deutlich attraktiver als die Einrichtung eines flexiblen und kundenorientierten Angebotes, da hiermit die niedrigsten fixen (Personal-)Kosten zu Buche stehen.*

*Aus **gesamtgesellschaftlicher Sicht** ist für Colditz ein flexibles aber haltstellengebundenes Mobilitätsangebot erstrebenswert, da hiermit der beste Kompromiss aus räumlicher ÖPNV-Erschließung (der Voraussetzung für soziale, wirtschaftliche & politische Teilhabe von Menschen in den ländlichen Räumen ohne Zugang zu einem Automobil) und ökologischer Bilanz erreicht wird.*

Diese Hypothesen können nicht generalisiert und auf andere Untersuchungsregionen angewandt werden, da es „keine für alle ländlichen Regionen passenden Lösungsansätze zur Gewährleistung der Mobilität der Bevölkerung gibt und auch flexible Bedienformen die Probleme des ÖPNV nicht umfassend beheben können.“ (Riesner, 2014, S. 48). Wird diese Untersuchung jedoch im Kontext anderer MATSim DRT-Simulationen betrachtet, dann zeigen sich folgende übereinstimmende Trends: Eine flexible Haustürbedienung ist für die ÖPNV-Anbieter mit erheblichen Mehrkosten verbunden, im Gegensatz zur flexiblen Haltestellenbedienung, welche im Übrigen auch kürzere Warte- und Reisezeiten für die ÖPNV-Kundschaft aufweist (Nagel et al., 2018). Das Ersetzen von traditionellen Linienbussen durch kleine und flexibel operierende DRT-Fahrzeuge bringt erhebliche Servicevorteile für die Kundschaft mit sich; Kostenvorteile auf Seiten der Betreiber können vermutlich nur durch den Einsatz von autonom fahrenden Fahrzeugen erzielt werden (Leich & Bischoff, 2018) Die Flexibilisierung des ländlichen ÖPNV-Angebotes durch DRT-Services kann also nicht per se als Erfolgsstrategie angesehen werden.

Diskussion & Praxisbezug

6.1 Methodische Limitationen

Die vorliegende Masterarbeit hat drei mögliche und voneinander völlig unabhängige Szenarios anhand der Simulationssoftware MATSim modelliert. Die Ergebnisse *keiner* dieser Simulationen können eins-zu-eins in die Praxis übertragen werden. Dies liegt zum einen an der Qualität der Eingabedaten der Simulationen - diese standen nur in aggregierter Form und als Durchschnittswerte für alle ländlichen Räume in Deutschland zur Verfügung und nicht detailliert für Colditz und seine Bevölkerung (siehe Kapitel 5.2) - und zum anderen an der Methodik selbst. ABMs können niemals die wirkliche Realität mit ihrer ganzen Komplexität zu 100% nachzeichnen. Agenten bleiben immer, wie realistisch sie auch modelliert wurden, *virtuelle Kunstfiguren*, die nach gewissen Regeln handeln. Menschen hingegen handeln nicht immer im Sinne des *homo oeconomicus*. Wenn man sich beispielsweise die Kundengruppe der *ökologieorientierten ÖPNV-Befürworter* (Boltze et al., 2002, S. 35) ansieht, die auch Umwege oder längere Reise- sowie Wartezeiten in Kauf nehmen, da sie ganz bewusst auf ein eigenes Automobil verzichten, dann besitzt bei diesen Menschen die minutiöse Optimierung ihres Tages keinen hohen Stellenwert. Ebenso ist dies der Fall bei *altruistisch eingestellten Personen*, die Begleitfahrten durchführen und zum Teil auch bei *Menschen ohne Berufsbeschäftigung*. Des Weiteren sollte man sich auch darüber bewusst sein, dass immer nur ein durchschnittlicher Wochentag simuliert wurde und dass die Werte sich in der Realität an einem Montag bzw. Freitag aufgrund

von Pendlermobilität - Arbeiter bzw. Studenten die das Wochenende in der Heimat verbringen - erheblich von denen unter der Woche unterscheiden können. Dies ist vor allem mit Blick auf die DRT-Fahrzeuganzahl und deren Kapazität zu beachten. Nichtsdestotrotz gilt der gewählte Simulationsansatz der *gegenwärtig weitestreichende seiner Art* und dient als Entscheidungshilfe für ÖPNV-Betreiber, die über die Einführung flexibler Bedienung in ihrem Servicegebiet nachdenken. Die Betreiber sollten sich darüber im Klaren sein, dass flexible Bedienung zwar einerseits effiziente Fahrzeug-Kunden-Zuteilung bedeutet und dass somit Fahrzeuge nur fahren wenn auch Anfragen bestehen, dass dies aber keineswegs mit niedrigeren Kosten und/oder geringeren Fz-km einhergeht. Für ein serviceorientiertes DRT-Angebot werden mehr Fahrzeuge benötigt und deren Fahrer (wenn konventionell betrieben) müssen auch bezahlt werden, wenn keine Anfragen bestehen, was sich in höheren fixen Personalkosten widerspiegelt. Ein solches Angebot könnte jedoch in der Folge aufgrund seiner Attraktivität neue Kundengruppen erschließen und aufgrund geringerer Leerfahrtenquoten die Mühe wert sein.

6.2 Nachfrageschwacher aber kein disperser Raum

Es wurde in den dargelegten drei Szenarios jeweils ein- und derselbe *nachfrageschwache Raum* der ländlichen Kleinstadt Colditz untersucht. Die Untersuchungsregion bzw. das Bedienebiet weist zum Teil urbane Züge (zumindest die Kernstadt von Colditz) und eine kompakte Siedlungsstruktur auf. ÖPNV-Mobilität in den ländlichen Räumen steht jedoch zumeist vor der viel größeren Herausforderung *disperse Siedlungsstrukturen* angemessen zu bedienen. Die DRT-Bedienung eines dispersen ländlichen Raumes konnte vor dem Hintergrund des gewählten Fallbeispiels nicht untersucht werden. Eine Untersuchung im englischen Lincolnshire sieht für DRT-Mobilitätsangebote in ländlichen Räumen mit niedrigen Bevölkerungsdichten zwar theoretisch eine *Marktnische* (Wang et al., 2015, S. 130), in der Realität muss aber vermutlich mit großen Voranmeldezeiten gearbeitet werden, damit die Nachfrage bei angemessenem Fahrzeugeinsatz bedient werden kann. Die Zuteilung des nächsten freien Fahrzeuges könnte hier zu ausufernden Fz-km führen und dieses Angebot schließlich nicht finanzierbar machen. Bei Voranmeldezeiten von mehreren Stunden bzw. bei regelmäßiger Buchung durch Berufspendler (Wang et al., 2015, S. 134) kann jedoch nicht mehr von einem DRT-Service im engeren Sinne die Rede sein (siehe Kapitel 2 & 3). Vielmehr wird es sich dann um eine Art des klassischen

Rufbusses o.ä. handeln (siehe Kapitel 3.2), bei dem nur Zu- und Abbringerfahrten zum übrigen ÖPNV durchgeführt werden und kein *nachfrageorientierter Mobilitätsservice (on demand)* angeboten wird. Eine kostenorientierte Untersuchung von autonom fahrenden DRT-Services kommt zu der Erkenntnis, dass fahrerlose und geteilte Fahrzeuge in den ländlichen Räumen größere Kostenvorteile haben als dies in urbanen Gebieten zu erwarten ist, weil dort hohe indirekte Kosten und Reinigungskosten zu Buche schlagen (Bösch et al., 2018). Dies ist jedoch auch nur eine szenariobasierte Schätzung und es kann konträr dazu auch möglich sein, dass die angesprochenen enorm hohen Fz-km und sehr niedrigen Besetzungsgrade diese Kostenvorteile vollkommen aufbrauchen und der ländliche ÖPNV nach wie vor stark staatlich subventioniert und/oder mit Einnahmen des urbanen ÖPNV gegenfinanziert werden muss.

6.3 Zukünftiges Mobilitätsverhalten

Diese Masterarbeit hat in Bezug auf die Nutzung von DRT das Verhalten von Agenten simuliert. Dies geschah auf der Grundlage vergangener und statistisch repräsentativer Mobilitätsmuster im traditionellen ÖPNV. Wenn in Realität jedoch ein solches Angebot eingeführt wird, dann müssen sich die bisherigen Kunden und auch die eventuellen Neukunden erst einmal auf dieses neue Angebot einrichten. Konkret bedeutet dies, dass Menschen sich innerhalb von Colditz nicht nach einem Fahrplan richten müssen, sondern die Fahrzeuge/Fahrer richten sich nach ihnen und ihren Anfragen bzw. Mobilitätswünschen. Diese Umkehrung des Verhältnisses Kunden-Anbieter beinhaltet gleichzeitig eine Anpassung des generellen Mobilitätsverhaltens. Dabei ist es von Nöten sich, sich folgende Fragen zu stellen: *Wie stark ändern sich die Anzahl der durchschnittlichen Wege, die Zusammensetzung der Wegemuster und auch die Startzeiten der ÖPNV-Nutzer?* Diese Anpassung des Mobilitätsverhaltens haben die vorliegenden Simulationen nicht abdecken können und es gab auch keine Anhaltspunkte wie diese Anpassung konkret aussehen könnte bzw. über welchen Zeitraum sie sich vollzieht (Anpassungs-/Übergangsphase). Somit spiegeln die Simulationsergebnisse nur dann Werte wider, wenn sich das Mobilitätsverhalten nicht signifikant durch die Nutzung von DRT-Services ändern würde. Aus der Vergangenheit ist jedoch bekannt und vielfach belegt, dass ein Angebot immer auch Nachfrage induziert (Rodrigue et al., 2013, S. 246-248). Das heißt, dass die heutige Planung, z.B. des haltestellenbasierten DRT-Services mit fünf PKW, nach einer Einführungsphase von

beispielsweise zwei bis drei Jahren aufgrund der Änderung des Mobilitätsverhaltens der Kunden vollkommen hinfällig sein kann und dann doch die doppelte Anzahl von Fahrzeugen benötigt wird, ohne eine Steigerung des Modal Splits zu erzielen. Im Falle der flexiblen Haustürbedienung könnte sich jedoch auch der Modal Split signifikant nach oben verändern, indem Kunden dieses attraktive Angebot nutzen würden, um das eigene Automobil zu ersetzen. In diesem Fall werden zusätzliche ÖPNV-Wege generiert und motorisierter Verkehr induziert (viele Umwege durch geteilte Fahrten). Hier stellt sich die Frage, ob es die Aufgabe des ÖPNV ist, solche unbegrenzten Mobilitätsdienstleistungen zur Verfügung zu stellen und ob nicht eine bewusste gesellschaftliche Begrenzung ohne Haustürservice sinnvoller wäre. Schließlich erhalten körperlich stark eingeschränkte Personen schon jetzt spezielle Beförderungsscheine. Ein Haustürservice könnte auch weitere denkbare gesamtgesellschaftliche Externalitäten hervorbringen, wie negative Effekte für den örtlichen Einzelhandel (z.B. Verringerung der Flanierwege entlang von Geschäften) und die Verschlechterung der gesundheitlichen Konstitution der Kunden durch eine Verringerung der Nahmobilität (Monheim, 2009), das heißt eine geringere Menge an zurückgelegten Wegen zu Fuß oder per Fahrrad innerhalb des täglichen Wohn- und Arbeitsumfeldes.

6.4 Aspekte von DRT-Mobilität

Anbieter von DRT-Serviceangeboten sollten sich in der Realität schließlich über folgende, nicht von den Simulationen erfasste, Aspekte bewusst sein: Eine Umsetzung des Angebotes *ausschließlich auf Smartphone-Basis* schließt im Moment noch vielfach Kundengruppen wie Senioren (siehe Kapitel 3.3) und dauerhaft auch bewusste Smartphone-Verzichter aus. Es sollte daher zumindest in der Einführungsphase auch die Möglichkeit bestehen, den Service per Telefon zu buchen. Die zu benutzende Smartphone-App sollte darüber hinaus intuitiv bedienbar sein, um einen möglichst niedrighwelligen Einstieg für alle zu gewährleisten (Dickinson et al., 2015, 2017). Wenn ein solches DRT-Angebot mit autonom fahrenden Fahrzeugen umgesetzt wird, sind zudem grundsätzlich ablehnend eingestellte Kundengruppen zu erwarten und auch gewerkschaftlicher Druck aufgrund von Arbeitsplatz- und Existenzängsten ist absehbar. Ein weiterer Punkt bei autonom fahrenden Fahrzeugen ist die Belästigung der Fahrgäste untereinander, Vandalismus und Verschmutzung, die durch die Abwesenheit von Personal auftreten könnten und dadurch neugewonnene Kunden wieder zum MIV zurück ziehen. Wenn es keinen Fahrplan mit eindeutigen Lenk-

und Pausenzeiten der Fahrer mehr gibt (wenn konventionell betrieben), dann müssten die Pausenzeiten der Fahrer neu und klar geregelt sein, unter Beachtung der zur Verfügung stehenden Fahrzeug- und Fahreranzahl sowie den einzuhaltenden Bedienkriterien. Fahrer sollten nicht über den gesamten Dienstzeitraum theoretisch wie praktisch auf Abruf stehen, ohne klar definierte Pausen. Wenn eine flexible Haltestellenbedienung eingeführt wird, dann müssen auch die neuen Haltestellen gemäß den geltenden Standards hergerichtet werden (FGSV, 2010), was wiederum Kosten mit sich bringt. Anbieter müssen sich zudem eine Dispatching-Software zulegen, die in der Lage ist, die hier vorgestellte oder andere Formen der Fahrzeugzuteilung zu den gültigen Kundenanfragen durchzuführen (siehe z.B. (Schiefelbusch & Bounin, 2017)). Eine weitere Frage, die zu klären ist, bezieht sich auf die Tarifgestaltung: Sollen Serviceaufschläge verlangt werden mit dem Risiko, dass dadurch das DRT-Angebot an Attraktivität und somit an Kunden verliert (König & Viergutz, 2017)? Können die durch autonom fahrende Fahrzeuge eingesparten Personalkosten dem DRT-Angebot (und letztlich dem ÖPNV) dazu verhelfen, attraktive und zum MIV konkurrenzfähige Tarife zu ermöglichen (Nagel et al., 2018)? Schließlich könnte man noch über die Kombination fahrplangebundener und flexibler Angebote nachdenken. In diesem Sinne könnten z.B. in den Stoßzeiten am Morgen und am Nachmittag traditionell fahrplangebundene Busse verkehren und zu allen anderen Zeiten kleine Fahrzeuge auf Abruf bereit stehen. Dies ist aus ÖPNV-Betreibersicht sicherlich ein attraktiver Kompromiss, wenn der Mut zur radikalen Veränderung fehlt, könnte aber zu Verwirrung durch die schwer nachvollziehbare Angebotsdiversifizierung auf Seiten der Kunden führen und hat dadurch eine hohe Wahrscheinlichkeit zu scheitern (Mehlert, 2001).

Fazit

Diese Masterarbeit untersucht anhand einer Multi-Agenten Simulationsanalyse ÖPNV-Mobilität im ländlichen und nachfrageschwachen Colditz. Sie beleuchtet dabei demografische, ökologische, räumliche und wirtschaftliche Aspekte aus den jeweiligen Blickwinkeln des Anbieters, der Kunden und der Gesamtgesellschaft. Die mit der MATSim Software erhaltenen Simulationsergebnisse für drei verschiedene Angebotsszenarios deuten darauf hin, dass für die ÖPNV-Kundschaft ein DRT-Serviceangebot, welches *on demand* Mobilität ermöglicht, die beste Alternative darstellt aufgrund geringer Reise- und Wartezeiten. Für ÖPNV-Anbieter bleibt hingegen der traditionelle Linienbus weiterhin das Mobilitätsangebot, welches sie in ländlichen und nachfrageschwachen Räumen unter den derzeitigen ökonomischen Gegebenheiten zur Verfügung stellen können. Aus gesamtgesellschaftlichem Blickwinkel betrachtet wäre ein flexibles aber haltestellengebundenes DRT-Serviceangebot die beste Alternative, da hierbei einerseits Colditz räumlich durch den ÖPNV so erschlossen ist, dass eine angemessene soziale, wirtschaftliche und politische Teilhabe der Menschen vor Ort gewährleistet werden kann und da andererseits hierbei die geringsten Emissionen pro Person generiert werden.

Die exakten Ergebnisse dieser Colditzer Fallstudie können in der Praxis von den lokalen ÖPNV-Anbietern und anderen Akteuren vor Ort in Form einer *probabilistischen Folgenabschätzung* verwendet werden. Das heißt, die hier generierten Simulationsergebnisse dienen der Entscheidungshilfe bei der Einführung eines neuen ÖPNV-Angebotes in Colditz und können nicht als gegebene Daten sondern nur als Orientierungswerte interpretiert werden.

tiert werden. Von der Einführung einer DRT-Haustürbedienung wird abgeraten, vielmehr sollte über eine modifizierte Variante der hier untersuchten Stadtbuslinie oder über die DRT-Haltestellenbedienung nachgedacht werden.

Im Kontext der wissenschaftlich-theoretischen ÖPNV-Forschung bestätigt die vorliegende Simulationsstudie die Erkenntnisse anderer Simulationen dergestalt, dass DRT-Haustürservices im Vergleich zur DRT-Haltestellenbedienung für die jeweiligen Unternehmen Mehrkosten und für die Kunden längere Warte- und Reisezeiten bedeuten. Die DRT-Haltestellenbedienung beinhaltet ein höheres Serviceniveau gegenüber Linienverkehren, aber finanziell scheint sie in den ländlichen Räumen derzeit nicht und wenn, dann nur mit autonomen Fahrzeugen, realisierbar zu sein. In diesem Sinne liefert die vorliegende Masterarbeit einen weiteren Beitrag, um generisches Wissen über die Natur von DRT-Services zu erlangen. Andere Fallstudien sollten DRT-Services verstärkt als Ab-/Zubringer zum Linienverkehr in dispersen ländlichen Räumen und spezifisch in Form der flexiblen Haltestellenbedienung untersuchen, um damit fundierteres Wissen über Besetzungsgrade, Emissionen, Fz-km, Reise- und Wartezeiten und vieles mehr zu erhalten.

Literaturverzeichnis

- Ahrens, G.-A. (2015). *Sonderauswertung zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten – SrV 2013“: SrV-Stadtgruppe: Unter-/Grund-/Kleinzentren/ländliche Gemeinden, Topografie: flach* (Bericht). Zugriff auf https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/ressourcen/dateien/2013/uebersichtsseite/SrV2013_Stadtgruppe_UnterGrundKleinzentrenLaendlGemeinden_flach.pdf?lang=de
- Aigner-Breuss, E. & Braun, E. (2011). Entwicklung der Mobilität älterer Menschen im ländlichen Raum – Projekt Motion 55+. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 57 (04), 191–197.
- Alcamo, J. (2008). *The SAS Approach: Combining Qualitative and Quantitative Knowledge in Environmental Scenarios*. Zugriff auf <http://www.newater.uni-osnabrueck.de/intern/sendfile.php?id=113>
- BBSR. (2017). *Laufende Raumb Beobachtung - Raumabgrenzungen Siedlungsstrukturelle Kreistypen*. Zugriff am 2018-03-01 auf <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumb Beobachtung/Raumabgrenzungen/Kreistypen4/kreistypen.html?nn=443270>
- Becker, U., Clarus, E., Schmidt, W. & Winter, M. (2009). Stickoxide, Partikel und Kohlendioxid: Grenzwerte, Konflikte und Handlungsmöglichkeiten kommunaler Luftreinhaltung im Verkehrsbereich. *Informationen und Empfehlungen für Mitarbeiter deutscher Kommunen*, 49, 1–112. Zugriff auf http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/21674/Becker_2009_luftreinhaltung-1.pdf
- Becker, U., Gerike, R. & Völlings, A. (1999). Gesellschaftliche Ziele von und für Verkehr. In *Schriftenreihe des dresdner instituts für verkehr und umwelt* (Bd. Heft 1). Dresden: DIVU.
- Bischoff, J., Führer, K. & Maciejewski, M. (2018). Impact assessment of autonomous DRT systems. *Transportation Research Procedia* (00), 1–8. Zugriff

- auf <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2018/18-04/BischoffFuehrerMaciejewski2018DRTCottbus.pdf>
- Bischoff, J., Maciejewski, M. & Nagel, K. (2017). City-wide Shared Taxis: A Simulation Study in Berlin. *VSP Working Paper* (11). Zugriff auf <http://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2017/17-11/BischoffMaciejewskiNagel2017SharedTaxiIITSC.pdf>
- BMJV. (2017). *Personenbeförderungsgesetz (PBefG)*. Zugriff auf <https://www.gesetze-im-internet.de/pbefg/PBefG.pdf>
- BMVBS & BBSR. (2009a). *Handbuch zur Planung flexibler Bedienungsformen im ÖPNV. Ein Beitrag zur Sicherung der Daseinsvorsorge in nachfrageschwachen Räumen*. Zugriff auf https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Sonderveroeffentlichungen/2009/DL_HandbuchPlanungNeu.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D2
- BMVBS & BBSR. (2009b). *Mobilitätskonzepte zur Sicherung der Daseinsvorsorge in nachfrageschwachen Räumen. Evaluationsreport*. Zugriff auf https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2009/DL_ON102009.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- BMVI. (o. J.). *Der Breitbandatlas*. Zugriff am 2018-02-27 auf <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Digitales/Breitbandausbau/Breitbandatlas-Karte/start.html>
- BMVI. (2015). *Sicherung der Daseinsvorsorge durch regionale Abstimmung von ÖPNV- und Versorgungsstrategien*. Zugriff auf http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVI/BMVIOnline/2015/dl-bmvi-online-10-15.pdf;jsessionid=4797E0884ABD88515CB6C04024D9EB22.live11291?__blob=publicationFile&v=2
- Boltze, M., Specht, G., Friedrich, D. & Figur, A. (2002). *Grundlagen für die Beeinflussung des individuellen Verkehrsmittelwahlverhaltens durch Direktmarketing*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik. Zugriff auf <http://www.verkehr.tu-darmstadt.de/media/verkehr/fgvv/for/publik/S009.pdf>
- Bösch, P. M., Becker, F., Becker, H. & Axhausen, K. W. (2018). Cost-based analysis of autonomous mobility services. *Transport Policy*, 64 (1), 76–91. Zugriff auf <https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/reports/1201-1300/ab1225.pdf> doi: 10.1016/j.tranpol.2017.09.005

- Bucher, H. & Schlömer, C. (2009). Alterung und soziale Netze in den ländlichen Räumen. Eine Abschätzung künftiger demographischer Potenziale. *Ländliche Räume im demografischen Wandel*, 45–52. Zugriff auf <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2009/ON342009.html>
- Bundesagentur für Arbeit. (2017). *Arbeitslosigkeit auf Stadt- und Landkreisebene* (Bericht). Nürnberg. Zugriff auf <http://statistik.arbeitsagentur.de>
- Bundesagentur für Arbeit. (2018). *Beschäftigungsquoten (Jahreszahlen und Zeitreihen)* (Bericht). Nürnberg. Zugriff auf <http://statistik.arbeitsagentur.de>
- Colditz. (o. J.). *Ortsteile*. Zugriff am 2018-07-17 auf <https://www.colditz.de/seite/300556/ortsteile.html>
- Czioska, P., Kutadinata, R., Trifunović, A., Winter, S., Sester, M. & Friedrich, B. (2017). Real-world Meeting Points for Shared Demand-Responsive Transportation Systems. *eprint arXiv:1709.08488*, 09. Zugriff auf <http://arxiv.org/abs/1709.08488>
- Dia, H. & Javanshour, F. (2017). Autonomous Shared Mobility-On-Demand: Melbourne Pilot Simulation Study. *Transportation Research Procedia*, 22, 285–296. Zugriff auf <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146517301709> doi: 10.1016/j.trpro.2017.03.035
- Diana, M., Quadrifoglio, L. & Pronello, C. (2007). Emissions of demand responsive services as an alternative to conventional transit systems. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12 (3), 183–188. Zugriff auf <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920907000107> doi: 10.1016/j.trd.2007.01.009
- Dibble, C. (2006). Computational Laboratories for Spatial Agent-Based Models. In *Handbook of computational economics* (Bd. 2, S. 1511–1548). doi: 10.1016/S1574-0021(05)02031-9
- Dickinson, J. E., Cherrett, T., Hibbert, J. F., Winstanley, C., Shingleton, D., Davies, N., ... Speed, C. (2015). Fundamental challenges in designing a collaborative travel app. *Transport Policy*, 44, 28–36. Zugriff auf <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X15300330> doi: 10.1016/j.tranpol.2015.06.013
- Dickinson, J. E., Hibbert, J. F., Filimonau, V., Cherrett, T., Davies, N., Norgate, S., ... Winstanley, C. (2017). Implementing smartphone enabled collaborative travel: Routes to success in the tourism domain. *Journal of Transport Geography*, 59, 100–110. Zugriff auf <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692317300753> doi: 10.1016/j.jtrangeo.2017.01.011

- Eiben, A. E. & Smith, J. E. (2003, jun). What is an Evolutionary Algorithm? In *Introduction to evolutionary computing* (S. 15–35). Springer Berlin Heidelberg. Zugriff auf <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-05094-1>
- Enoch, M., Potter, S., Parkhurst, G. & Smith, M. (2006). Why do demand responsive transportation systems fail? In *Paper for the 85th annual meeting of the of the transportation research board* (S. 1–17). Washington, DC. Zugriff auf <http://oro.open.ac.uk/19345/1/enochetalTRB2006failed.pdf>
- Fagnant, D. J. & Kockelman, K. M. (2014). The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40, 1–13. Zugriff auf <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X13002581> doi: 10.1016/j.trc.2013.12.001
- FGSV. (2010). *Empfehlungen für Planung und Betrieb des öffentlichen Personennahverkehrs*. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. Zugriff auf <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/328364/>
- Fichtner, T. & Wiegand, T. S. (2018). Zunehmende Vielfalt im ländlichen ÖPNV – sind die Rahmenbedingungen auf der Höhe der Zeit? *BBSR-Online-Publikation* (2), 124–130. Zugriff auf <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2018/bbsr-online-02-2018.html>
- FIS. (2017). *Das Begriffsfeld Mobilität*. Zugriff am 2018-07-17 auf <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/114261/>
- Fishman, T. D. (2012). *Digital-Age Transportation: The Future of Urban Mobility*. London: Deloitte University Press. Zugriff auf <https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/digital-age-transportation/Digital-Age-TRANSPORTATION.pdf>
- Fu, L. (2003). Analytical model for paratransit capacity and quality-of-service analysis. *Transportation Research Record*, 1841 (03-2179), 81–89. Zugriff auf <https://trrjournalonline.trb.org/doi/pdf/10.3141/1841-09> doi: 10.3141/1841-09
- Gauff Consultants. (2017). *BASISGUTACHTEN. Anlage 1: Synopse Nahverkehrspläne* (Bericht). Zugriff auf http://www.verkehr.sachsen.de/download/verkehr/Anlage_1_Synopse_Nahverkehrsplaene.pdf
- Gerhards, M. & Mende, A. (2004). Offliner 2004: Anpassungsdruck steigt, Zugangsbarrieren bleiben bestehen. *Media Perspektiven*, 8, 371–385. Zugriff auf http://www.ard-werbung.de/fileadmin/user_upload/media-perspektiven/

- pdf/2004/08-2004_Gerhards_Mende.pdf
- Hägerstrand, T. (1970). What about People in Regional Science? *Papers of the Regional Science Association*, 24 (1), 7–21. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1970.tb01464.x>
- Hensher, D. A. (2017). Future bus transport contracts under a mobility as a service (MaaS) regime in the digital age: Are they likely to change? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 98, 86–96. Zugriff auf <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0965856416303949> doi: 10.1016/j.tra.2017.02.006
- Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M. & Dordrecht, M. B. (2012). *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-90-481-8927-4
- Holland, J. H. (1992). Complex Adaptive Systems. *Daedalus (Boston)*, 121 (1), 17–30. Zugriff auf <http://arjournals.annualreviews.org/doi/abs/10.1146%2Fannurev.anthro.32.061002.093440> doi: 10.1146/annurev.anthro.32.061002.093440
- Horni, A. & Nagel, K. (2016). More About Configuring MATSim. In *The multi-agent transport simulation matsim* (S. 35–44). doi: <http://dx.doi.org/10.5334/baw.4>
- Horni, A., Nagel, K. & Axhausen, K. W. (2016). Introducing MATSim. In *The multi-agent transport simulation matsim* (S. 3–8). doi: <http://dx.doi.org/10.5334/baw.1>
- Horni, A., Nagel, K. & Axhausen, K. W. (2017). *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim. Extract of selected chapters to serve as user guide*. Zugriff auf <https://matsim.org/docs/userguide/>
- Horni, A., Scott, D. M., Balmer, M. & Axhausen, K. W. (2009). Location Choice Modeling for Shopping and Leisure Activities with MATSim. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2135 (1), 87–95. Zugriff auf <https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/reports/501-600/ab527.pdf> doi: 10.3141/2135-11
- Infas & DLR. (2010). *Mobilität in Deutschland 2008: Ergebnisbericht. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends*. Zugriff auf www.mobilitaet-in-deutschland.de
- Infras. (2018). *Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA) - Online Version*. Zugriff auf <http://www.hbefa.net/e/index.html>
- Jacob, R., Marathe, M. V. & Nagel, K. (1999). A computational study of routing algorithms for realistic transportation networks. *Journal of Experimental Algorithmics*, 4, 1–23. Zugriff auf <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/kn-old/rjacob-routing/rjacob-routing.pdf> doi:

- 10.1145/347792.347814
- Jara-Diaz, S. R. & Tirachini, A. (2013). Urban Bus Transport: Open All Doors for Boarding. *Journal of Transport Economics and Policy*, 47 (1), 91–106. Zugriff auf <http://www.ingentaconnect.com/content/lse/jtep/2013/00000047/00000001/art00006>
- Kagermeier, A. (2004). Verkehrssystem- und Mobilitätsmanagement unter den Bedingungen des ländlichen Raumes. In *Verkehrssystem- und mobilitätsmanagement im ländlichen raum* (S. 17–24). Mannheim: Verlag Meta-GIS Infosysteme. Zugriff auf https://www.kagermeier.de/mediapool/15/157354/data/Publikationen_ab_2006/Publikationen_bis_2005/SMV10_Mobilitaetsmanagement_laendlicher_Raum_gesamt_komp_150dpi.pdf
- Kickhöfer, B. (2016). EmissionModeling. In *The multi-agent transport simulation matsim* (S. 247–252). doi: <http://dx.doi.org/10.5334/baw.36>
- König, A. & Viergutz, K. (2017). Der Fahrschein für den Anrufbus. *Der Nahverkehr* (6), 11–15.
- Kubicek, H. (2003). Ein Internet für alle? Über die Notwendigkeit vielfältiger Bildungsinitiativen. In *Digitale spaltung. informationsgesellschaft im neuen jahrtausend.trends und entwicklungen* (S. 41–50). Baden-Baden: Vistas.
- Küpper, P. (2016). Abgrenzung und Typisierung ländlicher Räume. *Thünen Working Paper*, 68. Zugriff auf https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn057783.pdf
- Lanzke, S. (2010). *Digitale Spaltung und Regionalentwicklung in ländlichen Räumen* (Dissertation). Zugriff auf <https://d-nb.info/1013288718/34>
- Lefebvre, N. & Balmer, M. (2007). Fast shortest path computation in time-dependent traffic networks. In *The 7th swiss transport research conference (strc)*. Ascona. Zugriff auf <https://pdfs.semanticscholar.org/ac49/6a476c4df9214e6b8a72e6379801bc1929d5.pdf>
- Lehnert, M., Liebchen, C., Melzer, K. M. & Viergutz, K. (2018). Ride-Sharing: Chancen und Regulierungskontext einer neuen Mobilitätsform. *Der Nahverkehr* (5), 6–12.
- Leich, G. & Bischoff, J. (2018). Should autonomous shared taxis replace buses? A simulation study. *Transportation Research Procedia*, 1–10. Zugriff auf <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2018/18-05/LeichBischoff2018DRTLlastMileHeiligensee.pdf>
- Levinson, D. M. & Krizek, K. J. (2017). *The End of Traffic and the Future of Access: A*

- Roadmap to the new Transport Landscape*. Network Design Lab.
- Litman, T. (2018). *Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning* (Bericht). Zugriff auf <https://www.vtpi.org/avip.pdf> doi: 10.1613/jair.301
- Lu, W., Quadrioglio, L. & Petrelli, M. (2017). Reliability analysis of centralized versus decentralized zoning strategies for paratransit services. *Transportation Research Procedia*, 25, 4096–4109. Zugriff auf <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146517306476> doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.340
- Luley, T. (2006). *Zirkuläre physische und virtuelle Mobilität* (Dissertation). Zugriff auf https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/1695/1/Diss_Luley_Mobilitaet.pdf
- Maciejewski, M. (2016). Dynamic Transport Services. In *The multi-agent transport simulation matsim* (S. 145–152). doi: 10.5334/baw.23
- Maciejewski, M., Bischoff, J., Hörl, S. & Nagel, K. (2017). Towards a Testbed for Dynamic Vehicle Routing Algorithms. In *Highlights of practical applications of cyber-physical multi-agent systems: International workshops of paams 2017* (S. 69–79). Zugriff auf <https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/reports/1301-1400/ab1301.pdf> doi: 10.1007/978-3-319-60285-1_6
- Maciejewski, M., Bischoff, J. & Nagel, K. (2016). An Assignment-Based Approach to Efficient Real-Time City-Scale Taxi Dispatching. *IEEE Intelligent Systems*, 31 (1), 68–77. Zugriff auf <http://ieeexplore.ieee.org/document/7389909/> doi: 10.1109/MIS.2016.2
- Mehlert, C. (2001). *Die Einführung des AnrufBus im ÖPNV: Praxiserfahrungen und Handlungsempfehlungen* (S. f. V. und Technik, Hrsg.). Bielefeld: Erich Schmidt Verlag.
- Mehlert, C. & Karl, A. (2014). Vergabe und Genehmigung von Leistungen im Bedarfsverkehr. *Der Nahverkehr*, 7-8, 22–24.
- Mehlert, C. & Schiefelbusch, M. (2017). Mobility on-demand: Disruption oder Hype? *Der Nahverkehr* (7+8), 6–12.
- Mehlhorn, G. (2001). *Verkehr. Straße, Schiene, Luft*. Berlin: Ernst&Sohn.
- Miller, H. J. (2017). Theories and Models in Transportation Planning. In *The geography of urban transportation* (S. 113–138). New York: The Guilford Press.
- Monheim, H. (2009). Nahmobilität - Chancen für mehr Lebens- und Bewegungsqualität

- und effizienten Verkehr. *mobilogisch!*, 4, 1–14.
- Müller, A., Kopp, G., Beyer, S. & Deisser, O. (2017). Reallabor Schorndorf - Bedarfsgerecht und Nutzerorientiert. *Spektrum Wissenschaft*, 44, 41–44. Zugriff auf http://www.reallabor-schorndorf.de/wp-content/uploads/2016/08/spektrum_44_ReallaborSchorndorf.pdf
- Nagel, K. & Axhausen, K. W. (2016). Some History of MATSim. In *The multi-agent transport simulation matsim* (S. 307–314). doi: <http://dx.doi.org/10.5334/baw.46>
- Nagel, K., Bischoff, J., Leich, G. & Maciejewski, M. (2018). Simulationsbasierte Analyse der Wirkungen von Flotten autonomer Fahrzeuge auf städtischen Mikroskopische Simulation urbanen Verkehrs. *VSP* (06), 1–27. Zugriff auf <https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2018/18-06/NagelEtcFlottenAutonomerFahrzeuge-2018-05-16.pdf>
- Nagel, K., Kickhöfer, B., Horni, A. & Charypar, D. (2016). A Closer Look at Scoring. In *The multi-agent transport simulation matsim* (S. 23–34). doi: <http://dx.doi.org/10.5334/baw.3>
- Navidi, Z., Ronald, N. & Winter, S. (2017). Comparison between ad-hoc demand responsive and conventional transit: a simulation study. *Public Transport*, 10 (1), 147–167. Zugriff auf <http://link.springer.com/10.1007/s12469-017-0173-z> doi: 10.1007/s12469-017-0173-z
- Normenausschuss Gebrauchstauglichkeit und Dienstleistungen (NAGD) im Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN). (2002). *DIN EN 13816*. Beuth Verlag.
- Nutley, S. (2001). Rural Areas: The accessibility problem. In B. Hoyle & R. Knowles (Hrsg.), *Modern transport geography* (S. 185–215). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Pfeifer, F. (2016). *Anona darf sich erheblich vergrößern*. Zugriff auf <http://www.lvz.de/Region/Grimma/Anona-darf-sich-erheblich-vergroessern>
- Poletti, F. (2017). Public Transit Mapping on Multi-Modal Networks in MATSim. *Strasse und Verkehr* (7-8), 22–25. Zugriff auf <https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/news/vss-poletti-matsim.pdf>
- Prud’homme, J., Genre-Grandpierre, C. & Prud’homme, R. (2012). Impact of road network structure on pollutant emissions: Illustration for a Demand Responsive Transport system. In *International conference on geographic information science* (S. 141–146). Zugriff auf https://agile-online.org/conference_paper/cds/agile_2012/proceedings/papers/paper_prudhomme_impact_of_road

- _network_structure_on_pollutant_emissions_illustration_for_a_demand_responsive_transport_system_2012.pdf
- Prud'homme, J., Josselin, D. & Aryal, J. (2011). Quantitative Analysis of Pollutant Emissions in the Context of Demand Responsive Transport. In *Computational science and its applications - iccsa 2011* (S. 439–453). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Zugriff auf http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-21928-3_31 doi: 10.1007/978-3-642-21928-3_31
- Reallabor Schorndorf. (2017). *Ergebnisdarstellung des Bürgerinnen und Bürger-Workshops* (Bericht). Zugriff auf http://www.reallabor-schorndorf.de/wp-content/uploads/2017/05/Ergebnisdarstellung_WorkshopApril_HP_Lang.pdf
- Rieser, M. (2016). Modeling Public Transport with MATSim. In *The multi-agent transport simulation matsim* (S. 105–110). doi: DOI:<http://dx.doi.org/10.5334/baw.16>
- Riesner, A. (2014). Bedeutung und Förderung von Mobilität in ländlichen Räumen. *ZFV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 139 (1), 41–49. Zugriff auf https://geodaesie.info/system/files/privat/zfv_2014_1_Riesner.pdf doi: 10.12902/zfv-0007-2014
- Rodrigue, J. P., Comtois, C. & Slack, B. (2013). *The Geography of Transport Systems* (3. Aufl.). doi: 10.4324/9781315618159
- Ronald, N., Thompson, R. & Winter, S. (2015). Simulating Demand-responsive Transportation: A Review of Agent-based Approaches. *Transport Reviews*, 35 (4), 404–421. Zugriff auf <http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2015.1017749> doi: 10.1080/01441647.2015.1017749
- Ronald, N., Yang, J. & Thompson, R. G. (2016). Exploring Co-Modality Using On-Demand Transport Systems. *Transportation Research Procedia*, 12, 203–212. Zugriff auf <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146516000600> doi: 10.1016/j.trpro.2016.02.059
- R+V Pressecenter. (2018). *Zugelassen: Straße frei für autonomen R+V-Bus* (Bericht). Zugriff auf <https://www.ruv.de/presse/pressemitteilungen/20180608-strassenzulassung-autonomer-ruv-bus>
- Ryley, T. J., Stanley, P. A., Enoch, M. P., Zanni, A. M. & Quddus, M. A. (2014). Investigating the contribution of Demand Responsive Transport to a sustainable local public transport system. *Research in Transportation Economics*, 48, 364–372. Zugriff auf <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S073988591400105X> doi:

- 10.1016/j.retrec.2014.09.064
- Schiefelbusch, M. & Bounin, K. (2017). Bürgerrufautos EDV-gestützt disponieren. *Der Nahverkehr* (3), 54–60.
- Schmoll, C., Tiemann, J. & Welzel, C. (2014). *Digitale Mobilität - Dynamik im öffentlichen Raum*. Berlin: Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme FOKUS. Zugriff auf <https://www.oeffentliche-it.de/documents/10181/14412/Digitale+Mobilität+Dynamik+im+öffentlichen+Raum>
- Selwyn, N. (2003). Apart from technology: Understanding people's non-use of information and communication technologies in everyday life. *Technology in Society*, 25 (1), 99–116. doi: 10.1016/S0160-791X(02)00062-3
- Smith, C. (2017). *A Canadian town wanted a transit system. It hired Uber*. Zugriff auf <https://www.nytimes.com/2017/05/16/world/canada/a-canadian-town-wanted-a-transit-system-it-hired-uber.html>
- Socialdata. (2018). *Mobilitätsdaten*. Zugriff auf <http://www.socialdata.de/{#}>
- Statista. (2018). *Smartphone-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2018 (in Millionen)*. Zugriff am 2018-07-16 auf <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonennutzer-in-deutschland-seit-2010/>
- Statistisches Landesamt Freistaat Sachsen. (2014a). *Gemeindeblatt. Zensus 2011. Haushalte, Familien und deren Wohnsituation am 9. Mai 2011. Colditz, Stadt* (Bericht). Zugriff auf https://www.statistik.sachsen.de/download/080_zensus_2011_HFW/HFW_14729080.pdf
- Statistisches Landesamt Freistaat Sachsen. (2014b). *Kleinräumiges Gemeindeblatt: Bevölkerung, Haushalte, Familien und deren Wohnsituation am 09. Mai 2011. Grunddaten und Indikatoren. Colditz, Stadt* (Bericht). Zugriff auf https://www.statistik.sachsen.de/download/080_Zensus_2011_Gemeindeteile/GT_14729080.pdf
- Steinrück, B. & Küpper, P. (2010). Mobilität in ländlichen Räumen unter besonderer Berücksichtigung bedarfsgesteuerter Bedienformen des ÖPNV. *Arbeitsberichte aus der vTI-Agrarökonomie* (02). Zugriff auf http://literatur.thuenen.de/digbib_extern/bitv/dk043302.pdf
- Stielike, J. M. (2014). Konstitutionelle Anforderungen an die Versorgung peripherster Räume mit Infrastrukturen und Angeboten der Daseinsvorsorge. In *Vom demografischen wandel besonders betroffene regionen. ein wichtiges thema im kontext der demografiestrategie* (S. 71–

- 77). Zugriff auf https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2014/DL_ON112014.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- van Notten, P. (2006). Scenario development: a typology of approaches. *Schooling for Tomorrow: Think Scenarios, Rethink Education*, 6, 69–92. Zugriff auf <http://www.oecd.org/site/schoolingfortomorrowknowledgebase/futuresthinking/scenarios/37246431.pdf> doi: 10.1016/S1574-101X(08)00407-9
- VCD. (o. J.). *Die Digitalisierung der Mobilität* (Bericht). Zugriff auf <https://www.vcd.org/themen/multimodalitaet/schwerpunktthemen/digitalisierung-mobilitaet/>
- VDV. (2018). *Schülerverkehr* (Bericht). Zugriff auf <http://www.mobi-wissen.de/Bildung/Schülerverkehr>
- Velaga, N. R., Beecroft, M., Nelson, J. D., Corsar, D. & Edwards, P. (2012). Transport poverty meets the digital divide: accessibility and connectivity in rural communities. *Journal of Transport Geography*, 21, 102–112. Zugriff auf <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0966692312000026> doi: 10.1016/j.jtrangeo.2011.12.005
- Viergutz, K. (2017). In Echtzeit: Dynamische Fahrgastinformation. *Der Nahverkehr* (10), 70–77.
- Viergutz, K. & Brinkmann, F. (2018). Anforderungen von Nutzern flexibler öffentlicher Mobilitätskonzepte an die digitale Fahrgastinformation mit Echtzeitdaten. In *Mobilität und digitale transformation. technische und betriebswirtschaftliche aspekte* (S. 331–346). Wiesbaden: Springer Fachmedien. Zugriff auf https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-20779-3_20
- Vortisch, P., Chlond, B., Weiß, C., Streit, T., Zumkeller, D., Wirtz, M. & Kagerbauer, M. (2012). *Deutsches Mobilitätspanel (MOP) wissenschaftliche Begleitung und erste Auswertungen. Bericht 2011/12: Alltagsmobilität und Tankbuch* (Bericht). Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Verkehrswesen. Zugriff auf https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_11_12.pdf
- Wang, C., Quddus, M., Enoch, M., Ryley, T. & Davison, L. (2015). Exploring the propensity to travel by demand responsive transport in the rural area of Lincolnshire in England. *Case Studies on Transport Policy*, 3 (2), 129–136. Zugriff auf <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213624X15000085>
- Wehmeier, T. & Koch, A. (2010). Mobilitätschancen und Verkehrsverhalten in

- nachfrageschwachen ländlichen Räumen. *Informationen zur Raumentwicklung*, 7, 457–465. Zugriff auf http://www.bbsr.bund.de/cln_032/nn_23470/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/IzR/2010/7/Inhalt/inhalt.html
- Wehrhahn, R. & Sandner Le Gall, V. (2016). *Bevölkerungsgeographie* (2. Aufl.). Darmstadt: Reihe Geowissen Kompakt.
- Winter, O. M. (2005). *Analyse und Evaluation von Nahverkehrsplänen und die Aufstellung von Kriterien zur Bewertung von Standards im ÖPNV* (Dissertation). Zugriff auf <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-153-9.volltext.frei.pdf>
- Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH. (o.J.). *Firmensuche*. Zugriff am 2018-05-05 auf <http://www.firmen.saxony.de/KWISweb-Companies/CompanySearch.aspx>
- Wüst-Rocktäschel, C. & Georgi, A. (2010). Neue Wege für neue Zielgruppen. Die Lokale Nahverkehrsorganisation Offenbach beteiligt sich am europäischen Projekt ICMA und spricht gezielt ältere Fahrgäste an. *Der Nahverkehr* (4), 46–50.
- Zoche, P., Kimpeler, S. & Joepgen, M. (2002). Mobilität. In *Virtuelle mobilität: Ein phänomen mit physischen konsequenzen? zur wirkung der nutzung von chat, online-banking und online-reiseangeboten auf das physische mobilitätsverhalten* (S. 7–24). Berlin, Heidelberg: Springer. Zugriff auf https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-56234-1_2 doi: 10.1007/978-3-642-56234-1_2
- ZVNL, MDV & Vci. (2017). *Nahverkehrsplan 2016*. Zugriff auf https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/ressourcen/dateien/2013/uebersichtsseite/SrV2013_Stadtgruppe_UnterGrundKleinzentrenLaendlGemeinden_flach.pdf?lang=de

Masterarbeitsvereinbarung

Anlage aus Datenschutzgründen und zur Wahrung von Betriebsinterna entfernt.

Validierung des Simulationsansatzes

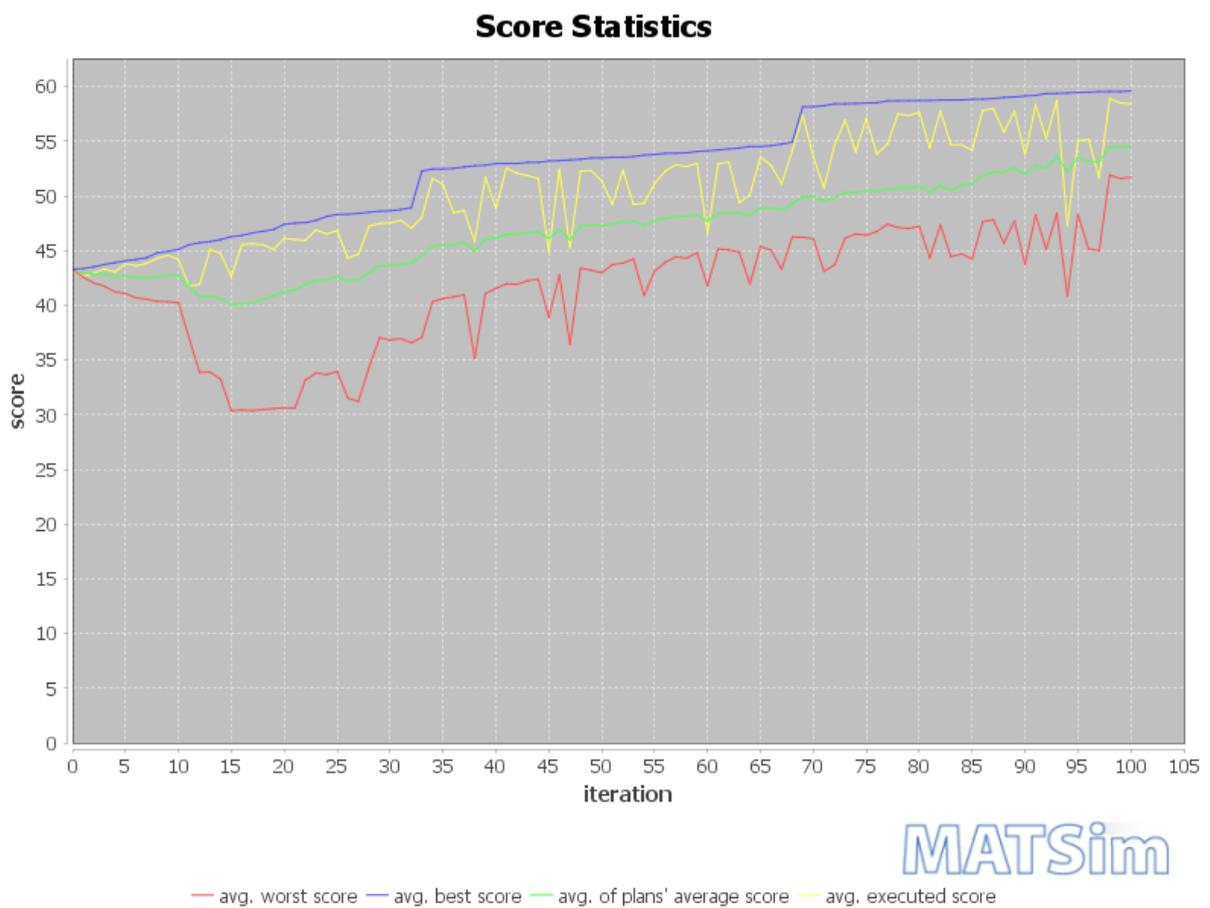


Abbildung B.1: Der Verlauf der MATSim-Noten über 100 Iterationen, genutzt für die Kalibrierung & Validierung des Simulationsansatzes.

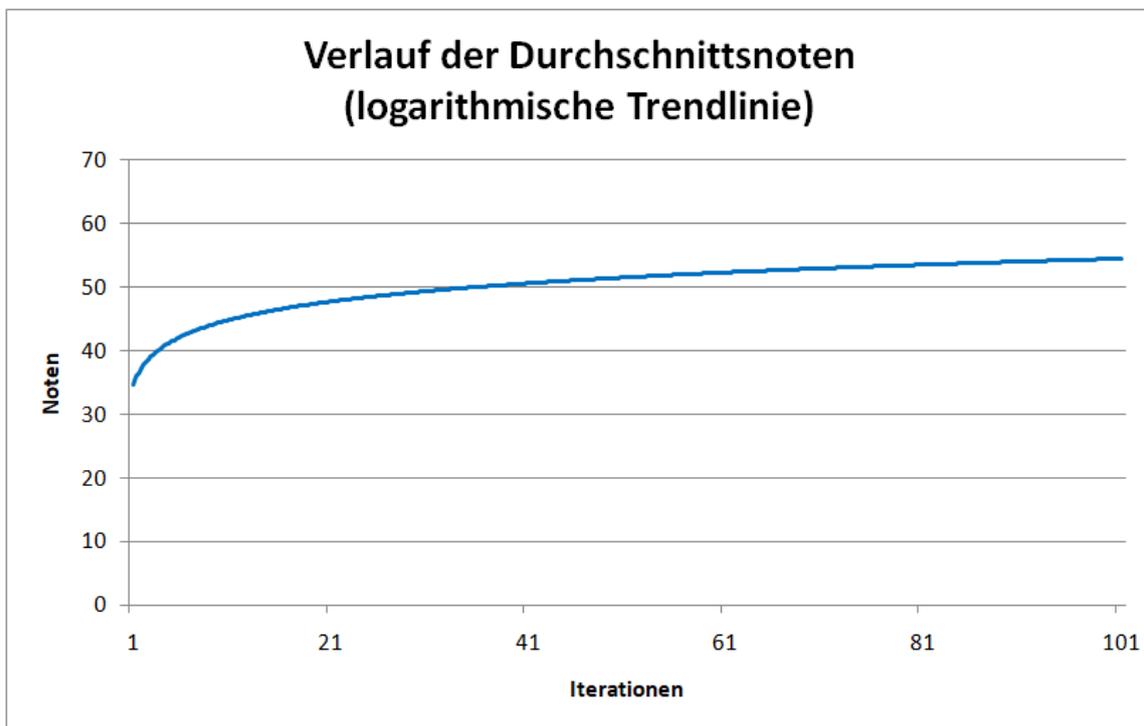


Abbildung B.2: Der Verlauf der logarithmischen Trendlinie für die durchschnittlichen MATSim-Noten über 100 Iterationen, genutzt für die Kalibrierung & Validierung des Simulationsansatzes.

Beförderungsfälle Tarifzone 145

Anlage aus Datenschutzgründen und zur Wahrung von Betriebsinterna entfernt.

Beförderungsfälle & Fahrgäste

Anlage aus Datenschutzgründen und zur Wahrung von Betriebsinterna entfernt.

Fahrzeugeinsatz

Anlage aus Datenschutzgründen und zur Wahrung von Betriebsinterna entfernt.

Weitere Möglichkeiten der Kalibration

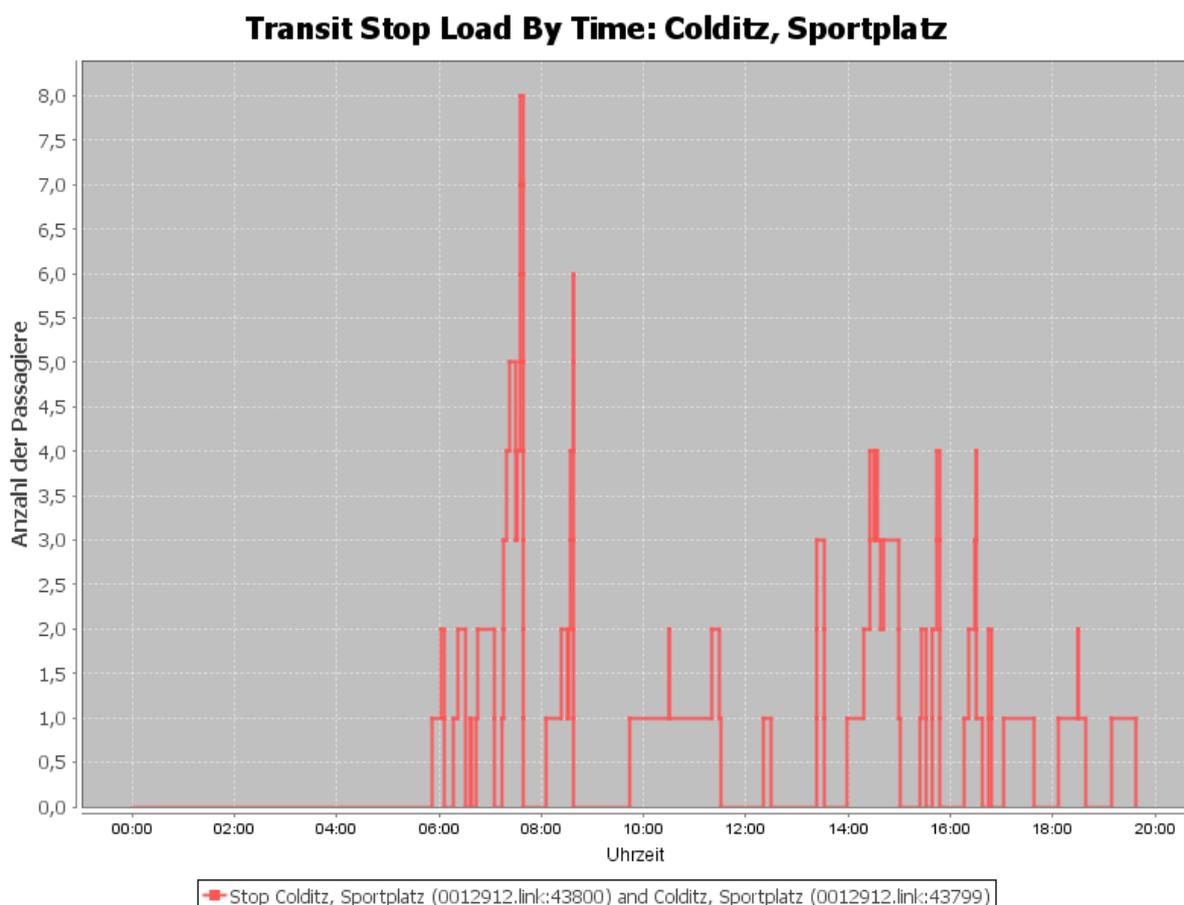


Abbildung F.1: Die Abbildung zeigt alle Agenten an der Haltestelle *Colditz Sportplatz*. Mit Zählungen zu einzelnen Haltestellenein- und ausstiegen könnte der Simulationsansatz noch weiter kalibriert und validiert werden.

Transfers at Colditz, Sportplatz (0012912.link:43800) and 1 more stop

05:00 – 21:00

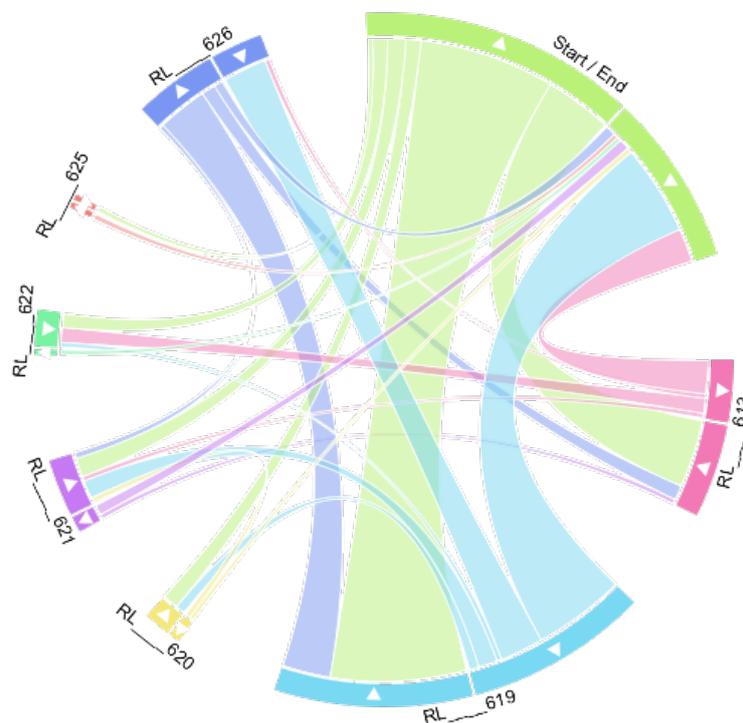


Abbildung F.2: Die Abbildung zeigt alle Transfers an der Haltestelle *Colditz Sportplatz*. Das heißt, alle Umstiege an dieser Haltestelle von einer Regionalbuslinie in eine andere Linie (613, 619, 620, 621, 622, 625 oder 626), oder den Start bzw. das Ziel einer Reise, dargestellt in Form eines Spinnennetzes. Mit Informationen zu den Wegemustern der Colditzer ÖPNV-Nutzer könnte der Simulationsansatz noch weiter kalibriert und validiert werden. Diese Informationen können nur über Befragungen vor Ort erhalten werden.

Simulation Stadtbuslinie

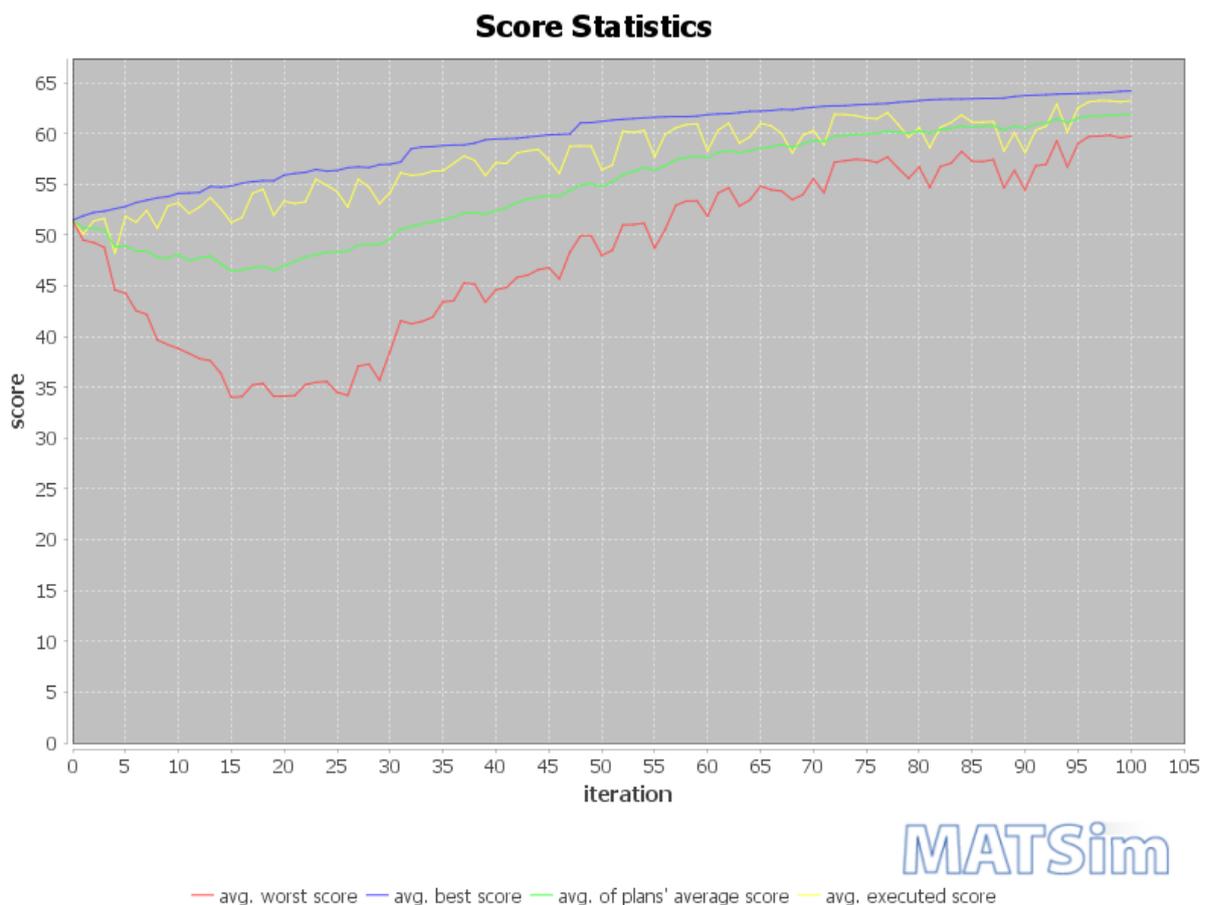


Abbildung G.1: Der Verlauf der MATSim-Noten über 100 Iterationen, genutzt für die Simulation der Colditzer Stadtbuslinie (siehe Kapitel 5.3.1).

Die neue Stadtbushlinie
(Colditz→Zschadraß):

Haltestelle	Zustiege	Ausstiege	Gesamtanzahl
Colditz, Sportplatz	5	0	5
Colditz, Nikolai-/Schulstr.	2	0	7
Colditz, Sophienstraße	5	0	12
Colditz, Wohngebiet	7	0	19
Colditz, Jugend-/Freizeitzentrum	22	0	41
Colditz, Kleingartenverein Gesundbrunnen	0	1	40
Zschadraß, Hauptstr.	2	29	13
Zschadraß, Krankenhaus	0	13	0

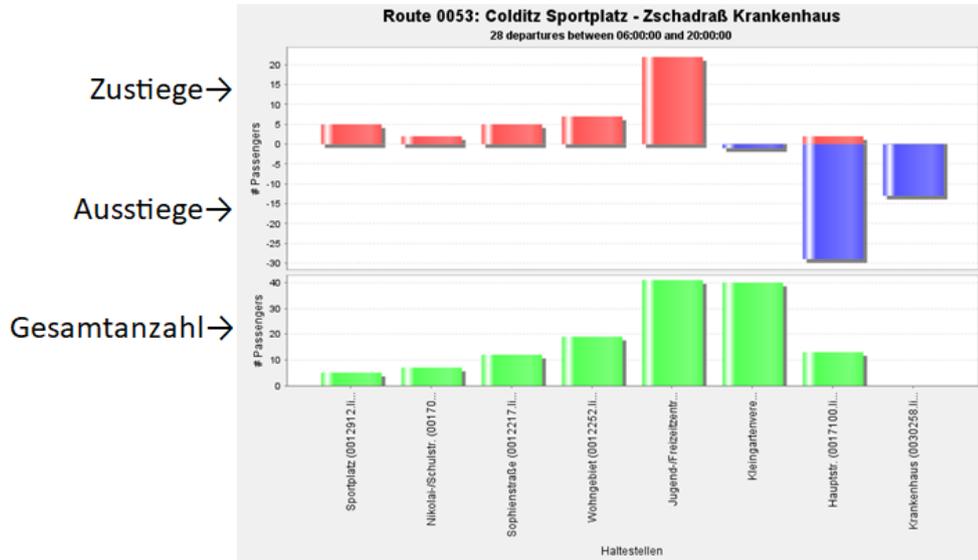


Abbildung G.2: Zu sehen sind die Zustiege, Ausstiege und die Gesamtzahl der Beförderten je Haltestelle, die die Stadtbushlinie in Fahrtrichtung Colditz-Zschadraß nutzen (betreffend Kapitel 5.3.1). Insgesamt fallen 43 Beförderungsfälle an.

Die neue Stadtbushlinie
(Colditz→Zschadraß):

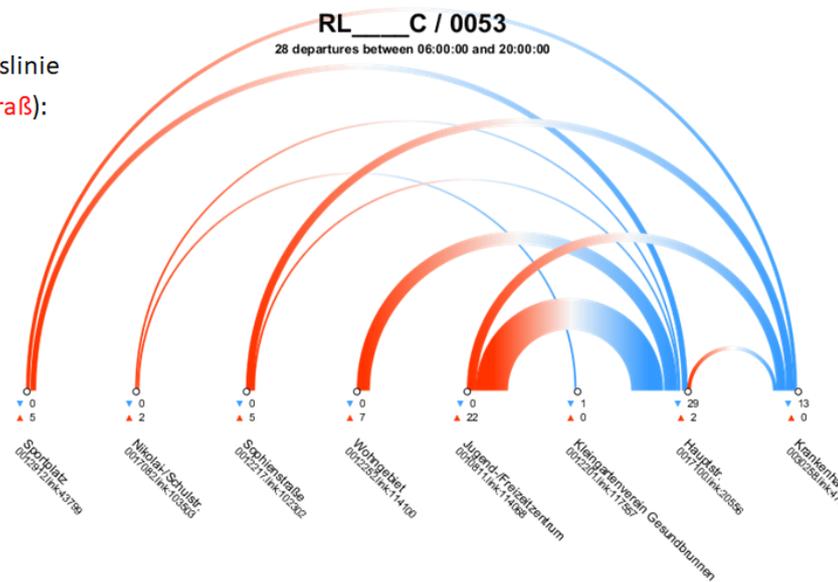


Abbildung G.3: Die Stadtbushlinie wird von den Agenten in Fahrtrichtung Colditz-Zschadraß vor allem für Wege zwischen Colditz Wettiner Ring (zwei Haltestellen: Wohngebiet, Jugend-/Freizeitzentrum) und Zschadraß (Haltestelle Hauptstraße) genutzt (betreffend Kapitel 5.3.1).

Die neue Stadtbushlinie
(Colditz→Zschadraß):

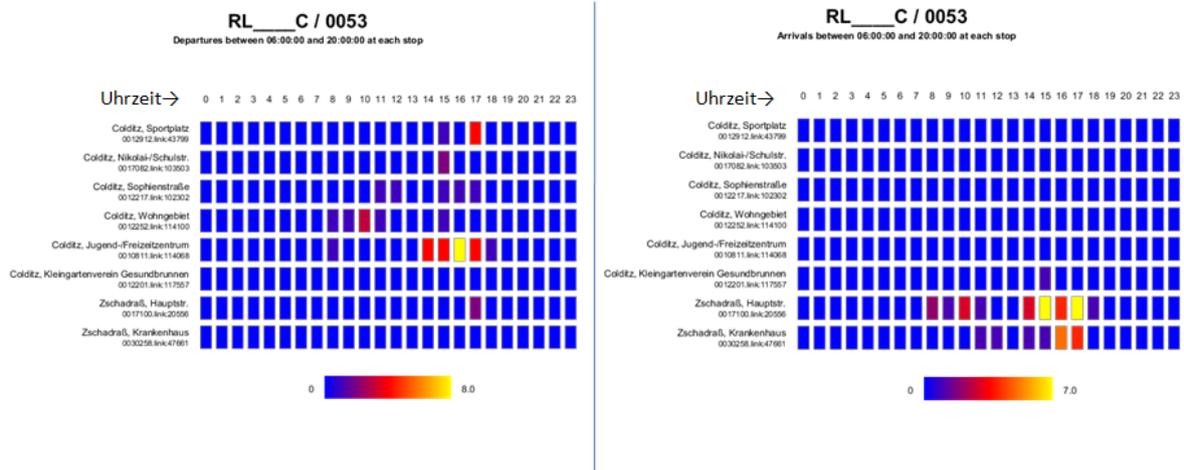


Abbildung G.4: Rechts sind die Zustiege zur und links die Ausstiege von der Stadtbushlinie in Fahrtrichtung Colditz-Zschadraß zu sehen. Das Angebot wird in diese Fahrtrichtung vor allem am Nachmittag zwischen 14-17 Uhr für Einkaufs- und Freizeitaktivitäten oder den Weg nach Hause genutzt (betreffend Kapitel 5.3.1).

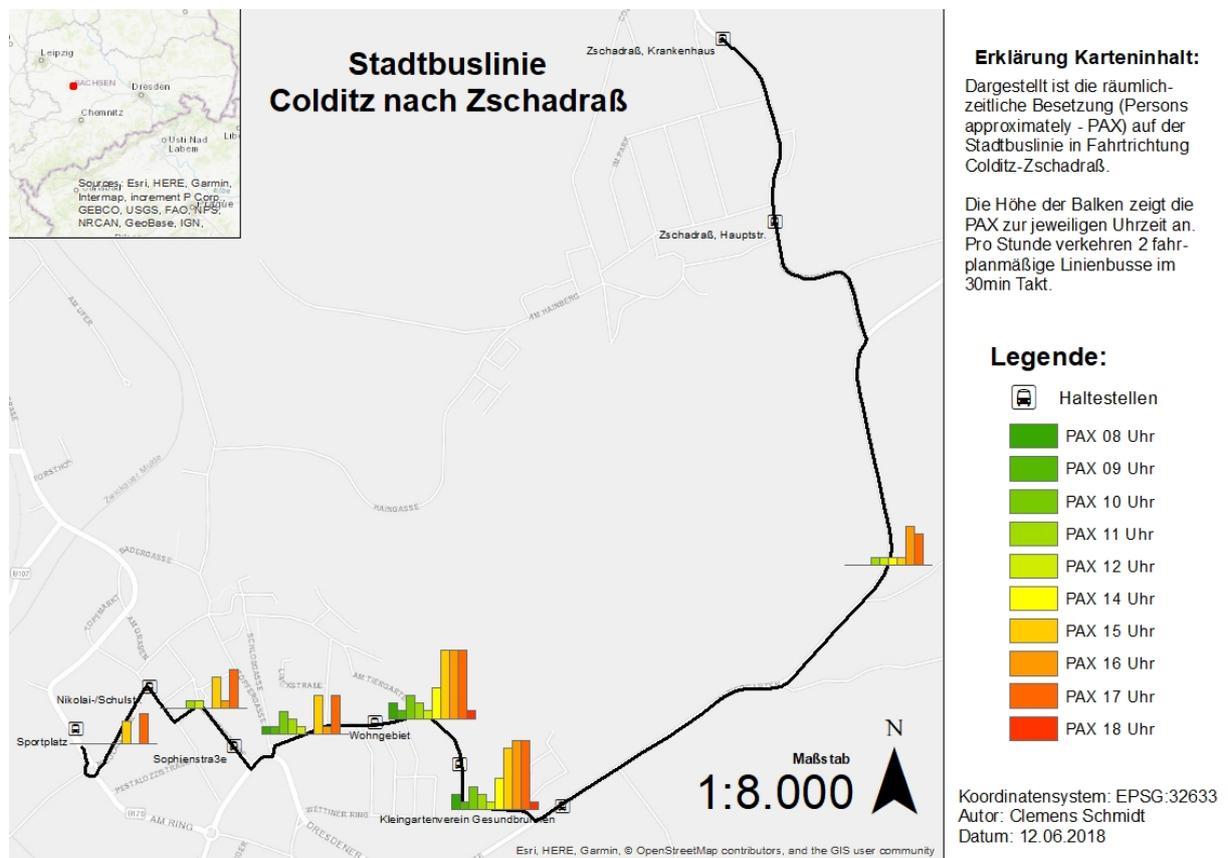


Abbildung G.5: Gezeigt wird die räumlich-zeitliche Besetzung PAX für die Stadtbushlinie in Fahrtrichtung Colditz-Zschadraß (betreffend Kapitel 5.3.1).

Die neue Stadtbuslinie
(Colditz→Zschadraß):

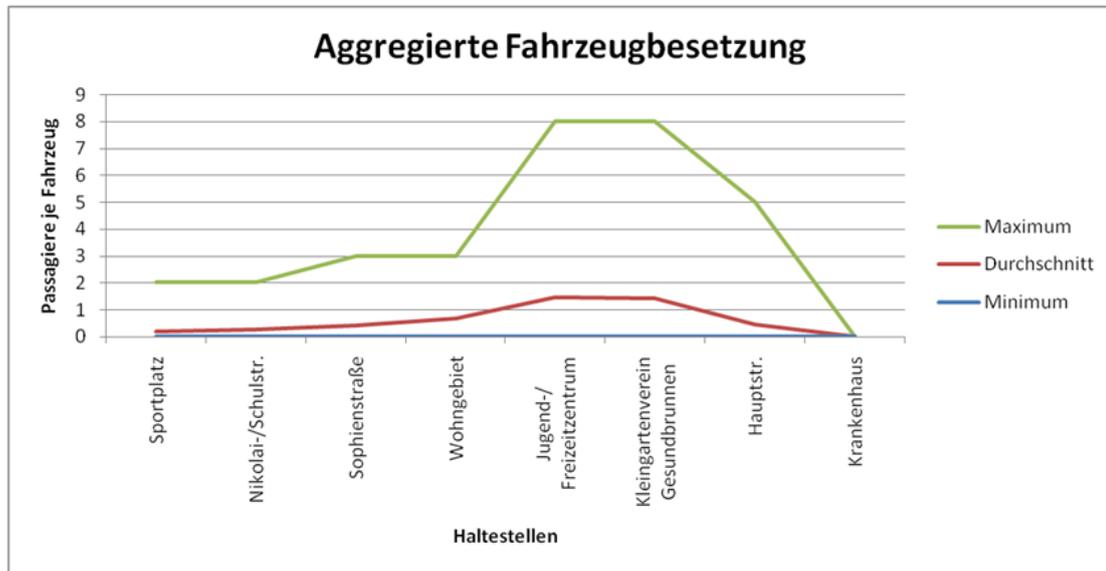


Abbildung G.6: Die maximale Fahrzeugbesetzung für die Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Colditz-Zschadraß beträgt 8 Agenten (betreffend Kapitel 5.3.1).

Die neue Stadtbuslinie
(Zschadraß→Colditz):

Haltestelle	Zustiege	Ausstiege	Gesamtzahl
Zschadraß, Krankenhaus	4	0	4
Zschadraß, Hauptstr.	34	1	37
Colditz, Kleingartenverein Gesundbrunnen	0	0	37
Colditz, Jugend-/Freizeitzentrum	1	1	37
Colditz, Wohngebiet	4	0	41
Colditz, Sophienstraße	7	0	48
Colditz, Nikolai-/Schulstr.	0	38	10
Colditz, Sportplatz	0	10	0

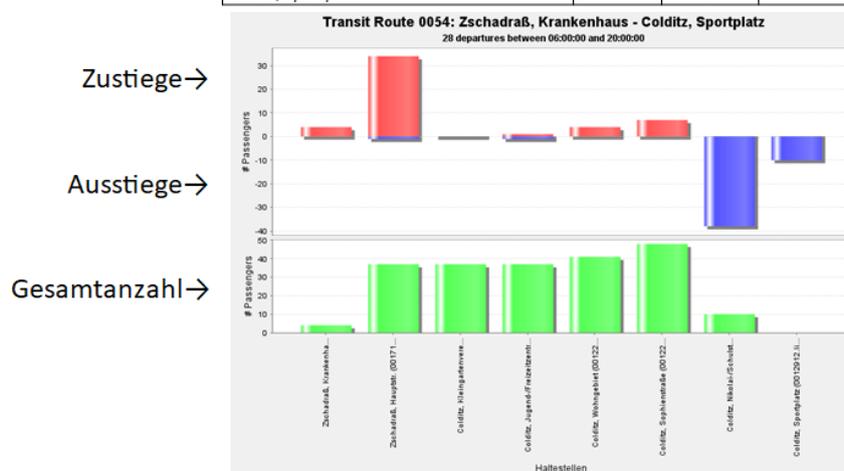


Abbildung G.7: Zu sehen sind die Zustiege, Ausstiege und die Gesamtzahl der Beförderten je Haltestelle, die die Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Zschadraß-Colditz nutzen (betreffend Kapitel 5.3.1). Insgesamt fallen 50 Beförderungsfälle an.

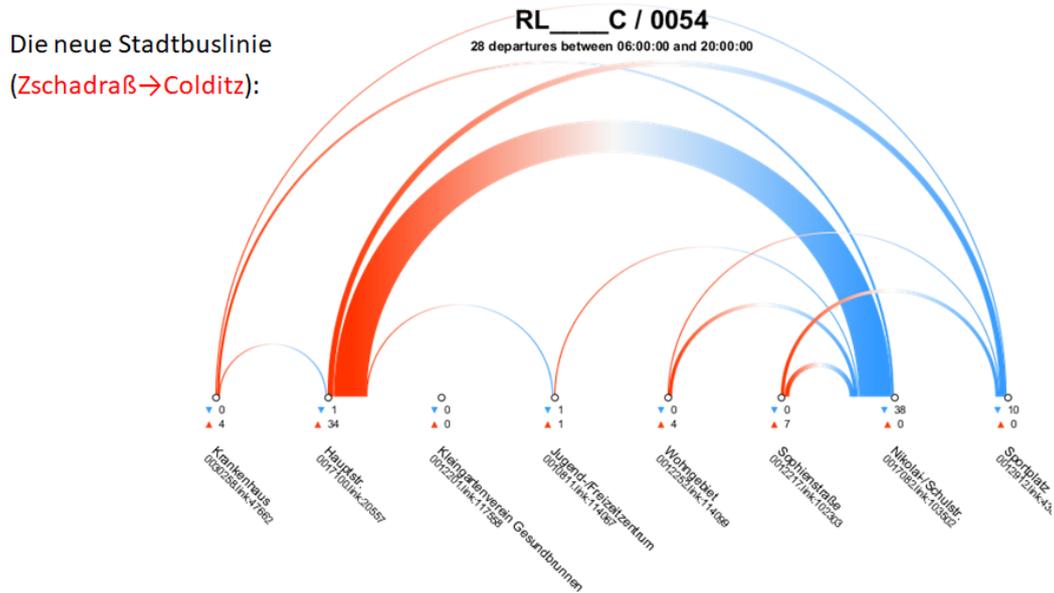


Abbildung G.8: Die Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Zschadraß-Colditz wird von den Agenten vor allem für Wege zwischen Zschadraß (Haltestelle *Hauptstraße*) und der Colditzer Innenstadt (Haltestelle *Nicolai-/Schulstraße* an der sich zwei Schulen befinden und auch der Marktplatz nahebei ist, mit vielen Einkaufs-/Erledigungsorten und Arbeitsplätzen) und genutzt (betreffend Kapitel 5.3.1).

Die neue Stadtbuslinie
(Zschadraß→Colditz):

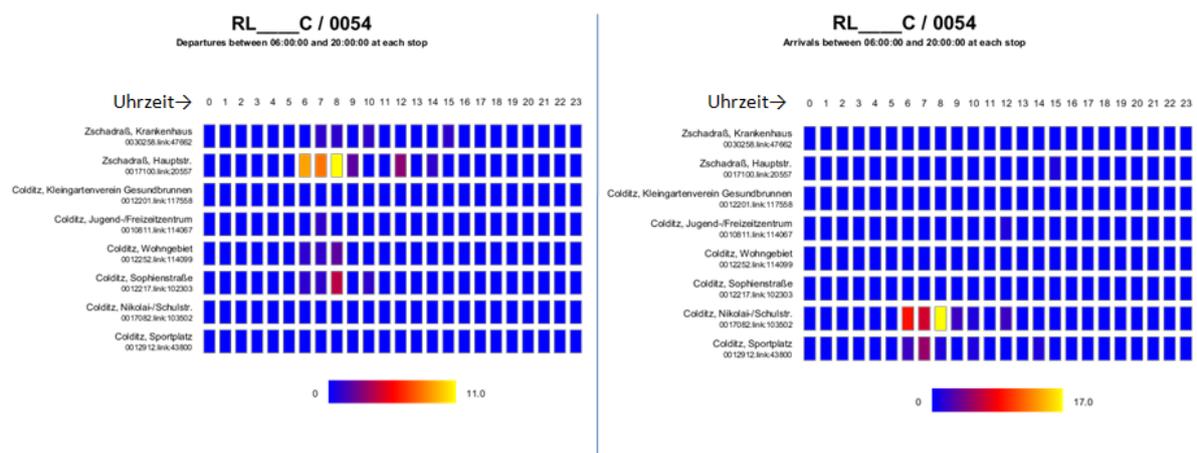


Abbildung G.9: Rechts sind die Zustiege und links die Ausstiege zur Stadtbuslinie in Fahrtrichtung Zschadraß-Colditz zu sehen. Das Angebot wird in diese Fahrtrichtung vor allem am Vormittag zwischen 06-08 Uhr für Arbeits-/Schul- und teils auch schon Einkaufs-/Erledigungsaktivitäten genutzt (betreffend Kapitel 5.3.1).

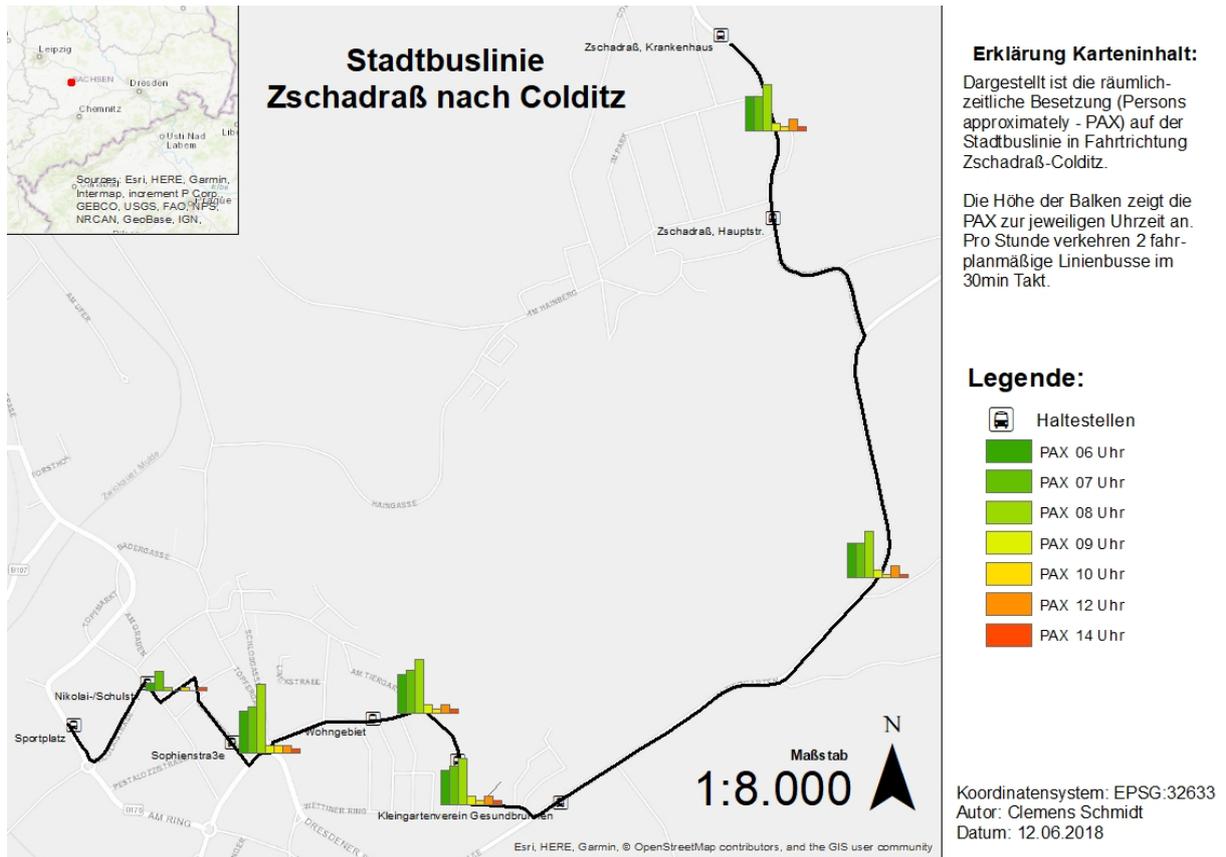


Abbildung G.10: Gezeigt wird die räumlich-zeitliche Besetzung PAX für die Stadtbushlinie in Fahrtrichtung Zschadraß-Colditz (betreffend Kapitel 5.3.1).

Die neue Stadtbushlinie

(Zschadraß→Colditz):

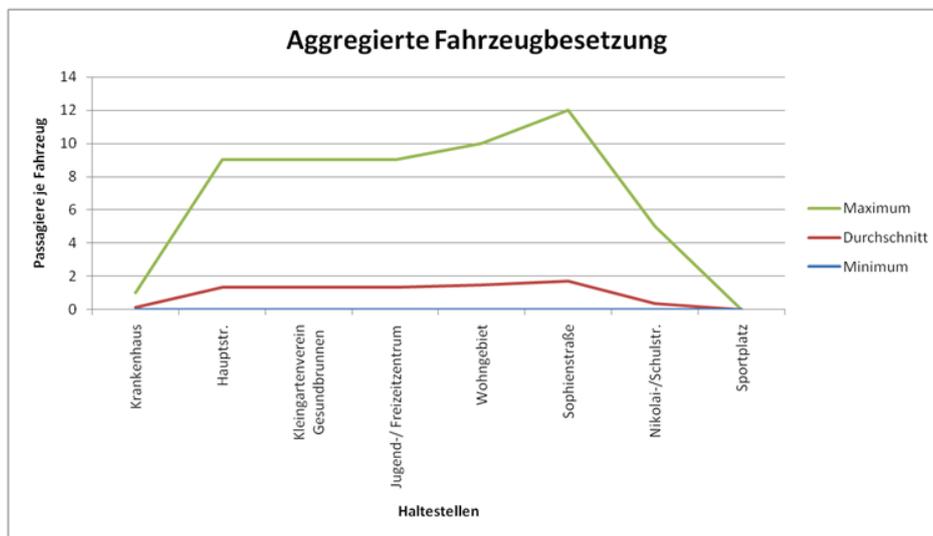


Abbildung G.11: Die maximale Fahrzeugbesetzung für die Stadtbushlinie in Fahrtrichtung Zschadraß-Colditz beträgt 12 Agenten (betreffend Kapitel 5.3.1).

Transfers at Colditz, Sportplatz (0012912.link:43800) and 1 more stop

05:00 – 21:00

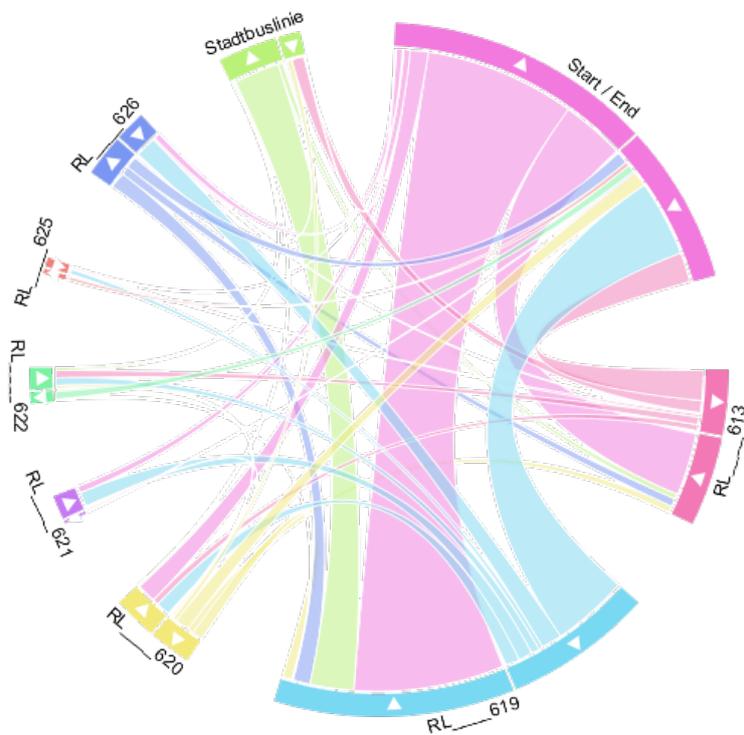


Abbildung G.12: Die Stadtbuslinie wird am meisten als Abbringer zur Regionalbuslinie 619 von Grimma genutzt, wie die Transfers an der Haltestelle *Colditz Sportplatz* zeigen (betreffend Kapitel 5.3.1).

Simulation DRT-Haltestellenbedienung

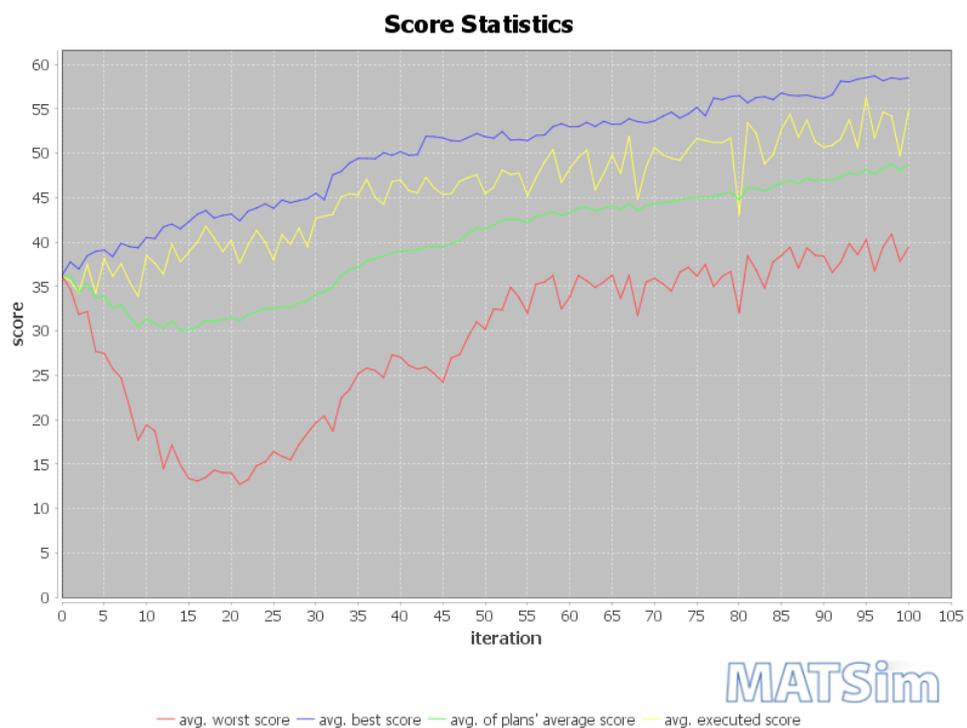


Abbildung H.1: Der Verlauf der MATSim-Noten über 100 Iterationen, genutzt für die Simulation der Colditzer DRT-Haltestellenbedienung (siehe Kapitel 5.3.2).

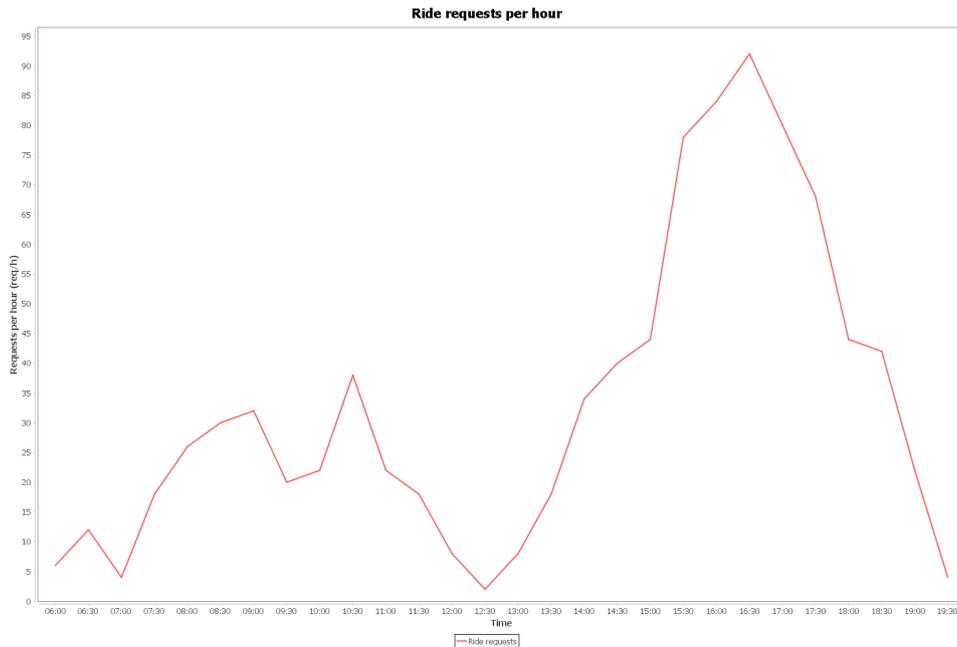


Abbildung H.2: Zu sehen sind die Fahrtenanfragen der Agenten für die DRT-Haltestellenbedienung. Dies ist ein Beispiel (Iteration 58), dass den DRT-Durchschnittssimulationswerten am nächsten kommt (betreffend Kapitel 5.3.2). Die meisten Anfragen bestehen am späten Nachmittag und frühen Abend, wo Freizeit- und Einkaufsaktivitäten vollzogen werden oder sich die Agenten auf dem Weg nach Hause befinden.

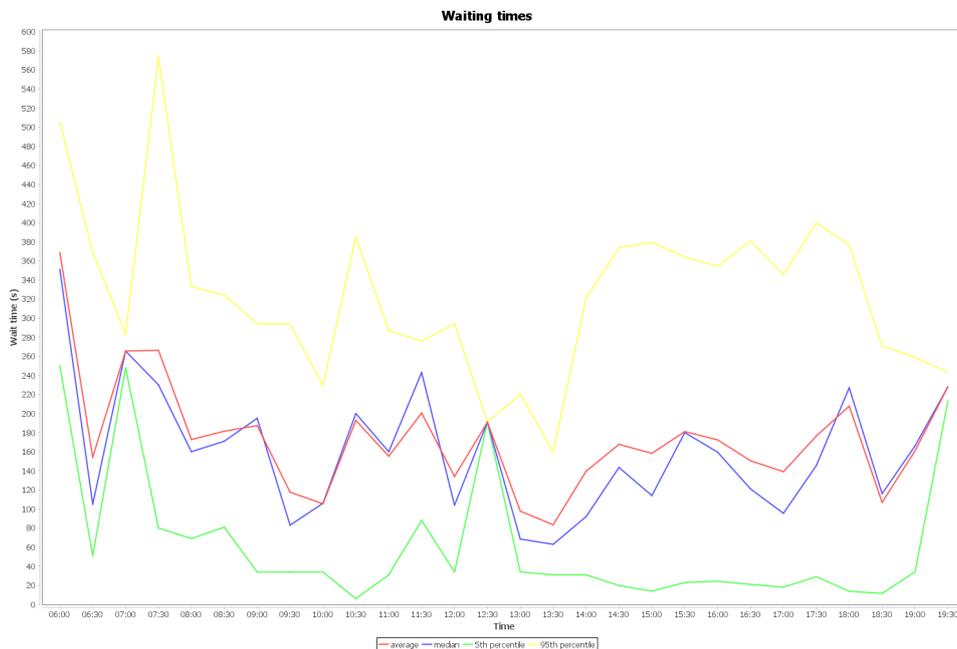


Abbildung H.3: Zu sehen sind für die DRT-Haltestellenbedienung die tatsächlichen Wartezeiten der Agenten, nach dem sie eine gültige Fahrtenanfrage platziert haben. Dies ist ein Beispiel (Iteration 58), dass den DRT-Durchschnittssimulationswerten am nächsten kommt (betreffend Kapitel 5.3.2). 95% der Agenten (gelbe Linie) warten kürzer als 10min (600sek) bis ihr Fahrtenwunsch bedient wird.

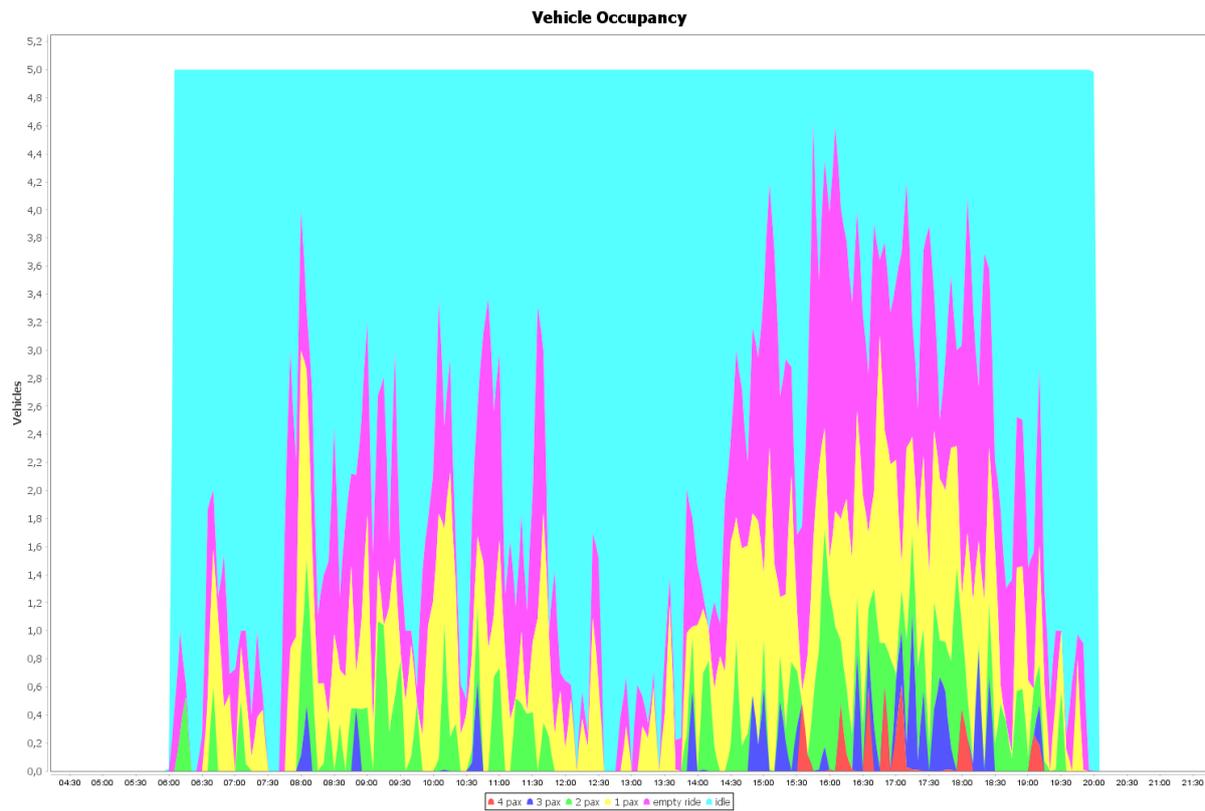


Abbildung H.4: Zu sehen ist die Fahrzeugbesetzung der fünf PKW für die DRT-Haltestellenbedienung. Dies ist ein Beispiel (Iteration 58), dass den DRT-Durchschnittssimulationswerten am nächsten kommt (betreffend Kapitel 5.3.2). Am Nachmittag ist ein Fahrzeug kurzzeitig voll besetzt, siehe rote Farbspitzen.

Simulation DRT-Haustürbedienung

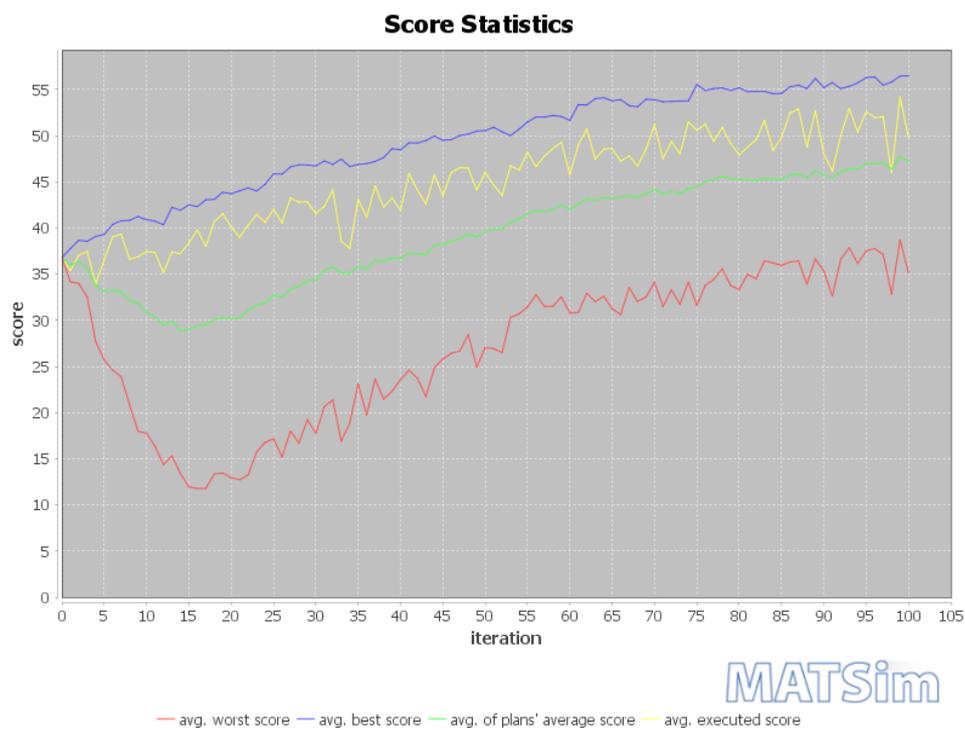


Abbildung I.1: Der Verlauf der MATSim-Noten über 100 Iterationen, genutzt für die Simulation der Colditzer DRT-Haustürbedienung (siehe Kapitel 5.3.3).

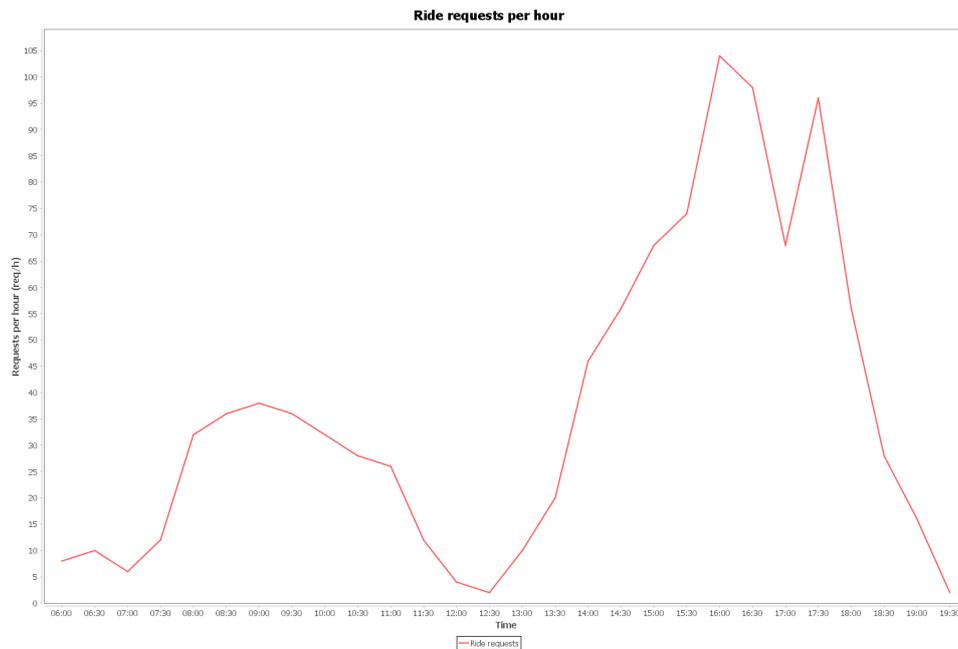


Abbildung I.2: Zu sehen sind die Fahrtenanfragen der Agenten für die DRT-Haustürbedienung. Dies ist ein Beispiel (Iteration 32), dass den DRT-Durchschnittssimulationswerten am nächsten kommt (betreffend Kapitel 5.3.3). Die meisten Anfragen bestehen am späten Nachmittag und frühen Abend, wo Freizeit- und Einkaufsaktivitäten vollzogen werden oder sich die Agenten auf dem Weg nach Hause befinden.

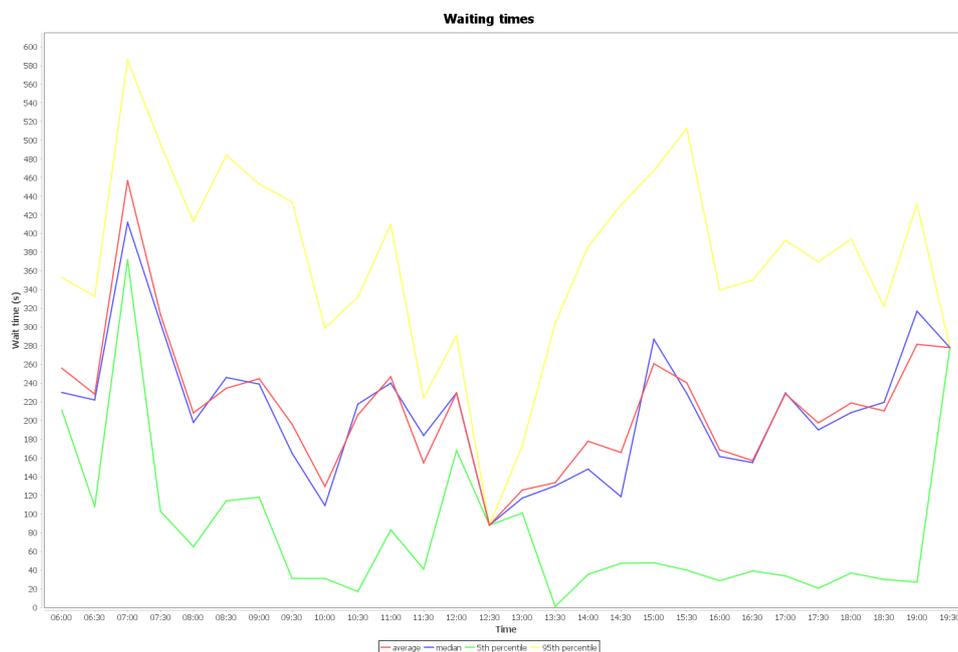


Abbildung I.3: Zu sehen sind für die DRT-Haustürbedienung die tatsächlichen Wartezeiten der Agenten, nach dem sie eine gültige Fahrtenanfrage platziert haben. Dies ist ein Beispiel (Iteration 32), dass den DRT-Durchschnittssimulationswerten am nächsten kommt (betreffend Kapitel 5.3.3). 95% der Agenten (gelbe Linie) warten kürzer als 10min (600sek) bis ihr Fahrtenwunsch bedient wird.

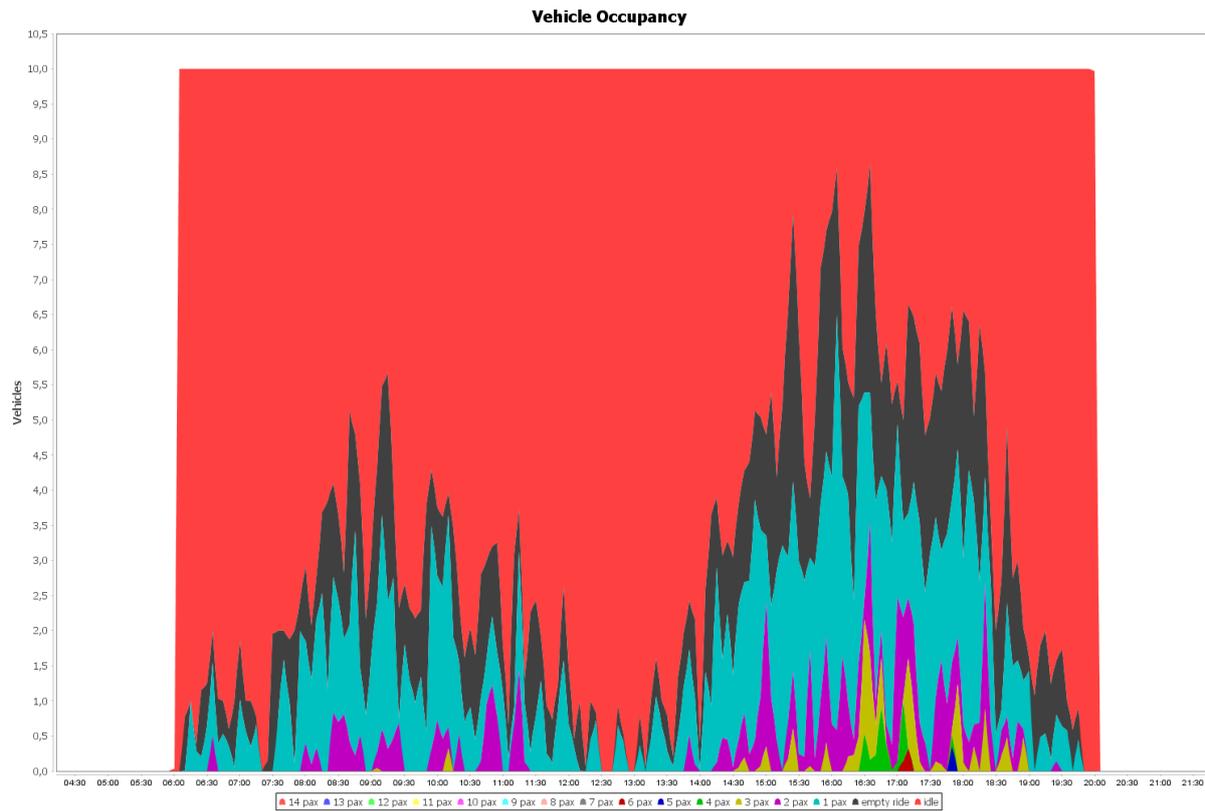


Abbildung I.4: Zu sehen ist die Fahrzeugbesetzung der 10 Minibusse für die DRT-Haustürbedienung. Dies ist ein Beispiel (Iteration 32), das den DRT-Durchschnittssimulationswerten am nächsten kommt (betreffend Kapitel 5.3.3). Am Nachmittag ist ein Fahrzeug einmal mit sechs Agenten besetzt, siehe rote Farbspitzen. Eine Kapazität von 14 Plätzen wird nicht benötigt, es könnten auch Vans mit einer Kapazität von sechs bis acht Plätzen eingesetzt werden.