



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

NetCap:

Intermodale Strecken-/Linien- und Netzleistungsfähigkeit

Capacité intermodale de tronçons, de lignes et de réseaux

Intermodal Capacity of Links, Segments, and Networks

**ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)**

Strassenverkehrstechnik
Dr. Monica Menendez
Dr. Javier Ortigosa
Lukas Ambühl

Verkehrsplanung
Prof. Kay W. Axhausen
Dr. Francesco Ciari
Patrick Bösch

**EPF Lausanne, École polytechnique fédérale
Urban Transport Systems Laboratory (LUTS)**
Prof. Nikolas Geroliminis
Dr. Nan Zheng

**Forschungsprojekt SVI 2004/032 auf Antrag der Schweizerischen
Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)**

Mai 2016

1563

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



NetCap: Intermodale Strecken-/Linien- und Netzleistungsfähigkeit

Capacité intermodale de tronçons, de lignes et de réseaux

Intermodal Capacity of Links, Segments, and Networks

**ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)**

**Strassenverkehrstechnik
Dr. Monica Menendez
Dr. Javier Ortigosa
Lukas Ambühl**

**Verkehrsplanung
Prof. Kay W. Axhausen
Dr. Francesco Ciari
Patrick Bösch**

**EPF Lausanne, École polytechnique fédérale
Urban Transport Systems Laboratory (LUTS)
Prof. Nikolas Geroliminis
Dr. Nan Zheng**

**Forschungsprojekt SVI 2004/032 auf Antrag der Schweizerischen
Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Monica Menendez

Mitglieder

Prof. Kay W. Axhausen

Prof. Nikolas Geroliminis

Dr. Francesco Ciari

Dr. Javier Ortigosa

Dr. Nan Zheng

Lukas Ambühl

Patrick Bösch

Begleitkommission

Präsident

Dr. Christian Heimgartner

Mitglieder

Nikolaus Bischofberger

Peter Spacek

Thomas Kreyenbühl

Jörg Häberli

Antragsteller

Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung	13
1.1 Ausgangslage	13
1.2 Ziel und Zweck des Forschungsprojektes.....	13
1.3 Vorgehen.....	14
2 Stand der Forschung	15
2.1 Grundlagen	15
2.2 Makroskopische Verkehrsmodelle	15
2.3 Forschungsbedarf	16
3 Methodik	17
3.1 Das makroskopische Fundamentaldiagramm MFD.....	17
3.1.1 MFD und Verkehrssteuerung	17
3.1.2 MFD mit Realdaten	18
3.1.3 MFD durch Mikrosimulation	19
3.1.4 Evaluation der MFD Genauigkeit	20
3.2 Das dreidimensionale MFD.....	21
3.3 Das 3D-Passagier-MFD	22
3.4 Variable Nachfragemodellierung.....	23
3.4.1 Simulationsmodelle	24
4 Resultate	27
4.1 Das MFD der Zürcher Innenstadt	27
4.1.1 Vollständiges MFD	27
4.1.2 Mit Kantenwahlstrategien konstruiertes MFD	28
4.1.3 MFD erzeugt mit den ZüriTraffic-Überwachungsressourcen	31
4.2 Das 3D-MFD der Zürcher Innenstadt.....	33
4.3 3D-MFD des Zentrums von San Francisco.....	36
4.4 Das 3D-pMFD der Zürcher Innenstadt.....	38
4.5 Einfluss von Fussgängern und Fahrrädern.....	38
4.6 Nachfrage-Variation mit MATSim	39
4.6.1 MATSim-Szenarien	39
4.6.2 MFD mit MATSim in Abhängigkeit der Anzahl Iterationen.....	40
4.6.3 Vergleich der MFD aus VISSIM und MATSim	41
4.6.4 3D-MFD erzeugt mit VISSIM basierend auf Nachfragen aus MATSim	42
5 Zusammenfassung und Empfehlungen	45
5.1 Zusammenfassung.....	45
5.2 Ausblick und Empfehlungen	45
Anhänge	47
Glossar	59
Literaturverzeichnis	61
Projektabschluss	67
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	69
SVI Publikationsliste	73

Zusammenfassung

In urbanen Räumen bewegen sich mehr und mehr Menschen multimodal. Deshalb steigt das Interesse, zu verstehen, wie der Raum optimal genutzt werden kann und wie die Erreichbarkeit für alle Nutzer verbessert werden kann. Wie der Strassenraum den verschiedenen Modi zugeteilt wird, muss deshalb sorgfältig analysiert werden. Des Weiteren bringen die Kenntnis der Verkehrskapazität einer Stadt und die Analyse der Verkehrsbelastung in Echtzeit verschiedene weitere Vorteile mit. Damit ist es möglich, den Einfluss von Netzeigenschaften und des Verkehrsmanagement auf das Gesamtsystem zu verstehen. Dadurch können entsprechende Massnahmen und Strategien entwickelt und evaluiert werden sowie entsprechende Entscheidungen erleichtert werden. Zudem können verkehrsrelevante Informationen der Verkehrssteuerung in Echtzeit zugeführt werden und damit das makroskopische Verkehrsmanagement in Städten unterstützen. Dadurch kann das Stauvolumen reduziert werden, bspw. durch die Anpassung der Lichtsignalzyklen von den in die Stadt führenden Strassen.

Um von diesen Möglichkeiten tatsächlich zu nutzen, ist ein neuer, ganzheitlicher Ansatz zur Überwachung und Kontrolle der städtischen Netze notwendig. Jüngste Fortschritte haben die Grundlagen dazu geschaffen. Ein prominentes Modell ist das makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD). Das MFD wurde ursprünglich für einzelne Verkehrsmodi (z.B. Autos) entwickelt. Mittlerweile gibt es aber auch Formen, die verschiedene Transportmodi gleichzeitig berücksichtigen. In diesen 3D-MFD wird bspw. die Verkehrsdynamik in Netzen abgebildet, in denen auch öffentliche Verkehrsmittel verkehren und den Strassenraum mitbeanspruchen. Mithilfe des 3D-MFD können Städte den Zielkonflikt zwischen verschiedenen Betriebsmöglichkeiten des Strassennetzes verstehen und quantifizieren. Aus den gewonnenen Erkenntnissen können Kontrollstrategien erarbeitet werden, die Verspätungen von Nutzern der verschiedenen Modi berücksichtigen. Zusätzlich erleichtert das 3D-MFD die Auswertung der Zuordnung von Strassenraum und dient als quantitatives Werkzeug für die Entscheidung, wie viel Strassenraum Autos und dem öffentlichem Verkehr zugeordnet werden soll.

Im Projekt NetCap werden MFD genutzt, um die Netzkapazität urbaner Räume zu quantifizieren und zu beurteilen. Der erste Teil des Projektes beschreibt die wichtigsten Charakteristiken des unimodalen MFD (nur Autos). Zwei Methoden werden beschrieben, wie das MFD generiert werden kann; einerseits mit Hilfe von echten Daten (Zählstationen und/oder Floating Car Data) und andererseits durch Simulation (hier VISSIM). Es wird auch eine Methodik präsentiert, wie die Genauigkeit der MFD beurteilt werden kann, wenn die Informationen nicht für das gesamte Netz vorliegen. Zum Schluss des ersten Teils werden Strategien vorgeschlagen, wie Überwachungsressourcen eingesetzt werden können, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen.

Der zweite Teil des Projektes widmet sich der Herleitung des 3D-MFD, das nicht nur Autoverkehr, sondern auch öffentlichen Transport abbildet. Die 3D-MFD für die Städte Zürich und San Francisco werden präsentiert, welche aus Simulationen erhalten wurden. Zusätzlich erklären wir, wie sich die Form und Charakteristiken ändern, wenn sich Netzeigenschaften ändern. Wir analysierten den Fall von separaten Busspuren sowie den Fall von Priorisierungssystemen. Schliesslich untersuchten wir auch den Effekt, den Fussgänger und Fahrradfahrer auf das 3D-MFD haben.

Dieses Projekt wurde mit zwei Mikrosimulationsmodellen durchgeführt, VISSIM für Zürich und Aimsun für San Francisco. Diese Mikrosimulationsmodelle verwendeten die Informationen eines statischen Verkehrsumlegungsprogrammes für die Routenführung. Die Genauigkeit der Simulationen wurde erhöht, indem dynamische Nachfragen verwendet werden, welche mit der agenten-basierten Verkehrssimulation MATSim erzeugt wurden. Ein System wurde entwickelt, um die Nachfragesimulation MATSim mit der Verkehrssimulation VISSIM zu verbinden. Diese Verbindung vom VISSIM mit MATSim erforderte die Weiterentwicklung von MATSim an verschiedenen Stellen.

Einerseits musste ein Export der Nachfrage nach VISSIM mit der entsprechenden Abbildung von Routen aus einer Netzmodellierung auf die Routen einer anderen Netzmodellierung implementiert werden, andererseits stellte die Fragestellung des multimodalen Verkehrs in urbanen Gebieten neue Anforderungen an die Simulationen in MATSim. So musste in einem neuen, echt-multimodalen Netz der ÖV mit dem MIV zusammengebracht und auf einem geteilten Netz abgebildet werden.

Das vorliegende Projekt bereitet den Weg für die Verwendung makroskopischer Ansätzen in Schweizer Städten. In Zukunft sollten Pilotversuche durchgeführt werden, um MFD und 3D-MFD mit realen Daten zu generieren. Des Weiteren sollten die in diesem Bericht vorgelegten makroskopischen Interaktionen verschiedener städtischen Verkehrsmodi fortgeführt werden.

Résumé

De plus en plus de gens utilisent des modes de transport différents pour se déplacer dans les espaces urbains et il devient primordial de comprendre comment ces espaces sont répartis entre ces modes et comment cette répartition peut être gérée pour améliorer l'accessibilité pour tous. Estimer la capacité d'une ville et évaluer en temps réel les conditions de trafic par rapport à cette capacité peut permettre de comprendre comment les caractéristiques du réseau et les stratégies de gestion des transports affectent la capacité du système dans son ensemble. Ceci est important pour évaluer, élaborer, et faciliter la prise de décisions concernant les politiques de transports. Cela fournit aussi les données nécessaires aux mécanismes de contrôle du trafic qui aident à réguler la congestion dans les villes. Ces mécanismes peuvent réduire le niveau de congestion en utilisant les informations disponibles en temps réel afin de, par exemple, réguler les cycles des feux sur les principales routes d'accès à la ville.

Ce projet est basé sur des avancées théoriques récentes en gestion du trafic qui permettent d'établir de tels indicateurs de performance à un niveau macroscopique. Le modèle au centre de ces avancées est le Diagramme Macroscopique Fondamental (MFD). Le MFD a été d'abord développé pour les réseaux de transports uni-modaux (par exemple avec des voitures uniquement). Ici, nous proposons d'utiliser une version plus élaborée qui prend en compte différents modes de transports. Le MFD tri-dimensionnel (3D-MFD) décrit les dynamiques de réseaux où les transports en commun (bus et tram) interagissent avec les voitures. En utilisant le 3D-MFD, les personnes responsables de la gestion du trafic dans les villes peuvent comprendre les impacts sur tous les modes de différentes mesures et développer des stratégies qui minimisent les délais pour tous les usagers. De plus, le 3D-MFD facilite l'évaluation de la distribution de l'espace urbain, servant d'outil quantitatif permettant de déterminer quelle proportion de l'espace urbain doit être allouée aux transports en commun et aux voitures respectivement.

Dans la première partie de ce projet, nous expliquons les principales caractéristiques d'un MFD unimodal (voitures seulement). Nous détaillons les différentes méthodes pour obtenir le MFD avec des simulations (VISSIM) ou avec des données réelles (boucles magnétiques ou véhicules-sondes). Nous proposons également une méthodologie pour évaluer sa précision dans le cas où nous n'aurions pas accès à l'ensemble des informations du réseau; et nous proposons des stratégies pour sélectionner les détecteurs pour obtenir une meilleure précision.

La deuxième partie de ce projet est consacré à l'obtention des 3D-MFD qui considèrent non seulement le trafic de voiture mais aussi les transports publics. Nous présentons les 3D-MFD des villes de Zurich et de San Francisco, obtenus à partir de simulations. En outre, nous expliquons comment la forme ou les caractéristiques du 3D-MFD sont affectés lorsque les caractéristiques du réseau changent. Nous avons analysé le cas de voies réservées et mixtes, ainsi que le cas des feux de signalisation donnant la priorité aux transports en commun. Enfin, nous étudions aussi l'effet que les piétons et les vélos ont sur le 3D-MFD.

Ce projet a été réalisé avec deux modèles de micro-simulation, un pour la ville de Zurich et l'autre pour la ville de San Francisco. Ces modèles de micro-simulation utilisent un programme d'allocation statique du trafic pour déterminer les itinéraires. Afin d'augmenter la précision du logiciel de micro-simulation, nous avons importé des informations dynamiques du modèle de simulation multi-agents MATSIM. Nous avons créé un système pour rendre MATSIM et VISSIM (microsimulation) compatibles et nous pensons que cela peut contribuer à améliorer l'état de l'art, en augmentant la précision des modèles de simulation.

Le projet NetCap a souligné l'importance d'appliquer des approches macroscopiques en trafic. Afin de générer des MFD et 3D-MFD avec des données réelles, à l'avenir, des projets pilotes devraient être introduits dans les villes Suisses. Par ailleurs, la recherche

doit continuer ses efforts pour comprendre les différentes interactions macroscopiques entre les moyens de transport.

Summary

More and more people use multiple modes to move in urban spaces. There is an increasing need to understand the details of how this space is used across multiple modes, and how it can be managed to improve accessibility for everyone. Estimating the capacity of a city and assessing at real time how far the traffic conditions are from this capacity can be used to understand how network features and transport management strategies affect capacity of the overall system. This is important to evaluate and develop different measures and policies, as well as to support the decision making process regarding transport and urban planning policies. It is also useful to feed traffic control mechanisms which help regulating congestion in cities. This is important in order to reduce traffic congestion levels in response to real time information by e.g., regulating traffic signal cycles on the main roads accessing the city.

In this project we research on recent advances in traffic engineering theory that provide a great opportunity to establish such performance indicators at macroscopic level. The proposed model is namely the Macroscopic Fundamental Diagram (MFD). The MFD was originally developed for uni-mode networks (e.g. cars-only). Here we propose to use an advanced version of the MFD model that takes into account other motorized transport modes. The three-dimensional MFD (3D-MFD) treats the traffic dynamics in networks where public transportation (buses and trams) operates and shares space with cars. By employing the 3D-MFD, traffic managers of cities can understand the trade-off of operations regarding different performance level, and develop control strategies to balance travel delay for all travelers utilizing different modes. Furthermore, the 3D-MFD facilitates the evaluation of road space allocation, serving as a quantitative tool for determining how much space should be devoted to cars but also public transport supply.

In the first part of this project, we explain the main characteristics of the unimodal MFD (only cars). We detail the different methods to obtain it either with simulation (VISSIM) or with real data (loop detectors, floating car data). We also propose a methodology to assess its accuracy in case that we would not have the whole information of the network; and we propose strategies to select monitoring resources to achieve a better accuracy.

The second part of this project is devoted to obtaining the 3D-MFD which consider not only car traffic but public transport. We show the 3D-MFD for the city of Zurich and San Francisco, results obtained from simulation. Additionally, we explain how the shape or characteristics of the 3D-MFD is affected when network features change. We analyzed the case of dedicated and mixed lanes, as well as the case of signal priority systems. Finally, we also study the effect that pedestrians and bicycles have on the 3D-MFD.

This project has been carried out with two microsimulation models, one for the city of Zurich and the other one for the city of San Francisco. These microsimulation models get information about routing from a Static Traffic Assignment program. We wanted to increase the accuracy of the microsimulation software by importing dynamic information from the agent based simulation model MATSIM. We have created a system to make MATSIM and VISSIM (microsimulation) compatible and we believe that this can contribute to the state of the art to have more accurate simulation models in the future.

This project paves the way for the use of macroscopic traffic models in Swiss cities. In the future, pilot projects should be implemented to generate MFDs and 3D-MFDs according to the present guidelines. In addition, further work should continue studying the macroscopic relationships between transport modes in cities.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

In heutigen Städten ist die Verkehrsfläche limitiert. Gleichzeitig wird der Individualverkehr voraussichtlich auch zukünftig nicht abnehmen. Die Stadtbevölkerung wird weiter wachsen, und Städte sind bestrebt, mehr und mehr Verkehrsflächen nachhaltigeren Transportmodi zuzuführen, beispielsweise dem öffentlichen Verkehr (ÖV), Fahrradverkehr, oder Fussverkehr, (Shahin und Friedrich, 2003). Diese Konkurrenz zwingt Planer, effizient mit der verfügbaren Verkehrsfläche umzugehen. Der Stadtverkehr ist das Resultat von unzähligen Interaktionen zwischen Infrastruktur und Menschen. Verkehrsingenieure sind herausgefordert, diese Systeme, die viel komplexer sind als einzelne Strassen, als Gesamtes zu studieren. Im Projekt NetCap wird die Kapazität von multimodalen, urbanen Strassennetzen untersucht.

Intermodalität, ein relativ altes Konzept der Bewegung von Menschen oder Gütern, wurde in den letzten Dekaden ein immer wichtigeres Thema (Boltze et al., 2015). Man versucht, die kontinuierlich wachsende Nachfrage mit der limitierten Verkehrsinfrastruktur zu bedienen. Daher hat sich der Schwerpunkt von autozentrierten Lösungen zu Integrationslösungen verschoben. Immer mehr Menschen verwenden verschiedene Modi, so dass sich diese um den dem Verkehr zugewiesenen, städtischen Raum konkurrieren müssen. Es gibt einen wachsenden Bedarf, detailliert zu verstehen, wie Raum genutzt wird und wie es möglich ist, die Erreichbarkeit für alle zu verbessern.

Nach Kenntnis der Autoren gibt es noch keine spezifische Methodik, die diese Probleme behandelt. Es fehlt im Speziellen eine einheitliche Methodik, um die Gesamtkapazität eines Netzes zu berechnen und um den gemeinsamen, intermodalen Level-of-Service verschiedener Transportmodi in urbanen Gebieten zu beurteilen. In diesem Projekt liegt der Fokus auf der Netzkapazität von multimodalen Systemen. Auf Grund seiner hohen Anteile in Schweizer Städten wird der ÖV als besonderer Schwerpunkt betrachtet. Es soll untersucht werden, wie die Passagier- und Fahrzeugkapazitäten von den geometrischen und operationellen Charakteristiken des Netzes, der Nachfragemustern und den Interaktionen zwischen den verschiedenen Modi abhängen.

1.2 Ziel und Zweck des Forschungsprojektes

Eines der ursprünglichen Projektziele war die Entwicklung einer generalisierten Norm aus der Kombination der bestehenden Schweizer Normen. Nach detaillierter Überprüfung der Ansätze wurde jedoch erkannt, dass es nicht möglich ist, eine umfassende Norm auf Basis der verschiedenen Schweizer Normen zu entwickeln. Daher wurde beschlossen, neue Ansätze zu untersuchen. Basierend auf entsprechenden Abklärungen wurde daraufhin entschieden, das aggregierte MFD als eine Lösung zur Entwicklung einer umfassenden Methode zur Berechnung der Gesamtkapazität in städtischen Gebieten zu nutzen.

Die Kapazität einer Stadt zu schätzen und in Echtzeit zu beurteilen, wie weit die momentanen Verkehrsbedingungen von dieser Kapazität entfernt sind, kann viele Vorteile bringen. Unter anderem können die gewonnenen Daten in der Verkehrssteuerung genutzt werden, um Staus zu regulieren: Indem man makroskopische Indikatoren, wie bspw. das MFD, einsetzt, kann der Stau basierend auf Realdaten in Echtzeit geschätzt werden. Diese Bewertung kann der Steuerung zugeführt werden, die beispielsweise die Lichtsignalzyklen der in die Stadt führenden Strassen steuern. Einige Städte, beispielsweise die Stadt Zürich, haben bereits solche Zugangskontrollsysteme, wobei eine Kontrolle mittels MFD eine kontinuierlichere und gleichmässiger Beurteilung des Staus erlauben würde. Eine Zugangskontrolle, die auf MFD basiert, wird momentan von verschiedenen Städten untersucht. In diesem Forschungsprojekt gehen wir einen Schritt weiter und schlagen vor, auch andere Transportmodi im MFD zu berücksichtigen. Dafür arbeiten wir mit 3D-MFD, welche auch den ÖV erfassen.

Die makroskopische Sicht der Stadt über die verschiedenen Transportmodi ermöglicht Planern und Ingenieuren, das Verhalten von urbanen Gebieten besser zu verstehen. Der Nutzwert dieser Indikatoren und Kapazitätsschätzungen geht über Zugangskontrollen hinaus und können auch andere Politikbereiche, wie die Stadtplanung, beeinflussen.

1.3 Vorgehen

Es wurde gezeigt, dass die Anzahl Fahrten (die Verkehrsmenge) in einer Stadt proportional zum mittleren Fluss auf den Strecken des Strassennetzes der Stadt ist (Geroliminis und Daganzo, 2008). Ebenfalls wurde gezeigt, dass – unter bestimmten Homogenitätsbedingungen – die Anzahl Fahrten auch mit der Anzahl Fahrzeuge in dieser Stadt in Verbindung gebracht werden kann; und dass die Anzahl von Fahrzeugen in diesem Gebiet (die Verkehrsdichte) proportional ist zur mittleren Dichte auf den Strecken. Diese Beziehung zwischen durchschnittlichem Fluss und Dichte bildet das makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD). Eine Methodik zum Schätzen des MFD und der Netzkapazität von Städten mit Mischverkehr (keine Trennung von Bus/Tram und Auto) oder separaten Bus- oder Trampuren wurde in diesem Projekt entwickelt. Sie wird an Beispielen für verschiedene Stadttopologien (Zürich und San Francisco) präsentiert. Die Analyse basiert auf realistischen, mikroskopischen Staudynamik-Modellen und kann mit unterschiedlichen Daten implementiert werden. Möglich sind Daten von Zählstellen (bspw. mit Schleifendetektoren), von GPS-Geräten in Fahrzeugen (z.B. Trams, Busse, Privatfahrzeuge, Taxis) und potentiell auch von Bluetooth-Zählern, um Fahrzeuge des öffentlichen Transports, sowie ihre Passagiere, zu erfassen. Im Projekt wird die Methodik an Daten aus Verkehrssimulationen (VISSIM und MATSim) getestet.

2 Stand der Forschung

2.1 Grundlagen

2011 wurden vom SVI die Ergebnisse des wissenschaftlichen Projektes 2004/309 „Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmitteln in Agglomerationen“ (Weidmann et al., 2011) veröffentlicht. In diesem Bericht werden einige Schwierigkeiten bezüglich der Benutzung der verschiedenen Verkehrsmodi in der Schweiz betrachtet. Es wird die Leistungsfähigkeit, die Kapazität und die Auswirkung des jeweiligen Verkehrsmodus erläutert. Weiter umfasst der Bericht ein Beispiel für die Berechnung der Kapazität an einer einzigen Stelle eines multimodalen Verkehrsflusses, der aus Autos, Bussen und Trams besteht. Zusätzlich findet man in einem separaten Bericht (Pitzinger und Spacek, 2009) eine Methode zur Berechnung der Kapazität einer Kreuzung ohne Verkehrssignale. Diese Methode kann unabhängig der verschiedenen Transportmodi (Tram, Bus, Autos, Fahrrad, und Fussgänger) benutzt werden. Die entsprechenden Schweizer Normen werden in den kommenden Kapiteln berücksichtigt und die Simulationen zur Berechnung der Kapazitäten von multimodalen Verkehrsflüssen werden auf Basis dieser Normen erstellt.

Das Schweizer Normenwerk enthält eine Anzahl an Normen zur Dimensionierung und Entwurf von Verkehrsanlagen. Diese beschreiben unter anderem die Leistungsfähigkeit und die Entwicklungsstandards, die in der Schweiz angewendet werden. Zum Beispiel stellt die Normgruppe SN 640017a (VSS, 1998) die vollständige Methodik bzgl. der Qualität von Verkehrselementen für Hochleistungsstrecken, Strecken mit Richtungstrennung, Kreuzungen mit und ohne Verkehrssignale und Kreisverkehren zur Verfügung. Dies beinhaltet eine generelle Beschreibung des Prozesses angewandt auf Transportstrecken. Eine detaillierte Beschreibung findet man in den Normen SN 640018a (VSS, 2006a), SN 640019 (VSS, 1999a), SN 640020a (VSS, 2010), SN 640022 (VSS, 1999b), SN 640023a (VSS, 2008), SN 640024a (VSS, 2006b), SN 641825 (VSS, 2009).

Der Standard SN640017a weist darauf hin, dass viele der beschriebenen Prozesse ebenfalls auf den öffentlichen Verkehr und auf Fussgängereinrichtungen angewandt werden können. Jedoch werden auch separate Standards entwickelt. Ein Beispiel für den öffentlichen Verkehr ist das Projekt VSS2007-305 „Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV“ (Weidmann et al., 2012a), und für Fussgänger und Fahrräder das Projekt VSS2007-306 „Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und Fussgängerverkehrs“ (Weidmann et al., 2012b).

Die genannten Normen und Standards sind die Grundlage für die Analysen und Simulationen im Projekt NetCap. Die Normen zu multimodalen Transportsystemen werden evaluiert und im Hinblick auf die maximale Netzkapazität für die Transportmodi Autos, Busse, Trams, Fahrräder und Fussgänger analysiert.

2.2 Makroskopische Verkehrsmodelle

Makroskopische, netzweite Verkehrsmodelle wurden zunächst von Smeed (1966), Godfrey (1969), Herman and Priogione (1979), Mahmassani et al. (1987) und Daganzo (2007) vorgeschlagen. Später zeigten Gerolimimis und Daganzo (2008) sowie Daganzo und Gerolimimis (2008), dass für ein gegebenes Gebiet eine Abhängigkeit besteht zwischen der Anzahl abgeschlossener Fahrten und der Anzahl Fahrzeugen, die im Netz unterwegs sind. Zusätzlich zeigten sie, dass es eine Beziehung zwischen dem durchschnittlichen Verkehrsfluss und der Verkehrsmenge auf allen Strecken im Netz gibt. Dies ist heute bekannt als das makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD). Die Existenz dieser Beziehung ist unabhängig von den Quelle-Ziel-Beziehungen, wenn die Verkehrsflüsse homogen über das Netz verteilt sind. Falls diese Bedingung nicht erfüllt

ist, weisen die kumulierten Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Beziehungen eine grössere Streuung auf und es zeigt sich, dass weniger Fahrten abgeschlossen werden, als das MFD angibt. Somit repräsentiert das MFD einen oberen Grenzwert (Mazoumian et al., 2010; Geroliminis und Sun, 2011; Daganzo et al., 2011; Mahmassani et al., 2013; Knoop et al., 2013). Es zeigte sich, dass das MFD speziell für Verkehrssteuerungsstrategien nützlich ist (Geroliminis und Boyaci, 2012; Koop et al., 2012; Keyvan-Ekbatani et al., 2013; Haddad und Shraiber, 2014; Haddad und Geroliminis, 2012; Geroliminis et al., 2013; Yildirimoglu und Geroliminis, 2014; Ramenazi et al., 2014). Viele dieser Forschungsarbeiten unterteilen das Stadtgebiet in kleinere Regionen mit homogenen Verkehrsaufkommen mit je einem eigenen MFD. Dadurch wird die Verkehrssteuerung komplizierter, da jede einzelne Region getrennt gesteuert werden muss.

Aufbauend auf dem Wissen über einfache MFD wurde das Verständnis der Dynamik von multimodalen Netzen in der Forschung thematisiert. Es existieren verschiedene Forschungsarbeiten, die versuchen, das Gleichgewicht zwischen verschiedenen Transportmodi in makroskopischen Modellen zu analysieren. Gonzales et al. (2011), Zheng et al. (2013) und Zheng und Geroliminis (2013) untersuchten beispielsweise die Verkehrsmittelwahl auf einer makroskopischen Ebene mit einem direkten Feedback auf die Verkehrsleistung. Sie schlugen eine auf der Verteilung des städtischen Raumes basierende Optimierungsmethodik vor. Geroliminis et al. (2014) zeigten schliesslich die Existenz eines dreidimensionalen MFD (3D-MFD). Um dieses Diagramm zu erhalten, wurde, mit Hilfe von simulierten Daten, die Menge von Autos und Bussen mit dem totalen Verkehrsfluss in Beziehung gesetzt. In Geroliminis et al. (2014) bietet das Netz dieselben Bedingungen und Strassenkapazität für beide Modi. In der Realität würde dies den öffentlichen Verkehr sehr unzuverlässig machen, da die Leistung der Busse von der Verkehrssituation abhängig ist. Stadt- und Verkehrsplaner pflegen dem öffentlichen Verkehr eine höhere Priorität zuzuordnen, um eine stetige Leistungserbringung zu ermöglichen, um den Individualverkehr zu reduzieren und um mehr Kunden zu gewinnen. Viele Städte haben separate Busspuren, um zu gewährleisten, dass Busse nicht mit dem Individualverkehr um Strassenkapazität konkurrieren müssen. Zusätzlich dazu oder auch als Alternative führten Städte, wie beispielsweise Zürich, Systeme für die Beeinflussung von Lichtsignalanlagen ein. So können öffentliche Verkehrsmittel an Kreuzungen prioritär behandelt werden.

2.3 Forschungsbedarf

In dieser Arbeit wird analysiert, wie die Präsenz separater Busspuren und von Systemen zur Beeinflussung von Lichtsignalanlagen (Priorisierungen) das 3D-MFD beeinflusst. Es soll die makroskopische Leistungsfähigkeit einer Stadt unter diesen Bedingungen genauer verstanden werden und dazu, mit Hilfe von Simulationen, die 3D-MFD für die Städte Zürich und San Francisco jeweils für die Situationen mit und ohne separaten Busspuren verglichen werden. Für die Verkehrssimulation wird VISSIM verwendet. Für die Nachfragesimulation mit unterschiedlichen ÖV-Angeboten MATSim. Zusätzlich wird eine Optimierungsmethode präsentiert, die auf Zheng und Geroliminis (2013) und Zheng (2014) basiert. Diese kann die mathematisch optimale Anzahl separater Busspuren für eine Stadt berechnen und dabei die Fahrzeiten aller Verkehrsteilnehmer minimieren.

3 Methodik

Das folgende Kapitel stellt die Methoden vor, welche im Projekt NetCap angewendet und entwickelt wurden, um das unimodale und multimodale MFD aus verschiedenen Datengrundlagen zu kreieren. Damit sollen Städte in der Lage sein, die Gesamtkapazität ihrer Verkehrsnetze abzuschätzen und daraus Schlüsse für das Verkehrsmanagement zu ziehen.

3.1 Das makroskopische Fundamentaldiagramm MFD

3.1.1 MFD und Verkehrssteuerung

Dieser Bericht fokussiert sich auf die von Städten nötigen Datenressourcen, die benötigt werden, um das MFD für die makroskopische Verkehrsregelung zu implementieren. Frühere Publikationen haben die Entwicklung des MFD studiert (z.B. Geroliminis und Daganzo, 2008; Daganzo und Geroliminis, 2008; Buisson und Ladier, 2009); gezeigt wie MFD erhalten werden können (Haddad und Geroliminis, 2012; Aboudolas und Geroliminis, 2013; Geroliminis et al., 2013); oder den Nutzen einer Implementierung von MFD-basierenden Perimeterkontrollstrategien beschrieben (Keyvan-Ekbatani et al., 2012, 2013). Hier werden die Anforderungen untersucht, um trotz limitierten Erhebungsressourcen ein zuverlässiges MFD zu erhalten. Anders gesagt, es wird die Genauigkeit des MFD untersucht, wenn nur eine limitierte Anzahl der Kanten überwacht werden kann. Keyvan-Ekbatani et al. (2013) machen einen Vergleich zwischen einer Strategie mit Detektoren in allen Kanten und einer Strategie, in der nur 10% bzw. 35% der Kanten Detektoren aufweisen. Unsere Arbeit baut diese Idee weiter aus und untersucht die Beziehung zwischen Netzabdeckung (Anteil der überwachten Kanten) und der Genauigkeit des MFD. Eine solche Beziehung ist interessant, da in der Realität meistens keine vollständigen Verkehrsinformationen verfügbar sind. In dieser Arbeit schlagen wir einen Vergleich zwischen einem vollständigen MFD (erhalten mit allen Kanten des Netzes) und einem unvollständigen MFD (erhalten mit nur einem Anteil der Kanten des Netzes) vor. Nach bestem Wissen der Autoren ist dies das erste Mal, dass eine solch generalisierte Methode für die Bewertung der Genauigkeit eines MFD präsentiert wird. Gayah und Dixit (2012) führten Geschwindigkeitsmessungen von Probefahrzeugen durch und verglichen diese mit den Verkehrszuständen des MFD. Keyvan-Ekbatani et al. (2013) evaluierten die Genauigkeit hinsichtlich der Gesamtdistanz und der totalen Fahrzeit der Fahrzeuge.

Es sei darauf hingewiesen, dass die exakte Position des Schleifendetektors innerhalb einer Kante hier nicht näher untersucht wird. Diese Thematik wurde von anderen Wissenschaftlern untersucht (z.B. Buisson und Ladier, 2009; Courbon und Leclercq, 2011). Die optimale Platzierung von Detektoren auf der Kante kann vom allfälligen Rückstau vor einem Lichtsignal und anderen Ursachen lokaler Inhomogenität beeinflusst werden. Wir nehmen hier an, dass wir den Verkehrsfluss und die Verkehrsdichte auf einigen Kanten korrekt messen können, indem wir die entsprechende Funktion in VISSIM nutzen. Um den Verkehrsfluss zu berechnen, summiert der Mikrosimulator im Auswertungszeitraum alle gefahrenen Fahrzeugkilometer einer Kante und dividiert die Summe durch die Gesamtlänge der Kante. Die Prozedur für die Dichtebestimmung ist ähnlich. Die gefahrenen Fahrzeugstunden werden durch den Auswertungszeitraum dividiert. In der Wirklichkeit könnten entsprechende Daten generiert werden, indem man mehrere Detektoren auf derselben Kante platziert oder andere lokale Messtechnologien verwendet (z.B. Videokameras die lange Sektionen einer Kante überwachen können).

Um möglichst genaue Quell-Ziel-Matrizen (QZ-Matrizen) zu erhalten, wurden in einer ähnlichen Fragestellung die optimalen Standorte für Detektoren untersucht (z.B. Yang und Zhou, 1998; Ehlert et al., 2006; Fei et al., 2007). In unserer Studie werden viele verschiedene Kombinationen von Standorten analysiert. Das Verkehrsaufkommen wird mit einer QZ-Matrix simuliert, welche auf Detektordaten basiert. Dieser Ansatz ist zwar rechenintensiv, aber die Simulation hängt nicht von der Auswahl der Kanten ab. Somit

muss die Simulation nur einmal durchgeführt werden. Trotzdem können die Kosten für ein genaues Modell sehr hoch sein, was NetCap weiter begründet.

Für die Berechnung einzelner Datenpunkte eines MFD werden die gewichteten, mittleren Verkehrsflüsse und die gewichteten, mittleren Verkehrsdichten auf allen Kanten des gewählten Stadtgebietes benötigt. Ein Punkt des MFD ist definiert als Durchschnitt der gewichteten Verkehrsflüsse und der Durchschnitt der gewichteten Verkehrsdichten (Geroliminis und Daganzo, 2008). Die durchschnittlichen Verkehrsflüsse und -dichten pro Kante werden in jedem Zeitintervall t (z.B. alle 5 Minuten) berechnet. Die Werte q_{it} und k_{it} entsprechen dem totalen Verkehrsfluss, q , und der totalen Dichte, k , der Kante i für das Zeitintervall t . Der Wert n_i entspricht der Anzahl Spuren der Kante i und l_i der Länge der Kante.

$$q_t = \frac{\sum_i q_{it} \cdot l_i}{\sum_i n_i \cdot l_i} \quad (1)$$

$$k_t = \frac{\sum_i k_{it} \cdot l_i}{\sum_i n_i \cdot l_i} \quad (2)$$

Im Weiteren sollen zwei Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Beziehungen betrachtet werden. Die erste ist das vollständige MFD: das MFD wird aus den Daten *aller* Kanten gewonnen. Das zweite ist das uMFD: das MFD wird nur aus den Daten von u Kanten gewonnen (mit $u < N$, wobei N der totalen Anzahl Kanten entspricht). Es wird uMFD genannt, weil es sich um ein unvollständiges MFD handelt. Es sei darauf hingewiesen, dass das ideale, analytisch hergeleitete MFD den oberen Grenzwert aller möglichen Fluss-Dichte-Beziehungen darstellt (Daganzo et al., 2011). Dies ist für das uMFD jedoch nicht komplett richtig, da es aus unvollständigen und unter Umständen nicht repräsentativen Informationen gewonnen wird.

3.1.2 MFD mit Realdaten

Bis vor kurzem wurden Verkehrsdaten nur punktuell an gewissen Standorten erhoben. Normalerweise wird dazu ein Schleifendetektor in der Strasse installiert. Dieser zählt die Fahrzeuge und misst die Belegung (wie lange Fahrzeuge die Schlaufe in einem gewissen Zeitintervall „belegen“). Aus der Fahrzeugzählung und der Belegung können die zwei für die Konstruktion des MFD relevanten Variablen Verkehrsfluss und -dichte berechnet werden. In den letzten Jahren wurden Schätzmethode für das MFD erarbeitet, die die Verwendung von mobilen Daten, sogenannten Floating Car Data, beinhalten. Die mobilen Daten stammen von Fahrzeugen, die sich im Netz bewegen. Im Gegensatz zu fix installierten Schleifendetektoren haben diese Daten den Vorteil, dass sie flexibel in Zeit und Raum erhoben werden können. Der Typ der so gewonnenen Daten hängt vom Fahrzeugmessgerät ab. Normalerweise beinhalten sie den momentanen Standort, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung (Gayah und Dixit, 2013). Ein Beispiel hierfür ist ein GPS-Gerät in einem Fahrzeug.

Allerdings ergibt sich in der Praxis folgendes Problem: Nicht alle Strassen weisen Schleifendetektoren auf und nicht alle Fahrzeuge sind mit GPS-Geräten ausgerüstet. Besonders für mobile Daten sind die Beobachtungszeit und die Penetrationsrate entscheidend für die Qualität der MFD-Schätzung. Eine Penetrationsrate von 0.3 bedeutet, dass 30% aller Fahrzeuge im Netz dem Verkehrsmanagement Informationen liefern. Es wird davon ausgegangen, dass eine höhere Penetrationsrate und ein längerer Beobachtungszeitraum zu genaueren Durchschnittswerten führen. Somit wird erwartet, dass eine Penetrationsrate von 0.3 eine höhere Informationsgenauigkeit liefert, als eine Penetrationsrate von 0.1. Analog wird erwartet, dass eine Beobachtung des Netzes für 300s genauere Informationen liefert, als eine Beobachtung für 100s. Zusätzlich muss die reale, mobile Penetrationsrate geschätzt werden. Dies kann bspw. durch die Zählung der mobilen Erhebungsfahrzeuge mit einem Detektor im Verhältnis zu allen gezählten Fahrzeugen erreicht werden.

Ist das MFD eines bestimmten Netzes bekannt, können der durchschnittliche Verkehrsfluss und die Verkehrsdichte durch die Verwendung der Durchschnittsgeschwindigkeit der mobilen Proben bestimmt werden. Diese Methode wurde von Gayah und Dixit (2013) verwendet. Sie hat aber den grossen Nachteil, dass das MFD im Voraus bekannt sein muss. Zusätzlich ist die Genauigkeit im staufreien Zustand kleiner, und diese Methode benötigt unrealistisch hohe Penetrationsraten, um genau zu sein.

Es ist auch möglich, mit mobilen Daten den Verkehrsfluss und die -dichte eines Netzes zu schätzen. Dazu verwendet man die zurückgelegte Distanz und die Zeit, die im Netz verbracht wird. Angenommen ein Anteil an Fahrzeugen ρ ist mit GPS ausgerüstet, dann kann mit Eddie's allgemeinen Definitionen die Dichte und der Verkehrsfluss in einem Netz ermittelt werden. In einem Netz der Länge L und während der Zeit T haben Fahrzeuge eine totale Distanz von d_{tot} und eine Zeit von t_{tot} im System verbracht. Wichtig ist, dass dieser Anteil an Fahrzeugen mit GPS, die Penetrationrate ρ , möglichst genau geschätzt wird.

$$q_t = \frac{d_{tot,t}}{\rho LT} \quad (3)$$

$$k_t = \frac{t_{tot,t}}{\rho LT} \quad (4)$$

Um GPS-Daten aufzubessern, können diese mit jenen von Schleifendetektordaten kombiniert werden. Dies führt zu einer noch besseren Schätzung des MFD. Eine solche Kombination von Daten, welche Gegenstand jetziger Forschung ist, stellt sich als schwierig heraus und hängt von den Anzahl Kanten im Netz sowie von der Penetrationsrate der mobilen Proben ab.

3.1.3 MFD durch Mikrosimulation

Um ein MFD zu erhalten, werden Informationen über Verkehrsflüsse und Verkehrsdichten benötigt. Wir benötigen diese Informationen für alle Kanten des Netzes in jeweils 5-Minuten-Intervallen. Weiter wird ein Verkehrssimulationsmodell benötigt, das in der Lage ist, diese Verkehrsgrössen bereitzustellen. Mikrosimulationen eignen sich für diesen Zweck, da diese die genauesten Verkehrsinformationen liefern (siehe Abschnitt 3.4.1).

Bei der wissenschaftlichen Untersuchung des MFD werden oft Mikrosimulationen benutzt, die feste Routenführungen verwenden. Diese Routenführungen werden in der Regel vorgängig über statische Verkehrsumlegungsmethoden erhalten (z.B. San Francisco, CORSIM (Geroliminis and Daganzo, 2008); Orlando, VISSIM (Gayah and Dixit, 2014); Zürich, VISSIM (Fellendorf and Vortisch, 2010; Ortigosa et al., 2014)). Diese Methode benötigt nur wenig Rechenleistung, da die Mikrosimulationen nur einmal durchgeführt werden müssen, und ist vergleichsweise stabil, da die Routenführungen fix sind. Andererseits weist sie auch zwei bedeutende Nachteile auf. Erstens müssen die Routenführungen zuerst mit einer Verkehrsumlegung (z.B. VISUM, TransCAD) berechnet werden und zweitens kann der Verkehr sich nicht weiter anpassen. Andere MFD-Studien wenden auch statische Methoden an, erlauben den Verkehrsteilnehmern jedoch, die Routen an jeder Kreuzung gemäss der in Echtzeit gemessenen Fahrzeit zu ändern (vgl. one-shot assignment-simulation (Chiu et al., 2011)). Saberi et al. (2014) verwenden diese Methode in DYNASMART-P, um MFD von urbanen Netzen (z.B. Chicago, Salt Lake City, Long Island) mit verschiedenen Anteilen von Fahrern, die ihre Routen anpassen können, zu untersuchen. Diese Routenführung verteilt den Verkehrsstau gleichmässiger und stellt eine grosse Verbesserung gegenüber Simulationen mit festen Routenführungen dar. Es gibt jedoch keinen Lernprozess, und die Optionen für eine neue Route sind begrenzt, wenn der Fahrer unterwegs ist. Somit könnte das Verkehrsverhalten weit entfernt von der Realität sein. Ortigosa et al. (2015) erzeugten MFD mit dem Mikrosimulationsmodell VISSIM, welches eine dynamische Verkehrsumlegung anwendet. Der Hauptvorteil dieser Methode ist, dass sie eine Verkehrsumlegung produziert und der Verkehr sich dem Stau anpasst, ohne dass unrealistische Routen gewählt werden. Diese Vorteile haben jedoch

ihren Preis. Das Modell ist deutlich rechenintensiver und das Verkehrsgleichgewicht erreicht nicht dieselbe Qualität wie bei einer simulierten Verkehrsumlegung. In diesem Projekt wird VISSIM 5.4 mit fixen Verkehrsumlegungen aus einem VISUM-Modell verwendet. Die Variabilität in der Nachfrage und der Routenführung, die auch Stausituationen berücksichtigt, ist über die Verwendung einer Nachfragemodellierung mit MATSim und die anschließende Übergabe der Resultate an VISSIM implementiert (siehe Abschnitt 3.4).

Ein anderer Aspekt, der in Betracht gezogen werden muss, ist, wie die Mikrosimulationssoftware die Verkehrsinformationen der verschiedenen Kanten erfasst. Im vorliegenden Fall wird die Auswertungsfunktion von VISSIM verwendet, welche die Verkehrsflüsse und -dichten entlang einer spezifischen Kante berücksichtigt. Andere Simulationspakete können möglicherweise Verkehrszählungen verwenden (d.h. der Verkehr wird an einem spezifischen Punkt gemessen). Ist dies der Fall, könnte die genaue Lage des Detektors entlang einer Kante einen wichtigen Faktor darstellen und die Form des MFD beeinflussen (Leclercq et al., 2013). Ist der Detektor beispielsweise in der Nähe eines Lichtsignals platziert, wird er mehr von Stau beeinflusst, als ein Detektor, der stromaufwärts platziert ist. Diese beeinflussten Fälle sollten vermieden werden.

3.1.4 Evaluation der MFD Genauigkeit

In der Realität sind häufig nicht alle Daten vorhanden, um ein vollständiges MFD zu kreieren. Einerseits sind nicht alle Kanten in einem Netz überwacht, andererseits können die übermittelten Daten fehlerhaft sein. Ein aus unvollständigen Daten erhaltenes MFD wird unvollständiges MFD (uMFD) genannt.

In diesem Abschnitt wird evaluiert, wie genau ein uMFD ist, das aus den Daten von nur u Kanten erstellt wurde, im Vergleich mit einem vollständigen MFD. Absolute Werte sind nicht besonders relevant für die Implementierung von realistischen makroskopischen Kontrollstrategien (z.B. Zufahrtskontrolle). Ein einfacher Ansatz wurde von Gayah und Dixit (2013) sowie von Nagle und Gayah (2014) verwendet. Diese Publikationen verwenden die relativen Fehler der Verkehrsfluss- und Verkehrsdichteschätzungen. Allerdings kann deren Gebrauch dazu führen, dass für eigentlich unterschiedliche Verkehrsverhalten Fehler unterschätzt werden. Aufgrund von Inhomogenitäten im Verkehrsfluss kann beispielsweise die Zeit bis zum Auftreten von Stau unterschiedlich sein, obwohl der relative Fehler der Verkehrsfluss- und Verkehrsdichteschätzungen gering ist. Daher könnte ein Überwachungssystem für die Einfahrtskontrolle sehr ungenau oder sogar unbrauchbar werden, wenn es nur absolute Werte betrachtet. Unser Vorschlag ist es, dies anhand von Verhältnissen bezüglich der kritischen Dichte der MFD zu tun. Das Verhältnis zwischen der Dichte in einem bestimmten Zeitintervall und der kritischen Dichte zeigt, wie nahe oder wie weit weg das System vom Stauzustand ist. Gemäss dieser Methodik präsentiert ein 100% genaues uMFD für jedes Zeitintervall exakt dieselben Dichteverhältnisse, wie das vollständige MFD. Es wird das Konzept von *reservoirs' simile* angewendet, das von Daganzo (2007) entwickelt wurde. Dabei wird evaluiert, wie voll (in %) jedes Reservoir zu jedem Zeitintervall ist. Diese Genauigkeitsmessmethode weist jedoch auch Nachteile auf. So resultiert kein genauer Wert für die Anzahl Fahrzeuge, die in ein Gebiet einfahren oder aus einem Gebiet ausfahren können, da diese Methode nur die Verkehrsdichte berücksichtigt. Anders gesagt: Es ist nicht realistisch, die Anzahl Fahrzeuge, die in ein Gebiet einfahren oder aus einem Gebiet ausfahren, aus einem 100% genauen uMFD zu extrapolieren.

Im Folgenden wird unser Vorschlag detaillierter beschrieben. Ein Punkt in einem MFD, a , hat die Dichte k_a . Das MFD hat die kritische Dichte k_{cr} , bei welcher der gemittelte Verkehrsfluss im Netz maximal wird. k_j steht für die sogenannte Staudichte, bei welcher das gesamte Netz völlig gestaut ist. Wir definieren das staufreie Dichteverhältnis, R_{un} (wenn $k_a < k_{cr}$), und das Dichteverhältnis im Staufall, R_{con} (wenn $k_a > k_{cr}$), wie folgt:

$$R_{un} = \frac{k_a - k_{cr}}{k_{cr}} \quad (5)$$

$$R_{con} = \frac{k_a - k_{cr}}{k_j - k_{cr}} \quad (6)$$

In einem MFD wird k_{cr} als der Durchschnitt der Dichten berechnet, die den maximalen Verkehrsflüssen entsprechen (höchste 1% der Werte). k_j wird als der Durchschnitt der maximalen Dichtewerte (höchste 1% der Werte) berechnet. Nun werden das vollständige MFD mit dem uMFD verglichen. Für dasselbe Zeitintervall, t , wird auf beiden Diagrammen ein Dichtepunkt generiert: k_t auf dem MFD und k'_t auf dem uMFD. Die Dichten k_{cr} und k'_{cr} werden als die kritischen Dichten und k_j und k'_j als die Staudichten des MFD respektive des uMFD betrachtet. Dann ist der Fehler in den Dichteverhältnissen für das Zeitintervall t :

$$\Delta R_t(MFD, uMFD) = \begin{cases} \frac{k_t - k_{cr}}{k_{cr}} - \frac{k'_t - k'_{cr}}{k'_{cr}} & \text{falls } k_t < k_{cr} \\ \frac{k_t - k_{cr}}{k_j - k_{cr}} - \frac{k'_t - k'_{cr}}{k'_j - k'_{cr}} & \text{falls } k_t > k_{cr} \end{cases} \quad (7)$$

Der Wert, der festlegt, welches Dichteverhältnis (mit und ohne Stau) zu verwenden ist, bezieht sich auf die Dichte des vollständigen MFD und nicht jene des unvollständigen MFD. Schliesslich können wir die absoluten Fehler für alle Zeitintervalle mitteln und erhalten den durchschnittlichen Dichtefehler zwischen den zwei MFD.

$$\overline{\Delta R}(MFD, uMFD) = \frac{1}{m_t} \sum_t |\Delta R_t(MFD, uMFD)| \quad (8)$$

Wobei m_t die Anzahl der Zeitintervalle ist (m_t muss für das MFD und das uMFD identisch sein). Dasselbe Konzept von Verhältnissen könnte auch auf Verkehrsflüsse bezogen werden. Jedoch ist der Fehler der Verkehrsflüsse in allen getesteten Szenarien immer kleiner als der Fehler der Dichten. Es kommt hinzu, dass Werte der Verkehrsflüsse (und somit auch deren Verhältnisse) zwei Verkehrszustände repräsentieren können (mit und ohne Stau). Die Dichtewerte repräsentieren dagegen einen eindeutigen Verkehrszustand. Aus diesem Grund wird im Rest dieser Arbeit nur auf den Fehler zwischen den Dichteverhältnissen eingegangen.

3.2 Das dreidimensionale MFD

Wird der ÖV als dritte Dimension des MFD eingeführt, ist es einfacher Verkehrsmanagementstrategien für multimodale Verkehrssysteme zu entwickeln, z.B. Busbevorzugungen oder die Zuteilung des städtischen Strassenraumes. Geroliminis et al. (2014) zeigt in einer Studie mit simulierten Daten, dass die Innenstadt von San Francisco ein solches stadtweites, dreidimensionales MFD (3D-MFD) aufweist. Die Dichte an Autos und Bussen wird mit den Verkehrsflüssen bei moderater Streuung und unter verschiedenen bi-modalen Nachfragen in Bezug gebracht. Wir bezeichnen mit n_c die Akkumulation an Autos und mit n_b die Akkumulation an Bussen in einem spezifischen Zeitintervall. Q_m ist die total zirkulierende Verkehrsmenge in einem Netz für die verschiedenen Modi, $m \in \{b, c\}$, wobei b für Bus und c für Autos stehen. Q beschreibt die totale Verkehrsmenge im Netz (in Fahrzeugen pro Zeiteinheit) und stellt die Summe der zirkulierenden Verkehrsmenge von Autos und Bussen dar. Die Verkehrsmenge Q im bimodalen Netz ist abhängig von n_c und n_b (das Zeitintervall t wurde einfachheitshalber weggelassen):

$$Q = Q(n_c, n_b) = Q_c(n_c, n_b) + Q_b(n_c, n_b) \quad (9)$$

Das 3D-MFD kann aus historischen Daten ermittelt werden. Die Abbildung 1 zeigt das 3D-MFD für bi-modalen Verkehr in San Francisco, $Q(n_c, n_b)$. Es ist ersichtlich, dass die bi-modale Verkehrsleistung von der Akkumulation von Bussen und Autos abhängig ist. Um die Abbildung besser zu verstehen, zeigt Abbildung 1 b) das Konturdiagramm des

3D-MFD. Das in Abbildung 1 b) eingezeichnete Dreieck zeigt (n_c, n_b) -Paare, bei denen das Netz nahe der maximalen Leistungsfähigkeit des 3D-MFD ist (die Werte entsprechen 80% der maximalen Verkehrsmenge). Das eingezeichnete Dreieck zeigt somit das optimale Betriebsregime des bi-modalen Verkehrs. Das städtische Verkehrsmanagement könnte versuchen, Managementstrategien zu entwickeln, die es ermöglichen im optimalen Bereich zu operieren. Es ist erkennbar, dass die Verkehrsmenge Q monoton abnimmt, wenn n_c und n_b zunehmen, obschon sie unterschiedliche Steigungen aufweisen. Es ist bemerkenswert, dass die Steigung der Busse grösser ist, als diejenige der Autos. Dies zeigt, dass die Auswirkung eines zusätzlichen Busses auf das Netz sich deutlich von einem zusätzlichen Auto unterscheidet. Eine einfache Erklärung hierfür ist, dass Busse zusätzlich zu den Halten bei Lichtsignalanlagen auch an Haltestellen halten müssen. Dies beeinflusst den Verkehr negativ und kreiert Stop-and-Go-Phänomene.

Abbildung 1 zeigt zusätzlich auch die kritische Akkumulation von Autos \tilde{n}_c (gestrichelte Linie im Dreieck). Dort erreicht Q das Maximum für verschiedene Werte von n_b . Die Steigung der gestrichelten Linie zeigt, dass die Kapazität der Autos beeinträchtigt wird, wenn mehr Busse im System erlaubt werden (ungefähr $\tilde{n}_c \cong 3500 - 0.5n_b$). Das 3D-MFD kann somit von Entscheidungsträgern verwendet werden, um den Zielkonflikt zwischen Bussen und Autos zu analysieren und nachhaltigere Städte zu gestalten.

Der maximale Wert für die Verkehrsmenge im Netz wird, wegen der Auswirkungen von Busshalten, bei $n_b = 0$ und $n_c = 3500$ erreicht. Wenn man vernachlässigt, dass Busse mehr Passagiere transportieren als Autos, wird das System in diesem Punkt optimal betrieben. Im nächsten Unterkapitel wird jedoch gezeigt, dass ein komplett anderes Resultat erreicht wird, wenn die Passagierzahlen von Autos und Bussen mitberücksichtigt werden.

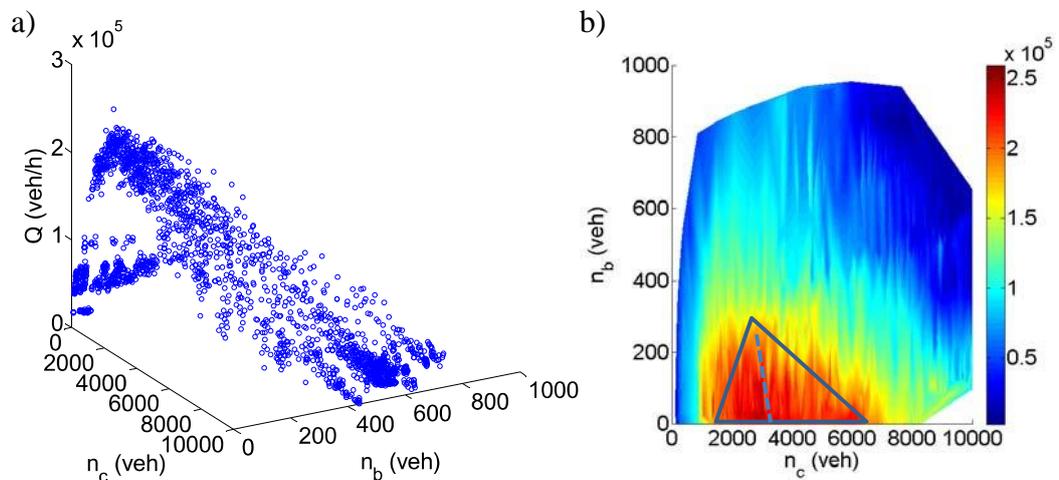


Abb. 1. 3D-MFD für Strassenfahrzeuge (Autos und Busse). a) 3D-MFD für bi-modalen Verkehr und b) Konturdiagramm des 3D-MFD nach der Interpolation mit der Delaunay-Triangulation. Die Farben repräsentieren die Werte der Verkehrsflüsse Q (Fz/h).

3.3 Das 3D-Passagier-MFD

Um den optimalen Betriebsbereich zu erreichen, kann bei einem gegebenen 3D-MFD der ins Netz einfallende Verkehr an der Netzgrenze kontrolliert werden. Es existieren Methoden für solche Zugangskontrollen, die nur Autos berücksichtigen (z.B. Keyvan-Ekbatani et al. (2012), Geroliminis et al. (2012), Haddad and Geroliminis (2012), Aboudolas and Geroliminis (2013)). Diese Strategien können jedoch nicht berücksichtigen, dass Busse der deutlich effizientere Modus sind, da sie mehr Fahrgäste als Autos befördern können. Somit begrenzen diese Strategien die Anzahl Busse übermässig, die in das kontrollierte Gebiet einfallen. Bevor Verkehrsmanagementstrategien für bi-modale Systeme mit Busbevorzugungen entwickelt werden, soll die

Dynamik von Passagierflüssen untersucht werden. Das ist die Motivation für die Herleitung eines dreidimensionalen Passagier-MFD (3D-pMFD). P repräsentiert den Passagierfluss in einem bi-modalen Netz mit n_c und n_b . Wir interessieren uns für das Verhalten $P = P(n_c, n_b)$. h_m bezeichnet die durchschnittliche Anzahl Passagiere in einem Fahrzeug, wobei $m \in \{b, c\}$. Wir nehmen an, dass die Anzahl Passagiere $h_c = 1.3$ und konstant ist. Die Anzahl Passagiere in einem Bus h_b ist eine Funktion der Haltezeit und kann aus historischen Daten erhalten werden. Danach kann der totale Passagierfluss folgendermassen ausgedrückt werden:

$$P(n_c, n_b) = h_c Q_c(n_c, n_b) + h_b Q_b(n_c, n_b) \quad (10)$$

Ein solches Verhalten wurde von Geroliminis et al. (2014) untersucht. Abbildung 2 zeigt das 3D-pMFD, das die Akkumulation von Autos und Bussen in Beziehung zum Passagierfluss bringt. Abbildung 2 b) stellt das resultierende Konturdiagramm von P in der (n_c, n_b) -Ebene dar. Das Polygon in diesem Diagramm zeigt das optimale Betriebsregime des Passagierflusses bei bi-modalem Verkehr. Es zeigt sich, dass die Form und Lage dieser Region signifikant unterschiedlich ist von der in Abbildung 1 b) gezeigten. Genauer gesagt heisst dies, dass für ein gegebenes n_c der Passagierfluss P zuerst monoton steigt, wenn n_b steigt. Nach dem Erreichen eines kritischen \tilde{n}_b nimmt P im Bereich $n_b > \tilde{n}_b$ ab. Somit kann die Effizienz eines Netzes signifikant gesteigert werden, wenn Busse verkehren. Verkehren jedoch zu viele Busse im Netz, treten Verspätungen auf und der totale Personenfluss wird reduziert. Abbildung 2 zeigt auch, dass \tilde{n}_c (steigende, gestrichelte Linie im Polygon) eine klar abnehmende Tendenz hat, wenn n_b steigt ($\tilde{n}_c \cong 3500 - 6n_b$). Die Steigung dieser Linie zeigt, dass nur schon eine kleine Erhöhung der Busse eine grosse Reduktion von Autos erlaubt, um den gleichen Personenfluss zu erhalten. Der maximale Personenfluss des Netzes tritt jetzt bei (2800, 120) auf. Wir erwarten, dass ein noch höherer Personenfluss erreicht werden kann, wenn spezielle Busspuren geschaffen werden.

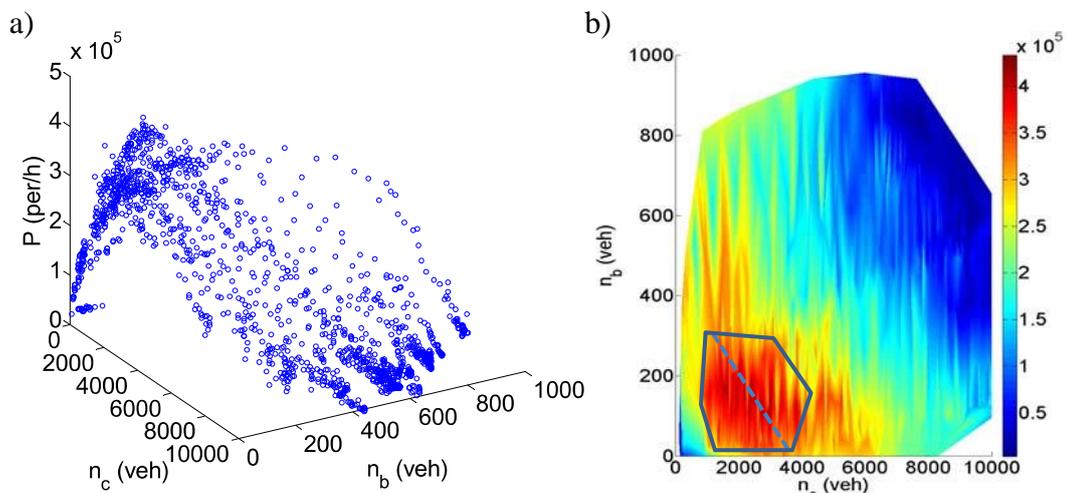


Abb. 2. 3D-pMFD inkl. Passagierflüsse. a) Das 3D-pMFD für bi-modalen Passagierfluss und b) Konturdiagramm des 3D-pMFD, die Farben entsprechen unterschiedlichen Werten von P (Passagiere/h).

3.4 Variable Nachfragemodellierung

Zur Berechnung von MFD werden verschiedenste Verkehrssituationen benötigt, von ungehindertem Fluss bis zu extremen Stausituationen. Für dieses Projekt werden die benötigten Daten aus Verkehrssimulationen gezogen. Es stehen dafür einerseits ein VISSIM-Modell der Zürcher Innenstadt (2.6km²) für die Verkehrssimulation sowie andererseits ein MATSim Modell der Grosse region Zürich (30km-Radius um das Bellevue) für die Nachfragemodellierung zur Verfügung. Im Folgenden wird beschrieben, wie die beiden Modelle verbunden werden, um verschiedenste Verkehrssituationen für

unterschiedliche Randbedingungen (v.a. unterschiedliche ÖV-Betriebsregime) in der Züricher Innenstadt im Modell zu erzeugen.

3.4.1 Simulationsmodelle

Die Modellierung von urbanem Verkehr mit Fokus auf die Interaktion und Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen Verkehrsmodi ist komplex und stellt vielseitige Anforderungen an das Modell. Der Verkehr soll einerseits so detailliert modelliert werden, dass die Interaktionen zwischen den verschiedenen Modi auf der Strasse, bspw. auf Kreuzungen und beim Spurwechsel, abgebildet werden kann. Gleichzeitig interagieren und konkurrenzieren die verschiedenen Modi aber auch auf der Nachfrageseite. Es muss also auch eine dynamische, von den verschiedenen Angeboten und von den daraus resultierenden Verkehrssituationen abhängige Verkehrsnachfragemodellierung erfolgen.

Verschiedene Modelle stehen zur Simulation von Verkehr zur Verfügung. Alle Modelle unterliegen aber der grundsätzlichen Abhängigkeit zwischen Modellaufwand und Rechenbedarf. Je detaillierter und aufwändiger ein Modell ist, desto höher ist auch der Rechenbedarf. Da die Rechenkapazität aber begrenzt ist, müssen sich die Modelle auf verschiedene Anwendungsfälle spezialisieren. Das bedeutet, dass falls in einem Modellaspekt mehr Aufwand betrieben wird, zwangsweise in anderen Aspekten abstrahiert und vereinfacht werden muss. Aus dieser Überlegung haben sich verschiedene Modellkategorien entwickelt.

- Makroskopische Modelle, bspw. VISUM¹, ermöglichen eine grossflächige Verkehrsanalyse über längere Zeiträume. Dafür wird der Verkehr nur sehr abstrahiert modelliert, d.h. man betrachtet nicht mehr einzelne Fahrzeuge, sondern nur noch aggregierte Flüsse zwischen Zonen.
- Mikroskopische Modelle, bspw. VISSIM², fokussieren dagegen auf die möglichst genaue Abbildung des tatsächlichen Verkehrsgeschehens, inkl. Unterscheidung einzelner Fahrzeuge und der Modellierung von Spurwechseln und Kreuzungsdynamiken. Studien müssen dafür auf einzelne, vergleichsweise kleine Gebiete beschränkt bleiben (bspw. einzelne Kreuzungen oder Stadtzentren).
- Agentenbasierte Modelle, bspw. MATSim³, erlauben die Verfolgung einzelner Verkehrsteilnehmer über längere Zeiträume und grössere Gebiete. Sie ermöglichen also eine sehr detaillierte Nachfragemodellierung. Dafür erfolgt die eigentliche Verkehrsmodellierung auf einem Abstrahierungsgrad zwischen makroskopisch und mikroskopisch.

Wegen der komplexen Anforderungen der Simulation von intermodalen Konkurrenzsituationen und den Interaktionen, welche eingangs des Abschnitts besprochen wurden, und wegen den Eigenschaften der verschiedenen Verkehrsmodellierungsansätze, macht es Sinn, für NetCap ein agentenbasiertes Modell für die dynamische Nachfragemodellierung mit einem mikroskopischen Verkehrsmodell für die Verkehrssimulation zu kombinieren. Die Wahl der Nachfragemodellierung fiel auf MATSim, jene für das Verkehrsmodell auf VISSIM. VISSIM ist in Europa sowohl in der Forschung als auch in der Praxis der Standard für die mikroskopische Verkehrsmodellierung. MATSim ist ein agentenbasiertes Verkehrsmodell, das die Nachfrage mittels eines Aktivitätenmodells erzeugt. Agentenbasiert bedeutet, dass einzelne Verkehrsteilnehmer individuell simuliert werden und dadurch identifizier- und verfolgbar werden. Der makroskopische Verkehr ergibt sich dann aus der Summe der einzelnen Verkehrsaktivitäten der verschiedenen Agenten. Der Ansatz des Aktivitätenmodells bedeutet, dass man von der Grundidee ausgeht, dass Verkehr das Resultat von Aktivitätsbedürfnissen ist, welche an verschiedenen geographischen Orten befriedigt werden. Das bedeutet nichts anderes,

¹ VISUM: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/de/products/ptv-visum/>, Zugriff 02.06.2015.

² VISSIM: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/de/products/ptv-vissim/>, Zugriff 02.06.2015.

³ MATSim: <http://www.matsim.org/>, Zugriff 02.06.2015.

als dass man bspw. an einem anderen Ort wohnt, als man arbeitet und deshalb Verkehr erzeugt, wenn man am Morgen arbeiten geht. Wenn man die geographische Verteilung der verschiedenen Aktivitäten mit Modellen der Aktivitätennachfrage und mit dem Verkehrsangebot verbindet, resultiert daraus eine systemabhängige, detaillierte Verkehrsnachfrage. MATSim ist in diesem Bereich, zumindest im deutschsprachigen Raum, das aktuell führende Modell und war deshalb naheliegend als Nachfragemodell. Im Anhang I wird die Verknüpfung von MATSim und VISSIM detailliert dargelegt.

4 Resultate

Im Folgenden werden die Resultate präsentiert, welche durch Anwendung der oben eingeführten Techniken und Methoden für die beiden konkreten Fälle Zürich und San Francisco erhalten wurden. Die Verkehrssimulation für Zürich wurde dabei mit VISSIM durchgeführt, für San Francisco mit Aimsun. Es werden die verschiedenen unimodalen und multimodalen MFD präsentiert, die daraus berechnet werden konnten. Ebenfalls werden erste Betrachtungen zum Einfluss von Fussgängern und Velofahrern auf die MFD präsentiert. Abgeschlossen wird der Abschnitt durch die Resultate, die durch die Verbindung von MATSim mit VISSIM für Zürich erhalten werden konnten.

4.1 Das MFD der Zürcher Innenstadt

4.1.1 Vollständiges MFD

Die Datengrundlage für das vollständige MFD für Zürich bilden die Resultate einer VISSIM-Verkehrsmikrosimulation, die die Zürcher Innenstadt (ca. 2.6km²) abbildet. Die Auswertung der Resultate wird dabei so vorgenommen, dass sie weitmöglichst der realen Datenerhebung entspricht, also der Messung von Verkehrsflüssen und -dichten in den Strassen von Zürich. Das verwendete VISSIM-Modell beinhaltet mehrere Transportmodi. Für unsere Zwecke beachten wir nur Autos, Lastwagen und Busse. Trams werden von diesen Betrachtungen ausgeschlossen, da sie auf eigenem Trasse verkehren und somit meistens vom restlichen Verkehr getrennt sind. Die Nachfrage entspricht der 17-18 Uhr Nachmittagsspitze eines Arbeitstages. Im VISSIM-Modell ist das effektive Lichtsignalprogramm der Stadt Zürich implementiert, inklusive der Priorisierung des öffentlichen Verkehrs. Dieses Modell wurde in früheren Arbeiten mittels Verkehrsflüssen kalibriert, die durch Fahrzeugzählungen erhalten wurden (Heimgartner, 2012; Menendez und Ge, 2012; Ge and Menendez, 2012; Ge and Menendez, 2013; Ge and Menendez, 2014). Im Projekt NetCap werden nur die Kanten berücksichtigt, welche im kalibrierten Modell tatsächlich einen Fluss aufweisen – nicht genutzte Kanten wurden aus dem Modell entfernt. Falls eine Strecke aus mehreren Kanten zusammengesetzt ist, werden diese als eine gruppiert, sofern keine Nachfrage-Quelle oder -Ziel auf der Strecke vorliegt (liegt dies vor, werden zwei Kanten gezählt). Jede Kante repräsentiert nur eine Bewegungsrichtung. Das bedeutet, dass bidirektionale Strassen aus zwei Kanten bestehen. Es werden also total 461 Kanten in Betracht gezogen. Um das MFD zu erzeugen, müssen viele verschiedene Verkehrszustände bekannt sein. Daher werden für dieses Projekt die Anzahl Fahrten variiert, wobei QZ-Beziehungen unverändert bleiben. Es werden 25 Faktoren zwischen 0.1 und 2.5 verwendet. Für jede Nachfrage wird eine randomisierte, der Stochastik unterliegenden, Simulation durchgeführt, um verschiedene Fälle abdecken zu können. Insgesamt werden 125 einstündige Simulationen durchgeführt. Wir sind uns bewusst, dass diese Art der Skalierung starken Einschränkungen unterliegt, da die Routenwahlen unverändert bleiben (siehe Abschnitt 3.1.3). Die Autofahrer sind nicht anpassungsfähig und ändern ihre Route nicht als Antwort auf Stau. Die Auswirkung dieser Annahme (die bisher oft in solchen Simulationen getroffen wurde) kann in Daganzo et al. (2011) gefunden werden und ist in Abbildung 3 illustriert. Als Teil dieses Projektes wurde eine Methodik entwickelt, um mit dieser Einschränkung umzugehen (siehe Abschnitt 3.4). So wird in späteren Untersuchungen im Projekt die Nachfrage zuerst für verschiedene, veränderte Bedingungen mit der agentenbasierten Verkehrssimulation MATSim simuliert und dann erst auf VISSIM übertragen (siehe Abschnitt 4.4).

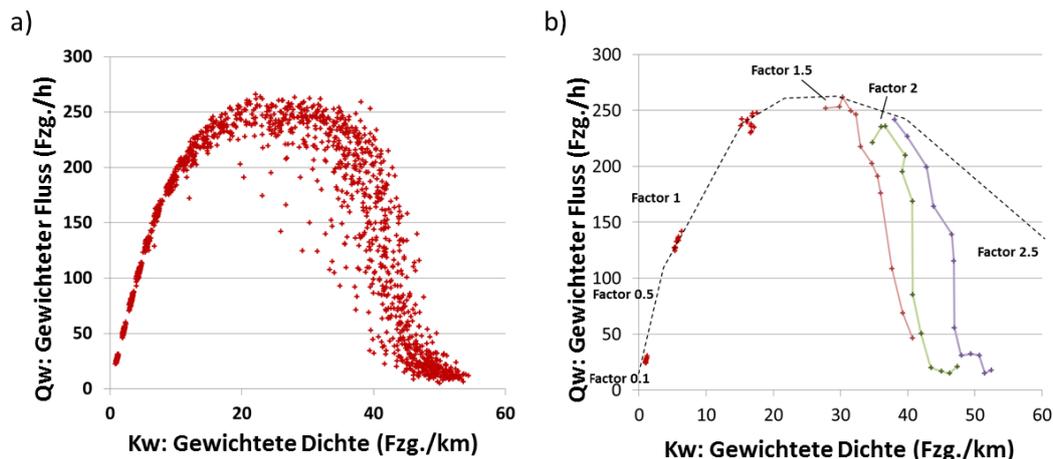


Abb. 3. MFD der Innenstadt Zürich. a) Komplettes makroskopisches Fundamentaldiagramm für die Innenstadt der Stadt Zürich. b) MFD mit nur einem Anfangswert für den Zufallsgenerator und sechs Nachfragen.

4.1.2 Mit Kantenwahlstrategien konstruiertes MFD

Die Suche nach den quasi-optimalen Kombinationen von u Kanten, um das uMFD zu generieren, ist nur möglich, wenn die vollständige Verkehrsinformation (Verkehrsrflüsse und -dichten für alle Kanten) im Voraus bekannt ist. Es sei hier angemerkt, dass es bedeutend schwieriger ist, die optimale Kombination von u Kanten zu finden (im Gegensatz zur quasi-optimalen). Dafür müssten alle existierenden Kombinationen von u Kanten durchgerechnet werden, was rechentechnisch praktisch unmöglich ist. Deshalb wird in dieser Arbeit eine quasi-optimale kombinatorische Suche mittels der metaheuristischen Tabu-Suche angewendet (Glover, 1990).

Dies ist jedoch keine durchführbare Möglichkeit, da die meisten Städte nur eine limitierte Menge an Verkehrsinformationen zur Verfügung haben. Daher werden hier einige Kantenwahlstrategien untersucht (Auswahl der u Kanten basierend auf den zur Verfügung stehenden Informationen). Nachfolgend werden vier einfache Kantenwahlstrategien präsentiert, die das Grundprinzip der Platzierung von Schleifendetektoren in urbanen Gebieten befolgen. Die erste Strategie wird nur zum Vergleich untersucht, die anderen Strategien werden jedoch oft von Verkehrsingenieuren benutzt, um Schleifendetektoren effizient zu platzieren.

- Zufällige Auswahl: Die Auswahl erfolgt durch Zufall. In unserem Modell wird jeder Kante eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 zugeordnet. Die Kanten mit den u grössten Werten werden ausgewählt. Diese Strategie wird als Basis für den Vergleich verwendet.
- Auswahl nach der Distanz zum Zentrum: Bei der Auswahl der Kanten werden den Kanten, die näher am Zentrum sind, grössere Bedeutung zugeordnet (eine übliche Praxis in vielen Städten). Das Konzept bezieht sich nicht nur auf das geometrische Zentrum, sondern auch auf die wichtigsten Gebiete hinsichtlich des Verkehrsaufkommens. Die euklidische Distanz zu diesem Zentrum wird berechnet und standardisiert. Die Auswahl der Kanten ist immer noch, zu einem gewissen Teil, zufällig. Die standardisierten Werte werden mit einer Zufallszahl zwischen 0 und 1 multipliziert. Die u höchsten Werte werden ausgewählt.
- Auswahl nach der Hierarchiestufe der Strasse: Bei der Auswahl der Kanten wird höherrangigen Strassen eine höhere Bedeutung zugeordnet. Als Indikator für die Hierarchie verwenden wir die Anzahl Spuren der betrachteten Strecken. Da die Anzahl Spuren entlang der Strecke ändern kann, betrachten wir die höchste Anzahl Spuren, die die Strecke aufweist. Nur Strecken mit mehr als einer Spur

werden ausgewählt. Unter diesen Strecken ist die Auswahl zufällig. Wie zuvor werden sie mit einer Zufallszahl zwischen 0 und 1 multipliziert und die u höchsten resultierenden Werte werden ausgewählt.

- Auswahl nach Lichtsignal: Die Auswahl berücksichtigt nur Kanten, die ein Lichtsignal haben, das strassenabwärts liegt. Typischerweise werden Schleifendetektoren vor Kreuzungen mit Lichtsignalisation platziert, um sie zu steuern. Daher findet man dort mit einer hohen Wahrscheinlichkeit bereits existierende Schleifendetektoren. Auch hier werden die Kanten schlussendlich zufällig ausgewählt.

Nun wird die Genauigkeit der vier Kantenwahlstrategien evaluiert. Um dies zu tun, betrachten wir verschiedene Abdeckungsgrade zwischen 5% und 40% der totalen Kanten des Netzes. Da jede Strategie eine zufällige Komponente hat, wurden alle Strategien und Abdeckungsgrade für 40 verschiedene Fälle untersucht. Für die Auswahl nach der Distanz zum Zentrum wurden zwei Orte ausgewählt, die das Zentrum definieren, einerseits der Hauptbahnhof von Zürich und andererseits die Tram- und Busstation Bellevue. Wir berechneten die Distanz zu diesen beiden Zentren und wählten die jeweils kleinere. Abbildung 4 zeigt den durchschnittlichen, den minimalen und den maximalen Fehler im Dichteverhältnis für die vier verschiedenen Auswahlen.

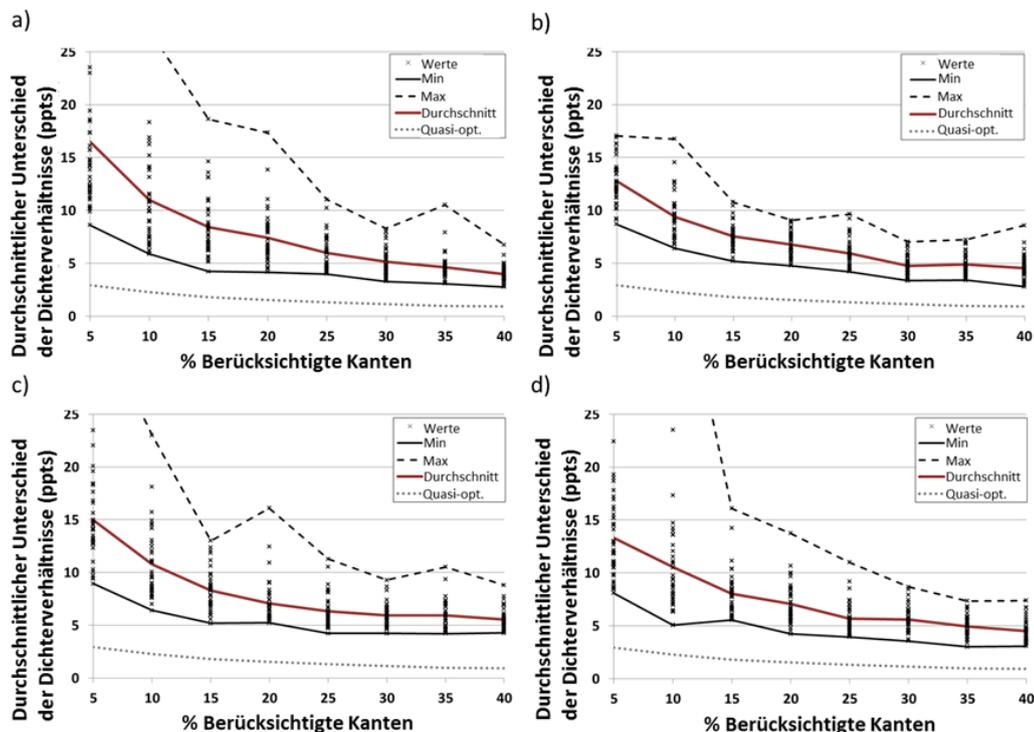


Abb. 4. MFD Genauigkeit vs. Netzabdeckung. a) Zufälliger Kantenwahl, b) Kantenwahl nach Distanz, c) Kantenwahl nach Hierarchie, d) Kantenwahl nach Lichtsignal.

Die Linie des durchschnittlichen Fehlers, die ein Durchschnitt der 40 verschiedenen Wiederholungen für jeden Abdeckungsgrad ist, ist fast immer unter 15%. Wie erwartet nehmen diese Werte bei einem zunehmenden Abdeckungsgrad ab. So beträgt der mittlere Fehler, wenn 35-40% aller Kanten in Betracht gezogen werden, etwa 5% für alle Strategien. Bei allen Strategien zeigen sich, zumindest wenn die Durchschnittslinie betrachtet wird, ähnliche Resultate. Daher ergibt sich kein Vorteil, wenn gewisse Kanten auf Grund der Distanz zum Zentrum, der Hierarchie, oder der Lage bezüglich eines Signales benachteiligt werden. Eine zufällige Auswahl ergibt ähnliche oder in einigen Fällen sogar bessere Resultate. Es ist jedoch zu bemerken, dass keines der getesteten Szenarien mit den vier Kantenwahlstrategien nahe der quasi-optimalen Lösung kam. Der

Unterschied zwischen den Kantenwahlstrategien und der quasi-optimalen Lösung wird kleiner, wenn die Abdeckung steigt. Werden die Kanten jedoch quasi-optimal ausgewählt, ist es möglich mit nur 5% Abdeckung eine ähnliche Genauigkeit wie mit 40% Abdeckung unter Anwendung einer der vier Kantenwahlstrategien zu erreichen.

Ebenfalls soll die Variabilität der Resultate der verschiedenen Strategien (d.h. die Verteilung zwischen maximalen und minimalen Fehlern) untersucht werden. Die Auswahl nach der Distanz zum Zentrum liefert konsistent die kleinsten Fehler. Dies macht Sinn, da frühere Arbeiten zeigten, dass Engpässe im Stadtzentrum auch die Kapazität von peripheren Strassen limitieren kann (Zheng et al., 2012). Dies könnte einen Grund dafür sein, dass die Kanten im Zentrum wichtiger für das MFD sind. Nichtsdestotrotz kann keine der Strategien extrem genaue Resultate liefern, da keine der Strategien die entscheidenden Kanten erfassen kann.

Wenn eine dieser Kantenwahlstrategien für die Implementierung eines MFD-Kontrollmechanismus verwendet wird, schlagen wir vor, auf Grund der limitierten Datenmenge, die man typischerweise in der Praxis zur Verfügung hat, den maximalen Fehler als oberen Grenzwert zu betrachten. Hier stellt sich heraus, dass die Auswahl nach der Distanz zum Zentrum die besten Resultate liefert. Als generelle Regel können wir feststellen, dass bei einem Abdeckungsgrad von 25% ein Fehler von unter 15% für alle vier Kantenwahlstrategien erreicht wird.

Schliesslich untersuchen wir die mögliche Variabilität in der Definition der Netzabdeckung. Bis anhin betrachteten wir Einfachheit halber einen Prozentsatz von Kanten. Werden jedoch unterschiedliche Kanten überwacht, können unterschiedliche Kilometeranteile des Netzes abgedeckt werden. Abbildung 5 zeigt die Fehler für die Kantenwahlstrategie mit beiden Grössen. Das Ergebnis ist in beiden Fällen relativ ähnlich. Wir erklären dies mit der Tatsache, dass die meisten Kanten in der Innenstadt von Zürich ähnliche Längen aufweisen. Die Kantenlänge hat somit keinen grossen Einfluss auf die resultierenden Fehler.

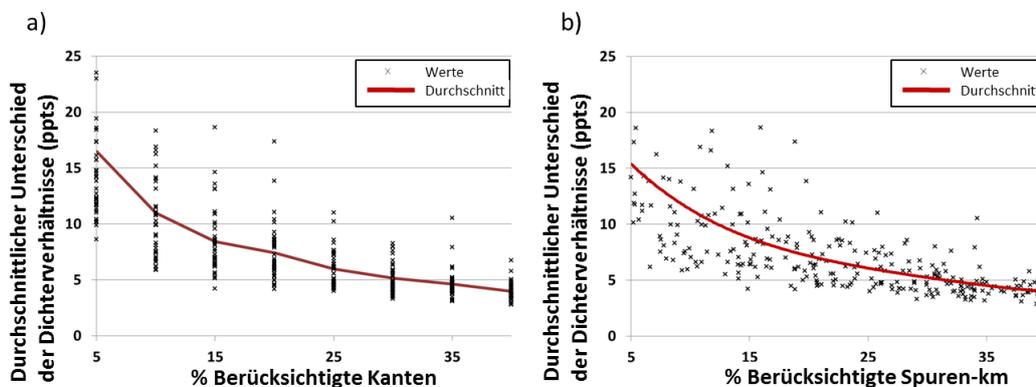


Abb. 5. Genauigkeit vs. Netzabdeckung für zufällige Kantenwahl. (a) Netzabdeckung in Prozent der Kanten und (b) Netzabdeckung in Prozent der Länge der Kanten.

Zusammengefasst:

- Unabhängig von der Kantenwahlstrategie kann man für einen minimalen Netzabdeckungsgrad von 25% einen Fehler von unter 15% zwischen den Dichteverhältnissen erwarten. Der Abdeckungsgrad und nicht die verwendete Strategie ist der bestimmende Faktor.
- Die Auswahl nach Distanz liefert nicht nur gute Resultate, sondern weist auch eine geringere Varianz auf, besonders wenn mindestens 15% der Kanten betrachtet werden.

- Die durchschnittliche Differenz der Genauigkeit, zwischen einer quasi-optimalen Auswahl und einer Auswahl nach einer der vier Kantenwahlstrategien kann 10% übersteigen. Das deutet an, dass andere mögliche Auswahlstrategien genauere MFD liefern könnten. Zurzeit werden möglicherweise bessere Strategien untersucht (Schiffmann, 2013).

4.1.3 MFD erzeugt mit den ZüriTraffic-Überwachungsressourcen

Wie in Kapitel 1 erwähnt, verwendet die Stadt Zürich aktuell einen Kontrollmechanismus als makroskopisches Betriebskonzept, um Staus zu reduzieren. Dieses basiert auf dem Informationssystem „ZüriTraffic“ und verwendet 23 Kanten (5% aller Kanten der Innenstadt, siehe Abbildung 6b)), um den Verkehr, der in die Stadt kommt und sie verlässt, zu regulieren.

Wir erzeugen ein uMFD mit diesen Kanten, um das System zu evaluieren. Abbildung 6 a) zeigt einige ausgewählte Fundamentaldiagramme für die 23 ZüriTraffic-Kanten, deren zugehörigen Daten aus einer Mikrosimulation stammen. Die vier gezeigten Kanten sind beispielhaft aus den ZüriTraffic-Kanten ausgewählt worden.

Die Genauigkeit dieser 23 Fundamentaldiagramme soll evaluiert werden. Dafür werden die Fundamentaldiagramme einzeln mit dem vollständigen MFD verglichen und deren Fehler mit der in Kapitel 3.1.4 präsentierten Methodik berechnet. Das vollständige MFD besteht aus allen Kanten der Zürcher Innenstadt. Das Ziel ist, zu evaluieren, wie gut eine einzelne Kante die Verkehrszustände der Innenstadt repräsentieren. *Tab. 1* zeigt die mittleren Fehler für zwei Szenarien: i) alle Verkehrszustände (mit und ohne Stau), und ii) nur die nicht überlasteten Verkehrszustände (ohne Stau). Wir evaluieren das zweite Szenario, weil wir oft nur daran interessiert sind, vorauszusagen, ob wir uns einem Stauzustand nähern. Die Fundamentaldiagramme für die einzelnen Kanten weisen im Staubereich eine grosse Streuung auf. Im staufreien Bereich streuen sie deutlich weniger. Für Szenario i) sind die durchschnittlichen Fehler hoch. Die Fehler für Szenario ii), also dem staufreien Bereich, sind deutlich tiefer. Allerdings werden auch in diesem Szenario noch Werte bis zu 30% erreicht. Die Kanten mit den grössten durchschnittlichen Fehlern (vgl. *Tab. 1* Kanten: 897, 922, 864) sind solche, die nie ihre Kapazität erreichen, oder Staus bilden, selbst wenn das gesamte System (das vollständige MFD) gestaut ist. Daher weist das Fundamentaldiagramm dieser Kanten nur einen kleinen, staufreien Anteil auf (siehe Fundamentaldiagramm der Kante 922 in Abbildung 6a-iv). Sie haben somit im rechten Teilbereich des MFD, einen sehr grossen Fehler. Als Folge dessen ist es möglich, dass Kontrollstrategien (z.B. Änderungen der Lichtsignale bei der Einfahrt in die Innenstadt) unter Umständen entweder zu früh oder zu spät eingesetzt werden – insbesondere, falls sie nur auf einer einzelnen Kante basieren. Eine zu frühe Zufahrtsreduktion könnte Fahrzeuge aus der Innenstadt fernhalten, obwohl dies nicht nötig ist, während eine zu späte Zufahrtsreduktion nicht mehr helfen könnte, Staus zu vermeiden.

Tab. 1 Mittlerer Fehler zwischen einzelnen ZüriTraffic-Kanten und einem vollständigen MFD

Nummer der Kante	Szenario i)	Szenario ii)	
	Totaler Durchschnittsfehler [%]	Durchschnittsfehler im	staufreien Bereich [%]
104	34.4		15.8
105	30.8		7.9
535	26.3		12.4
393	19.2		13.7
856	46.0		15.0
658	22.6		13.6
361	29.6		14.8
385	70.4		16.6

384	23.0	15.6
896	18.3	19.2
897	1043.9	17.6
567	36.0	14.0
874	37.1	22.5
922	5985.8	13.5
923	25.0	28.7
773	24.4	23.2
774	70.4	15.9
828	18.9	16.7
829	105.3	12.0
421	74.8	30.5
865	82.9	13.8
864	7233.2	20.6
262	31.1	29.2
Durchschnitt	656.1	17.5

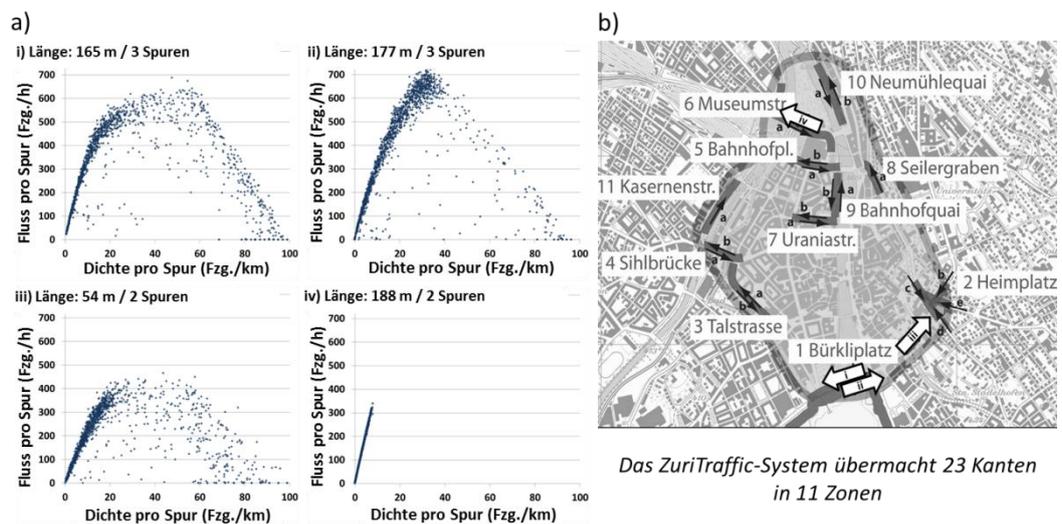


Abb. 6. ZuriTraffic. a) Individuelle Fundamentaldiagramme für vier verschiedene ZuriTraffic Kanten b) Karte der Zürcher Innenstadt und die Lage der beobachteten Kanten

Als nächster Schritt soll untersucht werden, wie repräsentativ die Messungen sind, wenn die Daten der 23 Kanten zusammen betrachtet werden. Das heisst, ein unvollständiges MFD wird auf Basis der 23 Kanten des ZuriTraffic-Netzes kreiert (5% aller Kanten des Netzes). Abbildung 7 zeigt dieses MFD₂₃ basierend auf den ZuriTraffic-Kanten und das vollständige MFD.

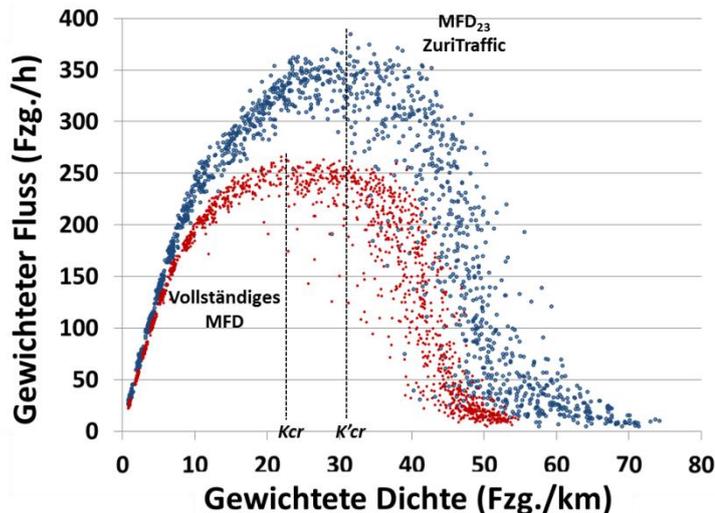


Abb. 7. Unvollständiges MFD_{23} basierend auf den ZuriTraffic-Kanten (blau) und vollständiges MFD (rot).

Mit derselben Methodik weist das MFD_{23} einen Fehler von 8.7%. Dieser Fehler ist wesentlich kleiner als diejenigen der Tab. 1, wo Kanten nur einzeln betrachtet werden. Daraus folgt, dass sich eine aggregierte Sichtweise lohnt. Weiter sieht man, dass die Abweichung zwischen dem MFD_{23} und dem vollständigen MFD im gestauten Bereich erheblich grösser sind, als jene im staufreien Bereich. Die absoluten Werte der mit ZuriTraffic generierten Verkehrsflüsse sind höher, da ZuriTraffic nur wichtigsten Kanten überwacht. Auf jenen Kanten finden wir höhere Kapazitäten und kritische Verkehrsdichten. Die grössten Fehler werden bei den höchsten Verkehrsdichten gefunden. Im ausschliesslich staufreien Bereich gemittelt, erhält man eine durchschnittliche Abweichung von 3.3%. Auch dieser Wert ist wesentlich tiefer, als die Werte, welche die einzelnen Kanten alleine erreichen, und ist nahe der quasi-optimalen Lösung. Wir sind der Überzeugung, dass ein Zusammenführen der Daten der momentan genutzten Kanten ein relativ genaues MFD liefert und somit zu einer besseren Verkehrssteuerung führen kann. Die grössten Fehler, die bei hohen Verkehrsdichten auftreten, haben wahrscheinlich keine Auswirkung auf die Kontrollstrategien, da diese quasi einen Verkehrskollaps darstellen. Ein solcher ist in einer Stadt wie Zürich unwahrscheinlich, da sich die Nachfrage vorher anpasst.

4.2 Das 3D-MFD der Zürcher Innenstadt

Im ersten Teil dieses Abschnittes analysieren wir die räumliche Konkurrenzsituation in der Innenstadt von Zürich. Wir benutzen die im vorherigen Kapitel erwähnte VISSIM-Simulation der Stadt Zürich mit einer Fläche von 2.6 km². Die Nachfrage entspricht der 17 – 18 Uhr Nachmittagsspitze eines Arbeitstages. Um das ganze MFD zu erhalten, skalieren wir die Nachfrage mit Faktoren von 0.4 bis 2.0. Dieses Modell wurde mittels Verkehrsflüsse kalibriert, die mittels Verkehrszählungen erhalten wurden (Heimgartner 2012; Menendez und Ge 2012). Das unimodale MFD für Zürich wurde mit dem Verfahren nach Ortigosa et al. (2014) berechnet.

In der Innenstadt von Zürich gibt es eine hohe Dichte an öffentlichen Transportmitteln. Trams machen einen grossen Anteil davon aus. 95% der Spuren in der Innenstadt sind unimodale Spuren, entweder für Autos (75% von allen Spuren) oder für Trams und Busse (18% von allen Spuren), und nur 5% sind für den Mischverkehr. In unserer Simulation betrachten wir 19 Linien des öffentlichen Verkehrs. Wir ziehen verschiedene Taktabstände in Betracht, um verschiedene Dichten von öffentlichen Verkehrsmitteln zu generieren. Es werden Taktabstände von 2 min, 4 min, 8 min und 16 min untersucht. Das Mikrosimulationsmodell emuliert auch das System zur Beeinflussung von Lichtsignalanlagen (Priorisierung des ÖV), das Zürich hat. Wenn die Taktfolgen des

öffentlichen Verkehrs zu kurz sind, kann das System nicht mehr mit einer solchen Menge von Fahrzeugen umgehen und einige Kreuzungen werden blockiert.

Die durchschnittlichen Verkehrsflüsse (Fzg./h/Spur) und die durchschnittlichen Verkehrsdichten (Fzg./km/Spur) werden alle 5 min für alle Kanten im Netz aufgezeichnet. Das 3D-MFD des Netzes mit separaten Spuren ist in den Abbildungen 8 a) bis c) dargestellt. In den Abbildungen 8 d) bis f) wurde dieselbe Simulation wiederholt, jedoch konnten Autos und öffentliche Verkehrsmittel auf allen Spuren verkehren. Die Routenwahl bleibt für alle Verkehrsmittel erhalten, das heisst bspw., dass Autos keine neuen Routen wählen, auch wenn sie könnten. Auf Kanten, die zuvor Autos und Busse/Trams in separaten Spuren aufwiesen, mischen sich die Verkehrsmittel nun. Es wird angenommen, dass Trams dieselben Eigenschaften wie Busse haben. Generell ist darauf hinzuweisen, dass unsere Resultate bestätigen, dass 3D-MFD in multimodalen Netzen, mit zweckgebundenen und gemischten Spuren, existieren.

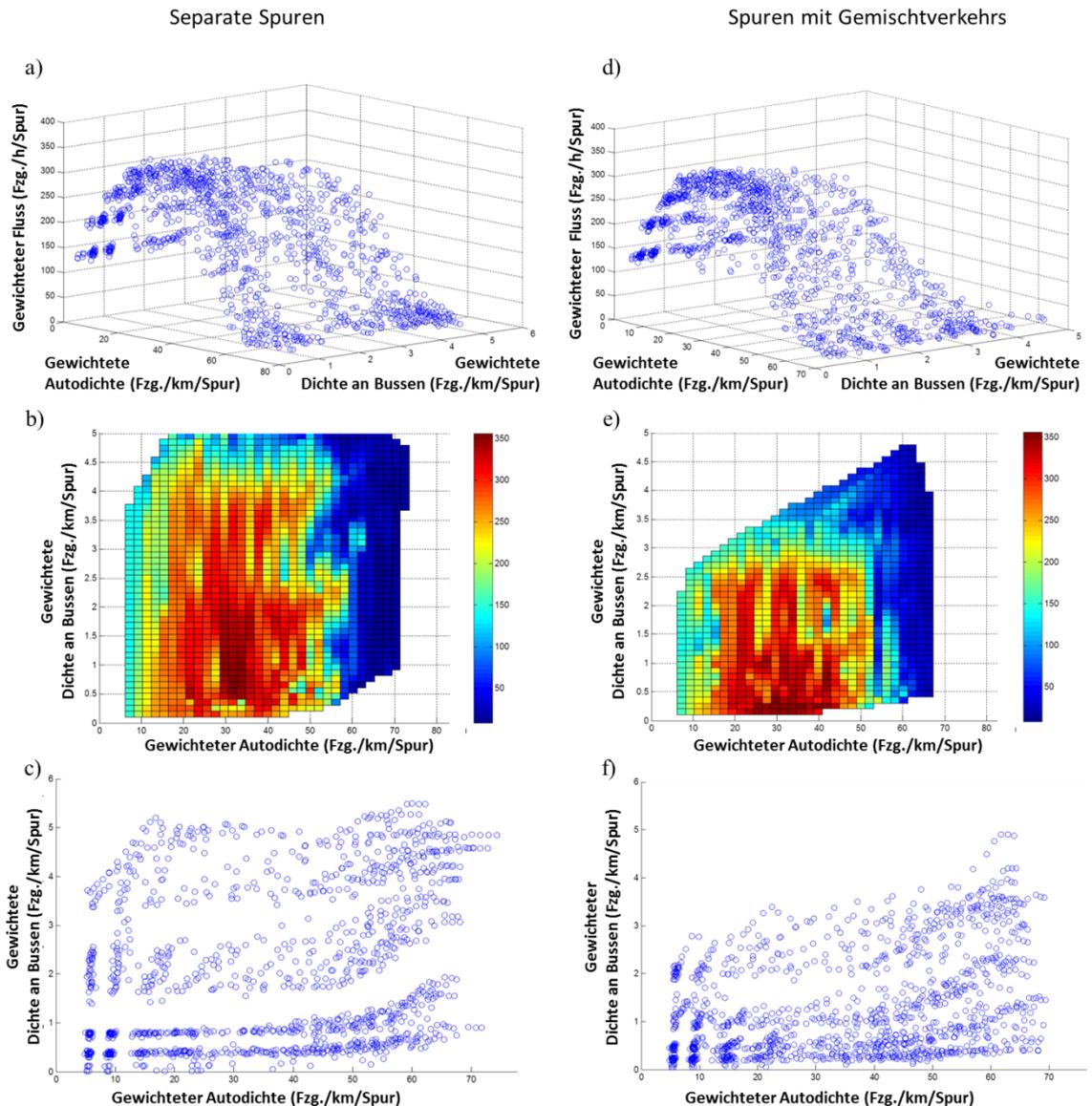


Abb. 8. 3D-MFD Repräsentationen für die Stadt Zürich. a-c) zweckgebundene Spuren, d-f) gemischte Spuren.

Bei einer genaueren Betrachtung der Resultate wird ersichtlich, dass die höchste Kapazität von zirkulierenden Fahrzeugen etwa 340-350 Fz./h/Spur entspricht. Die Abbildungen 8 a) bis c) zeigen dies für separate Spuren. Die Kapazität erreicht ein

Maximum, wenn der Takt des öffentlichen Verkehrs am tiefsten ist. Dies ergibt Verkehrsdichten zwischen 25 und 40 Fzg./km/Spur und ÖV-Dichten zwischen 0.3 und 0.8 Fzg./km/Spur. Des Weiteren stellen wir fest, dass, wenn die Dichten des ÖVs zunehmen, die Kapazität abnimmt. Beispielsweise sinkt die Kapazität auf 290 bis 310 Fzg./h/Spur bei einer ÖV-Dichte von 3.7 Fzg./km/Spur. Abbildung 8, d) bis f) stellt das 3D-MFD dar, wenn die Spuren im Mischverkehr befahren werden. Die Kapazität ist geringfügig höher als im vorhergegangenen Fall und bewegt sich zwischen 345 und 355 Fzg./h/Spur. Diese Werte werden bei leicht höheren Autodichten und tieferen ÖV-Dichten zwischen 0.2 und 0.5 Fzg./km/Spur erreicht. Wenn die Dichte des ÖVs grösser wird, wiederholt sich das gleiche Muster. Die Kapazität ist höher als in den vorhergehenden Fällen (zwischen 300 und 320 Fzg./h) und wird bei höheren Autodichten und wesentlich tieferen ÖV-Dichten (ca. 2 Fzg./km) erreicht.

Beim Vergleich der beiden Fälle ist besonders interessant, dass die Leistungsfähigkeit des Automodus höher ist, wenn alle Spuren im Mischverkehr betrieben werden, als wenn dies nicht der Fall ist. Stattdessen ist die Leistungsfähigkeit des ÖVs tiefer und tiefere ÖV Dichten zeichnen sich ab (vgl. Abbildung 8 c) und f) für ein Vergleich). Es ist jedoch zu beachten, dass diese Resultate vom System für die Beeinflussung von Lichtsignalanlagen limitiert werden. So funktionieren diese in Wirklichkeit wahrscheinlich nicht so gut, dass der ÖV Takt so hoch gehalten werden könnte.

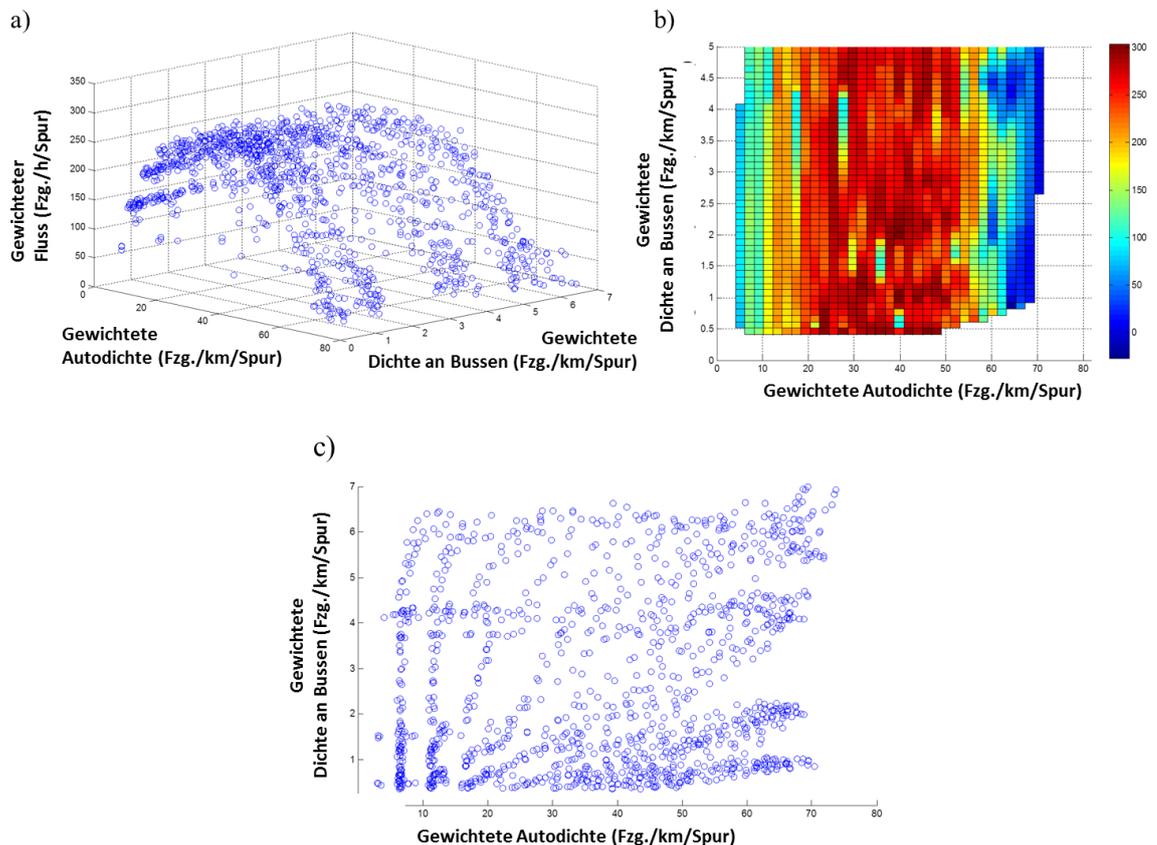


Abb. 9. 3D-MFD für die Stadt Zürich mit zweckgebundenen Spuren und ohne Buspriorisierungssystem

Im nächsten Schritt betrachten wir wie das 3D-MFD aussieht, wenn das System für die Beeinflussung von Lichtsignalanlagen nicht aktiv ist. Wir simulieren wiederum das Szenario mit zweckgebundenen Bus- und Trampuren aber wenden ein festzeitgesteuertes Signal an.

Abbildung 9 zeigt, dass sich der maximale Verkehrsfluss nicht mit einer Erhöhung der ÖV-Frequenz ändert. Die macht Sinn, da die meisten Spuren zweckgebunden sind und

die gleiche Kapazität (durch Grünsignal-Zeiteinstellung) an Kreuzungen zugesprochen wird, ungeachtet der Menge und dem Typ von Fahrzeugen. Werden die tatsächlichen Werte betrachtet, sehen wir, dass die maximale Kapazität tiefer ist, als in den Fällen die in Abbildung 8 dargestellt sind. Die erreichten Werte liegen zwischen 300 und 310 Fzg./h/Spur. Eine Erklärung dafür ist, dass ein System mit ÖV-Aufkommen ohne Priorisierung für den ÖV ineffizient ist und sich weniger gut an unterschiedliche Verkehrssituationen anpassen kann. Eine weitere mögliche Erklärung ist, dass wir eine ältere Version des Netzes verwenden, in der einige wichtige Kreuzungen (z.B. Central und Bellevue) ohne Lichtsignalregelung existieren. Normalerweise weisen solche nicht-signalisierten Kreuzungen eine tiefere Kapazität auf. Zusätzlich zeigt Abbildung 8, dass ein Netz mit separaten Spuren eine konsistentere Abwicklung des ÖVs aufweist, da die Dichtewerte des ÖVs fast konstant bleiben. Man kann das klassische 2D-MFD bei verschiedenen ÖV-Werten gut identifizieren. Diese 2D-MFD stellen die verschiedenen Taktszenari dar. In Abbildung 9 erkennt man, dass die Verkehrsdichten von beiden Modi korrelieren und sich über verschiedene Verkehrszustände ändern, aber auch eine hohe Variabilität aufweisen.

4.3 3D-MFD des Zentrums von San Francisco

Um die Beobachtungen der 3D-MFD aus der Fallstudie der Stadt Zürich zu verifizieren, untersuchen wir in diesem Abschnitt die Verkehrsleistung in einem anderen gut entwickelten und kalibrierten multimodalen urbanen Verkehrssimulationsmodell – dasjenige der Stadtmitte von San Francisco. Wir berechnen die 3D-MFD des Netzes unter Verwendung des Mikrosimulators Aimsun. Dieser Teil der Diskussion basiert auf der Arbeit von Geroliminis et al. (2014), welche die Existenz und die Eigenschaften von 3D-MFD für Mischverkehr beschrieb. Wir erweitern die Studie für den Fall, dass separate Spuren existieren. Die resultierenden 3D-MFD mit Mischverkehr sowie für separate Spuren werden präsentiert und verglichen.

Das untersuchte Gebiet ist ein 3 km² grosser Teil der Stadtmitte San Franciscos. Das Netz wird von Bussen und Autos genutzt und beinhaltet etwa 100 Kreuzungen und 430 Kanten mit total 100 Spur-Kilometern. Die Anzahl von Spuren variiert von 2 bis 5 Spuren und die Geschwindigkeit, die im staufreien Zustand erreicht wird, beträgt etwa 45 km/h. Es existieren keine Busbevorzugungssysteme. Die Bushaltestellen befinden sich meistens in den Fahrspuren, und die Busse erzeugen daher bei einem Halt Schlangen von Fahrzeugen. Der Verkehr besteht aus zwei Fahrzeugklassen: Autos und Busse. Die Buslinien und Takte der Linien im untersuchten Netz wurden von der San Francisco Municipal Transportation Agency (SFMTA) zur Verfügung gestellt. Wir simulieren den Verkehr einer 4-stündigen Morgenspitze. Die Nachfrage hat ein typisches, trapezförmiges Morgenspitzenprofil. Die Taktfrequenz der Busse variiert im selben Bereich wie in der Zürcher Fallstudie. Der Takt ausserhalb der Spitzenstunde (ca. 2h) ist zwischen 4min und 20min und der Takt während der Spitzenstunde (ca. 3h) beträgt zwischen 2min und 10min. Die durchschnittliche Haltezeit der Busse wird als normalverteilt definiert und dauert zwischen 35s und 60s.

In Abbildung 10 a) bis c) sind die resultierenden XY-Diagramme und die Konturdiagramme der 3D-MFD für eine ausgeweitete Version des San-Francisco-Netzes dargestellt. Separate Busspuren wurden in der Stadtmitte, sowie für besonders wichtige Kanten eingeführt. Für einen Vergleich reproduzieren wir dieselben Diagramme für den Mischverkehr-Fall, die in Geroliminis et al. (2014) dargestellt sind. Ähnliche Muster konnten im Fall mit den separaten Spuren sowie im Fall mit Spuren mit Mischverkehr festgestellt werden. (i) Gibt es separate Spuren, können höhere Verkehrsflüsse aufrechterhalten werden, und der Unterschied im maximalen Verkehrsfluss, wenn die Dichte von Bussen höher ist, ist nicht signifikant. (ii) Wird ein bestimmter Dichtewert für Busse fixiert, kann eine MFD-förmige Beziehung festgestellt werden. (iii) Der optimale Betrieb des Netzes wird erreicht, wenn es wenige Busse im System hat. Punkt (iii) ist, wie Geroliminis et al. (2014) zeigte, nicht länger gültig, wenn Personenflüsse, statt Fahrzeugflüsse betrachtet werden.

Besonders von Interesse im San Francisco Netz ist, dass erstens der Verkehrsfluss viel schneller abnimmt (von 250 Fzg./h/Spur zu 100 Fzg./h/Spur), als dass die Dichte von Bussen steigt (0.5 Fzg./km/Spur zu 4.5 Fzg./km/Spur steigt; vgl. Abbildung 15e). Dies weist darauf hin, dass Busse einen sensitiven Einfluss auf die gesamte Leistungsfähigkeit des Systems haben. Zweitens ist die Variation in der Komposition der Modi (d.h. das Verhältnis zwischen Bus- und Autodichten) viel kleiner als im Fall von Zürich. Dies weist auf einen zuverlässigeren Betrieb des Systems hin. Die Gründe dafür können den unterschiedlichen Signaleinstellungen, Topologien und Fahrverhalten zugeschrieben werden. Wir werden diese Ursachen in zukünftigen Arbeiten weiter untersuchen.

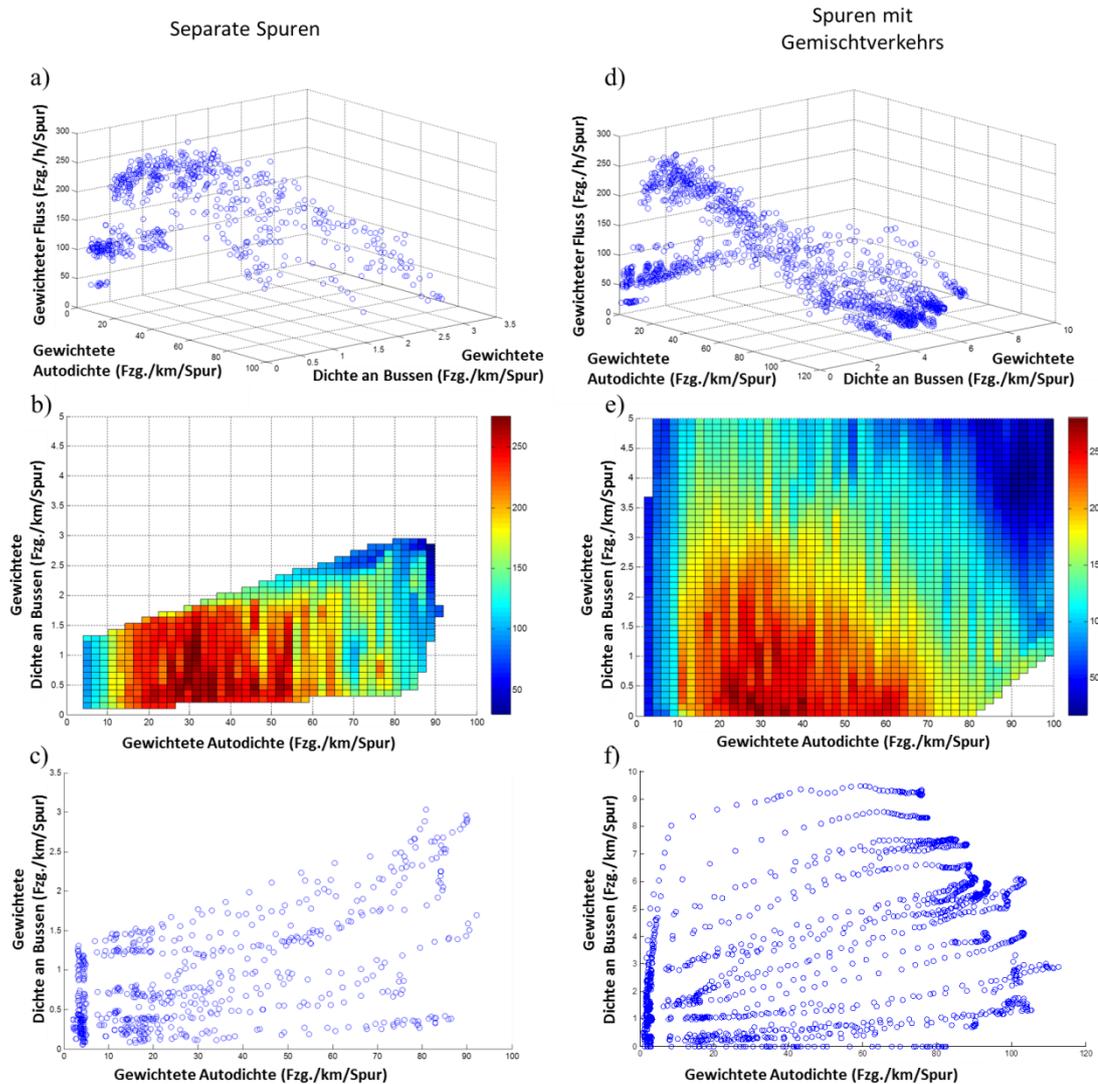


Abb. 10. 3D-MFD Repräsentationen für San Francisco. a-c) separate Spuren, d-f) Spuren mit Gemischtverkehrs (Geroliminis et al., 2014).

In den Plots der Abbildung 10c gibt es noch leere Felder, die mit den vorhandenen Daten nicht zu berechnen sind - insbesondere für den Fall mit separaten Spuren. Eine Erklärung der Unterschiede ist, dass San Francisco mehr Spuren in jeder Strasse als Zürich aufweist. In der Zürcher Innenstadt beinhalten die meisten Strassen nur eine Spur für den Autoverkehr. In San Franciscos Netz gibt es in einer Spur zusätzlich Bushaltestellen, die Autos blockieren. In Zürich kommt dies deutlich seltener vor. Trotzdem erlaubt uns das momentane 3D-MFD den Vergleich zwischen den zwei unterschiedlichen Spurzuordnungen und den zwei unterschiedlichen Netzen. Szenarien, in denen Busse einen extrem hohen Anteil am Verkehr ausmachen, sind im alltäglichen Betrieb nicht realistisch.

4.4 Das 3D-pMFD der Zürcher Innenstadt

In diesem Abschnitt generieren wir das 3D-pMFD von Zürich mit Daten aus der VISSIM-Simulation. Das 3D-pMFD wird generiert, indem die Anzahl Personen in jedem Fahrzeug in Betracht gezogen werden und der Fluss von Passagieren betrachtet wird. Allerdings werden keine Individuen modelliert. Somit ist es unmöglich zu wissen, wie sich die Anzahl von Fahrgästen von Bus zu Bus ändert und wie sich die Nachfrage in jedem Zeitintervall ändert. Wir müssen somit durchschnittliche Belegungen anwenden. Gemäss den typischen Zürcher Durchschnittswerten ist ein Tram mit 64 Fahrgästen belegt, Busse mit 29 und Autos mit 1.3. Abbildung 11 zeigt das resultierende 3D-pMFD.

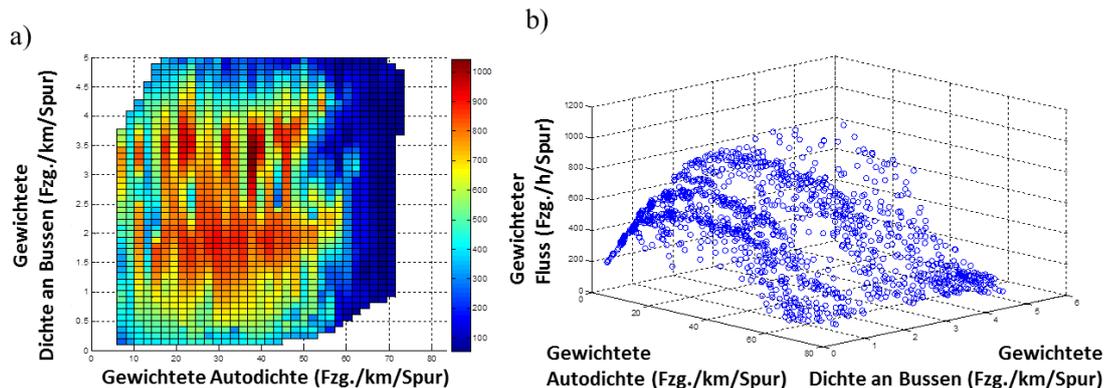


Abb. 11. 3D-pMFD für die Stadt Zürich mit zweckgebundenen Spuren und ohne Lichtsignalbevorzungen.

Dieses Resultat zeigt, dass der höchste Passagierfluss nicht beim maximalen Fluss an Fahrzeugen erreicht wird, sondern dass der Fluss an Bussen wichtiger ist. Der höchste Passagierfluss wird erreicht, wenn die Taktfolge etwa 4 Minuten ist. In Zürich sind die Takte der einzelnen Linien etwa 7-8 min. Dies zeigt, dass die Taktfolgen verringert werden könnten, um einen höheren Passagierfluss zu erreichen. Natürlich berücksichtigt das Modell nicht, welche Auswirkungen solche Takte an Kreuzungen wie Bellevue oder Central haben und es werden auch keine Ein- und Aussteigevorgänge mitberücksichtigt. Es zeigt aber, dass noch mehr Kapazität dem öffentlichen statt dem individuellen Verkehr zugesprochen werden könnte.

4.5 Einfluss von Fussgängern und Fahrrädern

Fussgänger und Fahrradfahrer spielen in Städten eine wichtige Rolle, und zukünftig könnten sie sogar noch relevanter werden. Manche Städte nehmen die Verkehrsfläche des Autoverkehrs zurück und stellen sie anderen Transportmodi zur Verfügung (Cairns, 2002; Ortigosa et al. 2014). Zusätzlich waren früher die Prioritäten und Hierarchien im städtischen Raum sehr klar und günstig für den motorisierten Transport. Dies ist jedoch heutzutage im Wandel. Fussgänger und Fahrradfahrer bekommen immer mehr Priorität in den Strassen zugesprochen und sie interagieren gleichberechtigter mit andern Fahrzeugen. Tiefere Geschwindigkeitslimiten, z.B. 30 km/h, findet man in Städten immer häufiger. Sie beeinflussen die Verkehrsflüsse nicht (Bergfreund, 2015), kreieren aber andere Interaktionen zwischen Fussgängern, Fahrradfahrern und dem motorisierten Verkehr. Städtische Shared-Space-Lösungen intensivieren diese Interaktionen noch weiter, indem Autofahrer immer für mögliche Konfliktsituationen bereit sein müssen. Städtische Umgebungen weisen immer mehr Shared-Space, Fussgängerstreifen, Fahrradspuren sowie eine grössere Präsenz von öffentlichen Verkehrsmitteln auf. Auch generieren Ein- und Aussteigevorgänge in und aus öffentlichen Verkehrsmitteln bedeutende Fussgängeraufkommen.

Es stellt sich die Frage, wie alle diese Interaktionen die intermodale Kapazität von Städten beeinflussen. Wir erwarten, dass die Präsenz von Fussgängern die intermodale

Kapazität von Städten verringert, wir wissen jedoch nicht in welchem Ausmass. Das Simulationsmodell der Stadt Zürich beinhaltet Fussgängerstreifen bei Lichtsignalanlagen und zusätzlich auch an anderen Stellen entlang von Strassen, um die Anwesenheit und die Strassenüberquerungen der Fussgänger zu simulieren. Wir kreierten zusätzlich ein Szenario, dass eine höhere Interaktion mit Fussgängern emuliert. Die Nachfrage von Fussgängern wurde bei Fussgängerstreifen, die sich an Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage befinden, erhöht. Die Resultate sind in Abbildung 12 dargestellt. Werden diese Darstellungen mit Abbildung 11 verglichen, sehen wir, dass der Einfluss der Fussgänger die Kapazität im 3D-MFD reduziert. Dies ist besonders bei einem hohen Anteil an Bussen der Fall. Die Anwesenheit von Fussgängern reduziert nicht nur die totale Kapazität, sondern macht auch das System instabiler. So treten mehr Szenarien mit Stau auf.

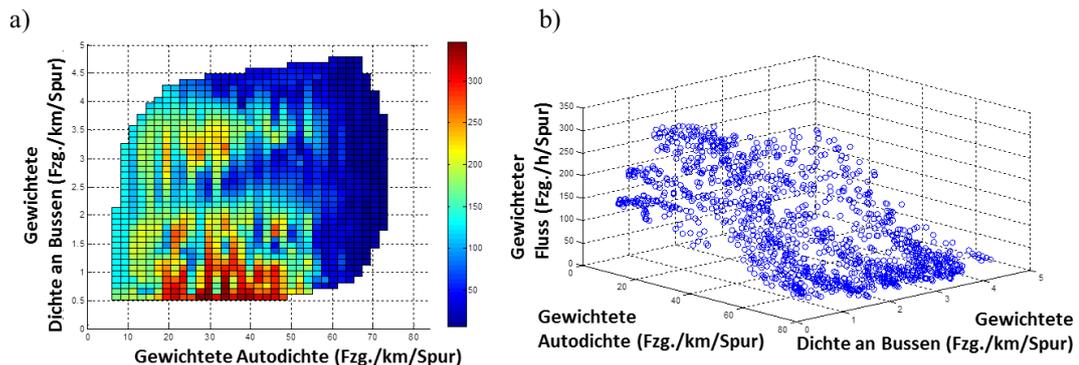


Abb. 12. 3D-MFD für die Stadt Zürich bei Berücksichtigung der Fussgänger.

Zusätzlich modifizierten wir das Netz San Franciscos, indem wir die Grünzeiten an allen Kreuzungen reduzierten. In diesem Szenario wird die Kapazität des Systems reduziert. Das System weist jedoch nicht solche Instabilitäten wie im vorausgehenden Fall auf und es gibt keine zufälligen Störungen.

4.6 Nachfrage-Variation mit MATSim

4.6.1 MATSim-Szenarien

Die Projektfragestellung in NetCap erfordert die Generierung von Verkehrsnachfragen für unterschiedliche ÖV-Angebote. Dies bedeutet vor allem, dass sich die Modi auch gegenseitig beeinflussen sollen und sich um die beschränkte Infrastrukturkapazität und die Verkehrsnachfrage konkurrenzieren sollen. Dies ist für MATSim eine spezielle Anforderung, da in bisherigen (Zürich-)Szenarien in MATSim der IV und ÖV zwar bereits um Nachfrage konkurrenzieren, aber stets getrennte Strassennetze verwendeten. Die Busse konnten in MATSim bisher also nicht im Stau stecken bleiben, die Autos im Gegenzug aber auch nicht durch haltende Busse aufgehalten werden. Im Rahmen von NetCap sollte nun aber der Schritt zu echt-multimodalen Netzen und Szenarien für MATSim getan werden. Diese Entwicklung wurde auch mit dem Schritt von proprietären Daten hin zu öffentlichen Daten als Szenariengrundlage verbunden. So sollten die neuen Netze für MATSim nicht nur echt-multimodal, sondern auch auf "Open Street Map"-Daten basieren. Auf Grund dieser spezifischen Anforderungen konnten bspw. keine bereits entwickelte Tools zur Erzeugung von echt-multimodalen Netzen verwendet werden, wie bspw. das Paket von Ordonez und Erath (2011), welches die Netze auf der Basis von GPS-Daten erzeugt. Die ÖV-Fahrpläne wurden aus dem öffentlichen HAFAS-Fahrplan der SBB gezogen und für die verschiedenen Szenarien (siehe Abschnitt 4.2) mit unterschiedlichen Frequenzen implementiert (2min, 4min, 8min und 16min Taktfrequenz für Busse und Trams).

Das im Rahmen von NetCap entwickelte MATSim-Paket, welches die Erzeugung von echt-multimodalen Netzen aus OSM- und HAFAS-Daten ermöglicht, wird detailliert in

(Bösch und Ciari, 2015) beschrieben. Es soll deshalb in diesem Bericht auch nicht näher darauf eingegangen werden. Abbildung 13 zeigt einen Stadt-Zürich-Auszug des neu erzeugten, multimodalen Schweiz-Netzwerks inkl. ÖV-Angebot, welches auch für die NetCap-Simulationen verwendet wurde.

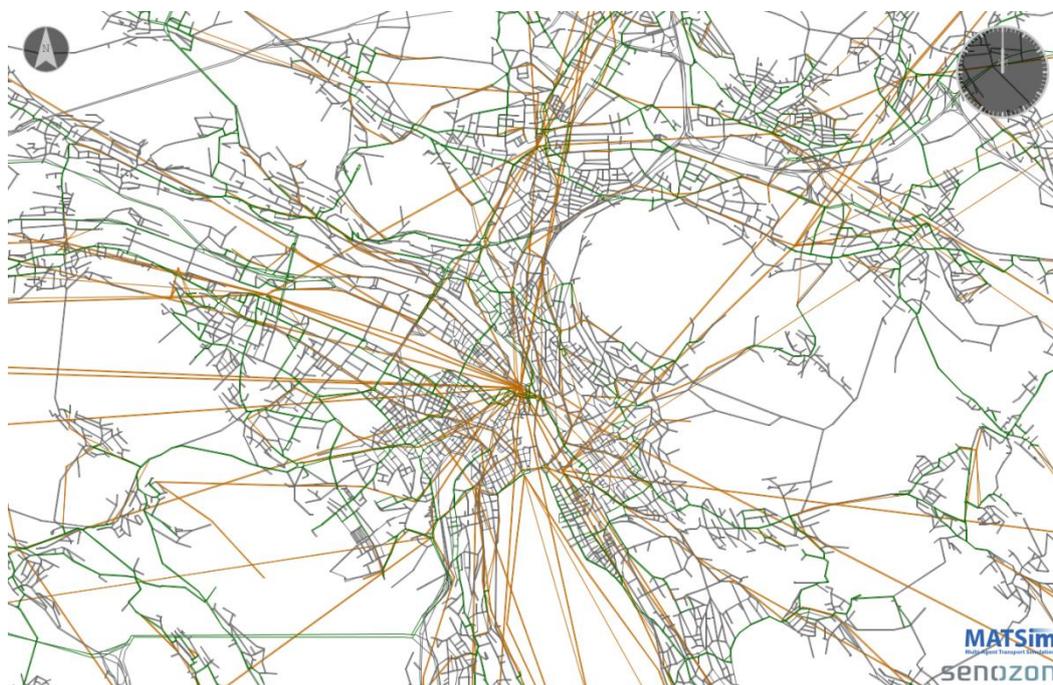


Abb. 13. Netz der Stadt Zürich für MATSim. Die grauen Kanten zeigen Strecken, welche exklusiv dem Privatverkehr zur Verfügung stehen. Die grünen Kanten zeigen Strecken, welche vom MIV und ÖV (Busse) geteilt werden. Die orangenen Linien zeigen Kanten, die dem ÖV vorbehalten sind (bspw. Tram-, Zugs- und Schiffsverkehrskanten).

Neben dem Netz und dem ÖV-Angebot, welche für NetCap in (Bösch und Ciari, 2015) beschrieben werden, erfordert MATSim eine Population. Diese Population beschreibt die aktivitätsbasierte Initialnachfrage, aus welcher in MATSim agentenbasiert die Verkehrsnachfrage abgeleitet wird. Wie von Bösch et al. (2014) beschrieben, basiert das bestehende Schweiz-Modell, welches auch im NetCap-Projektbeschrieb genannt wird, auf Daten aus den Jahren 2000 bis 2005. Die Neuentwicklung eines aktuellen Szenarios, welches auf den Daten von 2010 basiert, ist am IVT im Gange, hat sich aber leider aus verschiedenen Gründen verzögert. Es wurde deshalb für die NetCap-Simulationen eine optimierte Zürich-Population verwendet. Diese modelliert die Population der Grossregion Zürich (30km-Radius um das Bellevue) und basiert nach wie vor auf dem bestehenden Schweiz-Modell. Es wurde aber im Vergleich zum Schweiz-Modell optimiert und mit aktuellen Daten neu kalibriert. Für die Analysen in NetCap wurde aus diesem Zürich-Modell nach der Simulation die Nachfrage für das Stadtzentrum freigeschnitten und auf das VISSIM-Modell übertragen (Methodik in Abschnitt 3.4). Auf diese Weise konnten Randeffekte für die Untersuchungsregion (Stadtzentrum Zürich) vermieden werden.

4.6.2 MFD mit MATSim in Abhängigkeit der Anzahl Iterationen

Zur Modellierung von Verkehrsnachfragen wird in MATSim Verkehr simuliert. Dazu wird ein Warteschlangenmodell verwendet. Dieses Modell erlaubt eine sehr performante Simulation von Verkehr – d.h. bspw. Simulation eines Arbeitstages der gesamten Schweizer Population (7.3 Millionen Agenten) auf dem gesamten Schweizer Verkehrsnetz (ca. 1Mio. Links) in bis zu ca. 4.5 Stunden Rechenzeit – bei gleichzeitig genügender Realitätsnähe (Waraich et al., 2015). Jedoch müssen bei der verkehrsspezifischen Auswertung der Resultate die Eigenheiten und Charakteristiken dieses Modelles berücksichtigt werden. Beispielsweise können in stark überlasteten Strassenabschnitten Fahrzeuge unrealistisch akkumulieren. Ebenfalls können durch das

grundlegende Design MATSims gewisse Artefakte auftreten, die unrealistisch sein können. Beispielsweise wird in MATSim selbst bei völlig überlasteten Strassenabschnitten immer ein gewisser, minimaler Verkehrsfluss garantiert, da durch den Iterationscharakter von MATSim ein völliges Erliegen des Verkehrs nicht zielführend ist. Beide Phänomene sind beispielsweise erkennbar in Iteration 0 in Abbildung 14. Ebenfalls in der Abbildung sichtbar ist jedoch auch, dass mit mehr und mehr Iterationen erstens diese Effekte verschwinden, und zweitens das MFD immer mehr dem erwarteten Bild entspricht. Nach 150 Iterationen ist der Gleichgewichtszustand in MATSim gut erreicht, d.h. kein Agent kann mehr durch eine veränderte Routen-, Zeit-, Orts- oder Verkehrsmittelwahl seinen Tagesablauf wesentlich verbessern. Die Simulation wird deshalb beendet. Hinsichtlich des MFD kann in diesem Gleichgewichtszustand sogar eine vermutlich leicht zu optimale Verkehrssituation ohne Stau beobachtet werden (Iteration 150 in Abbildung 14). Der Gleichgewichtszustand in MATSim beschreibt also eine Situation, die in Realität so nur an wenigen Tagen auftreten wird, da die Agenten gegen Ende der Simulation tendenziell zu gut informiert sind und die Rand- und Umgebungsbedingungen in MATSim tendenziell zu stabil sind.

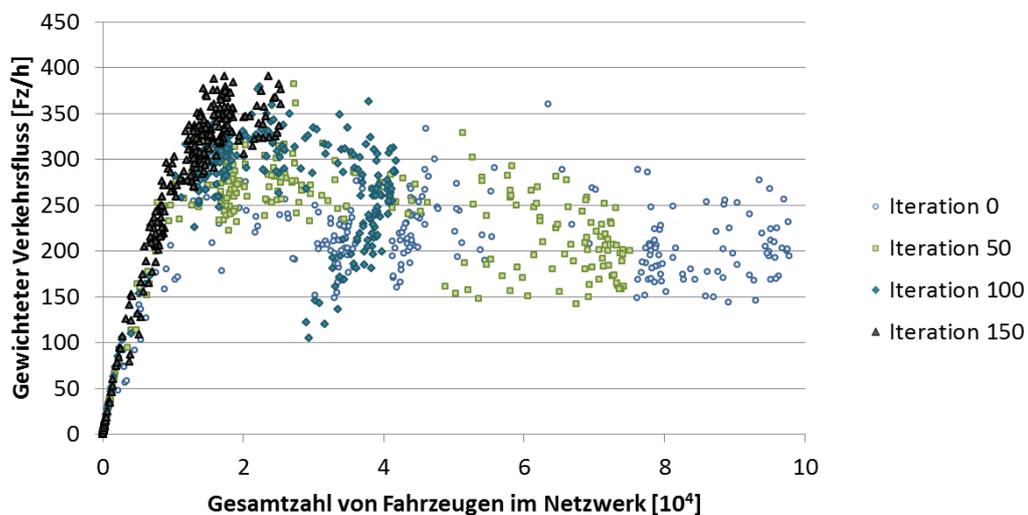


Abb. 14. MFD-Entwicklung über Anzahl Iterationen im MATSim-Zürich-Szenario.

4.6.3 Vergleich der MFD aus VISSIM und MATSim

In Abbildung 15 werden die beiden MFD aus MATSim (rot) (Iteration 150, d.h. Gleichgewichtszustand) und VISSIM (grün) gegenüber gestellt. Man kann beobachten, dass die grundsätzlichen Quantitäten gut übereinstimmen, wenn man bedenkt, dass es sich um zwei unterschiedliche, unabhängige Verkehrsmodelle handelt. Jedoch wird der im vorigen Abschnitt beschriebene MATSim-Überrelaxationseffekt im Vergleich noch deutlicher sichtbar.

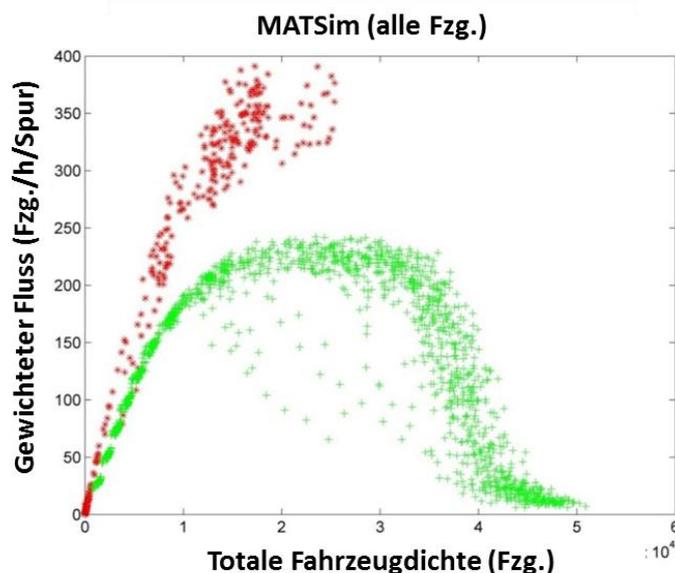


Abb. 15. Vergleich der MFD aus MATSim und VISSIM.

4.6.4 3D-MFD erzeugt mit VISSIM basierend auf Nachfragen aus MATSim

Wie weiter oben beschrieben, wurde als Basis für das Projekt NetCap eine Verkehrssimulation mit VISSIM verwendet. Das Modell simuliert die Innenstadt von Zürich von Zürich von 17.00 Uhr bis 18.00 Uhr (Ge and Menendez, 2012; Ortigosa et al., 2014). Die verschiedenen Nachfragen, um die vollständigen MFD zu erhalten, wurden daraus über Skalierung erstellt. Das bedeutet, die statische Nachfrage wurde mit verschiedenen Faktoren multipliziert, was bei Faktoren grösser 1 zu einer zusätzlichen Belastung des Systems führt und bei Faktoren kleiner 1 zu einer Entlastung des Systems. Wie weiter oben (Abschnitt 3.1.3) bereits beschrieben, ist dies nicht besonders realistisch, da die Nachfrage so nicht auf Stausituationen reagieren kann und keine neuen Routen finden kann. Ebenfalls wird keine Veränderung des Modalsplits erlaubt und damit eine Reaktion auf (un-) attraktivere Angebote verschiedener Modi.

Um diesen Einschränkungen zu begegnen, wurde als Teil von NetCap ein neuer Ansatz entwickelt. Es wurde die agentenbasierte Nachfragesimulation MATSim mit der Verkehrssimulation VISSIM verbunden. Damit können die komplexen Anforderungen der Simulation intermodaler Konkurrenz- und Interaktionssituationen und die Eigenschaften der verschiedenen Verkehrsmodellierungsansätze (Makro, Mikro und Agentenbasiert), wie in Abschnitt 3.4 bereits beschrieben, besser gemeistert werden. Durch die Verbindung von MATSim und VISSIM können die Stärken der beiden Simulationsumgebungen verbunden werden: Mit MATSim die Erzeugung realistischer Nachfrage, welche auf veränderte Randbedingungen reagiert, und mit VISSIM die detaillierte Verkehrsmodellierung. Für einen Vergleich zeigen die Abbildungen 16 und 17 die MFD und 3D-MFD, welche mit den beiden Vorgehensweisen, einerseits Skalierung bestehender Nachfrage in VISSIM und andererseits Nachfrage-Neuerzeugung mit MATSim und anschliessender Simulation in VISSIM, gewonnen wurden.

Verschiedene Beobachtungen können gemacht werden. Es fällt für die 3D-MFD (Abbildung 17) auf, dass die über die neue MATSim-VISSIM-Kombination gewonnenen MFD wesentlich weniger Punkte aufweisen. Dies liegt daran, dass diese Kombination nur einmal mit einem Startwert für den Zufallsprozess in VISSIM simuliert wurde, während die Skalierung für die weiter oben präsentierten Studien bereits für mehrere, verschiedene solche Startwerte durchgeführt wurden.

Was in Diagramm e) von Abbildung 17 ebenfalls auffällt, ist, dass die über die neue MATSim-VISSIM-Methode gefundenen 3D-MFD kaum Werte für den Bereich mit maximaler Kapazität aufweisen. Es wird angenommen, dass die Ursache für diese Beobachtung im Unterschied von MATSim und VISSIM liegt: Die Resultate aus MATSim

werden für VISSIM für ganze Stunden aggregiert, nach VISSIM übertragen und dort über die zeitliche Wahrscheinlichkeitsgleichverteilung für die Verkehrserzeugung in VISSIM wieder verteilt. In anderen Worten, das zeitliche Nachfragemuster, das feiner als eine volle Stunde ist, kann nicht vom aktuell verwendeten VISSIM-Modell abgebildet werden. Eine sehr detaillierte Nachfrage aus MATSim, die zum Beispiel jede Minute aktualisiert wird, könnte vom VISSIM-Modell nur mit erheblichem Aufwand direkt simuliert werden. Deshalb wird die Nachfrage aus MATSim lediglich als stündlicher Mittelwert in VISSIM simuliert. Die obige Vermutung wird durch das MATSim-VISSIM-MFD in Abbildung 16 gestützt. Dort sind ebenfalls Sprünge im MFD zu beobachten, die mit dieser Hypothese gut erklärt werden können. Definitive Aussagen können aber erst weitere Abklärungen bringen.

Was aber zeigt, dass das Ziel der Adaption der Nachfrage zur Situation mit der neuen Methodik tatsächlich erreicht werden konnte, ist die dichtere Verteilung der Punkte im Staubereich für die MATSim-VISSIM-3D-MFD (d) und e) in Abbildung 17) im Vergleich zur traditionellen Skalierungsmethode (a) und b) in Abbildung 17), was bedeutet, dass sich der Stau homogener im Netz verteilt hat.

Ebenfalls eine nennenswerte Beobachtung ist die Abwesenheit von Punkten für hohe ÖV-Dichten im MATSim-VISSIM-Fall (Abbildung 17). Dies kann damit erklärt werden, dass die Verkehrsmittelwahl in MATSim auf zu hohe ÖV-Dichten und die daraus resultierende Stauung von ÖV-Fahrzeugen reagiert und sich für diese Fälle zum Individualverkehr verschiebt. Das würde ebenfalls bestätigen, dass die neue Methode für die Nachfrageanpassung grundsätzlich funktioniert.

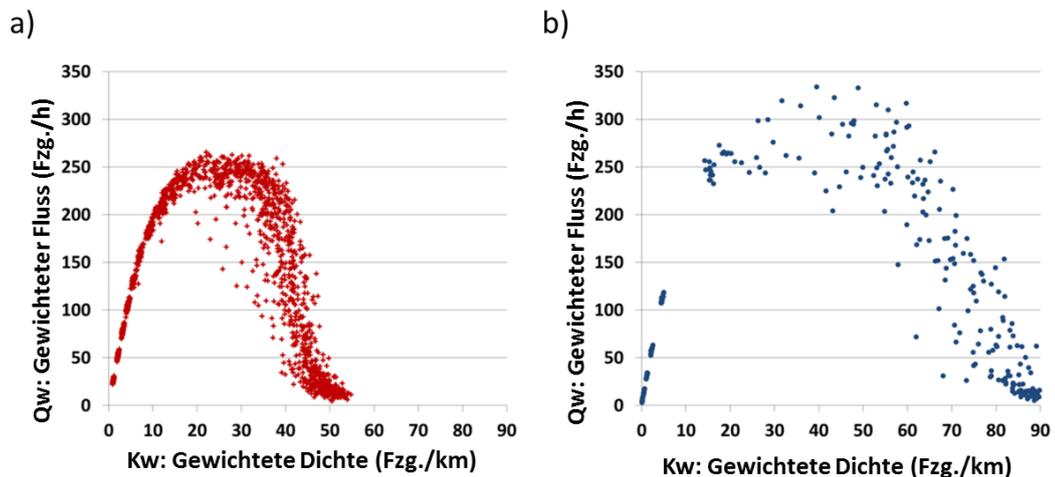


Abb. 16. Vergleich der Simulationen für das MFD. a) MFD, welches mit Skalierung des bestehenden VISSIM-Szenarios erzeugt wurde. b) das MFD, welches mit Nachfrage-Neuerzeugung mit MATSim und anschliessender Simulation in VISSIM erzeugt wurde.

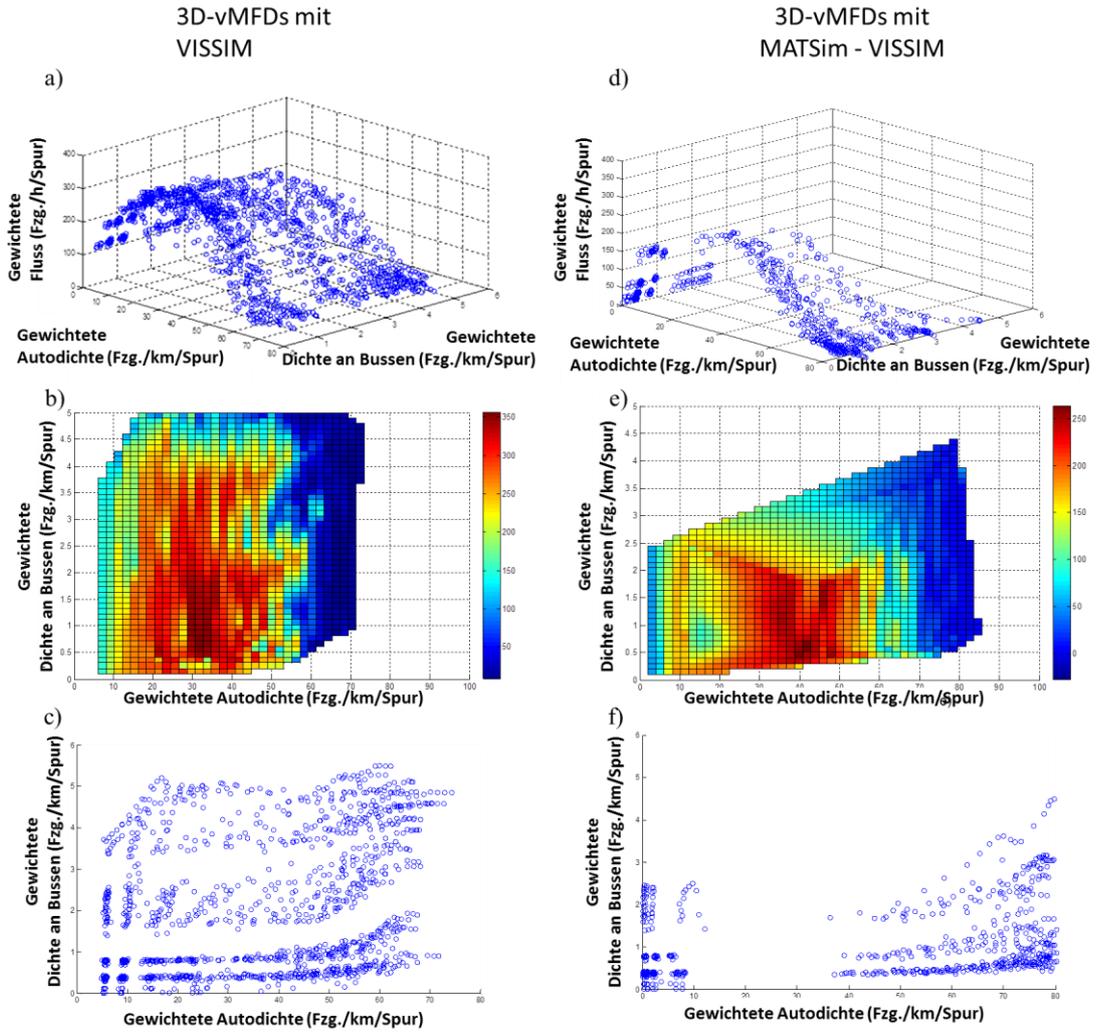


Abb. 17. Vergleich der Simulationen für 3D-MFDs. a) bis c) die 3D-MFD, welche mit Skalierung des bestehenden VISSIM-Szenarios erzeugt wurden, d) bis f) die 3D-MFD, welche mit Nachfrage-Neuerzeugung mit MATSim und anschliessender Simulation in VISSIM erzeugt wurden.

5 Zusammenfassung und Empfehlungen

5.1 Zusammenfassung

In diesem Projekt wird die Netzkapazität mit dem makroskopischen Fundamentaldiagramm beurteilt. Es wird vorgeschlagen, das MFD in Schweizer Städten zu implementieren. Im ersten Teil werden die wichtigsten Charakteristiken des unimodalen MFD (nur Autos) erklärt. Es werden zwei Methoden beschrieben, um ein MFD zu erhalten: Einerseits mit Hilfe von echten Daten (Zählstationen und/oder Floating Car Data) und andererseits durch Simulationen (VISSIM). Ebenfalls wird eine Methodik präsentiert, um die Genauigkeit zu beurteilen, falls nicht alle Informationen über das gesamte Netz vorhanden sind, und schliesslich werden Strategien vorgestellt, um Verkehrsdaten von verschiedenen Quellen so einzusetzen, dass die Genauigkeit gesteigert wird.

Der zweite Teil dieses Projekts widmet sich der Herleitung des 3D-MFD, das nicht nur den Autoverkehr, sondern auch den öffentlichen Verkehr beinhaltet. Es werden 3D-MFD für die Städte Zürich und San Francisco präsentiert, die aus Simulationen erhalten worden sind. Des Weiteren wird erklärt, wie sich die Form und Charakteristik des 3D-MFD ändern, wenn sich Netzeigenschaften ändern. Verschiedene Fälle werden untersucht: separate Busspuren, gemischte Spuren sowie ÖV-Bevorzugungssysteme. Schliesslich wird auch der Effekt, den Fussgänger und Fahrradfahrer auf das 3D-MFD haben, untersucht.

In diesem Projekt wurden zwei Mikrosimulationstools eingesetzt, mit VISSIM für Zürich und mit Aimsun für San Francisco. Diese Mikrosimulationsmodelle verwenden die Informationen eines statischen Verkehrsumlegungsprogrammes für die Routenführung. Dabei sollten die Genauigkeit der Simulationen erhöht werden, indem mit einer agentenbasierten Verkehrssimulation, MATSim, dynamische Nachfragen erzeugt wurden. Es wurde ein System entwickelt, um die Nachfragesimulation MATSim mit der Verkehrssimulation VISSIM zu verbinden. Diese Koppelung von VISSIM mit MATSim erforderte die Weiterentwicklung von MATSim an verschiedenen Stellen. Einerseits musste ein Export der Nachfrage nach VISSIM mit der entsprechenden Abbildung von Routen aus einer Netzmodellierung auf die Routen einer anderen Netzmodellierung implementiert werden, andererseits stellte die Fragestellung des multimodalen Verkehrs in urbanen Gebieten neue Anforderungen an die Simulationen in MATSim. So musste in einem neuen, echt-multimodalen Netz der ÖV mit dem MIV zusammengebracht und auf einem geteilten Netz abgebildet werden. Die Aktualisierung des MATSim-Szenarios auf die aktuellen Datensätze ist leider aus verschiedenen Gründen noch nicht ganz ausgereift, dafür wurde eine bestehende Population optimiert und mit den aktuellen Daten neu kalibriert.

Die Präsentation und die erste Anwendung dieser Methodik zur Verbindung von MATSim und VISSIM ist Pionierarbeit, und in der Zukunft sollen durch eine Weiterentwicklung und Verfeinerung dieser Methode noch genauere Simulationsmodelle aufgebaut werden können.

5.2 Ausblick und Empfehlungen

Das NETCAP Forschungsprojekt bereitet den Weg für die Verwendung makroskopischer Ansätze in Schweizer Städten. Damit sollen Massnahmen im städtischen Verkehr untersucht und neue Massnahmen vorgeschlagen werden. Auf deren Basis soll den Verkehrssteuerungsschemata Daten zugeführt werden, um Staus in Städten zu verringern. Allerdings bedingt es zusätzliche Forschung, bis diese makroskopischen Ansätze einsatzbereit sind.

Es muss detailliert untersucht werden, wie Schweizer Städte Verkehrsdaten in Echtzeit erfassen und mit diesen MFD errechnen können. Viele Städte, darunter auch

Zürich, haben bereits Schleifendetektoren installiert, deren Auswertung eine Schätzung des MFD zulassen würde. Es ist notwendig die Ressourcen, die in der Schweiz verfügbar sind, genau zu evaluieren, die Schlüsselstellen im Prozess der Datenbeschaffung zu identifizieren, und zu planen, wie diese Schwierigkeiten überwunden werden können. Gleichzeitig müssen Forscher die Investitionen in die Ausrüstung für die Erfassung von Daten evaluieren, welche die existierenden Ressourcen komplementieren können. Besonders sogenannte Floating Car Data, bspw. GPS Daten, von mobilen Geräten, scheinen ein guter Ansatz zu sein, da sie Trajektorien und alle damit verbundenen Vorteile, liefern. Es ist möglich MFD aus Floating Car Data zu erhalten, jedoch müssen noch mehr Städte untersucht, wie die Daten kontinuierlich und effizient erhalten werden können.

Wir denken, dass es unabdingbar ist, dass Pilotversuche in Schweizer Städten durchgeführt werden, um MFD und 3D-MFD mit realen Daten zu generieren. Ein erster Versuch läuft momentan bereits mit der Unterstützung der Stadt Genf. Zukünftige Publikationen werden diese empirischen Resultate präsentieren. Forscher müssen identifizieren, ob es eine Variabilität gibt, die von QZ-Beziehungen abhängt, ob Hysterese-Zyklen auftreten, ob gute MFD auch mit weniger Ressourcen erhalten werden können etc.; generell: ob die Resultate der Forschung übertragbar sind. Städte wie Zürich, wo bereits ein Zufahrtskontrollsystem besteht, könnten solche Versuche mit tiefen Kosten durchführen.

Um 3D-MFD zu erhalten, müssen Informationen über den öffentlichen Verkehr vorhanden sein. Die Bus- und Tramfrequenzen sind Schlüsselwerte beim Errechnen des 3D-pMFD. Daher sollten Forscher die Methoden für das effiziente Erhalten oder Annähern solcher Daten entwickeln. Es ist auch sehr wichtig, dass in verschiedenen Schweizer Städten 3D-MFD-Pilotversuche mit dem ÖV durchgeführt werden; es unterstützt die Entwicklung von 3D-MFD und ist auch für die Forschung ein Fortschritt.

Nicht zuletzt sollen auch die Einwirkungen von Fussgängern und Fahrradfahrern weiter untersucht werden. Fussgänger und Fahrradfahrer müssen als Teil einer Route oder als alternativen Transportmodus, der auch um Strassenraum konkurriert, betrachtet werden. Die Modellierung solcher Interaktionen in einer Simulationsumgebung ist eine grosse Herausforderung für Wissenschaftler. In diesem Projekt verbanden wir die agentenbasierte Simulation MATSim mit dem Mikrosimulationsprogramm VISSIM, um vom leistungsstarken, dynamischen Verkehrsumlegungssimulator MATSim, der auf individuellen Personen und Entscheidungen basiert, zu profitieren. Wir sind der Überzeugung, dass wir diese Synergien zwischen Simulationsprogrammen weiter untersuchen müssen.

Insbesondere der Vergleich der MATSim-VISSIM-MFD mit entsprechenden MFD aus skalierten VISSIM-Szenarien weist auf das Potential MATSims hin. Zur Ausschöpfung dieses Potentials ist es aber unabdingbar, dass die Bedeutung der MFD für MATSim besser verstanden wird. So weisen Analysen mit MFD aus MATSim auf interessante Entwicklungen der MATSim-Szenarien im Verlaufe einer Simulation hin und bedürfen unbedingt weiterer Untersuchungen.

In Zukunft ist geplant, das MATSim-Szenario basierend auf aktuellen Realdaten fertig zu erstellen und für weitere Studien zur Verfügung zu stellen. Ebenfalls sind im Bereich der Erstellung von echt-multimodalen Netzwerken und ÖV-Angeboten für MATSim verschiedene weitere Schritte geplant, wie in (Bösch und Ciari, 2015) beschrieben. Zudem sind im Bereich der möglichen Eignung von MFD für die Kalibrierung von MATSim sowie zur festgestellten Überrelaxation vertiefte Untersuchungen geplant.

Sämtliche Forschungsbestrebungen im Bereich der Simulationen und theoretischen Ansätze müssen jedoch immer von guten Felduntersuchungen begleitet werden. Erst diese erlauben, das tatsächliche Verkehrsgeschehen in Schweizer Städten zu betrachten, zu erfassen und damit den Simulationsansätzen wertvolle Erkenntnisse zur Verfügung zu stellen.

Anhänge

I	VISSIM-MATSim	49
I.1	Verbindung von VISSIM und MATSim	49
I.2	Abbildungsprozess	50
II	Entwurf eines Merkblatt.....	53

I VISSIM-MATSim

I.1 Verbindung von VISSIM und MATSim

VISSIM und MATSim verfügten bisher nicht über eine Schnittstelle für den Datenaustausch. Eine solche zu entwickeln war Teil des Projektes NetCap. Drei verschiedene Ansätze wurden untersucht, wobei schlussendlich für einen direkten Export der MATSim-Nachfrage in ein bestehendes VISSIM-Modell entschieden wurde.

Der erste Ansatz, der verfolgt wurde, war die Idee, möglichst auf bestehende Schnittstellen aufzubauen. Dafür sollte das makroskopische Modell VISUM als Mediator zwischen VISSIM und MATSim dienen. Konkret sollte die in MATSim generierte Nachfrage als QZ-Matrizen an VISUM übergeben werden. VISUM sollte dann die Nachfrage erneut umlegen und daraus ein VISSIM-Modell erzeugen (siehe Abbildung A1). Der Vorteil dieses Ansatzes war, dass viel auf bestehende Schnittstellen (v.a. zwischen VISUM und VISSIM) aufgebaut werden konnte. Die Nachteile sind jedoch, dass einerseits mit dem Aggregieren zu QZ-Matrizen viel Nachfrageinformation verloren geht, und andererseits stellten sich die technischen Schwierigkeiten des Gesamtprozess mit der Einbindung eines weiteren Produktes als unverhältnismässig heraus. Der Ansatz wurde deshalb verworfen.

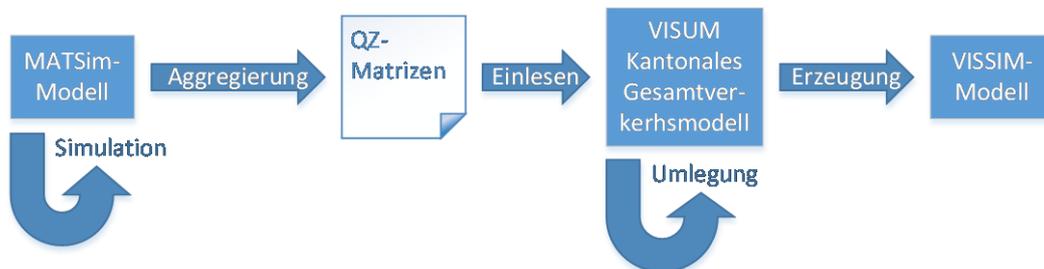


Abb. A1. Ablaufdiagramm des VISUM-Ansatzes.

Der zweite Ansatz, der verfolgt wurde, war die Idee, *anmroutes* zu verwenden. *anmroutes* ist das offizielle Schnittstelleformat von VISSIM für die Nachfrageerzeugung. Aus MATSim sollten *anmroutes*-Files erzeugt werden, welche die Nachfrage für VISSIM kodieren (siehe Abbildung A2). Dieser Ansatz hatte zum Vorteil, dass die offizielle VISSIM-Schnittstelle verwendet würde. Der Nachteil war jedoch, dass der Export eines *anmroutes*-Files aus MATSim neu implementiert werden müsste. Erste Versuche mit diesem Ansatz zeigten jedoch, dass auf Grund der unterschiedlichen Strassennetz-Modelle, die VISSIM und MATSim verwenden, ein solcher Export sehr aufwändig würde und dass man daher auch einen direkten Export eines vollständigen VISSIM-Modells aus MATSim erwägen könnte.

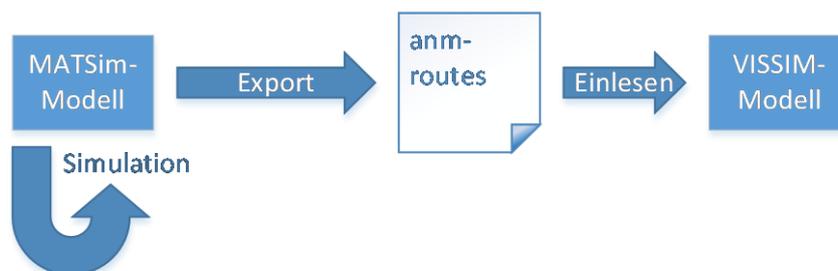


Abb. A2. Ablaufdiagramm des *anmroutes*-Ansatzes.

Der dritte, schlussendlich auch im Projekt umgesetzte Ansatz verfolgte den direkten Export der MATSim-Nachfrage in ein bestehendes VISSIM-Modell (siehe Abbildung A3). Eine solche Funktion war bisher in MATSim nicht verfügbar und musste neu entwickelt werden. Dafür stellt dieser Ansatz sicher, dass das VISSIM-Modell eine kohärente, sinnvolle Nachfragesituation abbildet, welche direkt der in MATSim erzeugten, multi-modalen Verkehrsnachfrage entspricht.

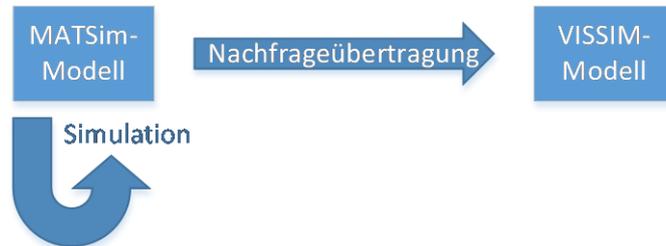


Abb. A3. Ablaufdiagramm des direkten Ansatzes.

Die Details und die Implementierung des direkten Ansatzes werden im nächsten Abschnitt, Abbildungsprozess, beschrieben.

I.2 Abbildungsprozess

Die Verkehrsnachfrage ist netzgebunden, spätestens wenn nicht nur QZ-Matrizen, sondern auch die tatsächlich benützten Routen berücksichtigt werden. Das Hauptproblem beim Export der Nachfrage aus einem MATSim-Modell in ein bestehendes VISSIM-Modell war nun, dass die beiden Modelle unterschiedliche Netzmodelle des gleichen realen Netzes verwenden. Das reale Netz ist aber unbekannt, d.h. es musste eine direkte Abbildung vom MATSim-Netz auf das VISSIM-Netz gefunden werden. Für diese Abbildung wurde die Grundannahme getroffen, dass im bestehenden Verkehrsmodell für Zürich, welches in VISSIM vorliegt, bereits alle relevanten Routen vorhanden sind. Dies erlaubte, nicht das ganze Netz verknüpfen zu müssen, sondern nur die in MATSim benutzten Routen nach best-fit mit den bestehenden VISSIM-Routen zu verknüpfen. So konnte die Grundstruktur des bestehenden VISSIM-Modells weiter verwendet werden, während die Nachfrage aus MATSim neu aufgebaut wurde.

Grundsätzlich wurde also für jede Route aus MATSim, welche im gewählten Zeitraum stattfand, eine Abbildung auf die am besten passende Route aus VISSIM gemacht. Anschliessend wurde die Nachfrage für eine VISSIM-Route für den gewählten Zeitraum als die Anzahl festgelegt, wie oft die Route als am besten passend befunden wurde. Damit stellt sich die Frage, was „am besten passend“ bedeutet, respektive wie dies implementiert wurde. Das Problem lässt sich umformulieren als ein Quantifizierungsproblem von Ähnlichkeit von Routen: Wie ähnlich sind sich eine Route aus MATSim und eine Route aus VISSIM. Dafür wurde ein Regressionsansatz gewählt, welcher im Folgenden beschrieben wird.

In einem vorbereitenden Schritt wurde dem Gebiet ein Raster hinterlegt, welches vom eigentlichen Netz unabhängig ist und damit als Mittler zwischen den beiden Netzmodellen dienen konnte. Anschliessend wurden die gefundenen Routen über das Raster neu codiert. D.h. es wurde für jede Route (VISSIM und MATSim) ein Vektor erzeugt, welcher codiert, über welche Rasterzellen die Route verläuft. Abbildung A4 zeigt dieses Vorgehen für zwei beispielhafte, relativ ähnliche Routen.



Abb. A4. Rasterabbildung der Routen. Die grüne Route kodiert zu A1-A2-A3-B3-C3, die orange zu A1-A2-B2-B3-C3.

Diese Vektorabbildungen der Routen können anschliessend auf einander abgebildet werden. Visuell bedeutet dies, dass auf der horizontalen Achse die Codierung der einen Route gelistet wird und auf der vertikalen Achse die Codierung der anderen Route. Elemente, die übereinstimmen, ergeben einen Punkt auf der Diagonalachse. Elemente die nicht übereinstimmen, geben einen negativen Punkt relativ zur Position im Vektor (je früher im Vektor die Nichtübereinstimmung, desto negativer der Punkt, um ein Übergewicht der späten Werte zu vermeiden). Anschliessend kann auf die gefundenen Punkte eine lineare Regression angewandt werden, welche umso besser ist (Steigung möglichst 1, Vertikalachsenschnitt möglichst im Ursprung, Kleinste-Quadrate-Fehler möglichst klein), je ähnlicher sich die Routen sind. Abbildung A5 illustriert das Vorgehen für die in Abbildung A4 kodierten Routen.

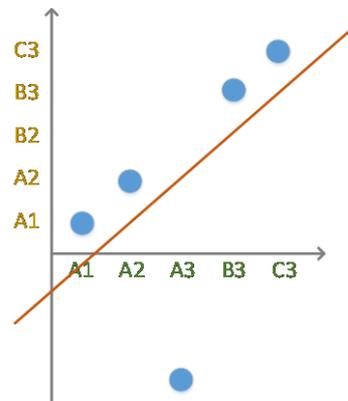


Abb. A5. Für den dritten Punkt konnte keine Übereinstimmung gefunden werden. Er wurde deshalb negativ gesetzt. Die rote Linie zeigt die lineare Regression zwischen den beiden Vektoren.

Durch eine Quantifizierung der Güte der linearen Regression (Vertikalachsenschnitt, Steigung und Kleinste-Quadrate-Fehler) konnte so die Ähnlichkeit zwischen zwei Routen quantifiziert werden. Durch Identifikation der so ähnlichsten VISSIM-Route für jede MATSim-Route konnte anschliessend die Nachfrage auf von MATSim auf VISSIM übertragen werden.

II Entwurf eines Merkblatt

Makroskopische Modelle zur Kapazitätsschätzung städtischer Netze

Dieses Merkblatt zeigt, wie mit makroskopischen Fundamentaldiagrammen (MFD) die multimodale Kapazität urbaner Verkehrssystemen in Echtzeit modelliert und geschätzt werden kann. Es beschreibt, wie dies Schweizer Städte in der Steuerung und Verbesserung ihres multimodalen Mobilitätsangebotes unterstützen kann. Die präsentierten Methoden stützen sich dabei auf oft bereits verfügbare Überwachungsressourcen wie bspw. Zählstellen oder GPS-Erhebungen.

Für die eilige Leserin, den eiligen Leser

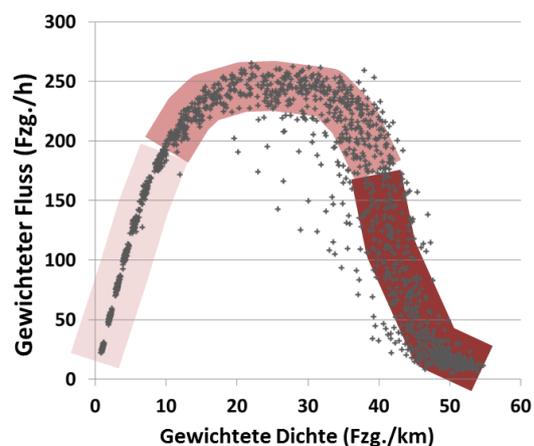
Weshalb sollten Städte makroskopisch denken?

- Um zu verstehen, wie Netzwerkeigenschaften das Gesamtverkehrssystem beeinflussen.
- Um Strategien für das Verkehrsmanagement zu entwickeln und zu bewerten.
- Um die Vorgaben für Verkehrsregelungsanlagen in Echtzeit an die reale Situation anzupassen.
- Um auf Systemebene die Interaktionen zwischen Individualverkehr und öffentlichem Verkehr in urbanen Gebieten besser zu verstehen.
- Um Verkehrsmanagementstrategien für alle Oberflächenmodi sowie für das Gesamtverkehrssystem zu entwickeln.
- Um die Raumzuteilung zu den verschiedenen privaten und öffentlichen Modi zu verstehen und zu planen.

Was wird in diesem Merkblatt präsentiert?

- Die Anwendung makroskopischer Fundamentaldiagramme (MFD), eine der neusten Modellierungs- und Steuerungsmethoden für urbane Verkehrssysteme.
- Die Erweiterung von MFDs zu 3D-MFDs, die neben dem motorisierten Individualverkehr auch den öffentlichen Verkehr einschliessen.

MFD der Innenstadt von Zürich:



Quelle: NetCap-Bericht

Abb. 1: Zürich MFD mit hellrosa dem Bereich des freien Flusses, rosa dem Kapazitätsbereich mit der kritischen Dichte und rot dem Staubereich.

Welche Informationen zu MFDs werden gegeben?

- Empfehlungen zur Erstellung von unimodalen MFDs basierend auf Simulations- und Realdaten.
 - Methoden, um MFDs aus unvollständigen Verkehrsdaten zu schätzen.
 - Ansätze, um MFDs zu 3D-MFDs zu erweitern.
 - Realbeispiele von MFDs und 3D-MFDs.
- Eine Übersicht, wie verschiedene Netzwerkeigenschaften die MFDs beeinflussen.

1 Kapazitätsschätzung mit dem makroskopischen Fundamentaldiagramm (MFD)

In urbanen Räumen bewegen sich mehr und mehr Menschen multimodal. Deshalb steigt das Interesse, zu verstehen, wie der Raum optimal genutzt werden kann und wie die Erreichbarkeit für alle Nutzer verbessert werden kann. Sorgfältige Analysen sind nötig, wie die Zuteilung des Strassenraums zu den verschiedenen Modi gestaltet werden soll. Zusätzlich bringen die Kenntnis der Verkehrskapazität einer Stadt und die Beurteilung der Verkehrsbelastung in Echtzeit diverse weitere Vorteile:

- a. Damit können Einfluss von Netzwerkeigenschaften und Verkehrsmanagement auf das gesamte System untersucht werden. Dadurch können entsprechende Massnahmen und Strategien evaluiert und entwickelt werden sowie entsprechende Entscheidungen erleichtert werden.
- b. Es können damit Informationen über den Zustand des Verkehrssystems in Echtzeit direkt der Verkehrssteuerung zugeführt und damit die Regulation der Verkehrslage in Städten unterstützt werden. Dadurch kann das Stauvolumen reduziert werden, bspw. über die Anpassung der Lichtsignalzyklen von in die Stadt führenden Strassen.

Um diese Möglichkeiten tatsächlich nutzen zu können, ist ein neuer, ganzheitlicher Ansatz zur Überwachung und Kontrolle der städtischen Verkehrsnetze nötig. Jüngste Fortschritte haben die Grundlagen dazu geschaffen. Ein prominenter Ansatz ist das makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD). Das MFD stellt, analog zum Fundamentaldiagramm für einzelne Strecken (FD), den Verkehrsfluss der Verkehrsdichte gegenüber. Im Unterschied zum FD stellt das MFD aber den durchschnittlichen Fluss für ein Gebiet der durchschnittlichen Dichte in diesem Gebiet gegenüber. Es konnte gezeigt werden, dass mit dem MFD, unter bestimmten Bedingungen, analoge Aussagen über das ganze Gebiet möglich sind, wie mit dem FD für die einzelne Kante. Das MFD wurde ursprünglich für einzelne Verkehrsmodi (z.B. Autos) entwickelt. Mittlerweile gibt es aber auch Formen, die andere Transportmodi mitberücksichtigen. In diesen 3D-MFD wird bspw. die Verkehrsdynamik in Netzwerken abgebildet, in denen auch öffentliche Verkehrsmittel verkehren und

den Strassenraum mitbeanspruchen. Mithilfe des 3D-MFDs können Städte den Zielkonflikt zwischen verschiedenen Betriebsmöglichkeiten des Strassennetzes verstehen und quantifizieren. Aus den gewonnenen Erkenntnissen können Kontrollstrategien erarbeitet werden, die Verspätungen der Nutzer verschiedener Modi berücksichtigen. Zusätzlich erleichtert das 3D-MFD die Auswertung der Zuordnung von Strassenraum und dient als ein quantitatives Werkzeug für die Entscheidung, wie viel Strassenraum Autos und dem öffentlichem Verkehr zugeordnet werden soll.

Das (3D-)MFD ist eine elegante und vielseitig anwendbare Methode, makroskopisch den Zustand von Verkehrssystemen zu beurteilen. Für eine Anwendung in Städten sind jedoch noch weitere Untersuchungen nötig. Die Ansätze zeigen aber viel Potential für die effiziente Überwachung und Steuerung von urbanen Verkehrssystemen. Städte sollten beginnen, „makroskopisch“ zu denken.

Die in diesem Merkblatt präsentierten Inhalte, Empfehlungen und Vorgehensweisen basieren auf dem SVI-Projekt NetCap. In NetCap wurde untersucht, wie Städte MFDs verwenden könnten und wie MFDs erweitert werden müssen, um die intermodale Komplexität von urbanen Verkehrssystemen adäquat zu erfassen. Das Merkblatt soll Schweizer Städte darin unterstützen, bereits bestehende Daten (bspw. von Zählstationen) neu zu nutzen und damit die Verkehrsüberwachung und -steuerung zu unterstützen und zu verbessern.

2 Was ist ein makroskopisches Fundamentaldiagramm (MFD)?

Es ist bekannt, dass die Anzahl Fahrten (die Verkehrsmenge) in einer Stadt proportional zum mittleren Fluss auf den Kanten des Strassennetzes der Stadt ist. Ebenfalls wurde bereits früher gezeigt, dass – unter bestimmten Homogenitätsbedingungen – die Anzahl Fahrten auch mit der Anzahl Fahrzeuge in dieser Stadt in Verbindung gebracht werden kann; und dass die Anzahl von Fahrzeugen in diesem Gebiet (die Verkehrsdichte) proportional zur mittleren Dichte aller Kanten ist. Die daraus resultierende Beziehung zwischen durchschnittlichem Fluss und Dichte ist das makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD).

Ein Beispiel-MFD ist in Abbildung 1 dargestellt. Es können drei farblich hervorgehobene Bereiche unterschieden werden. Der hellrosa

eingefärbte Teil repräsentiert den freien Verkehrsfluss. Die Leistung des Systems steigt linear, wenn mehr Fahrzeuge die Strassen des Netzwerkes nutzen. Im rosa Bereich erreicht das Netzwerk die Sättigung. Diese maximale Leistungsfähigkeit wird Kapazität genannt. Die Fahrzeugdichte, bei welcher die Kapazität erreicht wird, ist die kritische Dichte. Es ist wichtig, die kritische Dichte zu kennen, da die meisten Kontrollstrategien das Ziel haben, das System möglichst nicht über diese Grenze gehen zu lassen. Wenn sich trotzdem mehr und mehr Fahrzeuge im Netzwerk bewegen, resultieren Staus, die sich in der Folge ausbreiten. Fahrzeuge müssen verlangsamen oder kommen sogar ganz zum Stillstand – der Verkehrsfluss geht also zurück bis gegen Null. Die Leistung des Systems sinkt, wie im roten Bereich im Diagramm ersichtlich ist.

Diese klar definierte Kurve, das MFD, kann man für reale Systeme erhalten, indem die Messgrößen Verkehrsfluss und -dichte (bspw. erhoben mit Schleifendetektoren) untersucht werden. Diese Beziehung erlaubt Verkehrsingenieuren, die Verkehrsbedingungen der ganzen Stadt zu einem bestimmten Zeitpunkt zu beurteilen, indem die Verkehrsstärken und -dichten an verschiedenen Orten gemessen werden. Zufahrtskontrollmechanismen können implementiert werden, um das System vor dem Überschreiten der kritischen Dichte und der Bildung von Staus zu bewahren. Trotz dieses Potentials war der Einsatz von MFDs in realen Situationen bis anhin aber limitiert. Es wurde jedoch der Beweis erbracht, dass in der Realität MFDs existieren.

3 Wie wird das MFD erstellt?

Ein wichtiger Vorteil des MFDs ist, dass es mit Daten erstellt werden kann, die mit bereits existierenden und implementierten Technologien und Geräten erhoben werden. Für das MFD werden typischerweise Erhebungsintervalle von 5 Minuten verwendet. Es werden aus den Daten ein durchschnittlicher Verkehrsfluss und eine durchschnittliche Verkehrsdichte für das Gebiet berechnet. Ein vollständiges MFD repräsentiert demnach verschiedene Zustände des Systems zu verschiedenen Zeiten. Es ermöglicht auch die Erfassung der über die Zeit und den Raum dynamischen Natur von Stausituationen.

Der durchschnittliche Fluss im Netzwerk wird als der gewichtete Durchschnitt q_t aller Flüsse pro Spur über alle Kanten im Netzwerk berechnet, wobei die Gewichtung nach Länge

der jeweiligen Spur erfolgt. Die durchschnittliche Dichte k_t wird analog bestimmt. Die Werte q_{it} und k_{it} entsprechen dem totalen Verkehrsfluss und der totalen Verkehrsdichte der Kante i für das Zeitintervall t . Wenn n_i der Anzahl Spuren und l_i der Länge der Kante i entsprechen, ergeben sich die folgenden beiden Gleichungen zur Berechnung von q_t und k_t und damit für die Berechnung des MFDs:

$$q_t = \frac{\sum_i q_{it} \cdot l_i}{\sum_i n_i \cdot l_i} \quad (1)$$

$$k_t = \frac{\sum_i k_{it} \cdot l_i}{\sum_i n_i \cdot l_i} \quad (2)$$

Das MFD ist unabhängig von der Nachfragestruktur, wenn der Verkehr im betrachteten Gebiet homogen verteilt ist. Auch wenn dies für grössere urbane Gebiete nicht gegeben ist, ist es für Städte trotzdem nützlich, zu sehen, ob je nach Tag resp. Tageszeit eine grosse Variabilität im MFD zu beobachten ist. Es wird empfohlen, Beobachtungen an verschiedenen Tagen und zu verschiedenen Zeiten durchzuführen.

4 Wie wird das MFD aus Realdaten erzeugt?

Um das MFD mit Realdaten zu berechnen, muss eine Stadt die Verkehrsflüsse und -dichten für alle Strassen der Stadt erheben. Diese Messungen müssen in kurzen Zeitintervallen (5 min) durchgeführt werden. Die Kenngrößen können mit Hilfe von Schleifendetektoren, Radargeräten, Kameras, und anderen Methoden (z.B. Bluetooth-Detektoren) bestimmt werden. Abbildung 2 zeigt die Fluss-Dichte-Beziehung für eine einzelne Kante und für das ganze Netzwerk. Es ist interessant, zu sehen, wie die Streuung verschwindet, wenn die Daten auf einer makroskopischen Ebene gesammelt werden. Das ist ein bemerkenswerter Beweis, dass das MFD dynamische Stauzustände eines Netzwerkes erfassen kann.

Zusätzlich ist es zentral, zu wissen, dass die Position eines Schleifendetektors in der Strasse die Form des MFDs beeinflussen kann, da die Daten eventuell nicht repräsentativ für den Durchschnitt der Strasse sind. Die Platzierung des Detektors in der Strasse könnte von Schlangen vor Signalen oder anderen Ursachen von lokaler Inhomogenität beeinflusst sein.

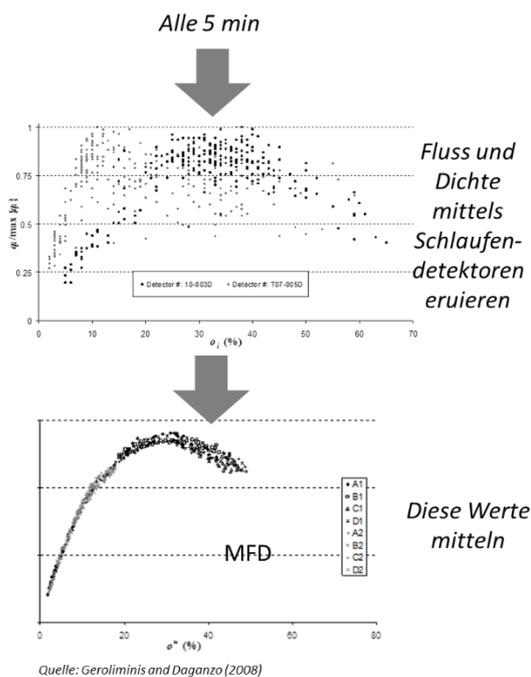


Abb. 2: Von einem einfachen Fundamentaldiagramm zu einem MFD für ein ganzes Gebiet.

5 Ein MFD aus Simulationsdaten?

Das MFD kann auch über Verkehrssimulationen erzeugt werden. Das Verwenden von Simulationen erlaubt die Untersuchung verschiedener Einflüsse auf die Form des MFDs, deren Überprüfung in Realität typischerweise schwierig sind. Zusätzlich können im Simulationsmodell später Änderungen im Netzwerk vorgenommen werden und es kann untersucht werden, wie sie die Kapazität des Netzwerkes beeinflussen. Mikrosimulationsmodelle sind am besten für diesen Zweck geeignet, da sie genau über dynamische Verkehrsinformationen und Verkehrsverhalten informieren.

Zwei heute weit verbreitete Software-Pakete für die Verkehrsmikrosimulation sind VISSIM und AIMSUN. Beide benötigen Nachfrageinformationen (sogenannte Quell-Ziel-Matrizen) und die Kalibration der zugrundeliegenden Verkehrsmodelle. Ebenfalls müssen für jedes Szenario Routenwahlmodelle vorhanden sein. Das Mikrosimulationsmodell reproduziert detailliert, wie Fahrten starten, sich fortsetzen und enden. Darauf aufbauend verbindet anschliessend das MFD die netzwerkweiten Leistungsvariablen. Abbildung 1 zeigt das MFD der Zürcher Innenstadt, das mit der Simulation VISSIM erstellt wurde.

Die meisten simulationsbasierten MFDs beruhen auf Mikrosimulationen, die fixe Routen

aus statischen Verkehrsumlegungsmethoden verwenden. Dieser Ansatz benötigt nur wenig Rechenleistung, da die Mikrosimulationen nur einmal durchgeführt werden müssen, und ist vergleichsweise stabil, da die Routenführung fix ist. Andererseits weist er auch zwei bedeutende Nachteile auf. Erstens muss die Routenführung zuerst mit einer entsprechenden Software berechnet werden und zweitens kann der Verkehr sich nicht anpassen, wenn es Stau gibt oder sich das Szenario verändert (z. B. bei neuen Angeboten).

Wenn Städte bereits ein statisches Verkehrsumlegungsmodell (z.B. VISUM, TransCAD) besitzen, das die statische Routenwahl berechnet, ist dies die kosteneffizienteste Option. Die meisten Mikrosimulationsprogramme können diese Routen importieren. Danach muss die Mikrosimulation kalibriert werden. Einige der Mikrosimulationsprodukte besitzen die Möglichkeit, dass Fahrer ihre Routen adaptieren können, während die Simulation läuft. Mit dieser Option der dynamischen Verkehrsumlegung können mehrere Iterationen durchgeführt werden, wobei die Fahrer die Routen in jeder Iteration wechseln können. Das Endresultat ist genauer und zeigt, wie Fahrer sich bei Staus der Situation anpassen. Diese Option benötigt aber auch signifikant mehr Rechenleistung und macht die einzelnen Fahrer komplexer in der Modellierung.

Im Projekt NetCap wird deshalb die Verbindung von Verkehrsmikrosimulationen (VISSIM) mit Nachfragesimulationen (MATSim) als mögliche, noch detailliertere Lösung präsentiert. Die Simulation mit MATSim erlaubt, eine personenfeine Nachfrageanpassung (Routen-, Zeit-, Orts- und Verkehrsmittelwahl) an neue oder veränderte Bedingungen. Die so angepasste Nachfrage kann anschliessend auf VISSIM übertragen und dort simuliert werden. Diese Verbindung erlaubt für verschiedene Verkehrssituationen eine ressourcenschonende Mikroverkehrssimulation (mit VISSIM) mit doch angepasster Nachfrage (mit MATSim).

6 Ein MFD aus unvollständigen Daten?

Das MFD kann approximiert werden, wenn nicht alle Kanten der Stadt über eine Fluss-Dichte-Informationen verfügen. Es kann bspw. bereits mit einer Abdeckung von 25% der Kanten ein Fehler von unter 15% erreicht werden (siehe den NetCap-Projektbericht). Diese Erkenntnis reduziert für einen Anwender

die benötigten Überwachungsressourcen beträchtlich.

Das obige Resultat (15% Fehler bei 25% Abdeckung) konnte bereits mit einer zufälligen Auswahl der zu überwachenden Strassen erreicht werden. Können die Strassen, die überwacht werden sollen, bewusst ausgewählt werden, so kann der benötigte Abdeckungsgrad weiter reduziert werden. Es konnte in NetCap gezeigt werden, dass bereits mit einfachen Kriterien bessere Resultate erreicht werden können. Wenn bspw. Kanten bevorzugt werden, die sich im Verkehrszentrum einer Stadt befinden (z.B. bei einem Bahnhof), können bereits mit einer Abdeckung von nur 15% gute Genauigkeiten erreicht werden.

Wenn man bereits auf Verkehrsinformationen aus bestehenden Überwachungssystemen oder aus Simulationsmodellen zurückgreifen kann, kann die Auswahl der Kanten, die überwacht werden müssen, nochmals effizienter gestaltet werden. Wenn Städte, beispielsweise über ein Simulationsmodell, alle Verkehrsstärken und -dichten aller Kanten einer Stadt kennen, ist es möglich, eine optimale Kombination von Kanten auszuwählen. Eine solche Wahl kann auch mit nur sehr wenigen überwachten Kanten bereits zu sehr kleinen Fehlern führen. Bspw. konnte für das Stadtzentrum von Zürich gezeigt werden, dass mit nur 5% überwachter Kanten ein Fehler unter 5% erreicht werden kann. Um eine gute Wahl zu treffen, ist es bei einer grossen Anzahl von Kanten praktisch, mit Hilfe eines Algorithmus (bspw. Tabu-Search) effizienter zu suchen.

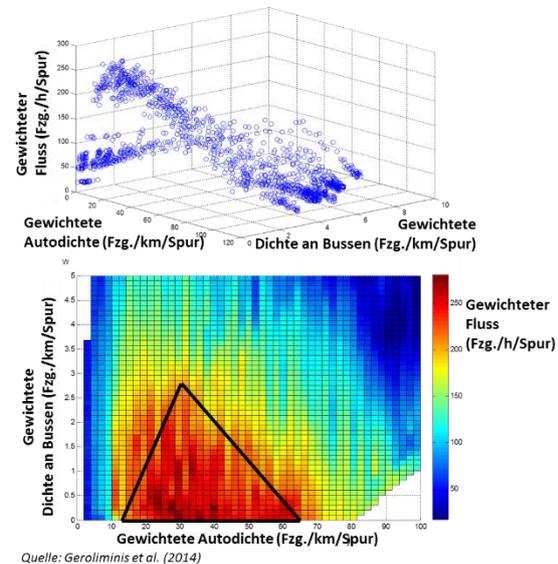
Wenn nur ein Teil der Verkehrsinformationen zur Verfügung steht, ist es eine gute Strategie, auf Kanten mit grossen Verkehrsstärken, welche in die Stadt führen, zu fokussieren. Es ist dabei aber wichtig, dass die Verkehrsflüsse der Kanten nicht zu stark korreliert sind und dem MFD jeweils neue Informationen liefern.

7 Was ist ein 3D-MFD?

Das 3D-MFD ist eine Erweiterung des unimodalen MFD. Es berücksichtigt zusätzlich zu Autos in einer dritten Dimension auch den öffentlichen Verkehr (Busse und Trams). Das 3D-MFD zeigt den Einfluss der verschiedenen Modi auf die Dynamik und Leistung des Netzwerkes. Mit den gewonnen Erkenntnissen können Kontrollstrategien, wie bspw. Buspriorisierungen, oder die Verteilung des städtischen Raumes geplant werden.

Abbildung 5 zeigt das 3D-MFD für Busse und private Kraftfahrzeuge für das Stadtzentrum von San Francisco.

3D-MFD von San Francisco:



Quelle: Geroliminis et al. (2014)

Abb. 3: **3D-MFD von San Francisco.** Oben: Die horizontalen Achsen zeigen die Autodichte (Autos/km/Spur) und die Busdichte (Busse/km/Spur) im Netz. Auf der vertikalen Achse ist der gesamte Verkehrsfluss (Fzg./h) im System gezeigt. Unten: Das Konturdiagramm des 3D-MFDs in der Dichte-Ebene.

Es ist deutlich erkennbar, dass die bi-modale Leistungsfähigkeit nun nicht mehr nur von der Anzahl Autos abhängt, sondern neu auch von der Anzahl Busse im System. Um die Figur besser zu verstehen, ist zusätzlich das Konturdiagramm des 3D-MFD in der Autodichte-Busdichte-Ebene abgebildet. So kann die Verkehrsstärke in der Dichteebene geschätzt werden. Das Dreieck in Abbildung 5 bezeichnet den Kapazitätsbereich des 3D-MFDs. Die Werte entsprechen dort mindestens 80% des beobachteten Maximums. Sie bilden das „optimale Betriebsregime“ bei bi-modalem Verkehr. Diese Information kann von Verkehrsplanern und Entscheidungsträgern verwendet werden, um den Zielkonflikt zwischen Bus- und Autoverkehr zu verstehen, neue Verkehrsstrategien zu entwickeln und nachhaltigere Städte zu planen.

Die Form des 3D-MFD hängt vom Verhältnis des dem ÖV und dem privaten Verkehr zugeordneten Strassenraumes ab. Bspw. zeigt ein Vergleich zwischen dem 3D-MFD von San Francisco (Abb. 3) und dem 3D-MFD von Zürich (Abb. 4), dass die Kapazität in Zürich bei einer Erhöhung der Busdichte weniger stark abnimmt. In der Stadt Zürich gibt es viele Bus- und Trampuren sowie eine konsequente Priorisierung des ÖV. Diese Mobilitätsstrategie

wird folglich im 3D-MFD ersichtlich.

3D-MFD von Zürich:

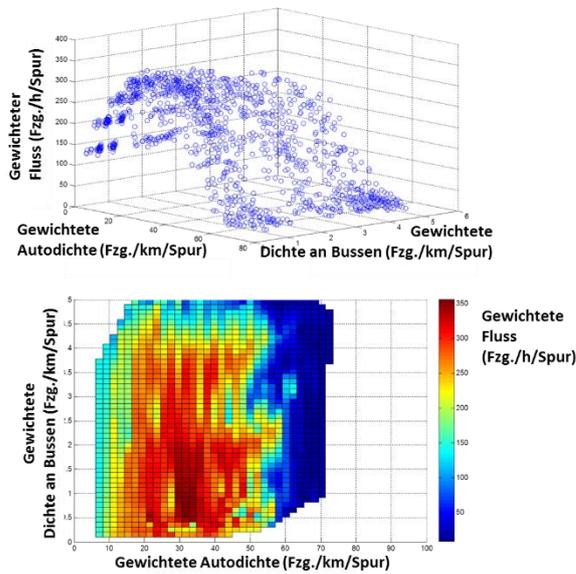


Abb. 4: 3D-MFD von Zürich. Oben: Die horizontalen Achsen zeigen die Autodichte (Autos/km/Spur) und die Busdichte (Busse/km/Spur) im Netz. Auf der vertikalen Achse ist der gesamte Verkehrsfluss (Fzg./h) im Netz gezeigt. Unten: Das Konturdiagramm des 3D-MFDs in der Dichte-Ebene.

8 Wie wird das 3D-MFD erzeugt?

Um das 3D-MFD zu erhalten, sollten – mit einem Erhebungsintervall von 5 Minuten – Daten zu den Verkehrsstärken und -dichten in den Strassen der Stadt gesammelt werden. Es muss dabei beachtet werden, dass die Daten getrennt nach Verkehrsmodus (Autos, Busse/Trams) erhoben werden. Die drei Achsen des 3D-MFD sind wie folgt definiert:

$$X_{kc} = \frac{\sum_i k_c^i \cdot l^i}{\sum_i n^i \cdot l^i} \tag{3}$$

$$Y_{kb} = \frac{\sum_i k_b^i \cdot l^i}{\sum_i n^i \cdot l^i} \tag{4}$$

$$Z_{qt} = \frac{\sum_i (q_i^c + q_i^b) \cdot l^i}{\sum_i n^i \cdot l^i} \tag{5}$$

Die x-Achse, X_{kc} , definiert die durchschnittliche Autodichte, die y-Achse, Y_{kb} , die

durchschnittliche Dichte an Bussen und die z-Achse, Z_{qt} , die totale Verkehrsstärke. Die Werte entsprechen jeweils dem gewichteten Durchschnitt über alle Kanten im Untersuchungsgebiet, n . Die Gewichtung erfolgt über die jeweilige Länge, l , der Kante.

Das 3D-MFD kann, analog zum unimodalen MFD, mit realen Erhebungsdaten oder mit Daten aus Verkehrssimulationen erzeugt werden. Die Herausforderung, um ein gutes 3D-MFD zu erhalten, besteht darin, dass viele verschiedene Zustände des Verkehrssystems beobachtet werden müssen. Die Anzahl an benötigten Punkten wird durch die zusätzliche Dimension des ÖV vervielfacht. Werden für den ÖV Taktfahrpläne verwendet, wird die Herausforderung noch grösser, da dann die nötige Variation im ÖV kaum erreicht wird.

9 Was ist das 3D-pMFD und wie wird es erzeugt?

Das 3D-pMFD ist das dreidimensionale MFD, das resultiert, wenn Fahrgastflüsse statt Fahrzeugflüsse betrachtet werden. Dies ist wichtig, da Busse und Trams mehr Passagiere als Autos befördern können. Deshalb unterscheidet sich die Struktur des 3D-pMFD, welches die Fahrgastkapazität des Systems beschreibt, auch deutlich vom einfachen 3D-MFD, welches nur die Fahrzeugkapazität beschreibt. Wenn die (potentielle) Fahrgastkapazität des Systems bekannt ist, kann das 3D-pMFD Massnahmen für den öffentlichen Verkehr unterstützen.

Die Datengrundlage für das 3D-pMFD ist schwierig zu generieren, da die Anzahl Passagiere, im Vergleich zur Anzahl Fahrzeuge, schwieriger zu schätzen und zu erfassen ist. Der einfachste Weg ist, eine mittlere Belegung für Autos und Busse aus historischen Daten zu schätzen. Es sollte dabei jedoch darauf geachtet werden, dass diese mittleren Belegungen die Variationen im Tagesverlauf abbilden. Besser, aber um einiges aufwendiger, wäre die Erfassung von Informationen über die Belegung des ÖV in Echtzeit.

Grundlagen

NetCap: Intermodale Strecken- /Linien- und Netzleistungsfähigkeit (SVI 2004/032)

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT): Dr. Monica Menendez (Projektleitung), Prof. Kay W. Axhausen, Dr. Francesco Ciari, Dr. Javier Ortigosa, Lukas Ambühl, Patrick Bösch. École Polytechnique Federale Lausanne, Urban Transport Systems Laboratory (LUTS): Prof. Nikolas Geroliminis, Dr. Nan Zhen

Glossar

Begriff	Bedeutung
MFD	Makroskopisches Fundamental Diagramm
uMFD	Unvollständiges MFD; erhalten aus unvollständigen Datensatz, z.B. nicht alle Kanten berücksichtigt.
3D-MFD	MFD, das auch noch andere Modi als Autos beinhaltet, z.B. ÖV
3D-pMFD	3D-MFD unter Berücksichtigung der Passagierflüsse
CORSIM	Mikroskopische Verkehrssimulation
VISSIM	Mikroskopische Verkehrssimulation
VISUM	Makroskopische Verkehrssimulation
MATSim	Agentenbasierte Simulation
DYNASMART-P	Makroskopische Verkehrssimulation
TransCAD	GIS Verkehrssimulation
Fzg.	Fahrzeug

Literaturverzeichnis

- Aboudolas, K., and N. Geroliminis (2013) Perimeter and boundary flow control in multi-reservoir heterogeneous networks. *Transportation Research Part B*, 55:265–281
- Bösch, P.M. and F. Ciari (2015) A Multi-Modal Network for MATSim, paper presented at the *15th Swiss Transport Research Conference*, Ascona.
- Bösch, P.M., M. Jakob, N. Zheng and G. Rerat (2014) NetCap - Intermodal Capacity of Links, Segments and Networks, *Zwischenbericht*, IVT, ETH Zurich, Zurich.
- Buisson, C., and C. Ladier (2009) Exploring the impact of homogeneity of traffic measurements on the existence of macroscopic fundamental diagrams. *Transportation Research Record* 2124(1):127–136.
- Courbon, T., Leclercq, L. (2011) Cross-comparison of macroscopic fundamental diagram estimation methods. *Procedia-Social Behavior Science*, 20:417–426.
- Daganzo, C. F., and N. Geroliminis (2008) An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B*, 42(9):771–781.
- Daganzo, C. F., V. V. Gayah, and E. J. Gonzales (2011) Macroscopic relations of urban traffic variables: Bifurcations, multivaluedness and instability. *Transportation Research Part B*, 45(1):278–288.
- Daganzo, C.F. (2007) Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B*, 41(1):49–62.
- Ehlert, A., M. Bell, and S. Grosso (2006) The optimisation of traffic count locations in road networks. *Transportation Research Part B* 40(6):460–479.
- Fei, X., H. Mahmassani, S. Eisenman (2007) Sensor coverage and location for real-time traffic prediction in large-scale networks. *Transportation Research Record* 2039(1):1–15.
- Fellendorf, M., Vortisch, P. (2010) *Fundamentals of traffic simulation*. International series in operations research and Management science 145. Ed: J. Barcelo. Springer.
- Gayah, V.V., and V. Dixit (2014) Using mobile probe data and the macroscopic fundamental diagram to estimate network densities: tests using micro-simulation. *Transportation Research Record*.
- Ge, Q., and M. Menendez (2012) Sensitivity analysis for calibrating VISSIM in modeling the Zurich network. *Proceedings of the 12th Swiss Transport Research Conference (STRC)*, Ascona, May 2012.
- Ge, Q., and M. Menendez (2013) An improved approach for the sensitivity analysis of computationally expensive microscopic traffic models - a case study of the Zurich network in VISSIM. *Proceedings of the 92nd Transportation Research Board Annual Meeting (TRB)*, Washington D.C., January 2013.
- Ge, Q., and M. Menendez (2014) An efficient sensitivity analysis approach for computationally expensive microscopic traffic simulation models. *International Journal of Transportation*, 2 (2): 49-64.
- Geroliminis, N., and B. Boyaci (2012) The effect of variability of urban systems characteristics in the network capacity. *Transportation Research Part B*, 46(10):1607–1623, 2012.

Geroliminis, N., and C. F. Daganzo (2008) Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings. *Transportation Research Part B*, 42(9):759–770.

Geroliminis, N., and J. Sun (2011) Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic. *Transportation Research Part B*, 45(3):605–617.

Geroliminis, N., J. Haddad, and M. Ramezani (2013) Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: A model predictive approach. *IEEE Transactions Intelligent Transport Systems* 14(1):348–359.

Geroliminis, N., N. Zheng, and K. Ampountolas (2014) A three-dimensional macroscopic fundamental diagram for mixed bi-modal urban networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 42:168-181.

Glover, F. (1990) Tabu search: A tutorial. *Interfaces*, 20(4): 74-94

Godfrey, J.W., (1969) The mechanism of a road network. *Traffic Engineering and Control*, 11(7):323–327.

Gonzales, E., C. Chavis, Y. Li, and C. Daganzo (2011). Multimodal transport in Nairobi, Kenya: insights and recommendations with a macroscopic evidence-based model. *Presented at 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.*

Haddad, J., and A. Shraiber (2014) Robust perimeter control design for an urban region. *Transportation Research Part B*, 68:315-332.

Haddad, J., and N. Geroliminis (2012) On the stability of traffic perimeter control in two-region urban cities. *Transportation Research Part B* 46(9):1159–1176.

Heimgartner, C. (2012) Virtual its-evaluation- establishment of micro-simulation for the city center of zurich. *19th ITS World Congress, Vienna*.

Herman, R. and I. Prigogine (1979) A two-fluid approach to town traffic. *Science*, 204: 148–151. Keyvan-Ekbatani, M., A. Kouvelas, I. Papamichail, and M. Papageorgiou (2012) Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating. *Transportation Research Part B*, 46(10):1393–1403.

Keyvan-Ekbatani, M., M. Papageorgiou, and I. Papamichail (2013) Urban congestion gating control based on reduced operational network fundamental diagrams. *Transportation Research Part C*, 33:74–87.

Knoop V, S. Hoogendoorn, J.W. Van Lint (2012) Routing strategies based on macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Record* 2315(1):1–10

Knoop, V., S. Hoogendoorn, and H. van Lint (2013) The impact of traffic dynamics on the Macroscopic Fundamental Diagram. *The 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., USA, 13-17 Jan 2013*.

Mahmassani, H., J. Williams, and R. Herman (1987) Performance of urban traffic networks. *Proceedings of the 10th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*.

Mahmassani, H., M. Saberi, and A. Zockaie (2013). Urban network gridlock: Theory, characteristics, and dynamics. *Transportation Research Part C*, 36:480-497.

Mazlounian, A., N. Geroliminis, and D. Helbing (2010) The spatial variability of vehicle densities as determinant of urban network capacity. *Philosophical Transactions of Royal Society A*, 368(1928):4627–4648.

- Menendez, M., and Q. Ge (2012) Final report on the calibration study for VISSIM (CSV). *Technical report for Stadt Zürich, Dienstabteilung Verkehr*.
- Nagle, A. S., and V. V. Gayah (2014) Accuracy of networkwide traffic states estimated from mobile probe data. *Transportation Research Record*, 2421:1-11.
- Ordonez, S. and A. Erath (2011) Semi-automatic tool for map-matching bus routes on high-resolution navigation networks, paper presented at the *16th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies*, Hong Kong.
- Ortigosa, J., M. Menendez, and H. Tapia (2014). Study on the number and location of measurement points for an MFD *perimeter control scheme: a case study of Zurich*. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 3(3-4):245-266.
- Ortigosa, J., M. Menendez, and V.V. Gayah (2015). Analysis of network exit functions for different urban grid network configurations. *Transportation Research Record*, 2491:12-21.
- Pitzinger, P. and P. Spacek (2009) Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren. *Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen*.
- Ramezani, M., J. Haddad, and N. Geroliminis (2015) Dynamics of heterogeneity in urban networks: aggregated traffic modeling and hierarchical control. *Transportation Research Part B*, 74:1-19.
- Schiffmann, L. (2013) Measuring the MFD of Zurich: Identifying and evaluating strategies for efficient fixed monitoring resources. *Master's thesis*, ETH, Zurich.
- Smeed, R. J. (1966) Road capacity of city centers. *Traffic Engineering and Control*, 8(7):455-458.
- Waraich, R.A., D. Charypar, M. Balmer and K.W. Axhausen (2015) Performance improvements for large-scale traffic simulation in MATSim, in M. Helbich, J.J. Arsanjani and M. Leitner (eds.) *Computational Approaches for Urban Environments*, (13):211-233, Springer, Cham.
- Weidmann, U., H. Orth, R. Dorbritz, M. Schwertner, N. Carrasco (2013) Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV, *VSS2007/305*.
- Weidmann, U., R. Dorbritz and H. Orth (2012a) Quality and capacity of public transport on streets - working paper. *Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)*.
- Weidmann, U., R. Dorbritz, H. Ort, M. Scherer and P. Spacek (2011) Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen. *Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)*.
- Weidmann, U., U. Kirsch and E. Puffe (2012b) Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und Fussgängerverkehrs. *VSS2007/306*.
- Yang, H., and J. Zhou (1998) Optimal traffic counting locations for origin-destination matrix estimation. *Transportation Research Part B* 32(2):109–126
- Yildirimoglu, M., and N. Geroliminis (2014) Approximating dynamic equilibrium conditions with macroscopic fundamental diagrams. *Transportation Research Part B*, 70:186-200.
- Zheng N, R. Waraich, K. Axhausen, and N. Geroliminis (2012) A dynamic cordon pricing scheme combining the macroscopic fundamental diagram and an agent-based traffic model. *Transportation Research Part A* 46(8):1291–130
- Zheng, N., and N. Geroliminis (2013) On the distribution of urban road space for multimodal congested networks. *Transportation Research Part B*, 57:326-341.

Zheng, N., K. Aboudolas, and N. Geroliminis (2013) Investigation of the existence of city-scale three-dimensional macroscopic fundamental diagrams for bi-modal traffic. *Proceedings of the 16th IEEE Conference on Intelligent Transportation System*, The Hague, The Netherland, 1029–1034.

NORMEN

SN 640017a (1998) Norm SN 640017a - Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Grundlagennorm, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich

SN 640018a (2006) Norm SN 640018a - Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Freie Strecke auf Autobahnen, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich

SN 640019 (1999) Norm SN 640019 - Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Einfahrten in Hochleistungsstrassen, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich

SN 640020a (2010) Norm SN 640020a - Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Zweistreifige Strassen ohne bauliche Richtungstrennung, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich

SN640022 (1999) Norm SN 640022 - Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Knoten ohne Lichtsignalanlage, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich

SN 640023a (2008) Norm SN 640023a - Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Knoten mit Lichtsignalanlage, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich

SN 640024a (2006) Norm SN 640024a - Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Knoten mit Kreisverkehr, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich

SN 641825 (2009) Norm SN 641825 – Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr; Bewertung und Abschätzung der Zuverlässigkeit.

Projektabschluss

Formular 3 ARAMIS SBT als PDF (Das Formular einscannen, dann das PDF öffnen und dann mit dem Schnappschuss-Werkzeug (Fotoapparat) die Seiten markieren und dann hier einfügen).

 <p>Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra</p>	<p>Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Bundesamt für Strassen ASTRA</p>
<p>FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK</p> <p>Formular Nr. 3: Projektabschluss</p>	
<p>Version vom 09.10.2013</p>	
<p>erstellt / geändert am: 18.03.2016</p>	
<p>Grunddaten</p>	
Projekt-Nr.:	SVI 2004/032
Projekttitel:	NETCAP: Intermodale Strecken- / Linien- und Netzleistungsfähigkeit
Enddatum:	September 2015
<p>Texte</p>	
<p>Zusammenfassung der Projektergebnisse:</p>	
<p>In urbanen Räumen bewegen sich mehr und mehr Menschen multimodal. Es steigt deshalb das Interesse, zu verstehen, wie der Raum optimal genutzt werden kann. Informationen über den Zustand des Verkehrssystems können der Verkehrssteuerung in Echtzeit zugeführt werden und damit die Regulierung der Verkehrslage in Städten unterstützen. Dadurch kann das Stauvolumen reduziert werden.</p> <p>Um diese Möglichkeiten tatsächlich nutzen zu können, ist ein neuer, ganzheitlicher Ansatz zur Überwachung und Kontrolle der städtischen Netzwerke nötig. Jüngste Fortschritte haben die Grundlagen dazu geschaffen. Ein prominentes Modell ist das makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD). Das MFD wurde ursprünglich für einzelne Verkehrsmodi (z.B. Autos) entwickelt. Mittlerweile gibt es aber auch Formen, die verschiedene Transportmodi gleichzeitig berücksichtigen. In diesen 3D-MFD wird bspw. die Verkehrsdynamik in Netzwerken abgebildet, in denen auch öffentliche Verkehrsmittel verkehren und den Strassenraum mitbeanspruchen. Mithilfe des 3D-MFD können Städte den Zielkonflikt zwischen verschiedenen Betriebsmöglichkeiten des Strassennetzes verstehen und quantifizieren. Zusätzlich erleichtert das 3D-MFD die Auswertung der Zuordnung von Strassenraum und dient als ein quantitatives Werkzeug für die Entscheidung, wie viel Strassenraum Autos und dem öffentlichem Verkehr zugeordnet werden soll.</p> <p>Im Projekt NetCap werden MFDs genutzt, um die Netzwerkkapazität urbaner Räume zu quantifizieren und zu beurteilen. Der erste Teil des Projektes beschreibt die wichtigsten Charakteristiken des unimodalen MFD (nur Autos). Zwei Methoden werden beschrieben, wie das MFD generiert werden kann; einerseits mit Hilfe von echten Daten (Zählstationen und/oder Floating Car Data) und andererseits durch Simulation (hier VISSIM). Es wird auch eine Methodik präsentiert, wie die Genauigkeit der MFDs beurteilt werden kann, wenn die Informationen nicht für das gesamte Netzwerk vorliegen. Zum Schluss des ersten Teils werden Strategien vorgeschlagen, wie Überwachungsressourcen eingesetzt werden können, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen.</p> <p>Der zweite Teil des Projektes widmet sich der Herleitung des 3D-MFDs, das nicht nur Autoverkehr, sondern auch öffentlichen Transport abbildet. Die 3D-MFDs für die Städte Zürich und San Francisco werden präsentiert, welche aus Simulationen erhalten wurden. Zusätzlich erklären wir, wie sich die Form und Charakteristiken ändern, wenn sich Netzwerkeigenschaften ändern. Wir analysierten den Fall von separaten Busspuren, sowie den Fall von Priorisierungssystemen. Schliesslich untersuchten wir auch den Effekt, den Fussgänger und Fahrradfahrer auf das 3D-MFD haben.</p> <p>Dieses Projekt wurde mit Mikrosimulationen durchgeführt. Die Genauigkeit der Simulationen sollte erhöht werden, indem dynamische Nachfragen verwendet werden, welche mit der agenten-basierten Verkehrssimulation MATSim erzeugt wurden. Dies stellte neue Anforderungen an die Simulationen in MATSim. So musste in einem neuen, echt-multimodalen Netz der ÖV mit dem MIV zusammengebracht und auf einem geteilten Netz abgebildet werden.</p>	
<p>Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3</p>	
<p>Seite 1 / 3</p>	



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die Ziele des Projekts wurden erreicht. Gemäss unserem Wissen ist es die erste Guideline zu einer makroskopischen Betrachtungsweise von städtischem Strassenverkehr. Schweizer Praktiker erhalten eine erste Übersicht des jetzigen Stand der Forschung und können anhand dieser Guidelines makroskopische Modelle benutzen, um intermodale Kapazitäten zu berechnen oder um einen grossflächigen Verkehrskontrollmechanismus zu implementieren.

Folgerungen und Empfehlungen:

Diese Guidelines sind ein wichtiger erster Schritt in die Richtung einer makroskopischen Betrachtungsweise des städtischen Strassenverkehrs. Allerdings steht auch die Forschung noch am Anfang und es gilt auch in Zukunft Projekte in diesem sehr zukunftsreichen Bereich zu verwirklichen. Unserer Meinung nach sind zwei Elemente zentral dafür:

- Überprüfung des Ansatzes mit realen Daten.
- Untersuchung realer Daten von Städten und Unternehmen.

Publikationen:

Ortigosa, J., N. Zheng, M. Menendez, and N. Geroliminis (2015). Analysis of the 3D-VMFs of the urban networks of Zurich and San Francisco, in proceedings: IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Las Palmas de Gran Canaria, Spain.

Bösch, P.M., and F. Ciari (2015). A Multi-Modal Network for MATSim, in: 15th Swiss Transport Research Conference, Ascona.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Menendez

Vorname: Monica

Amt, Firma, Institut: ETHZ, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das Forschungsteam hat mit der vorliegenden Arbeit ein wichtiges und herausforderndes Thema aufgegriffen. Wer sich eingehend mit dem urbanen Verkehr und dessen betrieblichen Aspekten auseinandersetzt, wird unweigerlich feststellen, dass unser methodisches Wissen darüber erst in den Anfängen steht. Die heutige Normierung und die damit verbundene Praxis ist inhaltlich mehrheitlich unimodal (z. B. Leistungsfähigkeitsbeurteilungen bezüglich MIV, allenfalls unter vereinfachter Berücksichtigung des ÖV) und auf eine lokale Optik beschränkt (z. B. einzelne Kreuzung, Strassenzug). Dies wird der Komplexität städtischer Verkehrssysteme und dabei insbesondere der Problematik der Aus- und Überlastung und damit verbundenen Instabilitäten nicht oder nur bedingt gerecht.

Das Forschungsteam hat sich dieser Komplexität und der damit verbundenen Herausforderung gestellt und einen ersten Schritt in Richtung Analyse, Beurteilung und zielgerichteter Beeinflussung von urbanen Verkehrssystemen gemacht. Die Forschungsarbeit liefert neue Erkenntnisse über das betriebliche Zusammenwirken von MIV und ÖV in komplexen und zuweilen überlasteten Verkehrsnetzen. Diese werden zwar aus der Sicht der Praxis noch nicht unmittelbar zu einer nachhaltigen Gestaltung der multimodalen Verkehrssysteme beitragen, was in Kenntnis des Forschungsgegenstandes nachvollziehbar ist. Daher ist es offensichtlich, dass es für eine anwendungsorientierte Grundlage noch etliche weitere Schritte benötigt.

Umsetzung:

Die Wahl des Makrofundamentaldiagramms als zentrale Methodik ist sehr pragmatisch und trägt insbesondere den Aspekten grosser Verkehrsnetze wie auch der Aus- und Überlastung Rechnung. Darüber hinaus lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse mit dem Einbezug verschiedener Nachfrage- und Simulationsmodelle auf eine doch breite und Software-unabhängige Basis abstützen. Die Verbindung von MATSim mit VISSIM stellt einen innovativen Entwicklungsschritt dar. Insgesamt hat das Forschungsteam das Potential der eingesetzten Grundlagen und Methoden optimal ausgeschöpft. Eine Validierung der Resultate mit effektiven Daten wäre sehr wünschenswert gewesen, doch standen solche Grundlagen nicht zur Verfügung. Im Fokus der Arbeiten stand der urbane Verkehr, was aus regionaler und nationaler Sicht etwas unausgewogen zu erscheinen vermag. Doch aus der Analyse des urbanen Verkehrs gewonnene Erkenntnisse kommen auch dem regionalen und nationalen Verkehr zugute.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die vorliegende Forschungsarbeit stellt einen ersten Schritt in Richtung eines vertieften Verständnisses des multimodalen urbanen Verkehrs dar. Für ein erfolgreiches Fortschreiten auf diesem Weg sind folgende Themen zentral:

- Feldtests zur Validierung der modellgestützten Analyseerkenntnisse
- Weiterführung der angefangenen Arbeiten in Richtung Multimodalität (insbesondere integraler Einbezug des Fuss- und Veloverkehrs)
- Weiterentwicklung der Methodik zur Praxistauglichkeit, angesichts des von Einzelprojekten geprägten Planungsaltags der Behörden

Einfluss auf Normenwerk:

Die vorliegende Forschungsarbeit stellt einen ersten Schritt dar. Von dieser methodisch ausgerichteten Arbeit bis hin zu anwendungsorientierten Normen sind im Sinne des weitergehenden Forschungsbedarfs noch etliche Arbeiten zu leisten.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Heimgartner

Vorname: Christian

Amt, Firma, Institut: Roland Müller Küsnacht AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Dienstleistungen --> Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.

SVI Publikationsliste

Die Liste kann bei der [SVI](#) bezogen werden.