



Master Thesis
im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg
zum Thema
„Übertragbarkeitsanalyse des Salzburger Radverkehrsmodells auf die Stadt Tübingen“

vorgelegt von
Bsc. Sophie Lattke
105164, UNIGIS MSc Jahrgang 2018
Betreuerin:
Frau Prof. Dr. Gudrun Wallentin
Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Aalen, 28.06.2021

Vorwort

Danke an alle, die mich bei der Erstellung der Masterarbeit unterstützt haben.

Ein großer Dank geht an Fr. Prof. Dr. Wallentin, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und konstruktive Kritik, die beim Verfassen der Arbeit aufgekommen sind, möchte ich mich herzlich bedanken. Ein besonderes Dankeschön geht an Dana Kaziyeva für ihre Unterstützung und die Antworten auf die zahlreichen Fragen. Nicht zu vergessen sei Dr. Martin Loidl, der mich bei Fragen rund um das Thema Daten insbesondere in der Anfangsphase unterstützt hat. Beim interfaktulären Fachbereich Geoinformatik, Z-GIS bedanke ich mich für die kostenlose Verwendung der Datenbankskripte *network_assessment*, *function-calculate-index* und *topology-check* im Rahmen dieser Masterthesis.

Zudem geht ein großer Dank an Daniel Hammer in der Fachabteilung Verkehrsplanung und an Melanie Hummer, Fachabteilung Geoinformation bei der Stadt Tübingen für das kostenlose Bereitstellen der auf Tübingen bezogenen Daten.

Danke auch meiner Familie, meinen Freunden und den fleißigen Korrekturlesern für ihre Unterstützung.

Zuletzt möchte ich mich bei dem UNIGIS-Team und meinen Kommilitonen für die tatkräftige Unterstützung und schöne Zeit während des Masterstudiums bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Ehrenwörtliche Erklärung	VIII
Zusammenfassung	IX
Abstract	X
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Relevanz des Themas	1
1.2 Struktur der Arbeit	2
1.3 Literaturüberblick	3
1.4 Zielsetzung und Forschungsfrage	6
2 Methodik	8
2.1 Agenten-basierte Modelle	8
2.1.1 Agenten-basierte Modelle in der Mobilität	11
2.1.2 Agenten-basierte Modelle im Radverkehr	13
2.2 Übertragung von agenten-basierten Modellen	14
3 Agenten-basierte Radverkehrsmodelle - Vorstellung des Salzburger Radverkehrsmodells	18
4 Übertragung des Salzburger Radverkehrsmodells auf die Stadt Tübingen	31
4.1 Vorstellung der Stadt Tübingen	32
4.2 Vorstellung des agenten-basiertes Radverkehrsmodell Tübingen	35
4.3 Datenaufbereitung	36
4.3.1 Einrichtungen	37
4.3.2 Arbeitsplätze	40
4.3.3 Wohnorte	40
4.3.4 Radverkehrszählstationen	51
4.3.5 Routingnetz	56
4.3.6 Kreuzungen	59
4.3.7 Stadtgrenze	60
4.3.8 Parametrisierung des Tübinger Radverkehrsmodells	62
4.4 Datenreferenzen	62

4.5 Übertragung des Salzburger Radverkehrsmodells auf Tübingen	64
5 Ergebnisse	67
6 Diskussion	74
7 Ausblick und Fazit	77
Literaturverzeichnis	80
Anhang	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Flussdiagramm des Salzburger Radverkehrsmodells	22
Abbildung 2: Heatmap des Radverkehrs in der Stadt Salzburg, simuliert mit dem Salzburger Radverkehrsmodell	23
Abbildung 3: Aktive Radfahrer in der Stadt Salzburg nach dem Fahrzweck im Modus kürzeste Route (oben) oder sicherste Route (unten), simuliert mit dem Salzburger Radverkehrsmodell	26
Abbildung 4: Gesamte Anzahl der Radfahrer im Modus kürzeste Route (oben) oder sicherste Route (unten) in der Stadt Salzburg, simuliert mit dem Salzburger Radverkehrsmodell	27
Abbildung 5: Gezählte Radfahrer in der Stadt Salzburg an den neun Zählstationen im Modus sicherste Route, simuliert mit dem Salzburger Radverkehrsmodell	28
Abbildung 6: Gezählte Radfahrer an den neun Zählstationen im Modus kürzeste Route in der Stadt Salzburg, simuliert mit dem Salzburger Radverkehrsmodell	28
Abbildung 7: Anzahl der Einwohner pro Stadtteil/Ortsteil	33
Abbildung 8: Räumliche Verkehrsarten in Bezug auf ein Untersuchungsgebiet	34
Abbildung 9: Verkehrsmittelwahl nach spezifischen Verkehrsaufkommen 2013	34
Abbildung 10: Wegehäufigkeit der Personen nach vier Hauptverkehrsmittelgruppen	35
Abbildung 11: Lage der Einrichtungen in Tübingen	39
Abbildung 12: Anteil der Beschäftigten an den Einwohnern in Tübingen	45
Abbildung 13: Anteil der Erwerbslosen in Tübingen	48
Abbildung 14: Lage der Radverkehrszählstationen in Tübingen	52
Abbildung 15: Radverkehrszählstelle am Neckarradweg zwischen Tübingen und Hirschau	53
Abbildung 16: Radverkehrszählstation am Schlossbergtunnel	54
Abbildung 17: Anzahl der Radfahrer in Tübingen im Oktober 2018	55
Abbildung 18: Darstellung der Problematik der gemeindefreien Gebiete im Routingnetz	57
Abbildung 19: Darstellung des Routingnetzes des Tübinger Radverkehrsmodells	58
Abbildung 20: Kreuzungen des Tübinger Radverkehrsmodells	60
Abbildung 21: Stadtteile und Kernstadt von Tübingen	61
Abbildung 22: Fehlermeldung nach dem Start des Experimentes im gesamten Untersuchungsgebiet	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Groß- und Mittelstädte in Deutschland, die Einwohnerzahl und die Anzahl der Radverkehrszählstellen im Stadtgebiet (Stand 06/2021)	36
Tabelle 2: Stadtteile und ihr Gewichtungsanteil an der Entfernung	41
Tabelle 3: Räumliche Verteilung der männlichen und weiblichen Studenten auf die Stadtteile	42
Tabelle 4: Anzahl der Schüler in den Stadt- und Ortsteilen Tübingens	43
Tabelle 5: Räumliche Verteilung der männlichen und weiblichen Arbeitnehmer auf die Einwohner der Stadtteile	46
Tabelle 6: Räumliche Verteilung der männlichen und weiblichen Ruheständler auf die Einwohner der Stadtteile	49
Tabelle 7: Art der Daten und Datenquellen für das Tübinger Radverkehrsmodell	62
Tabelle 8: Datenreferenz und Lizenzbestimmungen der Eingangsdaten im Tübinger Radverkehrsmodell	63
Tabelle 9: Gegenüberstellung der Datenreferenz im Tübinger und Salzburger Radverkehrsmodell	69

Abkürzungsverzeichnis

ABM	Agenten-basiertes Modell
CSV	Comma separated values
GAMA	GIS Agent-based Modeling Architecture
GAML	GAmA Modeling Language
GIS	Geoinformationssystem
MATSim	Multi-Agent Transport Simulation
MIV	Motorisierter Individualverkehr
N.N.	Normal Null
OSM	OpenStreetMap
ÖV	Öffentlicher Verkehr
SGB II	Sozialgesetzbuch, Zweites Buch
SGB XII	Sozialgesetzbuch, Zwölftes Buch
SI	Safety Index
SrV	System repräsentativer Verkehrsbefragungen
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geogetic System

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt und alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich angegebenen Quellen entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin damit einverstanden, dass diese Arbeit zum Zwecke eines Plagiatsabgleichs in elektronischer Form anonymisiert versendet und gespeichert werden kann.

Ort, Datum

Unterschrift

Zusammenfassung

Nicht nur im Zuge der zunehmenden Klimaschutzdebatte, auch in den letzten Jahren gewinnt der Radverkehr zunehmend an Bedeutung. Da nur vereinzelt Daten zu Ausgangs- und Zielorten sowie zu den Verkehrsströmen vorliegen, ist es kaum möglich, aus den vorhandenen Daten Radverkehrsdaten auf der Ebene einzelner Straßenabschnitte abzuleiten, sodass den Kommunen in Deutschland kaum Daten zum nicht motorisierten Verkehr vorliegen. Städte und Gemeinden können häufig nur auf die Daten weniger Zählstellen oder auf vereinzelte Verkehrszählungen an einigen wenigen Orten zurückgreifen. Die Übertragung eines Verkehrsflussmodells kann eine Lösung für das geschilderte Problem sein. Für die Stadt Salzburg wurde 2015 an der dortigen Universität ein erstes Radverkehrsflussmodell generiert, das mittels Daten von Radverkehrszählstationen validiert wird. Bislang wurde das genannte Radverkehrsmodell noch nicht auf ein anderes Untersuchungsgebiet übertragen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, ob ein agenten-basiertes Modell auf ein anderes Studiengebiet übertragen werden kann, ohne es neu kalibrieren zu müssen. Konkret wird das Salzburger Radverkehrsmodell auf das Stadtgebiet Tübingens übertragen, in dem zwar die Eingangsdaten zur Generierung des Modells, nicht jedoch die Modell-Variablen angepasst werden.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden zunächst agenten-basierte Modelle in der Mobilität und im Radverkehr sowie der Aspekt der Übertragung beleuchtet. Mit dem Wissen wie sich agenten-basierte Modelle auf ein anderes Untersuchungsgebiet übertragen lassen erfolgt die Präsentation des Salzburger Radverkehrsmodells, das als Grundlage für das Tübinger Radverkehrsmodell dient. Dabei werden die in Tübingen zu berücksichtigenden Charakteristika herausgearbeitet. Nach der ausführlichen Datenaufbereitung wird auf die Vorstellung des Untersuchungsgebietes des Tübinger Radverkehrsmodells eingegangen. Anschließend erfolgt die Übertragung des Salzburger Radverkehrsmodells auf Tübingen. Dabei werden auch Herausforderungen, deren Ursachen und Lösungsansätze zur Fehlerbehebung thematisiert.

Es wird deutlich, dass die Übertragung eines agenten-basierten Radverkehrsmodells in Form des Salzburger Radverkehrsmodells im Rahmen dieser Masterthesis fehlschlug. Als wesentliche Aspekte für die fehlende Übertragbarkeit können die teilweise nicht vorhandene und uneindeutige Spezifikation bei einzelnen Vektordaten, die ungenaue Datenlage bei der Datenaufbereitung für das Tübinger Radverkehrsmodell sowie ein Routingfehler bei der Durchführung des Experimentes genannt werden.

Abstract

Not only during the growing climate protection debate, but also in recent years, bicycle traffic has become increasingly important. Since only isolated data on origins and destinations as well as on traffic flows are available, it is hardly possible to derive cycling data on the level of individual road sections from the existing data, so that municipalities in Germany hardly have any data on non-motorized traffic. Cities and municipalities can often only fall back on the data of a few counting stations or on isolated traffic counts at a few locations. The transfer of a traffic flow model can be a solution for the described problem. For the city of Salzburg, a first bicycle traffic flow model was generated in 2015 at the university there, which is validated by means of data from bicycle traffic counting stations. So far, the mentioned bicycle traffic model has not been transferred to another study area.

This thesis deals with the question whether an agent-based model can be transferred to another study area without having to recalibrate it. Specifically, the Salzburg bicycle traffic model is transferred to the urban area of Tübingen, in which the input data for generating the model are adapted, but not the model variables.

To answer the research question, agent-based models in mobility and in cycling were first examined in terms of transfer. With the knowledge of how agent-based models can be transferred to another study area, the presentation of the Salzburg cycling model, which serves as the basis for the Tübingen cycling model, follows. The characteristics to be considered in Tübingen are elaborated. After the detailed data preparation, the presentation of the study area of the Tübingen bicycle traffic model will be discussed. Subsequently, the Salzburg cycling model is transferred to Tübingen. In doing so, challenges and their causes as well as possible solutions for correcting errors are also discussed. It turned out that the transfer of an agent-based bicycle traffic model in the form of the Salzburg bicycle traffic model within the scope of this master thesis failed. The main aspects for the lack of transferability are the missing and inaccurate specification of individual shapefiles, the inaccurate data situation during the data preparation for the Tübingen bicycle traffic model as well as a routing error during the execution of the experiment.

Anmerkung:

Zur Vereinfachung der Lesbarkeit erfolgt in diesem Text keine geschlechtsneutrale Differenzierung. Bei allen personenbezogenen Bezeichnungen gilt die gewählte Form für beide Geschlechter.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Relevanz des Themas

Der Radverkehr gewinnt seit einigen Jahren, nicht nur im Zuge der vermehrten Klimaschutzdebatte, zunehmend an Bedeutung. Obwohl der Radverkehr einen stetig wachsenden Anteil des städtischen Verkehrs ausmacht, so gibt es nur vereinzelt Daten zu Ausgangs- und Zielorten sowie zu den Verkehrsströmen. Daher ist es derzeit kaum möglich, aus den vorhandenen Daten gültige Radverkehrsdaten auf der Ebene einzelner Straßenabschnitte abzuleiten (KAZIYEVA et al. 2018a). Doch insbesondere in der Infrastrukturplanung, dem Verkehrsmanagement und der Unfallanalyse hat das Wissen, wann, wo und wie viele Radfahrer unterwegs sind, einen hohen Stellenwert (WALLENTIN & LOIDL 2015).

Der nicht motorisierte Verkehr (z.B. Rad- oder Fußverkehr) wird jedoch in den gängigen Verkehrsmodellen, die in der regionalen Verkehrsplanung eingesetzt werden, nicht oder nur unzureichend behandelt. Ein Grund dafür ist, dass die bereits existierenden Modelle für die Anforderungen und Berechnungen des motorisierten Verkehrs entwickelt wurden. Hinzu kommt, dass den Kommunen in Deutschland kaum Daten zum nicht motorisierten Verkehr vorliegen. Städte und Gemeinden können häufig nur auf die Daten weniger Zählstellen oder auf vereinzelte Verkehrszählungen an einigen wenigen Orten zurückgreifen. Anhand dieser Datenlage ist es jedoch nicht möglich, konkrete Modelle und Prognosen für den Radverkehr zu generieren (DEUTSCHES INSTITUT FÜR URBANISTIK 2017). Parallel nimmt die Zahl der Radverkehrszählstationen in Deutschlands Städten in den letzten fünf Jahren kontinuierlich zu (HÄUSSER 2020). Doch im Gegensatz zu Verkehrsmodellen ermitteln sie nur die Anzahl der Radfahrer an einem Tag, zu einer bestimmten Uhrzeit. Der Start- und Zielort sowie die Länge und die Route der bislang zurückgelegten Strecke bleiben unklar. Darüber hinaus sind sie vergleichsweise teuer, sowohl in der Anschaffung als auch in der Pflege. Einzelne Verkehrszählungen sind ebenfalls kostspielig, aufwändig und weisen einen eingeschränkten Erhebungs-Zeitraum auf (DEUTSCHES INSTITUT FÜR URBANISTIK 2017). Die aktuell preiswerteste und geläufigste Variante ist die Nutzung von crowd-sourced Daten in der Verwaltung, die mittels eines GPS-Sensors im Smartphone von den Anwendern in einer App

generiert werden. Als Beispiele für solche Apps können Bike Citizen, Strava oder Naviki genannt werden. Diese Apps werden von einer breiten Masse an Radfahrern genutzt, die Daten beispielsweise zur Länge, Dauer und Durchschnittsgeschwindigkeit sowie die Anzahl der Höhenmeter einer Fahrt generieren. Zudem können je nach App weitere Parameter, wie die Höchstgeschwindigkeit und physiologische Faktoren (z.B. Herzfrequenz oder verbrauchte Kalorien) angegeben werden. Mittels dieser – häufig in Form von Heatmaps – dargestellten Daten wissen die Radverkehrsplaner wo, wie viele Radfahrer unterwegs sind. Informationen, wie der Zweck, die genaue Länge oder die Route der Radfahrt können allerdings nicht wiedergegeben werden. Doch genau diese Informationen können mit Radverkehrsmodellen generiert werden.

Dennoch werden Verkehrsmodelle und systematische Verfahren zur Förderung des Radverkehrs in Städten selten in die Entscheidungen der Politik mit einbezogen (ZIEMKE et al. 2017). Viel mehr gab es bis vor kurzem für Städte und Regionen noch keine Radverkehrsflussmodelle. Als wesentliche Gründe für das Fehlen solcher Modelle sind die Heterogenität der Radfahrer sowie die Schwierigkeiten bei der Vorhersage von Mobilität und Radverkehrsverhalten zu nennen (KAZIYEVA et al. 2018a).

Die Übertragung eines Verkehrsflussmodells kann eine Lösung für das oben dargestellte Problem sein, wenngleich sie bislang sowohl in der Wissenschaft kaum erforscht als auch in der Praxis kaum angewandt wurde. Vorteil der Übertragung eines Verkehrsflussmodells ist, dass kein „neues“ Modell entwickelt werden muss, wodurch Kosten zur Entwicklung und Analyse der Daten eingespart werden. Doch bei der Übertragung eines Verkehrsflussmodells muss die Beurteilung der Ergebnisse und der Zuverlässigkeit des Modells beachtet werden. Hinzu kommt, dass je nach gewähltem Untersuchungsgebiet zusätzliche Kosten bei der Datenerfassung entstehen können (BAQUERI et al. 2019).

Für die Stadt Salzburg wurde 2015 an der Universität Salzburg ein erstes Radverkehrsflussmodell generiert, das mit Daten von Radverkehrszählstationen validiert wird. Das sogenannte Salzburger Radverkehrsmodell wird seitdem vom Team um Prof. Wallentin ständig weiterentwickelt (KAZIYEVA et al. 2021b). Ob sich das Modell nur auf die Anwendung in und um Salzburg eignet, wurde bislang noch nicht untersucht.

1.2 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Das erste Kapitel umfasst die Definition der Problemstellung und deren Relevanz, die Darstellung der Struktur der Forschungsarbeit, den Literaturüberblick sowie die Formulierung von Zielsetzung und Forschungsfragen. In

Kapitel zwei folgt eine allgemeine Einführung zu agenten-basierten Modellen. Im Anschluss wird die Definition eines agenten-basierten Modells erörtert. In den folgenden Unterkapiteln wird genauer auf die Bedeutung dieser Abbildungen in der Mobilität sowie im Radverkehr eingegangen. Nicht unerwähnt darf in diesem Kapitel die Kritik bleiben. Berücksichtigung findet ebenfalls der Aspekt der Übertragung von ABM's (agent-based models; agenten-basierten Modelle). Als Grundlage der vorliegenden Masterthesis wird in Kapitel drei das Salzburger Radverkehrsmodell detaillierter vorgestellt. In Kapitel vier folgt eine kurze Vorstellung der Stadt Tübingen, welche als Untersuchungsgebiet des zu übertragenden Modells dient. Anschließend wird das Tübinger Radverkehrsmodell präsentiert und dabei speziell auf die Datenaufbereitung sowie die Übertragbarkeit des Salzburger Radverkehrsmodells auf Tübingen eingegangen. Die Forschungsfrage wird in Kapitel fünf beantwortet, indem das Ergebnis präsentiert und das Tübinger mit dem Salzburger Radverkehrsmodell verglichen wird. In Kapitel sechs werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse diskutiert, sodass die Forschungsfragen bestätigt oder widerlegt werden können. Die vorliegende Arbeit schließt mit einem Ausblick unter dem Aspekt notwendiger und möglicher Forschungsfragen.

1.3 Literaturüberblick

Die im Folgenden vorgestellte Literatur wurde anhand der folgenden beiden Aspekte analysiert:

1. Agenten-basierte Modelle im Verkehrswesen (Inwiefern werden diese Modelle generell im Verkehrswesen angewandt?)
2. Agenten-basierte Modelle im Radverkehr (Welche Arten gibt es bereits im Radverkehr? Mit welchen Fragestellungen (z.B. Routenwahl oder Aspekte der Sicherheit) befassen sich die Modelle? Was sind die zentralen Ergebnisse?)

Aus der Literatur geht hervor, dass sich Anwendungen von agenten-basierten Modelle im Stadtverkehr in der Regel auf die Bewegung von Fahrzeugen oder Fußgängern und nicht nur primär auf das Fahrrad konzentrieren (DAVIDSON et al. 2007, BAZZAN & KLÜGL 2013, BADLAND et al. 2013). So wurde beispielsweise gezeigt, dass sich ABMs bei der Parkplatzsuche anwenden lassen (WARAICH & AXHAUSEN 2012, BENENSON et al. 2008, SPITAEELS et al. 2009), ebenso wie im Carsharing (FAGNANT & KOCKELMAN 2014) und bei E-Fahrzeugen (WOLF et al. 2015). Jedoch finden sich diese Abbildungen nicht nur im motorisierten Individualverkehr, sondern auch im Fuß-, Rad- und öffentlichen Verkehr wieder. Für agenten-basierte Fußverkehrsmodelle kann RONALD et al. (2007), KLÜGL & RINDSFÜSER (2007) sowie ROSE et al. (2014) genannt werden. FUJII et al. (2017) kombinieren mehrere Verkehrsteilnehmer (Autos, Fußgänger und Straßenbahnen) in einem agenten-basierten Modell. Zur Erleichterung der

Arbeit wurden mehrere Frameworks für Verkehr oder Transport wie MATSim (Multi-Agent Transport Simulation; Multi-Agenten-Transport-Simulation; BALMER et al. 2009), SUMO (Simulation of Urban MObility; KRAJZEWICZ et al. 2012) oder Agentpolis (JAKOB & MOLER 2013) entwickelt.

Mit dem Modell MOSAIIC wurde von CZURA et al. (2015) ein agenten-basiertes Modell zur Simulation des Straßenverkehrs während einer Naturkatastrophe entwickelt. ABMs auf Basis der Plattform GAMA (GIS Agent-based Modeling Architecture) wurden von TAILLANDIER (2014) mit Bezug zu allen Verkehrsteilnehmern erstellt. Auch im Bereich des Bikesharings konnten agenten-basierte Modelle weitere Erkenntnisse liefern (SORIGUERA et al. 2018, LU et al. 2018).

YANG & DIEZ-ROUG (2013) entwickelten ein solches Modell, um das Schulwegverhalten von Kindern innerhalb einer hypothetischen Stadt zu simulieren. Das Modell wurde verwendet, um die plausiblen Implikationen von Richtlinien zu untersuchen, die auf zwei etablierten Barrieren für aktive Fahrten zur Schule abzielen: Große Entfernungen und Verkehrssicherheit. Der Prozentsatz der Kinder, die zu Fuß zur Schule gehen, wurde für verschiedene Szenarien verglichen. Sie fanden heraus, dass die Schulstandorte gleichmäßig über den Raum verteilt sein sollten und die Kinder der nächstgelegenen Schule zugewiesen werden sollten. Ihnen zufolge kann es im Falle von Interventionen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit wirksamer sein, einen kleineren Bereich um die Schule herum mit größerer Intensität anzuvisieren als einen größeren Bereich mit geringerer Stärke.

Nur wenige Studien befassen sich mit dem Anwendungsgebiet von agenten-basierten Modellen im Radverkehr. RYBARCZYK (2014) verwendet die Methode, um zu untersuchen, wie sich die kleinteilige Stadtplanung auf die Wegfindung von Radfahrern auswirkt. Unter der Verwendung von geographischen Informationssystemen und statistischen Analysen wurden verschiedene Arten von simulierten Fahrradagenten mit dem beobachteten Radverkehrsaufkommen verglichen. Die Ergebnisse bestätigen die Notwendigkeit, Straßenräume zu entwerfen, die ein hohes Maß an Sichtbarkeit und eine reduzierte Anzahl an Knotenpunkten bieten, um das Radfahren zu fördern. Die Studie beschreibt zudem einen Modellierungsansatz, der von Stadtplanern repliziert werden kann, um das Verhalten von Radfahrern zu verstehen.

Im Rahmen seiner Dissertation entwickelte SNIZEK (2015) das agenten-basierte Modell CopenhagenABM, mit dem die Routenwahl von Radfahrern modelliert wird. Das Modell wurde in Repast, einem Framework zum Erstellen agenten-basierter Modelle, generiert. Der für das Routing zugrundeliegende Straßengraph basiert auf OpenStreetMap (OSM)-Daten. Dabei

zeigt sich, dass das Modell dazu geeignet ist, das Verhalten der Radfahrer bei der Routenwahl zu modellieren.

LEAO & PETTIT (2017) entwickelten basierend auf der Open-Source-Plattform GAMA ein agenten-basiertes Radverkehrsmodell zum besseren Verständnis von Radfahrmustern in der Stadt Sydney, Australien. Damit sollte zunächst die Hypothese überprüft werden, ob die kürzeste Route wirklich das Hauptkriterium für das Pendeln mit dem Fahrrad ist. Es konnte im Untersuchungsgebiet eine gute Übereinstimmung zwischen den Routen für die simulierten Radfahrer im ABM und den realen Radfahrern festgestellt werden. Daraus folgern sie, dass für Planungszwecke solche Simulationsergebnisse hilfreich sein können, um wichtige Fahrradrouten zu identifizieren, die den Radfahrern helfen, ihr Ziel auf kürzestem Wege zu erreichen.

Im agenten-basierten Radverkehrsmodell von VELDHUIS (2018) werden einzelne Radfahrten von Beschäftigten, Kunden und Touristen simuliert, die sich über das zentrale Stadtgebiet von Amsterdam verteilen. Das Modell ist ebenso wie das von LEAO & PETTIT (2017) in die Plattform GAMA eingebunden und konnte insgesamt 60 000 Radfahrer darstellen.

Darüber hinaus ist das Salzburger Radverkehrsmodell von WALLENTIN & LOIDL (2015) zu nennen, das in der Modellierungsumgebung NetLogo entwickelt wurde. KAZIYEVA et al. (2021b) entwickelten das Radverkehrsmodell weiter, beispielsweise durch die Erhöhung der Anzahl an Radverkehrszählstationen, die sich zudem breiter im Stadtgebiet verteilen. Als Grundlage des Tübinger Radverkehrsmodells und der vorliegenden Arbeit wird es in Kapitel 3 detaillierter thematisiert.

Das Modell MATSim, entwickelt 2016 von HORNI et al., wurde u.a. von ZIEMKE et al. (2017) in ihrer Studie zur Modellierung des Radverkehrs in Berlin angewandt. Der Fokus lag dabei auf Straßentypen und der Oberflächenbeschaffenheit. So wurde die Zeitkomponente in die Geschwindigkeitsberechnungen für die verschiedenen modellierten Straßentypen einbezogen. Anwendungen von MATSim finden sich ferner im Ruhrgebiet (KADDOURA et al. 2020, ZIEMKE et al. 2019) und in Vorarlberg (LENZ et al. 2016).

ZIEMKE et al. (2015) untersuchten, ob es möglich ist, ein geschätztes Modell für die Aktivitätserzeugung aus dem Schätzkontext heraus zu übertragen. Dabei wird eine Verkehrszählung verwendet, um eine lokale aktivitätsbasierte Darstellung der Verkehrsnachfrage zu generieren. Der Schätzkontext umfasste das Gebiet von Los Angeles, Kalifornien, der Anwendungskontext lag in Berlin. Dabei wurde mit CEMDAP (comprehensive econometric micro-simulator for daily activity-travel patterns: umfassender ökonomischer Mikrosimulator für tägliche Bewegungsmuster) ein aktivitätsbasiertes

Nachfragemodell und mit MATSIM eine Kombination aus einem agenten-basierten Verkehrsnachfragemodell und ein agenten-basiertes Simulationsmodell der verkehrsbezogenen Entscheidungsfindung erstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Übertragbarkeit möglich ist. Dies belegt auch ein Vergleich mit einer Berliner Verkehrsbefragung (ZIEMKE et al. 2015).

Bislang konzentrierte sich die Forschung zur Übertragbarkeit von Modellen vor allem auf Modelle zur Fahrtengenerierung und Verkehrsmittelwahl (COTRUS et al. 2005). SKIDER (2013) liefert eine Zusammenfassung der zur Beurteilung der Übertragbarkeit des Modells verwendeten Metriken und eine Zusammenfassung der empirischen Literatur zu dieser Thematik.

Aus der Literatur geht hervor, dass aus methodischer Sicht der ideale Rahmen von ABM ohne weiteres auf ein komplexes System wie eine Stadt angewendet werden kann (HEPPENSTALL et al. 2016). Allerdings benennen mehrere Autoren eine Reihe an kritischen Punkten, welche eine erfolgreiche Implementierung gefährden können. Dazu zählt die Kalibrierung und Validierung, die Verknüpfung von Prozessen auf verschiedenen Skalen, die Simulation des Verhaltens sowie die Transparenz und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (HEPPENSTALL et al. 2016, CROOKS & HEPPENSTALL 2012, MANZO 2014). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird in Kapitel 2.1 genauer auf die Kritik an agenten-basierten Modellen eingegangen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei agenten-basierten Modellen eine Kombination verschiedener Verkehrsträger möglich ist und bereits angewandt wird. Zusätzlich finden sich ABM's bei jedem Verkehrsteilnehmer wieder. Als Beispiele für agenten-basierte Modelle im Radverkehr sind MATSim, MOSAIIC, SUMO und Agentpolis zu nennen. Studien, die agenten-basierte Modelle anwenden, verwenden diese um die Routenwahl von Radfahrern zu untersuchen, welcher Straßentyp oder Oberflächenbelag von verschiedenen Radfahrertypen bevorzugt wird.

1.4 Zielsetzung und Forschungsfrage

Aus der oben geschilderten Problematik ergibt sich die Hypothese, dass ein agenten-basiertes Modell auf ein anderes Studiengebiet übertragen werden kann, ohne es neu kalibrieren zu müssen. Konkret wird das Salzburger Radverkehrsmodell (KAZIYEVA et al. 2021a) auf das Stadtgebiet Tübingens übertragen, in dem zwar die Eingangsdaten zur Generierung des Modells, nicht jedoch die Modell-Variablen angepasst werden. Daraus leiten sich die folgenden Teilfragen ab:

1. Welche bedeutenden Charakteristika weist das Salzburger Radverkehrsmodell auf, die bei der Übertragung berücksichtigt werden müssen?

2. Ergeben sich bei der Übertragung des Salzburger Modells Herausforderungen und wie können sie behoben werden?
3. Gibt es zwischen den beiden Radverkehrsmodellen nennenswerte Unterschiede?
4. Sind die Ergebnisse des Tübinger Radverkehrsmodells aussagekräftig genug, um die Leitthese zu beantworten?
5. Ist das Salzburger Radverkehrsmodell dazu geeignet, auch in anderen Städten angewandt zu werden?

Die erste Teilfrage ermittelt die Besonderheiten des Salzburger Radverkehrsmodells, welche bei der Entwicklung des Tübinger Radverkehrsmodells berücksichtigt werden. Mögliche Herausforderungen bei der Übertragbarkeit werden in der zweiten Teilfrage erörtert. Dabei soll u.a. auf die Datengrundlage sowie die Ausführung des Modells eingegangen werden. Teilfrage 3 zielt darauf ab, die Differenzen zwischen den beiden Radverkehrsmodellen hinsichtlich der verwendeten Daten herauszuarbeiten. Im letzten Teil der Arbeit fasst die vierte Teilfrage die Ergebnisse zusammen und erfasst inwieweit die erzielten Resultate die These bestätigen oder widerlegen können. Mit Hilfe von Teilfrage 5 soll ein Bogen zur weiteren Anwendung des Salzburger Radverkehrsmodells gespannt werden.

2 Methodik

2.1 Agenten-basierte Modelle

HECKBERT et al. definieren agenten-basierte Modelle als “(...) *the computational study of systems of interacting autonomous entities, each with dynamic behavior and heterogeneous characteristics.*“ (HECKBERT et al. 2010, S.40).

In der Definition wird deutlich, dass es sich bei agenten-basierten Modelle um Systeme handelt. Die als Agenten dargestellten Entitäten weisen ein dynamisches Verhalten und unterschiedliche Eigenschaften auf. SNIZEK (2015) ergänzt die Definition um eine räumliche Ebene. Er definiert agenten-basierte Modelle als eine Art Rechenmodell zur Simulation komplexer und oft räumlicher oder sogar georäumlicher Aufgaben mit Hilfe von Agenten. Mit Agenten sind autonome, aktive, re-, inter- und proaktive, heterogene und mobile Einheiten gemeint (SNIZEK 2015).

Agenten-basierte Modelle sind darüber hinaus eine Methode unter dem Dach der Vielschichtigkeit. Sie beruhen auf den Prinzipien, dass die Entstehung von Makro-Mustern aus individualisierten, aber miteinander verbundenen Mikro-Entscheidungen resultiert (LEAO & PETTIT 2017). Die Bewegungsmuster auf Systemebene ergeben sich in ABM's aus dem menschlichen Verhalten eines Individuums. Daher eignen sich agenten-basierte Transportmodelle besonders, um Hypothesen zum individuellen Verhalten zu generieren und zu überprüfen. Das simulierte Verhalten eines Individuums kann darüber hinaus auf einer höheren Skalenebene aggregiert werden und somit die Grundlage für eine globale Schätzung der Verkehrsströme bilden (WALLENTIN & LOIDL 2015). Durch Anweisung des Modells mit einfachen Bewegungsregeln auf Agentenebene ist das Modell in der Lage, Phänomene auf einer höheren Systemebene zu erklären (KAZIYEVA et al. 2018a). Agenten-basierte Modelle werden insbesondere bei der Modellierung komplexer Phänomene angewandt, bei denen viele Agenten oder aktive Entitäten mit bestimmten inhärenten Eigenschaften miteinander interagieren, um Agentenbeziehungen herzustellen und dadurch automatisiertes Denken und Problemlösen zu erleichtern (ABAR et al. 2017).

Ein Vorteil bei der Verwendung eines agenten-basierten Modellierungsansatzes in einem räumlichen Umfeld ist, dass er eine flexible Möglichkeit bietet, Prozesse auf mehreren Skalen zu kombinieren, von lokal über regional bis hin zu national oder sogar global, wodurch potenziell eine Rückkopplung zwischen den einzelnen Skalen entsteht (KIEU et al. 2020).

Jedoch dürfen bei den Vorteilen von agenten-basierten Modellen die Nachteile nicht unerwähnt bleiben. Einschränkende Faktoren sind die Rechenleistung, der Arbeitsspeicher sowie der wohl kritischste Aspekt – die verfügbaren Daten (BAZZAN & KLÜGL 2013).

Im Literaturüberblick (Kapitel 1.3) klang die Kritik an agenten-basierten Modellen an. Im Folgenden soll sie ausführlicher thematisiert werden. Wie bereits erwähnt werden 1) die Kalibrierung, 2) die Validierung, 3) die Transparenz und 4) die Reproduzierbarkeit als wesentliche Kritikpunkte an agenten-basierten Modellen genannt.

Hinsichtlich der Kalibrierung und Validierung ergibt sich ein großer Teil des eigentlichen Problems aus ABM-Anwendungen an sich. Da die Modelle in fast jeder Größenordnung angewandt werden können und jede Entität repräsentiert werden kann, kann ein „Einheitsansatz“ nicht funktionieren. Methoden und Metriken sind nötig, die Muster und Prozesse auf verschiedenen räumlichen sowie zeitlichen Skalen identifizieren. Darüber hinaus wird eine große Menge an Daten benötigt, um die Tausenden an heterogenen Agenten zu kalibrieren und validieren (HEPPENSTALL et al. 2016). MANZO (2014) ergänzt, dass die Variabilität quantifiziert und beschrieben werden muss. Dazu muss die Simulation für jeden Parametersatz eine bestimmte Anzahl von Malen wiederholt und dokumentiert werden (MANZO 2014). Allerdings merken KIEU et al. (2020) an, dass es in agenten-basierten Modellen viele Entscheidungsprozesse gibt, die das Verhalten von Individuen definieren. Diese Prozesse können nur schwer beobachtet und oft angenommen werden, was eine umfassende Validierung unmöglich macht. Die Schwierigkeiten, die mit der Validierung agenten-basierter Modelle verbunden sind, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a) Die Natur des zugrundeliegenden Systems – agenten-basierte Modelle werden typischerweise erstellt, um komplexe, emergente und offene Systeme zu simulieren, die unweigerlich unbekannte Parameter beinhalten.

b) Die Natur eines agenten-basierten Modells – die Interdependenzen zwischen Agenten und ihrer Umgebung und die Entstehung von Phänomenen auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen bedeuten, dass viele Aspekte des Modells in der Realität nicht beobachtet werden können.

c) Datenverfügbarkeit – selbst wenn es möglich wäre, einen bestimmten Aspekt des Systems zu beobachten, ist es unwahrscheinlich, dass kleinmaßstäbige räumlich-zeitliche Daten verfügbar sind, um das Verhalten der Agenten direkt zu validieren (KIEU et al. 2020).

Mit dem Aspekt der Transparenz der Ergebnisse agenten-basierter Modelle befasst sich MANZO (2014). Genauer geht es dabei um das Verständnis der inneren Funktionsweise des zu simulierenden Modells. Denn auch wenn die theoretischen Mechanismen, die im Computerprogramm kodiert sind, vollkommen klar sein mögen, ist der durch diese Mechanismen erzeugte Prozess nicht immer leicht zu verstehen. Darüber hinaus ist es dieser Prozess, der verstanden werden muss, um den Ursprung des Verhaltens des Modells in den

verschiedenen Bereichen seines Parameterraums zu klären (MANZO 2014). Hinzu kommt, dass das Modell bestenfalls so aufgebaut ist, dass es von Fach-Interessierten verstanden werden kann – bei agenten-basierten Modellen kann dies eine Herausforderung darstellen, das Modell entsprechend zu konzipieren.

Da der Aspekt der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse einer agenten-basierten Simulation das Thema dieser Forschungsarbeit umfasst, wird er im Folgenden detaillierter ausgeführt. Denn auch die Standardisierung von Verfahren zur Konstruktion und Analyse eines agenten-basierten Modells kann an sich schon als kritischer Punkt betrachtet werden. Da es – wie bereits oben thematisiert – schwierig ist, alle Details eines Modells in einem Artikel zu erklären und der Computercode nicht immer zur Verfügung gestellt wird, ist die Replikation veröffentlichter Modelle herausfordernd. Wird eine Überprüfung durchgeführt, so beschränkt sie sich im Allgemeinen auf den Nachweis, dass ein bestimmtes Ergebnis des beobachteten Modells nicht bestätigt wird, wenn ein bestimmter Aspekt des Modells geändert wird (GALAN & IZQUIERDO 2005; MEADOWS & CLIFF 2012; VAN DE RIJT et al. 2009; WILENSKY & RAND 2007). Oftmals führt die Analyse aufgrund der fehlenden Informationen zu einer Kontroverse darüber, was die Autoren replizieren konnten, im Vergleich zu dem, was sie tatsächlich repliziert haben. Zur Schaffung einer transparenteren Kommunikation, die sowohl die Wiederverwendung als auch die Replikation von Modellen erleichtern könnte, haben sich zwei Trends herauskristallisiert. Zum einen wurden Protokolle für die standardisierte Darstellung agenten-basierter Modelle vorgeschlagen (RICHIARDI et al., 2006; GRIMM et al. 2010), zum anderen wurden Plattformen für die Klassifizierung und gemeinsame Nutzung von Modellen – entweder generisch oder spezifisch für eine bestimmte Sprache, wie NetLogo – entwickelt (MANZO 2014).

Der agenten-basierte Modellierungsansatz wird heute in vielen Bereichen wie der Geographie, der Ökologie oder der Ökonomie und ganz allgemein zur Untersuchung räumlich expliziter sozio-ökologischer Systeme verwendet, wo die Heterogenität der Akteure und die zahlreichen Rückkopplungsschleifen zwischen ihnen einen amodularen und inkrementellen Modellierungsansatz erfordern (TAILLANDIER et al. 2019). Auch in Disziplinen wie der Klimaforschung, der Biologie, der Landwirtschaft, der Soziologie und den Sozialwissenschaften finden sich agenten-basierte Modelle und Simulationen wieder – ebenso wie im Verkehrswesen und der Mobilität (ABAR et al. 2017).

2.1.1 Agenten-basierte Modelle in der Mobilität

In den letzten zehn Jahren haben die Entwicklungen im Bereich der Mathematik zur nahtlosen Integration von GIS (geographischen Informationssystemen) in ABM und die Möglichkeit der Darstellung von geographischen Merkmalen die Fähigkeit von agenten-basierten Modellen, realistischere Prozesse und Muster städtischer Umgebungen abzubilden, erheblich verbessert. Im Verkehrswesen können Agenten Personen, Fahrzeuge, Verkehrssignale oder andere Elemente sein, die ein größeres, zu untersuchendes System darstellen. Bei dieser Methodik interagieren autonome Agenten mit der Umwelt und untereinander durch Verhaltensregeln (LEAO & PETTIT 2017).

Aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung der Simulation können ABMs nicht nur Strömungen, sondern auch die individuelle Begegnung zweier Fahrzeuge auf einem Straßennetz simulieren. Besonders für die Verkehrssicherheitsforschung können dadurch wichtige Erkenntnisse abgeleitet werden, da ein Unfall nur dann passiert, wenn sich die Wege zweier Verkehrsteilnehmer kreuzen (WALLENTIN & LOIDL 2015). Angesichts der geographischen, funktionalen und temporären Verteilung von Daten sowie der häufigen und flexiblen Interaktion zwischen den Teilnehmern und ihrer Umwelt lässt sich festhalten, dass sich agenten-basierte Ansätze sehr gut zum Verkehrs- und Transportmanagement eignen. Diese können zu den gesamten Bemühungen um die Gestaltung und Steuerung intelligenter Verkehrssysteme beitragen und im weiteren Sinne auch dazu, dass Städte intelligenter werden (BAZZAN & KLÜGL 2013).

Im Folgenden werden fünf Hauptmotivationen für den Einsatz von Agenten- und Multiagentensystemtechnologien im Verkehrs- und Transportwesen angeführt: Zunächst kann genannt werden, dass agenten-basierte Modelle eine natürliche und intuitive Problemlösung darstellen, indem Akteure auf einer potentiell lokalen Perspektive mit einbezogen werden. Aufgrund der Fähigkeit zur Selbstorganisation können adaptive und robuste Dienste angeboten werden. Ferner bieten autonome Agenten eine geeignete Grundlage für die Modellierung heterogener Systeme. Jede Instanz kann ihre individuelle Architektur und ihr individuelles Verhalten besitzen. Der Detaillierungsgrad kann beliebig in ein Simulationsmodell einbezogen oder ein Problemlösungsframework auf der Agentenebene angewandt werden. Des Weiteren können Agenten und ihre Interaktion mit Hilfe von Abstraktionen auf hoher Ebene beschrieben werden. Dadurch bieten sie eine intuitive Ebene der Interaktion zwischen menschlichen Anwendern oder Modellierern und dem agenten-basierten System. Dabei darf die Visualisierung nicht vergessen werden, die die Analyse und Kontrolle der Eigenschaften des gegebenen Systems erleichtert. Außerdem ermöglichen Agenten- oder Multiagentensysteme

die Anpassung an die variable Struktur des Systems auf elegante und effiziente Art und Weise. Wenn die aktiven Entitäten als Agenten modelliert werden – sowohl in Kontroll- und Managementanwendungen als auch bei der Entwicklung von Simulationsmodellen – können sie steuern, wann und mit wem sie interagieren. Diese dynamischen Beziehungen können vom lokalen Standpunkt aus gesteuert, getrennt oder hergestellt werden. Agenten können in der Lage sein, ihr Verhalten an eine sich verändernde Organisation anzupassen. Diese Flexibilität ist in Verkehrs- und Transportbereichen von großer Bedeutung. Zuletzt ermöglicht die Metapher des Agenten, die für die Modellierung eines Verkehrsteilnehmers oder Entscheidungsträgers verwendet wird, komplexe Einschränkungen zu erfassen, die alle Problemlösungsphasen miteinander verbinden. Die Agenten und ihre Argumentationsfähigkeiten können in ihrem Kontext und ihrer Umgebung persistent sein. Dies führt dazu, dass Entitäten über ihre gesamte "Lebensdauer" in konsistenter und kohärenter Weise angegangen werden können (BAZZAN & KLÜGL 2013).

Generell kann in drei verschiedene Gruppen der agenten-basierten Simulation in der Mobilität differenziert werden: Diejenige der Verkehrsnachfrage, diejenige der verkehrsbezogenen Entscheidungsfindung und die agenten-basierte Simulation des Verkehrsflusses. Traditionell ist die Ermittlung der Verkehrsnachfrage die Anfangsphase jeder Verkehrssimulation. Sie befasst sich mit dem Bedarf an Verkehrsinfrastruktur als grundlegendem Simulationsinput. Das Ergebnis der Berechnungen der Verkehrsnachfrage ist die Anzahl der Fahrten von einem Ausgangs- zu einem Zielort, wobei je nach Fragestellung auch die Abfahrtszeiten berücksichtigt werden müssen. Die Bestimmung der Verkehrsnachfrage ist traditionell eine datengetriebene Aktivität, die auf demographischen Daten, Statistiken über Arbeitsplätze und Haushalte, Autobesitz usw. basiert. Während in der Vergangenheit fahrtenbezogene Ansätze dominierten, gewinnen aktivitätsbasierte Abläufe immer mehr an Bedeutung. In diesen wird der Tagesverlauf eines typischen Menschen, der einer bestimmten Verhaltensklasse angehört, reproduziert. Er besteht aus Aktivitäten, die an festgelegten Orten stattfinden. Um den Wechsel von Orten zu simulieren, werden dem gesamten Plan Fahrten hinzugefügt. Danach können neben dem Start- und Zielort auch die Abfahrtszeit auf der Grundlage der jeweiligen Fahrt bestimmt werden, die zwei Aktivitäten miteinander verbindet (BAZZAN & KLÜGL 2013). MALLING et al. (2013) entwickelten beispielsweise ein Framework für ein agenten-basiertes Verkehrsnachfragemodell. Die agenten-basierte Simulation der verkehrsbezogenen Entscheidungsfindung basiert auf den Wahlmöglichkeiten der Agenten, die verschiedenen Ebenen der Auflösung umfassen können. Diese Wahlmöglichkeiten reichen von der Auswahl des Zielortes und der Abfahrtszeit über das Verkehrsmittel und die Routenwahl bis hin zum

Fahrspurwechsel. Bei diesen Modellen wählen die Agenten wiederholt eine Option aus der Reihe an Alternativen. Das Ergebnis dieser Entscheidungsprozesse sind bestimmte Ereignisse oder Hilfsmittel für den Entscheidungsträger (BAZZAN & KLÜGL 2013).

Je nach Forschungsziel ist die Simulation der Routen- und Verkehrsmittelwahl nicht ausreichend und kann ggf. irrelevant sein. Die meisten der diskutierten agenten-basierten Modelle befassen sich mit einer temporären Auflösung von einem Tag. Dies kann für die Berechnung von Fahrzeiten nützlich sein. Agenten-basierte Verkehrsflusssimulationen nutzen allerdings eine deutlich höhere zeitliche Auflösung von beispielsweise einer Minute oder weniger. So können Verkehrsphänomene wie das Entstehen von Staus direkt behandelt werden, indem das Fahrverhalten oder die Auswirkungen von Geschwindigkeitsbeschränkungen berücksichtigt werden. Auch die Vorhersage von bestimmten Verkehrssituationen oder die Berechnung der aktuellen Verkehrslage zwischen weit lokalisierten Sensoren kann mit agenten-basierten Verkehrsflussmodellen dargestellt werden. Insbesondere bei der aktuellen Thematik der Feinstaubbelastung in Großstädten (ausgehend von Fahrzeugen) können agenten-basierte Verkehrsflussmodelle wichtige Erkenntnisse liefern. Da jedes Fahrzeug als Individuum behandelt wird, kann der individuelle Schadstoffausstoß berechnet werden – unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Daten zu einer heterogenen Fahrzeugpopulation (BAZZAN & KLÜGL 2013).

Dabei muss angemerkt werden, dass ein agenten-basiertes Modell nicht nur einer der drei Kategorien zugeordnet werden kann. Vielmehr zeigt sich, dass die bislang verwendeten Modelle zwei Arten an agenten-basierten Modellen im Verkehrs- und Transportwesen kombinieren. Als Beispiel hierfür kann das Modell MATSim genannt werden.

2.1.2 Agenten-basierte Modelle im Radverkehr

Die in Kapitel 2.1 eingangs erwähnten Definitionen der agenten-basierten Modelle von HECKBERT und SNIZEK bestätigen die Anwendbarkeit von ABMs im Radverkehr. Der Radverkehr kann als Teil des Verkehrssystem betrachtet werden, gleichzeitig ist er als Verkehrsträger eigenständig. Radfahrer interagieren während der Radfahrt mit den anderen Verkehrsteilnehmern, beispielsweise an Knotenpunkten. Das Verhalten der Radfahrer ist dynamisch, nicht jeder Radfahrer fährt durchgängig die gleiche Geschwindigkeit, er muss an Kreuzungen abbremsen und ggf. neu anfahren. Die unterschiedlichen Eigenschaften des Agenten „Radfahrer“ können verschiedene Fahrradtypen sein, die für eine Fahrt verwendet werden. So haben aber auch Radfahrer an sich unterschiedliche physiologische Eigenschaften, die eine Radfahrt beeinflussen. Darüber hinaus bewegen sich Radfahrer nicht nur in einem

Verkehrsraum, sondern auch in einem lokalen, geographischen Raum, der durch den Start- und Zielort charakterisiert ist.

Die agenten-basierte Modellierung im Radverkehr wurde bislang v.a. zur Simulation von Radverkehrsströmen auf lokaler, aber kaum auf regionaler Ebene eingesetzt (KAZIYEVA et al. 2018a). Doch agenten-basierte Modelle haben im Einsatz als Radverkehrsflussmodelle auch ihre Grenzen. Zum einen ist hier die Skalierbarkeit zu nennen, da der Umgang mit großen Verkehrsflussszenarien schwierig ist. Zum anderen gibt es aufgrund unzureichender Validierungsdaten nur begrenzte Möglichkeiten, das Radverkehrsmodell auf seine Glaubwürdigkeit zu testen. Eine weitere Herausforderung ist die Rechenleistung, da Radverkehrsmodelle umfangreiche räumliche Daten enthalten können (KAZIYEVA et al. 2018a). Generell kann festgehalten werden, dass sich agenten-basierte Modelle im Radverkehr eignen, da die Simulation eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung aufweist. Mit ABMs wird deutlich erkennbar, wo und wann die Radfahrer unterwegs sind und die Quantifizierung des Radverkehrs über einen längeren Zeitraum ohne einen großen Kostenaufwand möglich ist. Darüber hinaus können die Ergebnisse der Anwendung eines ABMs im Radverkehr das Erstellen von Radverkehrsnetzen und Radverkehrskonzepten vereinfachen. Außerdem kann die Interaktion von den Radfahrern – in Form von Agenten – mit ihrer Umwelt in einem ABM simuliert werden.

2.2 Übertragung von agenten-basierten Modellen

Die gängigste Definition des Begriffes der Übertragbarkeit eines Modells stammt von KOPPELMAN & WILMOT:

“First, we define transfer as the application of a model, information, or theory about behavior developed in one context to describe the corresponding behavior in another context. We further define transferability as the usefulness of the transferred model, information or theory in the new context.” KOPPELMAN & WILMOT (1982, S.18).

Aus der Definition gehen drei wesentliche Aspekte hervor: Zum einen die Anwendung eines Modells, zum anderen die Beschreibung des Verhaltens in einem anderen Kontext und zuletzt die Nützlichkeit des zu übertragenden Modells im neuen Kontext. KOPPELMAN & WILMOT (1982) spielen dabei auf die Differenzierung des Übertragbarkeitsbegriffes an. In der Literatur wird zwischen der räumlichen und zeitlichen Übertragbarkeit unterschieden. Die räumliche Übertragbarkeit behandelt die Anwendung von Modellen, die unter Verwendung von Daten aus einem Raumgebiet in ein anderes Raumgebiet entwickelt wurden. Bei der zeitlichen Übertragbarkeit wird die Anwendung von Modellen, die unter Verwendung von zu einem

Zeitpunkt erhobenen Daten entwickelt wurden, auf einen anderen Zeitpunkt bezogen. In der Regel erfolgen zeitliche Übertragungen im gleichen räumlichen Kontext, räumliche Übertragungen finden zum oder um den gleichen Zeitpunkt statt. In einigen Fällen wird ein Modell jedoch sowohl zeitlich als auch räumlich übertragen, so dass sich beide Kategorien nicht gegenseitig ausschließen (FOX & HEES 2010; FOX et al. 2014).

Bei einer räumlichen Übertragung zum gleichen Zeitpunkt hängt die Transferierbarkeit des Modells von der Relevanz der Parameter im Transferkontext ab, z.B. vom Grad der Ähnlichkeit der Empfindlichkeiten in Bezug auf Fahrzeit und -kosten, sowie von der Angemessenheit der alternativen spezifischen Konstanten ab. Es wird erwartet, dass die Modelle auf Gebiete mit ähnlichen Merkmalen übertragbar sind, wie z.B. Ähnlichkeiten bei den durchschnittlichen Fahrzeiten und -kosten, dem Grad der Zuverlässigkeit von öffentlichen Verkehrsmitteln, dem Klima und der Hanglage. Bei einer zeitlichen Übertragung in einem bestimmten Gebiet sind die Überlegungen unterschiedlich. Daher lautet die Schlüsselfrage: Bleiben die Parameter über die gesamte Zeit konstant? (FOX & HEES 2010; FOX et al. 2014)

Die zeitliche und die räumliche Übertragbarkeit sind also nicht dasselbe. Ein Modell kann innerhalb eines bestimmten Gebiets zeitlich übertragbar sein, aber eine Spezifikation enthalten, die sich nicht gut auf andere Gebiete übertragen lässt. Ein anderes Modell könnte eine detaillierte Spezifikation enthalten, die gut auf andere räumliche Bereiche übertragbar ist, sich aber im Laufe der Zeit nicht gut abbilden lässt (FOX & HEES 2010; FOX et al. 2014). Bei einer räumlichen Übertragung handelt es sich in der Regel um eine Übertragungstichprobe, d.h. um eine Stichprobe von im Übertragungskontext beobachteten Wahlmöglichkeiten, die die Entwicklung eines lokal geschätzten Modells für den Vergleich mit der Modellübertragung ermöglichen kann (FOX & HEES 2010). Die räumliche Übertragbarkeit von Verkehrsprognosemodellen ist von großem praktischem Interesse. Die Möglichkeit, Modelle von einer Region auf eine andere zu übertragen, kann zu erheblichen Kosten- und Zeiteinsparungen für Regionen beitragen, die sich keine Investitionen in umfangreiche Datenerhebungs- und Modellentwicklungsverfahren leisten können (PINJARI et al. 2013, NOWROUZIAN & SRINIVASAN 2012).

BEN-AKIVA (1981) und HANSEN (1981) stellen eine Hierarchie verschiedener Ebenen vor, auf der die Übertragbarkeit berücksichtigt werden muss:

- a) Die zugrunde liegende Theorie des Reiseverhaltens,
- b) Das mathematische Modell,
- c) Die empirische Modellspezifikation und
- d) Die Parameterwerte.

Die angeführte Hierarchie geht von einer allgemeinen und abstrakten Ebene in eine spezifischere Ebene über, die numerische Schätzungen der Parameter beinhaltet. Die erste Ebene umfasst die Übertragbarkeit breiter Verhaltenspostulate des Fahrverhaltens, wie beispielsweise die Nutzenmaximierung oder zufriedenstellende Entscheidungsparadigmen. Die zweite und dritte Ebene enthält Überlegungen zur spezifischen Modellstruktur (z.B. logische vs. wahrscheinliche, kombinierte vs. sequentielle Entscheidungsstrukturen), zur funktionalen Form (z.B. additive vs. nicht-additive Nutzformen, lineare vs. nicht-lineare Spezifikationen) und zur Festlegung der erklärenden Variablen und der Art und Weise, wie sie in das Modell aufgenommen werden. Die vierte Ebene berücksichtigt die Übertragbarkeit von Koeffizienten der erklärenden Variablen und anderer Parameter, wie z.B. Elastizitäten und Zeitmaßwerte (PINJARI et al. 2013).

Selbst für eine einzelne Region können Modelle nur bis zu einem zufriedenstellenden Leistungsniveau nach bestimmten statistischen und praktischen Kriterien entwickelt werden. Zudem sind solche Kriterien in der Praxis nicht klar bestimmt und von Region zu Region unterschiedlich. Außerdem ist die Lücke zwischen der Darstellung des menschlichen Mobilitätsverhaltens in einem Modell und der Realität von Region zu Region unterschiedlich. Daher ist es unrealistisch zu erwarten, dass die Modelle mit derselben Spezifikation und äquivalenten Parametern zwischen verschiedenen Regionen perfekt übertragbar sind. Da eine theoretisch perfekte räumliche Übertragbarkeit schwer zu erreichen ist, ist eine empirische Bewertung der Übertragbarkeit unerlässlich, um zu beurteilen, inwieweit die Modelle übertragbar sind. Die empirische Bewertung der Übertragbarkeit erfordert Daten und/oder Informationen aus mindestens zwei verschiedenen räumlichen Kontexten. Der Kontext, aus dem ein empirisches Modell übertragen wird, wird als Basiskontext oder Schätzkontext bezeichnet. Der Kontext, in den das Modell übertragen wird, wird als Anwendungskontext oder lokaler Kontext bezeichnet (PINJARI et al. 2013).

Die in der Literatur verwendeten Maße der Übertragbarkeit lassen sich in zwei große Kategorien einteilen. Als erste Kategorie sind statistische Tests der Hypothese der Übertragbarkeit von Parametern zu nennen. Viele dieser Tests beruhen auf der Verfügbarkeit einer Übertragungsstichprobe, die zur Entwicklung eines lokal geschätzten Modells verwendet wird; das übertragene Modell wird dann relativ zu diesem lokal geschätzten Modell bewertet. Die zweite Kategorie sind prädiktive Maße, d.h. Beurteilungen der Prognosefähigkeit eines Modells im Transferkontext. Diese können zur Beurteilung der Übertragbarkeit eines Modells verwendet werden, aber sie messen die Übertragbarkeit nicht unbedingt direkt und müssen daher mit Vorsicht interpretiert werden (FOX et al. 2014).

DALY (1985) identifizierte drei Bedingungen für die räumliche Übertragbarkeit: Zum einen ist die Relevanz zu nennen (Gibt das lokale Modell Aufschluss über das Mobilitätsverhalten im Transferbereich?), zum anderen die Gültigkeit (Ist das Transfermodell für den Anwendungskontext akzeptabel spezifiziert?) und die Eignung (Ist das zu übertragende Modell dazu geeignet, im Anwendungskontext angewandt zu werden?) (FOX & HEES 2010).

Der einfachste Ansatz zur Übertragung eines Modells ist die naive Übertragung, bei der die Modellspezifikation und Parameterschätzungen aus dem Basiskontext direkt ohne Änderung auf den Anwendungskontext angewandt werden können. Empirische Belege deuten darauf hin, dass naiv übertragene Modelle das Verhalten im Anwendungskontext möglicherweise nicht angemessen repräsentieren. Daher kann das Basiskontextmodell unter Verwendung der verfügbaren Informationen und Daten aus dem Anwendungskontext „aktualisiert“ werden, um das Verhalten im Anwendungskontext besser zu erfassen. Dabei gibt es verschiedene Aktualisierungsmethoden, die in der Literatur genannt werden: Das Aktualisieren alternativer, aber bestimmter Konstanten, die Übertragung der Skalierung/Transferskalierung, die Bayessche Aktualisierung/Bayes'sche Ansatz, die kombinierte Transferschätzung sowie die gemeinsame Kontextbewertung (PINJARI et al. 2013, NOWROUZIAN & SRINIVASAN 2012). MCCOOMB (1986) und GUNN et al. (1985) befassten sich mit dem naiven Transfer, KOPPELMAN et al. 1985 und SANTOSO & TSUNOKAWA (2005) mit der Aktualisierung der Methode der alternativen Konstanten, BEN-AKIVA & BOLDUC (1987) mit der kombinierten Transferschätzung, ABDELWAHAB (1991) mit dem Bayes'schen Ansatz, BADOE & MILLER (1995), KARASMAA & PURSULA (1997), KARASMAA (2007) mit der Transferskalierung und den gemeinsamen Kontextschätzansatz.

3 Agenten-basierte Radverkehrsmodelle - Vorstellung des Salzburger Radverkehrsmodells

Das Salzburger Radverkehrsmodell wurde von Gudrun Wallentin und Martin Loidl entwickelt sowie 2015 publiziert. Es zielte darauf ab, herauszufinden, welche Rolle dem Stadtrand für den innerstädtischen Radverkehr zugeordnet werden kann. Mit dem Salzburger Radverkehrsmodell sind zwei Ziele verbunden: Zum einen soll die raum-zeitliche Verteilung der Radfahrer in der Stadt Salzburg an einem Wochentag im späten Frühjahr simuliert werden. Zum anderen soll sich die räumliche Verteilung der Radverkehrsdichte über das Straßennetz aus dem Verhalten der einzelnen Radfahrer ergeben (WALLENTIN & LOIDL 2015). In der vorliegenden Masterthesis dient das Modell als Grundlage für das Tübinger Radverkehrsmodell, daher wird es im folgenden Kapitel ausführlicher beleuchtet.

Das Salzburger Radverkehrsmodell in seinem Ursprung ist in die Modellierungsplattform NetLogo implementiert (WILENSKY 1999). Da die Veröffentlichung des Modells 2015 war, wird eine NetLogo Version 5.0.5 oder früher verwendet worden sein (NETLOGO 2020). Die weitere Entwicklung des Modells erfolgte in GAMA mit der Version 1.8.1 und früher (KAZIYEVA et al. 2018b). Bei GAMA handelt es sich um eine ABM-Plattform, die zur Simulation von Modellen in einer geographischen Umgebung entwickelt wurde (TAILLANDIER et al. 2012). Diese Modellierungsplattform eignet sich insbesondere für Verkehrsmodellierungen in einem geographischen Kontext (KAZIYEVA et al. 2018b). Des Weiteren ist sie auf den gängigsten Betriebssystemen Windows, Mac OS und Ubuntu verfügbar (TAILLANDIER et al. 2019). Die verbesserte Rechenleistung der Plattform ermöglicht die Simulation großer und komplexer Systeme, wie z. B. eines regionalen Verkehrssystems (KAZIYEVA et al. 2021b).

Grundlage der Modellierungsplattform ist die Sprache GAML (GAMA Modeling Language; GAMA Modellierungssprache). Bei GAML handelt es sich um eine agentenorientierte Sprache, die sich der Definition von agenten-basierten Simulationen widmet. Sie hat ihren Ursprung in objektorientierten Sprachen wie Java oder Smalltalk, erweitert aber den objektorientierten Programmieransatz um leistungsfähige Konzepte wie Skills, deklarative Definitionen oder Agentenmigration, um eine bessere Ausdrucksfähigkeit in Modellen zu ermöglichen. GAML orientiert sich sehr nah an anderen agenten-basierten Modellierungssprachen wie beispielsweise NetLogo. Das agenten-basierte Paradigma wird durch die Programmiersprache erweitert. Dazu werden die Grenzen zwischen der Domäne eines Modells und den experimentellen Prozessen, die seine Simulationen umgeben, aufgehoben. Die Domäne eines

Modells wird in ABM durch Agenten repräsentiert, die experimentellen Prozesse werden normalerweise nicht durch Agenten dargestellt (GAMA PLATFORM 2021).

Im Salzburger Radverkehrsmodell werden die grundlegenden Prinzipien der Verkehrsmodellierung berücksichtigt: Es berechnet die Start- und Zielorte sowie die Verkehrsmittel- und Routenwahl (KAZIYEVA et al. 2021a). Mit dem Basismodell können verschiedene Hypothesen über den Radverkehr generiert und getestet werden. Dazu zählen die Faktoren des Radverkehrs und deren Auswirkungen auf das Verkehrsmanagement, die Routenpräferenzen und die Auswirkungen der Radverkehrsinfrastruktur sowie die Identifizierung von unfallgefährdeten Orten (WALLENTIN & LOIDL 2015). Der Grundgedanke besteht also darin, die Verteilung der Radverkehrsströme auf regionaler Ebene darzustellen. Das Verkehrsmuster der Radverkehrsströme ergibt sich aus der Verkehrsnachfrage und der menschlichen Entscheidungsfindung innerhalb eines bestehenden Verkehrssystems. Die räumliche Auflösung der Radverkehrsströme ist eine Netzverbindung (KAZIYEVA et al. 2021a). Das Modell basiert auf den Entitäten, auf die im Folgenden näher eingegangen wird: Personen, Einrichtungen, Straßen, Kreuzungen und Zählstationen (KAZIYEVA et al. 2021a). Im Modell werden Radfahrer durch Agenten repräsentiert, die sich auf dem Straßennetz der Stadt Salzburg bewegen. Jedes Individuum wählt seine Aktivitäten, Verkehrsmittel und Routen basierend auf demographischen Daten, Mobilitätsdaten und Annahmen, die auf Umfragewerten über das Radverkehrsverhalten beruhen (KAZIYEVA et al. 2018b). Die Altersspanne der Radfahrer liegt zwischen 6 und 100 Jahren. Hinsichtlich des Arbeitsverhältnisses wird in Erwerbstätige, Erwerbslose, Studenten, Schüler, Pensionäre und inaktive Personen differenziert (KAZIYEVA et al. 2021b). Die Heterogenität der Personen wird durch demographische Merkmale dargestellt. Während des gesamten Simulationslaufes speichern die Personen Informationen über ihre Routen und Aktivitäten (KAZIYEVA et al. 2021a). Zu Beginn eines Tages hat der Radfahrer eine leere Fahrtenliste. Sobald er das Fahrrad nutzt, werden ihm mindestens zwei Fahrten zugeordnet: Er fährt von seinem Wohnort zum jeweiligen Ziel (Fahrt 1) und wieder zurück (Fahrt 2). Die beiden Ziele können allerdings durch beliebig viele Zwischenziele (z.B. durch den Besuch einer Freizeiteinrichtung oder eines Supermarktes) ergänzt werden. Maximal können acht Fahrten pro Tag zugewiesen werden (KAZIYEVA et al. 2021b).

Da nicht auszuschließen ist, dass Radfahrer in einer Gruppe fahren (beispielsweise als Familienradtour oder wenn Studenten einer Wohngemeinschaft zur Universität radeln), werden die einzelnen Personen je nach Alter und Beschäftigungsstatus dargestellt. Fallen sie dennoch in dieselben demographischen Gruppen, so weisen sie auch ähnliche Verhaltensmerkmale auf. Jedoch agieren sie trotz ihrer Gemeinsamkeiten als Einzelpersonen und nicht als Gruppe

(KAZIYEVA et al. 2021a). Individuelle Präferenzen und Variationen in der Wahrnehmung bzw. im Standortbewusstsein hinsichtlich der Routensicherheit werden durch eine stochastische Variation der Routengewichte berücksichtigt (WALLENTIN & LOIDL 2015).

Zusammen mit den Straßen stellen Einrichtungen die gebaute Umgebung dar, die die Bewegungen von Personen einschränkt und die Bereiche der Aufmerksamkeit definiert. Die als Einrichtungen dargestellten Entitäten werden durch ihren Typ (z.B. Freizeit, Behörden, Schulen und Kindergärten) charakterisiert. Straßen werden durch die Anzahl der durchfahrenen Radfahrer, den Beschränkungsgrad, den Sicherheitsindex und die Gewichtsattribute bestimmt. Für den Radverkehr gibt es eingeschränkte, teilweise eingeschränkte und nicht eingeschränkte Straßen. Die Straßen werden für das Routing gewichtet. Die Gewichte können je nach Art der Streckenführung Umfänge oder Sicherheitsindizes darstellen, z. B. kürzester bzw. sicherster Weg (KAZIYEVA et al. 2021b). Die Gewichtungen umfassen beispielsweise die Infrastruktur, den Belag oder die Steigung. Sie können im Modell in Abhängigkeit des Fokus individuell vom Anwender festgelegt werden. Eine Grundeinstellung ist jedoch konfiguriert. Sollte der Schwerpunkt der Untersuchung beispielsweise darauf liegen, welchen Weg Radfahrer wählen, wenn die Steigung besonders hoch ist, so wird der Parameter *gradient* entsprechend erhöht. Die Attribute der Gewichte liegen in den Vektordaten *network*. Über den Modellcode werden die Werte in der Simulationsphase aufgerufen und bei der Routenwahl berücksichtigt. Straßenkreuzungen werden ebenfalls modelliert, um die gewählten Routen von Personen als zusätzliche Fahrtinformationen zu charakterisieren (KAZIYEVA et al. 2021b). Die Zählstationen speichern Informationen über die vorbeifahrenden Radfahrer (KAZIYEVA et al. 2021a).

Der zeitliche Umfang der Simulation umfasst einen Wochentag von Mitternacht des einen bis Mitternacht des anderen Tages mit einer Auflösung von einer Minute. Die räumliche Ausdehnung des Modells bezieht sich auf die Großregion der Stadt Salzburg mit ca. 180 000 Einwohnern. Das Modell ist für eine mittelgroße Stadt und die angrenzenden Gemeinden ausgelegt, die zur Überwindung des Randeffektes mit einbezogen wurden (KAZIYEVA et al. 2021a). Die Durchführung verschiedener Szenarien von Infrastruktureingriffen ermöglicht einen Blick auf mögliche Veränderungen in der räumlichen Verteilung der Radverkehrsströme (KAZIYEVA et al. 2018b).

Das erste Modell verwendete Daten von drei Radverkehrszählanlagen. Im Zuge einer kontinuierlichen Weiterentwicklung des Radverkehrsmodells werden in der aktuellen Version Daten von neun Radverkehrszählstationen verwendet (KAZIYEVA et al. 2021b). Mit diesen Daten werden die Simulationsergebnisse aus dem Modell überprüft (WALLENTIN & LOIDL 2015; KAZIYEVA et al. 2021a). Der Tag, der für die Validierung verwendet wurde, wird mit

dem Zufallsprinzip anhand von vier Kriterien ausgewählt: (1) der Validierungstag liegt in der warmen Jahreszeit, in der die meisten Radfahrer erwartet werden, (2) er vermeidet die vorlesungsfreie Zeit der Universitäten vom 01. Juli bis zum 30. September, um die Anzahl der Studenten angemessen zu repräsentieren, (3) jede der drei Zählstationen arbeitet korrekt, (4) das Wetter war für das Radfahren geeignet. Die Zählung der Radfahrer an drei Stationen im Stadtzentrum dient als Zustandsvariable, um die Verteilung der Radfahrer über Raum und Zeit zu quantifizieren und zu validieren. Die Zählzeiten haben eine zeitliche Auflösung von 15 Minuten. Am Ende eines Simulationslaufs werden die Simulationsergebnisse für jeden Straßenabschnitt über den gesamten Tag weiter angehäuft (WALLENTIN & LOIDL 2015). Das Modell basiert auf einem Initialisierungs- und Simulationsteil (siehe Abbildung 1).

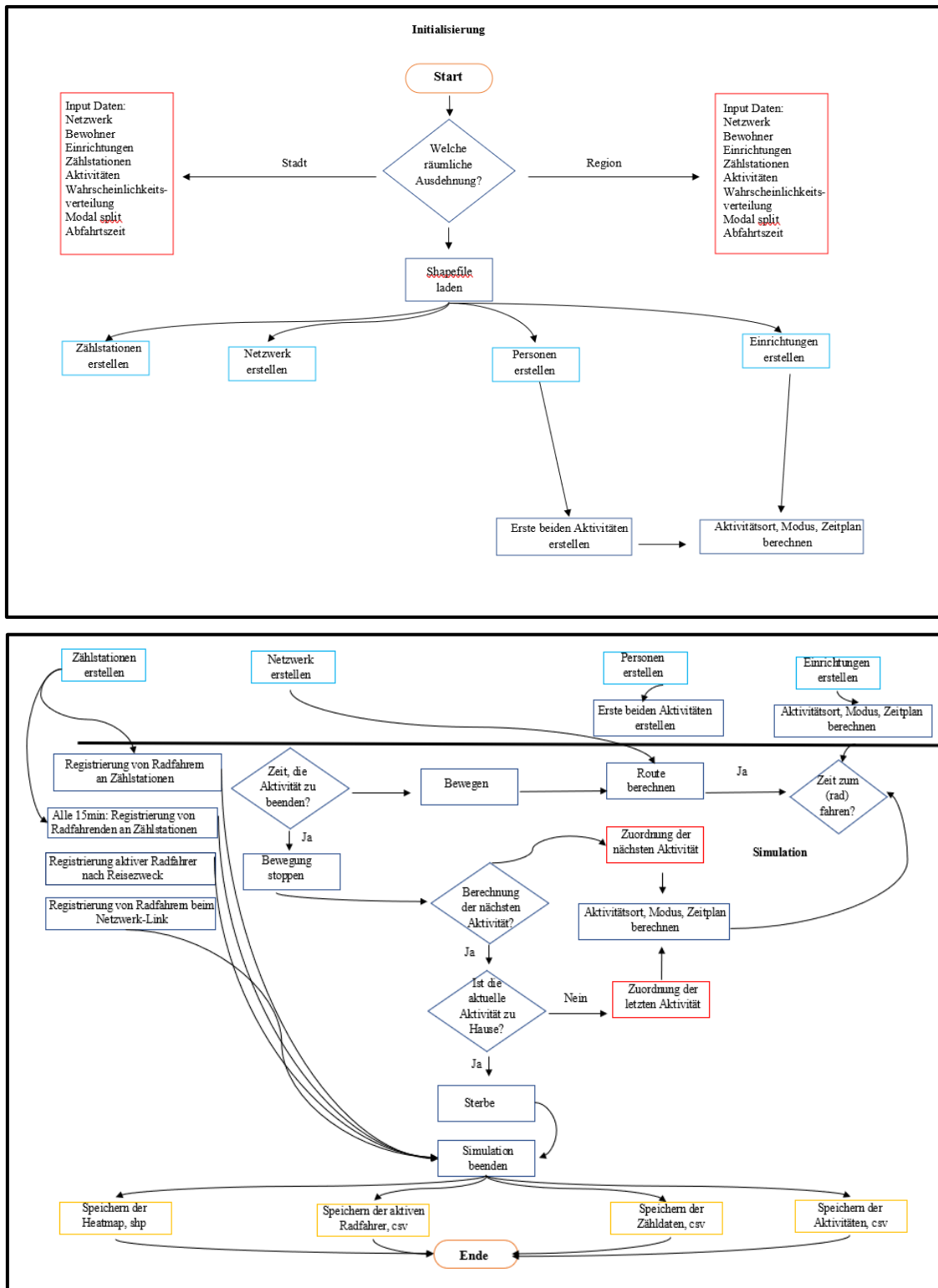


Abbildung 1: Flussdiagramm des Salzburger Radverkehrsmodells (KAZIYEVA et al. 2018b)

Bei der Initialisierung werden die Personen und die gebaute Umgebung erstellt. Die räumliche Verteilung der Personen nach Alter, Geschlecht und Beschäftigungsstatus wird aus realen Schätzungen in den Einwohnerdaten berechnet. Weist z.B. eine Gitterzelle eine registrierte Anzahl von weiblichen Bewohnern im Alter zwischen 20 und 24 Jahren auf, so erstellt das Modell diese Anzahl von weiblichen Personen und ordnet das Alter zufällig innerhalb dieses

Bereichs zu. Nach der Netzbewertung wird ein routingfähiger Netzgraph berechnet. Das Modell erfordert ein topologisch korrektes Netz an Verbindungen für die Routing-Operationen. So verbinden sich die simulierten Straßen zu einem zusammenhängenden bidirektionalen Netz mit Einbahnstraßen, Zwei-Richtungsstraßen und Einschränkungen, wie z.B. private Wege oder Treppenstufen. Die Zählstationen und Netzknotenpunkte (Kreuzungen) werden ebenfalls direkt aus den Vektordaten ohne zusätzliche Berechnungen initialisiert (KAZIYEVA et al. 2021b). Außerdem wählen die erstellten Personen ihre Anfangsaktivitäten aus. Während des Simulationsteils werden den Personen wiederholend Aktivitäten und Fahrten zugewiesen. Am Ende einer jeden Aktivität werden die Werte der Fahrtattribute einer Person in die Ausgabedatei *trips* geschrieben. Die Personen werden an den Radverkehrszählstationen und im Routingnetz registriert. Die Informationen über die Anzahl der vorbeifahrenden Radfahrer an den Zählstationen werden in jedes Zeitintervall exportiert (KAZIYEVA et al. 2021a; KAZIYEVA et al. 2021b). Die resultierende Heatmap stellt den Radverkehr über einen simulierten Tag in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung dar (siehe Abbildung 2; KAZIYEVA et al. 2018b).

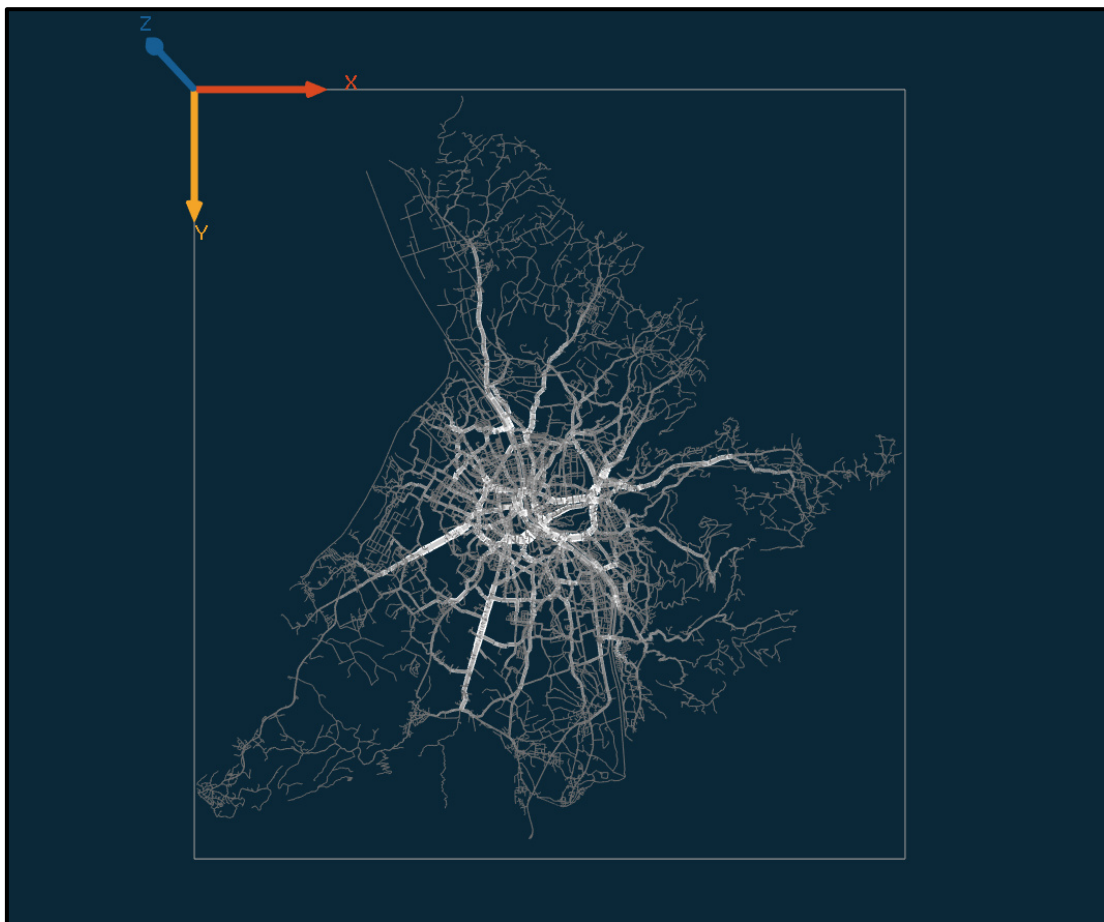


Abbildung 2: Heatmap des Radverkehrs in der Stadt Salzburg, simuliert mit dem Salzburger Radverkehrsmodell (KAZIYEVA et al. 2021a)

Die Heatmap wird im Simulationsteil erstellt und in der Ausgabedatei als Vektordatei gespeichert. Generell gibt es im Modell zwei Arten an Ausgabedaten. Erstens sind dynamisch generierte, tatsächliche Simulationsdaten zu nennen, die auf den Displays der GAMA-Plattform zu Verifikationszwecken visualisiert werden. Diese Diagramme stellen die aktuell radfahrenden Personen nach dem Fahrtzweck, die Anzahl der vorbeifahrenden Radfahrer an den Radverkehrszählstationen und die Gesamtzahl der aktiven Radfahrer dar. Zweitens werden die Simulationsdaten zu Validierungszwecken in Ausgabedateien exportiert. Neben der bereits thematisierten Heatmap werden die aktuell radfahrenden Personen nach ihrem Fahrtzweck, die Informationen über die berechneten Fahrten und Aktivitäten sowie die Anzahl der Radfahrer an den Zählstationen ermittelt (KAZIYEVA et al. 2021a).

Teil des Simulationsteils sind verschiedene Submodelle wie die Wahl des Aktivitätstyps, der Startzeit und der Dauer, des Modus, der Distanz und der Durchschnittsgeschwindigkeit, der Routenwahl sowie dem Start der (radfahr-) Bewegung. Mit der Wahl des Aktivitätstyps ist die Wahrscheinlichkeit gemeint, die eine Person eine Aktivität auswählt. Dabei kann sie zwischen folgenden Optionen wählen: zu Hause bleiben, arbeiten, einkaufen, Freizeitaktivitäten, berufliche Aktivitäten, Behördengänge, Arztbesuche, die Begleitung von anderen Personen und der Aufenthalt an sonstigen Orten. Die Wahrscheinlichkeiten dieser Optionen sind für jedes Individuum unterschiedlich; zum einen, weil sie in Abhängigkeit von der Position der Aktivität in einer Aktivitätskette variieren, zum anderen schränkt der Erwerbsstatus eines Individuums die Aktivitätsoptionen ein (KAZIYEVA et al. 2021b).

Die temporäre Verteilung der Fahrten erfolgt durch eine zufällige Modellierung. Die Startzeiten der Hin- und Rückfahrt werden von jedem Radfahrer nach dem Zufallsprinzip ausgewählt und folgen der Normalverteilung. Die Arbeitsradfahrer starten morgens gegen 7 Uhr ihren Weg zur Arbeit und kehren nach ca. acht Stunden Arbeit zu ihrem Wohnort zurück. Die Studenten fahren um 11.30 Uhr zur Universität und nach ca. drei Stunden wieder zurück. Fahrten zu den Freizeitaktivitäten werden so geplant, dass sie entweder um 14 Uhr mit einer großen Standardabweichung von vier Stunden oder um 19 Uhr beginnen (WALLENTIN & LOIDL 2015). Wenn eine Person keine Art, Abfahrts- oder Ankunftszeit der nächsten Aktivität auswählt, fährt sie zu ihrem Startort. Falls eine Person bereits zu Hause ist, wird sie aus der Simulation entfernt (KAZIYEVA et al. 2021a). Im Falle der Berufstätigkeit variiert die Dauer je nach Geschlecht. Außerdem bleiben die Schüler je nach Alter in der Schule (KAZIYEVA et al. 2021b).

Bei der Wahl des Modus kann eine Person aus sechs verschiedenen Modi wählen. Dazu zählen zu Fuß, mit dem Fahrrad, mit dem Auto, als Mitfahrer mit dem Auto, mit öffentlichen Verkehrsmitteln und andere Transportmittel. Es wird angenommen, dass eine Person nur zu

Hause ihr Verkehrsmittel ändern kann. Je nach räumlichem Bereich (Kernstadt oder Stadtregion) ist die Wahrscheinlichkeit für einen (Aktivitäts-) Modus unterschiedlich (KAZIYEVA et al. 2021b).

Die oben genannten Aktivitätsmodi basieren auf unterschiedlichen Streckenlängen und Durchschnittsgeschwindigkeiten. Es wird angenommen, dass ein Fußweg nicht länger als 5km ist (KAZIYEVA et al. 2021b). Die Durchschnittsgeschwindigkeit der Radfahrer beträgt unabhängig vom Typ 20 km/h (WALLENTIN & LOIDL 2015). Eine Radfahrt ist zudem nicht länger als 8km. Die ferner genannten Aktivitätsmodi sind nicht an Distanzen gebunden. Je nach Aktivitätsmodus wird auch eine unterschiedliche Durchschnittsgeschwindigkeit des Verkehrsträgers angenommen: Die Gehgeschwindigkeit liegt im Bereich von 0,7-2,0 m/s, die Fahrradgeschwindigkeit wird mit 1,6-5,5 m/s angegeben. Auto, Mitfahrer in einem Auto und öffentliche Verkehrsmittel fahren alle mit 4,9-14,9 m/s. Andere undefinierte Transporte haben eine Geschwindigkeit von 2,4-13,6 m/s (KAZIYEVA et al. 2021b).

Die Route wird bei jedem Simulationsschritt berechnet, wenn sich Radfahrer auf ein Ziel zu bewegen. Radfahrer bevorzugen dabei die sicherste gegenüber der kürzesten Route. Die sicherste Route basiert auf einem zuvor berechneten Sicherheitsindex. Beide Typisierungen können aber im Modell simuliert werden. Der Anwender kann wählen, in welchem der beiden Modi das Experiment durchgeführt wird. Im Modus *shortest path* werden dennoch Informationen zum Safety Index abgespeichert. Dies ist möglich, wenn die kürzeste Route auch die sicherste Route ist (WALLENTIN & LOIDL 2015; KAZIYEVA et al. 2021a). Die sichersten Routen werden mit dem Dijkstra Algorithmus und dem Sicherheitsindex als Widerstand berechnet. Für die kürzesten Routen verwendet derselbe Algorithmus die Entfernung als Widerstand. Radfahrer, deren Routen sich mit einem Stadtgebiet überschneiden, fahren zu berechneten Abfahrtszeiten entlang eines Netzwerks in Richtung Ziel (KAZIYEVA et al. 2021b).

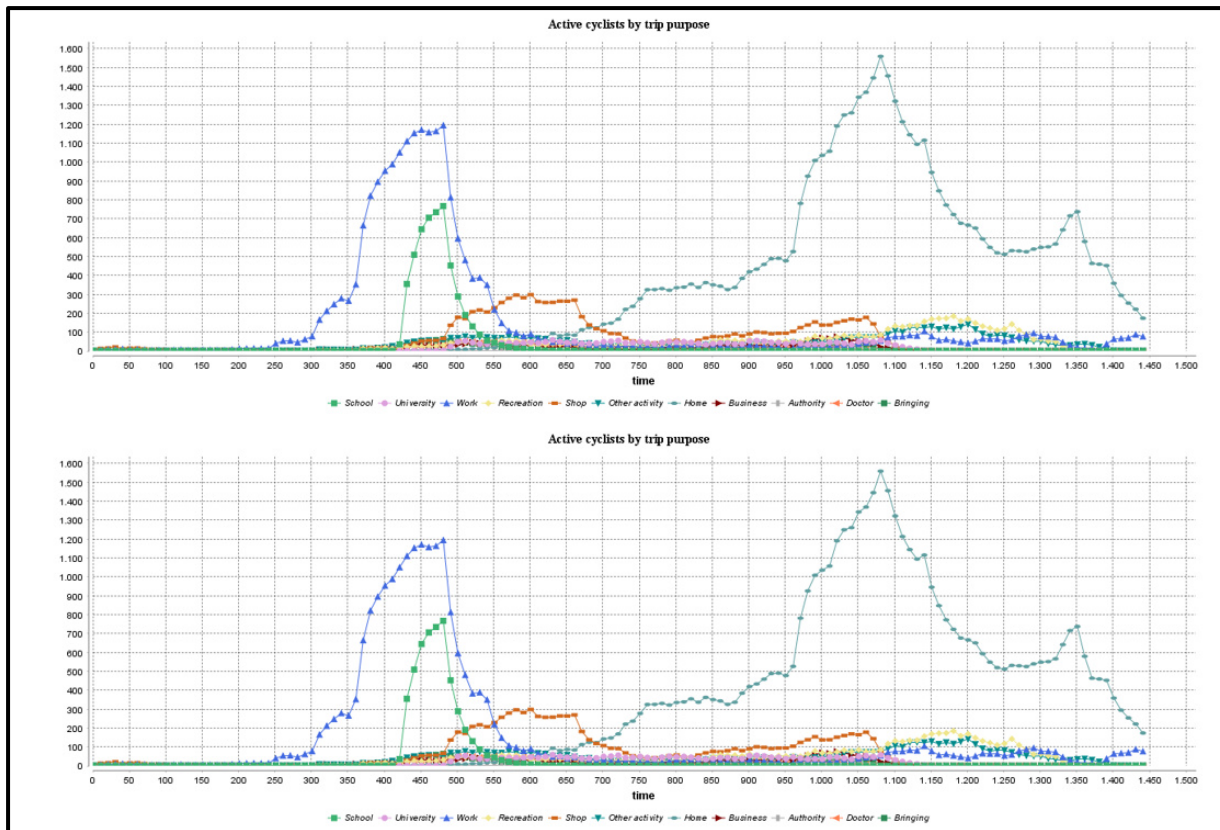


Abbildung 3: Aktive Radfahrer in der Stadt Salzburg nach dem Fahrzweck im Modus kürzeste Route (oben) oder sicherste Route (unten), simuliert mit dem Salzburger Radverkehrsmodell (KAZIYEVA et al. 2021a)

Abbildung 3 zeigt die Visualisierung der aktiven Radfahrer im Tagesverlauf nach dem Fahrzweck im Modus kürzeste oder sicherste Route. Dabei sind offensichtlich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Modi erkennbar. Zwischen 05:00 und ca. 08:30 Uhr fahren die meisten Radfahrer in beiden Modi zur Arbeit, gefolgt von der Schule. Gegen Abend (ca. 15:00-20:00 Uhr) radeln die Personen nach Hause (trip purpose *home*). Der erneute Anstieg bei ca. 22:00 Uhr kann damit begründet werden, dass die Radfahrer nach Feierabend einer Freizeitaktivität nachgehen und erst später ihr Zuhause erreichen.

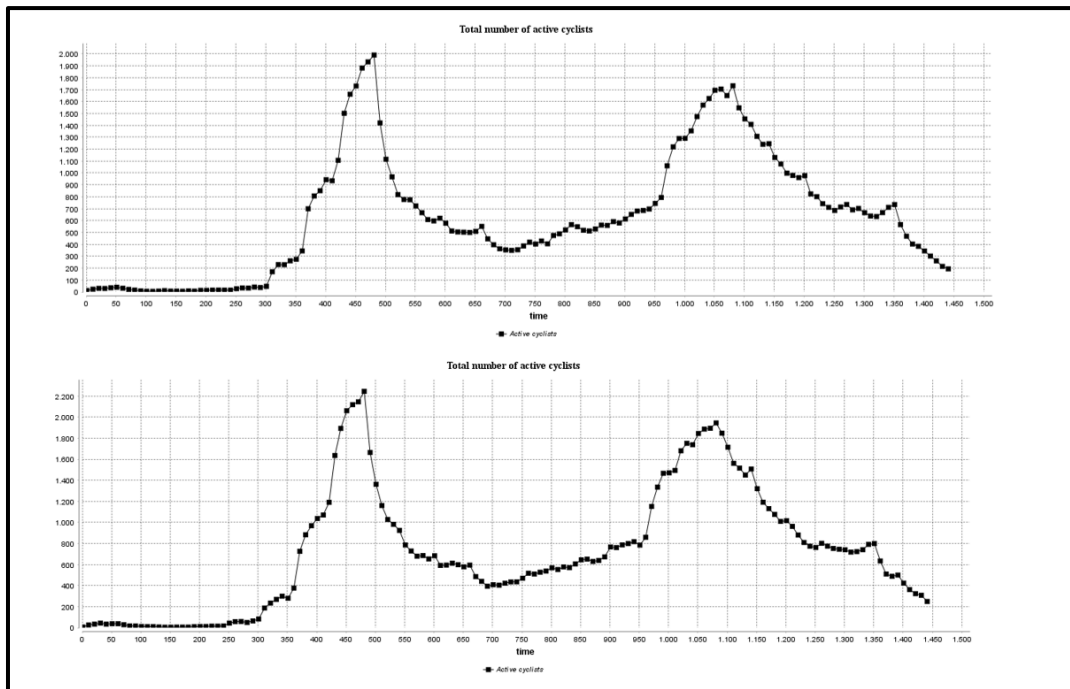


Abbildung 4: Gesamte Anzahl der Radfahrer im Modus kürzeste Route (oben) oder sicherste Route (unten) in der Stadt Salzburg, simuliert mit dem Salzburger Radverkehrsmodell (KAZIYEVA et al. 2021a)

Kleinere Unterschiede zwischen den beiden Modi *kürzeste Route* und *sicherste Route* sind in Abbildung 4 erkennbar. Um ca. 08:30 Uhr wurden im Modus *kürzeste Route* ca. 2.000 Radfahrer ermittelt, um die gleiche Uhrzeit waren es im Modus *sicherste Route* ca. 2.200. Deutlich sind auch die beiden Spitzen im Tagesverlauf. So werden um 08:30 Uhr in einem ersten Peak die meisten Radfahrer gezählt, es folgen in einem zweiten Peak um ca. 19:00 Uhr knapp unter 2.000 quantifizierte Radfahrer. Daraus kann gefolgert werden, dass Pendlerströme das Modell stark beeinflussen, Berufstätige, Schüler und Studenten gegen 08:30 Uhr das Haus verlassen und gegen 19:00 Uhr von der Arbeit oder Freizeitaktivitäten zurückkehren.



Abbildung 5: Gezählte Radfahrer in der Stadt Salzburg an den neun Zählstationen im Modus sicherste Route, simuliert mit dem Salzburger Radverkehrsmodell (KAZIYEVA et al. 2021a)

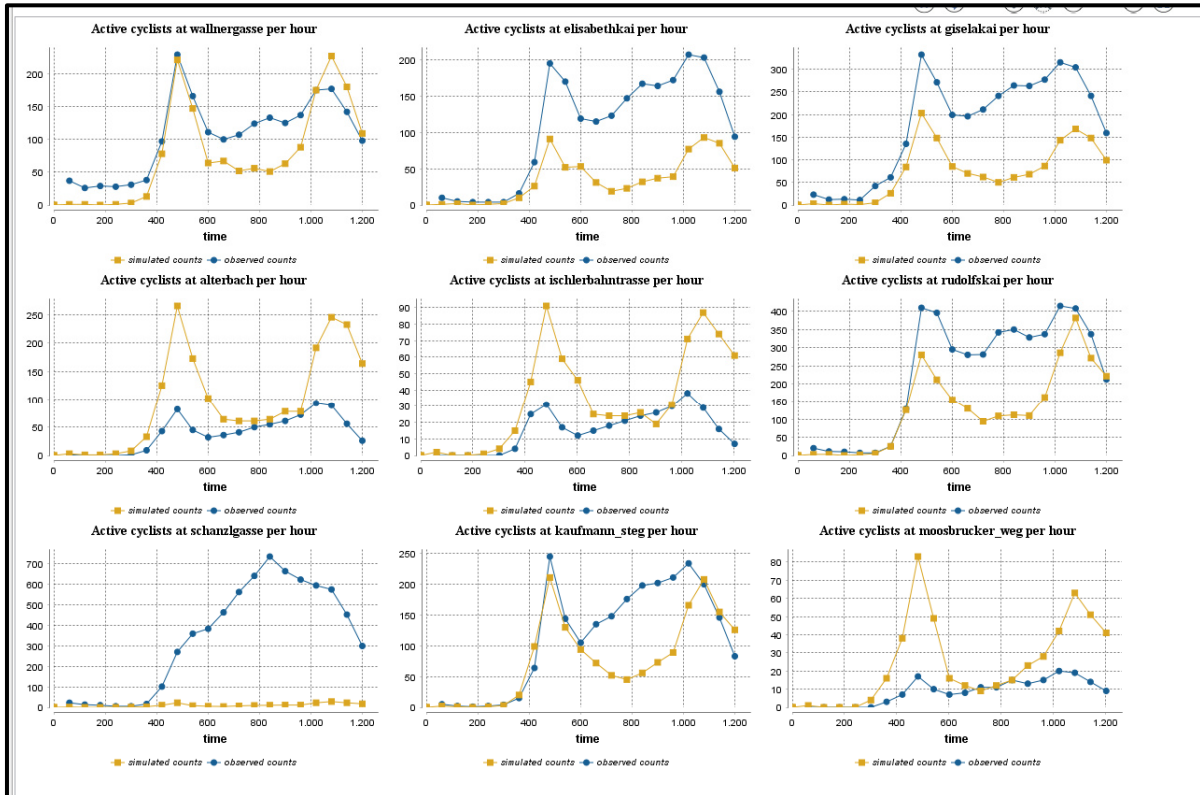


Abbildung 6: Gezählte Radfahrer an den neun Zählstationen im Modus kürzeste Route in der Stadt Salzburg, simuliert mit dem Salzburger Radverkehrsmodell (KAZIYEVA et al. 2021a)

Auch beim Vergleich der gezählten Radfahrer an den neun Zählstationen im Modus *kürzeste Route* oder *sicherste Route* sind keine offensichtlichen Unterschiede erkennbar (siehe Abbildung 5 und 6). Bei beiden Modi befindet sich die Radverkehrszählstation mit den meisten Radfahrern pro Zeitabschnitt an der Schanzlgasse, wohingegen an der Zählstelle am Moosbrucker Weg am wenigsten Radfahrer unterwegs sind. Die Schanzlgasse liegt direkt in der Innenstadt Salzburgs, unweit der Salzach. Dort sind vermutlich viele Tagestouristen, Besucher der historischen Altstadt und Radfahrer unterwegs, die in der Innenstadt Erledigungen machen möchten. Dies erklärt auch den steilen Anstieg der beobachteten Werte bis ca. 13:00 Uhr. Danach nehmen die beobachteten Zahlen an dieser Stelle ab. Zudem kann angenommen werden, dass die Radverkehrszählstation an der Schanzlgasse sowohl an der kürzesten als auch an der sichersten Route liegt. Der Josef-Moosbrucker-Weg befindet sich im Stadtteil Leopoldskron außerhalb der Innenstadt. Es kann vermutet werden, dass an dieser Zählstelle Pendler unterwegs sind, was sich auch durch die beiden Peaks zwischen 07:00 und 09:00 Uhr sowie zwischen 16:00 und 19:00 Uhr belegen lässt. Bei den Radverkehrszählstellen an der Wallnergasse, dem Rudolfskai und dem Kaufmannsteg lassen sich die geringsten Abweichungen zwischen beobachteten und simulierten Werten feststellen; die größten Abweichungen zwischen den simulierten und beobachteten Werten liegen an der Schanzlgasse und dem Moosbrucker Weg.

Die geringste Abweichung in den Daten der beiden Modi *safest path* und *shortest path* können an der Wallnergasse in der Salzburger Innenstadt und am Giselakai festgestellt werden, die höchste Abweichung kann an der Radverkehrszählstelle Schanzlgasse beobachtet werden.

Die oben vorgestellten Darstellungen (Heatmap, Radfahrer nach Fahrzweck, gesamt ermittelte Radfahrer und gezählte Radfahrer an den Zählstationen) werden zusätzlich zur Visualisierung in der GAMA-Plattform in CSV (comma separated values; kommagetrennte Werte) -Dateien gespeichert (KAZIYEVA et al. 2021a).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Salzburger Radverkehrsmodell folgende Charakteristika umfasst, die bei einer Übertragung berücksichtigt werden sollten: Zum einen sind die Vektordaten zu nennen, die die entsprechenden Attribute aufweisen. Zum anderen werden Daten von Radverkehrszählstationen benötigt, die wenn möglich minütlich, mindestens jedoch stündlich erhoben werden. Darüber hinaus ist das Modell spezifisch auf die maximale Flächengröße der Stadt Salzburg ausgelegt und ist nicht auf Städte mit mehr als 180 000 Einwohnern übertragbar.

WALLENTIN & LOIDL (2015) fanden heraus, dass Pendler, die in die Stadt einpendeln, die räumliche Verteilung der Verkehrsströme in der Stadt stark beeinflussen. Parallel erwies sich

der agenten-basierte Modellierungsansatz als nützliche Alternative zu konventionellen Methoden der Verkehrsmodellierung, da v.a. die intuitive Parametrisierung eine explorative Systemanalyse ermöglicht (WALLENTIN & LOIDL 2015). Außerdem ergab die Visualisierung des Salzburger Radverkehrs Muster, die mit den Daten der Fahrtenzählung einigermaßen übereinstimmten.

Aus offensichtlichen Gründen kann kein Simulationsmodell genauer sein als die Daten, die zu seiner Validierung verwendet wurden (WALLENTIN & CAR 2013). Die räumliche Verteilung der Radverkehrszählstellen konzentrierte sich 2015 stark auf die zentralen Stadtteile. Validierungsdaten liefern daher kein repräsentatives Bild der Nutzung des Fahrradrouthenetzes in der Stadt. Das Modell kann allerdings dazu beitragen, relevante Standorte für zukünftige und weitere Zählstationen zu identifizieren, mit dem Ziel, weitere und nützliche Validierungsdaten zu sammeln (WALLENTIN & LOIDL 2015). Mittels der Ergebnisse aus dem Modell von 2015 konnten weitere Standorte für Radverkehrszählstationen identifiziert und mit Radbarometern ausgestattet werden. Diese ergänzenden Zählstationen finden sich in der aktuellen Version des Salzburger Radverkehrsmodell wieder (KAZIYEVA et al 2021b).

4 Übertragung des Salzburger Radverkehrsmodells auf die Stadt Tübingen

Da, wie in den vorherigen Kapiteln bereits erwähnt, bislang noch keine räumliche Übertragung des Salzburger Radverkehrsmodells stattgefunden hat, soll dies in der vorliegenden Masterthesis nun durchgeführt werden. Vorab wurden die von DALY (1985) genannten Bedingungen zur Übertragung eines Modells am Beispiel der Stadt Tübingen geprüft. Es ist davon auszugehen, dass das lokale Modell einen Aufschluss über das Mobilitätsverhalten im Transferbereich liefert. Diese Aussage kann damit begründet werden, dass bislang noch kein (agenten-basiertes) Radverkehrsmodell für die Stadt Tübingen erstellt und publiziert wurde. Wie bereits in Kapitel 1 thematisiert, gibt es im Gegensatz zum motorisierten Individualverkehr (MIV) kaum Daten und belegbare Aussagen darüber, wo sich Radfahrer wann in einem definierten Raum bewegen. Die Fahrradfahrer rücken mit dem Tübinger Radverkehrsmodell in den Vordergrund, woraus sich aus den Ergebnissen weitere Empfehlungen und Aussagen für alle Verkehrsteilnehmer ableiten lassen.

Die zweite Bedingung DALYS (1985) befasst sich mit der Spezifikation des Transfermodells. Der Modellcode wurde auf der Wissenschaftssprache Englisch geschrieben und kommentiert. Er ist schlüssig, nachvollziehbar und verständlich. Damit lässt sich begründen, dass das Salzburger Radverkehrsmodell ausreichend beschrieben und definiert ist. Dennoch sollte bei der Übertragung ein grundlegendes Verständnis der räumlichen Simulation sowie von agenten-basierten Modellen vorhanden sein. Das Salzburger Radverkehrsmodell ist online verfügbar, kann von jedermann heruntergeladen und installiert werden. Darüber hinaus enthält das beigefügte ODD-Protokoll (Overview, Design concepts, Details; Übersicht, Designkonzepte, Details) weitere Informationen über die definierten Variablen, den Ablauf des Modells sowie das zu Grunde gelegte Konzept des Modells und welche Submodelle enthalten sind.

Die Eignung im Anwendungskontext – die dritte Bedingung für die räumliche Übertragung eines Modells – kann damit begründet werden, dass das Salzburger Radverkehrsmodell für Städte bis ca. 180 000 Einwohner entwickelt wurde. Tübingen weist eine Einwohnerzahl von ca. 90 000 auf, zudem ist die Stadt flächenmäßig kleiner als die Stadt aus dem Schätzkontext. Tübingen kann ebenso wie Salzburg in eine Kernstadt sowie ländliche geprägte Ortsteile gegliedert werden. Auch lässt sich die Topographie der beiden Städte miteinander vergleichen, genauso handelt es sich jeweils um Universitätsstandorte. Für alle benötigten Vektordaten konnten die entsprechenden Daten zur Verfügung gestellt und aufbereitet werden, wenngleich sich die Datenqualität ggf. unterscheidet.

4.1 Vorstellung der Stadt Tübingen

Tübingen liegt am Neckar, im Süden des Verdichtungsraumes Stuttgart. Gemeinsam mit der Stadt Reutlingen bildet sie das Oberzentrum der Region Neckar-Alb. Die Stadt ist Sitz des gleichnamigen Regierungspräsidiums sowie große Kreisstadt. Mit der Eberhard-Karls-Universität nennt sich Tübingen seit 1477 Universitätsstadt (LANDESKUNDLICHES INFORMATIONSSYSTEM BADEN-WÜRTTEMBERG 2021). Im Norden grenzt sie an den Landkreis Böblingen, im Osten an den Landkreis Reutlingen. Südlich und westlich befindet sich der Landkreis Tübingen (PETRY et al. 2010). Tübingen weist eine Einwohnerzahl von 89199 auf (UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN 2021b). Der höchste Punkt der Stadt liegt bei 515 m ü. N. N. (über Normal-Null) auf dem Hornkopf im Schönbuch, der niedrigste mit 275 m ü. N. N. am Neckar (LANDESKUNDLICHES INFORMATIONSSYSTEM BADEN-WÜRTTEMBERG 2021). Das Stadtgebiet ist stärker in Nord-Süd-Richtung als in West-Ost-Richtung ausgedehnt (Nord-Süd-Richtung: 16,0 km, West-Ost-Richtung: 12,5km; PETRY et al. 2010).

Da sich die Radverkehrszählungen auf Oktober 2018 beziehen, erfolgt an dieser Stelle bewusst die Datenangabe aus dem Jahr 2018. Die Wirtschaft Tübingens ist geprägt vom Dienstleistungssektor. Die Eberhard-Karls-Universität zählte 2018 7199 Beschäftigte (ENGLER 2018). 2018 waren 47235 Personen sozialversicherungspflichtig und in Ausbildung am Wohnort Tübingen gemeldet (STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 2021b). Davon arbeiteten 7808 Personen (16,5%) im produzierenden Gewerbe, 6262 Personen (13,9%) im Handel, Verkehr und Gastgewerbe sowie 32811 Personen (69,5%) im Dienstleistungsbereich (STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 2021c). Die Arbeitslosenquote betrug 2018 durchschnittlich 3,1% (UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN 2021c). Die Kernstadt ist relativ kompakt und setzt sich aus der historischen Altstadt sowie den urban geprägten Quartieren zusammen. Die Ortsteile sind hingegen monostrukturell und rural geprägt (HAAG et al. 2011). Diese Aussage kann bei Betrachtung der Bevölkerungsverteilung bestätigt werden (siehe Abbildung 7). In der Abbildung werden die Stadtteile in dunkelblau, die Ortsteile in hellblau visualisiert.

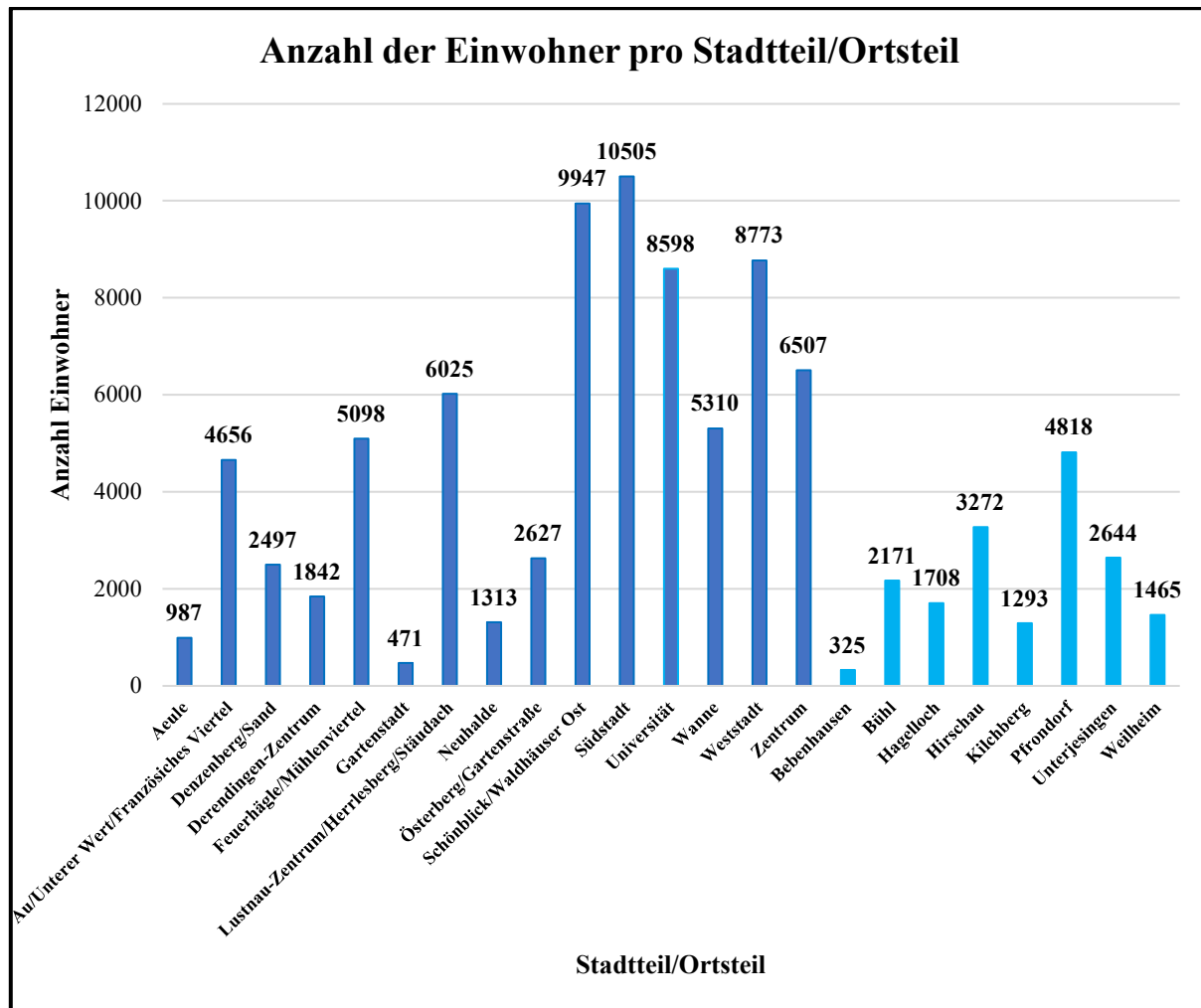


Abbildung 7: Anzahl der Einwohner pro Stadtteil/Ortsteil

Tübingen kann in 23 statistische Stadtteile gegliedert werden, darunter befinden sich 15 in der Kernstadt und acht sind sog. äußere Stadtteile oder Ortsteile (TÜPEDIA 2018). Es ist erkennbar, dass die Stadtteile in der Kernstadt die höchsten Einwohnerzahlen aufweisen. Als einwohnerstärkster Stadtteil kann die Südstadt mit 10505 Einwohnern, als einwohnerschwächster Stadtteil die Gartenstadt mit 471 Bürgern genannt werden. Pfrondorf im Nordosten des Stadtgebietes hat bei den Ortsteilen die höchste Bewohnerzahl (4818), Bebenhausen im Norden die kleinste (318). Deutlich wird auch, dass die universitätsnahen Stadtteile wie Universität, Waldhäuser Ost oder Zentrum eine vergleichsweise hohe Einwohnerzahl aufweisen. Mit der Bevölkerungsverteilung ist auch die Nachfrage nach Mobilität und das Mobilitätsverhalten verbunden. Je nach Ausrichtung der Siedlungsentwicklung hat dies Auswirkungen auf die Erreichbarkeit der täglichen Ziele und somit auf die Wahl des Verkehrsmittels (HAAG et al. 2011).

Die Technische Universität Dresden führte jeweils 2013 und 2018 im Rahmen des Forschungsprojektes *Mobilität in Städten* eine Haushaltsbefragung zum Thema Mobilität

durch. Dabei wurden hinsichtlich des Binnenverkehrs und des Verkehrs im gesamten Stadtgebiet (alle Wege) differenziert. Der Begriff des Binnenverkehrs bezeichnet alle innerstädtischen Wege, die zwischen dem Quellverkehr und dem Zielverkehr zurückgelegt werden. Der Verkehr im gesamten Stadtgebiet umfasst Wege des Quell-, Ziel- und Binnenverkehrs (WITTEWER et al. 2016). Die Differenzierung hinsichtlich der beiden Begriffe wird in Abbildung 8 veranschaulicht.

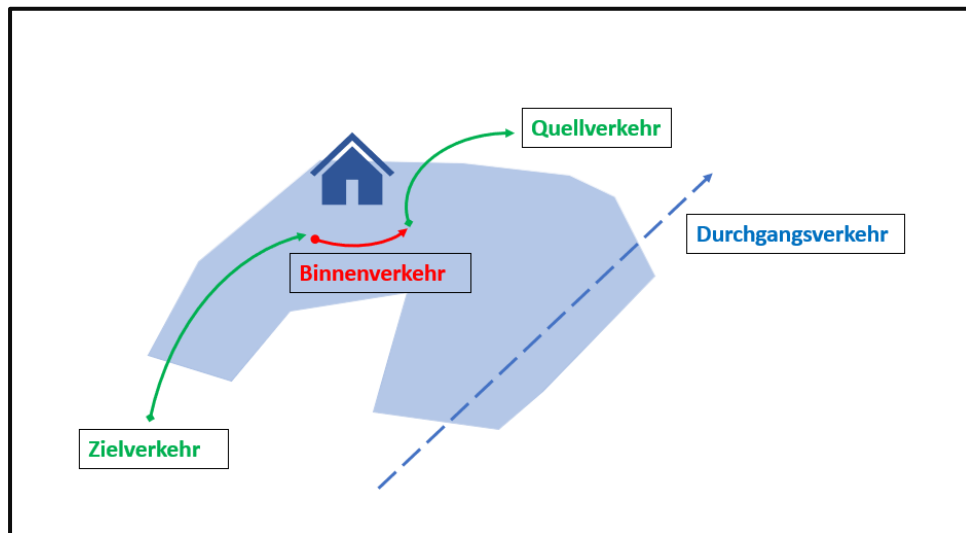


Abbildung 8: Räumliche Verkehrsarten in Bezug auf ein Untersuchungsgebiet (WITTEWER et al. 2016)

Abbildung 9 zeigt die Verkehrsmittelwahl nach dem spezifischen Verkehrsaufkommen im Jahr 2013, Abbildung 10 die Wegehäufigkeit der Personen nach den vier Hauptverkehrsmittelgruppen im Jahr 2018. Beide Diagramme beziehen sich auf den Verkehr im gesamten Stadtgebiet. Die angeführten Werte können mit den Daten des modal split verglichen werden.

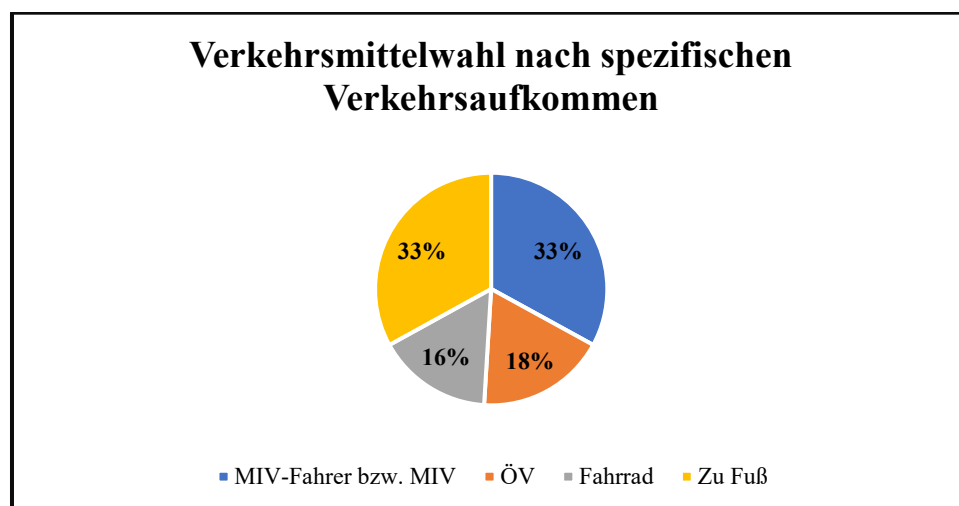


Abbildung 9: Verkehrsmittelwahl nach spezifischen Verkehrsaufkommen 2013

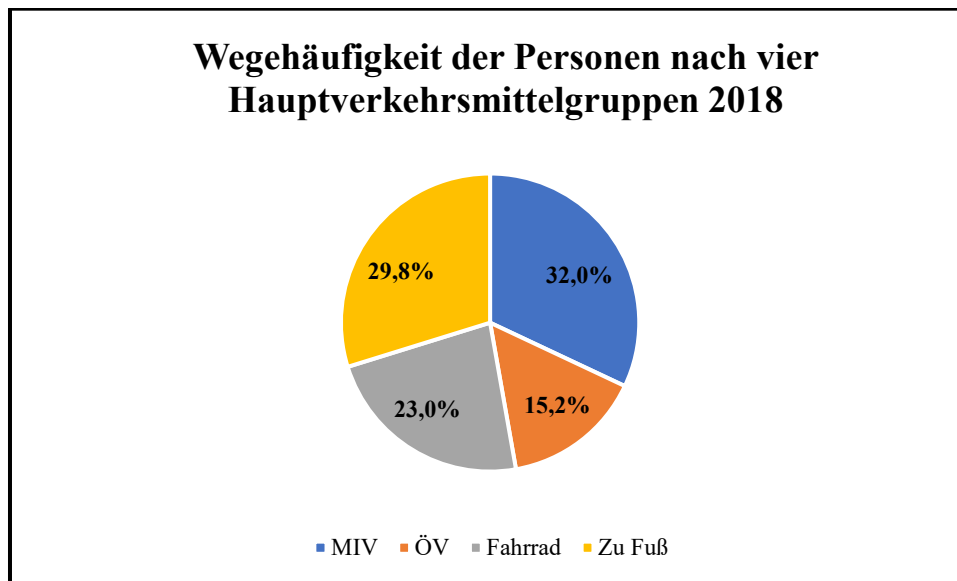


Abbildung 10: Wegehäufigkeit der Personen nach vier Hauptverkehrsmittelgruppen (GERIKE et al. 2020)

Den Diagrammen kann entnommen werden, dass der MIV zwischen 2013 und 2018 um ein Prozent zurückgegangen ist, der ÖV (Öffentlicher Verkehr) um 2,8% und der Fußverkehr um 3,2%. Hingegen nahm der Radverkehr um 7% zu.

4.2 Vorstellung des agenten-basiertes Radverkehrsmodell Tübingen

Zur Validierung des Salzburger Radverkehrsmodells sind Daten von permanenten Radverkehrszählstationen essenziell. LOIDL et al. (2015) verwenden in dem ersten Modell von 2015 drei eher im Stadtzentrum gelegene Zählstellen. Im Zuge einer Weiterentwicklung des Salzburger Radverkehrsmodells und der Installation weiterer Radbarometer im Stadtgebiet stieg die Zahl auf neun Radverkehrszählstationen an (siehe auch Kapitel 3; KAZIYEVA et al. 2021b). Gleichzeitig muss die Zahl der Radverkehrszählstationen in einer Relation zur Einwohnerzahl und innerhalb der Grenzen des agenten-basierenden Modells liegen. So weist beispielsweise die Stadt Rostock 11 Radverkehrszählstationen, allerdings eine deutlich höhere Zahl von 208085 Einwohnern auf. Aufgrund der größeren Einwohnerzahl wurde als Vergleichsstadt nicht die Hansestadt gewählt (siehe Tabelle 1). In der Tabelle wird außerdem die Anzahl der Zählstationen in Bezug auf die jeweilige Einwohnerzahl in Deutschlands Groß- und Mittelstädten abgebildet. Parallel ist auch die Problematik bei der Suche nach einer geeigneten Vergleichsstadt erkennbar. Nach näherer und intensiver Betrachtung wurde die Stadt Tübingen als am geeignetsten gefunden. Die Stadt weist drei Radverkehrszählstationen

auf – ebenso viele wie das Salzburger Radverkehrsmodell bei der Publikation 2015 beinhaltet. Zudem liegt die Einwohnerzahl unter der vorgegebenen Grenze von 180 000 Einwohnern.

Tabelle 1: Ausgewählte Groß- und Mittelstädte in Deutschland, die Einwohnerzahl und die Anzahl der Radverkehrszählstellen im Stadtgebiet (Stand 06/2021)

Stadt	Einwohnerzahl 2018	Anzahl der Radverkehrszählstellen	Quellenangabe
Rostock	208 085	12	HANSESTADT ROSTOCK 2020, ECO COUNTER 2021b
Heidelberg	149 755	15	STADT HEIDELBERG 2019, ECO COUNTER 2021d
Freiburg	231 195 [2019]	4	STADT FREIBURG 2021, ECO COUNTER 2021c
Ludwigsburg	93 140	1	STADT LUDWIGSBURG 2021a, STADT LUDWIGSBURG 2021b
Gera	99 964	0	STADT GERA 2019
Schwerin	95 797	4	LANDESHAUPTSTADT SCHWERIN 2019, LANDESHAUPTSTADT SCHWERIN 2018
Hildesheim	103 988 [2019]	0	STADT HILDESHEIM 2020
Trier	110 117	0	RATHAUS DER STADT TRIER 2020
Würzburg	130 455 [2019]	0	STADT WÜRZBURG 2020
Saarbrücken	183 399	0	LANDESHAUPTSTADT SAARBRÜCKEN 2019
Tübingen	90546	3	STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 2021A, UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN 2021i

4.3 Datenaufbereitung

Die grundsätzliche Datengrundlage des Tübinger Radverkehrsmodells bilden OSM-Daten. Diese wurden in der Software ArcGIS Pro 2.1 des Herstellers ESRI (Environmental Systems Research Institute) auf das Stadtgebiet Tübingens zugeschnitten und so aufbereitet, dass sie in

Form von mehreren Vektordaten in die ABM-Plattform GAMA importiert werden konnten. Für alle Vektordaten wird das Koordinatensystem WGS 1984 UTM Zone 32N (World Geometric System; Universal Transverse Mercator) verwendet. Im Folgenden werden die Bearbeitungsschritte der einzelnen Vektordaten vorgestellt, die als Eingangsdaten für das Modell dienen.

4.3.1 Einrichtungen

Die Vektordaten *Einrichtungen* basieren auf Schulen, Kindergärten, Krankenhäusern, Behörden, Freizeitangebote und Einkaufsmöglichkeiten. Zur Ermittlung aller Schulen wurde eine attributbezogene Auswahl auf den Vektordaten *gis_osm_pois_free_1* nach dem Stichwort *school* der Spalte *fclass* durchgeführt. Da daraus nur insgesamt drei Schulen resultierten, wurden die Angaben durch Informationen der Universitätsstadt Tübingen ergänzt.

Analog zu den Schulen wurde bei den Kindergärten vorgegangen. Durch eine attributbezogene Auswahl nach dem Stichwort *kindergarten* der Spalte *fclass* der Vektordaten *gis_osm_pois_free_1* wurden alle Kindergärten angezeigt. Die ausgegebenen Daten waren nur zu einem Drittel vollständig, sodass sie durch Angaben der Stadt komplettiert wurden.

Da in den OSM-Daten für das Tübinger Stadtgebiet keine Krankenhäuser vermerkt waren, wurden zunächst die Adressen der Kliniken, die bei der Stadt Tübingen bekannt sind, in einer CSV-Datei gespeichert. Mittels des Werkzeugs *Adressen geokodieren* konnten die in der CSV-Datei gespeicherten Adressen der Kliniken in ArcGIS Pro geokodiert werden. Ergänzt wurden die Angaben der Kliniken durch Ärzte und Psychotherapeuten. Dafür wurde in dem OSM-Datensatz *gis_osm_pois_free_1* eine attributbezogene Auswahl der Spalte *fclass* nach dem Stichwort *doctors* ausgeführt. Die resultierenden Angaben wurden durch Daten der Kassenärztlichen Vereinigung Baden-Württemberg ergänzt (KASSENÄRZTLICHE VEREINIGUNG BADEN-WÜRTTEMBERG 2021). Waren an einem Standort mehr als eine Klinik oder ein Arzt vorhanden, so wurde nur ein Ort markiert.

Analog zu den Krankenhäusern wurde auch bei den Behörden vorgegangen: Die Daten der Universitätsstadt Tübingen wurden in einer CSV-Datei gespeichert und in ArcGIS Pro mittels des Werkzeugs *Adressen geokodieren* geokodiert. Befanden sich mehrere Dienststellen an einem Standort, so wurde nur ein Standort berücksichtigt.

Um die Standorte der universitären Einrichtungen darzustellen, wurde auf den Vektordaten *gis_osm_pois_free_1* zunächst eine attributbezogene Auswahl der Spalte *fclass* nach dem Stichwort *university* durchgeführt. Da die ausgegebenen Daten unvollständig waren, wurden sie durch Angaben der Universität Tübingen ergänzt (EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT

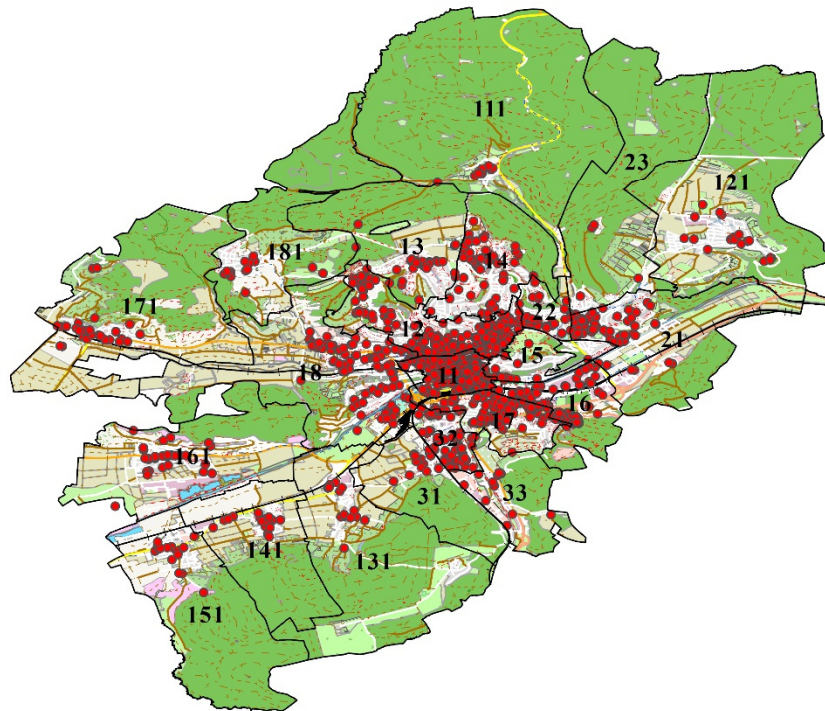
TÜBINGEN HOCHSCHULKOMMUNIKATION 2020). Tritt mehr als ein universitärer Standort an einem Ort auf, so wurde nur eine universitäre Einrichtung kartiert.

Zur Ermittlung der Freizeitangebote wurde mit einer attributbezogenen Selektion aus den Vektordaten *gis_osm_pois_free_1* OSM-Attribute wie *bar*, *biergarten*, *cafe*, *fast_food*, *ice_cream*, *pub*, *restaurant*, *library*, *arts_centre*, *cinema*, *community_centre*, *fountain*, *nightclub*, *planetarium*, *casino*, *studio*, *theatre*, *internet_cafe*, *place_of_worship*, *castle*, *attraction*, *church*, *zoo*, *gallery*, *viewpoint*, *theme_park* und *sport* selektiert. Ergänzt wurden die Angaben aus OpenStreetMap durch Daten von Google Maps sowie der Stadt Tübingen und den Kategorien *Fitness- und Yogastudios*.

Die Einkaufsmöglichkeiten basieren auf den OSM-Attributen *commercial*, *retail*, *warehouse* und *bakery*. Diese wurden mittels einer attributbezogenen Selektion aus den Vektordaten *gis_osm_pois_free_1* gefiltert. Ergänzt wurden die OSM-Attribute mit Google Maps-Angaben von Drogerien, Hofläden, Metzgereien, Apotheken, Getränkemärkte, Weinläden, Mühlenläden, Bioläden, Spielwarengeschäfte, Bekleidungsgeschäfte, Schuhläden, Schreibwarengeschäfte, Tee- und Kaffeeläden sowie Bastelläden und Buchhandlungen. Hinzu kommen Fahrradläden, Blumenläden und Baumärkte. Hingegen wurden beispielsweise Autohändler nicht berücksichtigt, da der Bezug zum Radverkehr nicht gegeben ist.

Die genannten Quell- und Zielorte (Schulen, Kindergärten, Krankenhäuser, Behörden, Freizeitangebote sowie Einkaufsmöglichkeiten) können zu Einrichtungen zusammengefasst werden. Abbildung 11 zeigt die Lage aller Quell- und Zielorte des Tübinger Radverkehrsmodells. Dabei wird deutlich, dass sich der Großteil der Quell- und Zielorte innerhalb der Kernstadt befindet. In den einzelnen Ortsteilen wie Unterjesingen, Weilheim oder Bebenhausen befinden sich nur wenige Einrichtungen, z.B. Hofläden, Bäckereien oder Metzgereien.

Einrichtungen in Tübingen



Legende

□ Stadtteile

● Einrichtungen

11 = Zentrum

12 = Universität

13 = Wanne

14 = Schönblick/Waldhäuser-Ost

16 = Aeule/Unterer Wert/Französisches Viertel

17 = Südstadt

18 = Weststadt

21 = Lustnau-Zentrum/Herrlesberg/Stäudach

22 = Denzenberg/Sand

23 = Neuhalde

26 = Aeule

31 = Derendingen-Zentrum

32 = Feuerhäggle/Mühlenviertel

33 = Gartenstadt

111 = Bebenhausen

121 = Pfrondorf

131 = Weilheim

141 = Kilchberg

151 = Bühl

161 = Hirschau

171 = Unterjesingen

181 = Hageloch



Abbildung 11: Lage der Einrichtungen in Tübingen

4.3.2 Arbeitsplätze

Arbeitsplätze sind als Teil des Quell-Zielnetzes elementare Orte. Im Tübinger Radverkehrsmodell werden Arbeitsplätze anteilig zur Anzahl der Beschäftigten wiedergegeben. Da die Daten zu den Unternehmensstandorten weder als Open Data vorlagen noch vom Fachbereich Geoinformation der Stadt Tübingen zur Verfügung gestellt werden konnten, wurde auf die Methode von LOIDL (2015) zurückgegriffen. Er schlägt dazu im Blog „gicycle“ einen auf Bevölkerungsdaten bezogenen Ansatz vor, welcher in der vorliegenden Arbeit auf die Orte der Unternehmen und ihre Beschäftigten übertragen wurde. Dabei muss angemerkt werden, dass im Gegensatz zu den österreichischen Daten der Erwerbstätigen die Beschäftigtenzahlen in Tübingen noch nicht als offene Daten vorliegen. Auch die zu Grunde liegenden Gebäude sind bei OpenStreetMap nur zu einem Bruchteil hinsichtlich der Differenzierung in Wohnhaus und Firma klassifiziert. Daher wurden die Gebäude mittels der bereits kategorisierten Angaben der Schulen, Kindergärten, universitären Einrichtungen, Behörden und Krankenhäuser sowie mit der Luftbildansicht in Google Maps in die Kategorien *Wohnhaus* und *Arbeitsplatz* eingeteilt (GOOGLE MAPS 2021, GEOFABRIK 2021). Dabei kann sich auch in einem Wohnhaus eine Firma und somit ein Arbeitsplatz befinden. In diesem Fall ist das Gebäude sowohl ein Wohnhaus als auch ein Arbeitsplatz. Die Beschäftigtenzahlen der Stadt Tübingen wurden zur Verwendung in der Masterthesis vom Radverkehrsbeauftragten der Stadt Tübingen, Hr. Hammer, zur Verfügung gestellt. Die Darstellung der Arbeitsplätze erfolgt im Gegensatz zum Salzburger Radverkehrsmodell nicht in Form eines Rasters, sondern durch Hexagone. Für das Modell notwendig waren außerdem die Zahl der arbeitenden Personen, die sich in einem Gebäude und somit auch in einem Hexagon befinden.

Zusätzlich wurde die Zahl der erwerbstätigen Bevölkerung pro Stadtteil und Firma ermittelt. Dazu wurde der Anteil jeder Firma an der Gebäudegrundrissfläche berechnet. Dieser Anteil wurde mit der Anzahl der Beschäftigten pro Stadtteil multipliziert. Um ein möglichst genaues Ergebnis zu erreichen, wurden die zuvor in Polygonen dargestellten Firmenorte in Punkte umgewandelt und mit den bereits in ArcMap erstellten Hexagonen durch einen Spatial Join (Räumliche Verbindung) verknüpft. Insgesamt verteilen sich 186 Hexagone mit einer Fläche von 0,233827 km² pro Hexagon über das gesamte Stadtgebiet.

4.3.3 Wohnorte

In der Regel starten alle Radfahrten vom Wohnhaus aus zu einem Zielort. Im Tübinger Radverkehrsmodell werden die Wohngebäude anteilig zur Einwohnerzahl eines Stadtteils repräsentiert. Bezüglich der Ermittlung des Anteils der Bevölkerung eines Stadtteils auf die

Anzahl der Wohngebäude wurde analog zu den Arbeitsplätzen vorgegangen, jedoch wurden nun die Häuser für die weitere Bearbeitung und aus Gründen einer höheren Genauigkeit, in Punkte umgewandelt. Die Darstellung der Daten erfolgte im Vergleich zum Salzburger Radverkehrsmodell nicht in Form eines Rasters, sondern mittels Hexagone. Die Vektordaten *homeplaces* beruht grundsätzlich auf der Datenstruktur der Vektordaten *homes* im Salzburger Radverkehrsmodell. Die Arbeitsschritte zur Datenaufbereitung der Personengruppen in den Vektordaten *homeplaces* für das Tübinger Radverkehrsmodell werden im Folgenden erläutert.

Studenten

Aus dem Modellcode des Salzburger Radverkehrsmodell, den Metadaten der Vektordaten *home* sowie dem beigefügten ODD-Protokoll geht nicht eindeutig hervor, wie sich die Zahl der Studenten und ihre räumliche Verteilung über das Stadtgebiet zusammensetzt. Die räumliche Verteilung der Studenten in Tübingen beruht auf einer entfernungsbasierten Gewichtung. Es wird die Annahme getroffen, dass in den umliegenden Ortsteilen wie Bühl, Hagelloch oder Pfrondorf keine Studenten wohnen. Hingegen handelt es sich bei den Stadtteilen wie Universität, Zentrum oder Waldhäuser Ost um potenzielle Wohnorte. Dies wird mit der Lage von universitären Einrichtungen in den genannten Stadtteilen begründet. Zusätzlich zeigt sich auch anhand der Altersverteilung in den einzelnen Stadt- und Ortsteilen, in welchen Stadtvierteln sich die Wohnorte der Studenten befinden. Daraus kann u.a. auch abgeleitet werden, dass in den Ortsteilen wie Bühl, Pfrondorf oder Unterjesingen keine oder nur sehr wenige Studenten wohnen.

Tabelle 2: Stadtteile und ihr Gewichtungsanteil an der Entfernung

Stadtteil	Gewichtungsanteil
Zentrum	0,15
Universität	0,19
Waldhäuser Ost/Schönblick	0,125
Denzenberg/Sand	0,125
Lustnau	0,125
Wanne	0,125
Südstadt	0,05
Feuerhägle/Mühlenviertel	0,025
De-Zentrum	0,025
Au/Unterer Wert/Französisches Viertel	0,025

Mit den in Tabelle 2 vorgestellten Gewichtungen wurden die männlichen und weiblichen Studenten multipliziert. Daraus ergeben sich die in Tabelle 3 abgebildeten Werte. Insgesamt studierten im Wintersemester 2018/2019 27629 Studenten an der Eberhard-Karls-Universität (EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT TÜBINGEN 2018). In die Kalkulationen nicht mit einbezogen wurden Studenten der Evangelischen Hochschule für Kirchenmusik, da für das Jahr 2018 keine Daten vorlagen.

Tabelle 3: Räumliche Verteilung der männlichen und weiblichen Studenten auf die Stadtteile (EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT TÜBINGEN 2018 und Tabelle 2)

Stadtteil	Männliche Studenten	Weibliche Studenten
Zentrum	4047	2861
Universität	2428	1716
Schönblick/Waldhäuser Ost	2023	1430
Denzenberg/Sand	2023	1430
Lustnau-Zentrum/Herrlesberg/Stäudach	1619	1144
Südstadt	2428	1716
Feuerhäggle/Mühlenviertel	567	400
Derendingen-Zentrum	486	343
Au/Unterer Wert/Französisches Viertel	567	400
Österberg/Gartenstraße	0	0
Weststadt	0	0
Gartenstadt	0	0
Wanne	0	0
Neuhalde	0	0
Aeule	0	0
Bebenhausen	0	0
Pfrondorf	0	0
Weilheim	0	0
Kilchberg	0	0
Bühl	0	0
Hirschau	0	0
Unterjesingen	0	0
Hagelloch	0	0
Summe	16187	11442

In beiden Radverkehrsmodellen werden die Studenten durch die Attribute *m_students*, *f_students* dargestellt. Das verwendete Attribut *students* fasst die Studenten beider Geschlechter zusammen.

Schüler

Aus dem Modellcode des Salzburger Radverkehrsmodell, den Metadaten der Vektordaten *home* sowie dem beigefügten ODD-Protokoll geht nicht eindeutig hervor, wo sich der Wohnort der Schüler befindet. Aufgrund dessen wurde für die Schüler des Tübinger Radverkehrsmodells anhand der Schülerzahlen des Schuljahres 2015/2016 die Anzahl der Schüler pro Stadtteil berechnet. Da für das Schuljahr 2018/2019 zum Zeitpunkt der Masterarbeit keine Daten vorlagen, wurde auf Angaben des Schuljahres 2015/2016 zurückgegriffen. Die Gesamtzahl der Schüler wurde dabei nach der Verteilung der Einwohner auf die Stadtteile gewichtet. Dazu wurde der Anteil der Schüler an den gesamten Einwohnern berechnet und anschließend mit dem Anteil der Einwohner pro Stadtteil multipliziert. Daraus ergeben sich die in Tabelle 4 abgebildeten Werte.

Tabelle 4: Anzahl der Schüler in den Stadt- und Ortsteilen Tübingens (UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN 2016)

Stadtteil	Schüler pro EW
Aeule	169
Au/Unterer Wert/Französisches Viertel	797
Bebenhausen	56
Bühl	372
Denzenberg/Sand	428
Derendingen-Zentrum	315
Feuerhägle/Mühlenviertel	873
Gartenstadt	81
Hagelloch	292
Hirschau	560
Kilchberg	221
Lustnau-Zentrum/Herrlesberg/Stäudach	1032
Neuhalde	225
Österberg/Gartenstraße	450
Pfrondorf	825
Schönblick/Waldhäuser Ost	1703
Südstadt	1799
Universität	1472
Unterjesingen	453
Wanne	909
Weilheim	251
Weststadt	1502
Zentrum	1114

Summe	15900
-------	-------

In beiden Radverkehrsmodellen werden die Schüler durch das Attribut *pupils* dargestellt.

Erwerbstätige

Aus dem Modellcode des Salzburger Radverkehrsmodells, den Metadaten in den Vektordaten *home* sowie dem beigefügten ODD-Protokoll geht nicht eindeutig hervor, wie sich die Zahl der Erwerbstätigen zusammensetzt. Um die Zahl der Arbeitnehmer in den Stadt- und Ortsteilen Tübingens zu ermitteln, wurde die Zahl der sozialversicherungspflichtig beschäftigten Arbeitnehmer und Auszubildenden nach Geschlecht gemäß dem Anteil der Einwohner eines Stadtteils an der Gesamtbevölkerung berechnet (STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 2021b). Ein Stadtteil mit einem Bevölkerungsanteil von 12% enthält somit auch 12% der Arbeitnehmer. Die Arbeitnehmer werden in beiden Radverkehrsmodellen durch die Attribute *m_employed* und *f_employed* dargestellt.

Abbildung 12 visualisiert den Anteil der Erwerbstätigen an den Einwohnern Tübingens. Es ist erkennbar, dass sich innerhalb der Kernstadt generell eine vergleichsweise hohe Anzahl an Beschäftigten befindet. Diese Aussage lässt sich mit der höheren Einwohnerzahl in den innerstädtischen Stadtteilen begründen. In den Ortsteilen wie Hagelloch oder Hirschau findet sich im Vergleich ein geringer Anteil an Erwerbstätigen an den Einwohnern wieder. Da in den Ortsteilen im Allgemeinen weniger Bürger wohnen, ist auch der Anteil der Beschäftigten entsprechend geringer. Als Stadtteile mit dem höchsten Anteil an Beschäftigten sind das Zentrum, die Südstadt sowie der Stadtteil Feuerhäggle/Mühlenviertel zu nennen.

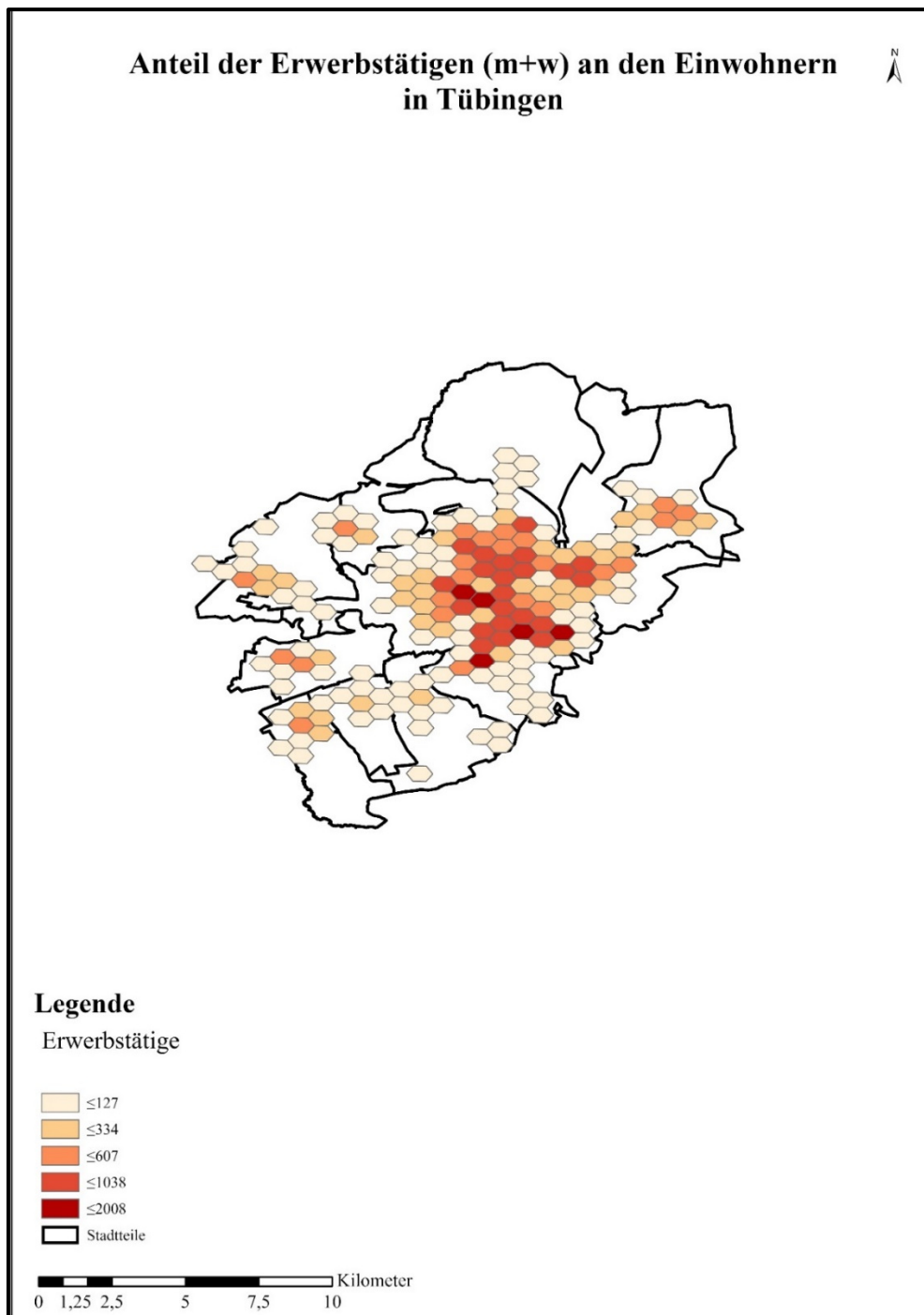


Abbildung 12: Anteil der Beschäftigten an den Einwohnern in Tübingen (STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 2021b)

Erwerbslose

Da wie auch bei den Schülern, Studenten und Erwerbstätigen aus dem Salzburger Radverkehrsmodell, den Vektordaten *homes* sowie dem beigefügten ODD-Protokoll nicht eindeutig hervor geht, wie sich die Zahl der Erwerbslosen zusammensetzt, wurde zur Ermittlung der arbeitslosen Personen wie folgt vorgegangen. Die Zahlen der SGB II und XII-Empfänger (Sozialgesetzbuch, Zweites Buch; Sozialgesetzbuch, Zwölftes Buch) wurden

ermittelt und den entsprechenden Stadt- und Ortsteilen zugeordnet. Die Daten aus dem Jahr 2017 wurden auf Basis des Sozialberichts 2019 veröffentlicht und geben zum Zeitpunkt der Masterarbeit die aktuellsten Zahlen wieder (UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN 2019). Die einzelnen Zahlen eines Stadt- und Ortsteils wurden addiert und anschließend durch die Zahl der Quartiere geteilt. Mit dem Begriff des Quartiers ist in diesem Kontext ein Teil eines Stadt- oder Ortsteils gemeint. Ein Quartier kann sich sowohl in einem Stadt- als auch in einem Ortsteil befinden. Lag ein Quartier in zwei Stadtteilen, so wurden die Zahlen jeweils zur Hälfte auf beide Stadtteile aufgeteilt. Dieser resultierende Wert ergab die Gesamtzahl aller SGB II und SGB XII-Empfänger in einem Stadtteil und wurde mit dem prozentualen Anteil der in Tübingen wohnhaften Männer und Frauen multipliziert, um die arbeitslosen Männer und Frauen zu ermitteln. Im Radverkehrsmodell werden sie durch die Attribute *m_unemployed* und *f_unemployed* repräsentiert.

Tabelle 5: Räumliche Verteilung der männlichen und weiblichen Arbeitnehmer auf die Einwohner der Stadtteile (UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN 2019)

Stadtteil	Männliche Erwerbslose	Weibliche Erwerbslose	Gesamt
Aeule	26	18	44
Au/Unterer Wert/Französisches Viertel	125	88	213
Bebenhausen	42	29	71
Bühl	42	29	71
Denzenberg/Sand	54	38	92
Derendingen-Zentrum	51	36	87
Feuerhäggle/Mühlenviertel	161	112	273
Gartenstadt	25	18	43
Hagelloch	42	29	71
Hirschau	42	29	71
Kilchberg	42	29	71
Lustnau-Zentrum/Herrlesberg/Stäudach	119	84	203
Neuhalde	32	23	55
Österberg/Gartenstraße	35	25	60
Pfrondorf	42	29	71
Schönblick/Waldhäuser Ost	267	187	454
Südstadt	445	312	757
Universität	188	131	319
Unterjesingen	42	29	71
Wanne	79	55	134
Weilheim	42	29	71
Weststadt	220	154	374
Weststadt	239	168	407
Zentrum	156	109	266
Summe	2555	1789	4345

Abbildung 13 stellt den Anteil der Erwerbslosen an den Einwohnern in Tübingen dar. Es wird deutlich, dass die Stadtteile Südstadt und Feuerhägle/Mühlenviertel den höchsten Anteil an Arbeitslosen mit mehr als 176 Erwerbslosen pro Hexagon (0,233827 km²) im Stadtteil aufweisen. Diese hohen Zahlen können mit der hohen Arbeitslosenquote in den beiden Gebieten sowie der hohen Anzahl an Einwohnern in der Südstadt begründet werden. Eine vergleichsweise große Zahl an SGB II und XII-Empfängern ist außerdem im Stadtteil Schönblick/Waldhäuser Ost zu beobachten. Die geringsten Anteile an Erwerbslosen an den Einwohnern pro Stadtteil befinden sich in den Ortsteilen wie Unterjesingen, Hirschau oder Kilchberg.

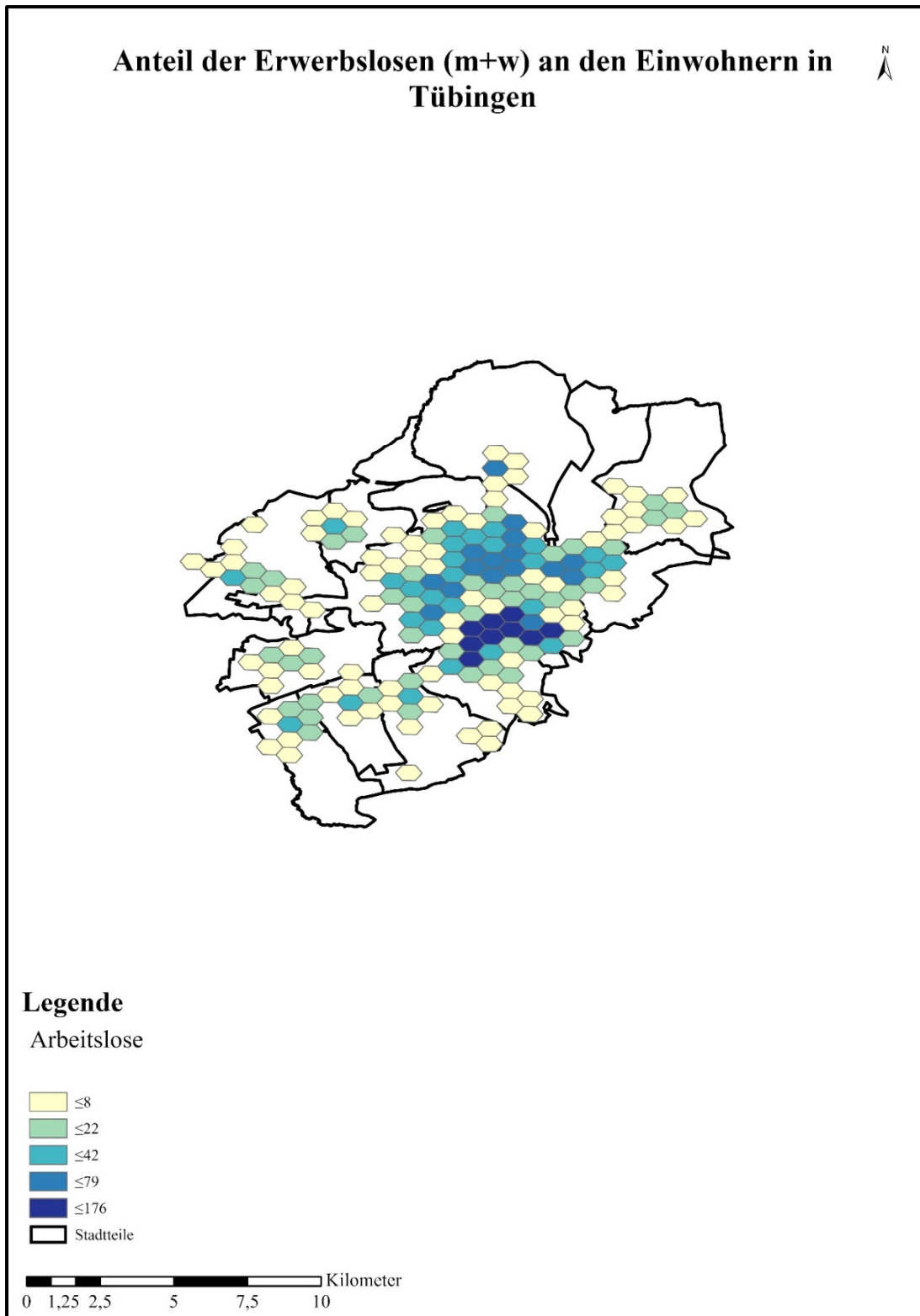


Abbildung 13: Anteil der Erwerbslosen in Tübingen (UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN 2019)

Ruheständler

Da keine offiziellen Daten zur Anzahl der Ruheständler in Tübingen gefunden wurden, werden im Tübinger Radverkehrsmodell alle Personen, die älter als 65 Jahre sind, als Rentner

bezeichnet. Die Höhe des Alters orientiert sich am durchschnittlichen Renteneintrittsalter 2018, welches 64,1 Jahre bei Frauen und 64,0 Jahre bei Männern beträgt (DEUTSCHE RENTENVERSICHERUNG 2019). Zusätzlich wird angenommen, dass sich die Ruheständler gleichmäßig über das gesamte Stadtgebiet verteilen. Tabelle 6 zeigt die Verteilung der männlichen und weiblichen Ruheständler auf die einzelnen Stadtteile Tübingens. Insgesamt lebten 2018 in Tübingen 15146 Personen, die über 65 Jahre alt waren.

Tabelle 6: Räumliche Verteilung der männlichen und weiblichen Ruheständler auf die Einwohner der Stadtteile (UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN 2021a)

Stadtteil	Männliche Ruheständler	Weibliche Ruheständler	Gesamt
Aeule	66	86	152
Au/Unterer Wert/Französisches Viertel	138	174	312
Bebenhausen	37	50	87
Bühl	153	235	388
Denzenberg/Sand	170	221	391
Derendingen-Zentrum	158	206	364
Feuerhägle/Mühlenviertel	304	401	705
Gartenstadt	46	62	108
Hagelloch	172	227	399
Hirschau	295	381	676
Kilchberg	119	159	278
Lustnau- Zentrum/Herrlesberg/Stäudach	388	498	886
Neuhalde	95	124	219
Österberg/Gartenstraße	195	250	445
Pfrondorf	296	677	973
Schönblick/Waldhäuser Ost	837	1095	1932
Südstadt	618	788	1406
Universität	494	649	1143
Unterjesingen	214	276	490
Wanne	520	696	1216
Weilheim	139	181	320
Weststadt	647	840	1487
Zentrum	336	433	769
Summe	6440	8706	15146

In beiden Radverkehrsmodellen werden die Ruheständler durch die Attribute *m_pension* und *f_pension* dargestellt.

Männliche und weibliche Einwohner nach Altersklassen

Die Altersklassen konnten analog zum Salzburger Radverkehrsmodell gebildet werden. Die Bevölkerungsdaten aller Altersjahre einer Altersklasse pro Stadtteil wurden summiert. Daraus resultiert die Anzahl der Bewohner in einer Altersklasse und einem Stadtteil. Um den Anteil der männlichen und weiblichen Bevölkerung pro Altersklasse in einem Stadtteil zu ermitteln, wurde zunächst der prozentuale Anteil der Bevölkerung nach Geschlecht pro Altersgruppe ermittelt. Die Daten stammen von der Universitätsstadt Tübingen und wurden zum Stichtag des 31.12.2019 erhoben (UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN 2021a). In einem nächsten Bearbeitungsschritt wurde der prozentuale Anteil der Bevölkerung nach Geschlecht pro Altersgruppe mit der Anzahl der Bewohner pro Altersgruppe in einem Stadtteil multipliziert. Da im Radverkehrsmodell Kinder und Jugendliche unter 15 Jahren zusätzlich berücksichtigt werden, wurden sie auf Grundlage dieser Daten ermittelt.

Personen mit inaktivem oder unbekanntem Beschäftigungsstatus nach Geschlecht

Im Salzburger Radverkehrsmodell werden Personen berücksichtigt, deren Beschäftigungsstatus „nicht aktiv“ ist. Dazu zählen Personen weiblichen und männlichen Geschlechts zwischen 15 und 65, die weder erwerbslos oder Studenten sind. Als Beispiel für diese Personengruppe können Menschen genannt werden, die sich gerade in Elternzeit befinden, selbstständig oder verbeamtet und somit nicht sozialversicherungspflichtig sind. Im Modell werden sie als *inactive* bezeichnet. Berücksichtigung im Radverkehrsmodell finden ebenfalls Personen, deren Beschäftigungsstatus unbekannt ist. Zu dieser Gruppe zählen Personen, die weder erwerbstätig, erwerbslos, pensioniert, inaktiv oder Studenten sind. Im Modell werden sie als *unknown* angegeben.

Die generierten Daten der Studenten, Schüler, Erwerbstätigen, Erwerbslosen, Ruheständler sowie die Bevölkerung nach Altersklassen und Geschlecht in den Stadt- und Ortsteilen Tübingens wurde in Exceltabellen gespeichert. So konnten die Tabellen dem ArcGIS Projekt hinzugefügt und mittels eines Join an die Vektordaten der Stadtteile geknüpft werden. Es folgte die Berechnung des Anteils jedes Gebäudes an der gesamten Gebäudegrundrissfläche. Dieser Anteil wurde mit der Anzahl der Bevölkerung pro Altersklasse in einem Stadtteil multipliziert. Um eine möglichst genaue Zahl der Personen zu erreichen, wurden die zuvor in

Polygonen abgebildeten Wohnhäuser in Punkte umgewandelt und abschließend mit den bereits in ArcMap erstellten Hexagonen durch einen Spatial Join (Räumliche Verbindung) verknüpft. Insgesamt umfassen die Vektordaten *homeplaces* 176 Hexagone, die sich über das gesamte Stadtgebiet verteilen. Von diesen 176 Hexagonen haben drei keine relevanten Daten, was durch die Verknüpfung der Daten mit der Geometrie des Hexagons und die Summenbildung begründet werden kann.

4.3.4 Radverkehrszählstationen

Über das Stadtgebiet verteilen sich insgesamt drei Radverkehrszählstationen (siehe Abbildung 14).

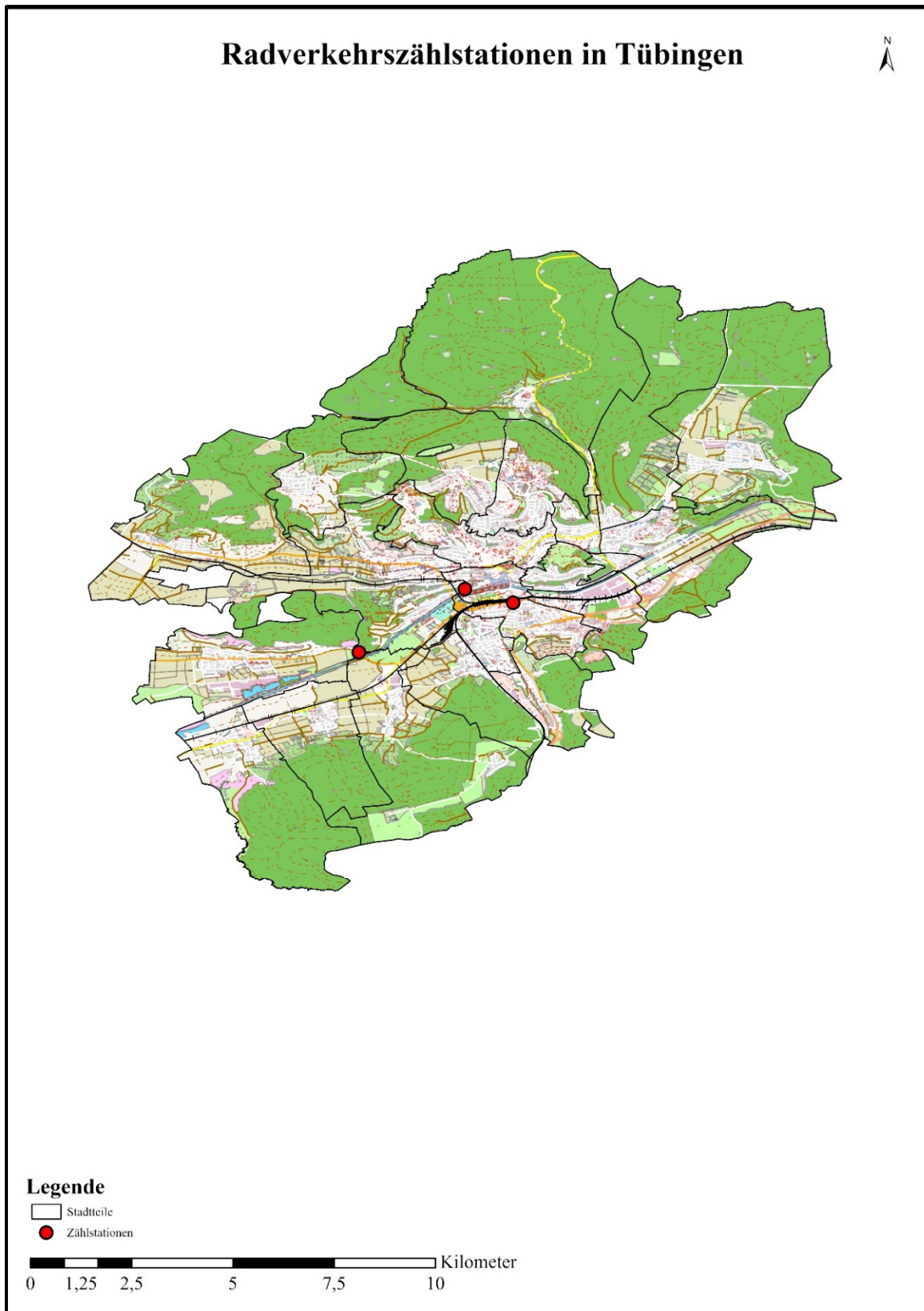


Abbildung 14: Lage der Radverkehrszählstationen in Tübingen

Die Radfahrer werden anhand einer Induktionsschleife im Boden quantifiziert. Hierbei handelt es sich um das gängigste Verfahren bei permanenten Zählstationen. Die Induktionsschleifen sind an einen Auswertesensor angeschlossen. Die Laufräder bewirken beim Überfahren der

Schleife eine Veränderung des induzierten elektromagnetischen Feldes. Im Sensor werden die Änderungen analysiert und als Zählimpuls gespeichert. In Abhängigkeit von der Breite der Radverkehrsanlage können je nach Zählquerschnitt zwischen zwei und vier Induktionsschleifen nebeneinander verlegt werden. Beim Überfahren der Zählstelle erkennt der Sensor die Geometrie eines überfahrenden Fahrrades anhand der zwei Laufräder mit dem Tretlager. Andere Fahrzeuge mit einer abweichenden Geometrie, wie beispielsweise Tretroller, werden vom Sensor herausgefiltert und nicht gezählt. Davon ausgenommen sind Fahrräder mit Carbonrahmen und Carbonfelgen. Da deren Anteil am Gesamtaufkommen an Fahrrädern derzeit noch gering ist, können diese vernachlässigt werden. Fahrräder mit Anhängern werden ebenfalls erfasst und als zwei Fahrrädern erkannt (SENATSVERWALTUNG FÜR UMWELT, VERKEHR UND KLIMASCHUTZ 2020).

Eine Zählstelle befindet sich in Tübingen am Ende der Unterführung Steinlachallee/Karlstraße, die zweite am südlichen Ende des Fahrrad隧nells, der durch den Schlossberg führt. Die dritte Zählstation kann seit 2016 auf dem Neckarradweg in Richtung Hirschau befahren werden (UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN 2021d). Die Abbildungen 15 und 16 zeigen zwei der insgesamt drei Radverkehrszählstationen. Zur dritten Zählstation an der Unterführung Steinlachallee / Karlstraße konnten aufgrund von Baumaßnahmen keine Bilder gemacht werden.

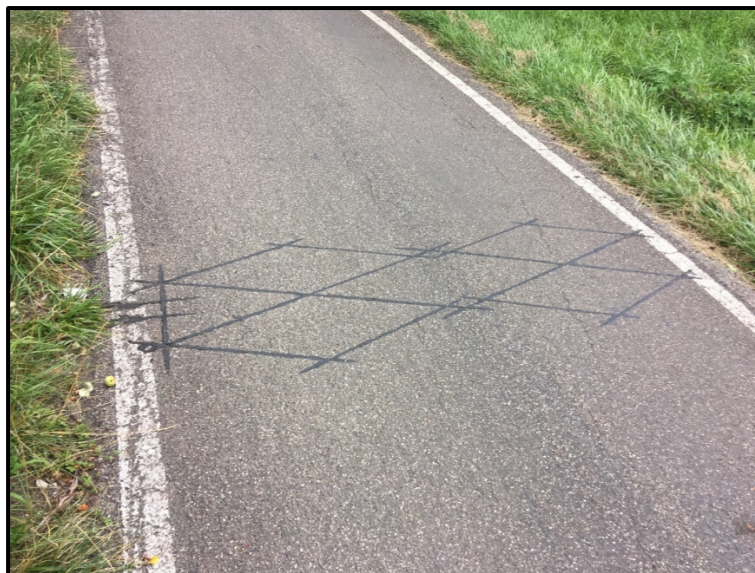


Abbildung 15: Radverkehrszählstelle am Neckarradweg zwischen Tübingen und Hirschau (Foto: THOMAS SWAIN)



Abbildung 16: Radverkehrszählstation am Schlossbergtunnel

Jedoch visualisiert nur die Zählstation am Schlossbergtunnel die Zahl der Radfahrer mittels eines Radbarometers. Die Daten der beiden anderen Zählstellen können im Internet abgerufen werden (UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN 2021d).

Anzahl der Radfahrer an den drei Radverkehrs­zähl­stationen im Oktober 2018

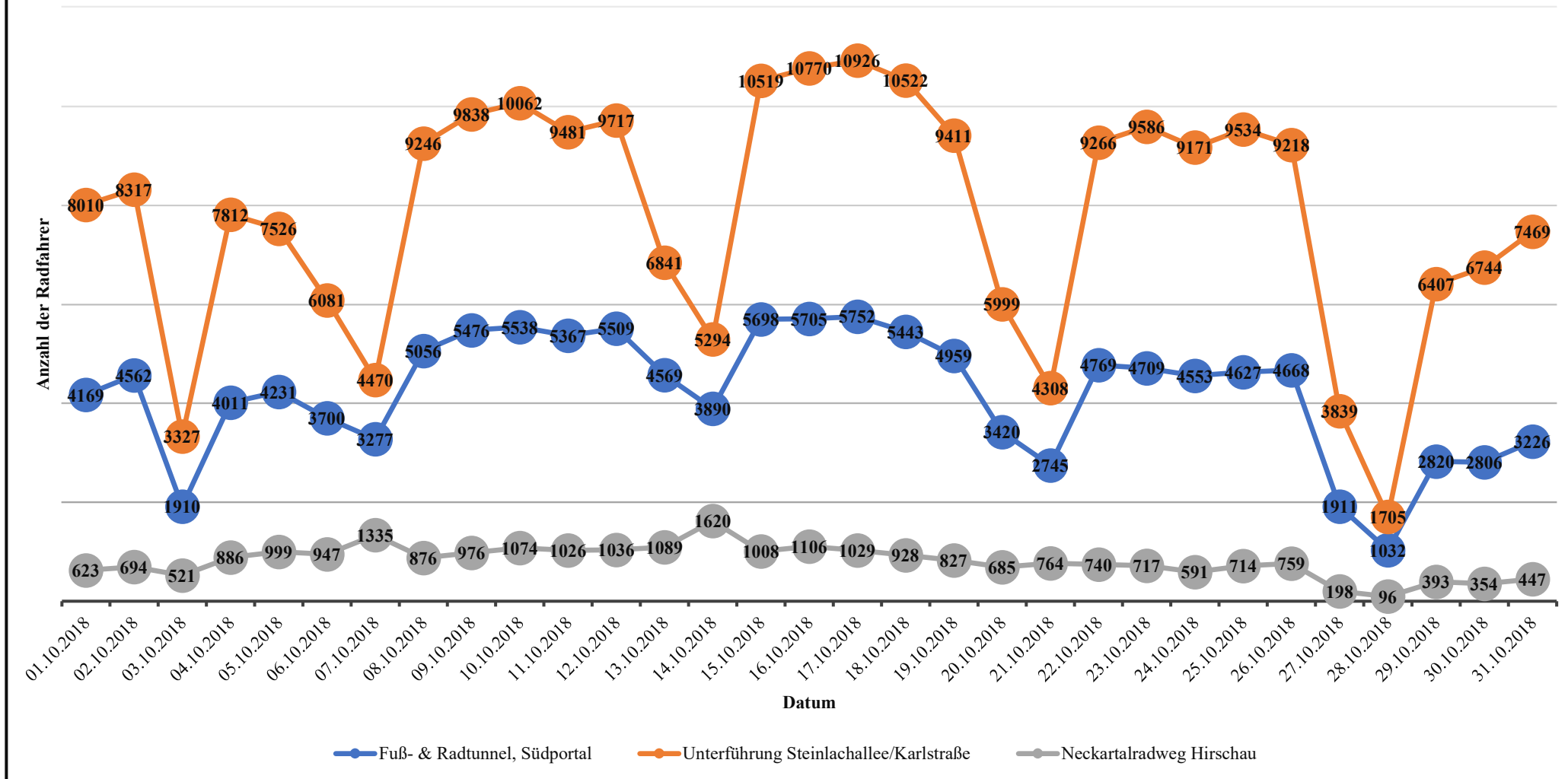


Abbildung 17: Anzahl der Radfahrer in Tübingen im Oktober 2018

Die Aussage, dass sich die Radverkehrszählstationen am Schlossberg und an der Unterführung Steinlachallee/Karlstraße an Pendlerstrecken liegen, kann mit Blick auf Abbildung 17 bestätigt werden. An Wochentagen wurden zwischen 6400 und 10900 Radfahrer an der Zählstation der Unterführung Steinlachallee/Karlstraße quantifiziert, zwischen 2800 und 5700 Radfahrer wurden am Schlossberg ermittelt. Bei der Zählstelle an der Unterführung der Steinlachallee und der Karlstraße handelt es sich um die frequentierteste Zählstation, am Neckarradweg wurden am wenigsten Radfahrer erfasst. Am 17.10.2018 konnten an der Zählstation „Unterführung Steinlachallee/Karlstraße“ mit 10926 Radfahrer die höchste Zahl gemessen werden, am 28.10.2018 mit 1705 die wenigsten Radfahrer. Die höchste Zahl an quantifizierten Radfahrer kann auf den 17.10.2018 datiert werden (5752), die geringste ebenfalls auf den 28.10.2020 (1032). Deutlich weniger Radfahrer wurden – wie bereits erwähnt - an der Zählstelle des Neckarradwegs ermittelt, am meisten Radfahrer wurden am 14.10.2018 (1620) erfasst, die wenigsten am 28.10.2018 (96).

4.3.5 Routingnetz

Zur Erzeugung der zentralen Grundlage des Radverkehrsmodells, dem Routingnetz, wurde das Datenbankskript *network_assesment* aus Salzburg an Tübingen angepasst. Es basiert auf OSM-Daten, die in eine PostgreSQL-Datenbank importiert und entsprechend angeglichen wurden – dazu zählt u.a. das Koordinatensystem, das von EPSG 32633 auf EPSG 32632 geändert wurde. Das Stadtgebiet Tübingens weist die Besonderheit auf, dass Teile nicht zur Stadt gehören bzw. es sogenannte gemeindefreie Gebiete gibt. Dennoch verlaufen über diese Gebiete Wege, die bei einer Grenzziehung auf Grundlage der Stadtgrenzen geteilt sind. Dies ist insbesondere für das Routing von Bedeutung, da so keine vollständigen Routen berechnet werden können. Denn es ist möglich, dass Wege direkt entlang der Stadtgrenze oder durch das gemeindefreie Gebiet verlaufen, die von den Radfahrern genutzt werden. Diese Wege sollen bei der Wahl der Fahrradroute nicht ausgeschlossen sein. In Abbildung 18 stellen die schwarzen Linien die Stadtgrenze, die roten Linien das Routingnetz dar. Um dieses geometrische Problem zu lösen, wurde um die Stadtgrenze ein Puffer von vier Kilometern gelegt.



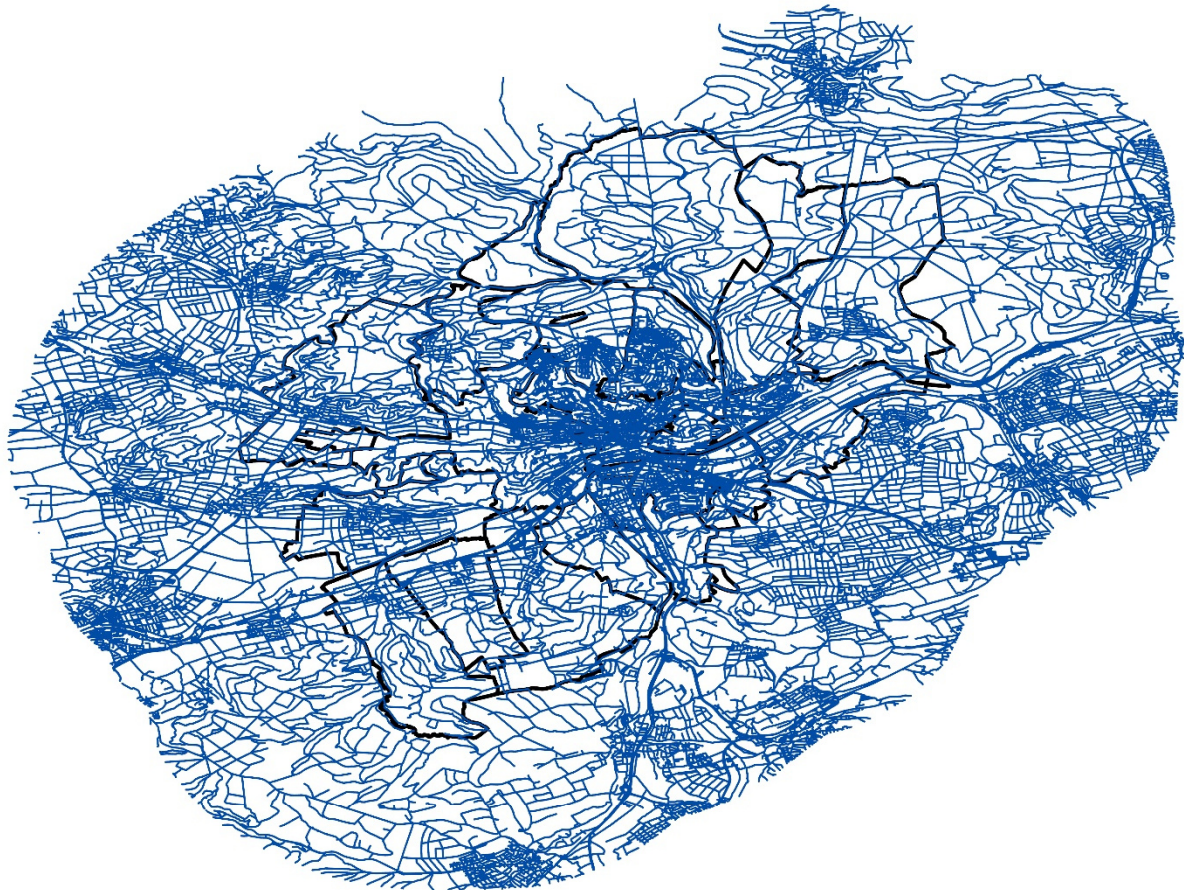
Abbildung 18: Darstellung der Problematik der gemeindefreien Gebiete im Routingnetz (GEOFABRIK (2021))

Im Gegensatz zum Salzburger Routingnetz werden in Tübingen nur lokale Radwege einbezogen. Die Durchschnittsgeschwindigkeit wurde ebenfalls auf die in Deutschland geltenden Beschränkungen angepasst. Um die Topographie im Routingnetz zu berücksichtigen, wurde ein digitales Geländemodell des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit einer Auflösung von 12 Metern in das Routingnetz integriert. Ausgelassen wurde hingegen ein Schnitt mit der österreichischen Grenze. Da Tübingen inmitten von Baden-Württemberg liegt und keine Außengrenzen hat, wurde dieser Teil des Datenbankskriptes übersprungen. Damit alle Vektordaten ein identisches Koordinatensystem haben, wurde das Koordinatensystem auf WGS 1984 UTM Zone 32N geändert. Teil des Routingnetzes ist außerdem das Datenbankskript *function-calculate-index*, das ebenfalls auf Tübingen angepasst wurde. Das Datenbankskript dient dazu, den Index für die sicherste Route zu berechnen. Ebenfalls ausgeführt wurde zur Verfügung gestellte Datenbankskript *topology-check.sql*. Damit wurde das erstellte Routingnetzwerk auf topologische Fehler geprüft. Das Skript wurde entsprechend des bereits erzeugten Routingnetzwerk angepasst und konnte erfolgreich angewandt werden.

Nachdem die Datenbankskripte ausgeführt wurden, wurde mit der Open-Source Software QGIS 3.10.6 eine Verbindung zur PostgreSQL-Datenbank erstellt und die Vektordaten abschließend exportiert. Damit die Radfahrer in Form von Agenten im Radverkehrsmodell an den drei Radverkehrszählstationen registriert werden, wurde auf dem Routingnetzwerk auf Höhe der drei Zählstellen ein weiterer Stützpunkt eingefügt.

Abbildung 19 zeigt das Routingnetz des Tübinger Radverkehrsmodells. Es ist erkennbar, dass sich im innerstädtischen Bereich der Kernstadt deutlich mehr radfahrtaugliche Straßen befinden. In den Ortsteilen wird die Dichte der für Radfahrer geeigneten Straßen deutlich dünner, die Anbindung an die Stadt ist auch auf mehreren alternativen Routen möglich.

Das Tübinger Routingnetz



Legende

-  Stadteile
-  Routingnetzwerk



Abbildung 19: Darstellung des Routingnetzes des Tübinger Radverkehrsmodells (GEOFABRIK 2021)

4.3.6 Kreuzungen

Teil des bereits erwähnten Datenbankskriptes sind Kreuzungen. Zu deren Ermittlung wurde analog zum Routingnetz vorgegangen. Die Datenbankskripte *topology-check.sql* und *function-calculate-index.sql* wurden nicht ausgeführt. Allerdings musste hier keine Anpassung des Datenbankskriptes vorgenommen werden. In einem letzten Arbeitsschritt wurde das Koordinatensystem auf WGS 1984 UTM Zone 32N geändert. Kreuzungen dienen bei Radfahrern zu Querung der Straße. An Kreuzungen kann die Route geändert werden. Zusammen mit dem Routingnetzwerk bilden sie die Grundlage des Radverkehrsmodells. Abschließend wurde mit der Open-Source Software QGIS 3.10.6 eine Verbindung zur PostgreSQL-Datenbank erstellt und die Vektordaten exportiert.

Abbildung 20 zeigt die Lage der ermittelten Kreuzungen. Wie schon beim Routingnetz thematisiert, weist die Kernstadt aufgrund der höheren Straßendichte deutlich mehr Kreuzungen auf, als beispielsweise in den Ortsteilen zu beobachten ist.

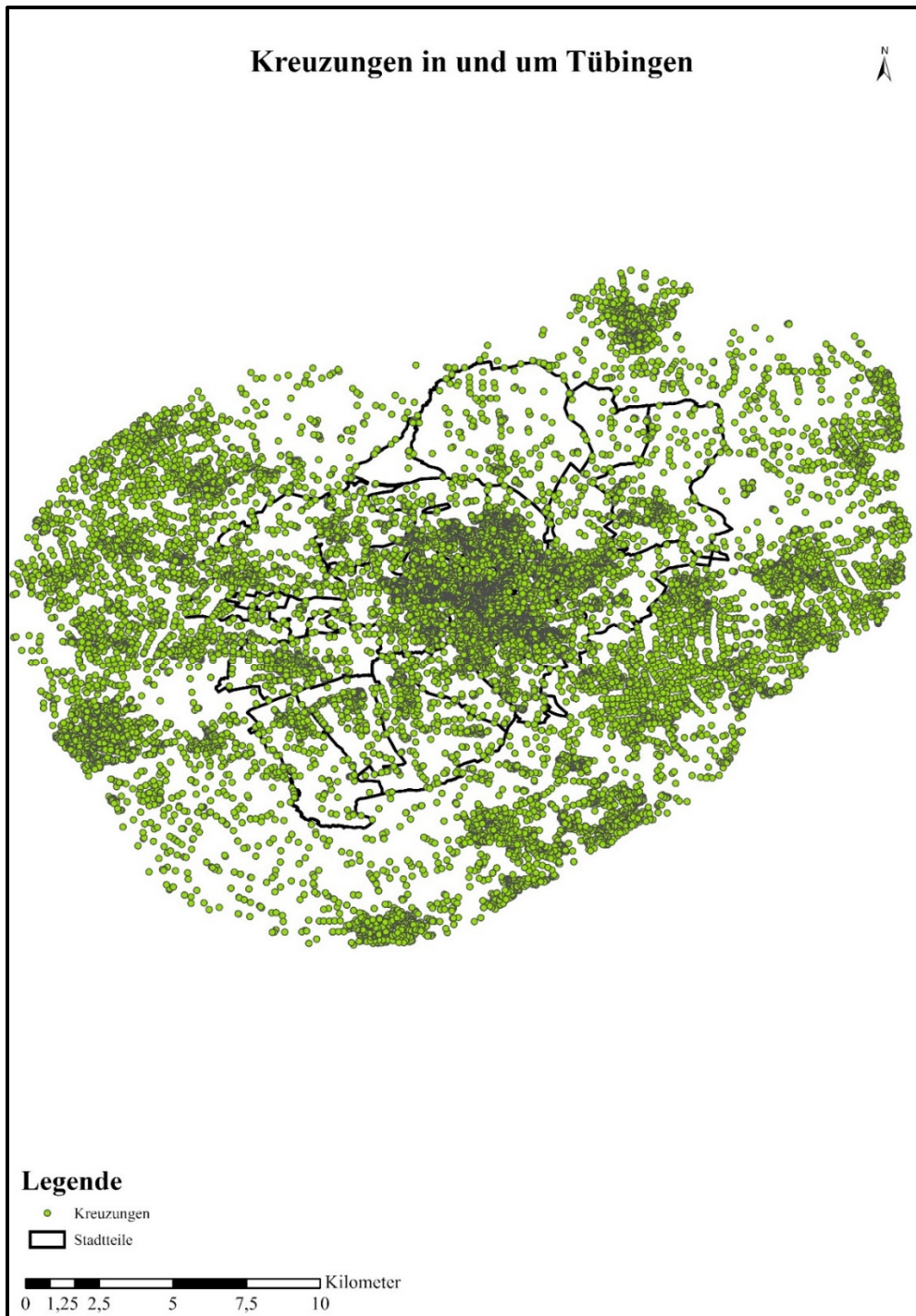


Abbildung 20: Kreuzungen des Tübinger Radverkehrsmodells (GEOFABRIK 2021)

4.3.7 Stadtgrenze

Die Daten zu den Stadt- und Ortsteilen stammen von der Fachabteilung Geoinformation der Universitätsstadt Tübingen. Darin enthalten sind ebenfalls Informationen zur Lage der einzelnen Stadtteile.

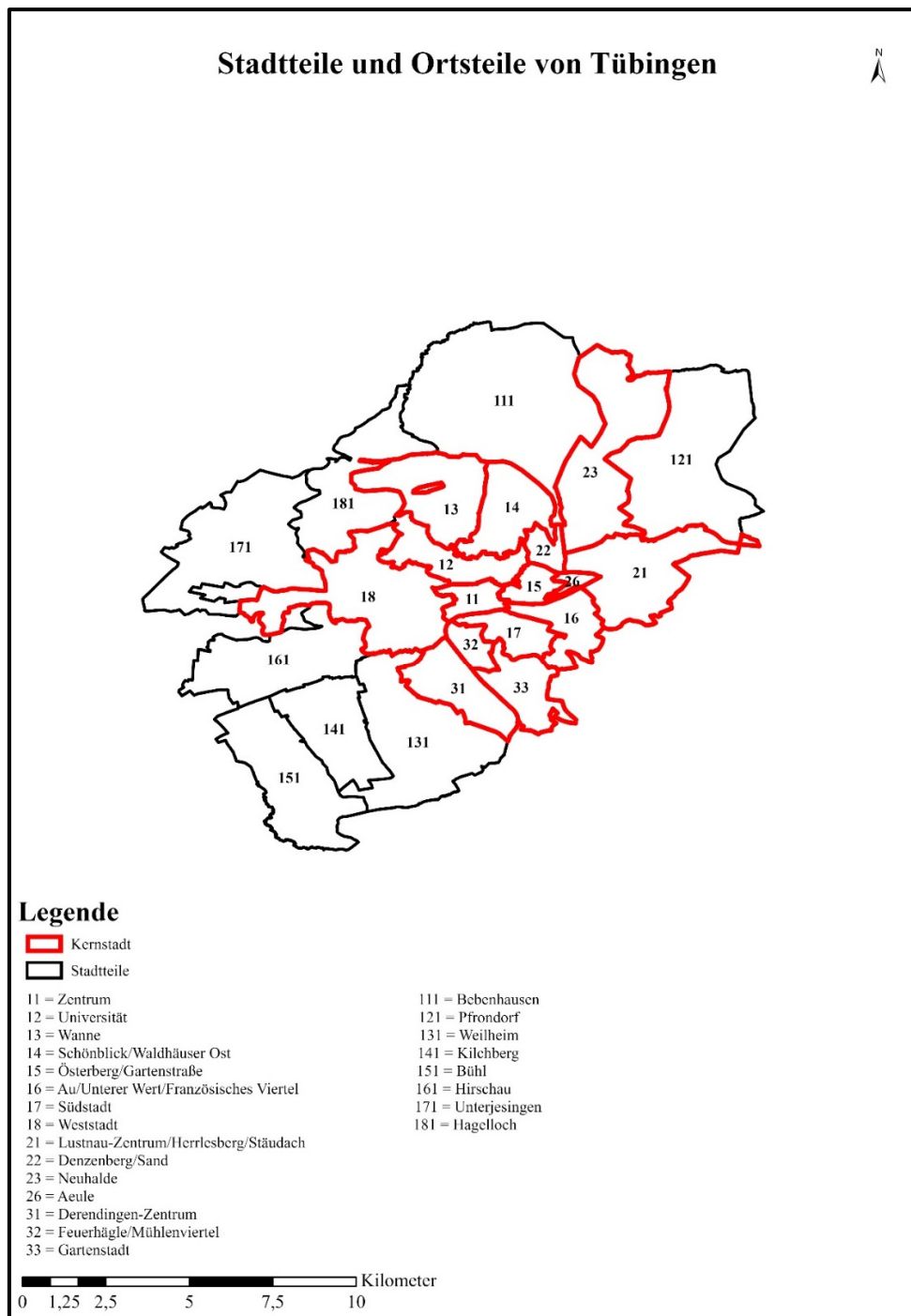


Abbildung 21: Stadtteile und Kernstadt von Tübingen

Wie Abbildung 21 entnommen werden kann, umfasst die in Rot dargestellte Kernstadt die Stadtteile Zentrum, Universität, Schönblick/Waldhäuser Ost, Österberg/Gartenstraße, Au/Unterer Wert/Französisches Viertel, Südstadt, Weststadt, Lustnau-Zentrum/Herrlesberg/Stäudach, Neuhalde, Aeule, Denzenberg/Sand, Derendingen-Zentrum, Feuerhäggle/Mühlenviertel sowie die Gartenstadt. Ergänzt wird die Kernstadt durch die Ortsteile Bebenhausen, Pfrondorf, Weilheim, Kilchberg, Bühl, Hirschau, Unterjesingen und Hagelloch.

4.3.8 Parametrisierung des Tübinger Radverkehrsmodells

Mit Ausnahme der CSV-Datei *real_counts* (Daten der drei Zählstationen aus Tübingen) wurden die CSV-Dateien der Wahrscheinlichkeiten (*activity_probabilities*, *time_probabilities* und *work_duration_probabilities*) aus dem Salzburger Radverkehrsmodell übernommen. Hierbei handelt es sich um Modellparameter, die für den neuen Anwendungskontext nicht aktualisiert werden (NOWROUZIAN & SRINIVASAN 2012).

4.4 Datenreferenzen

Für das Radverkehrsmodell wurden Radverkehrszähldaten aus Oktober 2018 verwendet. Für Oktober 2019 waren im Zeitpunkt des Erstellens der Masterarbeit zwar Daten verfügbar, diese waren jedoch unvollständig und damit nicht verwendbar, sodass auf das Jahr 2018 zurückgegriffen wurde. Der Monat Oktober wurde in Anlehnung an das Salzburger Radverkehrsmodell verwendet, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Studenten kehren wieder an die Universität und Hochschule zurück, die klimatischen Bedingungen befinden sich im Durchschnitt (weder Sommerhitze noch Winterkälte). Im Gegensatz zum Salzburger Radverkehrsmodell beträgt die zeitliche Auflösung der Simulation 60 Minuten. Sie bezieht sich allerdings ebenso wie in Salzburg auf einen Wochentag von Mitternacht des einen Tages bis Mitternacht des anderen Tages.

LOIDL et al. (2020) beschreiben einen Ansatz zur Kategorisierung von Mobilitätsdaten. Tabelle 7 fasst die Art der Daten und die Datenquellen für das Tübinger Radverkehrsmodell zusammen.

Tabelle 7: Art der Daten und Datenquellen für das Tübinger Radverkehrsmodell (LOIDL et al. 2020)

Art der Daten	Beispieldaten/Verwendete Daten	Datenquelle
Räumliche Daten	Fahrrad-relevante POIs Straßengraph, inklusive abgeleiteter Attribute	OpenStreetMap Google Maps
Statistische Daten	Sozio-demographische Daten	Statistische Daten der Stadt Tübingen Daten der Arbeitsagentur der Stadt Tübingen
Sensordaten	Fahrradzähldaten Digitales Höhenmodell	Stadt Tübingen Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Die Referenzen der Daten des Tübinger Radverkehrsmodells mit den jeweiligen Lizenzverweisen werden in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Datenreferenz und Lizenzbestimmungen der Eingangsdaten im Tübinger Radverkehrsmodell (KAZIYEVA et al. 2019, KAZIYEVA et al. 2021b)

Name der Eingangsdaten	Datenreferenz	Besondere Lizenzbestimmungen
homeplaces.shp	OSM-Daten und Daten der Stadt Tübingen (GEOFABRIK, 2021; Google Maps 2021; Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation)	Open Database Licence (ODbL) Fair Use Geodaten © Universitätsstadt Tübingen, 20-007(2)
workplaces.shp	OSM-Daten und Daten der Stadt Tübingen (GEOFABRIK, 2021; Google Maps 2021; Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation)	Open Database Licence (ODbL) Fair Use Geodaten © Universitätsstadt Tübingen, 20-007(2)
facilities.shp	Doktoren (KASSENÄRZTLICHE VEREINIGUNG BADEN-WÜRTTEMBERG 2021)	Siehe Datenreferenz
	Städtische Behörden (GEOFABRIK, 2021; Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation)	Open Database Licence (ODbL) Geodaten © Universitätsstadt Tübingen, 20-007(2)
	Schulen, Geschäfte, Freizeiteinrichtungen, Krankenhäuser, Kindergärten (GEOFABRIK, 2021; Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation)	Open Database Licence (ODbL) Geodaten © Universitätsstadt Tübingen, 20-007(2)
	Universitäre Standorte (EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT TÜBINGEN HOCHSCHULKOMMUNIKATION, 2020)	Siehe Datenreferenz
counting_stations.shp	Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation	Geodaten © Universitätsstadt Tübingen, 20-007(2)
network.shp	OSM-Daten (GEOFABRIK, 2021)	Open Database Licence (ODbL)
intersections.shp	OSM-Daten (GEOFABRIK, 2021)	Open Database Licence (ODbL)
real_counts.shp	Daten der Stadt Tübingen (Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation)	Geodaten © Universitätsstadt Tübingen, 20-007(2)
activity_probabilities.shp	Aus dem Salzburger Modell (Mobilitätserhebung (Bundesland Salzburg - Abteilung Verkehr, 2012))	Siehe Datenreferenz
time_probabilities.shp	Aus dem Salzburger Modell (Mobilitätserhebung (Bundesland Salzburg - Abteilung Verkehr, 2012))	Siehe Datenreferenz
mode_probabilities.shp	Aus dem Salzburger Modell (Mobilitätserhebung (Bundesland Salzburg - Abteilung Verkehr, 2012))	Siehe Datenreferenz
districts.shp	Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation	Geodaten © Universitätsstadt Tübingen, 20-007(2)
city_outline.shp	Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation	Geodaten © Universitätsstadt Tübingen, 20-007(2)
region_outline.shp	Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation	Geodaten © Universitätsstadt Tübingen, 20-007(2)
duration probabilities (in the code): school	Aus dem Salzburger Modell (Leitfaden für Schulleitungen (Landesschulrat Salzburg, 2010))	Siehe Datenreferenz
duration probabilities (in the code): university	Aus dem Salzburger Modell (ECTS-Richtlinie an der Universität Salzburg (Paris Lodron Universität Salzburg, 2005))	Siehe Datenreferenz
duration probabilities (in the code): work	Aus dem Salzburger Modell (Sozialbericht (Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, 2017))	Siehe Datenreferenz

4.5 Übertragung des Salzburger Radverkehrsmodells auf Tübingen

Nach der Datenaufbereitung wurde in GAMA ein neues Projekt angelegt. Die Modellparameter, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Aktivität stattfindet oder eine Person auf der Arbeit ist, wurden ohne Änderungen und Anpassungen aus dem Salzburger Radverkehrsmodell übernommen. Die für Tübingen erstellten Vektordaten wurden in der Pfadangabe angepasst. Bei der Übertragung des Radverkehrsmodells ist darauf zu achten, dass dieselbe GAMA-Version wie im Basiskontext verwendet wird. In diesem Fall bezieht sich das Tübinger ebenso wie das Salzburger Radverkehrsmodell auf die GAMA-Version 1.8.

Im Vergleich zum Salzburger Radverkehrsmodell musste beim Tübinger Radverkehrsmodell das Koordinatensystem in der GAMA-Plattform vom EPSG Code 32633 auf 32632 geändert werden. Auf das Tübinger Radverkehrsmodell hatte die Anpassung zur Folge, dass die Einstellungen in der GAMA-Plattform mit denen in den Vektordaten übereinstimmten. Ein Beibehalten des Salzburger Koordinatensystems hätte im Tübinger Modell ungenaue Ergebnisse zur Folge gehabt.

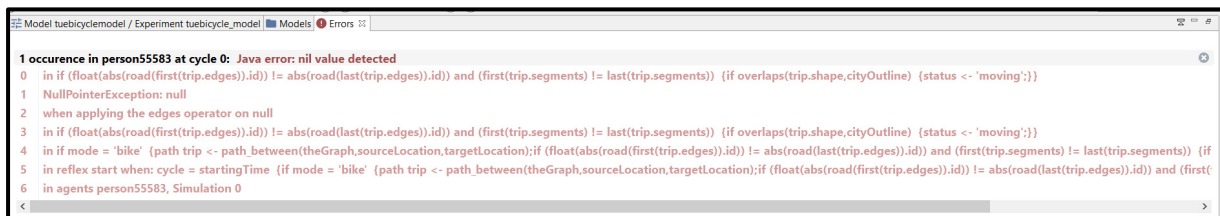
Darüber hinaus musste der Modellcode hinsichtlich des Safety Indexes angepasst werden. Im Salzburger Radverkehrsmodell ist die Berechnung des Safety Indexes Teil des Modellcodes, im Tübinger Radverkehrsmodell wurde die Kalkulation im Modellcode gelöscht. In diesem Fall erfolgt die Berechnung der damit verbundenen Werten bereits bei der Ausführung des Datenbankskriptes zur Ermittlung des Routing-Netzwerkes. Ein Beibehalten des Modellcodes hätte zu einem Fehler geführt, da im Modellcode Attribute abgerufen werden, die aber nicht im Routing-Netzwerk bzw. im Datenbankskript enthalten sind. Zudem würde der Safety Index insgesamt zwei Mal berechnet werden, obwohl die Kalkulation nur einmal nötig wäre.

Da die Attribute der Vektordaten *network* für das Tübinger Radverkehrsmodell im Vergleich zu demjenigen Routingnetzwerk aus dem Salzburger Radverkehrsmodell unterschiedliche Namen haben, wurde der Modellcode an die Namen der Attribute aus den Tübinger Vektordaten *network* entsprechend angepasst. Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, umfasst das Salzburger Radverkehrsmodell aktuell Daten von insgesamt neun Radverkehrszählstationen. Im Stadtgebiet Tübingens befinden sich nur drei Stationen, deren Namen sowie die Anzahl im Modellcode angeglichen wurde.

Um die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen, wurde das Aktualisierungsintervall für die simulierten Zählstationen von 10 Zyklen im Salzburger Modell auf 60 Zyklen im Tübinger Modell angepasst. Ein Zyklus im Modell entspricht einer Zeitminute, damit entsprechen 60 Zyklen der stündlichen Auflösung der Zählstationsdaten. Dies entspricht auch den Abständen,

wie sie in der CSV-Datei *hourly_counts_stations* (für das Salzburger Radverkehrsmodell) und *rv_daten* (für das Tübinger Radverkehrsmodell) vorliegen.

Nachdem die oben beschriebenen Anpassungen durchgeführt wurden, konnte das Modell gestartet werden. Nachdem die Initialisierungsphase erfolgreich abgeschlossen wurde, erschien nach dem Start des Experiments eine Fehlermeldung (siehe Abbildung 22).



```
Model tuebicylemodel / Experiment tuebicyle_model | Models | Errors |
1 occurrence in person55583 at cycle 0: Java error: nil value detected
0 in if (float(abs(road(first(trip.edges).id)) != abs(road(last(trip.edges).id)) and (first(trip.segments) != last(trip.segments)) (if overlaps(trip.shape,cityOutline) (status <- 'moving'))
1 NullPointerException: null
2 when applying the edges operator on null
3 in if (float(abs(road(first(trip.edges).id)) != abs(road(last(trip.edges).id)) and (first(trip.segments) != last(trip.segments)) (if overlaps(trip.shape,cityOutline) (status <- 'moving'))
4 in if mode = 'bike' (path trip <- path_between(theGraph,sourceLocation,targetLocation);if (float(abs(road(first(trip.edges).id)) != abs(road(last(trip.edges).id)) and (first(trip.segments) != last(trip.segments)) (if
5 in reflex start when: cycle = startingTime (if mode = 'bike' (path trip <- path_between(theGraph,sourceLocation,targetLocation);if (float(abs(road(first(trip.edges).id)) != abs(road(last(trip.edges).id)) and (first(
6 in agents person55583, Simulation 0
```

Abbildung 22: Fehlermeldung nach dem Start des Experimentes im gesamten Untersuchungsgebiet

Eine detaillierte Fehleranalyse befindet sich im Anhang. Im weiteren Verlauf der Suche nach der Ursache der Fehlermeldung wurde ein kleineres Untersuchungsgebiet verwendet, um den Fehler räumlich einzugrenzen. Außerdem wurde die Routingfähigkeit des Straßennetzes anhand der Funktion *Route* in ArcGIS Pro überprüft. Das Ergebnis war, dass auf dem Netzwerk Routen gebildet werden konnten. Des Weiteren wurden Elemente des in der GAMA-Plattform enthaltenen *library models* Modells *Clean Line Network* in das Tübinger Radverkehrsmodell integriert. Daraus resultierte ein zwar ein zusammenhängender Graph, jedoch eine *NullPointerException*. Eine *NullPointerException* drückt aus, dass ein Null-Wert in einem Objekt auftaucht. Mögliche Ursachen dieses Fehlers können sein, wenn ein Objektattribut bei der Deklaration auf Null gesetzt wurde und vor dem ersten Zugriff nicht initialisiert. Oder wenn einer Variablen durch eine Methode ein Objekt zugewiesen wird, wobei anstelle eines Objektes der Null-Wert zurückgeliefert wird. Eine weitere Fehlerursache kann ein Objektattribut sein, welches den gleichen Namen wie eine lokale Variable trägt. Wird anstatt der lokalen Variablen auf das Objektattribut zugegriffen, kommt es zu dem Fehler. Um den Fehler zu beheben, müsste zunächst die *NullPointerException* aus dem gemeinsamen Modell von Tübinger Radverkehrsmodell und *Clean Lines Network* behoben werden. Sollte dies funktionieren, könnte geprüft werden, ob das Experiment des Tübinger Radverkehrsmodell erfolgreich durchläuft. Sollte dies nicht passieren, wäre eine weitere Fehleranalyse nötig. Sollte das Experiment der beiden Modelle Tübinger Radverkehrsmodell und *Clean Lines Network* erfolgreich funktionieren, so könnte mit der weiteren Fehleranalyse des Routingfehlers begonnen werden – dies kann jedoch auch unabhängig des Modells *Clean Line Network* geschehen. Es ist anzunehmen, dass eine Behebung des Routingfehler eine weitere Anpassung

des Tübinger Radverkehrsmodells zur Folge hätte. Dies würde den Rahmen einer Masterthesis sprengen.

5 Ergebnisse

Tabelle 9 vergleicht die Datenreferenzen des Tübinger und des Salzburger Radverkehrsmodells und gibt die Genauigkeit der Daten für das jeweilige Modell anhand einer Farbklassifikation an. Bei der Farbklassifikation wurden Daten, die von einer Behörde stammen, als genauer eingestuft als beispielsweise OSM-Daten. Daten von einer Behörde werden in den Tabellenspalten Genauigkeit der Daten (Tübingen) und Genauigkeit der Daten (Salzburg) in dunkelgrün, OSM-Daten in orange, OSM-Daten, die mit Daten einer Behörde verglichen und angepasst wurden, in gelb, Daten von der Website einer Behörde in hellgrün und Modellparameter in rot dargestellt. Die gewählte Farbklassifikation lässt sich damit begründen, dass offizielle Daten von Ämtern und Behörden mit einer höheren Wahrscheinlichkeit geprüft werden, als das bei OSM-Daten der Fall ist. Daten von der Website einer Behörde wurden als hellgrün kategorisiert, da die Daten möglicherweise veraltet sein können. Die Modellparameter (rot), wie z.B. die *duration probabilities*, oder die *time-*, *mode-* oder *activity probabilities* wurden, ohne vorher an die Tübinger Verhältnisse angepasst zu werden, 1:1 übernommen. Jedoch ist davon auszugehen, dass es zwischen den beiden Städten zu Unterschieden hinsichtlich der Studien-, Schul- oder Arbeitszeiten kommt. Auch kann es zwischen Tübingen und Salzburg aufgrund der unterschiedlichen Mentalität und Kultur bzw. nationalen (Radverkehrs-)Bedingungen sowie des Stellenwertes des Radverkehrs in der lokalen und nationalen Verkehrspolitik zu Unterschieden kommen, die sich auf das Radverkehrsverhalten auswirken.

Tabelle 9 zeigt, dass mit Ausnahme der Schulen, Geschäfte, Freizeiteinrichtungen, Krankenhäuser und Kindergärten die Daten des Salzburger Radverkehrsmodells als genauer einzustufen sind als im Tübinger Radverkehrsmodell. Diese den Einrichtungen zuzuordnenden Zielorte wurden im Tübinger Modell zusätzlich mit Daten der Stadt abgeglichen. Die Vektordaten *network* und *intersections* stammen im Salzburger Radverkehrsmodell von der Österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG) und können als hochwertiger im Vergleich zu den im Tübinger Modell verwendeten OSM-Daten angesehen werden.

Dabei muss angemerkt werden, dass für die Vektordaten *work* und *homeplaces* im Salzburger Radverkehrsmodell die Datenreferenz erst von Kaziyeva et al. (2021b) veröffentlicht wurde. Beim Öffnen der Vektordaten mit einem GIS konnten zum Zeitpunkt der Bearbeitung im Sommer 2020 keine Metadaten gefunden werden. Demzufolge bleibt es unklar, wie sich die Daten in den beiden Vektordaten zusammensetzen und erschwert die Übertragung auf eine andere Stadt. Für die analogen Vektordaten *workplaces* in Tübingen konnten aufgrund dessen

die Datenstruktur bzw. der Aufbau der Daten nur erahnt werden. Wie in den Kapiteln 4.3.2 und 4.3.3 thematisiert, stammen die Daten von OSM, die mit Informationen der Stadt Tübingen und Google Maps ergänzt wurden.

Tabelle 9: Gegenüberstellung der Datenreferenz im Tübinger und Salzburger Radverkehrsmodell (KAZIYEVA et al. 2019, KAZIYEVA et al. 2021b)

Input bzw. Eingangsdaten	Datenreferenz des Tübinger Modells	Genauigkeit der Daten (Tübingen)	Datenreferenz des Salzburger Modells	Genauigkeit der Daten (Salzburg)
homes.shp (SZ) / homeplaces.shp (TÜ)	OSM-Daten und Daten der Stadt Tübingen (GEOFABRIK, 2021; Google Maps 2021; Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation)		Bevölkerungsdaten (STATISTIK AUSTRIA 2011)	
work.shp (SZ) / workplaces.shp (TÜ)	OSM-Daten und Daten der Stadt Tübingen (GEOFABRIK, 2021; Google Maps 2021; Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation)		Beschäftigungsdaten (BUNDESSTATISTIK ÖSTERREICH 2013)	
facilities.shp	Doktoren (KASSENÄRZTLICHE VEREINIGUNG BADEN-WÜRTTEMBERG 2021)		Doktoren (Bundesland Salzburg Abteilung GIS, 2019a)	
	Städtische Behörden (GEOFABRIK, 2021; Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation)		Städtische Behörden (Stadtverwaltung Salzburg, 2019) Bundesbehörden (Bundesland Salzburg - IT-Abteilung, 2020)	
	Schulen, Geschäfte, Freizeiteinrichtungen, Krankenhäuser, Kindergärten (GEOFABRIK, 2021; Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation)		Schulen, Geschäfte, Freizeiteinrichtungen, Krankenhäuser, Kindergärten (OpenStreetMap, 2019)	
	Website der Universität Tübingen (EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT TÜBINGEN HOCHSCHULKOMMUNIKATION, 2020)		Universitäten (Bundesland Salzburg Abteilung GIS, 2019b)	
counting_stations.shp	Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation		Daten der Zählstationen (GPV -Günther Pichler GmbH, 2020b, GPV -Günther Pichler GmbH, 2020a, Paris Lodron University of Salzburg -Interfaculty Department Z_GIS, 2020)	
network.shp	Netzwerk (GEOFABRIK, 2021)		Netzwerk (ASFINAG et al., 2019)	
intersections.shp	Netzwerk (GEOFABRIK, 2021)		Netzwerk (ASFINAG et al., 2019)	
real_counts.shp	Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation		Daten der Zählstationen (GPV -Günther Pichler GmbH, 2020b, GPV -Günther Pichler GmbH, 2020a, Paris Lodron Universität Salzburg -Interfakultäre Abteilung Z_GIS, 2020)	
activity_probabilities.shp	Aus dem Salzburger Modell (Mobilitätserhebung (Bundesland Salzburg - Abteilung Verkehr, 2012))		Mobilitätserhebung (Bundesland Salzburg - Abteilung Verkehr, 2012)	
time_probabilities.shp	Aus dem Salzburger Modell (Mobilitätserhebung (Bundesland Salzburg - Abteilung Verkehr, 2012))		Mobilitätserhebung (Bundesland Salzburg - Abteilung Verkehr, 2012)	

mode_probabilities.shp	Aus dem Salzburger Modell (Mobilitätshebung (Bundesland Salzburg - Abteilung Verkehr, 2012))		Mobilitätshebung (Bundesland Salzburg - Abteilung Verkehr, 2012)	
districts.shp	Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation		Administrative Grenzen (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, 2019)	
city_outline.shp	Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation		Administrative Grenzen (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, 2019)	
region_outline.shp	Stadt Tübingen – Fachabteilung Geoinformation		Administrative Grenzen (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, 2019)	
duration probabilities (in the code): school	Aus dem Salzburger Modell (Leitfaden für Schulleitungen (Landesschulrat Salzburg, 2010))		Leitfaden für Schulleitungen (Landesschulrat Salzburg, 2010)	
duration probabilities (in the code): university	Aus dem Salzburger Modell (ECTS-Richtlinie an der Universität Salzburg (Paris Lodron Universität Salzburg, 2005))		ECTS-Richtlinie an der Universität Salzburg (Paris Lodron Universität Salzburg, 2005)	
duration probabilities (in the code): work	Aus dem Salzburger Modell (Sozialbericht (Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, 2017))		Sozialbericht (Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, 2017)	

Werden die Maßeinheiten der Vektordaten *work* und *home* (Salzburg) sowie *homeplaces* und *workplaces* (Tübingen) miteinander verglichen, so lässt sich feststellen, dass die Vektordaten im Salzburger Radverkehrsmodell eine höhere Auflösung sowie eine geringere Fläche eines einzelnen Bereiches (Hexagon oder Quadrat) aufweisen. So ist ein Quadrat bei den Vektordaten *home* $0,06\text{km}^2$, bei den Vektordaten *work* $0,01\text{km}^2$ groß. Die analogen Vektordaten in Tübingen, *homeplaces* und *workplaces* weisen hingegen eine Fläche von $0,23\text{km}^2$ auf und sind damit deutlich größer. Da die in den Quadraten und Hexagonen enthaltenen Informationen zuvor als Punkte digitalisiert wurden, ist der Unterschied auf das gesamte Modell als vernachlässigbar einzustufen.

In Österreich liegt das Renteneintrittsalter bei Männern bei 65 Jahren, bei Frauen bei 60 Jahren. Bis 2024 soll das Eintrittsalter der Frauen an das der Männer angeglichen werden (PENSIONSVERSICHERUNGSANSTALT 2021). In Deutschland beträgt das durchschnittliche Renteneintrittsalter der Frauen 2018 64,1 Jahre, bei Männern 64,0 Jahre (DEMOGRAFIEPORTAL 2021). Beim Vergleich der beiden Länder wird deutlich, dass in Österreich Männer später in Rente gehen können als Frauen und das Renteneintrittsalter für Frauen deutlich geringer ist, als in Deutschland. Dort (in Deutschland) gibt es zwischen Männern und Frauen hinsichtlich des Renteneintrittsalters sehr geringe Unterschiede mit einer Abweichung von ca. einem Monat. Dabei muss beim Vergleich der beiden Länder angemerkt werden, dass das Renteneintrittsalter in Österreich gesetzlich vorgegeben ist. Der Durchschnittswert in Deutschland ist ein Mittelwert, da Personen früher in Rente gehen (Frührente) oder auch nach der Rente noch weiterarbeiten.

In Salzburg umfasste die Region eine Fläche von 330km^2 , die Salzburger Kernstadt eine Fläche von 65km^2 (WALLENTIN & LOIDL 2015). Das Untersuchungsgebiet Tübingens ist mit 107km^2 mit den Ortsteilen und 45km^2 in der Kernstadt deutlich kleiner als in Salzburg. Wird der prozentuale Anteil der Kernstadt an der Region berechnet, so beträgt dieser in Salzburg 19,6969%, in Tübingen 42,0560%. Somit ist der urbane Anteil in Tübingen deutlich höher als der suburbane. Dies lässt die Vermutung zu, dass in Tübingen mehr Fahrten innerhalb der Kernstadt stattfinden und Salzburg möglicherweise durch deutlich mehr Pendelfahrten zwischen dem urbanen und suburbanen Gebiet geprägt ist.

Einen Arbeits- oder Studienplatz haben in der Stadt Salzburg 64000 Einwohner. Von diesen 64000 Einwohnern sind ca. 15000 Studenten, ca. 49000 sind demzufolge Arbeitnehmer. 2010 betrug der Modal Split des Radverkehrs in der Stadt durchschnittlich 16% (GUMPINGER et al. 2010). Es wird allerdings angenommen, dass der Modal Split des Radverkehrs bei Studenten deutlich höher ausfällt. Die erwartete Anzahl der radfahrenden Arbeitnehmer beträgt 16% von

49000. Das entspricht 7840 Radfahrern. Die Zahl der radfahrenden Studenten beträgt 30% von 15000 Personen und entspricht somit 4500 Radfahrer.

In beiden Modellen werden verschiedene Radfahrertypen unterschieden (z.B. Radfahrer, die mit dem Fahrrad zur Arbeit oder zur Uni fahren, Freizeitradler oder Radfahrer, die das Fahrrad für Erledigungen wie beispielsweise Einkäufe nutzen). VRTIC et al. (2007) fanden heraus, dass der Anteil des berufsbedingten Verkehrs für den motorisierten Individualverkehr in der Schweiz auf 44% geschätzt werden kann. Daraus ergibt sich ein Anteil von 56% des berufsbedingten unmotorisierten Individualverkehrs. LOIDL & WALLENTIN (2015) verteilten die 56% auf Studenten (21%; 4500) und Freizeitradler (35%; 7510). Der Begriff des Freizeitradlers umfasst hier Fahrten, die in der Freizeit zu Erholungs- oder Erledigungszwecken stattfinden und nicht mit einer beruflichen Tätigkeit verbunden sind. Die Anzahl der simulierten Agenten beträgt jedoch 21450 Radfahrer innerhalb von 24h.

In Tübingen sind 74850 Personen zu nennen, die in der Stadt wohnen bzw. arbeiten – davon arbeiten insgesamt 47221 Menschen, die restlichen 27629 studieren an der Universität Tübingen. 2018 betrug der Modal Split der Radfahrer in der Stadt 23%, aufgrund der räumlichen Lage der Universitätsgebäude ist dieser für Studenten mit 18,7% etwas geringer (WAGNER 2016). Somit beträgt die erwartete Zahl der „Arbeitsradler“ 23% von 47221 (= 10861 Radfahrer) und die Anzahl der „Studentenradler“ 18,7% von 27629 (=5167 Radfahrer).

Im Rahmen der SrV (System repräsentativer Verkehrsbefragungen)-Studie „Mobilität in Städten“ der TU Dresden wurde für die Stadt Tübingen untersucht, für welche Zwecke die Bürger welches Verkehrsmittel nutzen. Für Einkäufe, Dienstleistungen und in der Freizeit, nutzen 2013 29% der Bewohner Tübingens das Rad in der Freizeit oder zu Erledigungszwecken. Dies entspricht 21707 Personen. Aus dem Modell heraus ergeben sich 85651 (~86000) Personen, die als Agenten in Frage kommen. Wird der durchschnittliche Modal Split, bestehend aus dem der Arbeitsradler und dem de Studentenradler ermittelt, so ergibt sich ein Wert von 20,85%. Damit lassen sich die erwarteten Radfahrer in der Simulation ermitteln. Es ist zu erwarten, dass im Tübinger Radverkehr insgesamt ca. 17585 Radfahrer unterwegs sind. Werden die Angaben aus Abbildung 7 im Anhang addiert, so lässt sich feststellen, dass deutlich weniger Radfahrer (74) in der Simulation vorhanden sind.

Das Salzburger und Tübinger Radverkehrsmodell unterscheidet sich zum einen von der Einwohnerzahl (Salzburg: ca. 180 000; Tübingen: ca. 90 000), von der Größe des Untersuchungsgebietes). Zum anderen von der Datenverfügbarkeit und der Hochwertigkeit der Daten, von der Anzahl der Radverkehrszählstationen und von der Auflösung der Daten der Radverkehrszählstationen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die fehlende Spezifikation des Salzburger Radverkehrsmodells bei den Vektordaten *homes*, die ungenaue Datenlage bei der Datenaufbereitung für das Tübinger Radverkehrsmodell sowie der Routingfehler bei der Durchführung des Experimentes als wesentliche Aspekte genannt werden können, warum die räumliche Übertragung im Rahmen dieser Masterthesis fehlschlug. Unterstrichen wird diese Aussage durch kleinere Anpassungen wie das Koordinatensystem in den Tübinger Vektordaten sowie in der GAMA-Plattform oder der Modellcode, damit die Attribute des Routingnetzwerkes und im Modell zueinander passen.

6 Diskussion

Zunächst soll die Vorgehensweise kritisch beleuchtet werden. Die zur Überprüfung der These ausgewählte Vorgehensweise bestand aus den folgenden Schritten. In einem ersten Schritt wurde das Salzburger Radverkehrsmodell vorgestellt, welches als Grundlage für das Tübinger Radverkehrsmodell diente. Mit dem Wissen der wesentlichen Charakteristika des Salzburger Radverkehrsmodells erfolgte die Vorstellung der Stadt und des Tübinger Radverkehrsmodells. Ausführlich beleuchtet wurde die Datenaufbereitung, indem auf die Erstellung der insgesamt sieben Vektordaten eingegangen wurde. Nachdem die Daten aufbereitet wurden, konnten sie in das Tübinger Radverkehrsmodell importiert werden. Das Ergebnis der Übertragung des Salzburger Radverkehrsmodells auf die Stadt Tübingen wurde dargestellt, mögliche Fehlerursachen dokumentiert.

Die Vorgehensweise dieser Arbeit erwies sich als zielführend, die operativen Teilfragen konnten beantwortet werden. Bei der Präsentation des Salzburger Radverkehrsmodells wurden die Besonderheiten herausgearbeitet, die bei der Entwicklung und Übertragung auf das Tübinger Radverkehrsmodell berücksichtigt werden. Die Ergebnisse aus Kapitel 3 beantworten die erste operative Teilfrage und liefern weitere Erkenntnisse zur Bearbeitung der Leitfrage.

Bevor auf die eigentliche Übertragung eingegangen wurde, wurde anhand der drei Bedingungen DALYS (1985) für eine räumliche Übertragung die Eignung des Salzburger Radverkehrsmodells geprüft. Nachdem das Ergebnis positiv ausfiel, erfolgte mit der Übertragung des Salzburger Radverkehrsmodells das zentrale Element zur Beantwortung der Forschungsfrage. Die Ergebnisse aus Kapitel 4.4. beantworten die zweite operative Teilfrage. Mit der dritten operativen Teilfrage wurden in Kapitel 5 die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden agenten-basierten Radverkehrsmodellen herausgearbeitet. Die vierte operative Teilfrage (Sind die Ergebnisse des Tübinger Radverkehrsmodells aussagekräftig genug, um die Leitthese zu beantworten?) bezieht sich auf Kapitel 5 und wurde ebenfalls darin thematisiert. Mit der letzten und fünften operativen Teilfrage (Ist das Salzburger Radverkehrsmodell dazu geeignet, auch in anderen Städten angewendet zu werden?) soll ein Ausblick auf weitere Forschungsthemen gegeben werden. Auf sie wurde ebenfalls in Kapitel 5 Bezug genommen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die dargestellte Vorgehensweise dazu eignet, ein agenten-basierten (Radverkehrs-) Modell auf ein anderes Untersuchungsgebiet zu übertragen. Anhand der drei Bedingungen DALYS (1985) für die räumliche Übertragbarkeit des Salzburger Radverkehrsmodell auf die Stadt Tübingen soll im Folgenden nochmals kritisch beleuchtet werden, ob die Bedingungen, wie sie in Kapitel 2.2 dargestellt wurden, beantwortet werden können. Hinsichtlich der Relevanz kann keine Aussage getroffen werden, da das lokale Modell

im Anwendungskontext nicht durchgeführt werden konnte. Nach der Übertragung kann die Frage nach der Gültigkeit nur zum Teil beantwortet werden. Es wurde deutlich, dass an manchen Stellen wie den Vektordaten *homes* das Modell nicht ausreichend spezifiziert ist. Es ist davon auszugehen, dass der Routingfehler nicht mit einer fehlenden Dokumentation im Modellcode oder im ODD-Protokoll zusammenhängt. Die Eignung des Salzburger Radverkehrsmodell für eine Anwendung im Anwendungskontext kann nicht abgesprochen werden. Würde der Routingfehler behoben werden, würde die Antwort auf die Frage nach der Eignung eine andere sein.

Die Problematik der Datenverfügbarkeit darf nicht unerwähnt bleiben. Im Vergleich zu Österreich bzw. Salzburg lagen die verschiedensten Geodaten nur sehr zerstückelt und überwiegend nicht für die Öffentlichkeit zugänglich vor. Die teils zusätzliche Kartierung und die aufwändigere Datenbeschaffung sind als Faktoren zu nennen, die bei zukünftigen Arbeiten mit der Lage des Untersuchungsgebietes in Baden-Württemberg berücksichtigt werden sollten. Kennwerte wie die Wahrscheinlichkeiten wurden als konstante Parameter aus dem Salzburger Radverkehrsmodell übernommen. Zu überprüfen sei, ob und inwiefern sich diese Hilfsgrößen ebenfalls auf eine andere Stadt übertragen lassen.

Wie bereits erwähnt, konnte die Ursache des Routingfehlers nicht abschließend geklärt werden und bleibt damit offen. Mögliche Ursachen können Fehler im Datenbankskript, die Ungenauigkeit der OSM-Daten oder Anwendungsfehler sein. Eine Behebung des Routingfehlers kann die Frage nach der Übertragbarkeit des Modells unter einem anderen Aspekt beantworten.

Zu lösen wäre ebenfalls das in Kapitel 5 thematisierte Problem der zu geringen Anzahl an Radfahrern in der Simulation. Dieses Thema konnte aufgrund der Undurchführbarkeit des Experimentes und des Modells nicht klargestellt werden und bietet weiteren Forschungsbedarf. Außerdem müsste zur Erzielung genauerer Werte das Datenbank-Skript als Grundlage des Routings sich stärker an den örtlichen Gegebenheiten orientieren. Dazu zählt u.a. die Ermittlung der Höhenangaben. So nimmt ein Radfahrer nur eine bestimmte Anzahl an Höhenmeter für eine Pendelstrecke in Kauf und vermeidet längere Steigungen. Bei Freizeitfahrten spielen längere Steigungen eine unbedeutendere Rolle.

Im Salzburger Radverkehrsmodell wird beschrieben, dass das Wetter für das Radfahren bei der Auswahl des Validierungstages geeignet war – die genauen Wetterverhältnisse sonnig, wolkig, windig – sowie die Witterungsverhältnisse (ein Sonnentag in einer Reihe an Regentagen) werden allerdings nicht genannt. In diesem Kontext stellt sich die Frage, ob im Salzburger Radverkehrsmodell auch ein Tag im Frühjahr genauso zur Validierung der simulierten Daten

geeignet wäre. Sollte das Salzburger Radverkehrsmodell weiter verbessert werden, so wäre es gut, dabei die x-Achse im Diagramm „Aktive Radfahrer nach Fahrtzweck“ anzupassen. Die Umwandlung der Zeitangabe in der x-Achse ist kompliziert und könnte vereinfacht werden. Positiv ist anzumerken, dass im Salzburger Radverkehrsmodell für Radfahrer relevante Aspekte wie der Belag, die Anzahl der Fahrspuren oder das Vorhandensein der Radverkehrsinfrastruktur (bei beiden Modi, der sichersten und kürzesten Route) berücksichtigt werden.

7 Ausblick und Fazit

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargelegt, wurde die These bestätigt, dass sich ein agenten-basiertes Modell im Rahmen dieser Masterthesis nicht auf ein anderes Studiengebiet übertragen lässt, ohne es neu kalibrieren zu müssen. Dieses Ergebnis kann im Rahmen dieser Arbeit mit der ungenauen Spezifikation der Vektordaten *homes* und *work* des Salzburger Radverkehrsmodells, dem Routingfehler bei der Durchführung des Experimentes sowie der ungenaueren Datenlage für das Tübinger Radverkehrsmodell begründet werden. Zu betonen ist hierbei, dass konkret das Salzburger Radverkehrsmodell sich im Rahmen dieser Masterthesis nicht auf ein anderes Studiengebiet am Beispiel der Stadt Tübingen übertragen lässt. Die generelle Eignung eines agenten-basierten Radverkehrsmodells zur Übertragung auf ein anderes Untersuchungsgebiet kann auch mit der negativen Antwort auf die Forschungsfrage nicht abgesprochen werden.

Generell dürfen die Schwächen von Verkehrsmodellen im Radverkehr nicht unerwähnt bleiben. So basieren Modelle grundsätzlich auf generalisierten Angaben und geben die realen Bedingungen nur eingeschränkt wieder. Zusätzlich ist die Modellierung des Radverkehrs im Vergleich zum MIV deutlich komplexer, da Radfahrer eben keine homogene Masse sind, die sich nach festgelegten Regeln wie beispielsweise der Fahrtrichtung oder der Geschwindigkeit verhalten (FENTON et al. 2020).

Das Salzburger Radverkehrsmodell basiert in seiner aktuellen Version auf theoretischen Annahmen, für den Radverkehr relevante Faktoren wie beispielsweise die Lage von Fahrradabstellanlagen sowie deren Zustand an den Zielorten werden bislang nicht berücksichtigt. Denn in der Praxis ist es häufig so, dass Radfahrer ohne das Wissen, wo sie ihr Rad abschließen können, mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit eine Strecke zurücklegen. Außerdem sinkt die Motivation, das Fahrrad anstelle eines sonstigen Verkehrsmittels zu verwenden, wenn ein Fahrrad an einem Zielort schon einmal gestohlen wurde.

Bislang werden Personen, die im Schichtdienst arbeiten, in der aktuellen Version des Salzburger Radverkehrsmodells nicht explizit genannt. Daten der Radverkehrszählstationen sind in der Regel 24 Stunden, sieben Tage die Woche verfügbar. Es kann vermutet werden, dass Personen im Schichtdienst die Ergebnisdarstellung beeinflussen. Ihr Einfluss auf die Resultate des Modells wären spannend. Möglich wäre es, sie in die Modellparameter mit einfließen zu lassen.

E-Bikes bleiben im Salzburger Radverkehrsmodell ebenso wie Lastenfahrräder unberücksichtigt – es bleibt offen, warum dies bislang noch nicht geschah, da zunehmend E-Bikes und Lastenräder in den Städten unterwegs sind. Mit einem E-Bike können längere

Strecken zurückgelegt werden, größere Höhenunterschiede und Steigungen einfacher überwunden werden. Mit Lastenrädern lassen sich Kinder oder Einkäufe problemlos transportieren und potentielle Auto-Fahrten dadurch eingespart werden. Möglicherweise kann an einer Radverkehrszählstation nicht zwischen einem E-Bike, einem Lastenrad und einem „normalen“ Fahrrad unterschieden werden. Doch die Auswirkungen von E-Bikes und Lastenrädern auf das Salzburger Radverkehrsmodell wären spannend zu beobachten.

Weiterer Forschungsbedarf besteht außerdem bei der Frage der Übertragbarkeit des Salzburger Radverkehrsmodells auf eine Kleinstadt bzw. eine Gemeinde. Möglicherweise ergeben sich durch das Untersuchungsgebiet eines rein ruralen Gebietes andere Forschungsergebnisse als im Salzburger Radverkehrsmodell vorliegenden urbanen und suburbanen Gebieten. Darüber hinaus finden auch in ländlicheren Gebieten Radfahrten statt. Die Herausforderung ist hierbei Radverkehrszählstationen zu finden.

Offen bleibt die Frage hinsichtlich der Modellparameter und ihren Auswirkungen auf die Ergebnisse des agenten-basierten Radverkehrsmodells. Wie äußern sich die Ergebnisse, wenn die Modellparameter auf die jeweilige Kommune angepasst werden? Gibt es Unterschiede im Vergleich zu dem agenten-basierten (Radverkehrs-)Modell der gleichen Stadt, wenn die Modellparameter nicht kalibriert werden? Ob dies am Beispiel der Stadt Tübingen oder einer anderen Gemeinde überprüft wird, ist dabei weniger relevant.

Zu beleuchten ist ebenfalls die Frage wie viele Radverkehrszählstationen minimal für das Modell notwendig sind, um möglichst valide Werte zu erzielen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der Übertragbarkeit auf kleinere Städte und Gemeinden ein nicht unwesentlicher Aspekt. Wohingegen der Radverkehr in größeren Städten mit einer höheren Wahrscheinlichkeit quantifiziert wird, sinkt die Wahrscheinlichkeit in ländlicheren Regionen.

Es bleibt außerdem offen, ob das Salzburger Radverkehrsmodells auf eine ähnlich große Stadt in Österreich übertragen werden kann. Diese Frage wird insbesondere vor dem Hintergrund einer besseren Vergleichbarkeit der Datenverfügbarkeit gestellt. Möglicherweise lässt sich das Salzburger Modell mit einer höheren Wahrscheinlichkeit übertragen, da Unterschiede in der Kultur, der Mentalität und den nationalen Bestimmungen in einem geringeren Maße berücksichtigt werden müssen.

Wie bereits im Literaturüberblick thematisiert, gibt es aktuell nur wenige agenten-basierte Modelle, die sich mit dem Radverkehr befassen – unabhängig davon, ob sich das Untersuchungsgebiet in Deutschland, Österreich, Europa oder darüber hinaus befindet. Weitere Studien können dazu beitragen, dass das Wissen, wo und wann sich Radfahrer aus welchen Gründen in einem (geographischen) Raum bewegen, zunimmt. Durch zusätzliche Forschungen

im Bereich der Transferierbarkeit von agenten-basierten Modellen im Radverkehr können Grundlagen geschaffen werden, die zukünftige Übertragungen vereinfachen – so können beispielweise auch in der Praxis leichter Radverkehrsmodelle generiert werden und auch eine Erleichterung für zukünftige Radverkehrsplanungen darstellen. Radverkehrszählungen können mit agenten-basierten Modellen vereinfacht werden – eine Chance für Städte und Kommunen, den Radverkehr zu fördern. Dem kann hinzugefügt werden, dass es an Kriterien fehlt, anhand derer begründet werden kann, wenn ein agenten-basiertes Modell nicht übertragen werden kann.

Ein Vergleich der Ergebnisse aus den agenten-basierten Radverkehrsmodellen mit wissenschaftlichen Untersuchungen z.B. der SrV-Studie der TU Dresden („Mobilität in Städten“) oder verkehrlichen Untersuchungen von Verkehrsplanern könnte weitere Erkenntnisse darüber geben, ob die Ergebnisse vergleichbar sind und wo es hinsichtlich der Quantifizierung der Radfahrer zu Unterschieden kommt.

Spannend zu beobachten bleibt, inwiefern sich real-time-Daten in agenten-basierte Modelle integrieren lassen, um aktuelle Vorhersagen zu machen (HEPPENSTALL et al. 2021). Sollte dies möglich sein, könnten die Ergebnisse beispielsweise in eine Smart-City-Kampagne einer Kommune einfließen. Bürger könnten so auf einer kommunalen Website sehen, welche Radwege gerade besonders frequentiert sind und auf Alternativrouten ausweichen. Ansätze, wie sie für den MIV bereits heute schon umgesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- ABAR, S.; THEODOROPOULOS, G. K.; LEMARINIER, P. & O'HARE, G. M.P. 2017. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*, 24, 13-33.
- ABDELWAHAB, W. M. 1991. Transferability of Intercity Disaggregate Mode Choice Models in Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(1), 20-26.
- BAQUERI, S.F.A.; ADNAN, M.; KOCHAN, B.; BELLEMANS, T. 2019. Activity-based model for medium-sized cities considering external activity travel: Enhancing FEATHERS framework. *Future Generation Computer Systems* 96, 51-63.
- BADLAND, H.; WHITE, M.; MACAULAY, G.; EAGLESON, S.; MAVOA, S.; PETTIT, C. & GILES-CORTI, B. 2013. Using simple agent-based modelling to inform and enhance neighbourhood walkability. *International Journal of Health Geographics*, 12(58), 1-10.
- BALMER, M.; RIESER, M.; MEISTER, K.; CHARYPAR, D.; LEFEBVRE, N.; NAGEL, K. 2009. Matsim-t: Architecture and simulation times. In: BAZZAN, Ana & KLÜGL, Franziska (Hrsg.): *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*, 57-78.
- BAZZAN, A. L.C. & KLÜGL, F. 2013. A review on agent-based technology for traffic and transportation. *The Knowledge Engineering Review*, 29(3), 375-403.
- BEN-AKIVA, M.E. 1981. Issues in transferring and updating travel-behavior models. In: STOPHER, P.R., MEYBURG, A.H., BROG, W. (Hrsg.) *New horizons in travel behavior research*. Lexington Books, Lexington, 665-686.
- BEN-AKIVA, M. & BOLDOC, D. 1987. Approaches to Model Transferability and Updating. The Combined Transfer Estimator. In: *Transportation Research Record*, 1139, 1-7.
- BENENSON, I.; MARTENS, K. & BIRFIR, S. 2008. PARKAGENT: An Agent-Based Model of Parking in the City. In: *Computers, Environments and Urban systems*, 32 (1), 431-439.
- COTRUS, A. V.; PRASHKER, J. N. & SHIFAN, Y. 2005. Spatial and temporal transferability of trip generation demand models in Israel. *Journal of Transportation and Statistics*, 8, 37-56.
- CZURA, G.; TAILLANDIER, P.; TRANOUEZ, P. & DAUDÉ, É. 2015. Mosaiic: City-level agent-based traffic simulation adapted to emergency situations. In: TAKAYASU, H.; ITO, N.; NODA, I.; TAKAYASU, M. (Hrsg.): *Proceedings of the International Conference on Social Modeling and Simulation, plus Econophysics Colloquium 2014*, 265-274.
- DALY, A. 1985. *A Study of Transferability of Disaggregate Mode Choice Models from Grenoble to Nantes*. Cambridge Systematics Europe, the Hague, Netherlands.
- DAVIDSON, W.; DONNELLY, R.; VOVSHA, P.; FREEDMAN, J.; RUEGG, S.; HICKS, J.; CASTIGLIONE, J. & PICADO, R. 2007. Synthesis of first practices and operational research approaches in activity-based travel demand modelling. *Practice*, 41(5), 464-488.
- DEMOGRAFIEPORTAL. 2021. Renteneintrittsalter. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.demografieportal.de/DE/Fakten/renteneintrittsalter.html>. [Zugriff am 02.05.2021].
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR URBANISTIK. 2017. *Den Radverkehr realitätsnah abbilden. Digitale Tools für die Radverkehrsplanung* [Online]. Verfügbar unter: [81](https://nationaler-</p></div><div data-bbox=)

- radverkehrsplan.de/de/forschung/schwerpunkthemen/digitale-tools-fuer-die-radverkehrsplanung. [Zugriff am 28.03.2021].
- DEUTSCHE RENTENVERSICHERUNG. 2019. *Rentenatlas2019. Die Deutsche Rentenversicherung in Zahlen, Fakten und Trends.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/Rente/Kommission-Verlaesslicher-Generationenvertrag/deutsche-rentenversicherung-rentenatlas-2019.pdf?jsessionid=FA6F09D6D99CCFA9720B2602559600AF.delivery2-replication?__blob=publicationFile&v=1. [Zugriff am 28.03.2021].
- ECO COUNTER.2021b. *Hansestadt Rostock. 12 Fahrradzahlstellen.* [Online]. Verfügbar unter: <http://www.eco-public.com/ParcPublic/?id=888>. [Zugriff am 28.03.2021].
- ECO COUNTER. 2021c. *Stadt Freiburg Fahrradzahlstellen. 4 Fahrradzahlstellen.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eco-public.com/ParcPublic/?id=751>. [Zugriff am 28.03.2021].
- ECO COUNTER. 2021d. *Stadt Heidelberg. 15 Fahrradzahlstellen.* [Online]. Verfügbar unter: <http://www.eco-public.com/ParcPublic/?id=4206>. [Zugriff am 28.03.2021].
- ENGLER, B. 2018. *Jahresbericht der Eberhard-Karls-Universität Tübingen 01. Januar bis 31. Dezember 2018.* [Online]. Verfügbar unter: https://uni-tuebingen.de/index.php?eID=tx_securedownloads&p=3&u=0&g=0&t=1594984123&hash=0d1c2eb95adf72ffd6b983db0ecd70e2765d107e&file=/fileadmin/Uni_Tuebingen/Allgemein/Dokumente/Jahresberichte/Jahresbericht_2018_de_web.pdf. [Zugriff am 28.03.2021].
- EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT TÜBINGEN. 2018. *Studierendenstatistik. Wintersemester 2018/2019.* [Online]. Verfügbar unter: https://uni-tuebingen.de/index.php?eID=tx_securedownloads&p=597&u=0&g=0&t=1599162580&hash=aecc3869a81e119e86dd05664c223972d682a2e5&file=/fileadmin/Uni_Tuebingen/Dezernate/Dezernat_II/studentenstatistiken/statistik-ws-20182019.pdf. [Zugriff am 28.03.2021].
- EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT TÜBINGEN, HOCHSCHULKOMMUNIKATION. 2020. *Orts- und Lagepläne. Universitätseinrichtungen und Kliniken Tal/Berg.* [Online]. Verfügbar unter: https://uni-tuebingen.de/index.php?eID=tx_securedownloads&p=655&u=0&g=0&t=1594028707&hash=55f19806a8407cac5753b4b00723c7d97716c766&file=/fileadmin/Uni_Tuebingen/Allgemein/Dokumente/2004-15_Lageplan_vorl%C3%A4ufig_f%C3%BCr_WEB_2020-05-05_web.pdf. [Zugriff am 28.03.2021].
- 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* 40, 1-13.
- FENTON, B.; NASH, A. & WEDDERBURN, M. 2020. *Radfahrer, Fußgänger und Staus. Leitfaden zur Verwendung von der multimodalen Bewertungskriterien von FLOW für Planer.* [Online]. Verfügbar unter: http://h2020-flow.eu/fileadmin/user_upload/flow_D_3.5_Implementers_Guide_multimodal_approach_DE.pdf. [Zugriff am 03.10.2020].
- FOX, J. & HEES, S. 2010. Review of Evidence for Temporal Transferability of Mode–Destination Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2175, 74-83.
- FOX, J.; DALY, A.; HEES, S. & MILLER, E. 2014. Temporal transferability of models of mode-destination choice for the Greater Toronto and Hamilton Area. *The Journal of Transport and Landuse*, 7(2), 41-62.

- FUJII, H.; UCHIDA, H. & YOSHIMURA, S. 2017. Agent-based simulation framework for mixed traffic of cars, pedestrians and trams. *Transportation Research Part C*, 85, 234-248.
- GALAN, J. M., IQUIERDO, L. R. 2005. Appearances can be deceiving: Lessons Learned Re-Implementing Axelrod's 'Evolutionary Approach to Norms'. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 8 (3) :2.
- GAMA PLATFORM. 2021. *Introduction*. [Online]. Verfügbar unter: <https://gama-platform.github.io/wiki/Introduction> [Zugriff am 01.05.2021].
- GEOFABRIK. 2021. *Download OpenStreetMap data for this region. Regierungsbezirk Tübingen*. [Online]. Verfügbar unter: <http://download.geofabrik.de/europe/germany/baden-wuerttemberg/tuebingen-regbez.html>. [Zugriff am 28.03.2021].
- GERIKE, R.; HUBRICH, S.; LIEBKE, F.; WITTIG, S.; WITWER, R. 2020. *Sonderauswertung zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten – SrV 2018“*. *Städtevergleich*. [Online]. Verfügbar unter: https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/ressourcen/dateien/SrV2018_Staedtevergleich.pdf?lang=de. [Zugriff am 28.03.2021].
- GOOGLE MAPS. 2021. *Google Maps*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.google.de/maps> [Zugriff am 08.05.2021].
- GRIMM, V.; BERGER, U.; DE ANGELIS, D. L.; POLHILL, J. G.; GISKE, J.; RAILSBACK, S. F. 2010. The odd Protocol. A Review and First Update. *Ecological Modelling*, 221, 2760-2768.
- GUMPINGER, G., THALER, R. & EDER, M. 2010. Studie – Radfahren und Einkaufen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, U. U.W. Wien, CIMA Beratung + Management GmbH.
- GUNN, H. F.; BEN-AKIVA, M. E. & BRADLEY, M. A. 1985. Tests of the Scaling Approach to Transferring Disaggregate Travel Demand Models. *Transportation Research Record*, 1037, 21-30.
- HAAG, M.; HENKEL, A.; HAHN, O.; HOFFMANN, A. 2011. *Mobilität 2030 Tübingen – Abschlussbericht der Pilotphase im Projekt „Nachhaltiger Stadtverkehr Tübingen“*. *Kaiserslautern* [Online]. Verfügbar unter: https://www.tuebingen.de/Dateien/mobilitaet_2030_tuebingen.pdf. [Zugriff am 28.03.2021].
- HANSEN, S. 1981. Pro cross-cultural transferability. In: STOPHER, P.R., BROG, W., MEEYBURG, A.H. (Hrsg.) *New horizons in travel behavior research*. Lexington Books, Lexington, 7-29.
- HANSESTADT ROSTOCK. 2020. *Bevölkerungsentwicklung nach Stadtbereichen*. [Online]. Verfügbar unter: https://rathaus.rostock.de/de/bevoelkerungsentwicklung_nach_stadtbereichen/254079. [Zugriff am 28.03.2021].
- HÄUSSER, O. H. 2020. *Hier werden künftig Radler gezählt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.stuttgart-rohr-hier-werden-kuenftig-radler-gezaehlt.30dadd93-a80f-4029-b24a-c54e3ef84f01.html>. [Zugriff am 28.03.2021].
- HECKBERT, S.; BAYNES, T.; REESON, A. 2010. Agent-based modeling in ecological economics. *Annals of the New York Academy of Science*, 1185, 39-53.
- HEPPENSTALL, A.; MALLESON, N. & CROOKS, A. 2016. "Space, the Final Frontier". How Good are Agent-Based Models at Simulating Individuals and Space in Cities? *Systems*, 4 (1), 9.
- HEPPENSTALL, A.; CROOKS, A.; MALLESON, N.; MANLEY E; G.; BATTY, M. 2021. Future Developments in Geographical Agent-Based Models. Challenges and Opportunities. *Geographical Analysis*, 53, 76-91.
- HOCHSCHULE FÜR KIRCHENMUSIK. 2021. *Lehrende der Hochschule* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kirchenmusikhochschule.de/hochschule/ueber-uns/lehrende/>. [Zugriff am 28.03.2021].

- HORNI, A.; NAGEL, K. & AXHAUSEN, K. W. 2016. The Multi-Agent Transport Simulation MATSim. London: ubiquity press.
- JAKOB, M. & MOLER, Z. 2013. Modular framework for simulation modelling of interaction-rich transport systems. *Proceedings of the 16th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC 2013)*.
- KADDOURA, I.; LAUDAN, J.; ZIEMKE, D. & NAGEL, K. 2020. Verkehrsmodellierung für das Ruhrgebiet. Simulationsbasierte Szenariountersuchung und Wirkungsanalyse einer verbesserten regionalen Fahrradinfrastruktur. In: PROFF, Heike (Hrsg.) Neue Dimensionen der Mobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte, 361-386.
- KARASMAA, N. & PURSULA, M. 1997. Empirical Studies of Transferability of Helsinki Metropolitan Area Travel Forecasting Models. *Transportation Research Record*, 1607, 38-44.
- KARASMAA, N. 2007. Evaluation of transfer methods for spatial travel demand models. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41 (5), 411-427.
- KASSENÄRZTLICHE VEREINIGUNG BADEN-WÜRTTEMBERG. 2021. *Arzt suche. Ergebnisse Ihrer Arzt suche.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.arzt such e-bw.de/index.php?suchen=1&sorting=name&direction=ASC&arzt gruppe=alle&id_fach gruppe=&vorna me=&nachname=&plz=&ort=T%C3%BCbingen&strasse=&landkreis=. [Zugriff am 28.03.2021].
- KAZIYEVA, D.; WALLENTIN, G.; LOIDL, M.; MOHR, S. & NEUWIRTH, C. 2018a. Reviewing Software for Agent-based Bicycle Flow Models. *GI_Forum* 2018 (1), 291-296.
- KAZIYEVA, D.; LOIDL, M.; WALLENTIN, D.; ZAGEL, B. 2018b. Simulating bicycle flows in Salzburg, Austria. [Online]. https://www.researchgate.net/publication/327931936_Simulating_bicycle_flows_in_Salzburg_Austria [Zugriff am 06.06.2021].
- KAZIYEVA, D.; WALLENTIN, G. & LOIDL, M. 2021a. "Bicycle model" (Version 2.0.0). CoMSES Computational Model Library [Online]. Verfügbar unter: <https://www.comses.net/codebases/768182a3-cb7c-4d93-9c27-c42d878bb2ea/releases/2.0.0/>. [Zugriff am 28.03.2021].
- KAZIYEVA, D.; WALLENTIN, G. & LOIDL, M. 2021b. Simulating Spatio-Temporal Patterns of Bicycle Flows with an Agent-Based Model. *International Journal of Geo-Information*, 10, 88.
- KIEU L-M; MALLESON N; HEPPENSTALL A. 2020. Dealing with uncertainty in agent-based models for short-term predictions. *Royal Society open science*, 7: 191074.
- KLÜGL, F. & RINDSFÜSER, G. 2007. Large-Scale Agent-Based Pedestrian Simulation. *MATES '07: Proc. of the 5th German Conference on Multiagent Systems Technology*, 2007, 145-156.
- KOPPELMAN, F. & WILMOT, C. 1982. Transferability Analysis of Disaggregate Choice Models. *Transportation Research Record 895*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 18-24.
- KOPPELMAN, F. S.; KUAH, G.-K. & WILMOT, C. G. 1985. Transfer Model Updating with Disaggregate Data. *Transportation Research Record*, 1037, 102-107.
- KRAJZEWICZ, D.; ERDMANN, J.; BEHRISCH, M.; BIEKER L. 2012. Recent development and applications of SUMO - simulation of urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3&4), 128-138.
- LANDESHAUPTSTADT SAARBÜCKEN 2019. *Saarbrücken in Zahlen 2020*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.saarbruecken.de/media/download-565eb062d378d>. [Zugriff am 28.03.2021].

- LANDESHAUPTSTADT SCHWERIN 2018. *Fahrrad-Dauerzählstellen im Stadtgebiet eingerichtet - Entwicklung des Radverkehrs wird kontinuierlich erfasst und dokumentiert* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.schwerin.de/news/566a83dc-9ad6-11e8-b4a9-1967de695b51/>. [Zugriff am 28.03.2021].
- LANDESHAUPTSTADT SCHWERIN (2019): *Statistisches Jahrbuch der Landeshauptstadt Schwerin* [Online]. Verfügbar unter: https://www.schwerin.de/export/sites/default/.galleries/Dokumente/Stadtporraet/Statistik-Jahrbuch-2018_r.pdf. [Zugriff am 28.03.2021].
- LANDESKUNDLICHES INFORMATIONSSYSTEM BADEN-WÜRTTEMBERG 2021. *Tübingen*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.leo-bw.de/web/guest/detail-gis/-/Detail/details/ORT/labw_ortslexikon/16197/T%C3%BCbingen. [Zugriff am 28.03.2021].
- LEAO, S. & PETTIT, C. 2017. Mapping Bicycling Patterns with an Agent-Based Model, Census and Crowdsourced Data. In: NAMAZI-RAD, Mohammad-Reza; PADGHAM, Lin; PEREZ, Pascal; NAGEL, Kai; BAZZAN, Ana (Hrsg.): *Agent Based Modelling of Urban Systems. First International Workshop, ABMUS 2016). Lecture Notes in Computer Science*, vol 10051. Springer, Cham, 112-128.
- LENZ, G.; RUDLOFF, C. & ULM, M. 2016. *Agentenbasiertes Verkehrsmodell Vorarlberg*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Gernot_Lenz/publication/320057367_Agentenbasiertes_MATSim-Vekehrsmodell_Vorarlberg/links/59cb5d66aca272bb050c14a4/Agentenbasiertes-MATSim-Vekehrsmodell-Vorarlberg.pdf. [Zugriff am 28.03.2021].
- LOIDL, M. 2015. Using OSM building footprints to disaggregate OGD census data. [Online]. Verfügbar unter: <https://gicycle.wordpress.com/2015/08/17/using-osm-building-footprints-to-disaggregate-ogd-census-data/>. [Zugriff am 16.05.2021].
- LOIDL, M.; WAGNER, A.; KAZIYEVA, D. & ZAGEL, B. 2020. Bicycle Observatory – eine räumlich differenzierte, kontinuierliche Beobachtung der Fahrradmobilität. *AGIT: Journal für Angewandte Geoinformatik*, 2020(6), 263-271.
- MAILLIG, N.; KAGERBAUER, M. & VORTISCH, P. 2013. mobiTopp – A Modular Agent-based Travel Demand Modelling Framework. *Procedia Computer Science* 19, 854-859.
- MANZO, G. 2014. The potential and limitations of agent-based simulation. Translated by Toby Matthews. *Revue française de sociologie*. 4, Vol. 55, 653-668.
- MCCOOMB, L. A. 1986. Analysis of the Transferability of Disaggregate Demand Models Among Ten Canadian Cities. *Transportation Forum*, 3 (1), 19-28.
- MEADOWS, M. & CLIFF, D. 2012. Reexamining the Relative Agreement Model of Opinion Dynamics. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 15 (4). [Online]: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/15/4/4.html>.
- NETLOGO. 2020. Download any Netlogo Version. [Online]. Verfügbar unter: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/oldversions.shtml>. [Zugriff am 01.05.2021].
- NOWROUZIAN, R. & SRINIVASAN, S. 2012. Empirical Analysis of Spatial Transferability of Tour-Generation Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2302, 14-22.
- PINJARI, R.; SIKDER, S.; SRINIVASAN, S.; NOWROUZIAN, R. 2013. Spatial Transferability of Travel Forecasting Models. A Review and Synthesis. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 5(2-3), 104-128.

- PENSIONSVERSICHERUNGSANSTALT. 2021. Alterspension. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pv.at/cdscontent/?contentid=10007.707664&portal=pvportal>. [Zugriff am 02.05.2021].
- PETRY, U.; PETRY, S.; ELFFERDING, S. & HUTH, M. 2010. *Radverkehrskonzept Tübingen. Abschlussbericht*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tuebingen.de/Dateien/radverkehrskonzept.pdf>. [Zugriff am 28.03.2021].
- RATHAUS DER STADT TRIER. 2020. *Bevölkerung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.trier.de/rathaus-buergerin/trier-in-zahlen/bevoelkerung-uebersicht/>. [Zugriff am 28.03.2021].
- RICHIARDI, M., LEOMBRUNI, R., SAAM, N. J., SONNESSA, M. 2006. A Common Protocol for Agent-Based Social Simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 9 (1): 15. Online: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/9/1/15.html>.
- RONALD, N.; STERLING, L. & KIRKEY, M. 2007. An agent-based approach to modelling pedestrian behaviour. *International Journal of Simulation*, 8 (1), 25-38.
- ROSE, J.; LIGTENBERG, A. & VAN DER SPEK, S. 2014. Simulating pedestrians through the innercity: An agent-based approach. *Proceedings of the Social Simulation Conference (SSC'14)*. Barcelona.
- RYBARCZYK, G. 2014. Simulating bicycle wayfinding mechanisms in an urban environment. *Urban Planning Transport Research*, 2 (1), 89-104.
- SANTOSO, D. S. & TSUNOKAWA, K. 2005. Transferability and updating analysis of mode choice model between two developing countries. Predictive performance point of view. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 173-185.
- SENATSV ERWALTUNG FÜR UMWELT, VERKEHR UND KLIMASCHUTZ. 2010. *Zählstellen und Fahrradbarometer: Fahrradverkehr in Zahlen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.berlin.de/sen/uvk/verkehr/verkehrsplanung/radverkehr/weitereradinfrasturktur/zaehlstellen-und-fahrradbarometer/#dauer>. [Zugriff am 28.03.2021].
- SKIDER, S. 2013. Spatial Transferability of Activity-Based Travel Forecasting Models. PhD Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, University of South Florida.
- SNIZEK, B. 2015. Mapping cyclist's experiences and agent-based modelling of their wayfinding behaviour. PhD Thesis, Department of Geosciences and Natural Resource management, University of Copenhagen.
- SORIGUERA, F.; CASADO, V. & JIMÉNEZ, E. 2018. A simulation model for public bike-sharing systems. *Transportation Research Procedia* 33, 139-146.
- SPITAEELS, K.; MAERIVOET, S.; DE CEUSTER, G; NIJS, G.; CLETTE, V.; LANNOY, P.; DIEUSSAERT, K.; AERTS, K. & STEENBERGHEN, T. 2009. Optimising Price and Location of Parking in Cities Under a Sustainability Constraint (SUSTAPARK). Final report. Belgian Science Policy, Brussels, Belgium.
- STADT FREIBURG. 2020. *Bevölkerung und Wohnen. Amtliche Bevölkerungszahl*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.freiburg.de/pb/207904.html>. [Zugriff am 28.03.2021].
- STADT GERA. 2019. *Jahr 2018. Bevölkerungsentwicklung Stadt Gera*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gera.de/fm/193/Statist-info-01-2019%20Bev%C3%B6lkerungsentwicklung%202018.pdf>. [Zugriff am 28.03.2021].
- STADT HEIDELBERG. 2019. *Heidelberger Statistik 2018. Klima, Fläche, Gesundheit*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.heidelberg.de/site/Heidelberg_ROOT/get/documents_E-651026795/heidelberg/Objektdatenbank/12/PDF/12_pdf_HeidelbergerStatistik.pdf. [Zugriff am 28.03.2021].

- STADT HILDESHEIM. 2020. *Fläche und Bevölkerung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hildesheim.de/wirtschaft/wirtschaftsstandort/flaeche-und-bevoelkerung.html#>. [Zugriff am 28.03.2021].
- STADTVERWALTUNG LUDWIGSBURG. 2021a. *Statistik und Einwohnerzahlen. Daten und Fakten über Ludwigsburg*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ludwigsburg.de/start/rathaus+und+service/statistik+und+einwohnerzahlen.html>. [Zugriff am 28.03.2021].
- STADT LUDWIGSBURG. 2021b. *Stadt Ludwigsburg Radzählstelle Alleenstraße*. [Online]. Verfügbar unter: <http://alleenstrasseradzaehlstelle.visio-tools.com/>. [Zugriff am 28.03.2021].
- STADT WÜRZBURG. 2020. *Statistische Daten 2019*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wuerzburg.de/media/www.wuerzburg.de/org/med_5478/566863_gesamtstadt_wuerzburg_2019.pdf. [Zugriff am 28.03.2021].
- STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 2021a. *Bevölkerung im Überblick*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/Bevoelkerung/01515020.tab?R=GS416041>. [Zugriff am 08.05.2021].
- STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 2021b. *Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte. Beschäftigte und Auszubildende nach Geschlecht*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statistik-bw.de/Arbeit/Beschaefigte/03025042.tab?R=GS416041>. [Zugriff am 28.03.2021].
- STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 2021c. *Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte. Beschäftigte seit 1999 nach ausgewählten Wirtschaftsbereichen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statistik-bw.de/Arbeit/Beschaefigte/03025015.tab?R=GS416041>. [Zugriff am 28.03.2021].
- STOPHER, P.R., BROG, W., MEEYBURG, A.H. 1981. *New horizons in travel behavior research*. Lexington Books, Lexington.
- TAILLANDIER, P.; VO, D.-A.; AMOUROUX, E. & DROGOUL, A. 2012. GAMA: a simulation platform that integrates geographical information data, agent-based modeling and multi-scale control. *Principles and Practice of Multi-agent Systems*, Kolkata, India, 242-258.
- TAILLANDIER, P. 2014. Traffic simulation with the GAMA platform. *Eighth International Workshop on Agents in Traffic and Transportation*, May 2014, Paris, France.
- TAILLANDIER, P.; GAUDOU, B.; GRIGNARD, A.; HUYNH, Q.-N.; MARILLEAU, N.; CAILLOU, P.; PHILIPPON, D. & DROGOUL, A. 2019. Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *GeoInformatica*, 23, 299-322.
- TAKAYASU, H.; ITO, N.; NODA, I. & TAKAYASU, M. 2015. *Proceedings of the International Conference on Social Modeling and Simulation, plus Econophysics Colloquium 2014*. Springer, Cham.
- TÜPEDIA 2018. *Stadtteile*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tuepedia.de/wiki/Stadtteile>. [Zugriff am 29.05.2021]
- UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN. 2016. *Tübingen 2016*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tuebingen.de/verwaltung/uploads/statistischer_bericht_2016.pdf. [Zugriff am 28.03.2021].
- UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN. 2019. *Sozialbericht 2019. Datenbasis 2017*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tuebingen.de/verwaltung/uploads/sozialbericht.pdf>. [Zugriff am 28.03.2021].

- UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN. 2021a. *Bevölkerung nach Altersgruppen, Geschlecht und Status am 31.12.2019*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tuebingen.de/Dateien/geschlecht_nationalitaet_nachalter.pdf. [Zugriff am 28.03.2021].
- UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN. 2021b. *Bevölkerungszahlen* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tuebingen.de/1370.html#/1381>. [Zugriff am 08.05.2021].
- UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN. 2021c. *Entwicklung der Zahlen der Arbeitslosen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tuebingen.de/Dateien/arbeitsmarkt.pdf>. [Zugriff am 06.06.2021].
- UNIVERSITÄTSSTADT TÜBINGEN. 2021d. *Unterwegs in der Stadt. Jeder zählt: Der wieviele Radler bin ich heute?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tuebingen.de/radfahren/8803.html#/14314>. [Zugriff am 06.06.2021].
- VELDHUIS, L.O. 2018. *Applications of Agent Based Modelling: Analysis and Simulation of Bicycle Traffic in Urban Environments*; Report; Wageningen University: Wageningen, The Netherlands.
- VRTIC, M.; FRÖHLICH, P.; SCHÜSSLER, N.; AXHAUSEN, K. W.; LOHSE, D.; SCHILLER, C.; TEICHERT, D. 2007. Two-dimensionally constrained disaggregate trip generation, distribution and mode choice model. Theory and application for a Swiss national model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41 (9). 857-873.
- WAGNER, U. M. 2016. *Mobilität an der Universität Tübingen. Kommentierter Ergebnisbericht*. [Online]. Verfügbar unter: <https://uni-tuebingen.de/securedl/sdl-eyJ0eXAiOiJKV1QiLCJhbGciOiJIUzI1NiJ9.eyJpYXQiOiJlMjMDg1NjM1MTQsImV4cCI6MTYwODY1MzUwOSwidXNlciI6MCwiZ3JvdXBzIjpbMCwtMV0sImZpbGUiOiJmaWxIYWRTaW5cL1VuaV9UdWVvaW5nZW5cL0RlemVybmF0ZVwvRGV6ZXJuYXRfVklJSV9CYXVfU2ljaGVyaGVpdF9VbXdlbHRcL0FidGVpbHVuZ18zX1Vtd2VsdF91bmRfRfW5lcmdpZW1hbmFnZW1lbnRcL1Vtd2VsdHNjaHV0elwvZG93bmxvYWRzXC9lcmdlYm5pc2Jlcm1jaHQtbW9iaWxpdGFldHNzdHVkaWUucGRmIiwicGFnZSI6OTE1NTh9.p36y-Fq2juFfjO8SE5HnpPAnNJ2xNtN3W4PXCSbyaqs/ergebnisbericht-mobilitaetsstudie.pdf>. [Zugriff am 28.03.2021].
- VAN DE RIJ, A., SIEGEL, D., MACY, M. 2009. Neighborhood Chance and Neighborhood Change: A Comment on Bruch and Mare. *American Journal of Sociology*, 114(4). 1166-1180.
- WALLENTIN, G. & CAR, A. 2013. A framework for uncertainty assessment in simulation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(2), 408-422.
- WALLENTIN, G. & LOIDL, M. 2015. Agent-based Bicycle Traffic Model for Salzburg City. *GI_Forum – Journal for Geographic Information Science*, 558-566.
- WALLENTIN, G. & LOIDL, M. 2016. Bicycle-Bicycle Accidents Emerge from Encounters. An Agent-Based Approach. *Safety*, 2016 2 (14).
- WARAICH, R. A. & AXHAUSEN, K. W. 2012. Agent-Based Parking Choice Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2319, 39-46.
- WILENSKY, U. 1999. NetLogo. Evanston, IL., Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University.
- WILENSKY, U. & RAND, W. 2007. Making Models Match: Replicating an Agent-Based Model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 10(4): 2.

- WITTWER, R.; HUBRICH, S.; Wittig, S. & LIEBKE, F. 2016. *Sonderauswertung zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten – SrV 2013“*. Städtevergleich. [Online]. Verfügbar unter: https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/ressourcen/dateien/2013/uebersichtsseite/SrV2013_Staedtevergleich.pdf?lang=de. [Zugriff am 28.03.2021].
- WOLF, I.; SCHRÖDER, T.; NEUMANN, J. & DE HAAN, G. 2015. Changing minds about electric cars. An empirically grounded agent-based modeling approach. *Technological Forecasting & Social Change*, 94, 269-285.
- YANG, Y. & DIEZ-ROUG, A. 2013. Using an agent-based model to simulate children's active travel to school. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 10 (67).
- ZIEMKE, D.; NAGEL, K. & BHAT, C. 2015. Integrating CEMDAP and MATSIM to increase the Transferability of Transport Demand Models. *Transportation Research Record*, 2493, 117-125.
- ZIEMKE, D.; METZLER, S. & NAGEL, K. 2017. Modeling traffic in an agent-based transport simulation. *Procedia Computer Science*, 109C, 923-928.
- ZIEMKE, D.; KADDOURA, I. & AGARWAL, A. 2019. Entwicklung eines regionalen, agenten-basierten Verkehrssimulationsmodells zur Analyse von Mobilitätsszenarien für die Region Ruhr. In: PROFF, H. (Hrsg.) *Mobilität in Zeiten der Veränderung. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*, 383-410.

Anhang

Fehlersuche und Fehlerdokumentation

Nach dem Auftauchen der Fehlermeldung (Abbildung 22) begann die Suche nach der Ursache des Fehlers. Die Fehlermeldung tritt unabhängig des gewählten Modus (*safest path* oder *shortest path*) auftritt. Sie verweist auf die Codezeilen

```
reflex start when:cycle = startingTime{
  if mode = "bike"{ //if a mode is "bike"
    path trip <-path_between(theGraph, sourceLocation,targetLocation);
    if abs((first(trip.edges) as road).id)!=abs((last(trip.edges) as
road).id) and first(trip.segments)!=last(trip.segments){ //if the start and end of
a trip are not on the opposite roads
      if trip.shape overlaps cityOutline{ //if a trip or the parts of
a trip occur in the city
        status <- "moving"; //move along the network
      }
    }
  }
  if status = "staying"{//if trip is not by bike or does not intersect the
city or is very short and uses two links
    location<-targetLocation;//don't move along the network but transfer
to a target location
    durationTime <- durationTime+int((distance_to (sourceLocation ,
targetLocation)/speed)/60.0);//update a duration time
  }
}
```

Die Fehlermeldung gibt an, dass eines der genannten Elemente einen Null-Wert aufweist. Es wird erwartet, dass der Null-Wert nicht auftritt. Nach dem Ausschlussprinzip wurden die Start- und Zielorte (*source location* und *target location*) als Fehlerquelle ausgeschlossen. Dazu wurde der Typ der Start- und Zielorte, beispielsweise universitäre Standorte, Behörden oder Wohngebäude mit in die Meldung der Konsole integriert.

Demzufolge wird angenommen, dass die Ursache des Fehlers beim Graph (*trip*) liegt. Um diesen räumlich einzugrenzen, wurde eine Meldung eingebaut, die in der Konsole die Koordinaten des Start- und Zielortes im Koordinatensystem WGS 84 ausgibt (siehe Abbildung Anhang 1). Das erste Zahlenpaar umfasst den Startpunkt der zufällig ausgewählten Route, das zweite Zahlenpaar den Endpunkt. Die erste Zahl des Zahlenpaares beschreibt die Longitude (9,08), der zweite Wert die Latitude (48,53) und der dritte Wert die Höhenangabe. Da zweidimensionale Koordinaten umgewandelt werden, ist die Höhenangabe nicht zu berücksichtigen.

```

Interactive console Console
172
88760
85662
Persons are created: 85662. Execution time: 5.844 sec
57
duration of initialization: 41.163
trip nil: {9.081364286930249,48.534823788254734,0.0} {9.046862790981512,48.524087042016504,0.0}

```

Abbildung Anhang 1: Ausgabe der Koordinaten, wenn eine Strecke (trip) keine Werte hat

Werden diese Koordinaten umgewandelt und in einer Karte dargestellt, so wird zum einen deutlich, dass Start- und Zielort vorhanden sind und zum anderen, dass auf der Strecke keine fehlerhaften Attribute (z.B. Treppenstufen oder Privatwege) liegen. Mit der ArcGIS-Pro Funktion *Route* wurde zudem die Routingfähigkeit des Netzwerks geprüft. Abbildung Anhang 2 zeigt, dass zwischen dem Start- und Zielort eine Route ohne Barrieren berechnet werden kann.

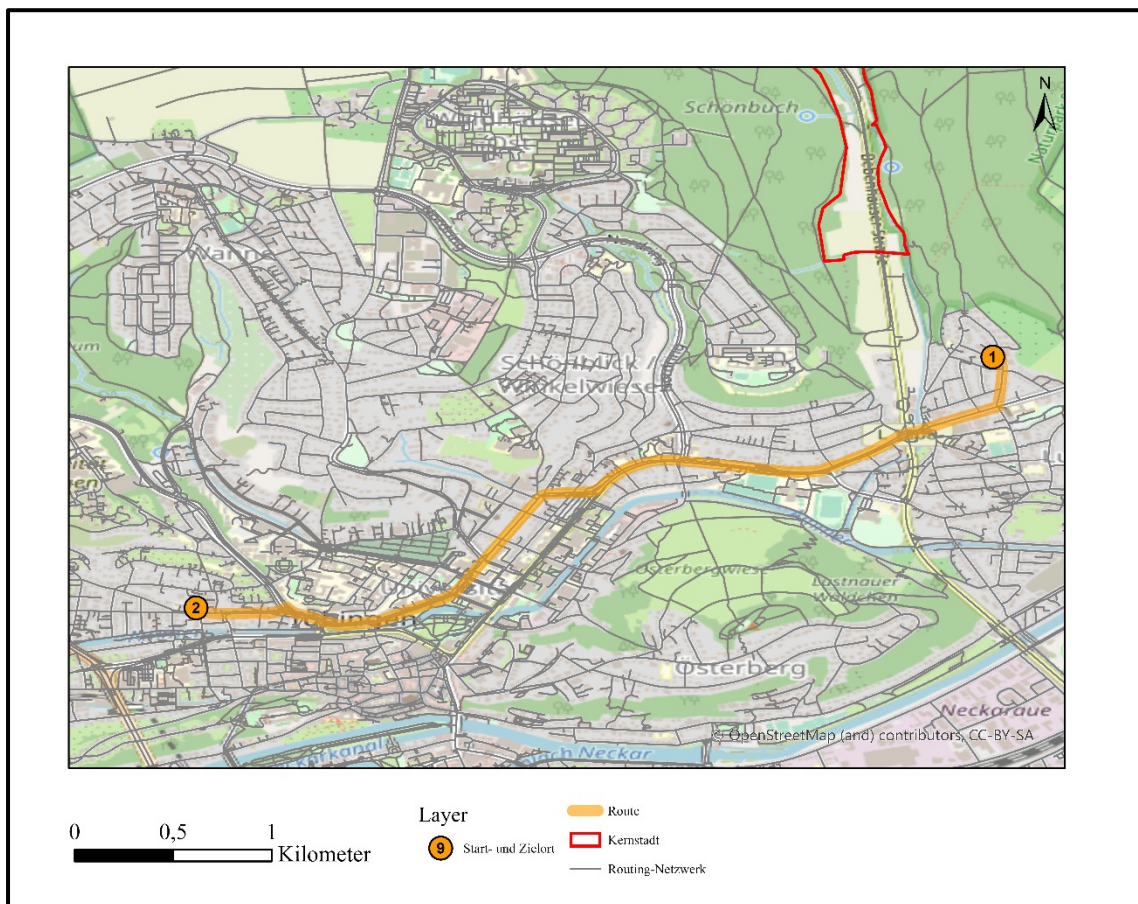


Abbildung Anhang 2: Beispielhafte Route zwischen dem von der GAMA-Plattform ausgegebenen Start- und Zielort (GEOFABRIK 2021)

Zur räumlichen Eingrenzung des Routingfehlers wurde ein kleineres Untersuchungsgebiet gewählt (siehe Abbildung Anhang 3). Bei der Wahl des Bereiches wurde darauf geachtet, dass sich alle drei Zählstationen innerhalb des neuen Gebietes befinden.

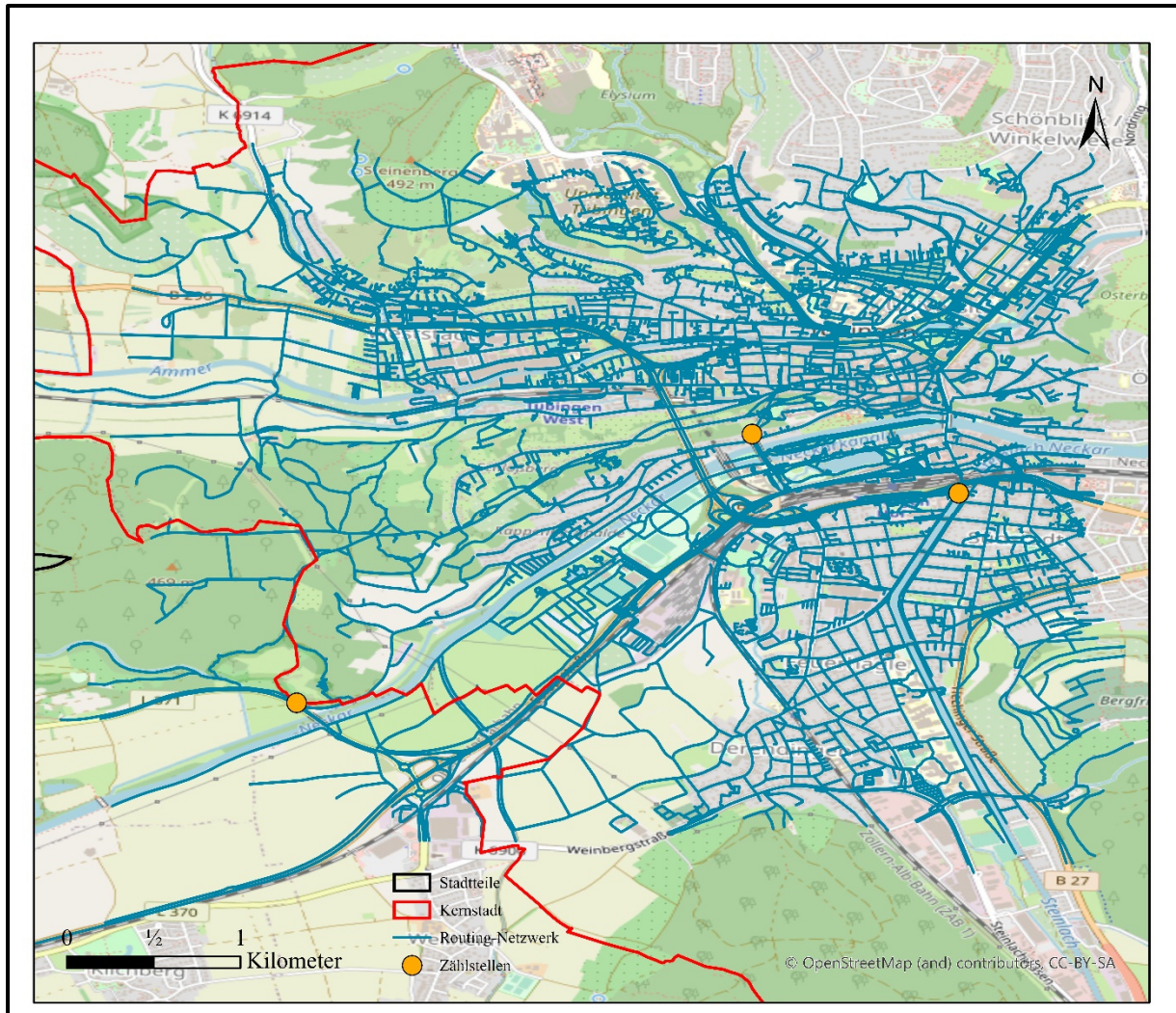


Abbildung Anhang 3: Ausschnitt des Routingnetzwerk in einem verkleinerten Untersuchungsgebiet (GEOFABRIK 2021 und FACHABTEILUNG GEOINFORMATION TÜBINGEN)

Es entspricht ungefähr der Innenstadt Tübingens und umfasst ca. 43000 potentielle Personen, die für das Radverkehrsmodell in Frage kommen. Auch die weiteren benötigten Vektordaten wie in Kapitel 4.3 vorgestellt, wurden auf das kleinere Untersuchungsgebiet entsprechend zugeschnitten. Die CSV-Dateien konnten 1:1 übernommen werden, da sich alle drei Radverkehrszählstellen innerhalb des Areals befinden. Auch die Pfade der neu erstellten Vektordaten wurden im Modellcode des Tübinger Radverkehrsmodells entsprechend angepasst. Dennoch erschien eine Fehlermeldung (siehe Abbildung Anhang 4).

```

1 occurrence in person26703 at cycle 0: Java error: nil value detected
0   in if (float(abs(road(first(trip.edges)).id)) != abs(road(last(trip.edges)).id) and (first(trip.segments) != last(trip.segments)) {if overlaps(trip.shape,cityOutline) {status <- 'moving';}}
1   NullPointerException: null
2   gaml.additions.GamlAdditions.lambda$113(GamlAdditions.java:223)
3   msi.gaml.expressions.UnaryOperator._value(UnaryOperator.java:83)
4   msi.gaml.expressions.AbstractExpression.value(AbstractExpression.java:70)
5   msi.gaml.expressions.UnaryOperator._value(UnaryOperator.java:81)
6   msi.gaml.expressions.AbstractExpression.value(AbstractExpression.java:70)
7   msi.gaml.expressions.BinaryOperator._value(BinaryOperator.java:75)
8   msi.gaml.expressions.AbstractExpression.value(AbstractExpression.java:70)
9   when applying the edges operator on null
10  in if (float(abs(road(first(trip.edges)).id)) != abs(road(last(trip.edges)).id) and (first(trip.segments) != last(trip.segments)) {if overlaps(trip.shape,cityOutline) {status <- 'moving';}}
11  in if mode = 'bike' {path trip <- path_between(theGraph,sourceLocation,targetLocation);if (float(abs(road(first(trip.edges)).id)) != abs(road(last(trip.edges)).id) and (first(trip.segments) != last(tri
12  in reflex start when: cycle = startingTime {if mode = 'bike' {path trip <- path_between(theGraph,sourceLocation,targetLocation);if (float(abs(road(first(trip.edges)).id)) != abs(road(last(trip.edge
13  in agents person26703, Simulation 0

```

Abbildung Anhang 4: Fehlermeldung bei einem verkleinerten Untersuchungsgebiet in Tübingen

Da die Fehlermeldung identisch mit derjenigen aus der ursprünglichen Größe des Untersuchungsgebietes ist, konnte mit dieser Option der Routingfehler nicht weiter eingegrenzt werden. Gleichzeitig konnte damit ausgeschlossen werden, dass in der Größe des Untersuchungsgebietes ein Zusammenhang mit der Fehlermeldung besteht.

In einem nächsten Schritt zur Fehlerbehebung wurde in der Mailing-Liste der GAMA-Plattform (<https://groups.google.com/forum/#!forum/gama-platform>) um Rat gebeten. Dort wurde empfohlen, Teile des in der GAMA-Plattform enthaltenen library models Modells *Clean Line Network* in den Modellcode des Tübinger Radverkehrsmodells zu integrieren. Das Modell *Clean Line Network* dient dazu die Routingnetzwerkdaten zu bereinigen, bevor sich Agenten über das Routing-Netzwerk bewegen. In einem ersten Versuch wurde zunächst auf die Daten des kleineren Untersuchungsgebietes zurückgegriffen. Sollte die Integration des Modells *Clean Line Network* bei dem kleineren Untersuchungsgebiet gelingen, würden die Daten des originalen Untersuchungsgebietes in das Tübinger Radverkehrsmodell importiert werden. Vor der Initialisierungsphase wurden folgende Codezeilen eingefügt:

```

//clean or not the data
bool clean_data <- true parameter: true;

//tolerance for reconnecting nodes
float tolerance <- 1.0 parameter: true;

//if true, split the lines at their intersection
bool split_lines <- true parameter: true;

//if true, keep only the main connected components of the network
bool reduce_to_main_connected_components <- true parameter: true;

string legend <- not clean_data ? "Raw data" : ("Clean data : tolerance: " +
tolerance + "; split_lines: " + split_lines + " ;
reduce_to_main_connected_components:" + reduce_to_main_connected_components );

list<list<point>> connected_components ;
list<rgb> colors;

```

In die Initialisierung wurde

- Der Clean-Lines-Block eingefügt

```
//clean data, with the given options
    list<geometry> clean_lines <- clean_data ?
clean_network(fileRoads.contents,tolerance,split_lines,reduce_to_main_connected_co
mponents) : fileRoads.contents;
    //create road from the clean lines
    action createRoads_{
    create road from:clean_lines;
    }
```

- Die verbundenen Elemente des Graphen berechnet

```
//computed the connected components of the graph (for visualization
purpose)
connected_components <-
```

```
list<list<point>>(connected_components_of(road_network_clean));
```

- Und eine Meldung eingebaut, die in der Konsole ausgibt, aus wie vielen Netzwerkbestandteilen der Graph besteht

```
write "connected_components " + connected_components count (true);
```

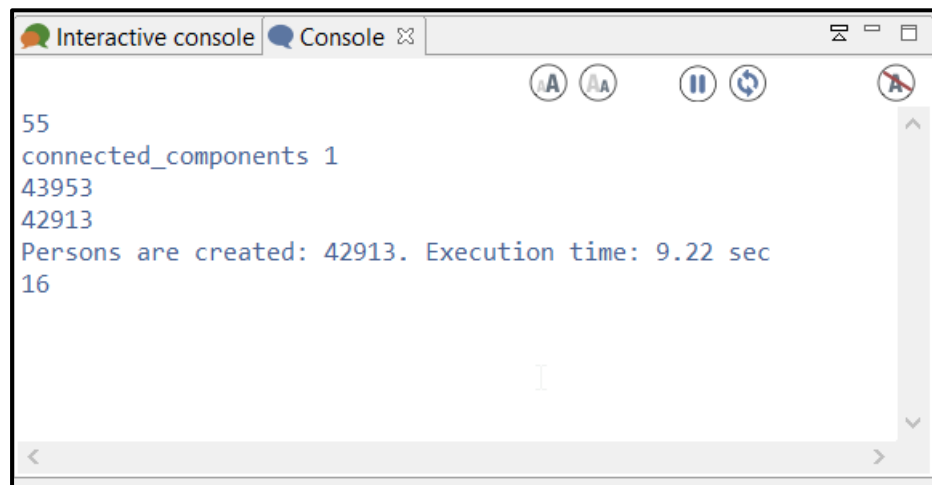


Abbildung Anhang 5: Meldung in der Konsole der GAMA-Plattform mit der Ausgabe, aus wie vielen Netzwerkbestandteilen der Graph besteht (connected_components)

Doch beim Starten des Experiments nach der Initialisierungsphase erschien eine weitere Fehlermeldung (siehe Abbildung Anhang 6). Bei der Fehlermeldung handelt es sich um eine sogenannte `NullPointerException`, welche auf Elemente der Java-Programmierung zurückgehen. Die Fehlermeldung drückt aus, dass ein Null-Wert in einem Objekt auftaucht. Wie bereits erwähnt, versucht das Modell Null-Werte zu verhindern. Mögliche Ursachen des Fehlers können sein, wenn ein Objektattribut bei der Deklaration auf Null gesetzt wurde und vor dem ersten Zugriff nicht initialisiert. Oder wenn einer Variablen durch eine Methode ein

Objekt zugewiesen wird, wobei anstelle eines Objektes der Null-Wert zurückgeliefert wird. Eine weitere Fehlerursache kann ein Objektattribut sein, welches den gleichen Namen wie eine lokale Variable trägt. Wird anstatt der lokalen Variablen auf das Objektattribut zugegriffen, kommt es zu dem Fehler.

```

2 occurrences in 2 agents at cycle 0: Java error: nil value detected
0 in
1 NullPointerException: null
2 msi.gaml.skills.MovingSkill.moveToNextLocAlongPath(MovingSkill.java:1176)
3 msi.gaml.skills.MovingSkill.primGoto(MovingSkill.java:640)
4 gaml.additions.GamlAdditions.lambda$1109(GamlAdditions.java:1168)
5 msi.gaml.compilation.GamaHelper.run(GamaHelper.java:43)
6 msi.gaml.compilation.IGamaHelper.run(IGamaHelper.java:35)
7 msi.gaml.statements.PrimitiveStatement.privateExecuteIn(PrimitiveStatement.java:92)
8 msi.gaml.statements.AbstractStatement.executeOn(AbstractStatement.java:41)
9 in agents person40720, Simulation 0

```

Abbildung Anhang 6: Fehlermeldung nach der Kombination aus den Modellen Clean Line Network und Tübinger Radverkehrsmodell

Die Fehlermeldung wurde erneut an die Mailingliste sowie in Github kommuniziert. Die Ursache konnte im weiteren Verlauf nicht gefunden und somit der Fehler nicht behoben werden.

Außerdem wurde sowohl bei dem kleineren als auch bei dem normalen Untersuchungsgebiet die Option getestet, wie sich das Tübinger Modell verhält, wenn die zu dem Routingfehler führenden Codezeilen auskommentiert werden. Der Modellcode wurde wie folgt angepasst:

```

//Decide to move or teleport
  reflex start when:cycle = startingTime{
    if mode = "bike"{ //if a mode is "bike"
      path trip <-path_between(theGraph, sourceLocation,targetLocation);

      if trip != nil {
        if abs((first(trip.edges) as road).id)!=abs((last(trip.edges) as
road).id) and first(trip.segments)!=last(trip.segments){ //if the start and end of
a trip are not on the opposite roads
          if trip.shape overlaps cityOutline{ //if a trip or the parts of a
trip occur in the city
            status <- "moving"; //move along the network
          }
        }
      }
    }
    if status = "staying"{//if trip is not by bike or does not intersect the
city or is very short and uses two links
      location<-targetLocation;//don't move along the network but transfer
to a target location
      durationTime <- durationTime+int((distance_to (sourceLocation ,
targetLocation)/speed)/60.0);//update a duration time
    }
  }

```

}

Zu beobachten ist dabei, dass das Experiment bei beiden Untersuchungsgebieten zwar vollständig durchläuft, die Anzahl der visualisierten Radfahrer jedoch nur zu einem Bruchteil dargestellt wird (siehe Abbildung Anhang 6).

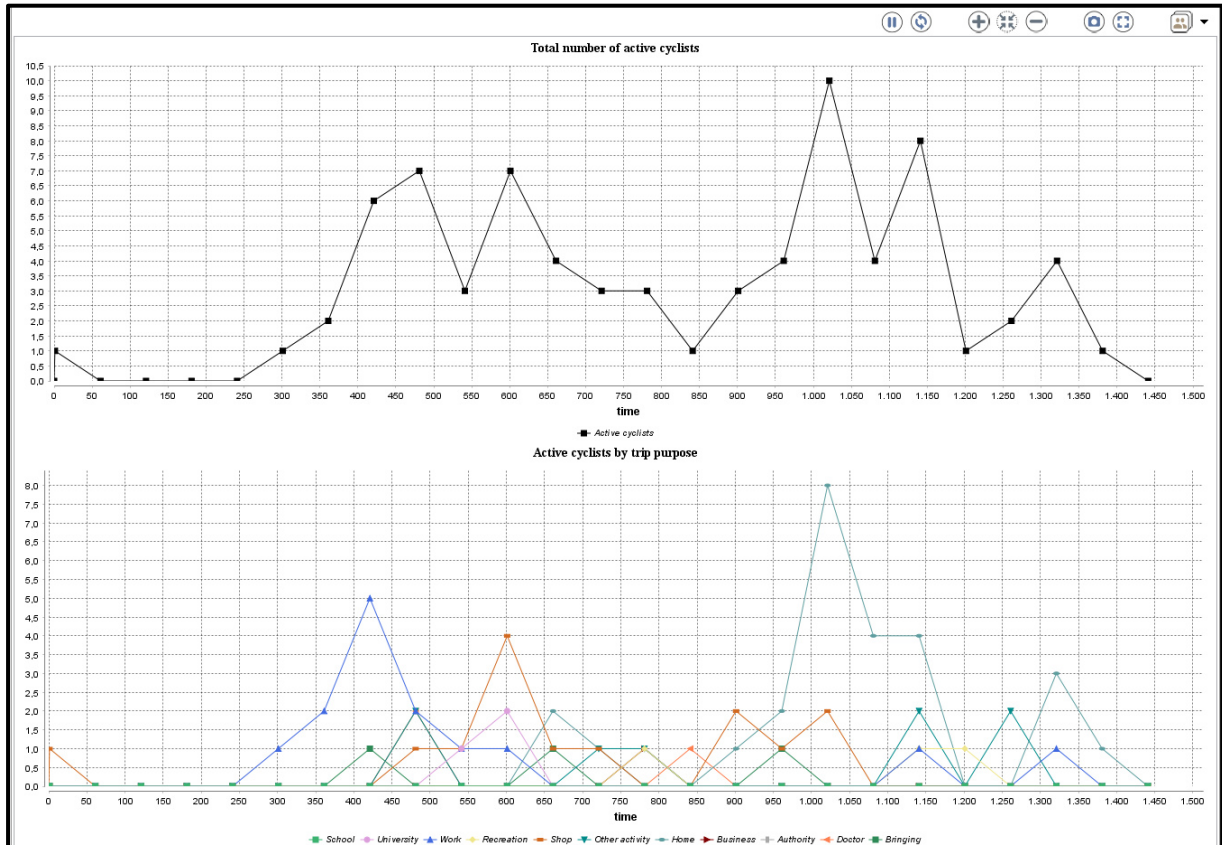


Abbildung Anhang 6: Gesamte Zahl an aktiven Radfahrern und aktive Radfahrer nach Fahrtzweck nach Auskommentierung der fehlerhaften Modellcodezeilen im originalen Untersuchungsgebiet