



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

**„Methodenevaluation und -test zum Prognostizieren
des Verkehrsaufkommens in der Agglomeration Bern“**

vorgelegt von

Dipl. Geogr. Pascal Burri
103825, UNIGIS MSc Jahrgang 2014

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Münsingen, 19. Dezember 2016

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Lehrgangs UNIGIS Master of Science der Universität Salzburg entstanden. Die Studienzeit war zeitintensiv und entbehrungsreich. Vielen Dank an meine Partnerin und meine Familie für die grosse Unterstützung und das Verständnis.

ERKLÄRUNG DER EIGENSTÄNDIGEN ABFASSUNG DER ARBEIT

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt ist. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäss übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.



Münsingen, 19.12.2016

ZUSAMMENFASSUNG

Intelligente Transportsysteme können einen Beitrag leisten, um den zunehmenden Verkehrsdruck in dicht bebauten Gebieten zu mindern. Wichtig ist die optimale Nutzung aller verfügbarer Verkehrsmittel, aber auch der Wille, die Verkehrsnachfrage zu verstehen und allenfalls steuernd einzugreifen. Nach einer Methodenevaluation wird in der vorliegenden Arbeit eine Multiagenten-Simulation ausgearbeitet, die es ermöglicht, das dicht bebaute Gebiet in der Agglomeration Bern mit seinem multimodalen Verkehr abzubilden. Die aktivitätsbasierte Verkehrsgenerierung erlaubt es, gezielt nachfragebeeinflussende Faktoren herauszuschälen. Die Simulation wird spezifisch auf die Abbildung von multimodalem Verkehr hin konfiguriert und durch eigene Erweiterungen ergänzt. Die Ergebnisse aus der finalen Simulation lassen Rückschlüsse auf Vorzüge und Schwachpunkte der Simulationsmethode zu.

Wichtige Begriffe:

- » Intelligentes Transportsystem (ITS)
- » Multiagentenbasierte Simulation
- » Multimodaler Transport
- » Aktivitätenbasierte Verkehrserzeugung
- » Dynamische Verkehrszuweisung

ABSTRACT

Intelligent transport systems can help to reduce the increasing traffic pressure in metropolitan areas. Crucial is the optimal use of all available means of transport. But also the will to understand the demand for traffic and, if necessary, to regulate it. The present work provides a method evaluation and the built-up of a multi-modal, multi-agent simulation for the agglomeration of Bern, Switzerland. The activity-based generation of traffic makes it possible to tap specific factors influencing the demand. The simulation is specifically configured for the mapping of multimodal traffic and is extended by code, developed during this research. The results from the final simulation allow to conclude the advantages and weaknesses of the applied simulation method.

Keywords:

- » Intelligent transportation system (ITS)
- » Multi-agent simulation
- » Multimodal transport
- » Activity-based traffic generation
- » Dynamic traffic assignment

INHALTSVERZEICHNIS

EINLEITUNG	10
MOTIVATION	11
Transportsysteme machen den Verkehr effizienter	11
Forschungsfrage	12
LITERATURÜBERBLICK	13
Komplexe Theorien für komplexe Siedlungsräume	13
Personen sind Agenten	14
Aktivitäten und Nachfrage	15
Verkehrsmittel- und Routenwahl	16
Dynamische Modelle	16
Anwendungsbeispiele	17
METHODIK	19
VORGEHEN	20
AGENTENBASIERTE VERKEHRSMODELLE	21
ERLÄUTERUNGEN	23
UNTERSUCHUNGSGEBIET	24
MODELLVERGLEICH	25
Simulationssoftware	25
Netzwerk	26
Nachfrage und Aktivitätenplanung	27
Routenplanung	28
Ausgabemöglichkeit	30
Dokumentation	30
Erweiterbarkeit	31
Limitationen bezüglich Untersuchungsgebiet	31
Eignung	32
DATENPOOL	34
Datenverfügbarkeit	34
Grundlagedaten	35
OpenStreetMap	35
Statistikdaten	35

Schulzahlen	36
Buslinien und Haltestellen	37
Messdaten	37
Strassenverkehrsmessung	37
Fahrradverkehrsmessungen Stadt Bern	41
Passagierzahlen öffentlicher Verkehr	42
Aufarbeiten der Messdaten	44
SUMO-MODELL DER AGGLOMERATION BERN	45
SUMO-Simulationssoftware	45
Ablauf der Modellierung in SUMO	45
Erstellen des Netzwerks	47
OSM-Daten für das Netzwerk	47
Netzwerk in SUMO	48
Netzwerk für Activitygen	50
Erzeugen von Nachfrage	51
Generieren von Verkehrsnachfrage	51
ACTIVITYGEN STATFILE	52
Multimodale Routenplanung	57
Erstellen von Routen	57
Beste Route	57
Multimodalität	59
Simulation ÖV	60
Simulation Fahrrad	60
Parameter	61
Parameter Beschreibung	61
Szenarien	64
Parameterset für Szenarien	64
Auswertung	65
Aufbereiten der Simulationsdaten	65
Ausgabe Verkehrsaufkommen	66
Anzahl Personen an Haltestellen	66
Anzahl Reisen	67
ERGEBNISSE	68
VERKEHRSAUFKOMMEN	69
Verkehrsaufkommen motorisierter Individualverkehr	69
Verkehrsaufkommen öffentlicher Verkehr	72
Verkehrsaufkommen Fahrrad	73
Anzahl Reisen	74

NACHFRAGESCHWANKUNGEN	74
Verhalten der beiden getesteten Szenarien	74
METHODISCHE ERGÄNZUNGEN	75
Automatisierung des Prozesses	75
DISKUSSION	76
FORSCHUNGSFRAGE UND METHODISCHES VORGEHEN	77
VERKEHRSAUFKOMMEN	78
Verkehrsaufkommen motorisierter Individualverkehr	78
Verkehrsaufkommen öffentlicher Verkehr	79
Verkehrsaufkommen Fahrrad	80
NACHFRAGESCHWANKUNGEN	80
Abbilden von Nachfrageeinflüssen	80
METHODISCHE ERGÄNZUNGEN	82
Reproduzier- und Übertragbarkeit	82
SCHLUSSFOLGERUNG & AUSBLICK	83
SCHLUSSFOLGERUNG	84
AUSBLICK	84
LITERATURVERZEICHNIS	86

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet Agglomeration Bern	25
Abb. 2: Übersicht Messstellen MIV der Gesamttagglomeration Bern	39
Abb. 3: Übersicht Messstellen MIV Stadt Bern	39
Abb. 4: Übersicht Messstellen MIV Teilagglomeration Nord	40
Abb. 5: Übersicht Messstellen MIV Teilagglomeration Süd	40
Abb. 6: Übersicht Messstellen MIV Teilagglomeration West	41
Abb. 7: Übersicht Messstellen Fahrrad Stadt Bern	42
Abb. 8: Übersicht Messstellen ÖV Agglomeration Bern	44
Abb. 9: Ablauf Modellierung in SUMO	46
Abb. 10: Mess- und Simulationswerte an MIV-Messstellen	70
Abb. 11: Diagramm der Mess- und Simulationswerten an MIV-Messstellen	71
Abb. 12: Mess- und Simulationswerte an ÖV-Messstellen	72
Abb. 13: Diagramm der Mess- und Simulationswerten an ÖV-Messstellen	73
Abb. 14: Mess- und Simulationswerte an Fahrrad-Messstellen	73

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABM: Agentenbasierte Modelle
ARE: Bundesamt für Raumentwicklung
ASTRA: Bundesamt für Strassen
BFS: Bundesamt für Statistik
DTA: Dynamic Traffic Assignment
DTV: Durchschnittlicher täglicher Verkehr
ITS: Intelligente Transportsysteme
MAS: Multiagentenbasierte Simulationen
MIV: motorisierter Individualverkehr
OSM: OpenStreetMap
ÖV: öffentlicher Verkehr
TBA: Tiefbauamt Stadt Bern

EINLEITUNG

METHODIK

ERGEBNISSE

DISKUSSION

SCHLUSSFOLGERUNG
UND AUSBLICK

LITERATURVERZEICHNIS

MOTIVATION

TRANSPORTSYSTEME MACHEN DEN VERKEHR EFFIZIENTER

Täglich nutzen wir Verkehrswege um zur Arbeit zu fahren oder einzukaufen, hin zur Freizeiteinrichtung oder um jemanden zu besuchen. Wenn wir aktiv am Verkehr teilnehmen, wollen wir möglichst schnell und bequem unser Ziel erreichen. Wenn wir ihn passiv wahrnehmen, zuhause, währenddem wir uns erholen, soll er möglichst gut ausgeblendet werden, am besten gar nicht wahrnehmbar sein. Ob wir den Verkehr aktiv oder passiv erleben, wird es zunehmend herausfordernd, schnell, bequem, leise und ohne Emissionen unterwegs zu sein. Denn die Bevölkerung und das Mobilitätsbedürfnis nehmen zu, ganz besonders in Ballungsgebieten. Es ist davon auszugehen, dass der Personen- und Güterverkehr bis 2050 zwischen 12 und 55% wächst (Stölzle, Weidmann et al. 2015). Die Urbanisierung in der Schweiz setzt sich fort (gemäss Bundesamt für Statistik, http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/01/02/blank/key/raeumliche_verteilung/agglomerationen.html, 28.08.2016) und wird weiteren Verkehr generieren. Die Verkehrsinfrastruktur hingegen kann in bebauten Gebieten nicht beliebig erweitert werden. Und wenn, dann mit grossem Kostenaufwand. Auch aus ökologischer und sozialer Sicht sind Erweiterungen nur schwer zu rechtfertigen (siehe Bazzan and Klügl 2014).

Der einfachste und kostengünstigste Weg, diese Dissonanz aufzulösen, kann über effizientere Transportsysteme führen. Die Reise wird nicht mehr selbstverständlich mit dem eignen Auto angetreten sondern mit dem sinnvollsten Verkehrsmittel für die beabsichtigte Strecke und Reisezeit. In idealisierter Form kennt man den Abfahrts- und Zielort und bucht eine Transportdienstleistung, welche die sinnvollsten Verkehrsmittel miteinander kombiniert, um möglichst schnell, günstig und bequem ans Ziel zu kommen. Ein intelligentes Transportsystem kann durch das Zusammenspiel von verschiedenen Verkehrsmitteln und Nutzungsarten einen effizienteren Transport sicherstellen. An Orten mit beispielsweise besonders schädlichen Verkehrsemissionen werden leise, abgasfreie Fahrzeuge eingesetzt, und dort wo grosse Strecken in kurzer Zeit überwunden werden müssen, besonders schnelle Fahrzeuge.

Als intelligente Transportsysteme (ITS) werden Verkehrssysteme bezeichnet, die effizienter, schneller und ressourcenschonender funktionieren, weil sie auf Dienste zurückgreifen, die durch Informations- und Kommunikationstechnologien unterstützt werden (siehe <http://rno-its.piarc.org/en>, 09.11.2016, Moerke 2007). Das multimodale Transportsystem, bestehend aus verschiedenen Verkehrsmitteln, die intelligent und multimodal genutzt werden, ist Bestandteil von intelligenten Transportsystemen. (Spickermann, Grienitz

et al. 2014) sieht viel Potenzial, wenn es gelingt, solche Transportsysteme aufzubauen. Als Voraussetzung werden

1. das Vorhandensein von multimodalen Transportmitteln,
2. ausreichend Informationen für die korrekte Entscheidung zwischen den verschiedenen Optionen in Echtzeit und
3. eine Anpassung des sozialen Verhaltens aufgeführt.

Damit die intelligente Mobilität funktioniert, braucht es nach (Spickermann, Grienitz et al. 2014) technische Lösungen, um die Verkehrsträger zu verbinden, aber auch neue Formen der Zusammenarbeit von öffentlicher Hand, privaten Firmen und privaten Initiativen.

Die Schweiz weist ein dichtes multimodales Verkehrsnetz auf mit einem gut ausgebauten öffentlichen Verkehr (Bussen und Bahnen) und einem dichten Verkehrsnetz für Autos, Fahrräder und Fussgänger. Das sind gute Voraussetzungen für ein funktionierendes, multimodales Transportsystem. Die Funktion des Transportsystems will aber besser verstanden werden: Wer nutzt welches Verkehrsmittel zu welcher Zeit, an welchem Ort? Welche Faktoren beeinflussen das Mobilitätsverhalten? Welche Auswirkungen haben Veränderungen – beispielsweise eine Förderung des öffentlichen Verkehrs oder die Einführung von Road Pricing?

FORSCHUNGSFRAGE

Ich möchte wissen, wie viele Personen auf den Verkehrswegen unterwegs sind, an einer beliebigen Stelle im Netzwerk, zu einer beliebigen Zeit und in einem beliebigen Verkehrsmittel. Und ich möchte wissen, welche Faktoren die Anzahl Personen im Verkehrsnetz beeinflussen.

Daraus lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

- » Wie gut kann eine Simulationssoftware das Verkehrsaufkommen auf dem Verkehrsnetz der Agglomeration Bern, bezogen auf jeden beliebigen Strassenabschnitt und jede Haltestelle im Gebiet, zu einer beliebigen Zeit und in den Verkehrsmitteln Auto, öffentlicher Verkehr und Fahrradverkehr abbilden?
- » Können Nachfrageschwankungen bezogen auf Zeit, Ort und Verkehrsmittel simuliert werden? Falls ja, wie wirken sie sich aus?

Mit den Forschungsfragen im Fokus soll aus einer Vielzahl verfügbarer Simulationssoftware die geeignetste ausgewählt, konfiguriert, getestet und dabei Möglichkeiten und Schwachstellen freigelegt werden. Als Kriterium gilt die bestmögliche Repräsentation der Realität. Die Simulation, bestehend aus Simulationssoftware und Konfiguration mit geeigneten Daten, soll reproduzier- und übertragbar sein. Dies betrifft Simulationen desselben Gebiets zu

unterschiedlichen Zeitpunkten gleichermaßen wie die Simulationen von weiteren Gebieten beliebiger Grösse. Im Zentrum steht das Transportsystem (siehe Kapitel Transportsysteme machen Verkehr effizienter). Die Mobilitätsnachfrage ist keine Konstante und ändert sich aufgrund äusserer Bedingungen und regulatorischer Eingriffe ins Transportsystem. Es wird davon ausgegangen, dass die Verkehrsnachfrage an einem Ort, zu einer Zeit nach einem bestimmten Verkehrsmittel von der Aktivität der simulierten Personen und der Verkehrsmittelwahl abhängt. Um die Abhängigkeit von Aktivität, Verkehrsmittelwahl und Verkehrsnachfrage besser zu verstehen, sollen zwei unterschiedliche Verkehrsnachfrageszenarien getestet werden: Szenario 1: Realitätsnahe Aktivität und Verkehrsmittelwahl, bezogen auf ein durchschnittliches, über ein Jahr gemitteltes Verhalten. Szenario 2: Verbesserte Bedingungen für den Fahrradverkehr und den öffentlichen Verkehr.

LITERATURÜBERBLICK

KOMPLEXE THEORIEN FÜR KOMPLEXE SIEDLUNGSRÄUME

In der Vergangenheit wurde immer wieder versucht, Siedlungsräume mit Systemen abzubilden, wie beispielsweise Christaller's Theorie der zentralen Orte. Diese zerlegte die Realität in Elemente und beschrieb über eine Funktion mathematisch deren Zusammenspiel. Siedlungsräume lassen sich damit nur schwer in ihrer vollen Komplexität erfassen und eignen sich nur bedingt als Modellierungsinstrument, das räumliche und zeitliche Prozesse abzubilden oder zu prognostizieren vermag. (Batty 2008) geht davon aus, dass Siedlungsräume als komplexe Systeme funktionieren und mit konventionellen Methoden nur ungenügend erklärt werden können. Er plädiert dafür, diese Systeme besser zu verstehen, und Siedlungsräume dadurch besser planbar zu machen.

In einem komplexen System wird der Siedlungsraum als fraktale Struktur mit allometrischem Wachstum gesehen (West, Brown et al. 1999). Das grosse Ganze setzt sich aus seinen Fraktalen zusammen. Es ist nicht mehr der theoretische Ansatz, der die Struktur einzelnen Teile festlegt. Der Top-down-Ansatz wird ersetzt durch ein Bottom-up-Ansatz. Oder wie es (Cham and Johnson 2007) sieht: «Complexity theory grew out of systems theory, an holistic approach to analysis that views whole systems based upon the links and interactions between the component parts and their relationship to each other and the environment within they exists.».

PERSONEN SIND AGENTEN

Agentenbasierte Modelle (ABM) sind in der Theorie komplexer Systeme verortet und bieten die Möglichkeit, deren Denkart umzusetzen. Sie beruhen auf den Annahmen:

- » Dass es ein System gibt, das aus mehreren Komponenten besteht (Individuen oder Agenten).
- » Dass die Agenten selber aktiv sind und das Verhalten anderer Agenten innerhalb einer gewissen Ausdehnung beobachten.
- » Dass die Agenten immer autonom und regelbasiert entscheiden und basierend darauf deren Aktivität anpassen; dies im Unterschied zur Systemdynamik (Forrester 1993).
- » Aus dem Zusammenspiel der Agenten komplexe Muster hervortreten, die erst auf Systemstufe sichtbar werden.

Nach (Bonabeau 2002) bringen agentenbasierte Modelle dann einen wesentlichen Erkenntnisgewinn, wenn das Verhalten eines Agenten nicht vorhersehbar ist, weil das Zusammenspiel der Agenten komplexe, diskontinuierliche Situationen hervorbringt. Dies impliziert die Annahmen, dass viel über die Systemkomponenten, den Agenten, bekannt und das entstehende Muster auf Systemebene schwer erklärbar ist.

Agentenbasierte Modelle bieten den Vorteil, dass auf der uns vertrauten, mikroskopischen Ebene der Agenten modelliert wird. Mit diesen Modellen sind auch Aussagen auf makroskopischer Ebene möglich. Zudem sind die agentenbasierten Systeme sehr flexibel. Ausgehend von Agenten kann eine Vielzahl von verschiedenen Themen und Fragestellungen modelliert werden. Es braucht nur eine Anpassung der Interaktionsregeln. Die Anzahl Agenten ist nicht limitiert, es können somit sehr kleine realweltliche Ausschnitte wie auch grosse Ausschnitte einbezogen werden. Zudem lassen sich Agenten auch aggregieren.

Die Anwendung von agentenbasierten Modellen bringt aber auch Unsicherheiten mit sich. Es ist schwer, die richtige Modellstruktur zu finden, die Modellparameter richtig zu setzen oder Alternativtheorien zu testen. (V. Grimm 2005) bietet hier mit dem *Pattern-Oriented Modeling* eine Methode, die es erlaubt, mit diesen Unsicherheiten umzugehen.

Nehmen wir Verkehrssysteme: sie sind ein essentieller Teil, um Siedlungsräume planbar zu machen. Weil ein Agent hier als Abbild einer Person agieren kann, ist sein Verhalten in einem regelbasierten System gut implementierbar. Viele Erkenntnisse aus Disziplinen wie der Soziologie, Psychologie und Ökonomie können zur Beschreibung der Agenten herangezogen werden.

Auf ein Verkehrsmodell fokussiert, das Auskunft über die Verkehrsnachfrage und Nachfrageschwankungen an einem beliebigen Punkt im Verkehrssystem geben soll, gibt es drei interessante Aspekte zu beachten:

1. Was bewegt eine Person dazu, Verkehrsinfrastruktur zu nutzen und wie verhält sich die

Nachfrage unter verschiedenen Bedingungen?

2. Welche Verkehrsmittel beabsichtigt die Person zu nutzen?
3. Wenn die Personen die Verkehrsinfrastruktur benutzen, wie bewegen sie sich darauf und wie interagieren sie mit anderen Verkehrsteilnehmern?

(Bernhardt 2007) zeigt, dass agentenbasiertes Modellieren für verschiedene Aspekte von Verkehrssystemen ein geeigneter Ansatz ist, um Erscheinungen im Verkehrswesen abzubilden. Als Folge daraus hat die Zahl der Konzepte und Ansätze zur technischen Umsetzung rund um die agentenbasierte Modellierung von Verkehrssystemen in den vergangenen Jahren zugenommen. (Bazzan and Klügl 2014) gibt einen Rückblick darauf und strukturiert die verwendeten Konzepte unter anderem in die Simulation von Nachfrage (travel demand simulation), Wahl der Verkehrsmittel und Routen (traffic related choice) und die Simulation von Verkehrsflüssen (traffic flow simulation). (Chen and Cheng 2010) bietet eine Übersicht von technischen Umsetzungen der agentenbasierten Modellen.

AKTIVITÄTEN UND NACHFRAGE

Verkehr entsteht dann, wenn sich Personen auf dem Verkehrsnetz zwischen unterschiedlichen Orten bewegen. Sie tun dies in der Regel nicht ohne Grund: Orte wo sie arbeiten, wohnen, sich vergnügen usw. liegen oft weit auseinander. Ihr Bedürfnis, sich an all diesen Orten aufzuhalten, steht am Anfang jedes Verkehrssystems. Es gibt komplexe wechselseitige Beziehungen zwischen den Orten, den Verkehrsmitteln den Verkehrswegen und den Akteuren. So ist in den meisten Fällen das Verkehrsnetz besonders stark frequentiert, wo viele Personen zwischen Wohn- und Arbeitsort pendeln. Andererseits befinden sich Einkaufszentren oft gut zugänglich an grossen Verkehrsachsen.

Häufig wird der Begriff Aktivität verwendet, um das Mobilitätsbedürfnis und die daraus unternommene Reise zu beschreiben. Als wichtige Aktivitäten sind sicher Arbeit, Schule, Freizeit und Erholung zu nennen. Diese Liste lässt sich beliebig erweitern und verfeinern. Eine aktivitätenbasierte Nachfragegenerierung berücksichtigt diese Aktivitäten, um den Agenten charakteristische Reisen im Tagesverlauf zuzuordnen. Geht ein Agent beispielsweise der Aktivität Arbeit nach, wird im Normalfall am Morgen eine Reise vom Wohn- zum Arbeitsort und am Abend vom Arbeits- zum Wohnort generiert (siehe beispielsweise Bowman and Ben-Akiva 2001). Zusätzlich können weitere Aktivitäten einbezogen und auch zeitlich realistischer verteilt werden. Die Reisen pro Agent gehen dann als Fahrten in die Verkehrssimulation ein. Vorausgesetzt wird, dass die Simulation fähig ist, Agenten einzubeziehen, die zwar nach den gleichen Regeln handeln, jedoch unterschiedliche Eigenschaften besitzen können: so genannte Multi-Agenten-Simulationen (siehe Cetin, Nagel et al. 2002).

VERKEHRSMITTEL- UND ROUTENWAHL

Die in der Aktivitätenplanung festgelegten Reisen werden in einem nächsten Schritt auf das Verkehrsnetzwerk gelegt. Jeder Agent, der im Strassenverkehr teilnimmt, sucht sich die kostengünstigste Route. Dies betrifft nicht nur die konkrete Abfolge von Netzwerkkanten, die ein Agent abfahren soll, sondern auch, welches Verkehrsmittel er dafür verwendet. In einem realen Verkehrssystem stehen immer verschiedene Verkehrsmittel zur Auswahl. Meist sind es der motorisierte Individualverkehr, der öffentlicher Verkehr und der Langsamverkehr. Der Modalsplit gibt den Anteil der verschiedenen Verkehrsmittel oder Verkehrsmittelgruppen an den durchschnittlichen Fahrten wieder (<http://www.are.admin.ch/themen/verkehr/00254/00491/index.html?lang=de>, 14.09.2016). Um die Effizienz eines Verkehrssystems zu steigern, lassen sich die einzelnen Verkehrsmittel optimieren, wie u.a. durch einen optimierten Verkehrsfluss auf der Strasse, durch optimierte Fahrpläne oder sicherere Fussgängerwege. Besonders vielversprechend scheint aber die Idee, Verkehrsmittel zu kombinieren und jeweils jenes Verkehrsmittel zu wählen, das für einen bestimmten Reiseabschnitt den besten Nutzen bringt (Eryilmaz, Kagerbauer et al. 2014), (Said, Soua et al. 2015), (Spickermann, Grienitz et al. 2014). Dies bedingt, dass neben der Suche der kürzesten Route für das Auto auf dem Strassennetz auch weitere Verkehrsmittel und die Kombination von Verkehrsmitteln in die Suche mit einbezogen werden. Nicht nur die kürzeste Route bewegt Personen dazu, ein bestimmtes Verkehrsmittel zu wählen. Es können auch Faktoren sein wie politische Ausrichtung, Einkommen (Zhang, Magalhães et al. 2014), Popularität von alternativen Verkehrsmitteln (Heinen, Panter et al. 2015), planerisch veränderte Mobilitätskosten (Li, Yin et al. 2015), (Zheng, Rérat et al. 2015) oder Anteil Autobesitzer im Vergleich zur Gesamtbevölkerung (Meng, Shao et al. 2014).

DYNAMISCHE MODELLE

Routen, die anhand statischer Reiselisten – gleichbedeutend mit *origin destination (OD)* Matrizen – erstellt werden, vermögen die komplexen Entscheidungsstrukturen von Reisenden nicht ausreichend gut wiederzugeben. Die Entscheidungsfindung muss dynamischer sein und die gegenseitige Beeinflussung von Agenten sowie Wechselwirkungen zwischen den Entscheidungen zur Wahl von Aktivitäten, Nachfrage, Reise, Route, Abfahrtszeit und Verkehrsmittel mit berücksichtigen.

Es besteht die Möglichkeit, Aktivitäten in einer Multiagenten-Simulation abzubilden (Rindsfuser, Klügl et al. 2004). Der Tagesablauf von einzelnen Agenten oder Agentengruppen besteht aus einer bestimmten Abfolge von Aktivitäten, den individuellen Aktivitätenprogrammen. Die Art und Dauer der Aktivität wird durch das Zusammenspiel der Agenten bestimmt. Als Vorteil der agentenbasierten Aktivitätengenerierung wird die Möglichkeit erwähnt, den situativen Kontext jedes einzelnen Individuums ins Modell einzubeziehen. Die

Agenten wiederum können, abhängig vom eigenen Status und dem Status der anderen Agenten, darauf reagieren. Die Beziehung zwischen den Agenteneigenschaften und dem dadurch ausgelösten Mobilitätsverhalten ist aber keinesfalls trivial. (Rindsfuser, Klügl et al. 2004) schreibt: «To improve the estimation of realistic activity patterns, a better understanding of mobility related to individual decision processes is needed on the one hand, an integration with state-of-the-art traffic flow micro simulation is important on the other hand».

In Zusammenhang mit der agentenbasierten Simulation ist das Konzept der dynamischen Verkehrszuordnung (Dynamic Traffic Assignment, DTA) von Bedeutung (Peeta and Ziliaskopoulos 2001). Es geht darum, dass jeder Agent die kostengünstigste Route findet, auch wenn zusätzlich der Zeitverlust aufgrund von Stau in die Streckenkosten mit einfließt. Die Staukosten sind zeitlich variabel und hängen davon ab, was die anderen Agenten in der Simulation tun. Deshalb ist es notwendig, die Routen basierend auf den Erfahrungen aus Simulationsdurchgängen zu rechnen. Die Berechnung der tatsächlichen, kostengünstigsten Route erfolgt mittels iterativem Prozess, der die tatsächlichen Kosten einer Route anhand eines Simulationsablaufs feststellt, um dann eine neue, günstigere Route auszuarbeiten. Bei (CHIU, BOTTOM et al. 2011) wird betont, dass sich ein Gleichgewicht für die jeweils günstigste Route nur auf einen bestimmten Zeitpunkt, eine bestimmte Route und Reisende mit denselben Reisen gilt, da ein Verkehrsnetzwerk über die Zeit kein statischer Zustand aufweist. (Nagel and Flötteröd 2012) geht von einem Nachfragemuster aus, das Netzwerkzustände ausbildet, die wiederum dasselbe Nachfragemuster erzeugen. Nach ihm können verschiedene Nachfragedimensionen wie z.B. die Wahl der Abfahrtszeit oder der Verkehrsmittel und Aktivitätenpläne über iterative Prozesse zusätzlich in die Routenplanung einbezogen werden. Diese führen zu einem besseren Abbild der Wirklichkeit, da komplexe Wechselwirkungen mit einbezogen werden. (Meng, Shao et al. 2014) fokussiert speziell auf den Einbezug von verschiedenen Verkehrsmodi in die DTA.

ANWENDUNGSBEISPIELE

Eine agentenbasierte Simulation der Modus- und Routenwahl im Strassenverkehr hat (Klügl) durchgeführt. Es wird versucht, die Modus- und Routenwahl in der Kleinstadt Burgdorf möglichst gut an die Messdaten anzunähern. Vorausgesetzt wird, dass die Agenten jeweils die Route mit der geringsten Reisezeit wählen. Steht für eine vorgesehene Strecke ein gutes öffentliches Verkehrsangebot bereit, wird dieses tendenziell häufiger verwendet. Als Entscheidungsbasis für MIV/ÖV wird unter anderem auch ein Trägheits- und Erinnerungsparameter verwendet. Bei (Meister, Balmer et al. 2010) wird das Untersuchungsgebiet auf die gesamte Schweiz ausgeweitet. Die Simulation wird mit MATSim-T durchgeführt und es kommen aktivitätenbasierte Nachfragegenerierung, Verkehrsmittel- und Routenwahl sowie eine Optimierung der Verkehrsmittel und Routen durch DTA zum Einsatz. (Krajzewicz,

Erdmann et al. 2014) versuchen Fussgänger- und Fahrradverkehr in eine Verkehrssimulation zu integrieren. Mit dem Simulations-Framework *AgentPolis* versucht (Certicky, Drchal et al. 2015), (Jakob, Moler et al. 2012) den Agenten noch eigenständiger zu machen, damit er jederzeit auf alle Gegebenheiten reagieren kann. Das *Luxembourg SUMO Traffic (LuST) Scenario* (Codeca, Frank et al. 2015) stellt ein OpenSource Verkehrsszenario zur Verfügung, das zum Testen verschiedener Verkehrsszenarien, insbesondere auch multimodaler Verkehrsformen, geeignet ist.

Neue Mobilitätsformen wie Carsharing, Taxidienste usw. gewinnen zunehmend an Bedeutung und ergänzen das bestehende multimodale Verkehrsangebot. Meist wird diese neue Verkehrsform unabhängig von den anderen Verkehrsmitteln beschrieben: (Ciari, Balmer et al. 2008), (Ciari, Balac et al. 2015), (Ciari, Schuessler et al. 2013), (Ciari, Weis et al. 2015).

EINLEITUNG

METHODIK

ERGEBNISSE

DISKUSSION

SCHLUSSFOLGERUNG
UND AUSBLICK

LITERATURVERZEICHNIS

VORGEHEN

Von der Forschungsfrage lässt sich folgendes Vorgehen ableiten:

1. Evaluation und Auswahl einer Simulationssoftware, die es erlaubt, das reale Verkehrsaufkommen auf den Verkehrswegen der Agglomeration Bern detailliert und realitätsnah abzubilden. Nachfrageschwankungen sollen sich als Folge des Verkehrsverhaltens der Akteure abbilden lassen. Die Skalierbarkeit der Software und Methode garantiert, dass sich die Grösse des Untersuchungsgebiets nicht nachteilig auf das Simulationsergebnis auswirkt.
2. Konfiguration der Simulationssoftware hinsichtlich einer maximalen Akkuratessse der verwendeten Daten und deren Repräsentation durch die Software sowie Reproduzier- und Übertragbarkeit, damit auch Daten mit unterschiedlichen Bezugsjahren und weiteren Untersuchungsgebieten verwendet werden könnten. Dieser Schritt erfordert auch eine angemessene Beschaffung und Aufbereitung von Datenmaterial.
3. Funktionale Ergänzung der Simulationssoftware mit geeigneten, selbst entwickelten Erweiterungen zur Verbesserung der Datenbasis und der Softwarekonfiguration sowie zu einer verbesserten Abbildung des Verkehrsverhaltens. Dies betrifft hauptsächlich die Abhängigkeit der Verkehrsnachfrage von Aktivitäten und deren Verkehrsmittelwahl.
4. Rechnen der zwei Szenarien mit jeweils repräsentativen Parametereinstellungen für die Erzeugung von Nachfrage und Verkehrsmittelwahl. Zur korrekten Parametrisierung wird die betreffende Dokumentation beigezogen.
5. Testen der Realitätsnähe der Simulation, indem das Verkehrsaufkommen von motorisiertem Individualverkehr, öffentlichem Verkehr und Fahrradverkehr aus der Simulation den vor Ort gemessenen Werten gegenübergestellt und Abweichungen beschrieben werden. Darauf aufbauend wird die Eignung der Software bezüglich Realitätsnähe beurteilt.
6. Testen der Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens von der Aktivität und der Verkehrsmittelwahl. Als Vorlage für die Parametereinstellungen dienen zwei Szenarien, die realitätsnah sind, jedoch unterschiedliche Voraussetzungen für die Verkehrsnachfrage bieten. In der Realität könnte Szenario 1 einem durchschnittlichen Tag entsprechen, wohingegen Szenario 2 ein Tag mit besonders günstigen Voraussetzungen für die Nutzung von Fahrrad und öffentlichem Verkehr bietet. Als Beispiel für Szenario 2 wäre ein schöner Juni-Tag zu wählen, der auch einen längeren Fussmarsch zur nächsten ÖV-Haltestelle zulässt, die Lust am Fahrradfahren fördert und zudem von der Aktion BikeToWork (<https://www.biketowork.ch/de/>, 20.10.2016) unterstützt wird. Die Simula-

tionswerte werden wiederum den gemessenen Werten gegenübergestellt, die Unterschiede beschrieben und daraus eine Beurteilung abgeleitet, wie gut Aktivitäten und Verkehrsmittelwahl abgebildet werden.

AGENTENBASIERTE VERKEHRSMODELLE

Eine realitätsnahe Abbildung des Verkehrsaufkommens in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung bedingt ein Modell, das die einzelnen Strassenabschnitte der Agglomeration Bern einbezieht. Das gesamte Untersuchungsgebiet ist heterogen, kein Strassenabschnitt ist bezüglich Voraussetzung für das Verkehrsaufkommen mit einem anderen Abschnitt vergleichbar. Vereinfachungen oder Verallgemeinerungen sind nicht möglich. Zudem soll das Verkehrsaufkommen nicht nur prognostiziert sondern auch deren Abhängigkeit von der Verkehrsnachfrage erklärt werden. Daher können nicht nur Vorhersagemethoden angewendet werden. Es braucht ein Verständnis des Verkehrssystems, das mittels Systemanalyse erarbeitet werden soll.

(Bernhardt 2007) und (Bazzan and Klügl 2014) beschreiben, dass sich das komplexe Muster aus dem Zusammenspiel der heterogenen Bevölkerung in einem Verkehrssystem mit einem agentenbasierten Ansatz (ABM) gut abbilden lässt: «Within the transportation domain, ABM is particularly appropriate for modeling systems in which human decision making and action are a critical component. Examples include highway traffic, pedestrian movements, and demand modeling». Zu dieser Eignung trägt bei:

1. Dass sich ein Agent sehr ähnlich verhält wie eine Person, weil dem Agenten Eigenschaften und Interaktionsregeln zugewiesen werden können, die dem Menschen sehr ähnlich sind. Dieser Vorteil kann für die Simulation von Verkehrssituationen ebenso wie für die Generierung der Verkehrsnachfrage ausgenutzt werden (siehe auch Kapitel Literaturüberblick).
2. Eine Agentensimulation fast beliebig skalierbar und damit auch auf Untersuchungsgebiete von einer Grösse der Agglomeration Bern anwendbar ist.
3. Ein agentenbasiertes Modell Verkehrsflüsse zwischen verschiedenen Standorten abbilden kann und diese als Folge von individuellen Mobilitätsbedürfnissen erklärbar macht.
4. Eine multimodale Routenwahl in die Simulation mit eingeschlossen werden kann.
5. Dass sich Agent und Individuum sehr ähnlich sind. Ergebnisse und Visualisierungen der Simulation sind daher intuitiv verständlich.

6. Dass agentenbasierte Modelle in der Verkehrsforschung weit verbreitet sind. Viele verschiedene Themen rund um den Verkehr wurden mit agentenbasierten Modellansätzen bereits untersucht. Es kann auf einen grossen Erfahrungsschatz zurückgegriffen werden, beispielsweise die nachfrageorientierte, multiagentenbasierte Modellierung der Region Zürich und Berlin von (Balmer, Axhausen et al. 2006).

Als Nachteile von agentenbasierten Modellen wird häufig ein hoher Ressourcenbedarf erwähnt. Auch wird darauf hingewiesen, dass nicht primär die treffliche Vorhersage von Verkehrsaufkommen, sondern ein besseres Systemverständnis Ziel solcher Untersuchungen sind. Eine Alternative könnte gemäss (Bernhardt 2007) neurale Netzwerke (Englisch: neural network) sein. Das Verkehrsaufkommen auf einzelnen Strassenabschnitten zu bestimmten Zeitpunkten liesse sich damit möglicherweise besser vorhersagen. Neuronale Netzwerke funktionieren jedoch als Blackbox: es ist nicht ersichtlich, nach welchen Regeln sie das Verkehrsaufkommen schätzen. Das verunmöglicht auch eine genauere Analyse der Zusammenhänge zwischen Aktivitäten, Verkehrsnachfrage, Verkehrsmittelwahl und Verkehrsaufkommen. (Bazzan and Klügl 2014) beschreibt konventionellere mikroskopische Modelle als Alternative: four-step model, game-theoretic analysis, traffic flow simulation, cellular automata. Sie alle können aber nicht so umfassend eingesetzt werden wie die agentenbasierten Modelle, die sowohl eine räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Verkehrsprognose wie auch Einblicke in das Verkehrssystem ermöglichen.

Die Produkte MATSim, SUMO und NetLogo (<http://www.matsim.org>, 04.09.2016, Čertický, Jakob et al. 2014, http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/, 04.09.2016, Krajzewicz, Erdmann et al. 2014, <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, 04.09.2016, Wallentin and Loidl 2015) unterstützen eine agentenbasierte Simulation und werden in verschiedenen Forschungsarbeiten zur Modellierung von agentenbasierten Verkehrsfragen eingesetzt. Sie scheinen aufgrund ihrer Verwendung in der Forschung zur Beantwortung der Forschungsfrage grundsätzlich geeignet. Da sie als quelloffene Software lizenziert sind, können sie kostenlos genutzt werden. Zudem werden sie aktiv betreut und weiterentwickelt, was bezüglich Reproduzier- und Übertragbarkeit positiv zu werten ist. Eine genauere Eignungsprüfung und Auswahl der bestgeeigneten Methode erfolgt im nächsten Kapitel Modellvergleich. Die Liste alternativer Software ist lang, als Beispiel sei *AgentPolis* (Jakob, Moler et al. 2012) erwähnt.

ERLÄUTERUNGEN

Die verwendeten Begriffe *Repräsentation der Realität*, *Reproduzier- und Übertragbarkeit*, *Gegenüberstellen von Simulations- und Messwerten* bedürfen einer Präzisierung.

Als die bestmögliche Repräsentation der Realität wird in diesem Kontext erwartet, dass das Verkehrsaufkommen im Modell jenem Aufkommen entspricht, das vor Ort ermittelt wurde. Das heisst die Anzahl motorisierter Fahrzeuge und Fahrräder auf ausgewählten Streckenabschnitten pro Tag sowie die Anzahl Passagiere, die an ausgewählten Haltestellen des öffentlichen Verkehrs ein- und aussteigen. Es könnten weitere Kenngrössen wie beispielsweise Stautunden oder Fahrzeiten ermittelt werden, zudem wäre es möglich und eventuell sinnvoll, eine höhere zeitliche Auflösung zu verwenden. Darauf wird verzichtet, da vorerst die grundsätzliche Tauglichkeit des Modells überprüft werden soll. Das Mobilitätsaufkommen kann anhand der Anzahl Fahrzeuge und Passagiere gut beschrieben werden.

Der Vergleich von Modell- und Messwerten erfolgt an ausgewählten Standorten. Wichtigstes Kriterium für die Standortauswahl ist die Verfügbarkeit von Fahrzeug- und Passagierzählungen. In der Agglomeration Bern sind diese in recht hoher Dichte vorhanden, so dicht, dass eine weitere Einschränkung erfolgen musste. Folgende Kriterien wurden berücksichtigt:

- » Einbeziehen des gesamten Verkehrs auf einer Verkehrsachse. Bei mehreren Zug- und Buslinien auf derselben Strecke sollte das Mobilitätsaufkommen aller Linien summiert werden.
- » Einbeziehen von möglichst vielen Strassentypen und Verkehrsanbietern.
- » Abdecken der wichtigsten Pendlerströme.
- » Einbeziehen von Stellen, an welchen sich der Verkehr konzentriert, beispielsweise Brücken.

Dank einer guten Reproduzier- und Übertragbarkeit der Simulation sind auch andere Gebiete und Zeitbereiche leichter konfigurierbar und die Resultate einfacher wiederholbar. Erreicht wird dies durch eine möglichst umfassende Automatisierung der Abläufe (womit stets die selben Regeln angewendet werden) und Daten, die flächendeckend, frei und in gleichbleibender Qualität – zumindest für die gesamte Schweiz – vorhanden sind. Das schweizerische Bundesgesetz über Geoinformation bezweckt, «dass Geodaten über das Gebiet der Schweizerischen Eidgenossenschaft den Behörden von Bund, Kantonen und Gemeinden sowie der Wirtschaft, der Gesellschaft und der Wissenschaft für eine breite Nutzung, nachhaltig, aktuell, rasch, einfach, in der erforderlichen Qualität und zu angemessenen Kosten zur Verfügung stehen.» (<https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20050726/index.html>, 04.09.2016). Die Geobasisdaten werden stetig ausgebaut. Immer mehr behörd-

liche Daten sind frei und kostenlos zugänglich. Daneben gibt es eine grosse OpenStreet-Map (OSM) Community, welche bewohnte Gebiete detailliert und genau erfasst hat und die Informationen stets aktualisiert. (Kirchmayr-Novak 2014) hat die Datenqualität von OSM untersucht und kommt zum Schluss, dass «für die Konvertierung von OpenStreetMap-Daten in einen Strassengraph Open-Source-Software und die für ihre Anwendung erforderliche Dokumentation in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen».

UNTERSUCHUNGSGEBIET

Als Untersuchungsgebiet dienen die Gemeinden der Agglomeration Bern gemäss Definition des Bundesamts für Statistik aus dem Jahr 2000 unter Berücksichtigung der zwischenzeitlichen Gemeindefusionen (http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/regionen/11/geo/analyse_regionen/04.html, 05.04.2016).

Räumlich lässt sich ein multimodales Verkehrsnetz auf ein Gebiet einschränken, in welchem sich die meisten Einwohner aufhalten, um ihren täglichen Bedürfnissen nachzugehen. Es sind dies sicherlich Wohnen, Arbeit, Freizeit. Wie (Bundesamt für Statistik 2014) zeigt, lässt sich dieser Raum unterschiedlich definieren. Es geht aber darum, dass ein urbanes Zentrum und ein Einzugsgebiet dieses Zentrums funktional zusammenhängen und sich anhand von Messgrössen identifizieren lassen. Der Agglomerationsbegriff des Bundesamts für Statistik ist als Einschränkung des Untersuchungsgebiets dieser Arbeit passend, da dieser exakt die funktionale Abhängigkeit im Verkehrssystem zeigt. Andererseits sind Daten, die das Bundesamt für Statistik bereitstellt, genau nach diesem Agglomerationsmuster aufbereitet. Wenn sich die Agglomerationsgrenzen und die Grenzen des Untersuchungsgebiets decken, können die Daten direkt übernommen werden.

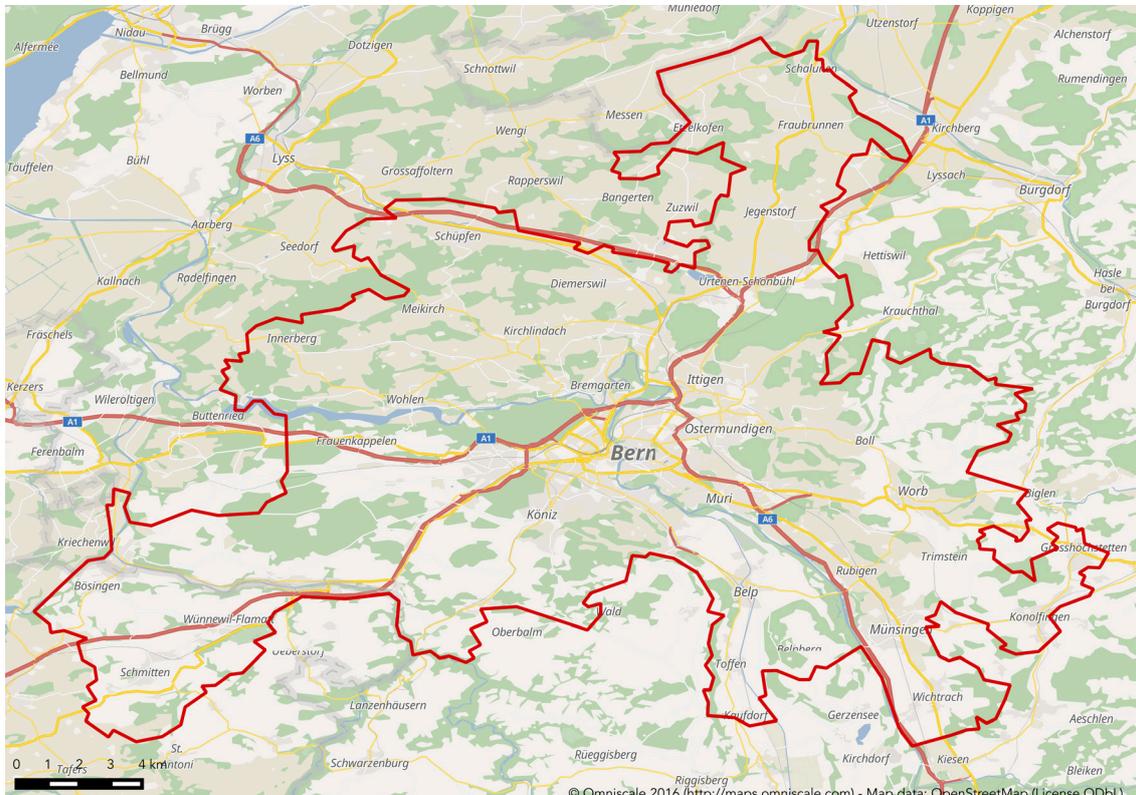


Abb. 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet Agglomeration Bern

MODELLVERGLEICH

SIMULATIONSSOFTWARE

Nachfolgend werden drei Softwareprodukte kurz vorgestellt:

SUMO (Simulation of Urban MObility, http://sumo.dlr.de/wiki/Main_Page) ist eine Open-Source-Simulationssoftware, die hauptsächlich vom Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) weiterentwickelt wird. SUMO ist unter *GNU General Public License (GPL)* lizenziert. Die Software ermöglicht mikroskopische Agentensimulationen gleichermaßen wie Verkehrssimulationen auf Makroebene. Die Software wurde bereits für ähnliche Projekte eingesetzt: *ITS Austria West* (<http://www.risc-software.at/de/geschaeftsbereiche/logistics-informatics/referenzen/1007-its-austria-west>, 28.09.2016), *LuST* (Codeca, Frank et al. 2015), *COLOMBO* (<http://www.colombo-fp7.eu>,

28.09.2016), Simulation of Urban MObility (Behrisch, Bieker et al. 2011). Es sind diverse Publikationen zur Software zugänglich. Die Referenzpublikation ist (Krajzewicz, Erdmann et al. 2012). Weitere Arbeiten sind hier aufgeführt: <http://sumo.dlr.de/wiki/Publications>, 28.09.2016.

MATSim (Multi Agent Transport Simulation, <http://www.matsim.org/about-matsim>, 28.09.2016) ist ein Open-Source-Softwareprojekt, das ein Gerüst zur Simulation von grossmasstäblichen, agentenbasierten Transportsystemen bietet. Es wird von der MATSim Community, hauptsächlich vom Institut für Land- und Seeverkehr der TU Berlin, vom Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich und Senozon betreut und weiterentwickelt. MATSim wird weltweit für Verkehrssimulationen eingesetzt (<http://www.matsim.org/scenarios>, 28.09.2016). Dazu sind diverse wissenschaftliche Publikationen erschienen: (Balmer, Axhausen et al. 2006), (Micha, #322 et al. 2012), (Ciari, Balac et al. 2015). Eine Übersicht ist unter <http://archiv.ivt.ethz.ch/vpl/publications/matsim/index.html>, 28.09.2016 und <http://www.vsp.tu-berlin.de/menue/forschung/publications/vspwp/>, 28.09.2016 zugänglich.

NetLogo ist eine programmierbare Umgebung für multiagentenbasierte Modelle. Sie eignet sich zur Simulation von komplexen Systemen im Bereich Natur- und Sozialwissenschaften. Es ist eine frei zugängliche Open-Source-Software, die unter GNU General Public License (GPL) lizenziert ist. Der Quellcode wird vom *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University* bereitgestellt. Es gibt eine NetLogo Users Group und eine Developers Group. NetLogo wird weltweit für eine grosse Bandbreite von Themen eingesetzt (<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/references.shtml>, 28.09.2016). Im Bereich Verkehrssimulationen wurde NetLogo für eine agentenbasierte Simulation von Fahrradverkehr in Salzburg eingesetzt: (Wallentin and Loidl 2015). Für den Modellvergleich wird hauptsächlich auf dieses Modell verwiesen, obwohl die Simulationssoftware Raum für diverse Alternativlösungen lässt.

NETZWERK

Eine Verkehrssimulation beginnt mit dem Netzwerk. Dessen Eigenschaften bestimmen die Bewegungen der Agenten und haben entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Simulation. Das Netzwerk muss die wichtigsten Verkehrsverbindungen und Kreuzungen einer Region repräsentieren und Informationen zu Länge, Kapazität, Nutzungseinschränkungen (Ampel, Einbahn, Radwege usw.) bereitstellen. In der Agglomeration Bern ist die Zahl der Strassen und Kreuzungen sehr hoch, es braucht Hilfsmittel, um daraus mit überschaubarem Aufwand ein Netzwerk zu erstellen. Die Simulationssoftware sollte Instrumente zur Verfügung stellen, welche die Erstellung eines Netzwerks unterstützen.

Das SUMO-Netzwerk besteht aus georeferenzierten *edges*, die weiter in eine oder meh-

rere *lanes* aufgeteilt werden können, *junctions (nodes)* mit entsprechender Vortrittsregelung, *traffic light logics* und *connections* zwischen den *lanes* und *junctions*. Ein abstraktes Netzwerk kann gemäss Dokumentation mit der Anwendung NETGENERATE erstellt werden. Mit NETCONVERT lassen sich Informationen zum Verkehrsnetz aus diversen Quellen importieren. Netzwerke aus den Simulationsprogrammen MATSim und VISUM können direkt transformiert werden. Lage, Informationen zu erlaubter Geschwindigkeit und Anzahl Spuren sowie Nutzungseinschränkungen können mit NETCONVERT aus Shapefiles und der OpenStreetMap-Datenbank importiert und daraus ein Netzwerk erstellt werden. Mit dem grafischen Netzwerkeditor NETEDIT lassen sich neue Netzwerke erstellen oder bestehende manuell anpassen.

Das MATSim-Netzwerk besteht aus den Basiskomponenten *nodes* und *links*. Den *links* können Informationen zu Länge in Metern, Durchflussmenge in Fahrzeugen pro Stunde, erlaubte Höchstgeschwindigkeit, Anzahl Spuren und eine Liste erlaubter Fahrzeuge mitgegeben werden. Alle *links* sind in nur eine Richtung befahrbar. Für die Erstellung eines Netzwerks steht ein *OsmNetworkReader* zur Verfügung, der aus einer OSM-Datei die notwendigen Informationen zieht, um ein Netzwerk zu erstellen. Mit dem *networkEditor* kann das Netzwerk manuell korrigiert oder erweitert werden. Die Netzwerkdaten werden im *network.xml* gespeichert.

Das NetLogo-Netzwerk wird für jede Simulation neu erstellt (<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/nw.html>). Es basiert auf Strassendaten, die als Shapefile in NetLogo importiert werden. Die Strassensegmentlänge wird als Kostenfaktor zwischengespeichert. Aus den Kreuzungspunkten der Strassen werden *junctions* und daraus die *breed vertices*. Über *links* sind die *vertices* miteinander verbunden. Die *links* haben als Attribut einen Kostenfaktor, der sich aus der Segmentlänge und weiteren Faktoren wie Tempolimit, Steigungen usw. zusammensetzen kann. Das Netzwerk kann die Strassen nur vereinfacht wiedergeben, da mehrspurige Strassen, Einspurstrecken oder auch separate Fahrradstreifen sehr umständlich zu integrieren sind. Die Strassendaten müssen gut aufbereitet sein, da ein Direktimport der OpenStreetMap-Daten nicht möglich ist. Das Netzwerk muss für jede Simulation neu aufbereitet werden, was Ressourcen und Zeit beansprucht.

NACHFRAGE UND AKTIVITÄTENPLANUNG

Wichtiges Element dieser Arbeit ist die Untersuchung der Abhängigkeit von Verkehrsaufkommen und Verkehrsnachfrage. Gefragt wird, wie sich Nachfrageänderungen auf das Verkehrsaufkommen auswirken und ob sich dies simulieren lässt. Die Aktivität ist ein wichtiges Bindeglied zwischen der Nachfrage und den tatsächlich unternommenen Fahrten. Die verwendete Simulationssoftware soll somit möglichst realitätsnah aus einer Nachfrage eine Aktivität, und daraus Fahrten auf dem Netzwerk erzeugen können.

SUMO generiert die Aktivität aufgrund der Eigenschaften einer Population (in dieser Arbeit gleichbedeutend mit Einwohner der Agglomeration Bern). So zum Beispiel die Altersverteilung, die räumliche Verteilung von Wohn- und Arbeitsplatzstandorten, die räumliche Verteilung von Schulen, der Anteil von Freizeitaktivitäten, der Besitz von Autos und so weiter. Die Nachfrage muss manuell in der vorgegebenen Struktur in einem XML File (SUMO Statisticsfile) abgespeichert werden. Das Programm eWorld (<http://eworld.sourceforge.net>) kann die Eingabe assistieren. ACTIVITYGEN rechnet daraus die Aktivitäten *work*, *school* und *free time* und weist diese den Verkehrsmitteln *walking*, *bike*, *car* und *bus* zu. Die erzeugten Aktivitäten werden im TRIPFILE gespeichert, das die Elemente *trip ID*, *depart*, *from edge*, *to edge* und optional auch einen Kostenfaktor pro *edge* aufnehmen kann.

Bei MATSim (Rieser, Dobler et al. 2013) wird die Nachfrage mittels eines *day plans* in die Simulation eingebunden. Alle Agenten zusammen bilden eine Population, die wiederum eine Liste von Personen enthält. Jeder Person ist eine Liste von *day plans* zugewiesen. Diese *day plans* enthalten eine Liste von Aktivitäten inklusive Zeiten, Reisen und Verkehrsmittel. Pro Simulation ist genau ein Plan ausgewählt. Die Auswahl erfolgt zufällig, jedem Plan kann aber eine Eintretenswahrscheinlichkeit (*scoring*) zugewiesen werden. Bei einer Neuplanung (*replanning*) wird basierend auf Erfahrungen ein neues *scoring* zugewiesen (evolutionary optimization algorithm). Aktivitäten sind über Koordinaten oder einen Link verortet. Die *day plans* werden in der Datei *population.xml* gespeichert.

Bei NetLogo müsste die Nachfrage durch eine entsprechende Programmierung erzeugt, in eine Aktivität umgelegt und als Verkehrsaufkommen simuliert werden. In (Wallentin and Loidl 2015) wird die Nachfrage mittels Anzahl Radfahrer, Geschwindigkeit der Radfahrer, Start- und Zielort im Netzwerk und Startzeit gesetzt. Es werden verschiedene Radfahrertypen (*working*, *leisure*, *student*) unterschieden, die in den jeweiligen Zeitbereichen mit zufälliger Geschwindigkeit (zufällige Abweichung von der Durchschnittsgeschwindigkeit) unterwegs sind. Die Dichte der Agenten am Start- und Zielort hängt von der Einwohner-, Arbeitsplatz- und Studentendichte der in die Simulation geladenen Grundlagedaten ab. Per Parameter können Anzahl Radfahrer, Durchschnittsgeschwindigkeit, Routing Optionen und der Option, ob die Radfahrer zurückfahren, gesetzt werden.

ROUTENPLANUNG

Sobald bekannt ist, wo und wann Agenten ihre Aktivität im Netzwerk aufnehmen und wohin sie sich bewegen, geht es darum, die geeignetste Route mit dem geeignetsten Verkehrsmittel zu wählen. Geeignet heisst im Normalfall kostengünstig. Die Kosten können sich aus verschiedenen Komponenten wie Reisedauer, verbrauchte Energie und Sicherheit zusammensetzen. Idealerweise wählt ein Agent die kostengünstigste Route beim aktuellen Verkehrsaufkommen, wobei sich die Kosten einer Reise für jedes Verkehrsmittel gleicher-

massen berechnen lassen sollte. Die Verkehrsmittelwahl hängt wiederum von verschiedenen Komponenten ab: Der kostengünstigsten Route, ob ein Agent ein Auto besitzt und ob er in der Lage ist, Fahrrad zu fahren. *Dynamic Traffic Assignment (DTA)* ist eine Technik, die durch Iteration die ideale Route für einen Agenten sucht und dabei das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer berücksichtigt (Siehe dazu auch Kapitel Literaturüberblick).

SUMO bietet mit dem Programm DUAROUTER (<http://www.sumo.dlr.de/wiki/DUAROUTER>, 28.09.20016) die Möglichkeit, Nachfrage (das Ergebnis der ACTIVITYGEN Berechnung) in Reiserouten umzurechnen oder beschädigte Routen zu reparieren. Mit dem Programm DUAIERATE.PY kann eine *dynamic user assignment (DUA)* durchgeführt werden. Hierzu werden die Befehle DUAROUTER und SUMO nacheinander ausgeführt, um ein Optimum bezüglich Reisekosten für jeden Agenten herauszuholen. Es ist eine iterative Annäherung an ein Gleichgewicht. Allerdings berücksichtigt DUAROUTER nur Strassenverkehr, der öffentliche Verkehr wird von der Routenplanung und dem *dynamic user assignment* ausgeschlossen. Als multimodales Verkehrsmittel unterstützt SUMO grundsätzlich Langsamverkehr (Fussgänger, Fahrradfahrer), Autoverkehr und öffentlicher Verkehr (Bus). Als Kriterium zur Nutzung des öffentlichen Verkehrs berücksichtigt ACTIVITYGEN nicht die Reisekosten, sondern hauptsächlich die Entfernung zur nächsten Busstation. Es gibt die Möglichkeit, eigentliche Mobilitätspläne für eine Person zu erstellen, wobei in Zukunft auch intermodales Routing möglich sein soll (<http://sumo.dlr.de/wiki/Specification/Persons#Rides>). Es besteht keine Verknüpfung von ACTIVITYGEN und den Personen-Mobilitätsplänen.

MATSim rechnet Routen mit den in den *day plans* enthaltenen Trips bestehend aus Startzeitpunkt, Startort und Zielort. Um die schnellste Route pro Agent zu finden, wird *dynamic traffic assignment (DTA)* angewendet. Die Routen werden mehrmals hintereinander gerechnet. Nach jedem Durchgang wird ein Teil der Routen – normalerweise jene mit dem tiefsten *scoring* – gelöscht und mit der aktuellen Situation neu gerechnet. Nach vielen Durchgängen wird ein *stochastic user equilibrium (SUE)* erreicht. Ein wichtiger Teil ist das *scoring*, also eine Beurteilung der getesteten Routen, das entscheidet, welche Route im Iterationsprozess weiter verfolgt werden soll. Mit diesem *scoring* kann die Erfahrung eines Agenten simuliert werden. Die *day plans* werden mithilfe von *rerouting*-Strategien angepasst, die im *stragy modules* beschrieben sind. MATSim kann auch öffentlicher Verkehr simulieren. Hierzu sind zwei weitere Dateien anzulegen: Eine Fahrplandatei mit Informationen zu Linien, Routen, Haltestellen, Abfahrtszeiten (*shedule.xml*) und eine Beschreibung der Fahrzeuge (*transitVehicles.xml*). Der öffentliche Verkehr (*transit legs*) wird durch die Lokalisierung von Haltestellen und *transit services* beschrieben, der Autoverkehr (*car legs*) durch Link-Listen, die ein Agent in der korrekten Reihenfolge durchlaufen muss.

Die Routenwahl erfolgt im NetLogo Radfahrermodell über einen Kostenfaktor, der dem Link, welcher die *vertices* miteinander verbindet, als Attribut mitgegeben wird. Kostenfaktoren können beispielsweise die Streckenlänge, die Steigung oder die Sicherheit sein. Pro

Agent wird die Route mit den geringsten Kosten gewählt. Im Radfahrermodell werden ausschliesslich Fahrradfahrer berücksichtigt. Selbstverständlich kann das Modell durch weitere Verkehrsmittel ergänzt werden.

AUSGABEMÖGLICHKEIT

Zur Auswertung der Simulationsergebnisse müssen Daten, Grafiken und/oder Bilder ausgegeben werden können.

SUMO Simulationen können auf der Konsole oder im *graphical user interface (GUI)* durchgeführt werden. Mit dem GUI kann die Simulation zur Realzeit mitverfolgt werden. Es können einige Darstellungsoptionen wie Farbe, Ausschnitt und Zoombereich gesetzt werden. Zudem lässt sich ein Hintergrundbild laden. Die Simulation kann diverse Werte zu den Fahrzeugen, Strassen und Fahrbahnen ausgeben (<http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Output>, 28.09.2016). So beispielsweise die Anzahl Fahrten pro Stunde oder Tag.

MATSim visualisiert Simulationsergebnisse über den *Senozon Via Visualisierer* (<http://via.senozon.com/>, 28.09.2016) oder OTFV (on the fly visualizer <http://matsim.org/docs/extensions/otfvis>, 28.09.2016), wobei *Senozon Via Visualisierer* kostenpflichtig ist. Daneben können diverse Statistiken zu den *scores* und Distanzen der Verkehrsmittel zusammengestellt werden. Die aktuellen *day plans* können ebenso ausgegeben werden wie ein Verkehrsmittelhistogramm oder die Reisedauer pro Durchgang. Für jeden Netzwerk-Link sind die stündlichen Zählwerte und die Reisedauer verfügbar.

Das NetLogo-Fahrradmodell bietet die Möglichkeit, das Verkehrsaufkommen (Anzahl Fahrten) an Zählstationen auszugeben, die Fahrradfahrer während dem Simulationsdurchlauf zu visualisieren, Heatmaps darzustellen oder Simulationsfilme zu erzeugen.

DOKUMENTATION

Die SUMO Dokumentation ist als Wiki aufgebaut. Es gibt Beschreibungen zu den Programmen der SUMO Simulationsumgebung, Tutorials, Beispiele und Nutzungstipps. Die Dokumentation erstreckt sich über die wichtigsten Themenbereiche, ist komplett und frei zugänglich. Da es sich um ein Wiki handelt, kann sie die Community jederzeit ergänzen. Der Support über das SUMO User Forum antwortet schnell und hilfreich. Es fällt jedoch auf, dass gewisse Bereiche sehr knapp gehalten sind und Funktionen und Fehlermeldungen nur unzureichend erläutert werden. Link zur Dokumentation: http://sumo.dlr.de/wiki/SUMO_User_Documentation, 28.09.2016

Die MATSim Dokumentation ist umfangreich, deckt Beschreibungen zum Programm so wie Tutorials und Beispiele ab. Mit dem MATSim Buch (Horni, Nagel et al. 2016) konnten die etwas verstreuten und unstrukturierten Informationen in einem 500-seitigen Werk zusam-

mengebracht werden. Auf einige Teile der MATSim Dokumentation konnte nicht zugegriffen werden, da sie passwortgeschützt sind. Link zur Dokumentation: <http://www.matsim.org/docs>, 28.09.2016

Die NetLogo Dokumentation ist sehr umfangreich, übersichtlich und gut strukturiert. Alle Funktionen sind detailliert erklärt und es gibt Tutorials und Beispiele. In Internetforen sind Ideen und Beispiele zu NetLogo Code zu finden, Probleme werden oft eingehend diskutiert. Link zur Dokumentation: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/index.shtml>, 28.09.2016

ERWEITERBARKEIT

SUMO besteht aus mehreren eigenständigen Programmen, die unabhängig voneinander angesprochen werden können. Die meisten Programme sind in C++ und Python programmiert. Erweiterungen von SUMO sollten sich in die bestehende Landschaft der Applikationen einfügen lassen und diese nicht behindern oder aushebeln (Krajzewicz, Erdmann et al. 2014). Ansonsten gibt es keine Einschränkungen bezüglich Programmiersprache, Form und Ort der Erweiterung.

MATSim ist in JAVA programmiert. Um es anzuwenden braucht es grundlegende JAVA- und Eclipse-Kenntnisse und um es zu erweitern gute JAVA-Kenntnisse.

NetLogo ist eine eigene Multi-Agenten-Programmiersprache, die auf der Programmiersprache Logo basiert. Ziel war es, eine einfach zu erlernende und trotzdem voll ausgestattete Programmiersprache zu entwickeln. NetLogo ist schnell erlernbar und stellt diesbezüglich keine grosse Hürde dar.

LIMITATIONEN BEZÜGLICH UNTERSUCHUNGSGEBIET

Die Agglomeration Bern mit rund 370'000 Einwohnern und rund 100'000 Strassenabschnitten hat eine nennenswerte Grösse. Diese stellt Anforderungen an die Hardware, speziell dann, wenn die Technik des dynamic traffic assignment (DTA) mit der iterativen Neurechnung der Agenten-Routen angewendet wird.

SUMO führt in der Dokumentation keine Mindestanforderungen und Limitationen bezüglich Hardware auf. Da SUMO in mindestens ebenso grossen Gebieten bereits eingesetzt wurde, wird davon ausgegangen, dass hier keine gravierenden Limitationen zu erwarten sind, wobei sie auch nicht auszuschliessen sind.

MATSim gibt verschiedene Hardwarevoraussetzungen vor: Für einfache Simulationen sollten 1GB RAM und 500MB freier Speicherplatz ausreichen. Für grosse Szenarien (100 000+ Agenten, Netzwerke mit 50 000+ links) braucht es mindestens 4GB RAM und 200 GB freier Speicherplatz. Um viele grosse Szenarien zu testen und miteinander zu vergleichen, werden

multiple high-end Computer oder Server mit mindestens 4GB RAM und mindestens 1TB freier Speicherplatz empfohlen.

NetLogo stiess bei der Radfahrsimulation in Salzburg (Wallentin and Loidl 2015) an Grenzen. Die Routenberechnung braucht bei grossen Netzwerken sehr viel Ressourcen. Beim Ausdehnen des Netzwerks auf das Gebiet der Agglomeration Bern und der Integration von weiteren Verkehrsmitteln wird mit einem massiven Ressourcenmangel gerechnet.

EIGNUNG

Nachfolgend sind die wichtigsten Punkte zu den drei Simulationssoftware-Paketen zusammengefasst:

SUMO:

- » Möglichkeit, Netzwerke aus OpenStreetMap-Daten zu erstellen.
- » Möglichkeit, mit ACTIVITYGEN das Verkehrsaufkommen nachfrage- und aktivitätenbasiert zu modellieren.
- » Möglichkeit, verschiedene Verkehrsmittel zu modellieren.
- » Möglichkeit, abhängig vom tatsächlichen Verkehrsaufkommen die kostengünstigste Agenten-Route zu eruieren.
- » Die Applikations-Landschaft um SUMO erlaubt eine flexible und einfache Erweiterung durch eigene Skripts und Programme.
- » Der Quellcode aller Applikationen und die gesamte Dokumentation ist frei zugänglich.
- » SUMO hat eine aktive Community.
- » Unklar ist, wie sich die Verkehrsmittel Fahrrad und Bahn integrieren lassen.
- » Es existiert keine Möglichkeit, Routen mit dem öffentlichen Verkehr zu berechnen.
- » ACTIVITYGEN ist für die aktivitätenbasierte Verkehrssimulation eine zentrale Applikation. Noch ist nicht klar, wie gut sie sich erweitern lässt.

MATSim:

- » Möglichkeit, Netzwerke aus OpenStreetMap Daten zu erstellen.
- » Möglichkeit, das Verkehrsaufkommen mit den *day plans* nachfrage- und aktivitätenbasiert zu modellieren.
- » Möglichkeit, verschiedene Verkehrsmittel zu modellieren.
- » Möglichkeit, abhängig vom tatsächlichen Verkehrsaufkommen die kostengünstigste Agenten-Route zu eruieren.

- » Möglichkeit, Routen mit dem öffentlichen Verkehr zu berechnen.
- » Der Quellcode von MATSim ist OpenSource und die meisten Applikationen sind frei zugänglich, einige Applikationen und Dokumentationen sind jedoch davon ausgenommen, da sie kommerziell vertrieben werden (beispielsweise das Visualisierungstool Senozon Via, <http://via.senozon.com>, 28.09.2016).
- » Die Erweiterbarkeit stellt einige Anforderungen, so braucht es dazu JAVA/Eclipse-Kenntnisse. Zudem ist nicht klar wie einfach es wäre, die *day plan* zu erweitern oder weitere Einflüsse auf die Verkehrsmittelwahl einzubeziehen.
- » Es ist nicht klar, wie der Fahrradverkehr modelliert werden kann.

NetLogo:

- » Bietet die volle Flexibilität, ein Verkehrsmodell nach den Anforderungen der Forschungsfrage zu entwickeln.
- » Aktivitätenbasierte Verkehrsnachfrage, multimodale Routenplanung, Wahl der besten Route abhängig vom tatsächlichen Verkehrsaufkommen und Einfluss von Erfahrungen können integriert werden.
- » Es sind Ressourcenengpässe zu erwarten, da das Radfahrermodell (Wallentin and Loidl 2015) bereits an Grenzen stiess und das simulierte Gebiet kleiner war als die Agglomeration Bern (weniger Einwohner, weniger Strassen)

Es lässt sich festhalten, dass sich NetLogo nicht eignet, um eine komplexe Routen- und Verkehrsmittelwahl in einem Untersuchungsgebiet von der Grösse der Agglomeration Bern durchzuführen. Es sei denn, der Ressourcenverbrauch könnte massiv reduziert werden. Nach dem aktuellen Informationsstand gelingt dies aber nur durch Abstriche beim Vorhaben: Eine Einschränkung auf eine Teilregion oder eine Vereinfachung des Strassennetzwerks. Damit könnte die Frage der Simulierbarkeit des gesamten Verkehrsnetzwerks in der Agglomeration Bern nicht beantwortet werden.

SUMO und MATSim hingegen sollten auch grössere Regionen simulieren können, ohne die Ressourcen zu überlasten. Unsicherheiten bestehen bei diesen beiden Softwareprodukten bezüglich Konfiguration und Erweiterbarkeit der beiden zentralen Programme ACTIVITY-GEN und *strategy module*. Sie müssten einerseits mit den verfügbaren Daten ausreichend gut konfiguriert und zugleich durch eine multimodale Routenplanung inklusive Fahrrad ergänzt werden können. Das *strategy module* und die gesamte Nachfrage- und Verkehrsgenerierung scheint in MATSim komplexer aufgebaut, besser konfigurierbar und besser dokumentiert zu sein. Möglicherweise hat dies eine Einschränkung bei der Erweiterbarkeit zur Folge. Generell erwarte ich bei MATSim mehr Aufwand beim Konfigurieren und Erweitern, da Änderungen am JAVA-Code gemacht werden müssen. Bei SUMO kann auf eine beliebige, geläufigere Programmiersprache (beispielsweise PYTHON) zurückgegriffen werden.

Da aufgrund der Dokumentationen und Beschreibungen der beiden Produkte MATSim und SUMO keines eindeutige objektive Vorzüge hat und eine ähnlich gute Eignung zur Beantwortung der Forschungsfrage erwartet werden darf, wurden subjektive Argumente bei der Auswahl der Software in den Vordergrund gestellt. SUMO verspricht die etwas grössere Flexibilität bei der Erweiterung von bestehenden Applikationen und eine uneingeschränkte Zugänglichkeit zu allen Programmen und Dokumentationen. Deshalb wird für die nächsten Schritte das Softwareprodukt SUMO eingesetzt.

DATENPOOL

DATENVERFÜGBARKEIT

Die Verkehrssimulation in der Agglomeration Bern stützt sich auf Grundlagedaten bestehend aus Strasseninformationen und Statistikdaten diverser Kantons- und Bundesstellen sowie auf Forschungsberichten und Messdaten bestehend aus Verkehrszähl- und Passagierdaten an ausgewählten Standorten der involvierten Mobilitätsanbieter. Die Grundlagedaten sind grösstenteils frei verfügbar und können bei OpenStreetMap sowie den Kantons- und Bundesämtern bezogen werden. Messdaten wurde bei den folgenden Mobilitätsanbieter angefragt:

- » Bundesamt für Statistik: Zähl- und Passagierdaten zu Kantons- und Bundesstrassen stehen beim Bundesamt für Statistik auf dem Webportal zur Verfügung (<http://www.portal-stat.admin.ch/ssvz/index.html>).
- » Tiefbauamt der Stadt Bern: Betreiberin von Messstellen auf Gemeindestrassen im Stadtgebiet für verschiedene Fahrzeugtypen, auch Fahrräder. Daten wurden auf Anfrage für einen bestimmten Zeitraum und eine Auswahl von Messstellen zur Verfügung gestellt.
- » RBS: Betreiberin des Regionalverkehrs Bern – Solothurn von Bahn- und Buslinien. Passagierzähl- und Passagierdaten wurden auf Anfrage zur Verfügung gestellt.
- » BLS: Betreiberin der S-Bahn und Regioexpresszügen der erweiterten Agglomeration Bern. Passagierdaten von ausgewählten Haltestellen und Linien wurden zur Verfügung gestellt.
- » BernMobil: Betreiberin des Stadtberner Bus- und Tramverkehrs. Passagierdaten von ausgewählten Haltestellen und Linien wurden zur Verfügung gestellt.

- » Postauto Schweiz: Betreiberin des regionalen Busverkehrs. Aggregierte Passagierdaten von ausgewählte Haltestellen und Linien wurden zur Verfügung gestellt.
- » Drahtseilbahn Marzili-Stadt Bern: Monatliche Fahrgastzahlen.

Alle angefragten Mobilitätsanbieter konnten Zählzeiten zur Verfügung stellen. Ein Export aus ihren Verkehrs- und Passagierdatenbanken war mit einem grossen Aufwand verbunden, der mit der Anzahl verschiedener Zeitabschnitte, Strecken und Stationen noch grösser wurden. Ein wichtiger Aspekt war der Datenschutz. Je mehr und detailliertere Daten zu Verfügung stehen, desto eher sind Rückschlüsse auf einzelne Personen möglich. Aus diesem Grund mussten die angeforderten Daten auf enge Zeitfenster und einige wenige, sinnvoll gewählte Streckenabschnitte konzentriert werden.

Fahrrad- und Autovermietungsstationen gehen nicht in die Verkehrssimulation ein, deshalb werden sie nicht berücksichtigt.

Nachfolgend sind die verwendeten Daten inklusive einer Beschreibung, Quelle und dem Einsatzort aufgeführt.

GRUNDLAGEDATEN

OPENSTREETMAP

Die Daten von OpenStreetMap dienen als Grundlage für das Netzwerk in der Simulation (siehe Kapitel OSM Daten für das Netzwerk). Die Daten können über das Overpass API bezogen werden (<http://overpass-api.de>, 29.09.2016).

STATISTIKDATEN

SUMO ACTIVITYGEN generiert die Verkehrsnachfrage für die Simulation. Dazu wird eine Statistikdatei benötigt, die diverse statistische Informationen zum Untersuchungsgebiet enthält.

- » Einwohner, Haushalte, Altersstruktur: Einwohner und Haushalte für das Jahr 2014 gemäss Bundesamt für Statistik (https://www.pxweb.bfs.admin.ch/default.aspx?px_language=de, 20.09.2016)
- » Anteil Verkehrsmittel: Pendlerstatistik der Regionalen Verkehrskonferenz Bern-Mittelland (RVK 4), basierend auf den Daten der Volkszählung 2000 (<http://www.worbeltalwärts.ch/wAssets/docs/themen/verkehr/pendlerstatistik/zusammenf.-pendler.pdf>, 20.09.2016)
- » Anteil Freizeitverkehr: Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Freizeitverkehr (<http://>

www.are.admin.ch/themen/verkehr/00250/00462/index.html?download=NHZLp-Zeg7t,Inp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCEdIB4fmym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--&lang=de, 20.09.2016)

- » Einwohnerzahlen und -position im Untersuchungsgebiet: Statistik der Bevölkerung und der Haushalte 2014 (http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/geostat/datenbeschreibung/volks-__gebäude-0.html, 20.09.2016)
- » Arbeitsplatzzahlen und -position im Untersuchungsgebiet: Statistik der Unternehmensstruktur 2013 (<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/geostat/datenbeschreibung/01.html>, 20.09.2016)

SCHULZAHLEN

Die ACTIVITYGEN Statistikdatei benötigt zudem Informationen zu den Schulhäusern, dem Alter der darin unterrichteten Schüler, Schulbeginn und Schulende sowie Position im Untersuchungsgebiet. Die notwendigen Informationen wurden von der Erziehungsdirektion des Kantons Bern (Amt für Kindergarten, Volksschule und Beratung, Statistik) zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden in der folgenden Struktur geliefert:

- » ID: Gemeindeidentifikation
- » TraegerBezeichnung: Gemeindename
- » BfS-Nr: Gemeindenummer Bundesamt für Statistik
- » GDENNameSchule: Name der Schulgemeinde
- » ID SOE: ID Schulbezirk
- » Schulorganisation: Bezeichnung der Schulorganisation
- » Schule: ID der Schule
- » Schulstandortbezeichnung: Bezeichnung der Schule
- » Adr2: Adresse der Schule, zweite Adresse
- » Strasse: Adresse der Schule, Strasse
- » Postfach: Adresse der Schule, Postfach
- » Plz: Adresse der Schule, Postleitzahl
- » Ort: Adresse der Schule, Ortsbezeichnung
- » Anz Kinder pro StaO: Anzahl Schüler pro Standort für das Jahr 2015

BUSLINIEN UND HALTESTELLEN

Auch für die ACTIVITYGEN Statistikdatei werden die Buslinien und Haltestellen im Untersuchungsgebiet benötigt. Sie sind als Geoprodukt OEVTP im Geoportal des Kantons Bern verfügbar (http://www.apps.be.ch/geo/index.php?tmpl=index&option=com_easysdi_catalog&Itemid=46&context=geocatalog&toolbar=1&task=showMetadata&type=complete&id=d94ea9c8-a90a-4566-aa17-dcfba18bb7df&lang=de, 20.09.2016) und werden für die Simulation zusätzlich aufbereitet (siehe Kapitel Erzeugung von Nachfrage).

MESSDATEN

STRASSENVERKEHRSMESSUNG

Die Stadt Bern betreibt über das Gebiet der Stadt Bern permanente und periodische Verkehrsmessstellen auf verschiedenen Strassentypen sowie Messstellen für den Fahrradverkehr. Das Tiefbauamt der Stadt Bern stellt die Daten zur Verfügung. Als besonders aussagekräftig werden Einfallstrassen aus der Agglomeration in die Stadt Bern eingestuft. An Brücken über den Fluss Aare werden die Verkehrsflüsse kanalisiert, wodurch Rückschlüsse auf das Verkehrsaufkommen eines grösseren Gebiets ermöglicht. Daten zu folgenden Stationen sind verfügbar:

TBA04 Ostring

TBA08 Länggasse

TBA11 Tiefenaustrasse

TBA13 Muri, Thunstrasse

TBA15 Europaplatz

TBA18 Schwarzenburgstrasse

TBA34 Wankdorf, Worblaufenstrasse

TBA44 Wankdorf, Schermenweg

TBA68 Wohlen, Eymattstrasse

TBA71 Neufeld, Neubrückstrasse

TBA77 Wankdorf, Papiermühlenstrasse

TBA81 Monbijoubrücke

TBA82 Lorrainebrücke

TBA88 Seftigenstrasse

Das Bundesamt für Strassen (ASTRA) betreibt eine Strassenverkehrszählung (SSVZ) auf dem nationalen und kantonalen Strassennetz. Es sollen durchschnittlicher Tagesverkehr (DTV) und durchschnittlicher Werktagsverkehr (DWV) lückenlos erfasst werden. Die gewonnenen Daten können beim Bundesamt für Statistik bezogen werden (<http://www.portal-stat.admin.ch/ssvz/index.html>, 29.09.2016). Die folgenden Messstationen liegen innerhalb der Agglomeration Bern:

BE11	Heggidorn
BE12	Zollikofen, Steinibach
BE13	Zollikofen, Moosseedorf
BE13N	Mattstetten
BE132	Münchenbuchsee
BE134	Rubigen
BE187	Worb
BE305	Kehrsatz
BE554	Belp
BE852N	Bern, Felsenauviadukt
BE944N	Schönbühl
BE946N	Muri
BE947N	Bern, Umfahrung Ost
BE950N	Bern, Bümpliz

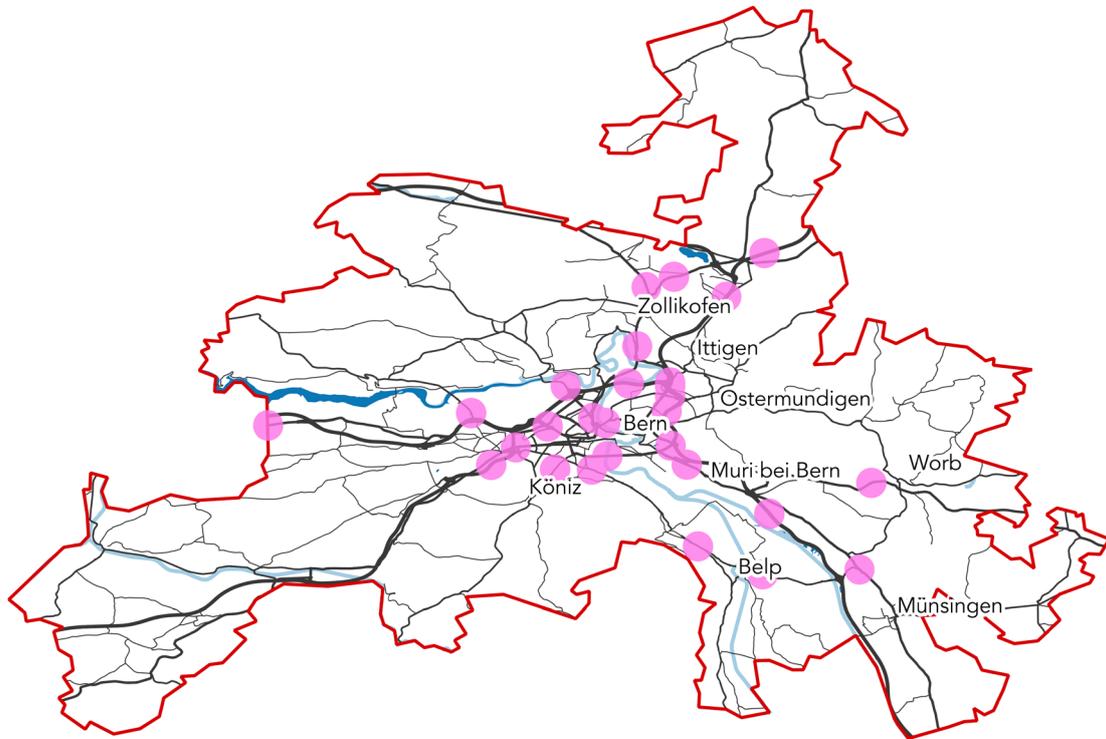


Abb. 2: Übersicht Messstellen MIV der Gesamttagglomeration Bern

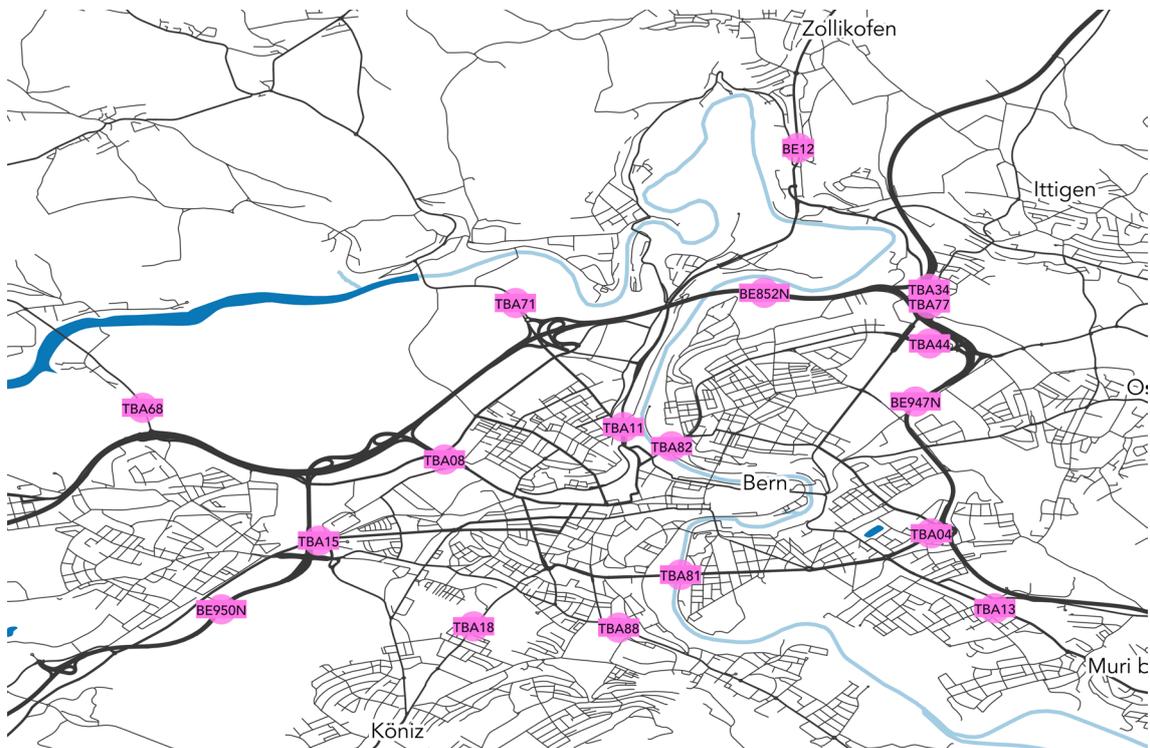


Abb. 3: Übersicht Messstellen MIV Stadt Bern



Abb. 4: Übersicht Messstellen MIV Teilagglomeration Nord

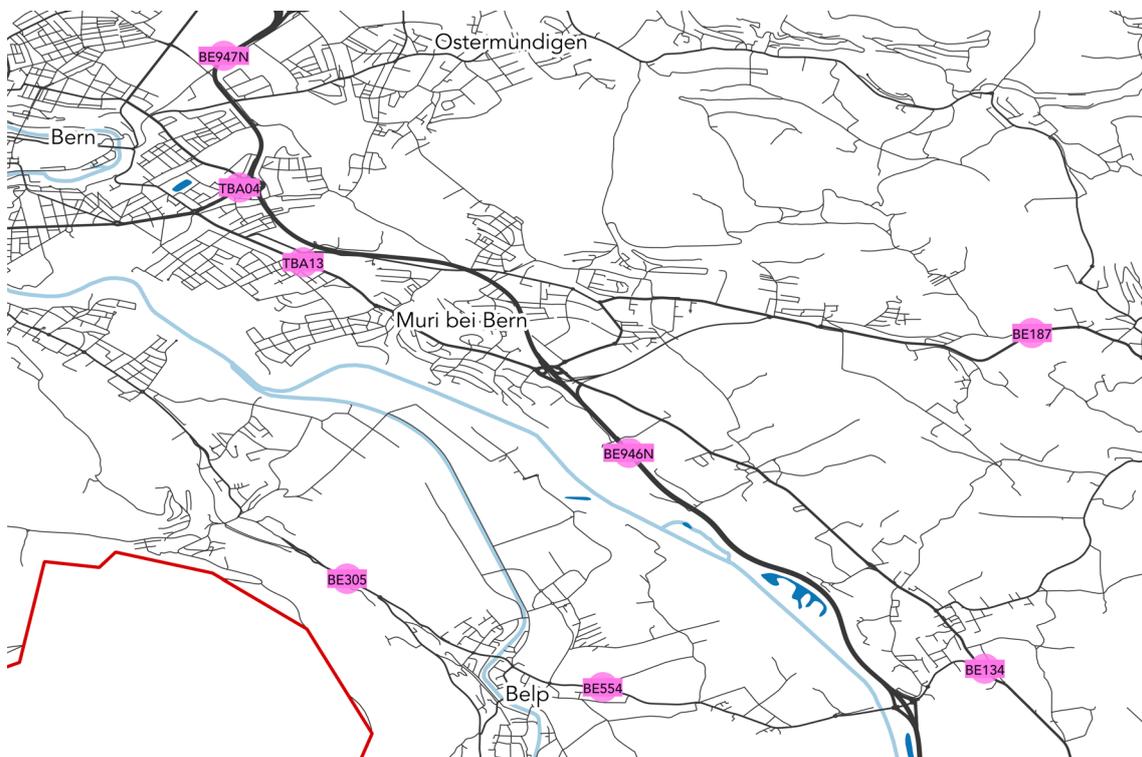


Abb. 5: Übersicht Messstellen MIV Teilagglomeration Süd

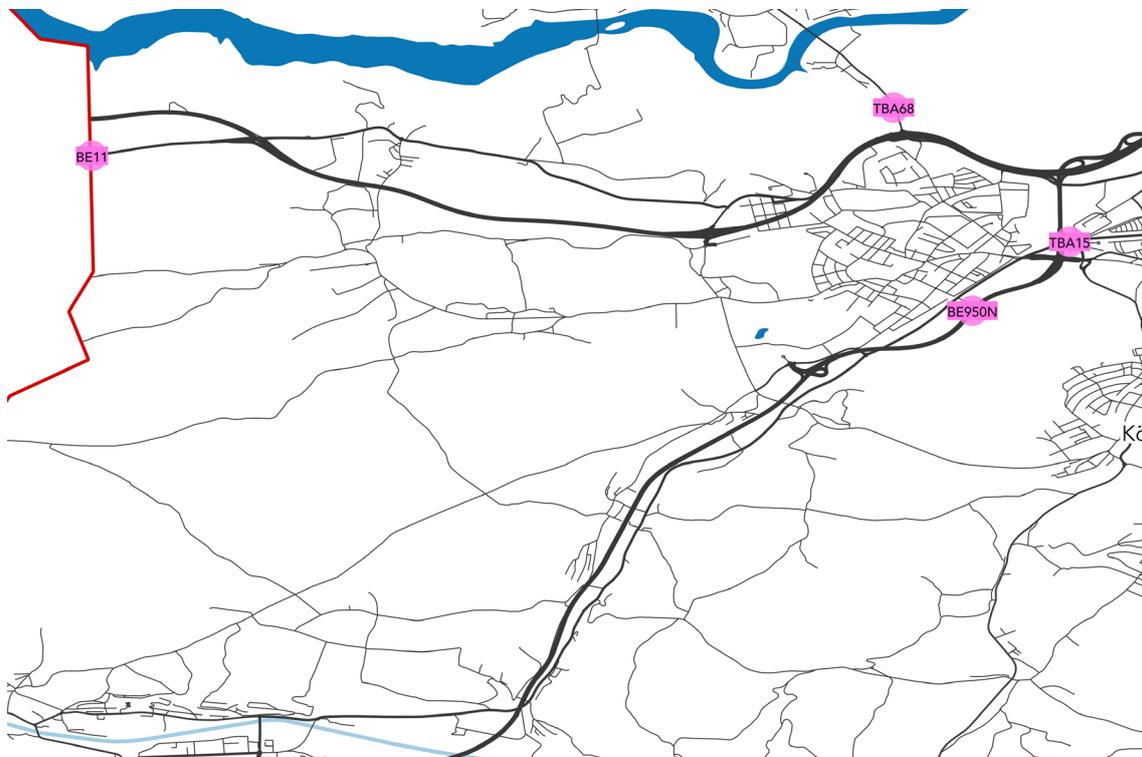


Abb. 6: Übersicht Messstellen MIV Teilagglomeration West

FAHRRADVERKEHRSMESSUNGEN STADT BERN

Die Stadt Bern betreibt über das Gebiet der Stadt Bern permanente Messstellen für den Fahrradverkehr. An 9 Standorten werden Anzahl Fahrten pro Tag gemessen, wobei zusätzlich die verkehrintensiven Tage Dienstag, Mittwoch, Donnerstag und die Morgen- und Abendspitzen aufgeschlüsselt werden. Zusätzlich wird die maximale Verkehrsbelastung im Jahresverlauf inklusive Datum angegeben. Zähldaten zum Fahrradverkehr können bei der Verkehrsplanung der Stadt Bern bezogen werden.

- V1: Tiefenaustrasse
- V2: Schwarzenburgstrasse
- V3: Kornhausstrasse
- V4: Monbijoustrasse
- V5: Kirchenfeldstrasse
- V6: Kalcheggweg
- V7: Weissensteinstrasse
- V8: Schlosstrasse
- V9: Schlosstrasse



Abb. 7: Übersicht Messstellen Fahrrad Stadt Bern

PASSAGIERZAHLEN ÖFFENTLICHER VERKEHR

Die Verkehrsanbieter in der Agglomeration Bern (RBS, BLS, BernMobil, Postauto und Drahtseilbahn Marzili-Stadt Bern) stellen Passagierzahlen zur Verfügung. Meistens konnten nur die Passagierzahlen einer Linie und auf einem bestimmten Streckenabschnitt abgegeben werden. Folgende Passagierzahlen stehen zur Verfügung:

RBS:

Zahl der ein- und aussteigenden Passagiere pro Haltestelle über den gesamten Tag, jeweils Jahresdurchschnittswerte für die Wochentage Montag bis Freitag auf den S-Bahnlinien S7, S8, S9 und Buslinien 33, 34, 36, 38, 40, 41, 43, 44, 46, 47.

BLS:

Anzahl der Passagiere zwischen zwei Haltestellen (Querschnitt) und Anzahl Ein- und Aussteiger als Jahresdurchschnittswerte Montag bis Freitag auf ausgewählten Linien und Stationen:

- » Linie S1 Flamatt–Münsingen. Querschnitte: Oberwangen–Niederwangen, Wankdorf – Ostermundigen, Rubigen–Münsingen

- » Linie S2 Flamatt–Konolfingen. Querschnitte: Oberwangen–Niederwangen, Wankdorf–Ostermundigen, Gümligen–Worb
- » Linie S3 Lyss - Belp. Querschnitte: Zollikofen–Wankdorf, Wabern–Kehrsatz
- » Linie S31 Lyss - Belp. Querschnitte: Zollikofen - Wankdorf, Wabern–Kehrsatz
- » Linie S4 Burgdorf–Belp. Querschnitte: Schönbühl–Wankdorf, Bern–Belp
- » Linie S44 Burgdorf–Belp. Querschnitte: Hindelbank–Wankdorf, Bern–Belp
- » Linie S5 Bern–Kerzers. Querschnitte: Bümpliz–Brünnen
- » Linie S51 Bern–Kerzers. Querschnitte: Bümpliz–Brünnen
- » Linie S52 Bern–Kerzers. Querschnitte: Bümpliz–Brünnen
- » Linie S6 Bern–Schwarzenburg. Querschnitte: Liebefeld–Köniz
- » Linie RegioExpress Bern–Kerzers. Querschnitt: Bern–Kerzers
- » Linie RegioExpress Bern–Münsingen. Querschnitt: Bern–Münsingen
- » Linie RegioExpress Bern–Konolfingen. Querschnitt: Bern–Konolfingen

BernMobil:

Anzahl der Passagiere zwischen zwei Haltestellen, Quartalsdurchschnittswerte Montag bis Freitag auf ausgewählten Linien:

- » Linie 3: Hasler–Eigerplatz
- » Linie 6: Rüfenacht–Scheyenholz, Brunnhof–Cäcilienrasse
- » Linie 7: Bümpliz Höhe–Bümpliz Post, Sonnenhof–Ostring
- » Linie 8: Egghölzli–Wittigkofen, Stöckacker–Bethlehem Säge
- » Linie 9: Breitenrain–Parkstrasse, Sandrain–Gurtenbahn
- » Linie 10: Monbijou–Eigerplatz, Galgenfeld–Schosshaldenfriedhof
- » Linie 12: Universität–Mittelstrasse, Zytglogge–Rathaus
- » Linie 20: Wyleregg–Breitfeld
- » Linie 21: Innere Enge–Bierhübeli
- » Linie 28: Weltstrasse–Giacomettistrasse

Postauto:

Anzahl der Passagiere zwischen zwei Haltestellen, durchschnittliche Tagesbelegung als Jahresdurchschnitt auf ausgewählten Linien:

- » Linie 560: Rosshäusern, Bahnhof–Brünnemoos b. Rosshäusern
- » Linie 570: Bern Brücken Westside, Bahnhof–Bethlehem b. Bern, Riedernrain
- » Linien 104-106: Bern, Neufeld P&R–Halenbrücke
- » Linie 107: Bern, Länggasse–Bern, Forsthaus
- » Linie 340: Wabern, Tram-Endstation–Wabern, Bächtelen

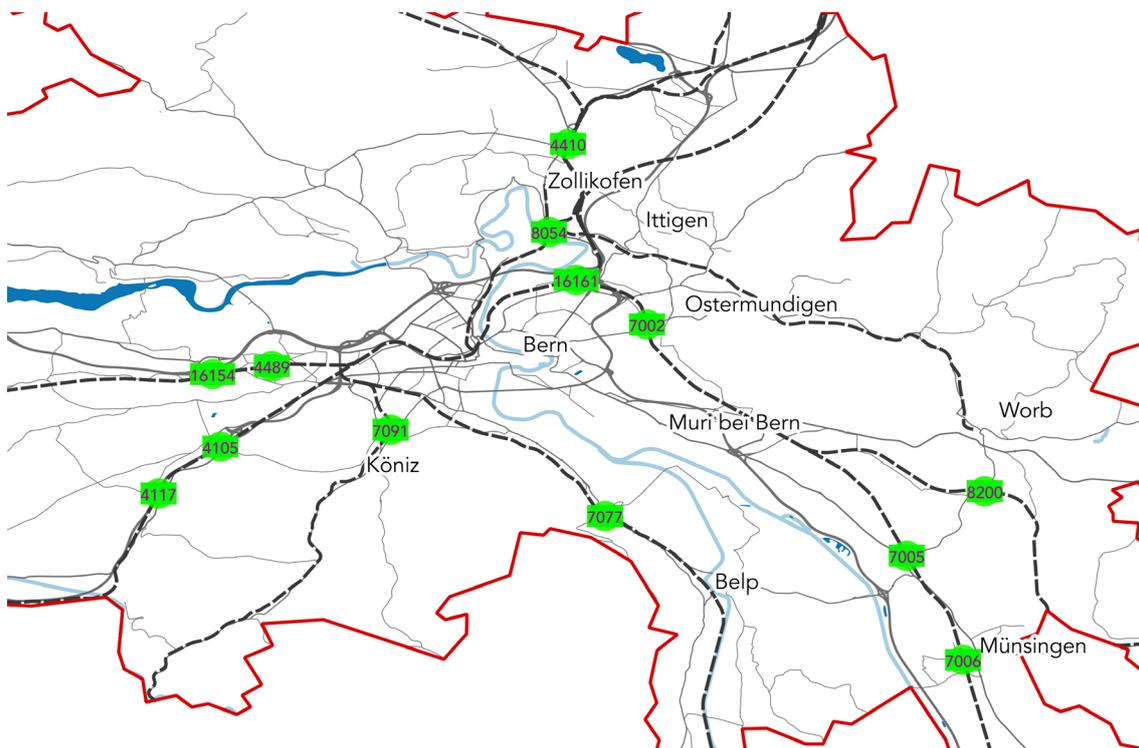


Abb. 8: Übersicht Messstellen ÖV Agglomeration Bern

AUFARBEITEN DER MESSDATEN

Die Messdaten liegen in unterschiedlicher Form vor und können teilweise nicht direkt mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Dazu müssen die Messdaten aufbereitet werden. Für den Individualverkehr interessieren die Anzahl Fahrten auf den ausgewählten Streckenabschnitten pro Tag (Montag bis Freitag). Für den öffentlichen Verkehr ist die Anzahl ein- und aussteigender Passagiere für ausgewählte Haltestellen interessant und mit den Simulationswerten vergleichbar. Die aufbereiteten Messdaten sind in den Ergebnissen zu finden.

SUMO-MODELL DER AGGLOMERATION BERN

SUMO-SIMULATIONSSOFTWARE

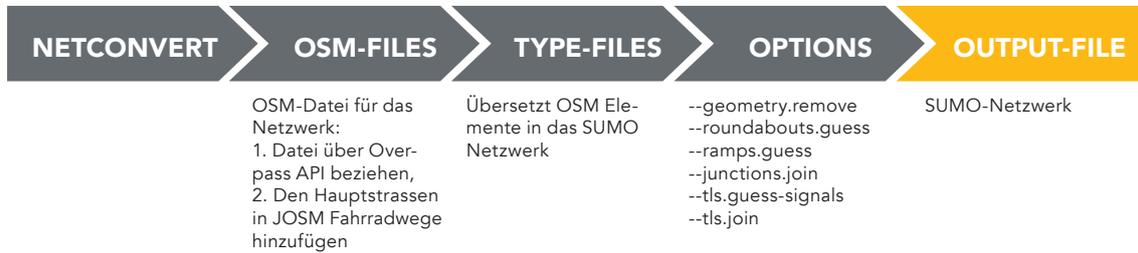
SUMO, hier in der Version 0.26 verwendet, stellt mit den Hilfsprogrammen NETCONVERT, ACTIVITYGEN, DUAROUTER und DUAITERATE.PY Instrumente zur Verfügung, die eine optimale Konfiguration der Simulation unterstützen. Die zur Verfügung stehenden Daten mussten zusätzlich aufbereitet werden, um den Erfordernissen der Hilfsprogramme gerecht zu werden. Hierzu wurden einige, nachfolgend erwähnte Python-Skripts geschrieben. Dort, wo die Konfiguration bezüglich Forschungsfrage noch nicht genügte, wurden ebenfalls eigene Python-Skripte geschrieben. Bestehende Programme wurden soweit möglich und sinnvoll für die Simulation verwendet, Fehlendes ergänzt.

Die Simulation lief auf einem Rechner mit folgenden Eckwerten: iMac mit Prozessortyp Intel Core i5, Prozessorgeschwindigkeit 3.2 GHz, 4 Prozessorkernen und 24 GB Arbeitsspeicher.

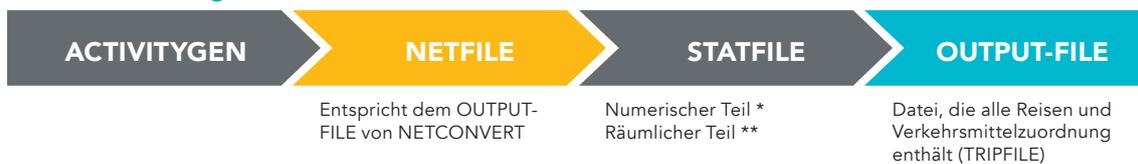
ABLAUF DER MODELLIERUNG IN SUMO

Die folgende Grafik zeigt Schritt für Schritt den Ablauf einer Modellierung in SUMO inklusive Überlegungen zum methodischen Vorgehen.

Netzwerk erstellen



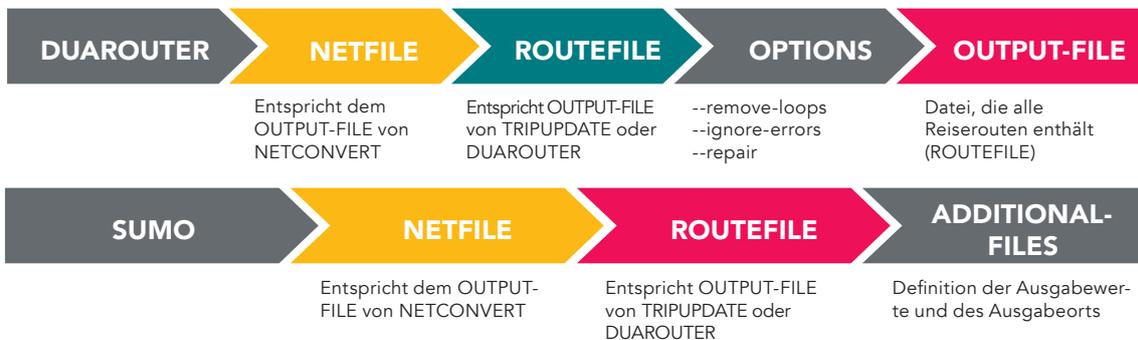
Verkehrsnachfrage erstellen und Verkehrsmittel wählen



Fahrradreisen berechnen



Reiseroute berechnen, Verkehr simulieren



Dynamische Optimierung der Reiserouten (dynamic user assignment), Verkehr simulieren



*Numerischer Teil: Numerische Parameter zur Beschreibung des Untersuchungsgebiets: inhabitants, households, childrenAgeLimit, retirementAgeLimit, carRate, unemploymentRate, footDistanceLimit, incomingTraffic, outgoingTraffic, carPreference, meanTimePerKmInCity, freeTimeActivityRate, uniformRandomTraffic, departureVariation, Altersverteilung, Zu-, Wegpendler, Arbeitszeitverteilung.

**Räumlicher Teil: räumliche Verteilung von Einwohnern, Arbeitsplätzen, Schulen und Bushaltestellen sowie Buslinien. Verorten der Punktinformationen Einwohner-, Arbeitsplatzzahl, Schulen und Busstationen auf dem nächstgelegenen Netzwerk-Strassenabschnitt. Buslinien: Abfolge der Busstationen, Fahrdauer, Fahrplaninformationen.

Abb. 9: Ablauf Modellierung in SUMO

ERSTELLEN DES NETZWERKS

OSM-DATEN FÜR DAS NETZWERK

OpenStreetMap (OSM) ist gleichermassen eine Gemeinschaft von freiwilligen Kartierern, eine Datenbank mit Raumdaten und ein Datenmodell. Die Kartierer erfassen Raumdaten indem sie auf ihr lokales Wissen, Begehungen vor Ort und Luftbilder zurückgreifen. Das Datenmodell ist einfach aber dennoch flexibel gestaltet, so dass sich ein Kartierer mit wenig Aufwand einarbeiten kann und es trotzdem möglich ist, komplexe Raumstrukturen abzubilden. Die erfassten Daten sind frei zugänglich (gemäss Richtlinien OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org/about>, 17.09.2016) und lassen sich über bestehende Schnittstellen beziehen. Die Datenqualität und -aktualität ist in dicht bewohnten Gebieten sehr gut. Bedingt durch das Prinzip der Datenerfassung muss beachtet werden, dass die Datenqualität und -aktualität räumlich variieren kann, und die Kartierung immer einen Interpretationsspielraum lässt und gleiche realweltliche Objekte dadurch verschieden kartiert werden können. Das OpenStreetMap-Datenmodell besteht aus den Elementen Punkt, Linie und Relation. Flächen sind geschlossene Linien. Elementen können Attribute zugeordnet werden, die aus Schlüssel und einem Wert bestehen.

Für das SUMO-Netzwerk der Agglomeration Bern braucht es hochwertige Strassendaten. OpenStreetMap bietet diese frei zugänglich an. (Kirchmayr-Novak 2014) zeigt, dass für die Konvertierung von OpenStreetMap-Daten in einer Strassengraph Open-Source-Software und die für ihre Anwendung erforderliche Dokumentation in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen. In diesem dicht besiedelten Gebiet ist die Aktivität der Kartierer hoch, was dem Datenbestand der OSM-Datenbank zugute kommt. Es ist davon auszugehen, dass OpenStreetMap-Daten eine gute Basis für die Verkehrssimulation bilden.

Die Daten können über das overpass API bezogen und mit JOSM und OSMOSIS bearbeitet werden. JOSM und OSMOSIS sind Programme zur Bearbeitung von OpenStreetMap-Daten. Mit JOSM können einzelne Elemente – Stützpunkte und Attribute – bearbeitet werden. OSMOSIS dient hier hauptsächlich zur Filterung von OpenStreetMap Daten nach Attributen. Beide Programme arbeiten mit OpenStreetMap-Datenbankauszügen vom Format OSM.

SUMO beinhaltet in der verwendeten Version kein Bewegungsmodell für Fahrräder. Für multimodale Verkehrssimulationen, die Fahrradverkehr beinhalten sollen, empfiehlt die SUMO-Dokumentation (<http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Bicycles>)

1. Fahrräder als langsame Fahrzeuge oder
2. als schnelle Fussgänger zu simulieren.

In der Agglomeration Bern gibt es nur wenige Räume, die durch Fussgänger und Fahrrad-

fahrrern gemeinsam genutzt werden. Fahrradwege verlaufen meist am Strassenrand oder auf separaten Fahrradwegen. Aus diesem Grund wird Ansatz 1 gewählt. Die SUMO-Dokumentation listet hierfür einige Einschränkungen auf. Die wichtigsten sind:

- » Fahrradwege können nur einseitig befahren werden, für bidirektionales Fahren muss eine zusätzliche Spur in der OSM-Datei erfasst werden.
- » Fahrradfahrer können auf einer einspurigen Strasse nicht überholt werden. Damit die Fahrräder keine Staus verursachen, kann eine zusätzliche Fahrradspur eingefügt werden. Mit der entsprechenden Einschränkung in der SUMO-Netzwerkdatei, ist deren Nutzung nur Fahrrädern erlaubt.

Um dem entgegen zu wirken, werden für die OSM-Werte *highway*, *primary* und *secondary* ein zusätzliches Attribut *cycleway=lane* gesetzt (zum Beispiel mit Hilfe von JOSM). Bei der Generierung des SUMO-Netzwerks wird damit für die Strassen *primary* und *secondary* jeweils eine *bicycle lane* erzeugt.

Die OSM-Datei enthält jetzt alle wichtigen Elemente, aber auch einige, die nicht benötigt werden. OSMOSIS kann diese herausfiltern. Als wichtig gelten jene Elemente, die Teil des Verkehrsnetzes sind und sich zu einem zusammenhängenden Netz ergänzen. Es zeigt sich, dass weniger bedeutsame Verkehrswege ausgeschlossen werden können: es sind dies die Wege mit den Werten *service*, *living_street*, *pedestrian*, *track*, *footway*, *bridleway*, *steps*, *path*, *sidewalk* (Definition *highway* <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Key:highway>, 20.09.2016).

Ausgeführte Programme:

```
wget -O OSM-DATEI.osm http://overpass-api.de/api/map? box=7.2013,46.8246,7.6507,47.1226 osmosis --read-xml file="OSM-DATEI.osm" --tf accept-ways highway=* railway=rail,-funicular,light_rail,narrow_gauge,subway,tram --tf reject-ways highway=service,living_street,pedestrian,track,footway,bridleway,steps,path,sidewalk --used-node --tf reject-relations --write-xml file="FILTER-OSM-DATEI.osm"
```

Erstellte Dateien:

FILTER-OSM-DATEI.osm

NETZWERK IN SUMO

Die SUMO Verkehrssimulation braucht als Grundlage ein SUMO-Netzwerkdatei (http://sumo.dlr.de/wiki/Networks/SUMO_Road_Networks). Das XML-File setzt sich zusammen aus *edges*, die sich weiter in *lanes* unterteilen lassen, *traffic light*, *junction* und *connections*. Um eine SUMO-Netzwerkdatei zu erzeugen, empfiehlt SUMO die Verwendung der Tools NETCONVERT oder NETGENERATE, wobei NETGENERATE nur abstrakte Netzwerke

erzeugt. NETCONVERT importiert OpenStreetMap Daten direkt in ein SUMO-Netzwerkdatei. Als Importoption übersetzt das *SUMO edge type file* OpenStreetMap-Attribute in SUMO-Netzwerkdatei Attribute. Es bestimmt, wie OSM Strassentypen im SUMO-Netzwerk abgebildet werden. Hervorzuheben ist die Definition der Bahnstrecken (*rail*). Sie darf nicht als Einbahn (*oneway="false"*) attribuiert werden, da sonst nicht beide Reiserichtungen modelliert werden können.

Verschiedene NETCONVERT-Optionen verbessern das Netzwerk:

- » *geometry.remove*: löscht nicht verwendete Knoten (*nodes*). Im Unterschied zu den OpenStreetMap *nodes*, die an Verzweigungen (*junctions*) wie auch im Strassenverlauf gesetzt sind, braucht SUMO Knoten nur an *junctions*.
- » *roundabouts.guess*: Stellt sicher, dass am Kreisverkehr die korrekten Vortrittsrechte zur Anwendung kommen.
- » *ramps.guess*: Schaltet das Erkennen von Autobahn Auf- und Abfahrten ein.
- » *junction.join*: Vereint nahe beieinander liegende *junctions* (Kreuzungsgruppen).
- » *tls.guess-signals*: OpenStreetMap benutzt häufig einen Punkt vor der eigentlichen Kreuzung, um die Verkehrsampel einzufügen. So kann es mehrere Ampelpunkte geben, die den Verkehr der Kreuzung regeln. Am eigentlichen Punkt, wo sich die Strassen zusammentreffen, gibt es jedoch keinen Hinweis darauf. Die Option *tls.guess-signals* weist einem Kreuzungspunkt die Informationen der nahe gelegenen Verkehrsampeln zu.
- » *tls.ignore-simple*: Verhindert, dass Verkehrsampeln an Stützpunkten eingefügt werden, die keine Kreuzung abbilden.
- » *tls.join*: OpenStreetMap kennt keine Möglichkeit, mehrere Stützpunkte einer Verkehrsampel zuzuweisen. Es braucht also für jede Ampel einen unabhängigen Stützpunkt. Trotzdem sind diese Ampeln miteinander synchron, andernfalls würde der Verkehr an der Kreuzung kollabieren. Mit der Option *tls.join* können die Ampeln einer Kreuzung gruppiert und in der Simulation synchron geschaltet werden.

Ausgeführte Programme:

```
netconvert --osm-files FILTER-OSM-DATEI.osm --type-files EDGE_TYPE_FILE.typ.xml -o NETWORK_FILE.net.xml --geometry.remove --roundabouts.guess --ramps.guess --junctions.join --tls.guess-signals --tls.ignore-simple --tls.join
```

Erstellte Dateien:

EDGE_TYPE_FILE.typ.xml

NETWORK_FILE.net.xml

Quellen:

http://sumo.dlr.de/wiki/Networks/Import/OpenStreetMap#Editing_OSM_networks

<http://sumo.dlr.de/wiki/NETCONVERT>

http://sumo.dlr.de/wiki/Networks/Import/OpenStreetMap#Editing_OSM_networks

http://sumo.dlr.de/wiki/Tutorials/Import_from_OpenStreetMap#Convert_the_Map_in_the_SUMO_Net_Forma

http://sumo.dlr.de/wiki/SUMO_edge_type_file und '<http://sumo.dlr.de/xsd/baseTypes.xsd>

NETZWERK FÜR ACTIVITYGEN

Die Verkehrsnachfrage für die Agglomeration Bern erstellt das SUMO-Programm ACTIVITYGEN (siehe Kapitel Erzeugung von Nachfrage). Zur Vorbereitung müssen Angaben wie Bevölkerungs- und Arbeitsplatzzahl, Schulen und Haltestellen auf dem SUMO-Netzwerk lokalisiert werden. Dies geschieht über die *edge ID*, welche beim Überführen der OpenStreetMap Strassen ins SUMO-Netzwerk vergeben wird. Die Verknüpfung der Statistikdaten mit dem Netzwerk soll automatisiert werden, was Ansprüche ans Netzwerk stellt: Die durch ACTIVITYGEN erstellte Nachfrage darf nur *edges* zugewiesen werden, die keine starken Nutzungseinschränkungen aufweisen. Wenn also beispielsweise die Einwohnerzahl einer Strasse einer bestimmten *edge* zugewiesen wurde, errechnet ACTIVITYGEN Reisen, die genau bei dieser *edge* ihren Startpunkt haben. Wenn diese *edge* wie dies beispielsweise bei Fahrradwegen oder Bahnlinien starke Nutzungseinschränkungen aufweist (erlaubt sind jeweils nur Fahrten per Fahrrad oder Bahn), dann wird die Simulation stark verfälscht. Um diesem Problem entgegenzuwirken, braucht es ein speziell auf diese Bedürfnisse aufbereitetes Netzwerk, das nur jene Verkehrswege enthält, die nur wenige Einschränkungen bezüglich Verkehrsmittelwahl machen.

Erschwerend kommt hinzu, dass die Vergabe der *edge ID* nicht wiederholbar ist, NETCONVERT vergibt sie für dieselben OSM Daten nicht immer gleich. Für die Simulation muss aber eine *edge ID* immer dieselbe Strasse referenzieren. Ausserdem soll die Lokalisierung der Statistikdaten für ACTIVITYGEN in einem GIS System erfolgen wie beispielsweise QGIS. Dazu muss das Netzwerk in einem kompatiblen Format gespeichert werden.

Als Reaktion auf diese Erschwernisse werden Aktivitätennetzwerke generiert, die eine Auswahl an *edges* aus dem Hauptnetzwerk enthalten, deren *edge ID* aber immer dieselbe Strasse bezeichnet. Dieses Aktivitätennetzwerk kann in zwei Schritten erzeugt werden: Das aus den OpenStreetMap-Daten erstellte Hauptnetzwerk wird mit dem Programm NETCONVERT in ein Shapefile konvertiert. Die *edges* und *nodes* werden anschliessend mittels selbst entwickeltem Programm networkToSHP.py georeferenziert und die nicht erwünschten *edges* entfernt.

Vom Aktivitätennetzwerk braucht es drei unterschiedliche Ausprägungen, die jeweils in

einem anderen Kontext zum Einsatz kommen:

1. Das komplette Netz, um die Haltestellen des öffentlichen Verkehrs korrekt zuzuordnen, aber ohne Fahrradwege. Dieses Netz wird für die Ableitung der Buslinien gebraucht.
2. Ein Netz, das nur *edges* enthält, die als Ausgangs- oder Endpunkt von Agenten dienen können. Ausgeschlossen sind Bahn- und reine Busspuren (da in OSM häufig auch Busdepots und ähnliches erfasst sind) sowie reine Fahrradspuren. Diese Netz wird für die Zuordnung der Statistikdaten gebraucht.
3. Ein Netz, das keine Einschränkungen der Spuren enthält und damit das gesamte Aktivitätensnetz abbildet. Es wird für das Einfügen der Fahrradreisen gebraucht (siehe Kapitel Simulation Fahrrad).

Da sich die Angaben zur Nachfragegenerierung auf die Agglomeration Bern beziehen, müssen auch die Aktivitätensnetzwerke den Grenzen entlang zugeschnitten werden. Als gemeinsame Projektion wird WGS84 gewählt.

Ausgeführte Programme:

```
netconvert -s NETWORK_FILE.net.xml --plain-output ACTIVITY_NETWORK_FILE.net.xml
```

```
networkToSHP_ActivityNetwork1.py (https://github.com/sumo-agglobern/script/blob/master/networkToSHP\_ActivityNetwork1.py)
```

```
networkToSHP_ActivityNetwork2.py (https://github.com/sumo-agglobern/script/blob/master/networkToSHP\_ActivityNetwork2.py)
```

```
networkToSHP_ActivityNetworkAll.py (https://github.com/sumo-agglobern/script/blob/master/networkToSHP\_ActivityNetworkAll.py)
```

Erstellte Dateien:

ACTIVITY_NETWORK_FILE.net.xml

ActivityNetwork1.shp

ActivityNetwork2.shp

ActivityNetworkAll.shp

ERZEUGEN VON NACHFRAGE

GENERIEREN VON VERKEHRSNACHFRAGE

Als Verkehrsnachfrage wird in diesem Kontext die Nachfrage nach der Benutzung von Verkehrsmitteln in der Agglomeration Bern verstanden. Der Wunsch, sich zwischen zwei Orten

zu bewegen, liegt in der Annahme, dass der Mensch aktiv ist und sein Bedürfnis nach Aktivität gestillt haben will. Der Verkehrsbenutzung zugrunde liegt, dass Wohn- und Arbeitsplätze, Bildungs- und Kultureinrichtungen, Erholungsgebiete geclustert sind und diese teilweise weit auseinander liegen und dadurch Potentialunterschiede entstehen. Die Annahme einer Clusterung wirft die Frage der Skalierung und der richtigen Grösse von Clustern auf. Das Bundesamt für Statistik (BFS) veröffentlicht Bevölkerungs- und Arbeitsplatzdaten in einem Raster von 100x100m. Für die Simulation von einzelnen Strassen oder Quartieren wäre dieses Raster sicher zu grob. Mit dem Massstab Agglomeration scheint diese Grösse aber vereinbar zu sein. Eine zu enge Rasterweite würde wohl die Simulationsgenauigkeit nicht oder nur wenig verbessern, den Rechenaufwand aber massiv erhöhen.

SUMO bietet mit ACTIVITYGEN (<http://sumo.dlr.de/wiki/ACTIVITYGEN>, http://sumo.dlr.de/wiki/Demand/Activity-based_Demand_Generation) eine Applikation an, die Fahrten aufgrund der Aktivitäten Arbeit, Bildung und Freizeit generiert. Die Fahrten werden in *origin-destination (OD)* Reihen gespeichert. SUMO nennt sie SUMO ROUTEFILE. Diese werden zugleich auch den Verkehrsmitteln Langsamverkehr (Fussgänger, Fahrradfahrer), öffentlicher Verkehr (Bus) und motorisierter Individualverkehr (Auto) zugewiesen. Als Grundlage zum Erzeugen der Aktivitäten braucht ACTIVITYGEN das ACTIVITYGEN STATFILE. Das ACTIVITYGEN STATFILE und die ACTIVITYGEN-Parameter bilden das zentrale Element dieser Simulation. Hier entscheidet sich, ob ACTIVITYGEN geeignet ist, die Verkehrsnachfrage akkurat zu erstellen und Nachfrageänderungen über die zur Verfügung stehenden Parameter in geeigneter Weise abzubilden und dadurch die Forschungsfrage zu beantworten.

ACTIVITYGEN STATFILE

Das ACTIVITY STATFILE (Statistikdatei) umfasst Informationen zum simulierten Gebiet:

- » Statistische Daten zum Gebiet: Anzahl Einwohner und Haushalte, Altersgrenzen, Zahl der Autos, Arbeitslosenzahlen, die zu Fuss zurückgelegte Distanz, Zu- und Wegpendler des simulierten Gebiets.
- » Aktivitäten Parameter: Vorliebe bezüglich Verkehrsmittel (Auto/öffentlicher Verkehr), Geschwindigkeit in der Stadt, Anteil Freizeitverkehr, nicht zuordenbarer Verkehr (Berufsverkehr, spontaner Verkehr und ähnliches), Variationen in der Abfahrtszeit.
- » Einwohnerstruktur: Anzahl Einwohner pro Altersgruppe.
- » Arbeitszeiten: Arbeitsbeginn und -ende im Tagesverlauf.
- » Verteilung von Einwohnern und Arbeitsplätzen über das Untersuchungsgebiet
- » Verkehr in das und aus dem Untersuchungsgebiet
- » Schulen im Untersuchungsgebiet
- » Buslinien und -stationen im Untersuchungsgebiet

Die benötigten Informationen lassen sich in zwei Klassen einteilen:

1. Statistische Daten und Parameter, die für das ganze Untersuchungsgebiet gelten,
2. räumliche Angaben, die nur für einen Bereich im Untersuchungsgebiet gelten und über die *edge* darin lokalisiert werden.

Die Daten in Klasse 1 können für einen Zeitpunkt und eine Parameterkombination unabhängig von der Grösse des Untersuchungsgebiets mit geringem Aufwand gesetzt werden. Der Aufwand, die Daten in Klasse 2 zu definieren, hängt hingegen stark von der Grösse des Untersuchungsgebiets und der Komplexität der darin enthaltenen Elemente ab: Netzwerk, Buslinien, Schulhäuser, Einwohner-, Arbeitsplatzstruktur und andere. Das Untersuchungsgebiet Agglomeration Bern muss als sehr gross bezeichnet werden. Die Informationen für die Daten in Klasse 2 sind nur mit übermässig grossem Aufwand manuell zusammenzustellen. Aus diesem Grund wurde das Python-Skript `activitygenAutoGenerate.py` entwickelt. Nach Aufbereitung der Ausgangsdaten stellt es die Teile

- » Verteilung von Einwohner und Arbeitsplätze über das Untersuchungsgebiet,
- » Schulen im Untersuchungsgebiet und
- » Buslinien und -stationen im Untersuchungsgebiet automatisch als Teil der Statistikdatei zusammen.

Die Informationen in der Statistikdatei sind nach dem Schema der SUMO Dokumentation gegliedert (http://sumo.dlr.de/wiki/Demand/Activity-based_Demand_Generation) und sehen wie folgt aus:

- » Einwohner und Haushalte für das Jahr 2014 gemäss Bundesamt für Statistik (https://www.pxweb.bfs.admin.ch/default.aspx?px_language=de, 20.09.2016): `inhabitants="370105", households="166761"`
- » In der Schweiz gilt als volljährig, wer das 18. Altersjahr überschritten hat: `childrenAgeLimit="18"`
- » Das Rentenalter in der Schweiz liegt bei 65 Jahren (Männer) und 64 Jahren (Frauen): `retirementAgeLimit="65"`
- » Der Motorisierungsgrad betrug 2015 gemäss Bundesamt für Statistik bei 541 Personenwagen auf 1000 Einwohnerinnen/Einwohner (http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/03/blank/02/01/01.html?CFC_cK=1349275147568&CFC_scrollTop=0, 20.09.2016): `carRate="0.6"`
- » Die Erwerbslosenquote nach ILO (<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/03/03/blank/data/01.html>) lag im Jahresdurchschnitt 2014 bei 4.5 % bezogen auf die gesamte Schweiz, das SECO publiziert für Bern eine Erwerbslosenquote 2014 von 2.68 %: `unemploymentRate="0.0268"`

- » Die maximal zurückgelegte Strecke zu Fuss beruht auf einer Annahme von 500 m. Dies ist einer jener Werte, die als Parameter verwendet werden kann: `footDistanceLimit="500"`
- » Aufgrund der Pendlerstatistik der Regionalen Verkehrskonferenz Bern-Mittelland (RVK 4), basierend auf den Daten der Volkszählung 2000 (<http://www.worbletalwärts.ch/wAssets/docs/themen/verkehr/pendlerstatistik/zusammenf.-pendler.pdf>, 20.09.2016) gibt es rund 20'000 Pendler aus der und 61'000 Pendler in die Agglomeration: `incomingTraffic="61000"`, `outgoingTraffic="20000"`
- » Die Pendlerstatistik RVK4 geht von einem Anteil motorisierter Individualverkehr von 37 bis 48 % (je nachdem ob innerhalb der Agglomeration oder agglomerationsübergreifend). Für den Freizeitverkehr publiziert das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) gar einen Anteil von 65 % (http://www.are.admin.ch/themen/verkehr/00250/00462/index.html?download=NHzLpZeg7t,lnp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCE-dlB4fmym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--&lang=de, 20.09.2016): `carPreference="0.65"`
- » Bei der Zeitschätzung, um einen Kilometer auf der Karte zurückzulegen, wird auf den Standardwert zurückgegriffen: `meanTimePerKmlInCity="360"`
- » Im Faktenblatt des ARE wird von einem Anteil von 40.2 % Freizeitverkehr an der gesamten Tagesdistanz ausgegangen: `freeTimeActivityRate="0.4"`
- » Als `uniformRandomTraffic` wird jener Verkehrsanteil bezeichnet, der von `ACTIVITYGEN` nicht explizit abgedeckt wird. Er bezeichnet gemäss Dokumentation `ACTIVITYGEN` Durchgangsverkehr, Berufsverkehr (Auslieferungen, Logistik), touristische Fahrten und Fahrten für spezielle Anlässe. Dieser Wert dient gut als Parameter für die Simulation: `uniformRandomTraffic="0.3"`
- » Für die Varianz in der Abfahrtszeit wird von etwa 4 min ausgegangen: `departureVariance="240"`
- » Als Grundlage für die Altersstruktur in der Agglomeration Bern dienen Daten des Bundesamts für Statistik zur ständigen und nichtständigen Wohnbevölkerung nach institutionellen Gliederungen, Geschlecht, Staatsangehörigkeit und Alter im Jahr 2014 (https://www.pxweb.bfs.admin.ch/Selection.aspx?px_language=de&px_db=px-x-0102010000_101&px_tableid=px-x-0102010000_101\px-x-0102010000_101.px&px_type=PX, 20.09.2016): Beispiel `<bracket beginAge="0" endAge="1" peopleNbr="3721" />`
- » Der Arbeitsbeginn wurde, basierend auf Erfahrung, zwischen 07:00 und 08:30 Uhr und das Arbeitsende zwischen 16:00 und 18:00 Uhr angesetzt: Beispiel `<opening hour="25200" proportion="0.20" />`, `<closing hour="64800" proportion="0.20" />`
- » Die Pforten für die Zu- und Wegpendler der Agglomeration Bern beschränkt sich auf

die Autobahnen. Jede Pforte bringt per Definition gleich viele Pendler in und aus der Agglomeration: Beispiel: `<entrance edge="320531927" pos="0" incoming="0.2" outgoing="0" />`

Die weiteren Daten für die Statistikdatei können mit dem erwähnten Python Skript berechnet werden. Es sind folgende Vorbereitungsarbeiten notwendig:

- » Die Zuordnung der räumlichen Informationen zum Verkehrsnetz erfolgt über die *edge ID*. Damit keine falschen Zuordnungen auftreten können – beispielsweise indem Einwohner des Agglomerationsgebiets fälschlicherweise einer Strasse ausserhalb der Agglomeration zugeordnet werden – ist das Aktivitätennetzwerk auf das Agglomerationsgebiet zugeschnitten.
- » Die Bevölkerungs- und Arbeitsplatzzahlen stammen vom Bundesamt für Statistik. Die Bevölkerung und Haushalte 2014 sind als 100 x 100m Raster strukturiert (http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/geostat/datenbeschreibung/volks-__gebaeude-0.html, 20.09.2016). Genau so wie die Statistik der Unternehmensstruktur 2013 (<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/geostat/datenbeschreibung/01.html>, 20.09.2016). Die in einer Tabelle verfügbaren Daten werden in Vektor-Punktdateien überführt und dann der nächstgelegenen *edge* zugewiesen. Dies erfolgt mit dem QGIS Plugin NNJoin (<http://www.qgis.org/de/site/>, <https://plugins.qgis.org/plugins/NNJoin/>, 20.09.2016).
- » Bei der Erziehungsdirektion des Kantons Bern wurden Angaben zu den Schulhäusern in der Agglomeration Bern angefragt. Gebraucht wird die exakte Position der Schulhäuser, welche mithilfe von OpenStreetMap Nominatim (<http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Nominatim>, 20.09.2016) und Google Geocoding API (<https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding/intro?hl=de>, 20.09.2016) aus den Adressen hergeleitet wird. Dazu wurde das Skript `schoolAdressesToCoordinates.py` entwickelt. Ausserdem braucht es Angaben zum Alter der Schüler, die dort unterrichtet werden. Diese Angaben wurden aus den Schulhausbezeichnungen (Grundschule, Sekundarschule und so weiter) interpretiert. Die Informationen zur Kapazität der Schulhäuser war in den Angaben der Erziehungsdirektion direkt enthalten. Angaben zum Unterrichtsbeginn und -ende basieren auf den üblichen Unterrichtszeiten. Die Punktinformationen wurden wiederum mit dem QGIS Plugin NNJoin der nächstgelegenen *edge* zugewiesen.
- » Die Buslinien und -haltestellen stehen im Geoprodukt OEVTP des Geoportals des Kantons Bern zur Verfügung (http://www.apps.be.ch/geo/index.php?tmpl=index&option=com_easysdi_catalog&Itemid=46&context=geocatalog&toolbar=1&task=show-Metadata&type=complete&id=d94ea9c8-a90a-4566-aa17-dcfba18bb7df&lang=de,

20.09.2016). Aus ihnen werden die Daten zu Bahn, Bus und Tram innerhalb der Agglomeration Bern herausgefiltert. Die Haltestellen und Linien sind zwei separate Datensätze, sie werden mit dem Skript `busStationToLine.py` miteinander verbunden. Danach sind die Haltestellen in zufälliger Reihenfolge an die Linien gebunden und müssen in die korrekte Fahrplanreihenfolge gebracht werden. Dieser Schritt kann nur manuell durchgeführt werden. Der Fahrplankontakt muss ebenfalls manuell zur Linie hinzugefügt werden, er basiert auf Online-Fahrplanauskünften. Die maximale Dauer einer Fahrt wird aufgrund der Länge einer Linie im Skript berechnet. Die Punktinformationen wurden wiederum mit dem QGIS Plugin NNJoin dem nächstgelegenen `edge` zugewiesen.

Es sollen insgesamt zwei Mobilitätsnachfragedateien (TRIPFILES) erstellt werden:

1. Die Hauptdatei mit den Trips gemäss Parametern, aufgeteilt auf Auto, Bus und Random (falls erwünscht).
2. Eine Mobilitätsnachfragedatei, die mit einem STATFILE erstellt wurde, keine Buslinien und -haltestellen enthält und deren Parameter `carRate` und `carPreference` auf 1 gesetzt werden. Die Datei enthält somit kein Busverkehr, alle Fahrten werden ausschliesslich mit dem Auto unternommen. Die Datei dient zur Auswertung der Anzahl Buspassagiere (siehe Kapitel Anzahl Personen an Haltestellen).

Ausgeführte Programme:

- » `busStationToLine.py` (<https://github.com/sumo-agglobern/script/blob/master/busStationToLine.py>)
- » `schoolAdressesToCoordinates.py` (<https://github.com/sumo-agglobern/script/blob/master/schoolAdressesToCoordinates.py>)
- » `activitygenAutoGenerate.py` (<https://github.com/sumo-agglobern/script/blob/master/activitygenAutoGenerate.py>)
- » `activitygenAutoGenerate_OeV` (https://github.com/sumo-agglobern/script/blob/master/activitygenAutoGenerate_OeV.py)
- » `activitygen --net-file ACTIVITY_NETWORK_FILE.net.xml --stat-file STAT_FILE.xml --output-file TRIPFILE.xml --random`

Erstellte Dateien:

- » `STAT_FILE.xml` mit allen verfügbaren Verkehrsmitteln (https://github.com/sumo-agglobern/stat-file/blob/master/agglobern_stat.xml und https://github.com/sumo-agglobern/stat-file/blob/master/agglobern_stat2.xml)
- » `STAT_FILE.xml` ohne Bus (<https://github.com/sumo-agglobern/stat-file/blob/master/>)

aglobern_stat_OBus.xml und https://github.com/sumo-aglobern/stat-file/blob/master/aglobern_statOBus2.xml)

- » TRIPFILE.xml mit allen verfügbaren Verkehrsmitteln
- » TRIPFILE.xml ohne Busverkehr
- » TRIPFILE.xml ergänzt durch den Fahrradverkehr

Quellen:

http://sumo.dlr.de/wiki/Demand/Activity-based_Demand_Generation

MULTIMODALE ROUTENPLANUNG

ERSTELLEN VON ROUTEN

ACTIVITYGEN stellt Reisen für Agenten zusammen, die aus dem Mobilitätsbedürfnis aufgrund von statistischen Daten und Parametern erwachsen. Die Reisen decken einen Tagesverlauf ab und besitzen Angaben zu Reisezeit, Verkehrsmittel, Ausgangs- und Endpunkt. Aus solchen *origin-destination (OD)* Reihen müssen dann die optimalen Routen auf dem vorhandenen Netzwerk berechnet werden. Meistens geht es darum, die Kosten für jeden Einzelnen, manchmal die Gesamtkosten über das gesamte Modell zu minimieren. Die Kosten setzen sich oft aus einer Kombination von Zeit- und Energieaufwand zusammen. Es sind auch andere Faktoren denkbar wie Sicherheits-, Umweltschutz- und Prestigeüberlegungen. In der Schweiz ist das Auto im Normalfall das dominante Verkehrsmittel. In städtischen Gebieten und Agglomerationen gibt es aber sehr konkurrenzfähige Mobilitätsangebote mit öffentliche Verkehrsmitteln (Bahn, Bus, Tram, Carsharing) und ein gut ausgebautes Fahrradrouthenetz. Die optimale Route berechnet sich nicht nur aus den geringsten Wegkosten für das Verkehrsmittel Auto. Zusätzlich müssen die Wegkosten mit dem öffentlichen Verkehr, dem Langsamverkehr und Kombinationen aus beiden berücksichtigt werden.

BESTE ROUTE

Aus den von ACTIVITYGEN erstellten Anfangs- und Endpunkten einer Reise rechnet DUAROUTER (<http://www.sumo.dlr.de/wiki/DUAROUTER>, 20.09.2016) eine Abfolge von befahrenen *edges* und weiteren Informationen, das ROUTEFILE (siehe http://www.sumo.dlr.de/wiki/Definition_of_Vehicles,_Vehicle_Types,_and_Routes, 20.09.2016). Auch defekte Routen können damit repariert werden. Zur Berechnung der Route mit den geringsten Kosten verwendet DUAROUTER den *Dijkstra's algorithm*, daneben werden auch *A** und *Contraction hierarchies* unterstützt. DUAROUTER berechnet nur Routen für Verkehrsmittel

im Strassenverkehr und keine Routen für den öffentlichen Verkehr. Die erstellten Routen beziehen sich auf ein Netzwerk ohne Verkehrsteilnehmer. Behindern sich Verkehrsteilnehmer gegenseitig, verändert sich die statische Kostensituation des Netzwerks (siehe auch Literaturüberblick). Sie verändert sich zudem auch über die Zeit. (CHIU, BOTTOM et al. 2011) beschreibt die dynamic traffic assignment (DTA) und zeigt auf, dass es nach diesem Konzept ein Gleichgewicht braucht, zu dem alle Verkehrsteilnehmer zu einem bestimmten Zeitpunkt die kostengünstigste Route kennen. Zudem müssen die Verkehrsteilnehmer wissen, dass sich Routenkosten über die Zeit verändern und dass das Gleichgewicht nur für eine Abfahrtszeit und Reise (*origin-destination*) gilt. Es braucht dazu eine Konzepterweiterung, damit es einen *time-dependent shortest path (TDSP)* gibt und die Gleichgewichtsbedingung für jede Abfahrtszeit gerechnet werden muss (*dynamic user equilibrium DUE*).

SUMO kann die reellen Fahrzeiten berechnen aber keine Änderungen am ROUTEFILE vornehmen. Hierzu dient Dualerate.py (http://sumo.dlr.de/wiki/Demand/Dynamic_User_Assignment, 20.09.2016); damit lassen sich die Routen hin zu einem Gleichgewicht optimieren, indem immer wieder die tatsächlichen Reisezeiten gerechnet werden (dynamic user assignment, DUA). Duaiterate.py ist jedoch sehr Ressourcenintensiv.

SUMO unterstützt die folgenden Car-following-Modelle (http://sumo.dlr.de/wiki/Definition_of_Vehicles,_Vehicle_Types,_and_Routes#Car-Following_Models, 28.09.2016):

- » carFollowing-Krauss
- » carFollowing-KraussOrig1
- » carFollowing-PWagner2009
- » carFollowing-BKerner
- » carFollowing-IDM
- » carFollowing-IDMM
- » carFollowing-KraussPS
- » carFollowing-KraussAB
- » carFollowing-SmartSK
- » carFollowing-Wiedemann
- » carFollowing-Daniel1

Ausgeführte Programme:

```
duarouter --net-file NETWORK_FILE.net.xml --route-files TRIPFILE.xml --output-file ROUTE_FILE.rou.xml --remove-loops --ignore-errors --repair
```

```
python duaiterate.py --net-file NETWORK_FILE.net.xml --route-files ROUTE_FILE.rou.xml
```

Quellen:

<http://www.sumo.dlr.de/wiki/DUAROUTER>

http://www.sumo.dlr.de/wiki/Definition_of_Vehicles,_Vehicle_Types,_and_Routes

http://sumo.dlr.de/wiki/Demand/Dynamic_User_Assignment

http://sumo.dlr.de/wiki/Definition_of_Vehicles,_Vehicle_Types,_and_Routes#Car-Following_Models

MULTIMODALITÄT

Als Multimodalität wird die Planung und Ausführung einer Reise unter Berücksichtigung von verschiedenen Verkehrsmitteln bezeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass neben dem Strassenverkehr auch öffentlicher Verkehr existiert, der dieselben Leistungen erbringen kann. Allerdings müssen die Routen im öffentlichen oder kombinierten Verkehr mit anderen Algorithmen berechnet werden. Mobilität ist zudem nicht nur auf die Verkehrsmittel Auto und öffentlicher Verkehr beschränkt: auf kurzen Reisen kann beispielsweise auch der Fahrradverkehr ein sehr gutes Mobilitätsangebot bieten.

ACTIVITYGEN macht bereits bei der Erstellung der Reisen eine Verkehrsmittelzuordnung zu Auto, Bus, Fussgänger/Fahrradfahrer (http://sumo.dlr.de/wiki/Demand/Activity-based_Demand_Generation, 28.09.2016). Die Zuordnung hängt von den Parametern *carRate*, *carPreference* und *footDistanceLimit* ab (siehe Kapitel Parameter), Fussgänger und Fahrradfahrer werden nur bis zur Distanz *footDistanceLimit* berücksichtigt. In die Routen- und Verkehrsberechnung gehen ausschliesslich jene Reisen ein, die mit dem Auto zurückgelegt werden. Busse werden unabhängig von ihrer Belegung gemäss Busliniendefinition im ACTIVITYGEN STATFILE auf den beschriebenen Linien und dem Fahrplankontakt als Fahrzeug simuliert. Agenten, die mit dem Bus reisen, nehmen nicht an der Simulation teil. Das hat auch zur Folge, dass Routenkosten des öffentlichen Verkehrs gar nicht berücksichtigt werden können.

Mit ACTIVITYGEN kann Multimodalität in einer sehr vereinfachten Weise simuliert werden. Allerdings fehlt ein Algorithmus, um Agenten-Routen im öffentlichen Verkehr zu berechnen und es werden nur sehr wenige Fahrzeugtypen unterstützt. Es wäre natürlich wünschenswert, wenn die Routen des öffentlichen Verkehrs in gleicher Weise berechnet werden könnten wie jene des Strassenverkehrs. Zudem müssten auch Kapazitätsgrenzen und Umsteigevorgänge berücksichtigt werden. Auch die geringe Vielfalt von simulierten Verkehrsmitteln kann im Bereich öffentlicher Verkehr vernachlässigt werden, da das System unabhängig der teilnehmenden Verkehrsmittel funktioniert. Es ist aber unabdingbar, dass neben dem Bus auch Bahn und Tram in die Simulation mit einbezogen werden, da sonst ein sehr grosser Teil des öffentlichen Verkehrs ausgeschlossen würde. Beim Individualverkehr berücksichtigt ACTIVITYGEN keinen Fahrradverkehr, der über eine Distanz des Parameters *footDistance-*

Limit hinausgeht. Dies fällt umso mehr ins Gewicht, wenn man an klassische Fahrradstädte (<https://de.wikipedia.org/wiki/Fahrradstadt>, 24.09.2016) denkt, wo 30–40 % der täglich zurückgelegten Distanzen mit dem Fahrrad erfolgen. Auch in der Stadt Bern gibt es einige stark befahrene Bereiche (<http://www.velostadtbern.ch>, 28.09.2016). Es ist davon auszugehen dass der Radverkehr in vielen Städten weiter zunehmen wird. Es gibt auch kombinierter Verkehr, der mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht abgebildet werden kann. Es ist sicherlich wünschenswert, wenn Park-and-ride Situationen (Kombination Auto/Fahrrad und öffentlicher Verkehr), Taxifahrten oder Fahrgemeinschaften simuliert werden könnten. Gemäss subjektiver Abschätzung dürfte die Mitberücksichtigung von Bahn und Tram als Teil des öffentlichen Verkehrs und von Fahrrädern als neues Verkehrsmittel die multimodale Routenwahl als Teil der Simulation aufwerten und damit auch die Realitätsnähe verbessern.

Quellen:

sumo.dlr.de/wiki/Demand/Activity-based_Demand_Generation

SIMULATION ÖV

Die einfachste Möglichkeit, Bahn und Tram in die Simulation einzufügen, ist, alle öffentlichen Verkehrsmittel als Bus zu modellieren, da diese als einzige von ACTIVITYGEN unterstützt werden. Dies kann gut funktionieren, da sich die Verkehrsmittel ähnlich verhalten: Bus, Tram und Bahn verkehren nach einem bestimmten Fahrplan auf einer festgelegten Route und beanspruchen dafür teilweise ein eigenes Trasse oder eine Busspur. Es unterscheiden sich also nur die Passagiertransportkapazität und die Einschränkungen beim Befahren der Fahrspuren.

Für die Simulation in SUMO muss darauf geachtet werden, dass die Bahn- und Tramlinien und deren Haltestellen in der ACTIVITYGEN-Statistikdatei aufgeführt werden müssen. Ausserdem muss das Netzwerk angepasst werden: Das für den NETCONVERT Vorgang verwendete `EDGE_TYPE_FILE.typ.xml` muss so angepasst werden, dass auf den Bahn- und Tramgleisen Busfahrten erlaubt sind. Zudem dürfen die Gleise nicht als Einbahnstrecken ins Netzwerk einfliessen.

SIMULATION FAHRRAD

Fahrräder werden in der SUMO-Aktivitätenberechnung nur als Zubringer zum öffentlichen Verkehr über sehr kurze Distanzen berücksichtigt, nicht jedoch für längere Distanzen.

SUMO bietet auch kein Bewegungsmodell für Fahrräder an. In der SUMO Dokumentation (<http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Bicycles>, 28.09.2016) wird empfohlen, Fahrräder als langsame Fahrzeuge oder als schnelle Fussgänger zu simulieren. Wie in Kapitel OSM Daten

für das Netzwerk aufgezeigt, ist es sinnvoll, die Fahrräder als langsame Fahrzeuge zu simulieren, die zeitweise auf eigenen Fahrradwegen verkehren.

Fahrräder sollen dort eingesetzt werden, wo es sinnvoll ist, das heisst auf kurzen bis mittellangen Reisen die allenfalls mit dem Fahrrad gar schneller zurückzulegen sind als mit dem Auto. Die Reisen wurden bereits in ACTIVITYGEN erstellt, jedoch nicht dem Fahrrad zugewiesen, weil dies ACTIVITYGEN nicht unterstützt. Ohne das Programm anzupassen, wird es durch einen nachgelagerten Prozess ergänzt, der im selbstentwickelten Python-Skript (`tripUpdate.py`) umgesetzt wurde. Jede Reise wird dahingehend überprüft, ob sie nicht auch mit dem Fahrrad zurückgelegt werden könnte. Als Kriterium gilt die Distanz zwischen Abfahrts- und Zielort. Wird diese als zumutbar erachtet (Wert kann über Parameter geändert werden), ersetzt das Skript die Autoreise – mit einer wählbaren Wahrscheinlichkeit – durch eine Fahrradreise. Wie in Kapitel ACTIVITYGEN STATFILE gezeigt, wird dabei das TRIPFILE kopiert und das Verkehrsmittel Auto durch Fahrrad ersetzt.

Dadurch ist es möglich, die in (Thomas 2014) aufgeführten Faktoren, welche die Wahl des bevorzugten Verkehrsmittels beeinflussen, abzubilden: Wegzeit, Energieerfordernis, Sicherheit, Wetter/Saison, Anteil Fahrradweg, Anteil Umwege, Verkehrsaufkommen, Geschlecht/Alter, soziales Umfeld und Erfahrungen, die auf Erkenntnissen aus früherer Verwendung der Route/Verkehrsmittel beruhen. Die Distanz wird direkt berücksichtigt. Die anderen Faktoren fließen vereinfacht über die `bicyclePreference` in die Simulation ein.

Ausgeführte Programme:

`tripUpdate.py` (<https://github.com/sumo-agglobern/script/blob/master/tripUpdate.py>)

Erstellte Dateien:

TRIPFILE.xml ergänzt durch den Fahrradverkehr

Quellen:

<http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Bicycles>

PARAMETER

PARAMETER BESCHREIBUNG

SUMO ACTIVITYGEN stellt verschiedene Parameter bereit (siehe auch Kapitel ACTIVITYGEN STATFILE), die es erlauben, das Simulationsmodell an die abgebildete Realwelt anzupassen. Eine Vielzahl von Gegebenheiten können so in die Simulation einfließen und de-

ren Aussagekraft erhöhen. Wichtig ist dabei, dass die Parameter und deren Auswirkungen gut beschrieben sind. Die Parameterbeschreibung in der SUMO-Dokumentation ist sehr kurz gehalten. Sie soll an dieser Stelle etwas tiefer gehen und auch durch Erfahrungen aus Tests mit der vorliegenden Simulation ergänzt werden. Eigentliche Parametertests konnten in diesem Rahmen nicht durchgeführt werden, da die Berechnungen über das gesamte Untersuchungsgebiet zu lange dauern. Einige Parameter sind sich – bezogen auf deren Auswirkungen auf die Simulationsresultate – sehr ähnlich und können in Gruppen zusammengefasst werden. Sie können wie folgt beschrieben werden:

- » Parametergruppe Verkehrsnachfrage: Parameter, die Einfluss auf die Verkehrsnachfrage haben und damit die Anzahl reisender Agenten bestimmen.
- » Parametergruppe Routen- und Verkehrsmittelwahl: Parameter, die Einfluss auf die Routen- und Verkehrsmittelwahl haben und damit die Verteilung der Agenten auf die Verkehrsmittel Auto, ÖV (Bus) und Fahrrad bestimmen.
- » Parametergruppe Reisebedingungen: Parameter, die indirekten Einfluss auf die Verkehrsnachfrage nehmen, indem sie die Reisebedingungen beeinflussen.

Die Parametergruppe Verkehrsnachfrage umfasst folgende Parameter:

- » *freeTimeActivityRate* (ACTIVITYGEN): Der Parameter bestimmt den Anteil von Freizeitaktivität. Entsprechend hat er einen Einfluss auf die Anzahl Reisen, die unternommen werden. Diese nehmen mit höherem Parameter linear zu. Die Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse bewegen sich in einem Bereich von rund 40% des Verkehrsaufkommens.
- » *uniformRandomTraffic* (ACTIVITYGEN): Der Parameter deckt zu einem bestimmten Grad jenen Verkehr ab, der nicht ausdrücklich in der Simulation vorgesehen ist. Dies kann Verkehr über die Grenzen des Untersuchungsgebiets, Werksverkehr, touristischer Verkehr und Verkehr aufgrund von speziellen Ereignissen umfassen. Je höher der Wert, desto grösser die allgemeine Verkehrsnachfrage.

Die Parametergruppe Routen- und Verkehrsmittelwahl umfasst folgende Parameter:

- » *carRate* (ACTIVITYGEN): Erhöht die Anzahl Autos in der Simulation und damit die Wahrscheinlichkeit, dass das Auto für die Reise gewählt wird.
- » *carPreference* (ACTIVITYGEN): Legt zusammen mit dem Parameter *carRate* fest, wie gross der Anteil der Personen ist, die nicht mit dem Auto reist, sondern den öffentlichen Verkehr wählt. Der Parameter *carPreference* hat Einfluss auf die Anzahl Reisen, die täglich mit dem Auto zurückgelegt werden. Sie nimmt linear zum Parameter zu. Die Auswirkungen von tiefen und hohen Werten auf die Verkehrsmittelwahl bewegt sich in

einem Bereich von rund 20% mehr oder weniger Autofahrten. Die Anzahl Reisen mit dem Bus hängt nicht vom Parameter *carPreference* sondern von der Anzahl und Takt der definierten Buslinien ab.

- » *footDistanceLimit* (ACTIVITYGEN): Legt die maximal zu Fuss zurückgelegte Strecke fest. Ist eine Bushaltestelle innerhalb dieser Distanz, unternimmt – abhängig von den Parametern *carRate* und *carPreference* – ein Teil der Agenten ihre Reise mit dem Bus.
- » *bicyclePreference* (neu integrierter Parameter): Kombination aus maximal zumutbarer Reisedistanz auf dem Fahrrad und einer Wahrscheinlichkeit, mit der ein Autofahrer tatsächlich auf das Fahrrad umsteigt. Die maximal zurückgelegte Strecke und der Zufallsfaktor widerspiegeln die «Lust das Fahrrad zu benutzen». Diese ist beispielsweise bei kalten Temperaturen im Winter tiefer als bei schönem Wetter im Sommer.

Parametergruppe Reisebedingungen:

- » *departureVariation* (ACTIVITYGEN): Repräsentiert leichte Abweichungen in Bezug zu den Abfahrtszeiten, wie sie für das menschliche Verhalten typisch sind. Der Einfluss auf die Simulation ist nicht eindeutig. Abhängig vom Parameter kann es an einigen Standorten Abweichungen im Verkehrsaufkommen von 20 bis 30% geben. Es ist aber nicht erklärbar, wo ein grosser Parameterwert auch eine grosse positive oder negative Abweichung zur Folge hat. Eindeutig ist die abnehmende Anzahl Reisen mit zunehmendem Parameterwert. Allerdings ist dieser Effekt mit Werten um 3% eher gering.
- » *meanTimePerKmlnCity* (ACTIVITYGEN): Drückt die Annahme aus, wie lange eine Fahrt pro Kilometer Luftlinie braucht. Mit zunehmendem Parameter nehmen die Anzahl Reisen ab, der Effekt ist mit rund 15% bemerkbar. Das Verkehrsaufkommen hingegen nimmt mit grösserem Wert generell deutlich zu.

Der Einfluss dieses Parametersets ist sehr gering, wie einige Tests gezeigt haben, deshalb werden hier die Standardeinstellungen verwendet. Kapazitätsgrenzen des Busses werden nicht berücksichtigt.

Die Simulation weist folgende abhängigen Variablen auf:

- » Verkehrsaufkommen auf ausgewählten Streckenabschnitten (*edges*) in Fahrzeuge pro Tag
- » Passagieraufkommen zwischen zwei Stationen auf ausgewählten Linien in Personen pro Tag

SZENARIEN

Es sind zwei Szenarien mit unterschiedlichem Parameterset zu testen:

- » Szenario 1 entspricht einem durchschnittlichen Tag, der sich weder stimulierend noch retardierend auf die Verkehrsnachfrage auswirkt und die Verkehrsmittel so gewählt werden, dass sie dem typischen Muster entsprechen. Besonders intensive ÖV-Nutzung – beispielsweise infolge Schneefall – oder Fahrradnutzung infolge warmer Temperaturen und schönem Wetter werden ausgeschlossen.
- » Szenario 2: ein Tag der besonders günstigen Voraussetzungen für die Nutzung von Fahrrad und öffentlichem Verkehr bietet. Als Beispiel für Szenario 2 wäre ein schöner Junitag zu wählen, der auch einen längeren Fussmarsch zur nächsten ÖV Haltestelle zulässt, die Lust am Fahrradfahren fördert und zudem noch von der Aktion BikeToWork (<https://www.biketowork.ch/de/>, 20.10.2016) unterstützt wird.

Zusätzlich sollen die Auswirkungen des Dynamic Traffic Assignment (siehe Kapitel Beste Route) überprüft werden. Dies geschieht, indem die beiden Szenarien einmal mit dem Routenfile gerechnet werden, das die tatsächlichen Verkehrsbedingungen nicht berücksichtigt. Danach werden die Szenarien mit einem Routenfile gerechnet, unter Berücksichtigung des tatsächlichen Verkehrsaufkommens, in drei Schritten optimiert wurde. Insgesamt stehen somit die Resultate aus vier Szenarien zur Verfügung:

- » Szenario 1 entspricht der Nachfrage eines durchschnittlichen Tags, die Routen werden ohne Berücksichtigung des tatsächlichen Verkehrs berechnet.
- » Szenario 2 entspricht der Nachfrage eines günstigen Tags für Fahrrad und ÖV, die Routen werden ohne Berücksichtigung des tatsächlichen Verkehrs berechnet.
- » Szenario 3 entspricht der Nachfrage eines durchschnittlichen Tags, die Routen werden unter Berücksichtigung des tatsächlichen Verkehrs berechnet.
- » Szenario 4 entspricht der Nachfrage eines günstigen Tags für Fahrrad und ÖV, die Routen werden unter Berücksichtigung des tatsächlichen Verkehrs berechnet.

PARAMETERSET FÜR SZENARIEN

Einige der verfügbaren Parameter beziehen sich auf sozialwissenschaftlich bestimmbare Grössen, die anhand von Forschungsarbeiten bereits vorgegeben sind. Es betrifft dies vor allem den Parameter *carRate*. Aber auch die Parameter *freeTimeActivityRate* und *carPreference* gehören dieser Gruppe an (siehe Kapitel ACTIVITYGEN STATFILE). Die Parameter *meanTimePerKmlnCity* und *departureVariation* haben generell einen Einfluss auf die Verkehrssimulation, dieser ist über das Verkehrsaufkommen jedoch nicht eindeutig erklärbar. Die Parameter *footDistanceLimit*, *bicyclePreference*, *freeTimeActivityRate* und *carPreference* sind volatil. Das heisst, dass sie sich häufig ändern, weil sie von Befindlichkeit des

Einzelnen, äusseren Einflüssen wie Jahreszeit oder Wetter abhängig sind. Zusätzlich hängen sie von anderen Faktoren wie Verkehrsregulierungsmassnahmen ab: Beispielsweise Preiserhöhungen von Kraftstoff, Parkplatzgebühren aber auch gesteigerter Komfort im ÖV. Der Parameter *uniformRandomTraffic* kann bedingt auch zu dieser Gruppe gezählt werden, ist jedoch weniger von Befindlichkeiten als vielmehr von der wirtschaftlichen Situation und den Jahreszeiten abhängig. Mit den Parametern *freeTimeActivityRate* und *carPreference*, die innerhalb einer gewissen Bandbreite variiert werden können, sowie *footDistanceLimit*, *bicyclePreference* und *uniformRandomTraffic* kann die Verkehrssimulation auf verschiedene Szenarien anpassen werden.

Entsprechend ihren Möglichkeiten, Aktivitäten- und Nachfrageschwankungen abzubilden, werden für die beiden Szenarien jeweils ein passendes Parameterset zusammengestellt.

Szenario 1:

- » *footDistanceLimit* 500
- » *carPreference* 0.65
- » *freeTimeActivity* 0.4
- » *uniformRandomTraffic* 0.3
- » *bicyclePreference* 0.1

Szenario 2 :

- » *footDistanceLimit* 800
- » *carPreference* 0.5
- » *freeTimeActivity* 0.4
- » *uniformRandomTraffic* 0.3
- » *bicyclePreference* 0.2

AUSWERTUNG

AUFBEREITEN DER SIMULATIONS DATEN

Das Simulationsergebnis (abhängige Variable) entspricht in dieser Simulation dem Verkehrsaufkommen an einem bestimmten Messpunkt. Beim Individualverkehr (Auto, Fahrrad) gilt als Messpunkt eine Stelle auf dem Strassennetz. Die Messgrösse ist die Anzahl Fahrzeugen pro Tag. Beim öffentlichen Verkehr interessiert die Anzahl ein- und aussteigender Passagiere pro Haltestelle pro Tag. Für die Auswertung der Anzahl Fahrzeuge pro Tag stellt SUMO Werkzeuge zur Verfügung. Nicht so bei den Passagieren des öffentlichen Verkehrs. Diese

werden bei der Erstellung der Agenten-Reisen durch ACTIVITYGEN nicht berücksichtigt und damit gar nicht simuliert. Eine Nachverfolgung der Passagiere ist daher nicht direkt möglich. Indirekt wird versucht, eine Annäherung der Zahl von ein- und aussteigenden Passagieren zu berechnen. Ziel ist es, die Anzahl Fahrzeuge pro Tag und Strassenabschnitt sowie die täglichen Passagierzahlen mit den aufbereiteten Messwerten zu vergleichen (siehe Kapitel Aufbereiten der Messdaten).

AUSGABE VERKEHRSaufKOMMEN

Gemäss SUMO-Dokumentation (http://www.sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Output/Lane_or_Edge-based_Traffic_Measures, 08.10.2016) kann in einem ADDITIONAL FILE der Speicherort für die Ausgabedatei gewählt werden. Mit dem SUMO-Befehl werden diverse Angaben zum Verkehr auf den Strassen geschrieben. Die Referenzwerte sind als Anzahl Fahrzeuge pro Tag (oder Stunden) respektive Anzahl Reisende zwischen zwei Haltestellen definiert. Gemäss Dokumentation werden die Anzahl Fahrzeuge pro Tag mit der Formel $\text{speed} \cdot \text{density} \cdot 3.6 \cdot 24$ berechnet. Die Berechnung für das Verkehrsaufkommen bei den Referenzstationen übernimmt das selbstentwickelte Skript `dumpfile_extract_edges.py`.

Ausgeführte Programme:

```
sumo --net-file NETWORK_FILE.net.xml --route-files ROUTE_FILE.rou.xml --additional-files ADDITIONAL_FILE.xml
```

```
dumpfile_extract_edges.py (https://github.com/sumo-agglobern/script/blob/master/dumpfile\_extract\_edges.py, https://github.com/sumo-agglobern/script/blob/master/dumpfile\_extract\_edges\_cycle.py)
```

Erstellte Dateien:

```
MAIN_EXPORT.xml
```

ANZAHL PERSONEN AN HALTESTELLEN

SUMO sieht keine Möglichkeiten vor, die Anzahl Personen an den Haltestellen des öffentlichen Verkehrs zu berechnen. Deshalb wird versucht, eine Näherung zu rechnen. Annahme: Die Anzahl Reisen, die von ACTIVITYGEN berechnet werden, wenn als Verkehrsmittel nur Autos erlaubt sind, ist gleich der Anzahl Reisen, die insgesamt unternommen werden. Wenn nun zusätzlich ÖV-Reisen erlaubt sind, löscht ACTIVITYGEN jene Reisen, die mit dem ÖV unternommen werden, aus der Reiseliste. Dadurch ergibt sich eine Differenz zwischen der Reiseliste *nur Auto* und der Reiseliste *Auto und ÖV*. Diese Differenz (TRIPFILE Auto minus TRIPFILE öffentlicher Verkehr) sollte den mit dem ÖV zurückgelegten Reisen entsprechen.

Danach wird jeder Haltestelle die *edges* zugeordnet, für welche die jeweilige Haltestelle die nächstgelegene ist. Will man die Anzahl Fahrten ab (oder zu) einer Haltestelle berechnen, muss nur die Anzahl *edges* der jeweiligen Haltestelle im Differenz-TRIPFILE gezählt werden. Damit ergibt sich die Zahl an dieser Station startender und ankommender Passagiere.

Ausgeführte Programme:

evaluationAgentsAtBusstation.py (<https://github.com/sumo-agglomern/script/blob/master/evaluationAgentsAtBusstation.py>)

Erstellte Dateien:

BUS_STATION_COUNT.csv

ANZAHL REISEN

Als einfache Grösse kann die von ACTIVITYGEN erstellte Zahl von Reisen berechnet werden.

EINLEITUNG

METHODIK

ERGEBNISSE

DISKUSSION

SCHLUSSFOLGERUNG
UND AUSBLICK

LITERATURVERZEICHNIS

VERKEHRSaufKOMMEN

VERKEHRSaufKOMMEN MOTORISIERTER INDIVIDUALVERKEHR

Unabhängig von Szenario und Verkehrsmittel fallen die sehr grossen Abweichungen der Simulationswerte im Vergleich zu den Messwerten auf. Die Messwerte sind jeweils um Faktoren 2.5 bis 5 – gemittelt über alle Referenzstationen – grösser als die Simulationswerte.

Die Abweichungen der Mess- und Simulationswerte beim motorisierten Individualverkehr, ausgedrückt in Faktoren (Messwerte/Simulationswerte), ergibt folgendes Muster: Bis auf die Werte der Stationen BE11 und TBA04 sind alle Messwerte grösser als die Simulationswerte. Die Abweichung bewegt sich im Bereich von Faktor 2 bis 11, wobei die Station TBA11 einen starken Ausreisser nach oben aufweist. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt 43.38, der Median 4.42 und die Standardabweichung 200.91. Grosse Abweichungen treten an den Stationen BE187, TBA11, TBA44 und TBA77 auf, geringe Abweichungen an den Stationen BE132, BE134, TBA18, TBA71. Räumlich befindet sich die Station BE11 mit den plausibelsten Werten am äussersten westlichen Rand der Agglomeration Bern. Die Station TBA04 mit zu hohen Simulationswerten befindet sich unmittelbar neben der Autobahnausfahrt Ostring und ist Teil einer wichtigen Zubringerstrasse zur Stadtmitte von Bern.

Durch den Einbezug der gegenseitigen Interaktion der Agenten verändern sich die Abweichungen etwas. Generell nimmt das Verkehrsaufkommen weiter ab, was über alle Stationen betrachtet eine Verschlechterung der Simulationsergebnisse bedeutet. Der Mittelwert und die Standardabweichung der Unterschiede zwischen Mess- und Simulationswerten nimmt auf 5.79 (Szenario 1) und 5.63 (Szenario 2) massiv ab, der Median nimmt hingegen auf 4.74 (Szenario 1) und 4.98 (Szenario 2) zu. Der Ausreisser an Station TBA11 verschwindet. Auch die grossen Abweichungen an den Stationen BE187, TBA44, TBA77 nehmen ab. Deutlich öfter gibt es Stationen mit nur geringen Abweichungen: BE11, BE132, BE134, BE305, TBA04, TBA15, TBA18, TBA71, TBA81.

Stationsname	Messwerte DTM	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1 iteriert	Szenario 2 iteriert	Abweichung Szenario 1	Abweichung Szenario 2	Abweichung Szenario 1 iteriert	Abweichung Szenario 2 iteriert
BE11	6606	7016	7219	4300	4504	0.94	0.92	1.54	1.47
BE12	17321	4251	4218	2188	3231	4.07	4.11	7.92	5.36
BE13	12070	1703	1558	2513	2112	7.09	7.75	4.80	5.72
BE132	10862	4046	3965	4189	4520	2.68	2.74	2.59	2.40
BE134	17689	6152	6086	7692	7437	2.88	2.91	2.30	2.38
BE13N	73637	8823	8679	5486	5530	8.35	8.48	13.42	13.32
BE187	12554	1143	1088	3370	3525	10.99	11.54	3.72	3.56
BE305	13690	3477	3403	5807	6219	3.94	4.02	2.36	2.20
BE554	18152	5745	5869	3886	3624	3.16	3.09	4.67	5.01
BE852N	94223	11801	11606	12128	12216	7.98	8.12	7.77	7.71
BE944N	98794	15130	14886	13688	14947	6.53	6.64	7.22	6.61
BE946N	57377	12965	12892	6926	6553	4.43	4.45	8.28	8.76
BE947N	69531	12747	12540	9604	10176	5.45	5.54	7.24	6.83
BE950N	38352	4555	4453	6283	7733	8.42	8.61	6.10	4.96
TBA04	18011	46631	46228	13811	17035	0.39	0.39	1.30	1.06
TBA08	23458	5303	5155	3380	3140	4.42	4.55	6.94	7.47
TBA11	18084	17	13	1085	1302	1068.43	1362.67	16.67	13.89
TBA13	4542	1159	1210	1559	1163	3.92	3.75	2.91	3.90
TBA15	7036	745	695	4699	5797	9.44	10.12	1.50	1.21
TBA18	7689	2881	2847	2969	3548	2.67	2.70	2.59	2.17
TBA34	5632	1317	1482	847	955	4.28	3.80	6.65	5.90
TBA44	24362	2083	2221	2258	2245	11.70	10.97	10.79	10.85
TBA68	11298	2127	1971	4634	2614	5.31	5.73	2.44	4.32
TBA71	12231	5966	6389	2916	4141	2.05	1.91	4.19	2.95
TBA77	9313	790	723	1122	1001	11.78	12.88	8.30	9.31
TBA81	17759	5378	5312	6410	7043	3.30	3.34	2.77	2.52
TBA82	21603	2734	2680	1784	1679	7.90	8.06	12.11	12.87
TBA88	10650	4703	4400	3660	3509	2.26	2.42	2.91	3.04
Total	732526	181389	179784	139194	147498				
Mittelwert						43.38	54.01	5.79	5.63
Median						4.42	4.50	4.74	4.98
Standard-abweichung						200.91	256.49	3.92	3.73

■ Messwerte DTM

■ Szenario 1

Abb. 10: Mess- und Simulationswerte an MIV-Messstellen

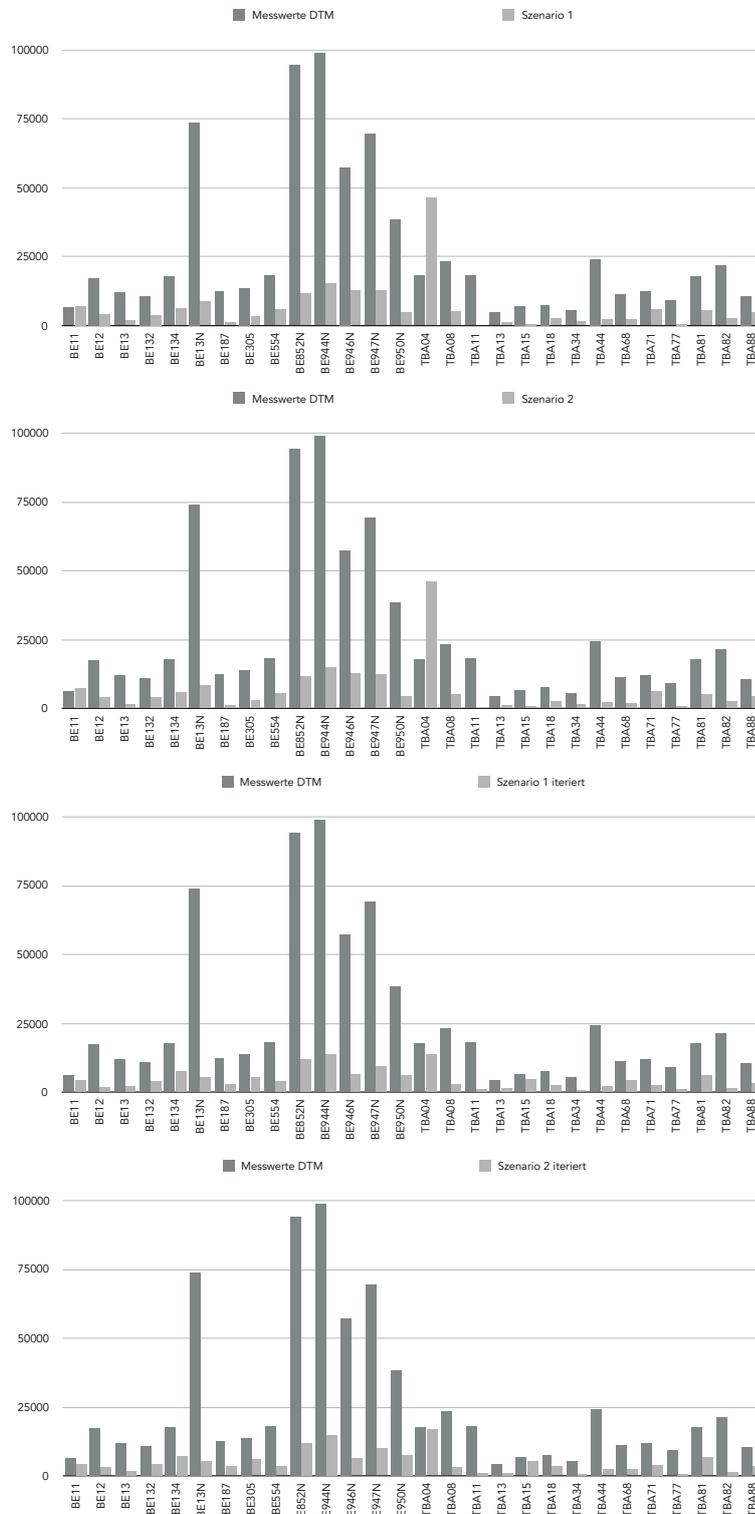


Abb. 11: Diagramm der Mess- und Simulationswerten an MIV-Messtellen

VERKEHRSAUFKOMMEN ÖFFENTLICHER VERKEHR

Die Abweichungen der Mess- und Simulationswerte beim öffentlichen Verkehr, ausgedrückt in Faktoren (Messwerte/Simulationswerte), ergibt folgendes Muster: Mit Ausnahme der Haltestellen Oberwangen, Ostermundigen und Worb SBB, ist die Anzahl ein- und aussteigender Passagiere in den Messungen deutlich grösser als jene der Simulation. Die Abweichungen bewegen sich im Bereich von Faktor 1.5 bis 5 mit zwei Ausreissern an den Haltestellen Zollikofen (Faktor 14) und Worblaufen (Faktor 11). Der Mittelwert der Abweichungen beträgt 3.76, der Median 2.14, die Standardabweichung 4.27. Räumlich befindet sich die Haltestellen mit den plausibelsten Werten an den äusseren Rändern der Agglomeration: Oberwangen (4117), Rubigen (7005), Liebefeld (7091), Worb (8200), Brünnen (16154).

Die Simulationswerte von Szenario 2 sind insgesamt näher an den Messwerten, weil sie durchwegs höher liegen als in Szenario 1. Dies entspricht auch den Erwartungen, das für Szenario 2 eine ÖV-freundliche Einstellung der Agenten in den Parametern mitgegeben wurde. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt 3.49, der Median 1.96 und die Standardabweichung 4. Die räumliche Verteilung hat sich im Vergleich zu Szenario 1 nur wenig verändert, die Aussagen können daher übernommen werden.

Stationsname	Messwerte DTM	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1 iteriert	Szenario 2 iteriert
V1 Tiefenaustrasse	822	9	5	9	0
V2 Schwarzengurgstrasse	788	14	15	15	21
V3 Kornhausstrasse	3403	12	11	7	8
V4 Monbijoustrasse	3302	44	47	37	35
V5 Kirchenfeldstrasse	1501	51	41	39	35
V6 Weissensteinstrasse	240	0	0	0	5
V7 Schlosstrasse, auswärts	725	0	0	0	0
V8 Schlosstrasse einwärts	728	0	0	0	0

Abb. 12: Mess- und Simulationswerte an ÖV-Messstellen

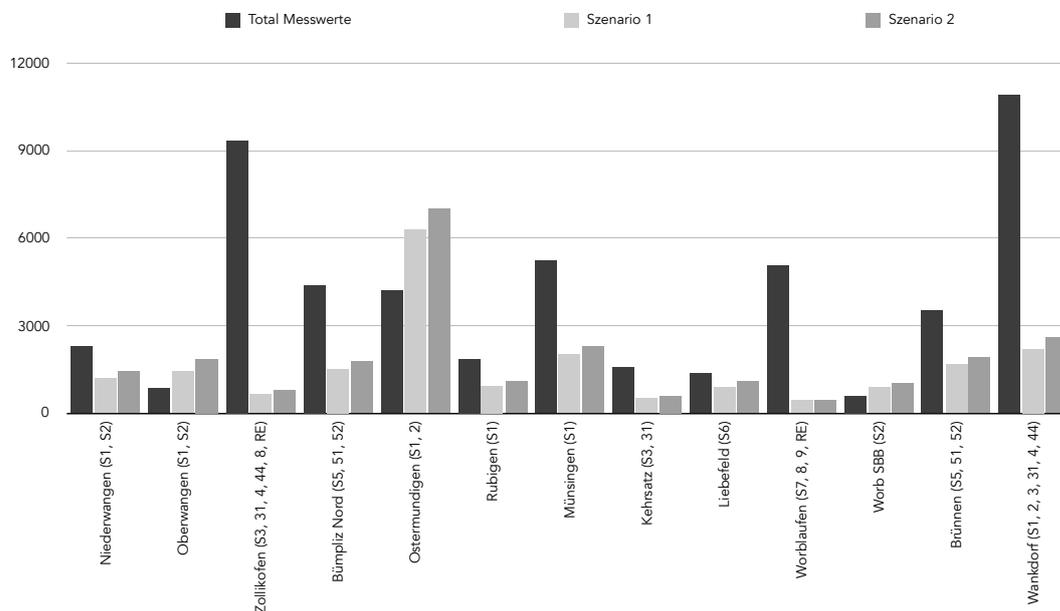


Abb. 13: Diagramm der Mess- und Simulationswerten an ÖV-Messstellen

VERKEHRS-AUFKOMMEN FAHRRAD

Die Abweichungen zwischen dem gemessenen durchschnittlichen täglichen Verkehr und den Werte aus der Simulation für die betreffenden Stationen sind sehr gross. Es lässt sich feststellen, dass die Stationen an den drei Strassen mit dem geringsten Verkehrsaufkommen auch die geringsten Simulationswerte aufweisen. Es kann kein Muster im Vergleich der beiden Szenarien und gegenüber den iterierten Werten festgestellt werden.

Stationsname	Messwerte DTM	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1 iteriert	Szenario 2 iteriert
V1 Tiefenaustrasse	822	9	5	9	0
V2 Schwarzeneggstrasse	788	14	15	15	21
V3 Kornhausstrasse	3403	12	11	7	8
V4 Monbijoustrasse	3302	44	47	37	35
V5 Kirchenfeldstrasse	1501	51	41	39	35
V6 Weissensteinstrasse	240	0	0	0	5
V7 Schlosstrasse, auswärts	725	0	0	0	0
V8 Schlosstrasse einwärts	728	0	0	0	0

Abb. 14: Mess- und Simulationswerte an Fahrrad-Messstellen

ANZAHL REISEN

Als weitere Kenngrösse kann die Anzahl unternommener Reisen pro Verkehrsmittel hinzugezogen werden. Sie widerspiegelt direkt die Verkehrsmittelwahl eines Agenten.

Szenario 1:

- » Auto: 428266
- » ÖV: 31089
- » Fahrrad: 4485

Szenario 2:

- » Auto: 395931
- » ÖV: 58618
- » Fahrrad: 8282

In Szenario 2 gibt es generell etwas weniger Reisen, vor allem aber weniger Autoreisen, dafür deutlich mehr Reisen mit dem öffentlichen Verkehr. Fahrradreisen kommen in Szenario 2 rund doppelt häufig vor wie in Szenario 1.

NACHFRAGESCHWANKUNGEN

VERHALTEN DER BEIDEN GETESTETEN SZENARIEN

Es zeigt sich, dass die Anzahl Reisen, die mit dem Auto unternommen wird, in Szenario 2 kleiner ist. Dies wirkt sich auf das Verkehrsaufkommen bei den Stationen aus. In Szenario 2 sind insgesamt weniger Autos unterwegs. Die Abnahme betrifft jedoch nicht alle Stationen gleich, an einigen Stationen ist das Verkehrsaufkommen gar grösser. Szenario 2 sieht vor, dass die Agenten in der Simulation eher bereit sind, auf den öffentlichen Verkehr oder das Fahrrad umzusteigen. Dieser Effekt kann anhand der unterschiedlichen Anzahl Reisen in den beiden Szenarien klar bestätigt werden.

Wie schon in den vorherigen Kapiteln gezeigt, hat sich das Verkehrsaufkommen auf dem ÖV-Netz und mit dem Verkehrsmittel Fahrrad in Szenario 2 im Vergleich zu Szenario 1 merklich erhöht. Dies war bei der Wahl der Parameterwerte beabsichtigt. Gemäss Angaben der BLS (Betreiberin der regionalen S-Bahn) bewegt sich das Verkehrsaufkommen über das Jahr hinweg in einem Bereich von +/-20% der mittleren Messwerte. Genau in diesem

Bereich bewegen sich auch die Veränderungen zwischen Szenario 1 und Szenario 2 bei den Zahlen der ein- und aussteigenden Passagieren an den Haltestellen.

Szenario 2 hätte fahrradfreundliche Bedingungen simulieren sollen: warmes, sonniges Wetter, später Einbruch der Dunkelheit und zusätzliche Motivationen wie die Aktion BikeTo-Work. Aufgrund der geringen Unterschiede von Fahrradreisen zwischen Szenario 1 und Szenario 2 muss festgestellt werden, dass dies nicht gelungen ist. Es ist fraglich, ob die Simulation von Fahrrädern korrekt funktioniert.

METHODISCHE ERGÄNZUNGEN

AUTOMATISIERUNG DES PROZESSES

Die Teilschritte zur Vorbereitung und Konfiguration der Simulation (Ausführen des SUMO-Befehls) wurden manuell in Gang gesetzt und die entsprechenden Optionen manuell eingefügt. Mit Ausnahme der Vorbereitung des ÖV-Netzes liefen die Teilschritte automatisch und ohne wesentliche manuelle Eingriffe ab.

EINLEITUNG

METHODIK

ERGEBNISSE

DISKUSSION

SCHLUSSFOLGERUNG
UND AUSBLICK

LITERATURVERZEICHNIS

FORSCHUNGSFRAGE UND METHODISCHES VORGEHEN

Mit dem Konfigurieren, Erweitern und Durchführen der Verkehrssimulation in der Agglomeration Bern mit SUMO und deren Programme NETCONVERT, ACTIVITYGEN, DUAROUTER sollten folgende Ziele erreicht werden:

- » Möglichst genaue Schätzung des Verkehrsaufkommens auf dem Verkehrsnetz der Agglomeration Bern, bezogen auf jeden beliebigen Strassenabschnitt und jede Haltestelle im Gebiet, zu einer beliebigen Zeit und in den Verkehrsmitteln Auto, Bus (inklusive Bahn) und Fahrrad.
- » Nachfrageschwankungen bezogen auf Zeit, Ort und Verkehrsmittel simulieren und die Realitätsnähe ihrer Auswirkungen diskutieren. Dies sollte mithilfe zweier Szenarien umgesetzt werden. Szenario 1 steht für einen durchschnittlichen Tag, Szenario 2 für einen Tag mit besonders günstigen Voraussetzungen für die Nutzung von Fahrrad und öffentlichem Verkehr. Als Beispiel für Szenario 2 wäre ein schöner Junitag zu wählen, der auch zu einem längeren Fussmarsch zur nächsten ÖV-Haltestelle einlädt, die Lust am Fahrradfahren fördert und zudem noch von der Aktion BikeToWork (<https://www.biketowork.ch/de/>, 20.10.2016) unterstützt wird.
- » Zusätzlich zu diesen Zielen war es eine Anforderung an die angewendete Methode, die Reproduzier- und Übertragbarkeit der Simulation sicherzustellen. Die Simulation soll sich dadurch leichter wiederholen und auch auf andere Gebiete und Zeitbereiche anwenden lassen. Erreicht wird dies durch eine möglichst umfassende Automatisierung der Abläufe, womit die stets selben Regeln angewendet werden und Daten, die flächendeckend, frei und in gleichbleibender Qualität – zumindest für die gesamte Schweiz – vorhanden sind.
- » Die Möglichkeiten, multimodaler Verkehr in die Verkehrsnachfrage und Routenwahl in eine SUMO-Simulation einzubeziehen, sind heute auf die Verkehrsmittel motorisierter Individualverkehr, öffentlicher Busverkehr und Fussverkehr beschränkt. Fahrradverkehr wird in SUMO (konkret in ACTIVITYGEN) gleich wie Fussverkehr ausschliesslich für sehr kurze Distanzen, als Zubringer zu anderen Verkehrsmitteln simuliert. Mit der Erweiterung `tripUpdate.py` (<https://github.com/sumo-agglobern/script/blob/master/tripUpdate.py>) wurde im Rahmen dieser Arbeit versucht, das Verkehrsmittel Fahrrad realitätsgetreuer in die Simulation zu integrieren.

VERKEHRSaufKOMMEN

VERKEHRSaufKOMMEN MOTORISIERTER INDIVIDUALVERKEHR

Das Kapitel Ergebnisse zeigt auf, dass die Korrelationen zwischen Mess- und Simulationswerten insgesamt gering ist. Die Simulation unterschätzt das Verkehrsaufkommen teilweise massiv, unabhängig von den analysierten Verkehrsmitteln. Verglichen mit den Korrelationen von Mess- und Simulationswerten in (Meister, Balmer et al. 2010) sind die Abweichungen in der vorliegenden Simulation gross, die Korrelationen klein. Aber auch bei ihm gibt es Stationen, die sehr kleine Korrelationen aufweisen. Erklärt werden diese durch die Nähe zur Untersuchungsgebietsgrenze (und damit auch der Landesgrenze). Es sei kein grenzüberschreitender Verkehr simuliert worden und dadurch die tiefen Simulationswerte erklärbar. Weiter stellt (Meister, Balmer et al. 2010) fest, dass das Verkehrsaufkommen durch die Simulation in ländlichen Regionen unterschätzt wird. Er führt dies auf die vielen touristischen Fahrten zurück, die nicht in die Simulation einfließen.

Es fällt auf, dass sich in der vorliegenden Simulation die Stationen mit den höchsten Korrelationen an Verbindungsstrassen zwischen der Stadt Bern und grossen Siedlungsräumen in der Agglomeration befinden: Stationen BE132 (Lyss, Münchenbuchsee), BE134 (Münsingen), TBA18 (Schwarzenburg), TBA71 (Agglomerationsgebiet Nord). Stationen mit schlechter Korrelation befinden sich eher in der Nähe des Stadtzentrums Bern: TBA11, TBA44, TBA77. Die Station TBA11 befindet sich auf einer wichtigen Zubringerstrasse zur Stadtmitte aus Richtung Nord. Mit der Neueröffnung des Neufeldtunnels im Jahr 2009, der als Umfahrung für das Länggassquartier gebaut wurde, hat sich die Verkehrsführung in diesem Gebiet stark verändert. Einen direkten Einfluss ist nicht zu erwarten, da sich die Mess- und Simulationswerte auf das Jahr 2014 beziehen. TBA44 und TBA77 befinden sich unmittelbar neben dem vielbefahrenen Wankdorfkreuzung. Diese wurde im Jahr 2012 neu gestaltet und erhielt eine neue Verkehrsführung. Auch hier ist kein direkter Einfluss der Baumassnahmen auf das Verkehrsaufkommen 2014 zu erwarten. Etwas aus dem Schema fällt die grosse Abweichung an der Station BE187. Sie liegt an einer wichtigen Verbindungsstrasse zwischen dem Emmental und der Stadt Bern und dürfte auch als Zubringerstrasse bezeichnet werden. Als Unterschied zu den anderen Zubringerstrassen liegt das Emmental grösstenteils ausserhalb der Agglomeration Bern. Die Pforten für die Zu- und Wegpendler in die Agglomeration Bern wird in der Simulation berücksichtigt (siehe Kapitel ACTIVITYGEN STATFILE). Zur Vereinfachung wurden aber nur Autobahnen als Ein- und Austrittspunkte berücksichtigt. Die Verbindung zum Emmental erfolgt aber über eine Hauptstrasse. Wie bei (Meister, Balmer et al. 2010) dürfte es sich somit um Abweichungen aufgrund zur Nähe der Untersuchungsgebietsgrenze handeln.

Der Parameterwert *uniformRandomTraffic* gibt das Verkehrsaufkommen von Fahrzeugen an, die von Berufes wegen oder aus touristischen Gründen unterwegs sind. Der Wert von 0.3 wurde als realistisch geschätzt, könnte aber auch bedeutend höher liegen. Möglicherweise wurden wie bei (Meister, Balmer et al. 2010) zu wenig touristische Fahrten miteinbezogen. Für eine verbesserte Parametrisierung war die Zeit zum Rechnen einer Simulation zu hoch. Hier müsste mit einem stärkeren Rechner oder einem kleineren Untersuchungsgebiet operiert werden. Die Parametrisierung wäre zudem mit einer vollständigeren und ausführlicheren Dokumentation leichter gefallen.

Das Verkehrsaufkommen – basierend auf den durch Iteration verbesserten Agentenrouten – zeigt hauptsächlich eine realitätsnähere Verteilung des Verkehrs auf die Stationen. An vielen Stationen gibt es eine Annäherung an die realen Werte, Abweichungsspitzen werden gebrochen. Möglicherweise liessen sich die Simulationswerte durch weiteres Iterieren noch besser an die Messwerte annähern. Der hohe Bedarf an Zeit und Rechenleistung für die iterierte Routenberechnungen über ein Untersuchungsgebiet dieser Grösse machte es unmöglich, weitere Iterationsschritte zu rechnen.

VERKEHRSAUFKOMMEN ÖFFENTLICHER VERKEHR

Reisen mit dem öffentlichen Verkehr werden in SUMO berücksichtigt, indem sie aus der eigentlichen Verkehrssimulation ausgespart werden. Der einzelne Agent, der mit dem ÖV reist, kann nicht verfolgt werden. Nur die Busse werden gemäss ihrem Fahrplankontakt in die Simulation einbezogen. Somit können keine Aussagen zu seiner Reiseroute, Start- und Endhaltestelle und Umsteigepunkte gemacht werden. Mit dem Skript `evaluationAgentsAtBusstation.py` (<https://github.com/sumo-agglomern/script/blob/master/evaluationAgentsAtBusstation.py>) wurde versucht, die Anzahl Ein- und Aussteiger an den ÖV Haltestellen zu berechnen. Damit lassen sich Aussagen zum Verkehrsaufkommen machen.

Es zeigt sich, dass die simulierten Werte deutlich von den Messwerten abweichen. Insgesamt unterschätzt die Simulation das tatsächliche Verkehrsaufkommen deutlich. Die Haltestellen mit den plausibelsten Werten befinden sich an den äusseren Rändern der Agglomeration: Oberwangen (4117), Rubigen (7005), Liebefeld (7091), Worb (8200) und Brünnen (16154). Gemäss diesem Bild müssten auch die Stationen Münsingen (7006) und Zollikofen (4410) kleine Abweichungen aufweisen. Münsingen und vor allem Zollikofen sind jedoch wichtige Umsteigeorte. Da keine Passagiere in die Simulation einbezogen werden, können auch keine Umsteigevorgänge registriert werden, weder in der Simulation noch im selbst entwickelten Skript. Dies erklärt ein Teil der grösseren Abweichungen in Münsingen und Zollikofen. Auch zu den Umsteigeorten zu zählen sind die Haltestellen Worblaufen (8054) und Wankdorf (16161). Auch hier sind grosse Abweichungen aufgrund der nicht erfassten Umsteigevorgängen zu erkennen.

VERKEHRSAUFKOMMEN FAHRRAD

Die Interpretation des Fahrradverkehrs gibt ein zwiespältiges Bild ab. Einerseits nehmen die Fahrradreisen zwischen Szenario 1 und Szenario 2 wie erwartet deutlich zu. Das simulierte Verkehrsaufkommen weicht jedoch stark von den Messwerten ab und es ist keine Entwicklung zwischen den Szenarien und hin zu den iterierten Werten zu erkennen. Da kein ausführlicher Parameterstest durchgeführt werden konnte, ist anzunehmen, dass mit einer Optimierung der Parameterwerte eine Verbesserung der Resultate erreicht werden könnte. Die Mess- und Simulationswerte liegen jedoch so weit auseinander, dass damit nur ein kleiner Teil der Abweichung erklärt werden kann. Viel eher ist von einem konzeptionellen Fehler auszugehen. Als Fahrradreisende kommen in der angewandten Methode nur jene in Frage, die eigentlich mit dem Auto reisen würden, jedoch aus diversen Gründen aufs Fahrrad umsteigen. All jene, die mit dem Fahrrad zu einer Haltestelle des öffentlichen Verkehrs fahren, oder davon weg, können mit der Methode nicht berücksichtigt werden. Der wichtigste Ursache dafür ist, wie im vorangehenden Kapitel beschrieben, dass sich die ÖV Agenten nicht an der Simulation beteiligen und somit auch keine Zubringer simuliert werden. Ausserdem ist nicht auszuschliessen, dass in der Simulation ein Fehler aufgetreten ist. Es wäre zu erwarten gewesen, dass die unterschiedliche Anzahl Fahrradreisen zwischen Szenario 1 und 2 zu einem deutlich unterscheidbaren Verkehrsaufkommen führen. Dass dies nicht geschehen ist, deutet auf einen Berechnungsfehler hin.

Unabhängig von den Simulationsergebnissen ist zu bemängeln, dass die Fahrradreisen nur über zwei Parameter gesteuert werden können. Hauptsächlich der Wahrscheinlichkeitsparameter ist Sammelbecken für viele, teilweise sehr unterschiedliche Gründe, auf ein Fahrrad umzusteigen. Der Parameter müsste aufgeschlüsselt werden. Nur so erhält die Simulation Relevanz und kann beispielsweise in der Verkehrsplanung die Ausarbeitung von Massnahmen unterstützen.

NACHFRAGESCHWANKUNGEN

ABBILDEN VON NACHFRAGEEINFLÜSSEN

Szenario 1 und Szenario 2 weisen zwei verschiedene Parametersets auf. Sie sollen die Entscheidungen der Agenten so beeinflussen, dass sie möglichst weit den realen Entscheidungen der am Verkehr teilnehmenden Personen entsprechen. Es wird davon ausgegangen, dass man an einem schönen Junitag bereit ist, etwas längere Distanzen zu Fuss oder mit

dem Fahrrad zurückzulegen und auf das Auto zu verzichten. Entsprechend wurden auch die Parameter gewählt: die Bereitschaft, eine grössere Distanz bis zur nächsten Haltestelle zu Fuss zurückzulegen (*footDistanceLimit*) wurde erhöht, die Attraktivität des Autos verringert (*carPreference*) und die Wahrscheinlichkeit, das Fahrrad für die geplanten Reisen zu benutzen, erhöht (*bicyclePreference*). Die Auswirkungen davon zeigen sich in den Simulationsergebnissen. Die ÖV-Passagiere und Anzahl Fahrradreisen haben deutlich zugenommen und die Anzahl Fahrten des MIV abgenommen. Die Auswirkungen der Parametersets auf die Simulationsergebnisse entspricht den Erwartungen. Dieses Verhalten widerspiegelt sich nicht im simulierten Fahrrad-Verkehrsaufkommen.

Wie in (Klügl 2015) konnte aufgezeigt werden, dass die multimodale Routenwahl von realweltlichen Faktoren abhängig ist. Diese können – soweit sie mit Parameterwerten beschrieben sind – in die Simulation einfließen und das Ergebnis entsprechend steuern. Dies bietet die Möglichkeit, systemweite Effekte anhand individueller Informationen und Entscheidungen zu simulieren und entsprechende Fragestellungen zu beantworten. Ob die beobachtete Veränderung der Simulationsergebnisse zwischen Szenario 1 und 2 auch tatsächlich mit der Veränderung in der Realität vergleichbar wäre, kann nicht abschliessend geklärt werden. Dazu bräuchte es Messwerte, die das Verkehrsaufkommen spezifisch für Szenario 1 und 2 aufschlüsseln würden.

Ein wirklicher Nutzen aus der Verkehrsmittelwahl könnte dann gezogen werden, wenn die Faktoren, die im Moment unter dem Parameter *bicyclePreference* zusammengefasst sind, einzeln angesprochen werden könnten. Gemäss (Thomas 2014) wären dies Faktoren wie: Wegzeit, Energieerfordernis, Sicherheit, Wetter/Saison, Anteil Fahrradweg, Anteil Umwege, Verkehrsaufkommen, Geschlecht/Alter, soziales Umfeld und Erfahrungen, die auf Erkenntnisse aus früherer Verwendung der Route/Verkehrsmittel basieren. Nur so liessen sich die sehr unterschiedlichen Einflussfaktoren sinnvoll abbilden und interpretieren. Dies wäre beispielsweise für die Ausarbeitung von Massnahmen in der Verkehrsplanung wünschenswert. Methodisch lässt sich ein solches Anliegen nur umsetzen, wenn der Fahrradverkehr neben dem MIV und ÖV in die Aktivitäten- und Routenplanung mit einfließt. Das bedeutet, dass mindestens ACTIVITYGEN erweitert werden müsste. Da sich solche Faktoren aber auch auf die Qualität der Route beziehen, müsste die Routengenerierung auch in diesem Schritt passieren.

Ein weiteres Element, das den Erkenntnisgewinn aus der Simulation beeinträchtigt, ist das bereits im Kapitel Verkehrsaufkommen öffentlicher Verkehr diskutierte Problem, der fehlenden Routen für Agenten, die im ÖV reisen. Somit lassen sich Faktoren wie Anzahl Umsteigevorgänge oder Reisezeit nicht in den Prozess der Verkehrsmittelwahl aufnehmen.

METHODISCHE ERGÄNZUNGEN

REPRODUZIER- UND ÜBERTRAGBARKEIT

Mit grossem Aufwand wurden Skripte geschrieben, die es ermöglichen, Daten automatisch und damit auch reproduzier- und übertragbar für die Simulation aufzubereiten. Es wurde versucht, die bestehenden Programme nicht zu verändern, sondern sinnvoll zu ergänzen. Der Simulationsprozess inklusive bereitstellen der notwendigen Daten kann automatisch ausgeführt, die einzelnen Teilschritte müssen jedoch manuell gestartet werden. Auch die Aufbereitung der Buslinien muss manuell erfolgen. Es gibt noch keine Möglichkeit, die Reihenfolge der angefahrenen Haltestellen und den Takt automatisch festzulegen. Die Simulation ist aus folgenden Gründen gut reproduzier- und auf andere Gebiete übertragbar:

- » Die Simulation wurde mit einer quelloffenen Simulationssoftware durchgeführt. Daher steht sie für jede weitere Simulation zur Verfügung.
- » Zur Konfiguration und Vorbereitung der Simulation wurde auf qualitativ hochwertige, frei zugängliche Daten zurückgegriffen. Damit ist sichergestellt, dass andere Zeitstände und Regionen in gleicher Weise modelliert werden können.
- » Die Konfiguration und Vorbereitung der Simulation erfolgte in hohem Mass automatisiert. Dies stellt sicher, dass der Vorgang stets nach den gleichen Regeln abläuft und gut dokumentiert ist.

Die verwendeten Skripte und Parameter sind auf Github verfügbar (<https://github.com/sumo-agglobern>). Um die Feingliedrigkeit und den Detaillierungsgrad der SUMO Verkehrssimulation der Stadt Luxemburg, LuST (Codeca, Frank et al. 2015) zu erreichen, wären zusätzliche Anstrengungen nötig.

EINLEITUNG

METHODIK

ERGEBNISSE

DISKUSSION

**SCHLUSSFOLGERUNG
UND AUSBLICK**

LITERATURVERZEICHNIS

SCHLUSSFOLGERUNG

Mit SUMO kann das Verkehrsaufkommen auf einzelnen Verkehrsabschnitten zu beliebigen Zeitpunkten simuliert werden. Zudem lässt sich testen, welche Faktoren die Anzahl Personen im Verkehrsnetz beeinflussen. Es muss aber festgestellt werden, dass das simulierte Verkehrsaufkommen stark von den Messwerten abweicht und die Simulation auch nach den ergänzenden Skripten noch kein intelligentes Transportsystem abbilden kann. Im ersten Fall erschwert die Grösse des Untersuchungsgebiets und die hohen Anforderungen der Software an die Rechenleistung die Optimierung des Modells, die bestmögliche Parametrisierung und die durch Iterationen optimale Routenbildung. Ausserdem ist nicht klar, wie gut die Simulationswerte an die realen Werte angenähert werden können, mit dem Konzept der agentenbasierten Simulation und mit der Software SUMO. Für die reine Prognose von Verkehrsaufkommen gibt es möglicherweise bessere Ansätze. Es sei hier als Beispiel *artificial intelligence* erwähnt (siehe Vlahogianni 2015). Ausserdem weist die Simulationssoftware SUMO einige Mängel auf, wenn es zur Simulation grosser Untersuchungsgebiete und multimodalem Verkehr eingesetzt werden soll. Die aktivitätenbasierte Generierung von Reisen, die multimodale Routenwahl und die ständige Verbesserung der Routenwahl durch wiederholtes Simulieren (Dynamic Traffic Assignment) beeinflussen sich gegenseitig und müssen daher gleichzeitig ausgeführt werden. SUMO führt sie nacheinander aus. Das erschwert die Abbildung eines Untersuchungsgebiets als intelligentes Transportsystem (ITS), weil nicht unabhängig von Verkehrsmittel die schnellste Route gesucht wird, sondern nur die schnellste Route für das bereits bestimmte Verkehrsmittel. Ausserdem leidet die Genauigkeit der Simulation, weil es an Entscheidungsgrundlagen fehlt, das ideale Verkehrsmittel zu wählen. Es müsste beispielsweise bekannt sein, wie sich die Reisezeit verändert, würde die Reise einmal mit dem Auto und einmal mit dem ÖV zurückgelegt. Es ist davon auszugehen, dass MATSim in diesem Zusammenhang bessere Simulationsmöglichkeiten bieten würde.

AUSBLICK

Die weiteren Schritte können in zwei verschiedene Richtungen weisen:

1. Die bestehende SUMO-Simulation wird optimiert. Dazu braucht es mehr Rechenleistung, mehr Zeit und die Fähigkeit, ACTIVITYGEN so weiterzuentwickeln und zu dokumentieren, dass es den Ansprüchen eines intelligenten Transportsystems gerecht

wird. Die hier gezeigten Erweiterungen sind nur Ideen und müssten weiter verbessert werden. Ein wichtiges Anliegen ist die Simulation von verschiedenen Verkehrsmitteln. Am Beispiel des öffentlichen Verkehrs ist zu erkennen, was es dazu braucht: Agenten müssen sich auch auf einem zur Strasse alternativen ÖV-Netz bewegen können und Kriterien wie Fahrpläne, Umsteigezeiten oder Kapazitäten in ihre Entscheidungen mit einbeziehen.

2. Das intelligente Transportsystem wird durch eine alternative Simulationssoftware zur Verfügung gestellt. MATSim bietet sicher gute Voraussetzungen. Oder es werden alternative Ansätze wie *artificial intelligence* in Betracht gezogen.

Die Nachfrage nach zuverlässigen, flexiblen und schnellen Verkehrssimulationen ist sicherlich noch nicht erschöpft. Im Kontext intelligenter Transportsysteme spielen sie eine entscheidende Rolle. Die sich akzentuierenden Verkehrsprobleme in den Ballungsräumen werden die Entwicklungen hin zu einer systematischen Betrachtung des Verkehrs weiter vorantreiben. Die Menge an gesammelten Daten durch Verkehrsteilnehmer, Fahrzeuge oder Verkehrsinfrastruktur wird weiter zunehmen. Um daraus einen Nutzen zu ziehen, müssen die Daten strukturiert verarbeitet werden können. Verkehrssimulationen bieten eine Möglichkeit dazu.

EINLEITUNG

METHODIK

ERGEBNISSE

DISKUSSION

SCHLUSSFOLGERUNG
UND AUSBLICK

LITERATURVERZEICHNIS

AnhangBalmer, M., K. Axhausen and K. Nagel (2006). "An agent based demand modeling framework for large scale micro-simulations, paper submitted for the 85th annual meeting of the Transportation Research Board." TRB, Washington DC.

Batty, M. (2008). "The size, scale, and shape of cities." *science* 319(5864): 769-771.

Bazzan, A. L. and F. Klügl (2014). "A review on agent-based technology for traffic and transportation." *The Knowledge Engineering Review* 29(03): 375-403.

Behrisch, M., L. Bieker, J. Erdmann and D. Krajzewicz (2011). Sumo-simulation of urban mobility. *The Third International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL 2011)*, Barcelona, Spain.

Bernhardt, K. (2007). "Agent-based modeling in transportation." *Artificial Intelligence in Transportation* 72.

Bonabeau, E. (2002). "Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(suppl 3): 7280-7287.

Bowman, J. L. and M. E. Ben-Akiva (2001). "Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 35(1): 1-28.

Bundesamt für Statistik, B. (2014). "Raum mit städtischem Charakter 2012: Erläuterungsbericht." Neuenburg (www.bfs.admin.ch/Regional/ZumNachschlagen/Publikationen).

Certicky, M., J. Drchal, M. Cuchy and M. Jakob (2015). Fully agent-based simulation model of multimodal mobility in European cities. *Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 2015 International Conference on, IEEE.

Čertický, M., M. Jakob, R. Píbil and Z. Moler (2014). "Agent-based simulation testbed for on-demand mobility services." *Procedia Computer Science* 32: 808-815.

Cetin, N., K. Nagel, B. Raney and A. Voellmy (2002). "Large-scale multi-agent transportation simulations." *Computer Physics Communications* 147(1): 559-564.

Cham, K. and J. Johnson (2007). "Complexity theory; a science of cultural systems." *M/C Journal*, Complex 10(3).

Chen, B. and H. H. Cheng (2010). "A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 11(2): 485-497.

Chiu, Y.-C., J. Bottom, M. Mahut, A. Paz, R. Balakrishna, T. Waller and J. Hicks (2011). "Dynamic Traffic Assignment." *Transportation Network Modeling Committee*: 1-39.

Ciari, F., M. Balac and M. Balmer (2015). "Modelling the effect of different pricing schemes on free-floating carsharing travel demand: a test case for Zurich, Switzerland." *Transportation* 42(3): 413-433.

Ciari, F., M. Balmer, K. W. Axhausen, K. W. Axhausen and K. W. Axhausen (2008). Concepts for a large scale car-sharing system: Modeling and evaluation with an agent-based approach, Eidgenössische Technische Hochschule, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme.

Ciari, F., N. Schuessler and K. W. Axhausen (2013). "Estimation of carsharing demand using an activity-based microsimulation approach: model discussion and some results." *International Journal of Sustainable Transportation* 7(1): 70-84.

Ciari, F., C. Weis and M. Balac (2015). "Evaluating the influence of carsharing stations' location on potential membership: a Swiss case study." *EURO Journal on Transportation and Logistics*: 1-25.

Codeca, L., R. Frank and T. Engel (2015). LuST: a 24-hour Scenario of Luxembourg City for SUMO Traffic simulations. SUMO User Conference.

Eryilmaz, E., M. Kagerbauer, T. Schuster and O. Wolf (2014). Collaborative Management of Intermodal Mobility. *Collaborative Systems for Smart Networked Environments*, Springer: 713-721.

Forrester, J. W. (1993). *System dynamics and the lessons of 35 years. A systems-based approach to policymaking*, Springer: 199-240.

Heinen, E., J. Panter, R. Mackett and D. Ogilvie (2015). "Changes in mode of travel to work: a natural experimental study of new transport infrastructure." *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity* 12(1): 81.

Horni, A., K. Nagel and K. W. Axhausen (2016). "The multi-agent transport simulation MAT-Sim." *Ubiquity*, London 9.

Jakob, M., Z. Moler, A. Komenda, Z. Yin, A. X. Jiang, M. P. Johnson, M. Pěchouček and M. Tambe (2012). Agentpolis: towards a platform for fully agent-based modeling of multi-modal transportation. *Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 3*, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

Kirchmayr-Novak, S. (2014). "Bewertung der Datenqualität der OpenStreetMap als Datengrundlage für einen Verkehrsgraph mit Hilfe offener Daten und Software."

Klügl, F. (2014). "Kombiniertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell."

Krajzewicz, D., J. Erdmann, M. Behrisch and L. Bieker (2012). "Recent development and applications of SUMO—simulation of urban mobility." *International Journal On Advances in Systems and Measurements* 5(3&4).

Krajzewicz, D., J. Erdmann, J. Härrri and T. Spyropoulos (2014). Including Pedestrian and Bicycle Traffic in the Traffic Simulation SUMO. 10th ITS European Congress. Helsinki.

Li, Z.-C., Y. Yin, W. H. Lam and A. Sumalee (2015). "Simultaneous optimization of fuel sur-

charges and transit service runs in a multimodal transport network: a time-dependent activity-based approach." *Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research*: 1942787515Y. 0000000005.

Meister, K., M. Balmer, F. Ciari, A. Horni, M. Rieser, R. A. Waraich and K. W. Axhausen (2010). Large-scale agent-based travel demand optimization applied to Switzerland, including mode choice. 12th World Conference on Transportation Research, Lisbon.

Meng, M., C. Shao, J. Zeng and C. Dong (2014). "A simulation-based dynamic traffic assignment model with combined modes." *PROMET-Traffic&Transportation* 26(1): 65-73.

Micha, #322, Maciejewski and K. Nagel (2012). Towards multi-agent simulation of the dynamic vehicle routing problem in MATSim. Proceedings of the 9th international conference on Parallel Processing and Applied Mathematics - Volume Part II. Torun, Poland, Springer-Verlag: 551-560.

Moerke, A. (2007). *Intelligente Transportsysteme (ITS)*. Japans Zukunftsindustrien, Springer: 275-286.

Nagel, K. and G. Flötteröd (2012). Agent-based traffic assignment: Going from trips to behavioural travelers. *Travel Behaviour Research in an Evolving World—Selected papers from the 12th international conference on travel behaviour research*.

Peeta, S. and A. K. Ziliaskopoulos (2001). "Foundations of dynamic traffic assignment: The past, the present and the future." *Networks and Spatial Economics* 1(3-4): 233-265.

Rieser, M., C. Dobler, T. Dubernet, D. Grether, A. Horni, G. Lämmel, R. Waraich, M. Zilske, K. W. Axhausen and K. Nagel (2013). *MATSim user guide*, Accessed.

Rindsfuser, G., F. Klügl and J. Freudenstein (2004). "Multi-agent simulation for the generation of individual activity programs." *Application of Agent Technology in Traffic and Transportation*: 165-180.

Said, A. M., A. Souza, E. Abd-Elrahman and H. Afifi (2015). Context-aware multi-modal traffic management in ITS: A Q-learning based algorithm. *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2015 International, IEEE*.

Spickermann, A., V. Grienitz and A. Heiko (2014). "Heading towards a multimodal city of the future?: Multi-stakeholder scenarios for urban mobility." *Technological Forecasting and Social Change* 89: 201-221.

Stölzle, W., U. Weidmann, T. Klaas-Wissing, J. Kupferschmid and B. Riegel (2015). "Vision Mobilität Schweiz 2050."

Thomas, R. J. (2014). "Determining cycle mode choice for commuting using new fine-grained route analysis methods."

V. Grimm, E. R., U. Berger, F. Jeltsch, W.M. Mooij, S.F. Railsback, et al. (2005). "Pattern-Oriented Modeling of Agent-Based Complex Systems: Lessons from Ecology." *Science* 310:

987-991.

Vlahogianni, E. I. (2015). "Optimization of traffic forecasting: Intelligent surrogate modeling." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 55: 14-23.

Wallentin, G. and M. Loidl (2015). "Agent-based bicycle traffic model for Salzburg City." *GI_Forum-Journal for Geographic Information Science* 2015(1): 558-566.

West, G. B., J. H. Brown and B. J. Enquist (1999). "The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organisms." *science* 284(5420): 1677-1679.

Zhang, D., D. J. A. V. Magalhães and X. C. Wang (2014). "Prioritizing bicycle paths in Belo Horizonte City, Brazil: Analysis based on user preferences and willingness considering individual heterogeneity." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 67: 268-278.

Zheng, N., G. Rérat and N. Geroliminis (2015). "Time-dependent area-based pricing for multimodal systems with heterogeneous users in an agent-based environment." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.