



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

Bestimmung der Verkehrsnachfrage für überlastete Strassen im urbanen Raum

Détermination de la Demande de Trafic pour Routes encombrées en Zones Urbaines

Estimation of traffic demand for oversaturated urban networks

Roland Müller Küsnacht AG
Dr. Christian Heimgartner
Angelo Orlando

ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Strassenverkehrstechnik
Prof. Dr. Monica Menendez
Dr. Qiao Ge
Dr. Mireia Roca-Riu
Dr. Lukas Ambühl
Igor Dakic

TomTom Development Germany
Oliver Kannenberg
Peter Mieth

Prof. Dr. Nikolas Geroliminis

Forschungsprojekt SVI 2016/003 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

September 2021

1708

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)



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

Bestimmung der Verkehrsnachfrage für überlastete Strassen im urbanen Raum

Détermination de la Demande de Trafic pour Routes encombrées en Zones Urbaines

Estimation of traffic demand for oversaturated urban networks

Roland Müller Küsnacht AG
Dr. Christian Heimgartner
Angelo Orlando

ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Strassenverkehrstechnik
Prof. Dr. Monica Menendez
Dr. Qiao Ge
Dr. Mireia Roca-Riu
Dr. Lukas Ambühl
Igor Dakic

TomTom Development Germany
Oliver Kannenberg
Peter Mieth

Prof. Dr. Nikolas Geroliminis

Forschungsprojekt SVI 2016/003 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

September 2021

1708

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Christian Heimgartner

Mitglieder

Prof. Dr. Monica Menendez
Prof. Dr. Nikolas Geroliminis
Angelo Orlando
Alex Stahel
Dr. Qiao Ge
Dr. Mireia Roca-Riu
Dr. Lukas Ambühl
Igor Dakic
Oliver Kannenberg
Peter Mieth

Begleitkommission

Präsident

Danièle Müller

Mitglieder

Dr. Nikolaus Bischofberger
Barbara Burger
Gian Dönier
Steven Kappeler
Natascia Morenzoni
Marco Richner
Bence Tasnady
Markus Bartsch

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 Ausgangslage, Anlass und Motivation	13
2 Forschungsfrage und Forschungsziel	15
3 Vorgehen	17
4 Auslegeordnung	19
4.1 Stand der Technik und Wissenschaft	19
4.1.1 Verkehrsübersättigung – Stau	20
4.1.2 Verkehrsdaten	20
4.1.3 Kalibration und Sensitivitätsanalyse von Verkehrsmodellen	21
4.2 Übersicht über die Bedürfnisse der Praxis	22
4.2.1 Typische Frage- und Aufgabenstellungen im Projektalltag	22
4.2.2 Überblick über die Erhebungspraxis	22
4.2.3 Rolle der Überlasteffekte in der Erhebungspraxis	24
4.3 Fazit	24
5 Herleitung einer Methodik	25
5.1 Wissenschafts- versus anwendungsgetrieben	25
5.2 Wissenschaftsgetriebener Ansatz	25
5.2.1 Konzeption der Methodik	26
5.2.2 Testanwendung der konzipierten Methodik	28
5.2.3 Validierung der Methodik	31
5.2.4 Synthese	33
5.3 Anwendungsgetriebener Ansatz	33
5.3.1 Konzeptionelle Erkenntnisse	34
5.3.2 Erkenntnisse aus dem Datensatz	36
5.3.3 Konzeption der Methodik	40
5.3.4 Testanwendung der konzipierten Methodik	42
5.3.5 Vertiefung ergänzender Aspekte	51
5.3.6 Synthese	54
6 Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick	57
Anhänge	59
Glossar	65
Literaturverzeichnis	67
Projektabschluss	69

Zusammenfassung

Der Verkehrsfluss in urbanen Verkehrssystemen bewegt sich insbesondere in den Hauptverkehrszeiten meist an oder gar über der Kapazitätsgrenze. Die Folge davon sind stockender Verkehr und Staus. Die analytische Beurteilung solcher Verkehrssysteme im Rahmen von Projekten sieht sich dabei mit speziellen Herausforderungen konfrontiert: Wird etwa in überlasteten Systemabschnitten die Verkehrsnachfrage durch Zählung erfasst und diese den Berechnungen der Leistungsfähigkeit mit statischen Verfahren oder Verkehrsflusssimulationsmodellen zugrunde gelegt, so wird es damit nicht gelingen, die Überlasteffekte rechnerisch reproduzieren zu können: Aufgrund der infolge der Überlast reduzierten Verkehrsflüsse wird sich in den Berechnungen kein Stau zeigen, weil die Verkehrsflüsse eben gerade tief sind, was für die Beurteilung entsprechender Projekte fatal ist. Wie aber lassen sich Überlasteffekte und damit einhergehende Rückstaus bei infolge der Überlast reduzierten Verkehrsflüssen rechnerisch reproduzieren?

Hierzu wurde je mit einem wissenschaftsgetriebenen und einem anwendungsgetriebenen Ansatz eine Methodik entwickelt, welche die Berücksichtigung und Reproduzierbarkeit von Überlasteffekten bei der rechnerischen Analyse erlaubt.

Der wissenschaftsgetriebene Ansatz wurde auf Basis einer Methode entwickelt, die eine makroskopische Perspektive aufzeigt. Eine solche erlaubt es, mittels globaler Kennwerte wie der Durchschnittsgeschwindigkeit und dem durchschnittlichen Verkehrsfluss zu kalibrieren. Dadurch verringert sich der Kalibrierungsaufwand signifikant. Eine solch aggregierte Sichtweise liefert das makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD), welches die durchschnittliche Verkehrsdichte und den durchschnittlichen Verkehrsfluss in einem relativ homogenen Gebiet zusammenfasst. Grundsätzlich werden die gemessenen, empirischen MFD Punkte mit dem simulierten MFD verglichen. Dabei wird nach Punkten im simulierten MFDs gesucht, die am ehesten mit den empirischen MFD-Punkten übereinstimmen. Die entsprechend skalierte Nachfrage der MFD-Simulation stellt die gesuchte latente Nachfrage dar.

Der anwendungsgetriebene Ansatz wurde auf Basis eines umfangreichen Datensatzes, der im Rahmen eines effektiven Projektes zur Verfügung stand und Detektor-Zählungen, Grünzeiten wie auch Geschwindigkeitsprofile umfasste, entwickelt. Im Kern stützt die Methodik auf die abschnittsweise Bilanzierung der jeweiligen Zu- und Abflüsse ab, nachdem zunächst die Lage der Stauwurzel identifiziert wurde. So lässt sich für jeden Abschnitt herleiten, ob der Verkehrsfluss behindert ist und mit Stauwirkungen einhergeht oder ob er ungehindert abgewickelt werden kann. Bei lichtsignalgesteuerten Knoten sind dabei nebst Zählungen auch die Grünzeiten zu beachten. Ist etwa der nachfolgende Abschnitt überlastet, so kann dies zur Folge haben, dass die am vorgelagerten Knoten verfügbare Grünzeit nicht genutzt werden kann. Oder aber die Grünzeiten werden als Folge des Staus im nachfolgenden Abschnitt gezielt reduziert. Insbesondere wenn Geschwindigkeitsprofile oder sonstige Grundlagen für eine Aussage zur Reisezeit auf den einzelnen Abschnitten zur Verfügung stehen, sind mittels Schätzung der Routenwahl auch grobe Aussagen zu Verkehrsverlagerungen möglich.

Mit den im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten und getesteten Methoden stehen neue Instrumente, die eine wesensgerechte Berücksichtigung von Überlasteffekten erlauben, zur Verfügung. So wird es im Rahmen von Verkehrsflusssimulationsstudien möglich, gestützt auf das Makrofundamentaldiagramm jene Zuflüsse zu bestimmen, die eine Erzeugung der Überlasteffekte im abgebildeten Verkehrssystem erlaubt. Aber auch durch eine gezielte und abschnittsweise Analyse jeweiliger Zu- und Abflüsse lässt sich auf praktische Weise ein rechnerisches Bild der Überlast und deren Effekte gewinnen. Voraussetzung in beiden Fällen ist ein kombiniertes Abstützen sowohl auf Verkehrszählungen als auch auf Daten zur Verkehrsdichte. Nur so lässt sich letztlich differenzieren, ob ein bestimmter Verkehrsfluss, der unterhalb der Kapazitätsgrenze liegt, als Folge von Überlasteffekten reduziert ist oder nicht. Im Hinblick auf eine erfolgreiche Planung und Umsetzung von Projekten ist es essentiell, dass man sich von Beginn weg diese Aspekte vor Augen führt.

Résumé

La circulation dans les systèmes de mobilité urbaine atteint ou dépasse fréquemment les limites de capacité, en particulier aux heures de pointe. Il en résulte une circulation ralentie et des embouteillages. L'analyse de tels systèmes dans le cadre de projets de réaménagement se trouve confrontée à des défis particuliers: par exemple, la demande dans les sections surchargées est souvent définie en comptant les usagers, et ces chiffres serviront ensuite à déterminer le débit maximal à l'aide de méthodes statiques ou des modèles de simulation de flux de trafic. Pourtant, ainsi, une reproduction mathématique des effets de surcharge restera sans succès: En raison de la réduction des flux en raison de la surcharge, les calculs n'indiqueront aucun embouteillage car justement les flux de trafic sont faibles, ce qui ne permettra pas l'évaluation d'un projet. Mais comment reproduire mathématiquement les effets de surcharge et les retards qui en découlent lorsque les flux sont ainsi réduits en raison d'une surcharge?

À cette fin, nous avons développé une méthode basée sur deux approches: une scientifique, une empirique, basée sur les observations. D'une combinaison des deux, la méthodologie résultante permet de prendre en compte et de reproduire les effets de surcharge dans l'analyse numérique.

L'approche scientifique a été développée sur la base d'une méthode qui désigne une perspective macroscopique. Celle-ci permet de calibrer le débit moyen du trafic à l'aide de paramètres globalement standardisés tels que vitesses et flux moyens. Ainsi se réduit considérablement l'effort requis par la calibration. Une telle vue agrégée est fournie par le diagramme fondamental macroscopique (MFD), qui résume la densité de trafic moyenne et le flux de trafic moyen pour une zone relativement homogène. Les points MFD empiriques mesurés sont alors comparés au MFD simulés en recherchant les points dans le MFD simulé qui correspondent au mieux aux points MFD empiriques. La demande échelonnée correspondante issue de la simulation MFD représente la demande larvée recherchée.

L'approche basée sur les applications a été, elle, développée sur la base d'un ensemble de données rendu disponible dans le cadre d'un projet réalisé et qui comprend les chiffres issus du comptage des détecteurs de véhicules, de la longueur des phases vertes des feux, et des profils de vitesse. Essentiellement, cette méthodologie est basée sur le comptage, pour chaque section de voirie, des affluences et découlements respectives, une fois l'origine de l'embouteillage localisé. Ainsi, il peut être déterminé pour chaque section si le flux de trafic y est obstrué, s'il y a un embouteillage, ou s'il y aura un flux sans entrave. Dans le cas de croisements à feux tricolores, en plus des données de comptage, les longueurs des périodes "vertes" doivent également être pris en compte. Si, par exemple, la section suivante est surchargée, cela peut signifier que les périodes vertes disponibles au croisement amont ne pourront pas être utilisés – ou que les périodes vertes seront alors réduits pour cause d'embouteillages dans la section suivante. En particulier, si des profils de vitesse ou d'autres bases quantitatives pour une estimation du temps de trajet dans des sections spécifiques sont disponibles, des estimations sur une redistribution des flux pourront être basés sur une estimation de variances dans les sélections d'itinéraires.

Les méthodes développées et testées dans le cadre de ce travail de recherche ont permis la création de nouveaux instruments permettant une prise en compte adéquate des effets de surcharge: Dans le cadre des études de simulation de flux de trafic, il est possible, à partir du diagramme macro-fondamental, de déterminer les flux à l'origine des effets de surcharge dans le système de trafic représenté. De même, à travers une analyse ciblée des affluences et écoulements respectives section par section, une image numérique de la surcharge et de ses effets pourra être obtenue. Une condition préalable dans les deux cas est une base combinée à la fois des données de comptage du trafic et des données sur la densité du trafic. C'est là le seul moyen de différencier si un flux donné, inférieur à la limite de capacité, sera réduit ou non en raison des effets de surcharge. Afin de réussir la planification et la mise en œuvre de projets, il est donc essentiel de prendre en compte ces aspects dès le tout début.

Summary

Traffic flow in urban transportation systems is usually at or even above capacity, especially during rush hours. The result is traffic gridlock and congestion. The analytical assessment of such traffic systems in practice is confronted with particular challenges: For example, in most transportation simulations, traffic demand is measured by traffic counts. Therefrom, however, it is not possible to reproduce the effects of congestion. This is because traffic flows in congestion are low, which is fatal for the evaluation of corresponding projects. Yet how can congestion effects and the associated spillbacks be reproduced computationally when the measured traffic flows are reduced as a result of the congestion?

For this purpose, a methodology was developed using a scientific and an applied approach, that account for and reproduce the effects of congestion in a simulation.

The scientific approach was developed based on a methodology that uses a macroscopic perspective. Such a perspective allows the calibration using global parameters such as average speed and average traffic flow. This significantly reduces the calibration efforts. Such an aggregated view is provided by the macroscopic fundamental diagram (MFD), which summarizes the average traffic density and the average traffic flow in a relatively homogeneous neighborhood. The measured, empirical MFD points are compared to the simulated MFDs from many different demand scalings. This involves identifying points in the simulated MFDs that correspond best to the empirical MFD points. The corresponding scaled demand from the MFD simulation represents the latent demand being sought.

The applied approach was developed based on an extensive dataset available from a project that included detector count data, green times as well as speed profiles. At its core, the methodology relies on section-by-section accounting of the respective inflows and outflows after first identifying the location of the congestion root. In this way, it is possible to derive for each section whether the traffic flow is constrained and involves congestion effects or whether it can be handled unconstrained. In the case of traffic signal-controlled intersections, green times must be taken into account in addition to counting data. If, for example, the subsequent section is congested, this may affect the green time available at the upstream intersection cannot be used. Or, green times may be deliberately reduced as a result of congestion in the downstream section. In particular, if speed profiles or other data are available for a calculation of the travel time on the individual sections, it is possible to make rough approximations of traffic distribution by estimating the route choice.

With the methods developed and tested within the scope of this research work, new instruments are made available that allow consideration of congestion effects in simulations. Thus, in the context of traffic flow simulation studies, it is possible to determine those inflows based on the macroscopic fundamental diagram that allows the generation of congestion effects in the modeled traffic system. Alternatively, a specific and section-by-section analysis of the respective inflows and outflows can be used to obtain a computational representation of the congestion and its effects in a practical manner. The prerequisite in both cases is a combined reliance on both traffic count data and traffic density data (or speed data). This is the only way to ultimately differentiate whether or not a particular traffic flow is reduced as a result of congestion effects. In terms of successful project planning and implementation, it is essential to keep these aspects in mind from the very beginning.

1 Ausgangslage, Anlass und Motivation

Die Verkehrsnachfrage ist eine wichtige Grundlage für die Dimensionierung und den Entwurf von Verkehrsanlagen. Nicht nur beim nachfrageorientierten, sondern auch beim angebotsorientierten Ansatz ist die Erhebung und Bestimmung der Verkehrsnachfrage erforderlich, um das Verkehrsmanagement planen und konzipieren zu können. Die realitätsnahe Simulation der Nachfrage ist erforderlich, um Projektvarianten beurteilen und deren Auswirkungen (Rückstau etc.) möglichst exakt bestimmen zu können.

In überlasteten Strassennetzen, wie sie heute vielfach in Städten und Agglomerationen der Schweiz anzutreffen sind, wird mit den klassischen Erhebungsmethoden (Querschnittszählungen, Knotenstromerhebungen) nicht die Nachfrage im Motorfahrzeug-Verkehr, sondern das Angebot des Verkehrssystems erhoben. Teilweise werden daher auch der Rückstau und selten auch Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten (Floating Car Data (FCD)) erhoben. Jedoch sind die Zusammenhänge zwischen Angebot und Nachfrage respektive die Wechselwirkungen zwischen Kapazität, Rückstau sowie Verkehrsfluss (Dichte, Geschwindigkeiten) bei überlasteten Netzen noch wenig untersucht.

Auch zeigt die Erfahrung, dass aufgrund der Zweideutigkeit der Verkehrsmengen in Bezug auf die Verkehrsdichte (vgl. *Abb.1*) bei Verkehrsflusssimulationen die realen Verhältnisse nicht richtig abgebildet werden: Die Rückstaus sind zu gering und die Geschwindigkeiten zu hoch. Zwar können mit der Variation der Zuflüsse in der Simulation die tatsächlichen Rückstaulängen reproduziert werden, diesem Vorgehen fehlt jedoch die wissenschaftliche respektive methodische Grundlage.

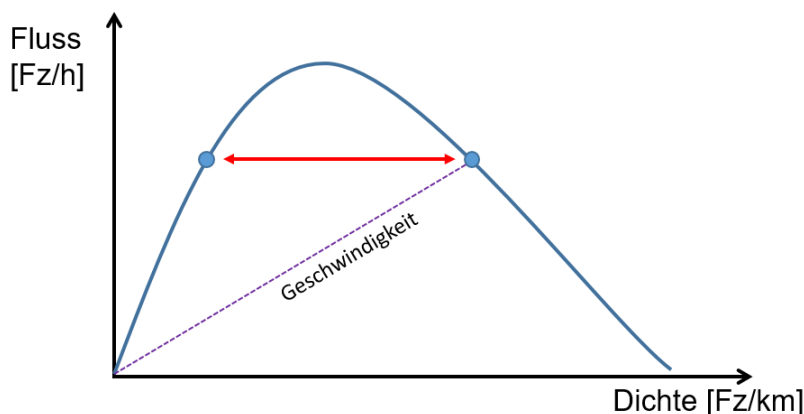


Abb.1 Die Ambivalenz von Verkehrsmengen

Ein konkretes Beispiel, das diese Problematik beispielhaft illustriert, ist das Verkehrsflusssimulationsmodell der Zürcher Innenstadt (Dienstabteilung Verkehr (2012)). Dieses in PTV Vissim etablierte Simulationsmodell bildet den öffentlichen Verkehr (ÖV) und den motorisierten Individualverkehr (MIV) mitsamt den Signalplänen der Stadt Zürich exakt nach. Nachfrageseitig wurde auf das Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich (GVM-ZH, vgl. Kanton Zürich (2010)) abgestützt und dabei die Quell-Ziel-Verkehrsflüsse inklusive Route über die Schnittstelle von PTV Visum nach PTV Vissim importiert. Das GVM-ZH seinerseits weist im betrachteten Perimeter eine hohe Kalibrationsgüte auf. Bei der Etablierung des Simulationsmodells der Zürcher Innenstadt stand der Anspruch im Raume, dieses sowohl auf die Verkehrsmengen als auch die Geschwindigkeiten respektive Reisezeiten zu kalibrieren. Als Grundlage hierfür dienten auf Seite der Verkehrsdaten die Zählraten der Zählstellen als auch FCD aus dem TomTom Traffic Stats Portal. Angesichts der zahlreichen Parameter in PTV Vissim wurden mittels einer Sensitivitätsanalyse diejenigen Parameter identifiziert, deren Veränderung eine signifikante Auswirkung auf die Simulationsergebnisse hat. Auf dieser Basis wurde das Simulationsmodell kalibriert. *Abb.2* zeigt den Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und den effektiv erhobenen Werten bezüglich Anzahl Fahrzeuge an den Erhebungsquerschnitten wie auch der Geschwindigkeiten auf

ausgesuchten Abschnitten im abgebildeten Verkehrssystem. Dabei wird ersichtlich, dass es mit der Kalibration zwar gelang, den gezählten Fahrzeugmengen zu entsprechen, nicht aber den erhobenen Geschwindigkeiten. Die Vermutung liegt nahe, dass die Diskrepanz bei der Geschwindigkeit darauf zurückzuführen ist, dass die Dichte im Simulationsmodell zu tief ist respektive mit den hinterlegten Verkehrsflüssen die real beobachtbaren Rückstaueffekte im Modell nicht zu Tage treten.

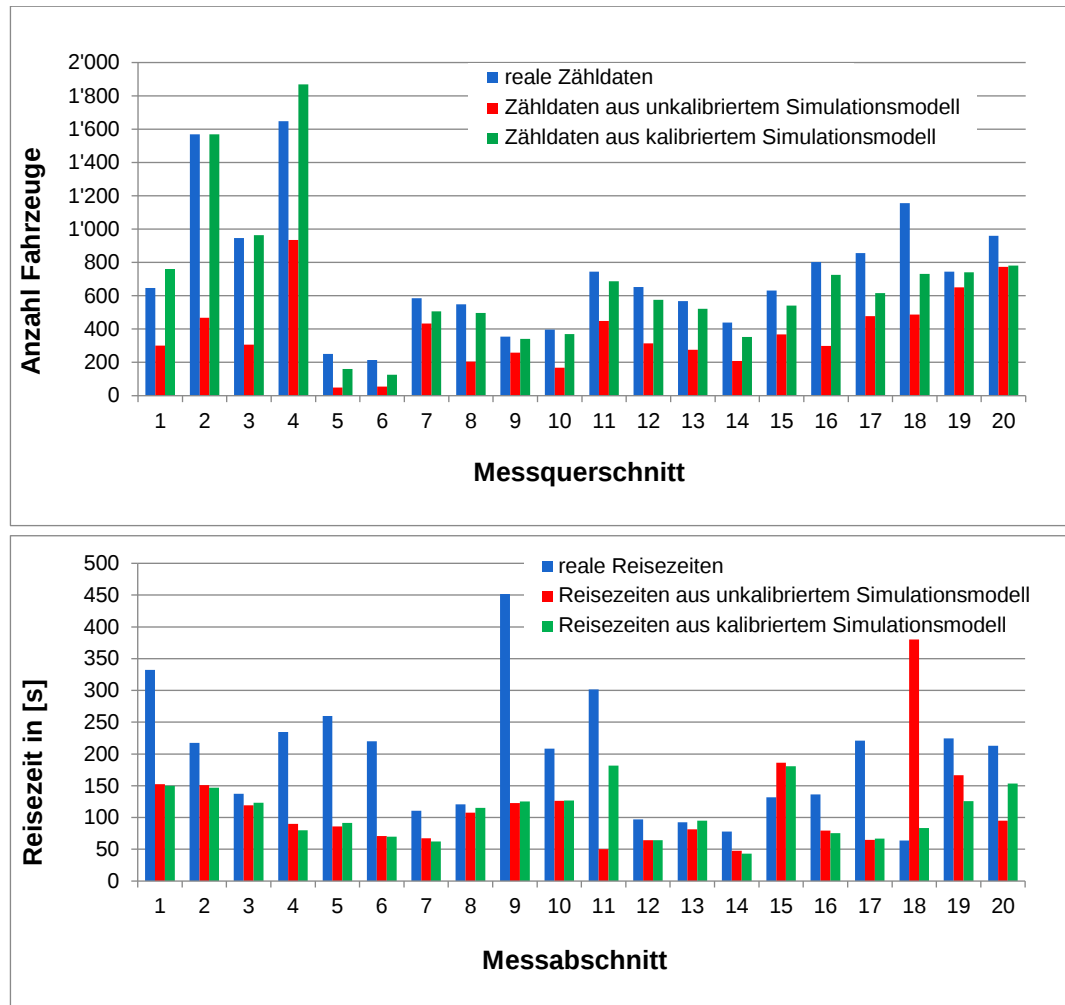


Abb.2 Herausforderungen zur Nachbildung der Effekte überlasteter Strassen; Quelle: Heimgartner und Menendez (2013)

Es stellt sich somit die Frage, wie die tatsächliche Verkehrsnachfrage als Grundlage für Verkehrs- und Strassenprojekte im urbanen Raum erhoben und für die Beurteilung von Projektvarianten und Ermittlung deren Auswirkungen realitätsnah modelliert werden kann.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es aktuell keine fundierte Methodik gibt, die praxisnah einen robusten Umgang mit Analysen und der Modellierung des Verkehrsflusses in überlasteten Systemen erlaubt. Angesichts der betrieblichen Relevanz von Stauereffekten ist jedoch die Motivation, hierfür eine entsprechende Methodik bereitzustellen, entsprechend hoch.

2 Forschungsfrage und Forschungsziel

Wenn auch Stauphänomene an der Tagesordnung sind, so erschliessen sich deren systemischen Effekte nicht von vornherein und intuitiv. In Abb.3 sind stellvertretend für die Stauereffekte im Strassensystem die Zusammenhänge zwischen Zu- und Abfluss und dem Pegelstand einer Wasserwanne dargestellt.

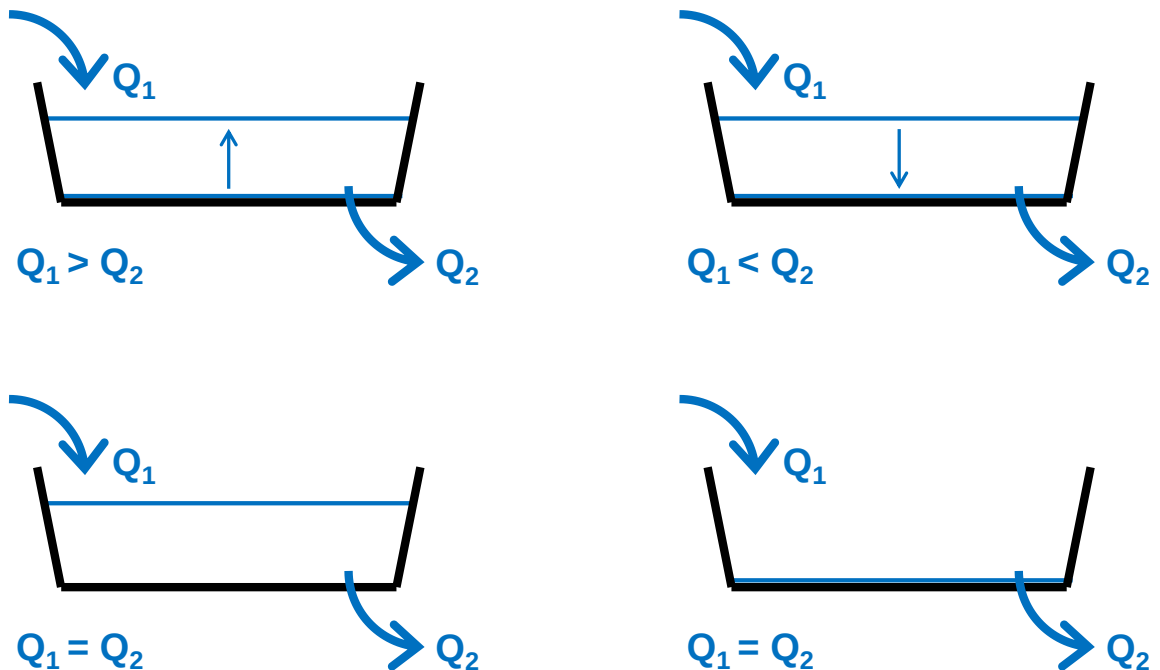


Abb.3 Zusammenhänge zwischen Zu- und Abfluss und Pegelstand einer Wanne

Daraus wird folgendes ersichtlich:

- Bei konstanten Zu- und Abflüssen Q_1 und Q_2 und Zufluss $Q_1 > \text{Abfluss } Q_2$ steigt der Pegel kontinuierlich an.
- Bei konstanten Zu- und Abflüssen Q_1 und Q_2 und Zufluss $Q_1 < \text{Abfluss } Q_2$ sinkt der Pegel kontinuierlich ab.
- Bei konstanten Zu- und Abflüssen Q_1 und Q_2 und Zufluss $Q_1 = \text{Abfluss } Q_2$ verbleibt der Pegel auf konstanter Höhe.
- Nach einer Phase mit konstanten Zu- und Abflüssen Q_1 und Q_2 und Zufluss $Q_1 > \text{Abfluss } Q_2$ reicht Zufluss $Q_1 = \text{Abfluss } Q_2$ aus, um den Pegelstand auf gleicher Höhe zu halten.
- Zur Beschreibung des Systemzustands reicht die Kenntnis der Zu- und Abflüssen Q_1 und Q_2 nicht aus, sondern es bedarf zusätzlich der Kenntnis des Pegelstands.
- Zur Erklärung des aktuellen Pegelstands reicht die Kenntnis der aktuellen Zu- und Abflüssen Q_1 und Q_2 nicht aus, sondern es bedarf zusätzlich der Kenntnis der davorliegenden Zu- und Abflüssen Q_1 und Q_2 und Pegelstände.

In der Übertragung auf den Strassenverkehr gilt das Analoge für die Verkehrsflüsse, die bei Engstellen (z. B. Knoten) zu- und abfließen, und die damit in Verbindung stehenden Rückstauereffekten (z. B. vor dem Knoten). Angesichts dessen stellen sich für die forschungsbasierte Etablierung einer entsprechenden Methodik folgende Forschungsfragen:

- Wie können die Zusammenhänge und Wechselwirkungen von Verkehrsangebot und -nachfrage in überlasteten Verkehrssystemen im urbanen Raum verkehrstechnisch beschrieben werden?

- Welche Wechselwirkungen bestehen zwischen Zufluss/Abfluss, Kapazität (Knoten, Strecke), Verkehrsdichte/Geschwindigkeiten und Rückstau in überlasteten Systemen?
- Wie können die Verkehrsströme angesichts des Zusammenhangs zwischen Fluss und Dichte bestimmt werden?
- Wie kann mit möglichst geringem Erhebungsaufwand eine robuste quantitative Verkehrsmengengrundlage für Projektierungsarbeiten in urbanen Überlastsystemen geschaffen werden?
- Welche Daten und Grundlagen sind hierzu erforderlich respektive was muss dazu wann und wo erhoben werden?
- Wie müssen diese Daten und Grundlagen analytisch verwertet werden?
- Welche Regeln sollen in der Praxis der Verkehrsmodellierung, insbesondere bei der Anwendung von mikroskopischer Verkehrssimulation beachtet werden, damit die Verkehrsnachfrage in überlasteten urbanen Strassenräumen realistisch abgebildet wird?
- Ist es etwa ausreichend, in Anlehnung an *Abb.4* an spezifischen Querschnitten und in Knoten die Verkehrsflüsse zu erheben?

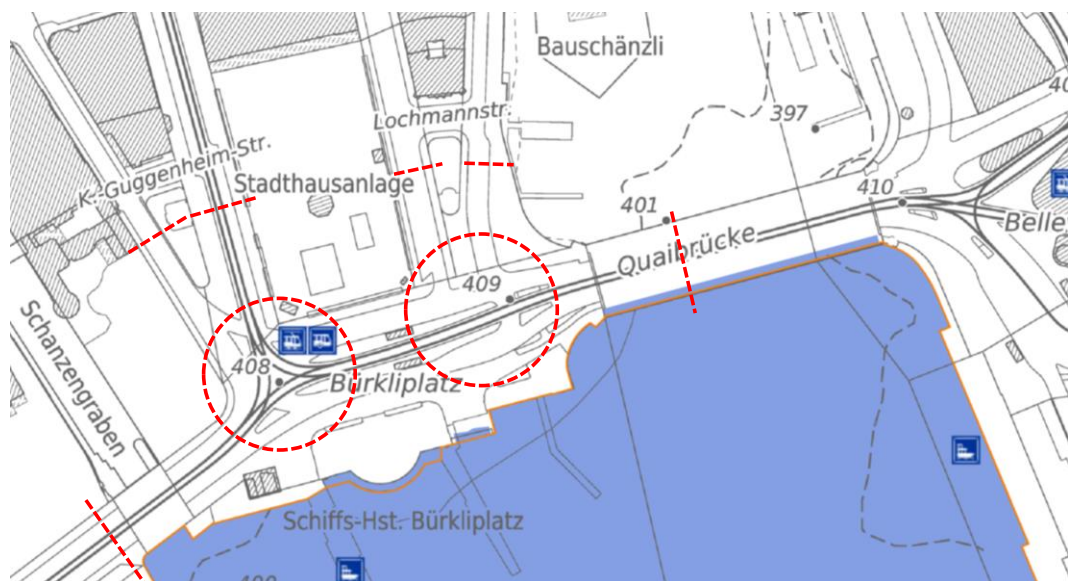


Abb.4 Erhebung von Querschnittsbelastungen und Knotenströmen; Quelle Hintergrundplan: GIS-Browser Kanton Zürich (2020)

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist somit wie folgt gesteckt:

Ein **Verfahren** und eine damit verbundene **praxisnahe Methodik** zur **Bestimmung der Verkehrsnachfrage** als Grundlage für quantitative Analysen und die Modellierung im Rahmen der **alltäglichen Projektarbeit** sind konzipiert und erprobt. Die Methodik erfüllt dabei folgendes **Anforderungsprofil**:

- **Reproduzierbarkeit von real beobachteten Verkehrsströmen** unter Überlast mittels analytischer Werkzeuge (Verkehrsfliesssimulationsmodelle, Tools zur Leistungsfähigkeitsschätzung)
- **Robuste Prognostizierbarkeit** der Auswirkungen von Projektvarianten (z. B. noch nicht realisierter Spurabbau) in Überlastsystemen mittels analytischer Werkzeuge

3 Vorgehen

Diese Forschungsarbeit untersucht überlastete Strassensysteme im urbanen Raum. Autobahnen und andere kreuzungsfreie Strassen werden nicht betrachtet. Rückwirkungseffekte zwischen den zahlreichen Kreuzungen in überlasteten städtischen Verkehrsnetzen machen die robuste Projektbearbeitung zu einer sehr komplexen, aber nicht minder wichtigen Aufgabe im Hinblick auf ein verlässlich funktionierendes städtisches Verkehrssystem. Der Fokus wird hierbei auf den motorisierten Individualverkehr gelegt. Die vorgeschlagene Analyse und deren Resultate sind jedoch stets im Kontext zu den übrigen Verkehrsmitteln (ÖV, Fuss- und Veloverkehr) zu reflektieren. Das Vorgehen stützt sich auf den Projektablauf gemäss *Abb.5*.

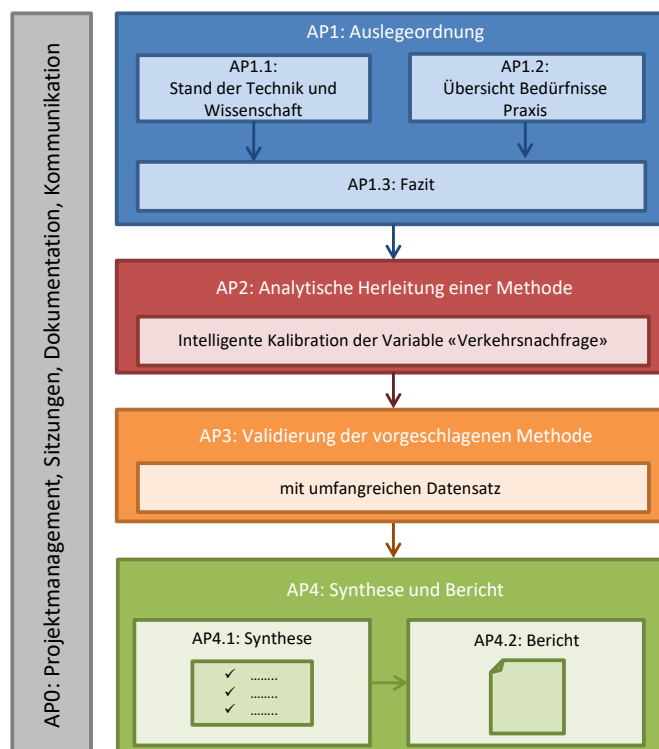


Abb.5 Projektablauf in der Übersicht

4 Auslegeordnung

Als solide Basis für die Entwicklung einer Methodik werden sämtliche relevanten Aspekte zu Überlastsystemen und deren Analyse beleuchtet. Sowohl der Stand der Technik und der Wissenschaft als auch der Stand und die Bedürfnisse der Praxis stehen hierbei im Fokus.

4.1 Stand der Technik und Wissenschaft

Obwohl die Überlast in Strassensystemen ein bekanntes Thema ist, besteht im Hinblick auf eine effektive Methodik zur Bestimmung von Verkehrsnachfrage in Überlastsystemen noch wesentlicher Forschungsbedarf. Es stehen folgende Fragen im Zentrum:

- Welches Wissen zum Verkehrsfluss und zu Überlasteffekten ist aktuell vorhanden?
- Welche Faktoren bestimmen den Verkehrsfluss im Zustand der Überlast?
- Welches Potential bieten verschiedene Datenquellen (Zählraten, FCD, Verkehrsnachfragemodelle etc.) für die Bestimmung der Verkehrsnachfrage?
- Welche methodischen Ansätze und Tools sind heute verfügbar?

Zu den Ende Kapitel 1 gestellten Fragen nach den Verkehrsmengen in überlasteten Strassen finden sich für urbane Verhältnisse, ganz im Gegensatz zur Erforschung der Stauphänomene auf Autobahnen, wenige bis gar keine Publikationen. Zwar sind die Komplexität des urbanen Verkehrs und die damit verbundenen Fragestellungen bekannt und werden breit diskutiert. Auch sind erste Ansätze für deren Beantwortung skizziert (siehe z. B. Heimgartner and Menendez (2013) und Heimgartner (2012)). Doch die aktuell verfügbaren Grundlagen und Erkenntnisse tragen der hohen Relevanz der Thematik gerade für die Projektarbeit in Städten und Agglomerationen noch nicht voll Rechnung. Insbesondere sind die in der Forschung besprochenen Ansätze eher komplex und basieren auf sehr vereinfachten Simulationen (vgl. z. B. Ge, Ciuffo and Menendez (2014)). Sie sind also nur sehr beschränkt praxisrelevant. Dennoch stellen einige Arbeiten für dieses Forschungsvorhaben wichtige Grundlagen dar:

In Widmer et al. (2016)) wurde eine sehr wertvolle und umfassende aktuelle Zusammenstellung der Bedürfnisse bezüglich Erhebungen im Verkehr erstellt. Daraus werden auch die Funktionsweisen und damit verbundenen Chancen der einzelnen Erhebungsarten ersichtlich. Widmer und Klink (2004) haben sich 2004 der Thematik, dass beim Einsatz von Verkehrsumlegungs-Modellen für stark belastete Strassennetze Vorsicht geboten ist, angenommen und Verfahren für die Bearbeitung von Fragestellungen in stark belasteten Strassen vorgestellt. Bis heute haben sich die Umlegungsverfahren stark weiter entwickelt. Aktuell ist es etwa möglich, den Einfluss von Signalplänen auf die Knotenkapazitäten und Rückstaulängen zu berücksichtigen (PTV AG (2015)). In Menendez et al. (2016) wurde der Frage nach der multimodalen Leistungsfähigkeit von Verkehrsnetzen nachgegangen und dabei anhand umfangreicher multimodaler Simulationsanalysen aufgezeigt, wie sogenannte Makrofundamentaldiagramme (MFD), die zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Verkehrsnetzen verwendbar sind, generiert werden können. In Punzo and Montanino (2016) wird ein neuer Ansatz zur Kalibration des Fahrzeugfolgmodells getestet. Dabei werden nach jeder Kalibration verschiedene Parameter querverglichen. Die Kalibration wird also nicht nur aufgrund des Verkehrsflusses alleine validiert, sondern die Güte der Kalibration wird auch mit der Verkehrsgeschwindigkeit oder dem mittleren Fahrzeugabstand beurteilt. Damit wird sichergestellt, dass die Kalibration nicht nur einem Indikator genügt, sondern mehreren. Insbesondere kann dadurch auch der in *Abb.1* gezeigten Ambivalenz der Verkehrsflüsse gerecht werden. Des Weiteren besteht ein interessanter Ansatz darin, die Validierung nicht auf die Indikatoren einzeln abzustützen, sondern auf deren Summe oder die Summe ihrer Kehrwerte. Damit sollen Abweichungen, die sich im Schnitt möglicherweise gegenseitig aufheben, berücksichtigt werden. Eine wertvolle Grundlage stellt auch Treiber, Hennecke and Helbing (2000) dar, werden hier doch die wesentlichen Grundlagen des dynamischen Verkehrsflusses aufgezeigt.

4.1.1 Verkehrsübersättigung – Stau

Verkehrspränomene wurden bereits Anfangs des 20. Jahrhundert untersucht. Eine der zentralen Erkenntnisse ist die Forschung von Greenshields anfangs der 30er Jahre, die die Grundlage für das Fundamentaldiagramm geschaffen hat. Dieses verknüpft die Variablen Geschwindigkeit (v), Verkehrsfluss (oder Verkehrsstärke; Fahrzeuge pro Zeiteinheit; q) und Verkehrsdichte (Fahrzeuge pro Längeneinheit; k). Dabei zeigt sich, dass bei zunehmender Verkehrsdichte die Verkehrsgeschwindigkeit abnimmt. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass bei zunehmender Verkehrsdichte der Verkehrsfluss zuerst ansteigt, bis eine gewisse Sättigung erreicht wird, und er anschliessend mit steigender Verkehrsdichte wieder sinkt. Messungen haben auch gezeigt, dass die Kurven des Fundamentaldiagramms mit der Zeit immer gestreckter wurde. Der steigende Ast in diesem Fundamentaldiagramm wird mit einem Zustand freien Verkehrsflusses assoziiert, während der absteigende Ast den stauenden oder übersättigten Zustand repräsentiert. Die drei Variablen sind dabei mit folgender Gleichung funktional gekoppelt: $q = k \cdot v$ (Daganzo, Cassidy and Bertini (1999); Greenshields (1935); van Wageningen-Kessels, van Lint, Vuik and Hoogendoorn (2015)). In anderen Worten: Die Verkehrsnachfrage kann nur bis zu einer gewissen kritischen Dichte bedient werden. Alles darüber hinaus führt zu Stauzuständen.

Bis heute bilden die obige Gleichung und das dazugehörige Fundamentaldiagramm die Basis für die Erklärung verkehrlicher Phänomene. Dass einem Verkehrsfluss verschiedene Verkehrszustände zugewiesen werden (ein Verkehrsfluss kann bei zwei unterschiedlichen Verkehrsdichten auftreten), zeigt die Schwierigkeit, Verkehrszustände und insbesondere Stau zu identifizieren. Dafür müssen grundsätzlich zwei von drei der erwähnten Variablen erfasst werden. Lange genügten Untersuchungen für ungesättigte Verkehrszustände.

Erst seit ein paar Jahren wird den Überlastzuständen wissenschaftlich mehr Beachtung geschenkt, insbesondere im Zusammenhang mit makroskopischen Analysen, die ganze Gebiete (Städte) zusammenfassen (Geroliminis and Daganzo (2008)). Der ungesättigte Ast des q - k -Fundamentaldiagramm weist eine relativ geringe Streuung auf. Im Gegensatz dazu steht der gesättigte Ast des Fundamentaldiagramms, der eine relativ hohe Streuung aufweist. Der Hauptgrund ist die Instabilität von Stau, die unter anderem ein Resultat von Hysteresen ist (van Wageningen-Kessels et al. (2015)). Aber auch in der Stadt ist Stau ein häufiges, aber etwas komplexeres Phänomen, das aus dem (negativen) Zusammenspiel zwischen Netztopologie, Verkehrssteuerung und der Nachfrage entsteht (Mahmassani, Saberi and Zockaie (2013); Williams (2001)). Übersättigung an Lichtsignalen beispielsweise führt zu einem zunehmenden Rückstau. Erst wenn der ankommende Fluss kleiner wird als der abgehende, verringert sich der Rückstau.

4.1.2 Verkehrsdaten

Das Lindern von Staus in urbanen Gebieten ist mit Schwierigkeiten verbunden, was zur Entwicklung von verschiedenen Verkehrsmanagementstrategien mit realen Daten als Basis geführt hat. Oft werden die Daten unter anderem mittels Schleifendetektoren erfasst, die je nach Verkehrssteuerung unterschiedlich positioniert werden, oder von fahrenden Autos gesammelt (Ambühl and Menendez (2016)). Beide Quellen liefern verschiedene Daten.

Schleifendetektoren beispielsweise liefern Daten über die Anzahl Fahrzeuge und je nach dem auch über die Geschwindigkeit oder die Belegungszeit, womit sich verlässlich auf die Verkehrsdichte schliessen lässt (Daganzo and Geroliminis (2008)). Fahrende Autos hingegen können Informationen über die Reisezeiten, Geschwindigkeiten und geografische Koordinaten liefern, welche in Hochauflösung (z. B. jede Sekunde) verfügbar sind. Zudem können während der Messung Videoaufnahmen der Trajektorien gemacht werden. Die Aufnahmen können vor allem zur Beobachtung von Warteschlangen bei Übersättigung und generellen Stauausmassen an jeder Kreuzung benutzt werden. Dies ist durch eine einfache Analyse der gesammelten Daten nicht möglich. Messungen der Wegzeiten können ausserdem Wi-Fi-basiert oder Bluetooth-basiert sein. Daten über Ampelzeiten (Phasenzuordnung, Phasentakte, Phasenfolge oder Koordination mit anderen Kreuzungen) werden normalerweise von Firmen oder Behörden, welche für das Betreiben der Ampeln verantwortlich sind, zur Verfügung gestellt. Wenn an Standorten mit hohem Fussgängeraufkommen Verkehrssituationen analysiert werden müssen, sollten auch Daten zum

Fussgängeraufkommen (z. B. über Drücker) an signalisierten Knotenpunkten gesammelt werden. Diese können die Ampelkoordination unterbrechen, indem sie einen Zeitraum zur Verfügung stellen, in dem Fussgänger bedient werden.

Schliesslich ist es wichtig, Daten zum öffentlichen Verkehr zu sammeln, da urbane Netze in den meisten Fällen multimodal sind, d. h. unterschiedliche Modi nutzen dieselbe Strasseninfrastruktur. Diese Daten sollten Informationen zu den Passagieren, Routen, Reisezeiten und Geschwindigkeiten der ÖV-Fahrzeuge beinhalten.

4.1.3 Kalibration und Sensitivitätsanalyse von Verkehrsmodellen

Mikroskopische Verkehrssimulationstools wie PTV Vissim sind heutzutage ein wichtiges Werkzeug für Forschende und Praktizierende im Bereich Verkehrstechnik. Die Komplexität moderner Simulationsmodelle (insbesondere kommerzieller Simulationspakete) führt jedoch auch zu beträchtlichen Schwierigkeiten bei der Kalibration des Modells. Wenn ein Verkehrsmodell beispielsweise eine grosse Anzahl unterschiedlicher Parameter aufweist und/oder viel Rechenaufwand erfordert, kann es schwierig oder gar unmöglich werden, alle Parameter unter einem limitierten Projektbudget zu kalibrieren. Um eine Kalibration durchzuführen und die Qualität des Kalibrationsprozesses besser kontrollieren zu können, schlagen einige Verkehrssimulationsrichtlinien wie Daamen, Buisson and Hoogendoorn (2014) eine Sensitivitätsanalyse (SA) vor.

Eine SA prüft, wie die Unsicherheit im Output eines Modells (numerisch oder andere) verschiedenen Unsicherheitsquellen im Input des Modells zugeteilt werden kann (Saltelli et al. (2008)). Sie ist ein mächtiges Werkzeug zur Identifikation von einflusslosen Parametern, zur Quantifizierung der Varianzen mehrerer Parameter und zur Analyse des Einflusses verschiedener Interaktionen von Parameter. Der einfachste und intuitivste Ansatz für eine SA ist die «One-at-a-Time-Methode» (OAT) (Tarantola (2011)). Sie berechnet die partiellen Ableitungen, indem sie immer nur einen Parameter auf einmal verändert. Alle anderen Parameter bleiben dabei auf einem festen Nennwert. Die OAT-Methode wird in verschiedenen wissenschaftlichen Berichten auf Verkehrsmodelle angewendet. Sie ist jedoch lediglich ein lokaler Ansatz und schafft es nicht, Informationen über die globale Sensitivität und die Auswirkungen von Interaktionen zwischen mehreren Parametern zu liefern. Deshalb ist sie für nichtlineare Modelle nicht geeignet, denn diese enthalten viele Parameterinteraktionen (üblich bei mikroskopischen Simulationsmodellen).

Punzo and Montanino (2016) schlagen vor, zur Kalibrierung von Verkehrssimulationsmodellen eine globale SA (GSA) anzuwenden. Die GSA enthält normalerweise eine Monte Carlo-Simulation, und es werden zahlreiche Modelldurchläufe mit zufälligen Beispielswerten durchgeführt (Punzo and Ciuffo (2014)). Sie ist ein weniger spezifischer Ansatz, welcher den gesamten Input-Parameterraum und die Bandbreite aller Parameter der Analyse berücksichtigt. Zudem garantiert diese Methode, dass die Einflüsse der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern bestimmt werden können. GSA-Methoden können üblicherweise je nach den verwendeten Informationen als qualitative und quantitative Methoden kategorisiert werden. Relevante Anwendungen davon sind in Saltelli et al. (2008) zu finden. Hier werden die einflussreichsten Parameter des IDM-Fahrzeugfolgmodell untersucht und das vereinfachte Modell aufgrund von SA-Resultaten kalibriert. Ausserdem haben Ge and Menendez (2012) einen verbesserten varianzbasierten Ansatz für die Analyse von zusammenhängenden Parametern im Wiedemann-74-Fahrzeugfolgmodell übernommen.

Um die Nachfrage zu kalibrieren, eignen sich obengenannte Verfahren nur bedingt. Es bietet sich daher an, eine Methode zu entwickeln, die eine makroskopische Perspektive offeriert. Allerdings ist eine aggregierte Kalibrierungsmethode, basierend auf makroskopischen Eigenschaften des Verkehrs, noch nicht erforscht. Eine solche würde es erlauben, mittels globaler Kennwerte wie der Durchschnittsgeschwindigkeit oder dem durchschnittlichen Verkehrsfluss zu kalibrieren. Dadurch würde sich der Kalibrierungsaufwand signifikant verringern. Eine solch aggregierte Sichtweise könnte das MFD liefern.

4.2 Übersicht über die Bedürfnisse der Praxis

Für die Evaluation des Stands der Praxis wird insbesondere folgenden Fragen nachgegangen:

- Welches sind die angesichts der überlasteten Strassen zentralen Fragestellungen bei Verkehrsprojekten in städtischen Strassensystemen, und welche Anforderungen werden an die Beantwortung dieser Fragen gestellt?
- Wie sieht die aktuelle Erhebungspraxis aus, und welche Erhebungsarten und -umfänge sind dabei weshalb zumutbar?
- Welche Rolle spielen bei beiden obigen Fragen Überlasteffekte?

Die Beantwortung dieser Fragen erfolgt gestützt auf die Expertise der Forschungsstelle wie auch der Begleitkommission (BK).

4.2.1 Typische Frage- und Aufgabenstellungen im Projektalltag

In Tab. 1 sind die wesentlichen Fragestellungen, wie sie mit Verkehrsprojekten im städtischen Strassensystem einhergehen, aufgeführt.

Tab. 1 Fragestellungen nach Projektphase

Projektphase	Frage- und Aufgabenstellungen
Planung/Projektierung	Schätzung der Auslastung von Kreuzungen Bestimmung der Rückstaulängen Durchführung und Analyse von Verkehrsflusssimulationen Bestimmung der Verlustzeiten für verschiedenen Verkehrsmittel Konzeption von Verkehrssteuerungsmassnahmen (Basissignalpläne, Grüne Wellen u. ä.)
Realisierung	Wirkungskontrollen Verkehrsmanagement im Zuge von Baustellen
Betrieb und Unterhalt	Monitoring des Verkehrs Schwachstellenanalyse

Ob dabei Überlasteffekte eine Rolle spielen, geht nicht primär aus den Frage- und Aufgabenstellungen hervor. Es ist daher essentiell, dass sich sowohl Auftraggeber wie auch Auftragnehmer ein Bild davon machen, ob bei der zu bearbeitenden Fragestellung Überlasteffekte eine Rolle spielen.

4.2.2 Überblick über die Erhebungspraxis

Wenn in der Praxis Verkehrsflusssimulationsmodelle verwendet werden, ist deren Anwendung meist stark von Randbedingungen wie knappes Zeit- und Geldbudget geprägt. Die Simulation steht hier oft in direkter Konkurrenz zu wesentlich günstigeren statischen Berechnungsverfahren, die aus Sicht der Auftraggeber auch einfacher vermittelbare Aussagen generieren (Kapazität ausreichend, ja/nein). Auch in der Aus- und Weiterbildung zur Verkehrsflusssimulation stehen mitunter andere Aspekte im Vordergrund als die korrekte Kalibrierung der Modelle. Da auch seitens der Auftraggeber – sei es aus Desinteresse, Unwissenheit oder mangels geeigneter Grundlagedaten – normalerweise kaum Vorgaben gemacht werden, wie bzw. wie gut ein Modell kalibriert werden soll, erstaunt es nicht, dass sich die Kalibrierung in der Praxis meist auf ein Minimum beschränkt. Es fehlen auch praxistaugliche Empfehlungen für Simulationen in urbanen Räumen (wie bspw. "HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen (2016)" oder das Projekt "HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Landstrassen"). Konkret überprüft man oft nur, ob die in der Realität erhobenen Verkehrsmengen mit den vom Modell verarbeiteten Mengen korrespondieren und stellt allenfalls noch qualitative Betrachtungen über die Plausibilität des im Modell beobachtbaren Verkehrsverhaltens an. Insbesondere wenn es sich um grössere Modelle handelt, welche z. B. aus bestehenden Makromodellen

abgeleitet wurden, wird erstmal davon ausgegangen, dass es so schon stimmen wird – nicht zuletzt, weil oft gar keine Möglichkeit besteht, dies in grösserem Rahmen zu überprüfen.

Dieser sehr pragmatische Ansatz bei der Aufsetzung von Mikromodellen muss nicht unbedingt falsch sein: Es kann durchaus sein, dass das im Simulationsmodell implementierte Fahrzeugfolgmodell mit den Standardeinstellungen in Kombination mit den korrekt eingegebenen Fahrzeugzuflüssen/-routen und qualitativen Betrachtungen bezüglich der Plausibilität des Ablaufs der Verkehrssimulation bereits ausreicht, um in den allermeisten Fällen eine für die jeweilige Fragestellung ausreichend gute Simulation zu erhalten. Trotzdem wäre es interessant zu wissen, wann es nicht ausreicht bzw. wann zusätzliche Messgrößen überprüft werden müssen und welche dies wären. Abgesehen davon würden zusätzliche Kontrollmöglichkeiten auch bei bereits scheinbar korrekt funktionierenden Modellen helfen, die Akzeptanz und das Vertrauen in die Ergebnisse zu stärken.

Im Folgenden wird kurz auf die in Frage kommenden Messgrößen eingegangen:

- **Verkehrsmengen:**

Bei den Verkehrsmengen kann man zwischen den Fahrzeugzuflüssen in das System bzw. Modell und den Fahrzeugabflüssen aus dem System/Modell unterscheiden. Die Zuflüsse (z. B. als Anzahl Fahrzeuge pro Stunde) werden als Input für das Modell benötigt. Die Abflüsse müssten, zumindest dort, wo der Abfluss durch Hindernisse im Sinne von Stauwurzeln ausserhalb der Systemgrenzen behindert ist, ebenfalls kontrolliert und gegebenenfalls angepasst werden. Die Verkehrsmengen auf Querschnitten bzw. an Knoten innerhalb des Systems müssten sich als Teil des zugrundeliegenden Verkehrsmengengerüsts eigentlich von selber richtig einstellen, wenn neben den Routen Zu- und Abflüsse richtig definiert wurden. Das gilt zumindest bei der Verwendung von statischen Routen. Falls die Funktion der dynamischen Umlegung verwendet wird, müssten die Verkehrsmengen auf Strecken innerhalb des Systems noch genauer kontrolliert werden.

- **Staulängen:**

Die Staulängen sind im Vergleich zu den Verkehrsmengen wesentlich schwieriger und auch aufwändiger zu erheben. Das hat auch damit zu tun, dass der Begriff "Stau" nicht genau definiert ist bzw. einer Definition bedarf, um überhaupt erhoben werden zu können (z. B. bei Unterschreiten einer bestimmten Geschwindigkeit: Fahrzeug im Stau nach Abbremsen auf < 5 km/h und nachfolgender Beschleunigung auf < 10 km/h). Eine weitere Schwierigkeit ist die grosse Variabilität dieser Messgrösse, sowohl bei kurz- als auch bei langfristiger Betrachtung: Ein Stauende kann sich innerhalb sehr kurzer Zeit um grosse Distanzen verschieben. Erhebt man den Stau über mehrere Tage (bzw. an über mehrere Tage verteilte Spitzenstunden) kann es durchaus sein, dass an einzelnen Tagen fast gar kein Stau auftritt, während an anderen Tagen selbst bei vergleichbaren Verkehrsmengen ausgedehnte Staus registriert werden. Es stellt sich dann die Frage, welcher Wert (Maximal- oder Mittelwert, oder Mittelwert der Maxima etc.) zur Kalibrierung des Modells herangezogen werden soll und wie lange man erheben muss, auf dass ein repräsentativer Messwert erhalten wird. Im Grossen und Ganzen scheinen die Staulängen wenig geeignet, um als Kalibriergrößen verwendet zu werden. Liegt ein Mischverkehrsregime ÖV-MIV vor, so lassen sich gegebenenfalls aus der Auswertung der ÖV-Reisezeiten die Verluste oder ungeplanten Halte relativ genau lokalisieren und somit auf Rückstausituationen schliessen. Vielfach liegen die ÖV-Reisezeiten-Daten in hoher Qualität und umfassend vor.

- **Floating Car Data:**

Mittels Floating Car Data (FCD) lassen sich sowohl Routenwahl als auch Geschwindigkeitsprofile bzw. Reisezeiten vergleichsweise kostengünstig abbilden. Diese Messgrößen lassen sich auch im Verkehrsmodell einfach erheben und scheinen somit als potentielle Kalibrierungsgrößen sehr geeignet.

- **Andere Reisezeit- und Routenwahrerhebungsverfahren:**

Routenwahl und Reisezeit lassen sich auch mittels anderer Verfahren wie Bluetooth- oder Nummernschilderhebungen bestimmen. In Zukunft könnten auch noch weitere Verfahren (Auswertung der Mobilfunkdaten u. ä.) eine Rolle spielen.

- **Grünzeiten von Lichtsignalanlagen (LSA):**

Vielerorts sind die Grünzeiten einzelner Spuren an LSA verfügbar. Interessant ist dabei insbesondere der Vergleich mit der Anzahl die jeweilige Spur passierenden Fahrzeugen. Liegt dabei die Anzahl passierender Fahrzeuge unter dem mit der jeweiligen Grünzeit einhergehenden Angebot, so kann dies daher rühren, dass es entweder wenig Verkehr hat oder aber der Verkehrsfluss im betrachteten Systemabschnitt stark behindert ist.

4.2.3 Rolle der Überlasteffekte in der Erhebungspraxis

Es ist heute in aller Munde, dass urbane Verkehrssysteme vermehrt von Überlastungen gekennzeichnet sind. Trotzdem spielen Überlasteffekte in der Erhebungspraxis bislang erfahrungsgemäss eher eine untergeordnete Rolle. Zwar ist die Frage nach den Rückstaulängen und damit einhergehenden Zeitverlusten allgegenwärtig, doch ein breites Bewusstsein um die Zusammenhänge zwischen Verkehrsmenge und Verkehrsdichte und deren Bedeutung für Planung, Betrieb und Monitoring der Verkehrssysteme ist noch nicht die Regel. Grund hierfür dürfte nicht zuletzt die hohe Komplexität, die mit überlasteten urbanen Strassenverkehrssystemen einhergeht, sein.

4.3 Fazit

Aus Sicht der Wissenschaft werden in einem ersten Schritt vermehrt Sensitivitätsanalysen der zu kalibrierenden Parameter erstellt. In einem zweiten Schritt wird der Parameterraum auf die wichtigsten Kenngrössen reduziert und anschliessend kalibriert. Für die Kalibrierung der Nachfrage wären aggregierte Methoden nötig, zum Beispiel mit Hilfe des Konzepts des MFD. Diese Sicht erlaubt es, die komplexen Verkehrszustände eines relativ homogenen Gebietes, zum Beispiel eines Quartiers, zu abstrahieren.

Aus Optik der Erhebungspraxis sind die Voraussetzungen gegeben, mit denen dem Aspekt der Überlast und den Zusammenhängen zwischen Verkehrsmenge und Verkehrsdichte mehr Bedeutung beigemessen werden könnte. Es erscheint daher als zielführend, das Bewusstsein für Überlasteffekte und die Zusammenhänge zwischen Verkehrsmenge und Verkehrsdichte zu fördern. Dies würde zu vergleichsweise robusteren und innerhalb der Behörde breiter abgestützten Projektentscheiden führen. Auch Optimierungspotentiale wie z. B. durch Umverteilung nicht nutzbarer Grünzeiten auf andere Spuren und Verkehrsmittel wären sichtbar.

5 Herleitung einer Methodik

5.1 Wissenschafts- versus anwendungsgetrieben

Im Arbeitspaket 2 wird aufgrund verschiedener Analysen eine theoretische Methodik zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage in Überlastsystemen entwickelt und erarbeitet. Die geplanten Analysen haben das Ziel, die relevanten Kenngrössen und deren Ausprägungen sowie auch die zentralen Wirkungszusammenhänge zu identifizieren. Aus heutiger Sicht stehen hierzu folgende Fragen im Zentrum:

- Welche Kenngrössen und welche ihrer Ausprägungen sind von Relevanz in Bezug auf ein Verkehrssystem, das in den Zustand der Überlast gerät und darin vorübergehend verharrt (vgl. *Abb.1*)?
- Mit welchen wenigen Kenngrössen (Fahrzeugmengen, Fahrzeugdichten, Rückstaulängen, Geschwindigkeiten und deren Variation über die Zeit etc.) und Wirkungszusammenhängen lässt sich das Verhalten des Verkehrssystems hinsichtlich Auslastungsgrad treffend beschreiben?

Im Zuge der Forschungsarbeiten ergab sich angesichts eines zeitgleich zu bearbeitenden, realen Projekts zur Überlastproblematik aufgrund der Bereitschaft des Auftraggebers die Möglichkeit, Synergienutzung mit diesem Forschungsprojekt zu nutzen. Da die Beantwortung der Fragestellung des realen Projekts nach Möglichkeit ohne Simulationsarbeiten zu erfolgen hatte, ergab sich dadurch die Möglichkeit, nebst einem wissenschaftsgetriebenen, auf Simulationsmodelle ausgerichteten Ansatz auch einen anwendungsgetriebenen, auf pragmatisch-effiziente Weise erzeugte Resultate ausgerichteten Ansatz zu entwickeln und herzuleiten.

5.2 Wissenschaftsgetriebener Ansatz

Wie in Kapitel 4.1.1 eingeleitet, hat sich in den letzten Jahren das MFD für die Modellierung des Strassenverkehrs auf makroskopischer, städtischer Ebene etabliert. Unter der Annahme, dass sich der Verkehr innerhalb eines städtischen Gebietes relativ homogen verteilt und verhält, wurde postuliert, dass ein ähnlicher Zusammenhang auch auf makroskopischer Ebene (viele Strassen aggregiert) vorhanden ist. Tatsächlich wurde 2007 gezeigt, dass ein sogenanntes makroskopisches Fundamentaldiagramm (MFD) existiert. Dieses erlaubt es, den mittleren Verkehrsfluss und die mittlere Verkehrsdichte in Verbindung zueinander zu bringen. Gedanklich kann das MFD auch als eine Reduktion des städtischen Verkehrs auf ein einziges repräsentatives Strassensegment gesehen werden. Anders als beim Fundamentaldiagramm wird bei der Gegenüberstellung der mittleren Dichte und des mittleren Flusses in der Realität keine dreieckige Form ersichtlich, sondern sie kann trapezförmige oder parabelähnliche Funktionen annehmen (vgl. *Abb.1*). Die Gründe hierfür sind Gegenstand der Forschung, liegen wahrscheinlich aber in der Netzstruktur und insbesondere in der Verkehrssteuerung.

Die Reduzierung der verkehrsdynamischen Komplexität erlaubt es, ein relativ simples Modell von Stauphänomenen in Städten zu kreieren. Ähnlich wie beim Fundamentaldiagramm können ungestaute und gestaute Verkehrszustände unterschieden werden. Die mittlere Netzgeschwindigkeit im MFD ist wiederum die Steigung einer mit dem Ursprung verbundenen Linie. Es sei hier auf den interessanten Zustand hingewiesen, bei dem der mittlere Verkehrsfluss im MFD maximiert wird. Dieser kritische Punkt im MFD stellt die Grenze zwischen gestauten und ungestauten Verkehrszuständen dar. Interessanterweise ist die Geschwindigkeit an diesem kritischen Punkt unter Umständen deutlich tiefer als die Geschwindigkeit im freien Fluss. Das heisst, makroskopisch betrachtet, ist es durchaus wünschenswert, dass die Geschwindigkeiten nicht derjenigen des freien Flusses entsprechen. Dadurch, dass die Unterschiede zwischen den werktäglichen Verkehrsnachfragen in einer

Stadt relativ klein sind und über längere Zeiten ähnlich ausfallen, wird das resultierende MFD reproduzierbar, und das mit relativ kleiner Streuung. Das heisst, die Unterschiede zwischen MFDs von verschiedenen Tagen sind sehr klein. Das hat entscheidende Vorteile, wenn das MFD beispielsweise mittels einer Simulation eruiert wird. In diesem Fall kann jeder Verkehrsnachfrage ein konkreter Verkehrszustand (und umgekehrt) zugewiesen werden.

Zusammengefasst stellt das MFD ein elegantes Konzept dar, wie Stauphänomene in Städten modelliert werden können. Das MFD ist für diese Forschungsarbeit von Nutzen, da es Überlastszenarien (Stau) relativ einfach messen und abbilden kann.

5.2.1 Konzeption der Methodik

Die analytische Herleitung der Methodik folgt folgender Hypothese:

Es gibt einen Zusammenhang zwischen Überlastgrad und -dauer und der Variation der Zuflüsse, Routen und maximal möglichen Abflüsse über die Zeit in einem betrachteten Verkehrssystem.

Der Aspekt der maximal möglichen Abflüsse ist dahingehend von Relevanz, als die Abflüsse gegebenenfalls aufgrund einer Ursache ausserhalb eines betrachteten Verkehrssystems beeinträchtigt werden. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn eine Kreuzung ausserhalb des betrachteten Systems zuweilen Rückstau erzeugt, der bis ins betrachtete System zurückreicht und das Verkehrsgeschehen darin behindert. In diesem Sinne ist auch die Frage der Systemabgrenzung eine wichtige, sorgfältig zu beurteilende Frage.

Im Folgenden wird der Methodenansatz mittels des im vorangehenden Kapitel eingeführten MFD kurz beschrieben. Die Herausforderung besteht darin, die Nachfrage in Überlastszenarien zu bestimmen. Diese Nachfrage ist nicht direkt messbar, da in der Überlast – anders als im freien Fluss – die Nachfrage nicht von den gemessenen Verkehrsflüssen abzuleiten ist. Der Grund hierfür ist, dass sich Fahrzeuge an lokal überlasteten Kreuzungen zu stauen beginnen; der gemessene Verkehrsfluss entspricht dann bestenfalls der Kapazität der Kreuzung und nicht der Nachfrage. Es geht in der Folge darum, diese latente Nachfrage (vgl. Abb. 6 und Abb. 7) makroskopisch zu bestimmen. Es wird davon ausgegangen, dass eine für den freien Fluss kalibrierte mikroskopische Simulation zur Verfügung steht. Kalibriert heisst in diesem Fall, dass die Reisezeiten relativ gut mit der Realität übereinstimmen – jedenfalls im ungestauten Zustand des Netzes.

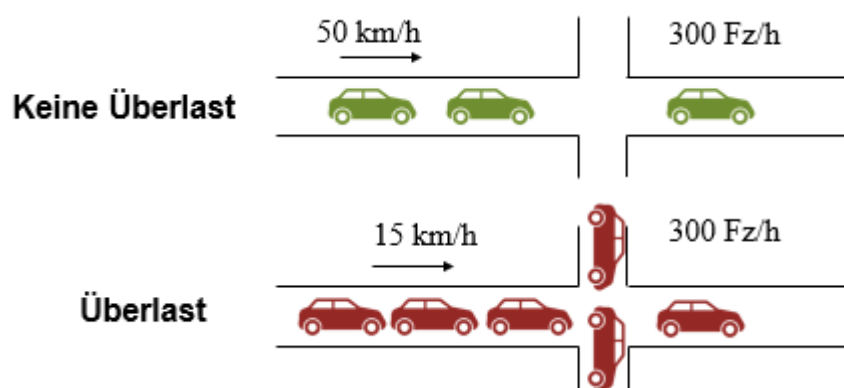


Abb. 6 Unklare Messungen des Verkehrsflusses. In beiden Verkehrszuständen wird die gleiche Anzahl Fahrzeuge (Fz) pro Stunde gemessen.

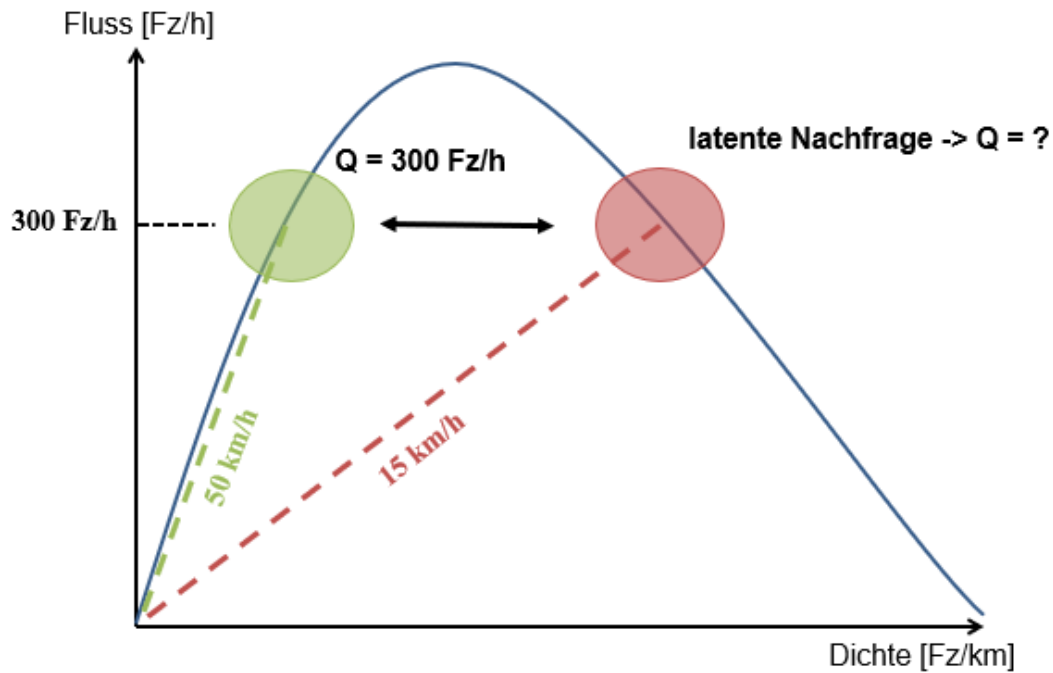


Abb.7 Kalibrierungsproblematik: Die Kalibrierung der Nachfrage aufgrund des gemessenen Fahrzeugflusses ist nicht empfehlenswert, denn es bleibt unklar, ob dieser den ungestauten oder den gestauten (überlasteten) Zustand repräsentiert.

Die folgenden Schritte bilden eine Übersicht der Methodik:

1. Raumgrenzen

In einem ersten Schritt geht es darum, den Raum abzugrenzen und den räumlichen Fokus der Simulation festzulegen. In dieser Forschungsarbeit wird auf kleinräumige Simulationen mit wenigen Routenoptionen fokussiert.

2. Definition Nachfragegerüst

In einem zweiten Schritt geht es darum, eine Initialnachfrage für ein kalibriertes mikroskopisches Modell zu eruieren. Vielfach ist ein makroskopisches Nachfragegerüst vorhanden, das aus einem übergelagerten Netz hergeleitet wurde. Ein Beispiel dafür ist das resultierende Mengengerüst einer Nachfragebestimmung mittels makroskopischem Verkehrsmodell. Für die modellierten Abschnitte können die Spitzenverkehrsflüsse berechnet werden. Diese dienen in einer Mikrosimulation als Grundlage für die Nachfrage, allerdings würde die Verwendung dieser Nachfrage nicht der oben erwähnten latenten Nachfrage entsprechen – oder mit anderen Worten, es wäre schwierig, Überlastzustände zu simulieren. Insbesondere wenn das Nachfragegerüst anhand von Verkehrszählungen erhoben worden ist, entspricht es, wie aus Abb.6 und Abb.7 erkennbar, nicht der latenten Nachfrage.

3. Empirische Punkte eines MFD

In einem nächsten Schritt werden Messungen durchgeführt, um einen Teil des MFD zu erzeugen. Falls nicht der ganze Tag von Interesse ist, reicht es aus, sich auf einen vordefinierten Zeitraum mit Überlastzuständen zu fokussieren. Um Punkte eines MFD zu erhalten, müssen zwei von den drei folgenden Variablen ermittelt werden: Verkehrsfluss, Verkehrsdichte und/oder Verkehrsgeschwindigkeit. Dies wird entweder mittels Schleifendetektoren oder FCD berechnet. Zusätzlich ist die Länge der im untersuchten Gebiet enthaltenen Strassenabschnitte festzuhalten. Gemittelt wird nicht über alle Strassensegmente, sondern nur über jene, die einen verkehrlichen Charakter haben, d. h. Quartierstrassen werden ignoriert. Grundsätzlich ist es

empfehlenswert, in Intervallen von 5-15 min zu messen. Folgende Formeln werden für Schleifendetektordaten benützt, um ein empirisches MFD zu schätzen.

$$Q_{MFD} = \frac{q_i l_i}{\sum l_i} \quad (1)$$

$$K_{MFD} = \frac{k_i l_i}{\sum l_i} \approx \frac{o_i l_i}{\sum l_i} \quad (2)$$

Gleichung (1) zeigt auf, wie sich der mittlere Fluss im Netz, Q_{MFD} , aus einem gewichteten Mittelwert des Verkehrsflusses q_i auf den Strassenabschnitten i mit Länge l_i herleitet. Ähnliches gilt in Gleichung (2), wo die mittlere Dichte, K_{MFD} , mittels der Dichte k_i ermittelt wird. Die Verkehrsdichte wiederum wird aus der Belegung, o_i , des Schleifendetektors und dessen effektiven Länge, L_d , (Detektorlänge + mittlere Fahrzeuglänge) eruiert.

4. Simuliertes MFD

In diesem vierten Schritt geht es darum, die definierte Initialnachfrage so zu skalieren, dass ein MFD gebildet werden kann. Dazu wird die Nachfrage mit einem variablen Faktor α multipliziert. Inkrementelle Veränderungen von α stellen sicher, dass das ganze MFD, sprich sowohl ungestaute wie auch gestaute Zustände, simuliert werden. Dieser Vorgang wird bestenfalls dynamisch in der Simulation selbst durchgeführt, d. h. die Nachfrage wird z. B. alle 20 min schrittweise erhöht. Dies entspricht einem treppenförmigen Profil der Nachfrage. Andernfalls kann auch eine statische Simulation durchgeführt werden, bei der eine Erhöhung α mit einer neuen Simulation einhergeht. Es gilt zu beachten, dass in allen Fällen eine bestimmte Dauer am Anfang der Simulation, die sogenannte «Anwärmphase», für die Auswertungen ignoriert wird. Dieser Schritt sorgt dafür, dass jedem simulierten Verkehrszustand (ein Punkt im MFD) eine mit α skalierte Nachfrage zu Grunde liegt.

5. Vergleich der Nachfrage

In diesem Schritt werden die gemessenen, empirischen MFD Punkte mit dem simulierten MFD verglichen. Dabei wird nach Punkten im simulierten MFDs gesucht, die am ehesten mit den empirischen MFD Punkten übereinstimmen. Die entsprechende skalierte Nachfrage der MFD Simulation stellt die gesuchte latente Nachfrage dar.

5.2.2 Testanwendung der konzipierten Methodik

Die in Kapitel 5.2.1 elaborierte Methodik wird im Folgenden anhand einer Simulationsanwendung vorgestellt. Die Stadt Zürich eignet sich für eine Auswertung gut, weil sie regelmässig Überlastzustände im Verkehr aufweist. Anschliessend wird die Methodik für einen Strassenzug in der Stadt Luzern im Kapitel 5.2.3 validiert.

Die **Raumgrenzen** werden in Abb.8 gezeigt. Beim ausgewählten, gelb-markierten Perimeter in der Innenstadt von Zürich handelt es sich um den Bereich rund um den Hauptbahnhof, der von hoher Komplexität gekennzeichnet ist – insbesondere wegen der hohen Knotendichte sowie den Interaktionen zwischen den Verkehrsmitteln (MIV, Fussverkehr, Tram und Bus). Überlastzustände sind deshalb täglich anzutreffen. Die weiss-markierten Strassenzüge sind im Verkehrsflusssimulationsmodell der Stadt Zürich modelliert.

Das **Nachfragegerüst** wurde aus dem Gesamtverkehrsmodells des Kantons Zürich (GVM-ZH) generiert und für die Spitzenstunde definiert. Diese Nachfrage kann als erste Annäherung angesehen werden. Wie erläutert, ist es das Ziel dieser Forschungsarbeit, die Verkehrsnachfrage detaillierter zu bestimmen, insbesondere die latente Nachfrage, die sich mit den üblichen Datensätze (FCD oder Schleifen) nur schlecht eruieren lässt (siehe dazu auch Abb.6 und Abb.7).

In einem dritten Schritt wurden die **empirischen Daten** auf ihre Qualität hin überprüft, um anschliessend damit ein MFD zu bilden. Dabei werden sowohl FCD wie auch

Schleifendaten untersucht. Da die Schleifen relativ homogen über das untersuchte Gebiet verteilt sind, bestehen gute Bedingungen, ein unverzerrtes MFD zu schätzen. Abb.9 zeigt das MFD für den Bereich um den Zürcher Hauptbahnhof. Es wird die mittlere Verkehrsdichte in Fz/km dem mittleren Verkehrsfluss während der dritten Oktoberwoche im 2016 gegenübergestellt. Jeder Wert repräsentiert einen 15-min-Durchschnittswert, ermittelt von 26 Schleifendetektoren. Während für die Schleifen die nach Streckenlängen gewichteten Mittel des Verkehrsflusses und der Verkehrsdichte berechnet werden, wird bei den FCD die Geschwindigkeit zur Verkehrsdichtebestimmung herangezogen. Gemäss dem Fundamentaldiagramm kann die Verkehrsdichte mittels des Verkehrsflusses und der Verkehrsgeschwindigkeit eruiert werden ($\text{Fluss} = \text{Dichte} \times \text{Geschwindigkeit}$). Für den Verkehrsfluss werden hier die Schleifen herangezogen. Auf jedem Streckenabschnitt werden in diesem Fall die Verkehrsflüsse der Schleifen kombiniert mit den jeweiligen Geschwindigkeiten gemäss FCD. Dieser Schritt erlaubt es, die zeitlich variable GPS-Marktpenetration nicht schätzen zu müssen. Es ist klar ersichtlich, dass beide Datenquellen ein übereinstimmendes Bild des Verkehrszustandes abgeben. Dieses Resultat zeigt, dass die Qualität der MFD-Schätzung mittels Schleifen sichergestellt ist. Des Weiteren weisen die Punkte des MFD eine relativ geringe Streuung auf. Wie erwartet, ist eine leichte makroskopische Übersättigung vorhanden, welche daran zu erkennen ist, dass die Kurve leicht nach unten zeigt ab einer Verkehrsdichte von rund 45 Fz/km. Es gilt zu beachten, dass hier nur MIV-Fahrzeuge berücksichtigt wurden.

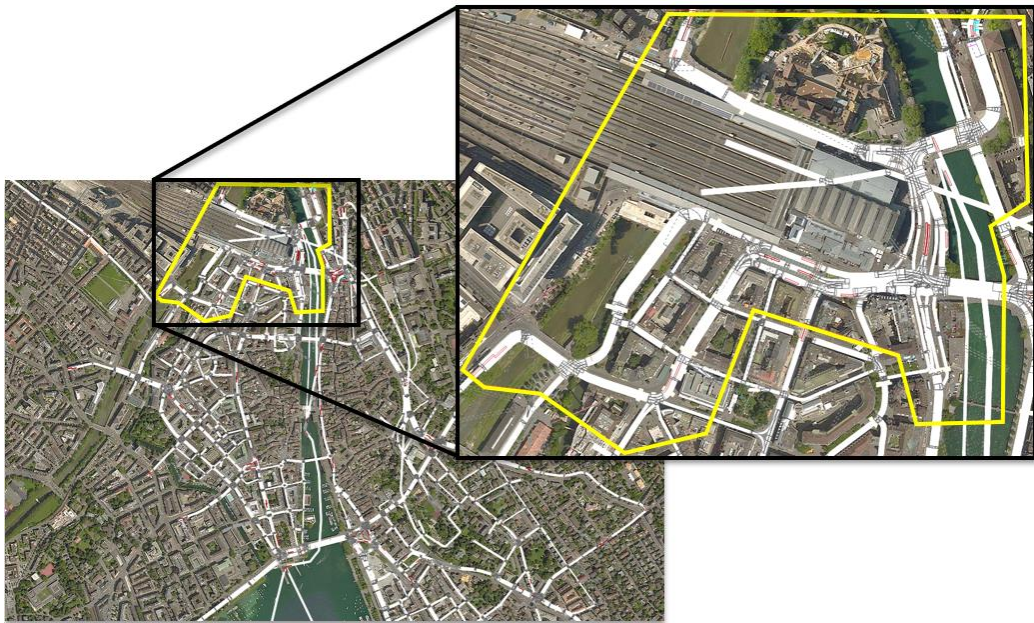


Abb.8 Analyseperimeter

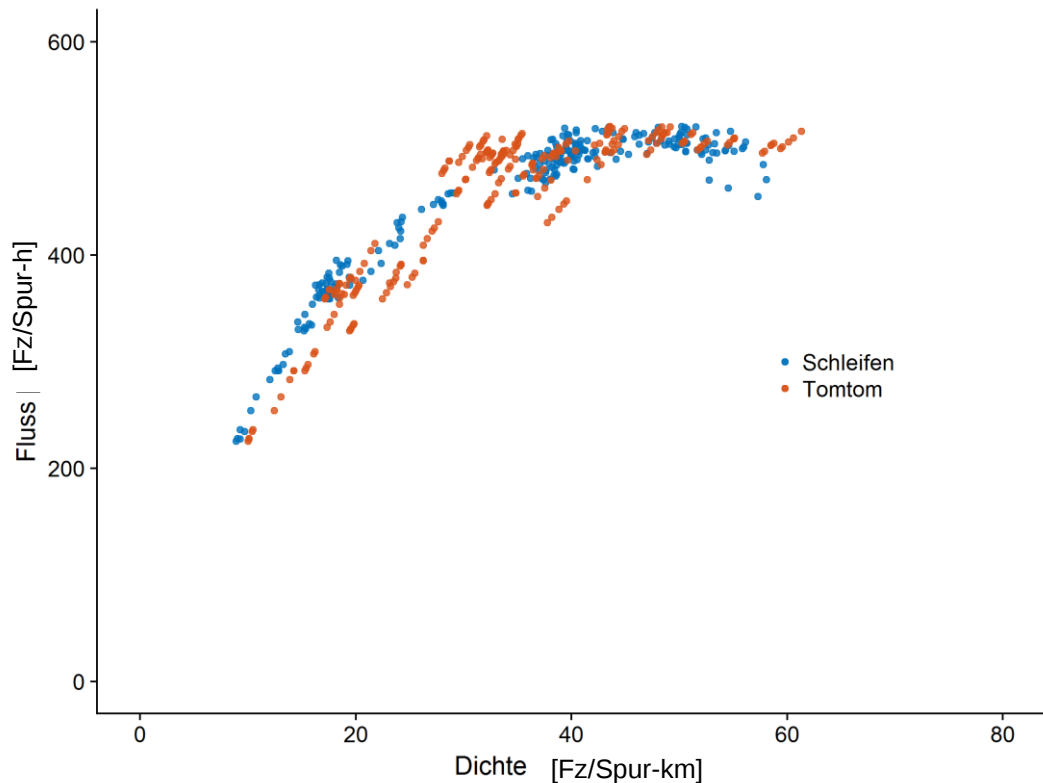


Abb.9 Reales MFD des Analyseperimeters

Im vierten Schritt wird das **MFD mittels Simulation** erzeugt. Hierfür wird das im zweiten Schritt definierte Nachfragegerüst linear skaliert. Das MFD stellt den Zusammenhang zwischen Verkehrsfluss und Verkehrsdichte über einen zeitlichen Horizont auf. Wenn das gegebene Mengengerüst entsprechend hinauf- und hinunterskaliert wird, können verschiedene Nachfragezustände simuliert und das daraus resultierende MFD erzeugt werden. Abb.9 zeigt das entsprechende MFD für den ausgewählten Perimeter um den Zürcher Hauptbahnhof. Das Nachfragegerüst wird linear mit einer Konstante skaliert. Der Effekt auf das MFD für Zürich ist in Abb.10 in verschiedenen Farben dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Skalierungsfaktor die Verkehrsbelastung anfänglich zunimmt, um anschliessend wieder abzunehmen. Jeder Punkt im Diagramm stellt einen Mittelwert über ein Intervall von 5 Minuten dar. Jeder Skalierungsfaktor wird eine Stunde lang simuliert. Deshalb existieren mehrere Punkte des gleichen Skalierungsfaktors in der Abbildung. Werden die Resultate verschiedener Datenquellen zusammengetragen, ergibt sich Abb.10. Die blauen Punkte zeigen hier die empirischen Daten, währenddessen die anderen Farben die Simulationsergebnisse darstellen.

Die Skalierungsfaktoren variieren von 0.2 bis 1.8, wobei in Schritten von 0.1 eine neue Simulation mit einem während einer Stunde konstanten Skalierungsfaktor lanciert wird. Interessanterweise wird in dieser Abbildung die angesprochene Problematik der Abschätzung der latenten Nachfrage sichtbar. Für einen Skalierungsfaktor von 1, d. h. wenn die simulierte Nachfrage jener der Abendspitzenstunde des makroskopischen Verkehrsmodells entspricht, ergeben sich die roten Punkte. Die empirisch gemessenen Punkte einer Abendspitzenstunde liegen allerdings relativ weit davon entfernt – sie sind mit Sternen gekennzeichnet. Anders gesagt, die im makroskopischen Nachfragegerüst definierte Verkehrsnachfrage resultiert in deutlich tieferen Verkehrsdichten als die tatsächlich gemessenen Zustände. Insbesondere die Verkehrsgeschwindigkeit ist stark verfälscht.

Die Ursachen dafür sind vielfältig. Einerseits ist das makroskopische Nachfragegerüst nur eine erste Approximation und bedingt einer genaueren Kalibration auf mikro- oder mesoskopischer Ebene. Andererseits sind makroskopische Nachfragemodelle oft mit Verkehrsflüssen auf verschiedenen Strassen kalibriert. Wie in Abb.1 dargestellt, bringt dies

allerdings den Nachteil mit sich, dass eine klare Zuordnung der dazugehörigen Staudichte fehlt. Dies führt dazu, dass es wie im vorliegenden Fall zu einer Überschätzung der Verkehrsgeschwindigkeit kommt. Deshalb ist eine Korrektur dieser ursprünglichen Nachfrage nötig. Indem die Skalierungsfaktoren variiert werden, kann ein vollständiges MFD abgebildet werden.

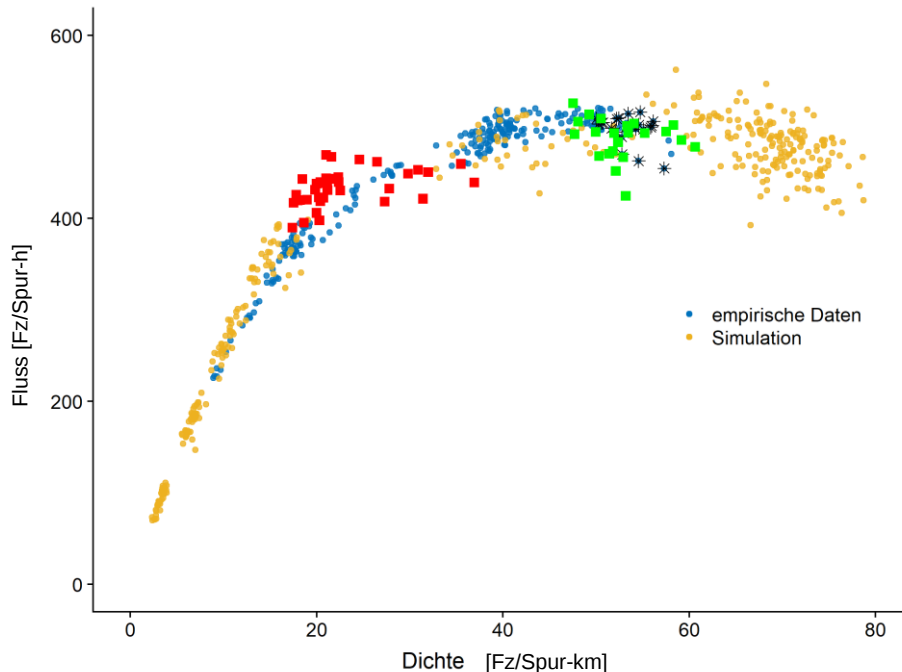


Abb.10 Reales und virtuelles MFD des Analyseperimeters der Stadt Zürich. Blau dargestellt sind die empirischen Daten aus Schleifen, Gelb die Simulation. Rot stellt den Zustand dar, welcher mit der Simulation mit dem initialen Nachfragegerüst herrscht. Sterne zeigen den Soll-Zustand gemäss empirischer Auswertung. Grün stellt den Simulationszustand bei kalibrierter Nachfrage dar.

Werden nun die empirischen Daten und die Simulation verglichen, kann der Skalierungsfaktor, der zu einer guten Übereinstimmung sorgt, determiniert werden. So zum Beispiel sorgt ein Skalierungsfaktor von 1.3 (grün markierte Simulationspunkte) für eine gute Übereinstimmung zwischen den empirisch beobachteten Verkehrszuständen während der Abendspitzenstunde und der Simulation. Das heisst, dass eine Skalierung der ursprünglichen makroskopischen Initialnachfrage mit einem Faktor von 1.3 die empirischen Zustände gut repliziert. Dies ist ein erfreuliches Resultat, denn die vorgeführten Schritte sind relativ einfach zu replizieren und auf andere Situationen und geographischen Gegebenheiten anzupassen. Das MFD bietet eine hohe Flexibilität in der Modellierung und kann deshalb versatil eingesetzt werden. Am Beispiel des Zürcher Hauptbahnhofs konnte gezeigt werden, dass eine nicht-definierte latente Verkehrsnachfrage existiert, und dass diese mittels der oben beschriebenen Methode eruiert werden kann. Damit ist es möglich Verkehrszustände, Rückstaulängen und die Fahrzeiten realistisch zu simulieren.

Es sei hier angemerkt, dass dieses Verfahren eine relativ gut definierte Simulation benötigt. In anderen Worten: Das eingebundene Nachfragegerüst sollte zum Beispiel relativ einfach skaliert werden können. Dies ist allerdings in den meisten Simulationsanwendungen der Fall. Darüber hinaus sollte angemerkt sein, dass eine Simulation immer mittels mehreren sogenannten Random-Seeds getestet werden sollte. Im vorliegenden Fall wurden 4 Random-Seeds getestet. Die Resultate bleiben robust.

5.2.3 Validierung der Methodik

Im Folgenden wird die in Abschnitt 5.2.1 definierte und in Abschnitt 5.2.2 angewandte Methodik mit einem neuen Datensatz validiert. Dafür wird ein Strassenzug in der Luzerner

Innenstadt ausgewählt. Es handelt sich um die Haldenstrasse am rechten Seeufer. Diese wird in beiden Richtungen gleichzeitig analysiert, und die Verkehrszustände werden wieder mittels MFD dargestellt. *Abb.11* zeigt den Simulationsmodellausschnitt; die Haldenstrasse ist blau markiert.

Das auf 15 Schleifendetektoren basierende, empirische MFD wird in *Abb.12* in violett (kleinere Kreise) dargestellt. Die Simulationsergebnisse der einzelnen Skalierungsfaktoren werden in verschiedenen Farben (grössere, ausgefüllte Kreise) dargestellt. Die Skalierungsfaktoren der Initialnachfrage, die gestützt auf Zählraten hergeleitet wurde, reichen hier von 0.5 bis 2. Insgesamt wurden 4 Random-Seeds getestet. Im Fall von Luzern ist erkenntlich, dass die latente Nachfrage rund 1.375 der Initialnachfrage entspricht. Diese ist in der Abbildung mit einem orangenen Kreis markiert. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich um einen Zufall handelt, dass der Skalierungsfaktor jenem von Zürich ähnlich ist.

Diese Analyse validiert die Resultate des im vorherigen Abschnitt beschriebenen Anwendungsfalls. Die Methode zeigt in der Tat robuste und einfach zu erzeugende Resultate. Die Methode ermöglicht es, nicht nur die latente Nachfrage zu bestimmen, sondern auch eine übergeordnete Initialnachfrage für das Verkehrsflusssimulationsmodell zu verfeinern bzw. zu kalibrieren.



Abb.11 Verkehrsflusssimulationsmodell mit dem Analyseperimeter (blauer Strassenzug) der Stadt Luzern

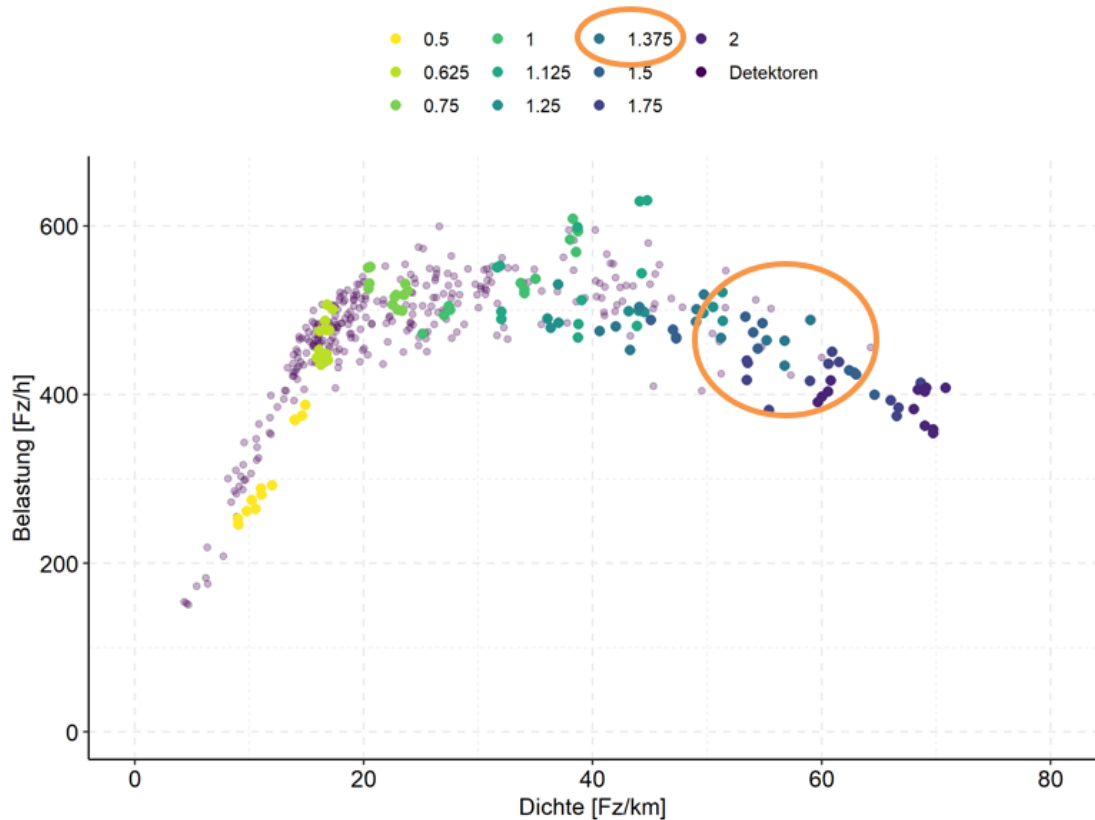


Abb.12 Reales und virtuelle MFD unterschiedlicher Skalierungsfaktoren (vgl. Zahlenwerte je Punktfarbe) des Analyseperimeters der Stadt Luzern

5.2.4 Synthese

Die folgende Aufzählung fasst den wissenschaftsgetriebenen Ansatz zusammen.

Datenbedarf:

- Initialnachfrage (z. B. aus Makromodell)
- Zähldaten
- Geschwindigkeitsdaten (z. B. FCD, Belegungsdaten)

Methodik:

1. Mit Initialnachfrage in Simulationsmodell das MFD erzeugen
2. Auswertung realer Daten und Überlagerung mit erzeugtem MFD
3. Rückschluss auf latente Nachfrage durch Skalierung der Initialnachfrage.

Diese Methodik erlaubt es, eine aus Zähldaten eruierte Initialnachfrage zu kalibrieren und dadurch potentielle Überlastszenarien im Netz entsprechend abzubilden und zu simulieren.

5.3 Anwendungsgetriebener Ansatz

Der anwendungsgetriebene Ansatz verfolgt das Ziel, eine sehr pragmatische Methodik zu entwickeln, mittels derer Fragestellungen in Überlastsystemen ohne Einsatz von aufwändigen Simulationsarbeiten mit adäquater Robustheit beantwortet werden können. Dies erfolgt unter Nutzung von Synergien zu einem realen Projekt um den Escher-Wyss-Platz in

Zürich (siehe Knoten Nr. 402 und 403 und Umgebung in Abb.13). Dieses reale Projekt zeichnet sich dadurch aus, dass erstens Aussagen zu Veränderungen und Verlagerungen von Verkehrsflüssen in einem überlasteten Verkehrssystem als Folge von Massnahmen gefragt waren und zweitens ein umfangreicher, zeitlich gut aufgelöster Datensatz von Zählstellenzählenden, Detektorzählenden, Grünzeiten und FCD verfügbar war. Die Beantwortung der Fragen soll sich dabei ganz bewusst nicht auf ein Simulationswerkzeug abstützen.

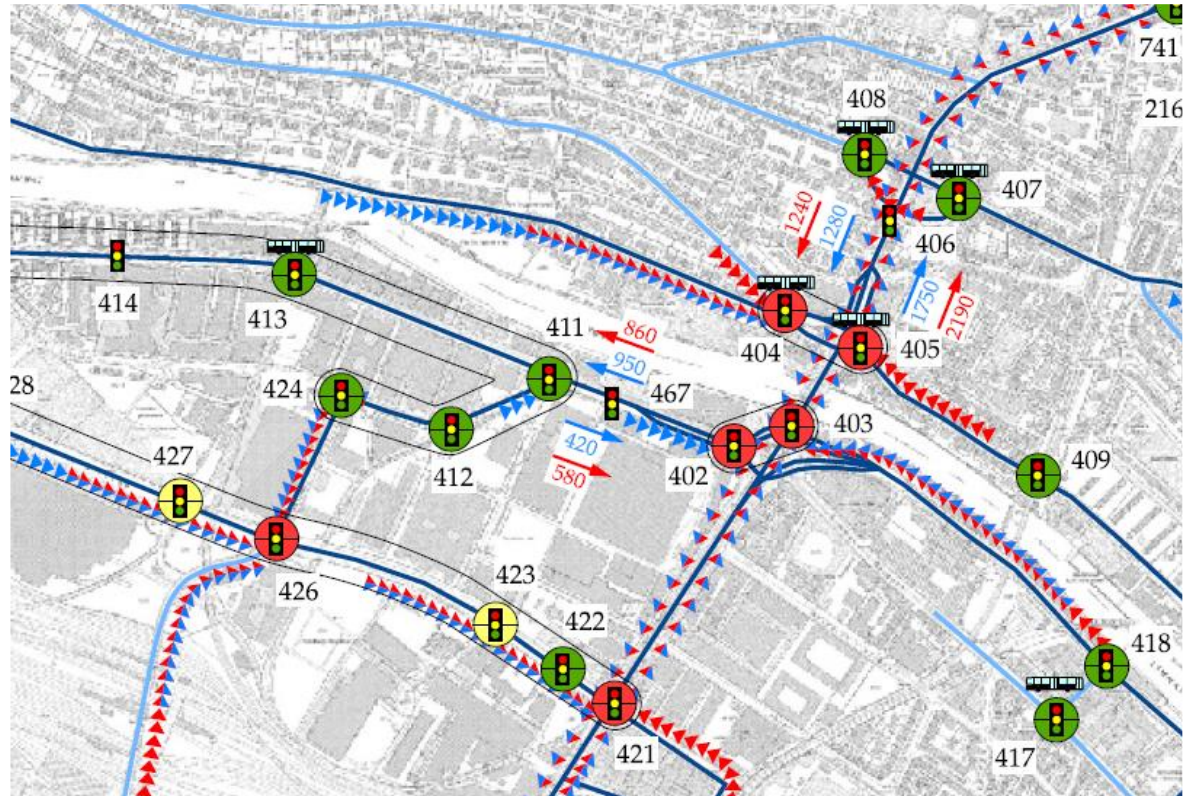


Abb.13 Das überlastete Knotensystem am Escher-Wyss-Platz (Legende: Dreiecke blau resp. rot: Stau in der MSP resp. ASP, grün, gelb, rot hinterlegte LSA: Auslastung gering, mittel, hoch; Quelle: Stadt Zürich, Dienstabteilung Verkehr)

5.3.1 Konzeptionelle Erkenntnisse

In der grundsätzlichen/konzeptionellen Auseinandersetzung mit dem Verkehrssystem am Escher-Wyss-Platz ist eine Reihe von Überlegungen entstanden, die sich als wertvolle Grundlage im Hinblick auf die Einschätzung und Beantwortung von Fragestellungen zu überlasteten Strassensystemen zeigten. Diese sind im Folgenden aufgeführt und erläutert (Quelle: DAV/RMK 2018).

a) Dynamische Aspekte

Die im Zentrum des Interesses stehende Ausprägung des Verkehrsflusses variiert mitunter je Zeitintervall und auch innerhalb des Zeitintervalls. Es ist somit denkbar, dass sie in den verschiedenen ¼-Stunden-Intervallen signifikant unterschiedliche Werte aufweist oder sich gar innerhalb einer einzigen ¼-Stunde signifikant ändert. Zu beachten ist dies etwa bei folgenden Ausprägungen respektive Wechseln zwischen diesen:

- Der Zählquerschnitt ist überstaut oder nicht überstaut.
- Der Abfluss aus dem Knoten ist frei oder behindert.
- Die Grünzeit auf der Zufahrt ist nutzbar oder nicht nutzbar (z. B. infolge überstautem nachfolgendem Streckenabschnitt).

b) Deckungsungleichheit zwischen Ausprägung und betrachtbaren Zeitintervallen ($\frac{1}{4}$ h, 1 h, ...):

Bei der Betrachtung der erwähnten dynamischen Aspekte ist der verfügbaren oder verwendeten zeitlichen Auflösung der Daten Rechnung zu tragen. Je kleiner die Zeitintervalle sind, desto präziser können signifikante Änderungen identifiziert werden.

- Die Wahrscheinlichkeit, dass etwa der Beginn einer Behinderung eines Verkehrsflusses und damit einhergehende Überlasteffekte in Form von Rückstaubildung exakt auf den Beginn eines Zählintervalls fallen, ist sehr klein.
- Demgegenüber gilt es zu beachten, dass die betrachtete Kenngrösse auch gerade wegen des betrachteten Zeitintervalls Variationen zeigt. Dies ist insbesondere bei Grünzeiten der Fall, da die Umlaufzeit von Lichtsignalanlagen nicht zwingend ein Bruchteil einer $\frac{1}{4}$ h ist.

c) Vordosierungsaspekte bei sich vereinigenden Strömen

Vereinigen sich Verkehrsflüsse an Knoten, so resultiert mitunter einzig aus diesem Zusammenfluss ein Dosierungseffekt. Dies ist dann der Fall, wenn die über die Zuflüsse summierte Kapazität über derjenigen des Abflusses liegt. Ganz konkret und operativ resultiert der Dosierungseffekt aufgrund reduzierter Grünzeiten und/oder behinderter Abfluss.

- $Q_{\text{Abfluss}} < Q_{\text{Zufluss 1}} + Q_{\text{Zufluss 2}}$ führt zu Rückstau.

d) Bereits vorhandener Rückstau zu Beginn des Betrachtungsintervalls:

Ist auf dem betrachteten Abschnitt zu Beginn des Betrachtungsintervalls bereits Rückstau vorhanden, so muss dem bei der Betrachtung des Verkehrsflusses Rechnung getragen werden. Denn damit ein bereits überlasteter Strassenabschnitt unverändert im Zustand der Überlast verharrt, genügt ein kleinerer Zufluss als für das Erreichen des Überlastzustands erforderlich. Oder anders gesagt kann dieser Rückstau unter Umständen auch bei einem gegenüber der Leistungsfähigkeit des Abschnitts kleineren Zufluss nicht abgebaut werden. Erst wenn er die Grösse des Abflusses unterschreitet, baut sich die Überlastsituation wieder ab. Dies ist beim Umgang mit entsprechenden Verkehrszählraten zu berücksichtigen. Ob und in welchem Ausmass Stauereffekte vorliegen, lässt sich wie folgt erfassen:

- Erhebung des Rückstaus direkt vor Ort oder indirekt z. B. aufgrund von FCD

oder

- Bestimmung des Rückstaus aufgrund des sich im Zeitverlauf aufsummierenden Leistungsdefizits (Anzahl nicht verarbeitete Fahrzeuge) ab einem staufreien Zeitpunkt z. B. nachts)

e) Intensität der Verkehrsbelastung = $f(Q(t), k(t))$:

Angesichts der Interaktion zwischen Verkehrsfluss und Verkehrsdichte ist dem Begriff der Verkehrsbelastung mit Vorsicht zu begegnen. Ein Verständnis im Sinne einer am Querschnitt gezählten Menge Fahrzeuge greift hierbei zu kurz und wird dem Aspekt der Überlast nicht gerecht. Auch gibt es nicht das maximale Verkehrsaufkommen im Sinne des höchsten Zählwerts an einem Querschnitt oder ähnlich. Die Intensität der Verkehrsbelastung muss somit im Lichte verschiedener Faktoren und Effekte verstanden und bewertet werden. Folgende Aspekte spielen hierbei eine Rolle:

- Eine überdurchschnittliche Verkehrsbelastung ist nicht gleichbedeutend zu einem grossen Verkehrsfluss. Die Intensität der Belastung ergibt sich vielmehr im Lichte der allfälligen und insbesondere flussabwärts vorhandenen Rückstauereffekte.

- Starke Rückstaueffekte zeichnen sich durch hohe Anteile stehender bis stockend verkehrender Fahrzeuge aus, was mit vergleichsweise niedrigem Verkehrsfluss und hohen Reisezeiten einhergeht.
- Die Differenzierung verschiedener Intensitäten der Verkehrsbelastung hat stets in Kombination mit einer Analyse der Reisezeiten respektive Verlustzeiten und Staulängen zu erfolgen.
- Falls keine Daten bezüglich Reisezeiten und Staulängen direkt und explizit vorliegen, kann in der konkreten Anwendung alternativ der Verkehrsfluss an LSA-Knoten aufgrund der während den angebotenen Grünzeiten verarbeitbaren Verkehrsmenge beurteilt werden. So können allfällige Leistungsdefizite und damit einhergehende Verlustzeiten und Rückstaus identifiziert werden.
- Die Herleitung der Intensität der Verkehrsbelastung resultiert somit aus einer Analyse und Gegenüberstellung der verfügbaren Daten.
- Dabei gilt es auch zu beachten, dass zur Beschreibung der Verkehrsbelastung nicht einzig gemittelte $\frac{1}{4}$ h-Werte aneinandergereiht werden dürfen, sondern auch allfälligen betrieblichen Abhängigkeiten zwischen den Zeitintervallen Rechnung zu tragen ist.
- Somit wird die jeweilige Verkehrsbelastung durch einen in sich über die Zeitintervalle konsistenten Datensatz repräsentiert.
- Wird auf Basis der Grünzeiten auf die verarbeitbaren Verkehrsmengen geschlossen, so gilt es zu berücksichtigen, dass die Grünzeiten gegebenenfalls infolge eines Staumanagements reduziert sein könnten.

5.3.2 Erkenntnisse aus dem Datensatz

Die nachfolgenden Abbildungen geben einen beispielhaften Einblick in die analysierten Daten des Verkehrssystems am Escher-Wyss-Platz. Dabei handelt es sich sowohl um Zählraten der LSA-Detektoren als wie auch um Grünzeiten der einzelnen Signalgruppen. Die aus den Abbildungen ersichtlichen Aspekte und damit einhergehenden Erkenntnisse sind nachfolgend beschrieben.

Abb.14 zeigt links die mittels LSA-Detektoren erfassten Verkehrsflüsse und rechts die dazugehörigen Grünzeiten am 30.06.2017 in Viertelstundenintervallen. Zur Vereinfachung der Vergleichbarkeit sind die Grünzeiten auf Basis einer mittleren Fahrzeugfolgezeit von 2 s in entsprechende Kapazitäten/Sättigungsverkehrsstärken umgerechnet. Zunächst fällt unweigerlich auf, dass die einzelnen Werte oszillieren. Der Grund dafür ist der Umstand, dass das Zeitintervall der Viertelstunde kein Vielfaches der Umlaufzeit ist. Somit hat die eine Viertelstunde mal mehr, mal weniger Grünzeit. Auf den zwei Fahrspuren auf der Hardbrücke (D29, D30 resp. S1) nimmt der Verkehrsfluss beispielsweise in der Abendspitze (ASP) zu, während die Grünzeit auf etwa gleichem Niveau verharrt. Daraus lässt sich ableiten, dass der Verkehr auf der Hardbrücke die angebotene Grünzeit zu nutzen vermag und der Abfluss in Richtung Bucheggplatz nicht überstaut ist. Hingegen gehen Verkehrsfluss als auch Grünzeit in der Röschibachstrasse (D16, S3) leicht zurück. Für sich betrachtet lässt sich aus diesen Daten kein Rückschluss auf die Verkehrslage ziehen. Es bleibt unklar, ob der Abschnitt vor der LSA überlastet ist oder der Verkehr frei fließen kann. Da aufgrund der Situationskenntnisse aber klar ist, dass dieser Abschnitt überlastet ist, lässt sich aufgrund der Daten schliessen, dass der Verkehrsfluss auf der Hardbrücke steuerungstechnisch eine höhere Priorität genießt als derjenige in der Röschibachstrasse.

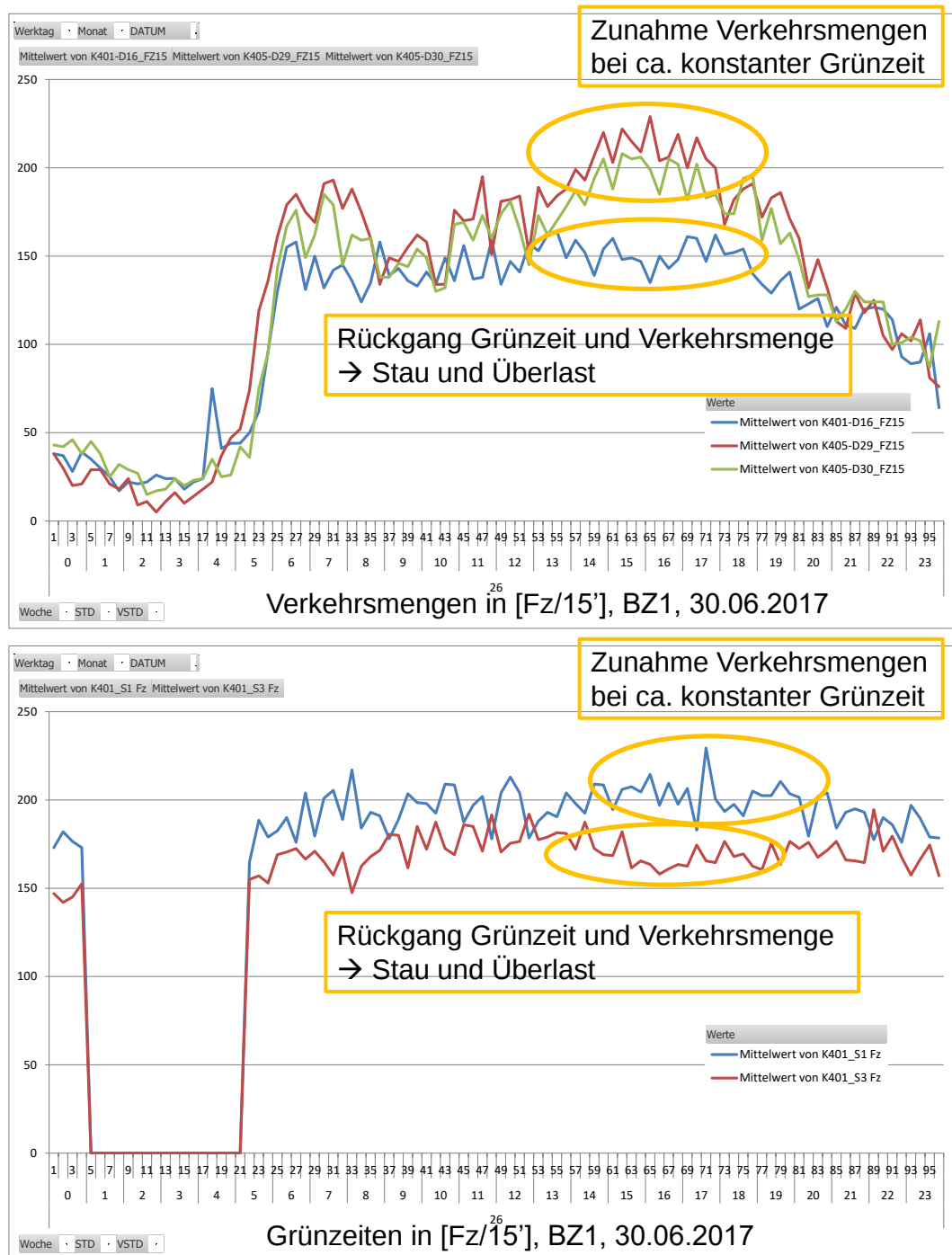


Abb.14 Zähldaten (oben) und Grünzeiten (unten; auf Basis einer Fahrzeugfolgezeit von 2 s in die maximale Kapazität umgerechnet) bei der Einfahrt der Röschibachstrasse in die Rosengartenstrasse (Quelle: DAV/RMK 2018)

Aus Abb.15 wird die Situation an der zu oben vorgelagerten LSA am Wipkingerplatz ersichtlich. Auch hier lässt sich aufgrund der Daten alleine für den Verkehrsstrom in Richtung Röschibachstrasse kein abschliessender Zustand festhalten. Mit dem Wissen, dass diese Achse überlastet ist, lässt sich festhalten, dass der Rückgang von Verkehrsfluss und Grünzeit auf ein Stauraummangement zurückzuführen ist: Da der nachfolgende Abschnitt vor der Einfahrt in die Rosengartenstrasse zugestaut ist, wird die Grünzeit reduziert und dadurch der Abfluss in die Röschibachstrasse verringert. Bezüglich der

anderen Spuren zeigt sich, dass dort der Abfluss ungehindert möglich ist und in der ASP ansteigt, während die Grünzeit auf unverändertem Niveau verbleibt.

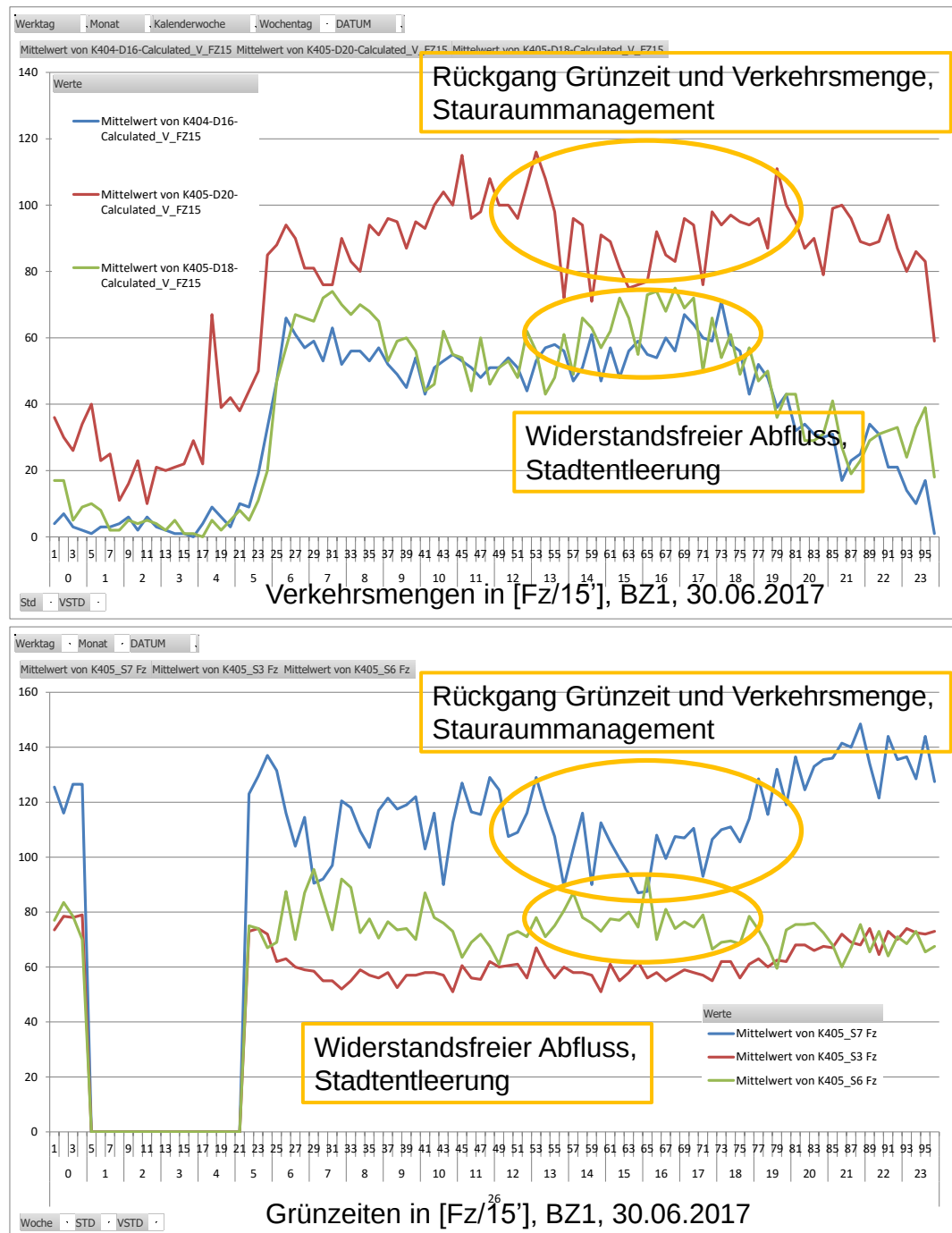


Abb.15 Zählraten (oben) und Grünzeiten (unten) der Einbieger in die Röschibachstrasse am Wipkingerplatz (Quelle: DAV/RMK 2018)

In Abb.16 sind die Zählraten und Grünzeiten in der Zufahrt zur Wipkingerbrücke abgebildet. Auch hier lässt sich, im Wissen um die Überlast auf der Wipkingerbücke, schliessen, dass eben diese Überlast mit einem aufgrund des Stauraummanagements leichten Grünzeitenrückgang einhergeht und daher auch die Zuflüsse zurückgehen. Letztere gehen zudem auch daher zurück, weil der massive Rückstau auf der Wipkingerrücke zuweilen in den Knoten zurückreicht.

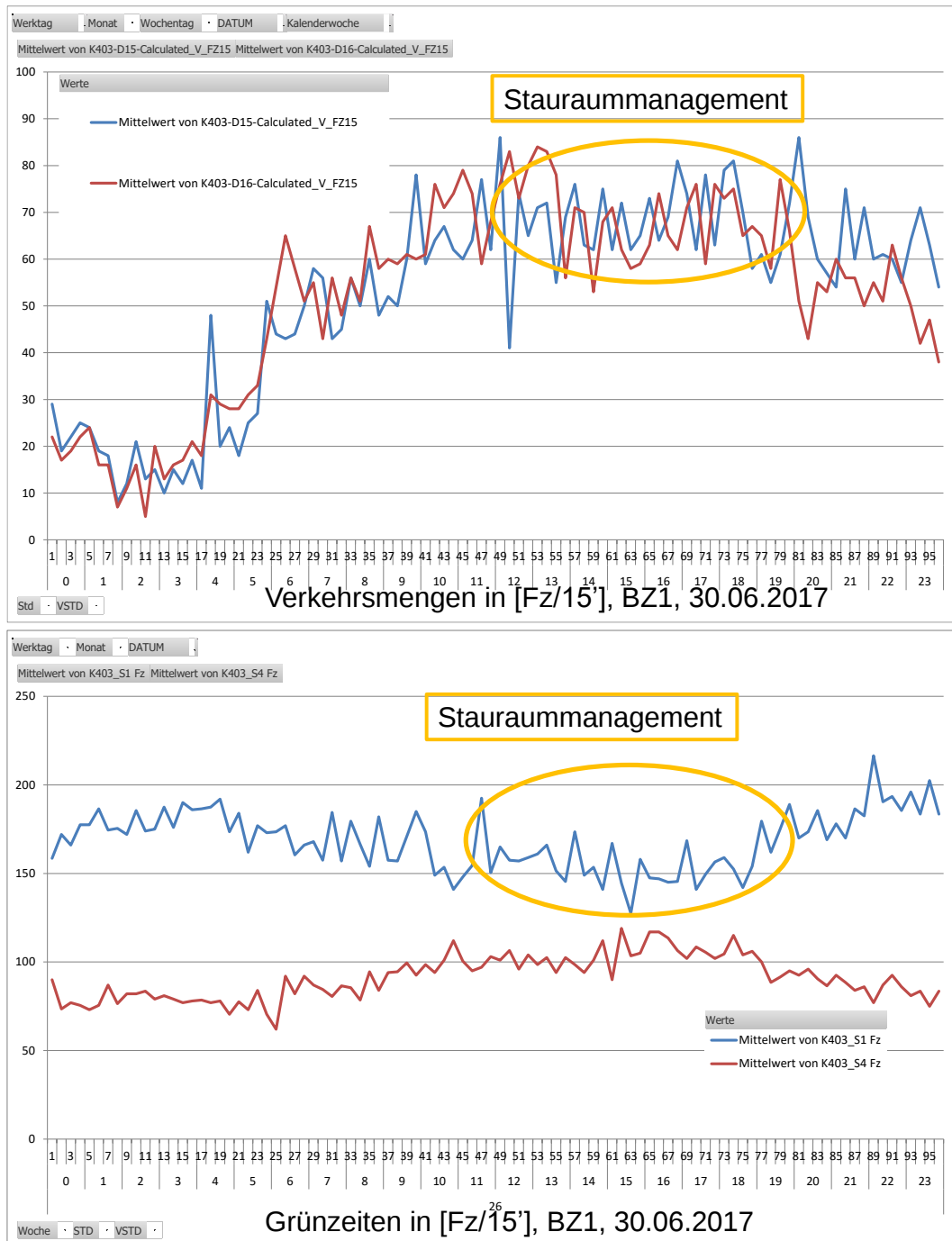


Abb.16 Zähldaten (oben) und Grünzeiten (unten) der Zuflüsse auf die Wipkingerbrücke (Quelle: DAV/RMK 2018)

Wie die Erkenntnisse aus den Abbildungen zeigen, lassen sich aufgrund dieser Daten wertvolle Rückschlüsse auf die betriebliche Situation im Verkehrssystem und die Zu- und Abflüsse der einzelnen Streckenabschnitte ziehen. So wird etwa klar, wo und wann

- die Fahrzeuge gut abfließen können,
- die Abflüsse behindert sind oder aber
- die Zuflüsse und deren Grünzeiten als Folge eines Stauraummanagements zurückgehen.

Dabei wird aber auch klar, dass die Situation vielfach nicht ohne Wissen um die Verkehrslage respektive die Verkehrsdichte richtig eingeschätzt werden kann. Dieses Wissen kann etwa auf Beobachtungen zur Verkehrslage vor Ort wie auch auf FCD abgestützt werden. Zählzeiten und Grünzeiten allein reichen nicht aus, um das System abschliessend zu beschreiben.

5.3.3 Konzeption der Methodik

Wie die Erkenntnisse aus den obigen Absätzen 5.3.1 und 5.3.2 zeigen, sind die verkehrlichen Geschehnisse an den Knoten von zentraler Bedeutung für die Einschätzung der Verkehrsflüsse und deren Veränderung als Folge etwa von Massnahmen. Dies ist grundsätzlich nicht unerwartet und auch nicht verwunderlich. Und doch überrascht es mitunter, dass diese im Kontext der einzelnen Knoten im gegenseitigen Vergleich Aussagen zum Verkehrsfluss auf den Streckenabschnitten erlauben. erinnert man sich an die Betrachtungen in *Abb. 3.*, so wird die Analogie offensichtlich: Im Abfluss am flussabwärts liegenden Knoten erfasste Fahrzeuge und Grünzeiten repräsentieren den aus dem Streckenabschnitt abfließenden Verkehrsfluss, in den Zuflüssen am flussaufwärts gelegenen Knoten erfasste Fahrzeuge und Grünzeiten repräsentieren den in den Streckenabschnitt einfließenden Verkehr. In der Bilanz zwischen Zu- und Abfluss lässt sich für den jeweiligen Streckenabschnitt eine Aussage zum Verkehrsfluss und zu allfälligen Rückstauwirkungen ableiten.

Die Konzeption der Methodik stützt genau auf diese Sachverhalte ab und baut dementsprechend auf die nachfolgend beschriebenen Analysen:

- Unterteilung des betrachteten Verkehrsnetzes in die relevanten (un-)geregelten Knoten und Streckenabschnitte (ganz im Sinne der Wannen gemäss *Abb. 3*)
- Identifikation und Lokalisierung der Stauwurzel(n)
- Analyse der Zu- und Abflüsse
- Analyse der zugehörigen Grünzeiten
- Analyse der Dichte resp. Geschwindigkeit
- Ermittlung von Reisezeitenveränderungen und Verlagerungseffekten

Unterteilung des betrachteten Verkehrsnetzes in die relevanten (un-)geregelten Knoten und Streckenabschnitte

Das betrachtete Verkehrsnetz des Analyseperimeters wird in der Betrachtung in einzelne Abschnitte im Sinne von Wannen gemäss *Abb. 3* unterteilt. Hierbei bietet sich eine Unterteilung in die Streckenabschnitte zwischen (un-)geregelten Knoten an. Dabei werden auch die Anzahl der Spuren auf den Strecken und an den Knoten die einzelnen Abbieger inklusive Fahrspuranzahl wie auch, falls der Knoten per LSA geregelt wird, die Signalgruppen festgehalten. Dabei ist es etwa von Bedeutung, wie viele zufließende Fahrstreifen in wie viele abfließende Fahrstreifen führen. Je nach dem ist hierbei die Voraussetzung für einen vordosierenden Effekt gegeben.

Identifikation und Lokalisierung der Stauwurzel(n)

Die Identifikation und Lokalisierung der Stauwurzel ergibt sich für den Fall des Ist-Zustands in der Regel aufgrund der Beobachtung vor Ort. Alternativ ist es bei entsprechender Datenverfügbarkeit (z. B. Echtzeit-Verkehrslage) auch möglich, hierzu eine datengestützte Aussage zu machen, auch wenn Beobachtungen vor Ort in jedem Falle zu empfehlen sind. Die Stauwurzel zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass unterhalb der Stauwurzel der Abfluss unbehindert möglich ist, oberhalb jedoch nicht.

Analyse der Zu- und Abflüsse und der zugehörigen Grünzeiten

Analog zur Wannenbetrachtung werden für die einzelnen Abschnitte die Zu- und Abflüsse analysiert und einander gegenübergestellt. Daraus wird ersichtlich, ob der Zufluss grösser,

gleich oder kleiner als der Abfluss ist und ob dementsprechend Rückstau und Reisezeiten anwachsen, gleichbleiben oder zurückgehen.

Die Analyse der Grünzeiten ist dahingehend von Relevanz, als es im Vergleich zum Verkehrsfluss der zugehörigen Signalgruppen vorkommen kann, dass die Grünzeiten aus zwei unterschiedlichen Gründen nicht genutzt werden:

- Es hat grundsätzlich wenig Verkehr.

Oder:

- Der nachgelagerte Systemabschnitt ist überlastet und dementsprechend zugestaut.

Die Grünzeit ist somit nur ein Kriterium der Kapazität von mittels LSA gesteuerten Knoten.

Dieser Sachverhalt ist auch etwa dahingehend von Relevanz, als sich der Abfluss am abwärts gelegenen Knoten erhöhen kann (z. B. weil die Stauwurzel entfallen ist) und in der Folge die Grünzeit wieder besser genutzt werden kann. Somit steigt auch der Zufluss in den nachfolgenden Abschnitt an.

Analyse der Dichte resp. Geschwindigkeit

Aufgrund der Doppeldeutigkeit des Verkehrsflusses im Kontext zur Verkehrsdichte ist es zentral, eine Aussage zur Verkehrsdichte auf dem betrachteten Abschnitt machen zu können. Für den Ist-Zustand ist dies entweder aufgrund von Erhebungen und Beobachtungen vor Ort oder indirekt aus der Geschwindigkeit oder der Belegungszeit von Detektoren möglich. Zwar ist auch etwa die Kenntnis der Geschwindigkeit keine abschliessend ‚sichere‘ Kenngrösse, die eine Aussage zur Dichte zulässt, denn es wäre auch möglich, dass die Verkehrsteilnehmenden mit tiefer Geschwindigkeit unterwegs wären, obwohl die Verkehrslage es zulassen würde, schneller zu fahren. Es ist aber sehr unwahrscheinlich, dass solches eintreffen würde, zumal auch die Fahrzeugfolgezeiten entsprechend passen müssten, auf dass eine Zweideutigkeit gegeben wäre. Angesichts dessen ist es als hinreichend anzusehen, von einer tiefen Geschwindigkeit auf Staueffekte zu schliessen. In Nebenstunden gilt es bei der Verwendung, dass bei einer vorliegenden Geschwindigkeit von 0 km/h bei 0 Fz/h aufgrund der Geschwindigkeitsangabe nicht auf Stau gefolgert wird.¹

Ermittlung von Reisezeitenveränderungen und Verlagerungseffekten

Zuweilen kann es über die eigentliche Analyse des Verkehrsflusses im betrachteten Verkehrsnetz hinaus von Interesse sein, für einen Planfall die aus entsprechenden Massnahmen hervorgehenden Auswirkungen auf die Reisezeiten und damit einhergehenden Verlagerungseffekte abzuschätzen. Hierfür gilt es, auf den einzelnen Abschnitten die Änderung der Reisezeiten Δt zu schätzen. Dabei kann wie folgt vorgegangen werden:

- Vergleich der Grünzeiten der Zuflüsse, der Grünzeiten der Abflüsse und der Abflüsse des Ist-Zustands und des Planfalls
- falls **Verkehrsflusssituation unverändert**:

$$\Delta t \approx \Delta t_{\text{heute}}$$
- bei **Entlastung**:
 Δt aufgrund statischer Berechnung mit Grünzeit oder gezählter frei zufließender Verkehrsmenge als Grundlage für Zufluss und Sättigung
- bei **zusätzlicher Belastung**:
 - Bestimmung Rückstauraumverlust infolge alternativem Verkehrsregime

¹ Dies ist etwa bei der Erstellung einer FCD-gestützten, farblich abgestuften Verkehrslagedarstellung über den Tagesverlauf zu beachten.

- Abschätzung der zusätzlichen Staulänge im Zulauf
- daraus und in Kombination mit FCD Bestimmung der gesamten Staulänge
- Bestimmung Δt aufgrund zusätzlicher Staulänge und v gemäss FCD
- Alternativ:
Simulation ab Zeitpunkt vor Überlast

Eine Schätzung der Verlagerungseffekte kann wie folgt durchgeführt werden:

- Bestimmung der relevanten Alternativrouten
- Bestimmung der Reisezeit der Ausgangsrouten aufgrund der FCD und der gemäss oben ermitteltem Δt
- Bestimmung der Reisezeiten aller Alternativrouten aufgrund der FCD
- Bestimmung der Verlagerungswahrscheinlichkeiten aufgrund der Reisezeiten der jeweiligen zwei Routen im Vergleich

Beispiel: Routenwahlschätzung nach Kirchhoff (Quelle: Schnabel und Lohse (2019))

Zur Einschätzung der unterschiedlichen Attraktivität der betrachteten Routen und der damit verbundenen Verlagerungseffekte können die Wahrscheinlichkeiten der Wahl einer der beiden Routen mittels der „klassischen“ (Kirchhoff'schen) Aufteilungsregel bestimmt werden:

$$\text{Verkehrsanteil (Wahrscheinlichkeit): } P(str) = \frac{(A_{str})^{-\alpha}}{\sum_{r'}^n (A_{str'})^{-\alpha}}$$

mit A = Aufwandswert (hier: Reisezeit)
 st = Beziehung (z. B. von A nach B)
 r = Route (von A nach B über Route r)

Die Empirie empfiehlt bezüglich des Faktors α für Stadtstrassennetze Werte von 6 bis 8 und für Landstrassennetze Werte von 12 bis 16 (Quelle: Schnabel und Lohse (2019)).

5.3.4 Testanwendung der konzipierten Methodik

Im Nachfolgenden wird das oben skizzierte Konzept einer anwendungsorientierten Methodik anhand des Beispiels Escher-Wyss-Platz exemplarisch und testweise angewendet. Dabei gilt es zu analysieren, inwiefern sich als Folge der Massnahme einer Umsignalisation die Überlast- und Rückstauereffekte wie auch die Reisezeiten gegenüber dem Ausgangszustand verändern und inwieweit dies zu Verlagerungseffekten führt. Gegenstand dieser Umsignalisation sind die getrennte und einspurige Führung der Verkehrsflüsse Richtung Wipkingenbrücke und Sihlquai.

Unterteilung des betrachteten Verkehrsnetzes in die relevanten (un-)geregelten Knoten und Streckenabschnitte

In Abb.17 sind die relevanten, per LSA geregelten Knoten ersichtlich. Diese Knoten dienen hier als Grundlage für die Unterteilung des Verkehrsnetzes in die relevanten Streckenabschnitte wie folgt:

- K405/K404 – K401
- K403 – K405/K404
- K402 – K403
- K411/K467 – K402
- K412 – K411/K467
- K414 – (K413 –) K411/K467
- K426 – (K424 – K412 –) K411/K467



Abb.17 Knotennummern der per LSA geregelten Knoten (links), Auslastung der Knoten gemäss Layer Kenngrössen Verkehrsmanagement (rechts) (Quellen: DAV)

Identifikation und Lokalisierung der Stauwurzel(n)

Die hauptsächliche Stauwurzel liegt beim Knoten K401. Dort fliessen die Verkehrsflüsse von der Hardbrücke und von der Röschibachstrasse zusammen, wobei der zweispurige Verkehrsfluss auf der Hardbrücke gegenüber dem Zustrom aus der Röschibachstrasse ein höheres Gewicht geniesst, sodass die Grünzeit für die Röschibachstrasse nicht ausreicht, damit der gesamte Zufluss verarbeitet werden könnte. Dementsprechend staut es von hier aus zurück bis in die Hardturmstrasse und die Förrlibuckstrasse/Duttweiler-strasse.

Weitere Stauwurzeln sind am K402 und am K411 zu vermuten, da hier massgebende Verkehrsflüsse zusammenfliessen, wobei die Anzahl der Spuren im Abfluss kleiner als die Summe der Spuren der Zuflüsse ist.

Analyse der Zu- und Abflüsse und der zugehörigen Grünzeiten

Die Gegenüberstellung von Zu- und Abflüssen und der zugehörigen Grünzeiten erfolgt für die folgenden Abschnitte:

- K405/K404 – K401:
Wipkingerbrücke Richtung Röschibachstrasse
- K411/K467 – K402 (resp. 403):
Rechte Spur am Escher-Wyss-Platz aus Richtung Hard(turm)strasse in Richtung Sihlquai
- K414 – (K413 –) K411/K467 (resp. 402):
Zufahrtsachse von der A1 zum Escher-Wyss-Platz über Hardturmstrasse
- K426 – (K424 – K412 –) K411/K467 (resp. K402):
Zufahrtsachse von der A1 zum Escher-Wyss-Platz über Pfingstweidstrasse – Förrli-buckstrasse

Bezüglich der übrigen Abschnitte wird auf eine gesonderte Betrachtung verzichtet, da sie etwa sehr kurz sind (insb. Abschnitte K405/K404 – K401 und K402 – K403) oder aber die innerhalb des Abschnitts liegenden LSA insgesamt nicht von Relevanz für die Rückstauwirkungen sind (insb. die Zufahrtsachsen aus Richtung A1). Allerdings ist ein allfälliger Vordosierungseffekt am K402 zu berücksichtigen. Zudem erfolgt die Betrachtung unter Berücksichtigung der Aufweitung von einer Spur auf zwei Spuren zwischen dem K467 und dem K402. Aufgrund der hohen Rückstauwahrscheinlichkeit in der linken Spur am Escher-Wyss-Platz aus Richtung Hard(turm)strasse in Richtung Wipkingerbrücke in der heutigen wie in der geplanten Situation wird die linke Spur nicht explizit analysiert.

Abschnitt Wipkingerbrücke Richtung Röschibachstrasse

Die erhobenen respektive mittels Detektoren erfassten Zu- und Abflüsse wie auch die zugehörigen Grünzeiten bezüglich des Abschnitts der Wipkingerbrücke sind in *Tab. 2* dargestellt.

Tab. 2 Bilanzierung der Zu- und Abflüsse der Wipkingerbrücke (Quelle: DAV/RMK 2018)

	Fz/h	Fz/h und Spur	Bemerkung
Zufluss in Wipkingerbrücke gemäss Erhebung			
Total	433...537		60 in Richtung Röschibachstrasse: 260... 322 Fz/h
aus Richtung Südwesten	345...415		
aus Richtung Sihlquai	88...122		
Zufluss in Wipkingerbrücke gemäss Detektorzählraten			
Total	ca. 440...500		
max. Zufluss auf Basis Grünzeiten			
Total		ca. 1'020	60 in Richtung Röschibachstrasse: ca. 612 Fz/h
aus Richtung Südwesten		ca. 620	Grünzeiten nicht voll nutzbar resp. Sättigung < 1'800 Fz/h
aus Richtung Sihlquai		ca. 400	

Tab. 2 Bilanzierung der Zu- und Abflüsse der Wipkingerbrücke (Fortsetzung)

	Fz/h	Fz/h und Spur	Bemerkung
Abfluss ab Wipkingerbrücke gemäss Detektorzählraten			
Total			
in Richtung Röschibachstrasse		ca. 820	
in Richtung Höngg		ca. 380	Grünzeiten nicht voll nutzbar resp. Sättigung < 1'800 Fz/h
		ca. 440	

Im Hinblick auf eine mögliche Umsignalisation lässt sich folgendes festhalten:

Wie sich aufgrund des Grünzeitangebots beim K403 zeigt, kann der Zufluss auf die Wipkingerbrücke trotz einspuriger Verkehrsführung in zu heute unveränderter Grösse erfolgen. Heute führt der Zufluss in dieser Grösse zur Überstellung der Wipkingerbrücke. Der mit dem Spurabbau einhergehende Kapazitätsabbau in Richtung Wipkingerbrücke wird dadurch kompensiert, dass das heutige mit der Zweispurigkeit einhergehende Grünzeitangebot (bei gleicher Grünzeit und zwei Spuren resultiert die zur Einspurigkeit doppelte Kapazität) bei weitem nicht ausgeschöpft wird und ein Rückstaurückgang auf der Wipkingerbrücke eine bessere Ausschöpfung des Grünzeitangebots ermöglichen würde.

Es stellt sich hier allerdings noch die Frage, ob der Spurabbau in Richtung Wipkingerbrücke am K402 zu einem Vordosiereffekt führt, sodass der Verkehrsfluss vom K402 zum K403 zurückginge und folglich der Zufluss auf die Wipkingerbrücke kleiner als der maximal mögliche Abfluss von der Wipkingerbrücke ausfallen könnte. Gemäss Abb.18 liegt das Grünzeitangebot für den Zufluss aus Richtung Hardturmstrasse in der Hauptverkehrszeit bei gut 15 s je $\frac{1}{4}$ h, was rund 300 Fz/h entspricht.

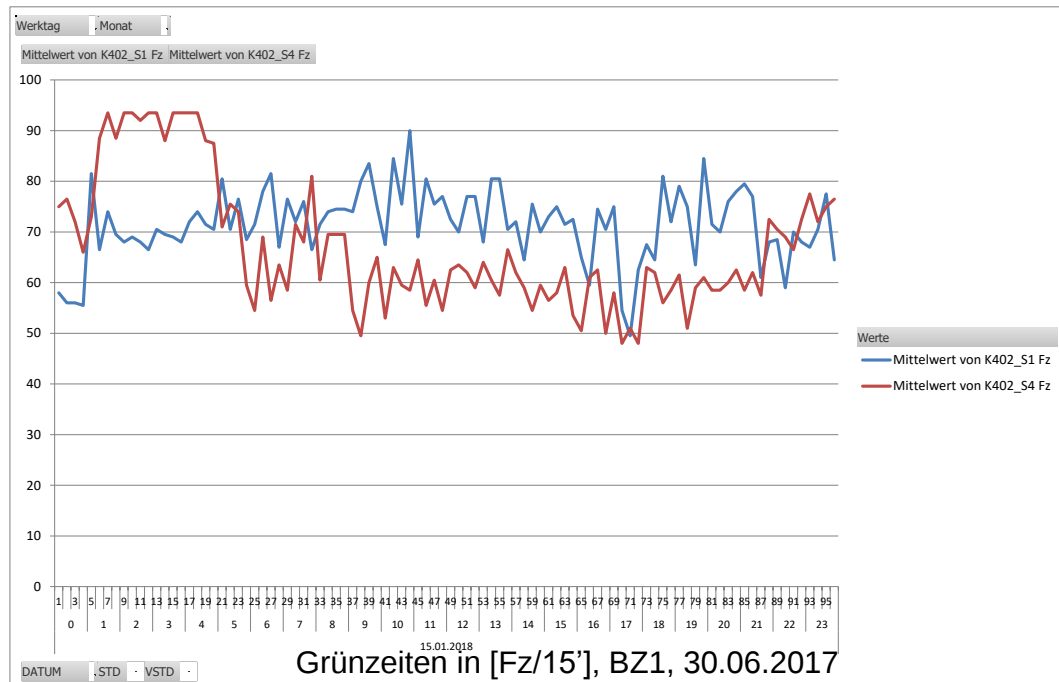


Abb.18 Grünzeiten am K402 (auf Basis einer Fahrzeugfolgezeit von 2 s in die maximale Kapazität umgerechnet; BZ1 Betriebszustand 1 ohne Tramverbindung Hardbrücke, mit Baustellen-Verkehrsregime; Quelle: DAV/RMK 2018)

Da die Reisezeit auf der Route über die Europabrücke für Fahrten nach Höngg attraktiver ist als auf derjenigen über die Wipkingerbrücke, kann davon ausgegangen werden, dass die Fahrzeuge dieses Zuflusses hauptsächlich in Richtung Röschibachstrasse verkehren.

Auch fliessen aus der Hardstrasse und aus dem Sihlquai Fahrzeuge in Richtung Röschi-bachstrasse hinzu, sodass nicht von einem Vordosiereffekt am K402 auszugehen ist, aufgrund dessen die Wipkingerbrücke entscheidend entlastet würde. Die rechte, in Richtung Röschi-bachstrasse führende Spur auf der Wipkingerbrücke ist somit auch im Falle der Um-signalisation eingestaut.

Rechte Spur am Escher-Wyss-Platz aus Richtung Hard(turm)strasse in Richtung Sihlquai

Die Gegenüberstellung von Verkehrsfluss und Grünzeit am K403 hinsichtlich der rechten Spur in Richtung Sihlquai ist in *Tab. 3* ersichtlich.

Tab. 3 Bilanz des Abflusses in Richtung Sihlquai

	Fz/h	Fz/h und Spur
Abfluss in Richtung Sihlquai gemäss Erhebung	433...537	
max, Abfluss in Richtung Sihlquai auf Basis Grünzeiten		ca. 620

Es zeigt sich, dass mit der gegebenen Grünzeit der Verkehrsfluss in Richtung Sihlquai ohne Probleme verarbeitet werden kann. Dabei gilt es zu beachten, dass sich heute wegen der Überlastung auf der Wipkingerbrücke Fahrzeuge auf beiden Spuren und somit auch auf der hier betrachteten rechten Spur stauen.

Zufahrtsachsen von der A1 zum Escher-Wyss-Platz über Hardturmstrasse

Diese beiden Abschnitte sind insbesondere von einer Stauverlagerung betroffen: Die sich heute in der rechten Spur am Escher-Wyss-Platz stauenden Fahrzeuge in Richtung Wipkingerbrücke werden durch die Umsignalisation auf die linke Spur verlagert, was zu einem entsprechenden Zuwachs des Staus auf den zwei Zufahrtsachsen führt.

Analyse der Dichte resp. Geschwindigkeit

Aus den nachfolgenden *Abb.19* bis *Abb.21* sind die Geschwindigkeiten auf den Achsen Hardturmstrasse und Pfingstweidstrasse – Duttweilerstrasse – Förrlibuckstrasse in Richtung Röschi-bachstrasse ersichtlich. Es zeigt sich, dass die Geschwindigkeiten in der Röschi-bachstrasse und auf der Wipkingerbrücke über mehrere Tagesstunden hinweg relativ tief sind, was mit entsprechenden Rückstauwirkungen und erhöhter Dichte einhergeht. In der Abendspitze zwischen 16 Uhr und 17 Uhr sind sämtliche Abschnitte von der Ein-mündung der Röschi-bachstrasse in die Rosengartenstrasse überlastet, wobei der Stau bis zur Duttweilerstrasse und in der Hardturmstrasse bis über die Haltestelle Fischerweg hin-aus reicht.

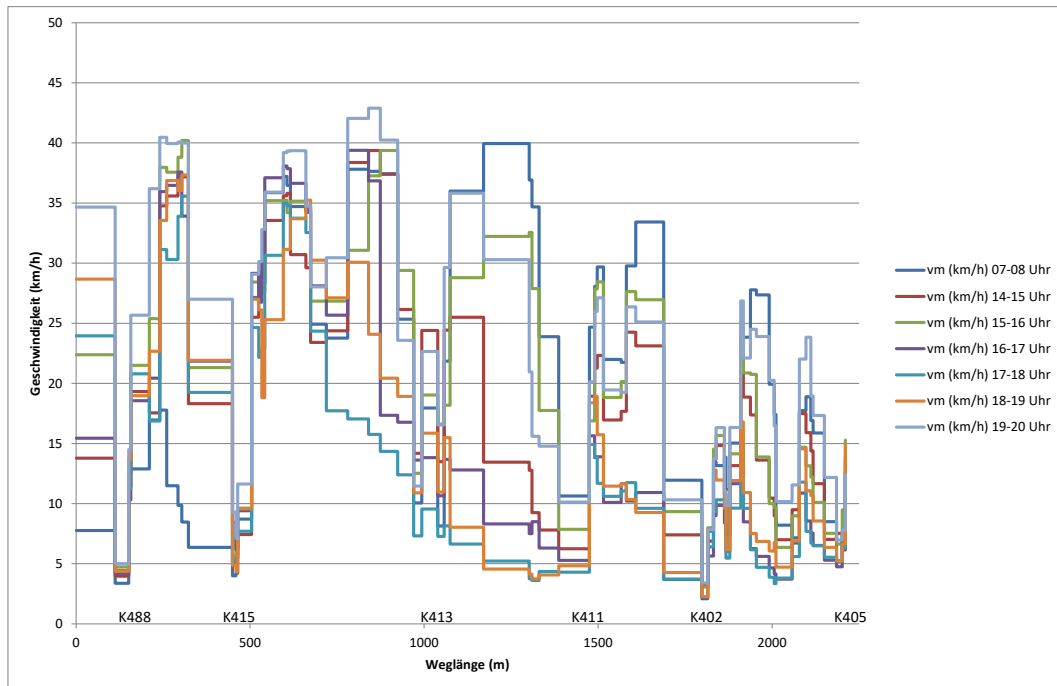


Abb.19 Mittlere Geschwindigkeiten auf der Relation A1 → Hardturmstrasse → Wipkingbrücke (Werktage der Messperiode 08.01.-17.01.2018; Quelle: TomTom 2018)

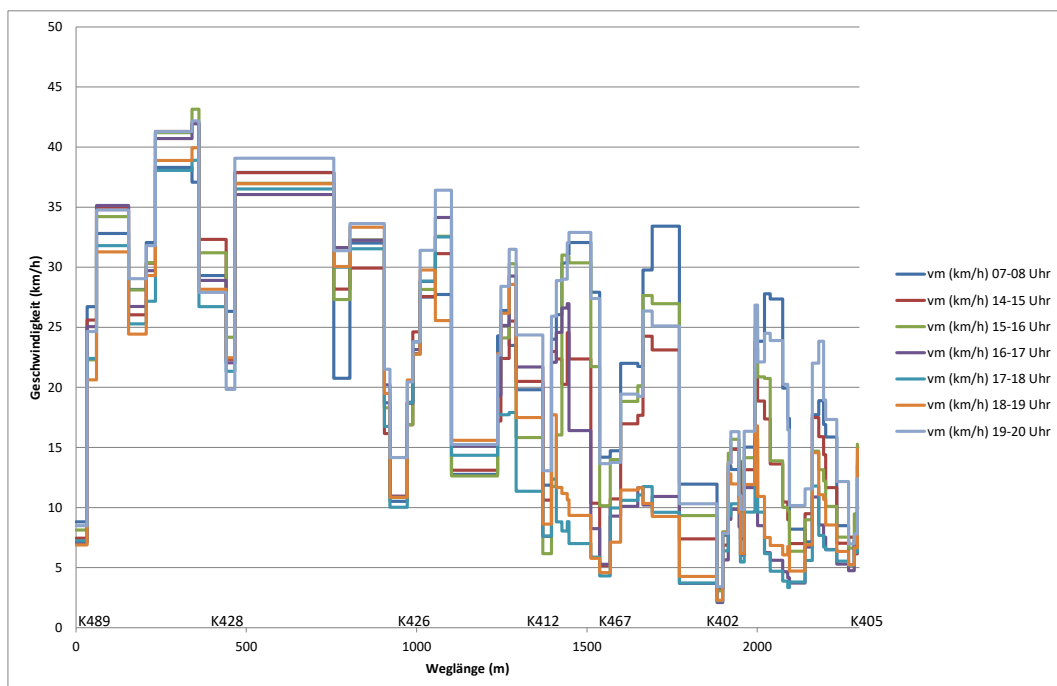


Abb.20 Mittlere Geschwindigkeiten auf der Relation A1 → Pfingstweidstrasse → Förrli-buckstrasse → Wipkingbrücke (Werktage der Messperiode 08.01.-17.01.2018; Quelle: TomTom 2018)

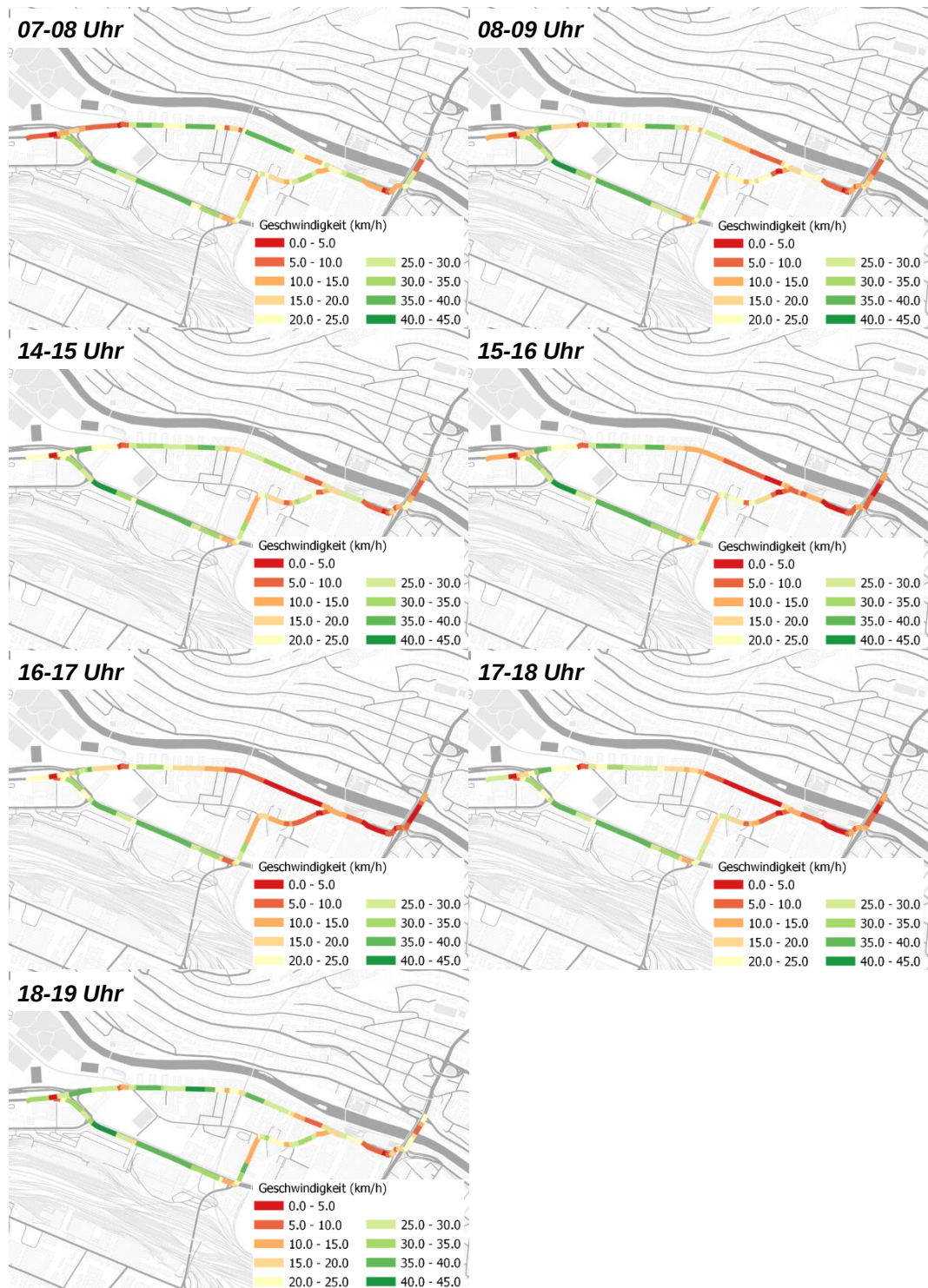


Abb.21 Mittlere Geschwindigkeiten (Werktage der Messperiode 08.01.-17.01.2018; Quelle: TomTom 2018)

Ermittlung von Reisezeitenveränderungen und Verlagerungseffekten

Bestimmung der Reisezeiten heute

Zur Bestimmung der Reisezeiten auf den relevanten Routen wird auf FCD respektive TomTom Custom Travel Times abgestützt.

Schätzung der künftigen Reisezeit

Abschnitt Wipkingerbrücke Richtung Röschibachstrasse

Aufgrund der Analyse der Zu- und Abflüsse wie auch der Grünzeiten hat sich für die Wipkingerbrücke gezeigt, dass diese auch im Falle einer Umsignalisation überlastet und zugestaut sein dürfte. Für in Richtung Röschibachstrasse verkehrende Fahrzeuge ist auf der Wipkingerbrücke kein Δt zu erwarten, deren Reisezeit verbleibt somit unverändert.

Rechte Spur am Escher-Wyss-Platz aus Richtung Hard(turm)strasse in Richtung Sihlquai

Da sich die Fahrzeuge auf dieser Spur heute wegen der Überlastung auf der Wipkingerbrücke zwar stauen, mit der verfügbaren Grünzeit die Anzahl der in diese Richtung verkehrenden Fahrzeuge aber problemlos abgewickelt werden kann, ist hier mit einem klaren und deutlichen Δt zu rechnen. Dieses errechnet sich unter Annahme gegenüber heute unveränderter Grünzeiten gemäss Tab. 4.

Tab. 4 Schätzung der Veränderung der Reisezeit

Streckenlänge ab Beginn 2 Spuren vor K402 bis nach K403	ca. 170 m
Grünzeit K403	ca. 1'240 s/h
Annahme zur Umlaufzeit	Umlaufzeit = 60 s
Grünzeit je Umlauf	21 s
Schätzung mittlere Wartezeit	$(60 \text{ s} - 21 \text{ s})/2 = \text{ca. } 20 \text{ s}$
Annahme zur Geschwindigkeit mit Umsignalisation	$V_{\text{mit Umsignalisation}} = 20 \text{ km/h}$ (vgl. FCD im Bereich EWP 19.00 bis 20.00 Uhr)
	$\rightarrow t_{\text{mit Umsignalisation}} = 170 \text{ m} * (3.6 \text{ (s*km)/(h*m)}) / 20 \text{ km/h} = 30.6 \text{ s}$
	$v_{\text{heute}} \text{ aufgrund FCD} = 0 \dots 10 \text{ km/h; Annahme } v_{\text{heute}} = 5 \text{ km/h}$
	$\rightarrow t_{\text{mit Umsignalisation}} = 170 \text{ m} * (3.6 \text{ (s*km)/(h*m)}) / 5 \text{ km/h} = 122.4 \text{ s}$
$\rightarrow \Delta t = 30.6 \text{ s} - 122.4 \text{ s} = \mathbf{-91.8 \text{ s}}$	

Zulauf auf Hardturm- und Förrlibuckstrasse

Aufgrund der Stauverlagerungen in den Zulauf auf der Hardturm- und Förrlibuckstrasse tritt hier ein Δt auf. Die Bestimmung des Δt ergibt sich unter Annahme gegenüber heute unveränderter Grünzeiten gemäss Tab. 5 bis Tab. 7.

Tab. 5 Bestimmung Rückstauraumverlust infolge alternativen Verkehrsregimes

Rückstaulänge auf linker Spur (Spurwechsel!) der Wipkingerbrücke	max. ca. 50 m gesamte Spurlänge auf Wipkingerbrücke: 115 m
Rückstaulänge auf rechter Spur vor K402	max. ca. 80 m
Rückstaulänge auf rechter Spur vor K403	max. ca. 25 m
$\rightarrow$ Total Rückstaulänge	155 m resp. 26 Fz

Tab. 6 Abschätzung der zusätzlichen Staulänge im Zulauf

Annahme zur Aufteilung der Rückstaulänge	Aufteilung der Rückstaulänge von 155 m resp. 26 Fz hälftig auf Hardturm- und Förrlibuckstrasse → je 78 m resp. 13 Fz
Zusätzliche Staulänge im Zulauf	78 m resp. 13 Fz

Tab. 7 Bestimmung Δt aufgrund zusätzlicher Staulänge und v gemäss FCD im Zulauf

Zusätzliche Staulänge	78 m resp. 13 Fz
Geschwindigkeit im Zulauf	V_{Zulauf} gemäss FCD = 0 bis 5 km/h; Annahme v_{Zulauf} 5 km/h (sichere Seite)
→ $\Delta t = 78 \text{ m} \cdot (3.6 \text{ (s*km)/(h*m)}) / 5 \text{ km/h} = +56.16 \text{ s}$	

Schätzung der Verlagerungseffekte

Abb.22 zeigt exemplarisch drei einander gegenüberstellte Routen, und aus Tab. 7 sind die hierbei mittels der Kirchhoff'schen Aufteilungsregel (vgl. S. 42f) geschätzten Routenwahleffekte ersichtlich. Dabei wurden α -Werte von 6 und 8 angesetzt.

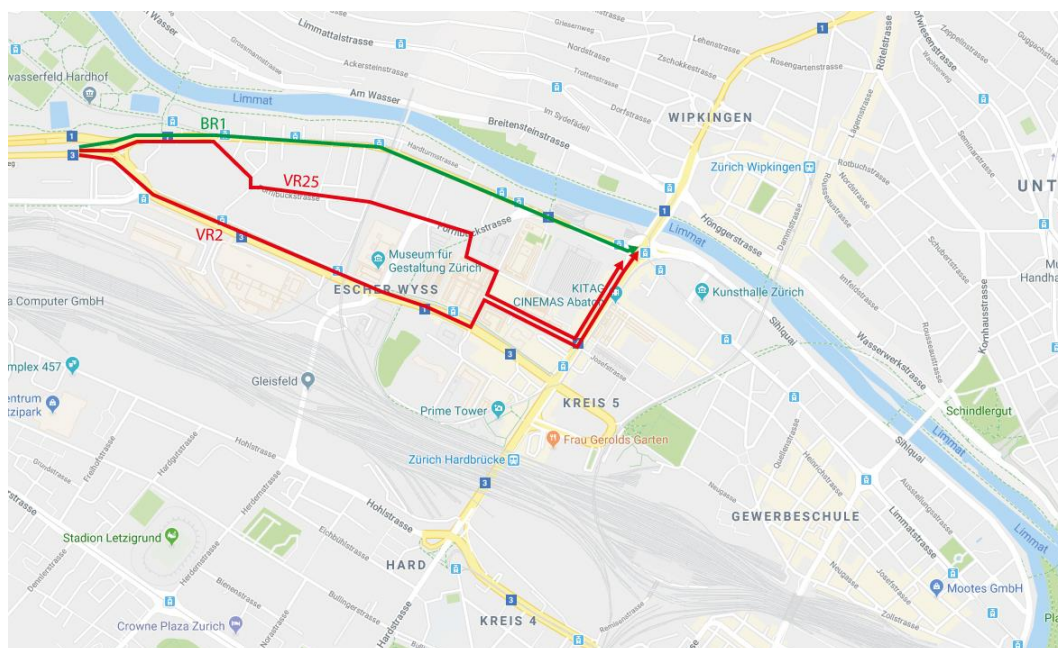


Abb.22 Im Vergleich zur Basisroute 1 (BR1) analysierte Vergleichsrouten 2 und 25 (VR2 und VR25) (Quelle: DAV/RMK)

Tab. 8 Verlagerungseffekte

Routen im Vergleich	Reisezeit in [s]	P in []
Basisroute 1	767.5	0.009
Vergleichsroute 2	381.5	0.991
Basisroute 1 mit Umsignalisation	823.6	0.006
Vergleichsroute 2	381.5	0.994
Basisroute 1	767.5	0.099
Vergleichsroute 25	556.3	0.901
Basisroute 1 mit Umsignalisation	823.6	0.064
Vergleichsroute 25	556.3	0.936

Wie der Vergleich zeigt, sind die Reisezeiten auf beiden Verlagerungsrouten grundsätzlich attraktiv. Die Umsignalisation hat dabei nur geringen Einfluss auf die Attraktivität der Routen. Somit ist als Folge der Umsignalisation nicht mit signifikantem Mehrverkehr auf den Alternativrouten zu rechnen.

5.3.5 Vertiefung ergänzender Aspekte

Vor dem Hintergrund der generellen Fragestellung zur Verkehrsnachfrage und deren Dynamik auf überlasteten Strassen und der Disaggregationstiefe der zur Verfügung stehenden oder explizit zu sammelnden oder erhebenden Daten stellt sich grundsätzlich folgende ergänzende Frage:

- Wie stabil oder auch instabil verhält sich ein Verkehrssystem mit Überlasteffekten über die Zeitachse hinweg und welche Bedeutung hat dies im Hinblick auf entsprechende Analysen zum Verkehrsablauf in einem solchen System?
- Muss zur Analyse von Verkehrssystemen mit Überlasteffekten auf sehr disaggregierte Datensätze (z. B. ¼ h-feine Daten) abgestützt werden oder reichen aggregiertere Daten (z. B. 1 h-Daten) aus?
- Braucht es dabei eine tagesspezifische Betrachtung der betrieblichen Abhängigkeiten oder reichen etwa Mittelwerte über einen längerdauernden Zeitraum hinweg?

Zur Suche nach entsprechenden Antworten werden die FCD-basierten Geschwindigkeitswerte eines einzelnen Streckenelements, in diesem Falle ein Abschnitt der Aargauerstrasse in Zürich, auf verschiedenen Aggregationsstufen analysiert und miteinander verglichen. Die Datengrundlage der Analyse bezieht sich auf die Werktage vom Mittwoch 01.11. bis Freitag 17.11.2017.

In Abb.23 ist der Geschwindigkeitsverlauf aller Tage des betrachteten Zeitraums einzeln aufgeführt. Während der grosse Teil der Werte zwischen 40 km/h und 50 km/h liegt, gibt es in beide Richtungen der Geschwindigkeitsskala Ausreisser. Die Mehrzahl davon tritt gegen unten auf, betrifft also einzelne Werte mit zuweilen sehr tiefer Geschwindigkeit. Diese Werte sind Ausdruck der jeweiligen Verkehrsflussqualität und gehen einher mit situativen Überlasteffekten, schliesst man andere Ursachen wie etwa situative Behinderung durch stehengebliebene Fahrzeuge o. ä. aus. Demgegenüber stehen die Ausreisser nach oben nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit der betrieblichen Verkehrsflussqualität, liegt doch die signalisierte maximal zulässige Geschwindigkeit im betrachteten Abschnitt bei 50 km/h. Mit einer Ausnahme treten die einzelnen Ausreisser einzig in einem einzelnen ¼ h-Intervall auf.

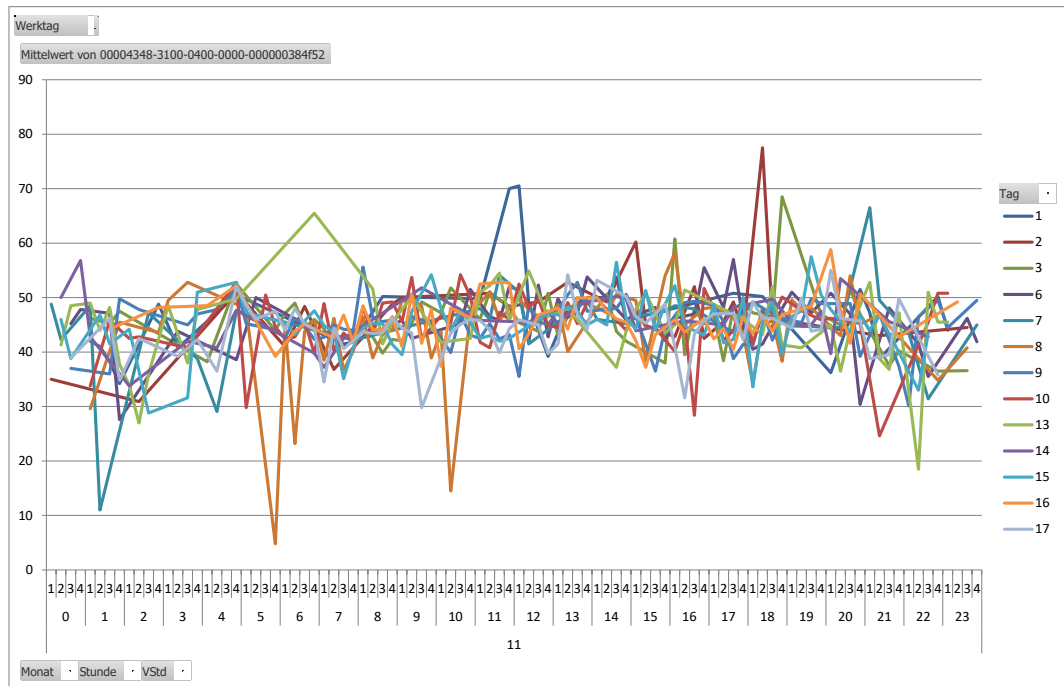


Abb.23 Geschwindigkeitsverlauf in $\frac{1}{4}$ h-Intervallen der einzelnen Werktage des Zeitraums 01.11.-17.11.2017 (Quelle der Daten: TomTom 2017)

Der mittlere Geschwindigkeitsverlauf über alle Werktage des betrachteten Zeitraums ist in Abb.24 in $\frac{1}{4}$ h-Intervallen, in Abb.25 in 1 h-Intervallen dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass zum einen die $\frac{1}{4}$ h-Werte stärker oszillieren als die 1 h-Werte, zum anderen in beiden Fällen die Werte im Wesentlichen zwischen 40 km/h und 50 km/h zu liegen kommen. Zwar sind bei der $\frac{1}{4}$ h-Betrachtung einzelne Werte ausserhalb dieses Bandes, die Ausreisser gemäss Abb.23 sind jedoch nicht oder nur andeutungsweise erkennbar.

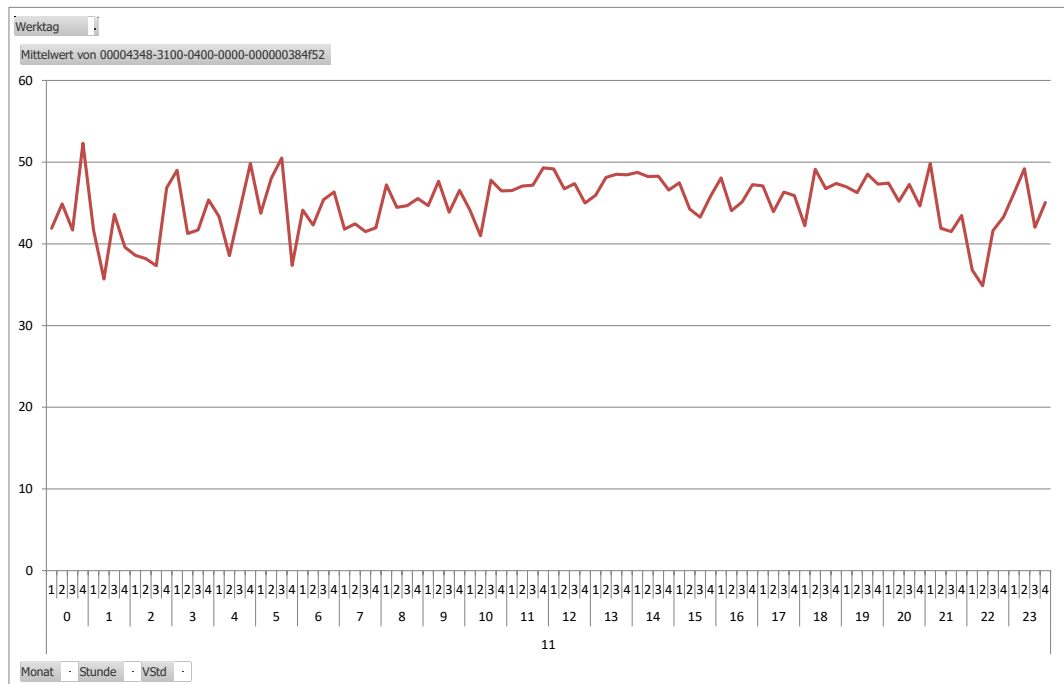


Abb.24 Mittlerer Geschwindigkeitsverlauf der Werktage des Zeitraums 01.11.-17.11.2017 in $\frac{1}{4}$ h-Intervallen (Quelle der Daten: TomTom 2017)

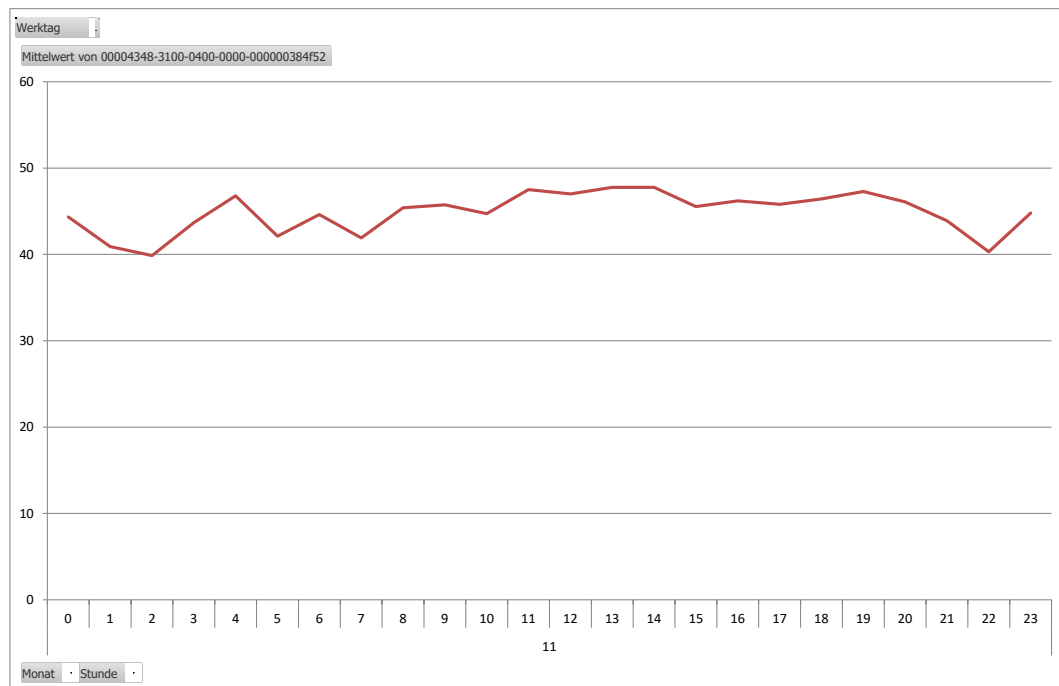


Abb.25 Mittlerer Geschwindigkeitsverlauf der Werktage des Zeitraums 01.11.-17.11.2017 in 1h-Intervallen (Quelle der Daten: TomTom 2017)

Abb.26 zeigt nun das 5., das 50. und das 95. Perzentile der Geschwindigkeitswerte aus dem betrachteten Zeitraum. Während das 50. Perzentil einen zum mittleren Geschwindigkeitsverlauf über alle Werktage des betrachteten Zeitraums in $\frac{1}{4}$ h-Intervallen wie auch in 1 h-Intervallen ähnlichen Verlauf zeigt, so weisen das 5. und 95. Perzentil eindeutig auf einzelnen Ausreisser gemäss Abb.23 hin.

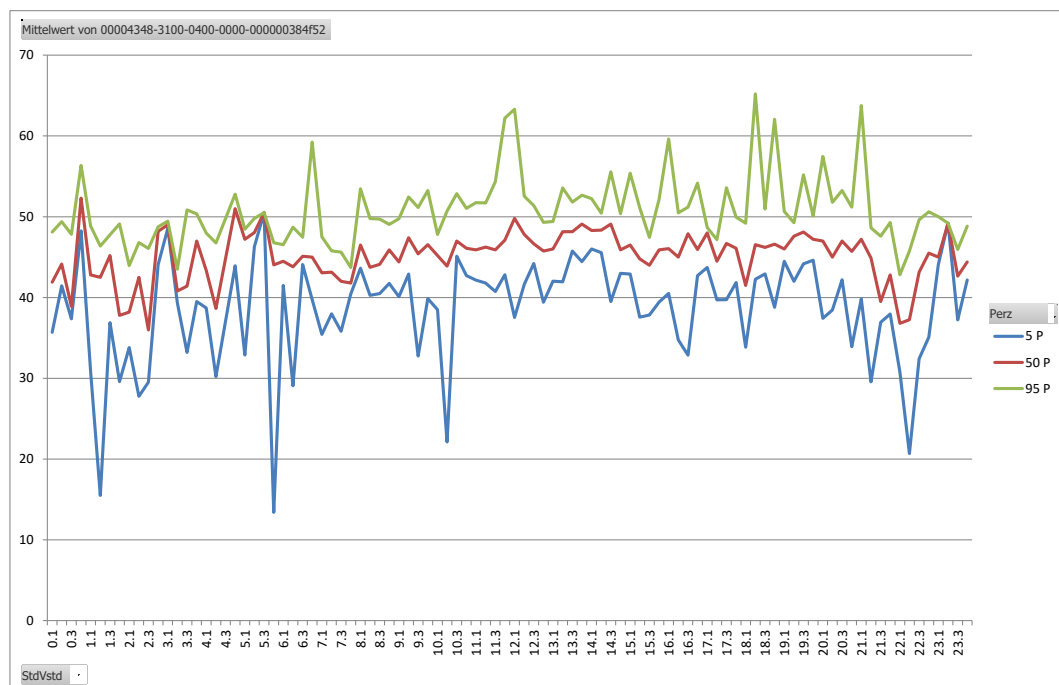


Abb.26 Perzentile des mittleren Geschwindigkeitsverlauf der Werktage des Zeitraums 01.11.-17.11.2017 in $\frac{1}{4}$ h-Intervallen (Quelle der Daten: TomTom 2017)

Zieht man aufgrund dieser Sachverhalte ein Fazit, so lässt sich folgendes festhalten:

Grundsätzlich ist es nicht entscheidend, ob eine Analyse auf 1 h- oder ¼ h-Intervalle abstützt. Es kann davon ausgegangen werden, dass in beiden Fällen, die wesentlichen Tendenzen ersichtlich sind. Interessiert im Einzelfall jedoch eine allfällige Ausprägung eines Einzelereignisses, so hilft hierbei eine Analyse der ¼ h-Werte nach Perzentilen, werden dadurch doch einzelne Ausreisser eruierbar. Alternativ kann natürlich auf den nach Tag und Intervall disaggregierten Datensatz abgestützt werden.

5.3.6 Synthese

Die in Absatz 5.2.1 konzipierte Methodik wurde in Absatz 5.2.2 testweise angewendet. Aufgrund der hierbei genutzten Synergien mit dem realen Projekt zur Umsignalisation konnte dabei optimal auf die Anforderungen einer praktischen Fragestellung eingegangen werden und die Methodik praxisgerecht ausgestaltet werden. Nachfolgend sind die wesentlichen Grundlagen und Arbeitsschritte der Methodik rezeptartig aufgeführt.

Datenbedarf:

- Zu- und Abflüsse je Streckenabschnitt (Zählwerte, Grünzeiten)
- Dichte oder Geschwindigkeit (FCD o. a.)

Analyse der Situation ex-post:

1. **Abschnittsweises Bilanzieren der Zu- und Abflüsse auf Basis Zählwerte und Grünzeiten**
→ Einschätzung zum Auslastungsgrad resp. zur Verkehrsdichte
2. **Verifizierung der Einschätzung aufgrund FCD resp. Geschwindigkeitsdaten**

Analyse der Situation ex-ante:

1. **Abschnittsweises Bilanzieren der Zu- und Abflüsse auf Basis veränderter Zählwerte und Angebotsänderungen (Grünzeiten, Spuren)**
→ Einschätzung zum Auslastungsgrad resp. zur Verkehrsdichte
2. **Schätzung der Veränderung von Rückstaulänge und Reisezeit**
 - a) falls weiterhin Überlast/überstaut: $\Delta t \approx \Delta t_{\text{heute}}$
 - b) bei Entlastung:
 Δt aufgrund statischer Berechnung mit Grünzeit oder gezählter frei zufließender Verkehrsflüsse als Grundlage für Zufluss und Sättigung
 - c) bei zusätzlicher Belastung:
 - Abschätzung der zusätzlichen Staulänge im Zulauf
 - daraus und in Kombination mit FCD Bestimmung der gesamten Staulänge
 - Bestimmung Δt aufgrund zusätzlicher Staulänge und v gemäss FCD
 - Alternativ:
Simulation z. B. mit LISA+ ab Zeitpunkt vor Überlast
3. **Schätzung der Verlagerungseffekte**

6 Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

Aufgrund der durchgeführten Analysen wird ersichtlich, dass das Phänomen der Überlast und die Quantifizierung und Reproduzierbarkeit von ihren Effekten aufgrund der dynamischen Natur zwar von hoher Komplexität ist und bleibt, es aber bei entsprechender Herangehensweise dennoch möglich ist, sich ein belastbares Bild der jeweiligen Situation zu machen. Die gewonnenen Grundlagen und Erkenntnisse zu den Stauwirkungen wie auch die daraus abgeleiteten Methoden machen eine Bearbeitung praktischer Fragestellungen unter Berücksichtigung der Zusammenhänge bei Überlast möglich. Insbesondere dank des MFD wird auch eine globale und dynamische Sicht für Netzaspekte möglich. Es macht die Zusammenhänge zwischen Verkehrsangebot und der Verkehrsnachfrage über die Zeitachse sichtbar und beurteilbar. Dadurch wird offensichtlich, dass die Kapazität eines Verkehrsnetzes stets als Resultat der vergangenen wie auch aktuellen Verkehrsflusssituation zu betrachten ist. Da aufgrund der heutzutage vielfach verfügbaren Datengrundlage real wie auch mittels eines Verkehrsflusssimulationsmodells virtuell gut und verlässlich ein MFD erzeugt werden kann, stehen die erforderlichen Analysegrundlagen zur Bearbeitung von Fragestellungen zu überlasteten Strassen mit vertretbarem Aufwand zur Verfügung. Darüber hinaus kann auch durch die gezielte Bilanzierung und Gegenüberstellung von Zu- und Abflüssen in einem Verkehrssystem ein Verständnis für die Funktionsweise des betrachteten überlasteten Verkehrsnetzes gewonnen werden.

Insgesamt ist es sehr wesentlich, dass beim Umgang mit Daten zum Verkehrsfluss stets der Zusammenhang zwischen Verkehrsfluss und Dichte beachtet wird. Das Bewusstsein für diese Abhängigkeit ist die Voraussetzung für einen adäquaten Umgang mit überlasteten Verkehrsnetzen und die belastbare Bearbeitung von Fragestellungen in diesem Kontext. Gerade in urbanen Verkehrsnetzen ist es daher essentiell, etwa ein Monitoring nicht einzig auf z. B. mittels automatischer Zählstellen erhobene Zählwerte abzustützen, sondern diese konsequent um Daten zur Dichte respektive zur Verkehrsflussqualität zu ergänzen. Nur so kann effektiv aufgezeigt werden, ob ein allfälliger Rückgang eines Verkehrsflusses aufgrund eines Überlasteffektes auftritt oder ob die Nachfrage effektiv zurückgeht.

Die Thematik der Bestimmung der Verkehrsnachfrage in überlasteten Strassen ist sehr komplex und bedingte vereinfachende Annahmen in der Bearbeitung des vorliegenden Forschungsprojekts. Eine wesentliche Vereinfachung war die Annahme konstanter Routen bei der Verwendung der Verkehrsflusssimulationsmodelle und der Bestimmung der MFD. Insbesondere in grösseren Verkehrsnetzen und vorhandener Redundanzen haben Rückstauwirkungen und damit verbundene Änderungen der Reisezeit unmittelbaren Einfluss auf die Routenwahl. Aufgrund der heutzutage vermehrt genutzten Navigationsdienste sind die Verkehrsteilnehmenden auch imstande, sehr agil auf veränderte Verkehrssituationen zu reagieren. Insofern ist Forschungsbedarf dahingehend zu sehen, was den Einfluss solcher Reaktionen auf die Verkehrsfluss- und Überlastsituation und damit verbunden auf das MFD bedingt. In den Analysen hier wurde von einer konstanten Verteilung der Routenanteile ausgegangen, variiert wurde die Nachfragegrösse. Es ist nicht ausgeschlossen, dass das MFD unter Berücksichtigung von Routenänderungen eine andere Gestalt und Dimension aufzeigen würde. Solange aber in Bezug auf den betrachteten Netzausschnitt keine relevanten Redundanzen auszumachen sind, spielen auch Routenwahlwirkungen keine Rolle, da solche aufgrund der fehlenden Redundanzen nicht oder nicht in signifikantem Ausmass auftreten.

Anhänge

I	Entwurf eines Merkblatts.....	61
---	-------------------------------	----

I Entwurf eines Merkblatts

Bestimmung der Verkehrsnachfrage für überlastete Strassen im urbanen Raum

Dieses Merkblatt zeigt, wie Verkehrsflüsse auf überlasteten Strassen im urbanen Raum ermittelt und die damit einhergehenden Überlasteffekte analytisch reproduziert werden können. Beim hierfür entwickelten wissenschaftsgetriebenen Ansatz dient das makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD) als Grundlage für die Ermittlung der Verkehrsflüsse im Abgleich mit den Überlasteffekten, während der anwendungsgetriebene Ansatz auf ein abschnittsweises Bilanzieren von Zu- und Abflüssen abstützt. Die in diesem Merkblatt präsentierten Inhalte, Empfehlungen und Vorgehensweisen basieren auf dem SVI-Projekt „Bestimmung der Verkehrsnachfrage für überlastete Strassen im urbanen Raum“.

Für die eilige Leserin, den eiligen Leser

Worauf ist bei Analysen zu überlasteten Strassenverkehrssystemen zu achten?

- In der gängigen Praxis beschränkt sich die Erhebung der Verkehrsflüsse vielfach auf Querschnitts- und Knotenstrom-Zählungen.
- Die zugehörige Dichte wird vielfach nicht berücksichtigt.
- Aufgrund der Zusammenhänge zwischen Verkehrsfluss und Verkehrsdichte kann es beim Verwenden der genannten Zählungen zu einer Unterschätzung der Verkehrslage im System kommen (vgl. linker vs. rechter Punkt in Abb. 1).

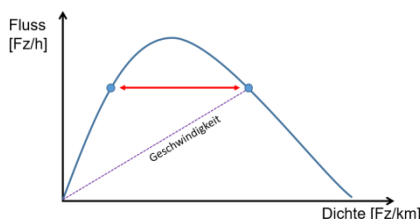


Abb. 1 Die Ambivalenz von Verkehrsmengen

Wie kann dem Risiko einer Unterschätzung der Verkehrslage methodisch entgegnet werden?

- Die wissenschaftsgetriebene Methodik baut unter Einsatz eines Verkehrsflusssimulationsmodells auf

das sogenannte makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD).

- Dabei werden zunächst unter Variation der Zuflüsse im Modell die Abhängigkeiten zwischen Zuflüssen und Dichte im Modell erfasst und evaluiert.
- Das auf dieser Basis erstellte virtuelle MFD kann anhand eines auf realen Daten erstellten realen MFD plausibilisiert werden.
- Darüber hinaus kann auf Basis der realen Daten eines spezifischen betrieblichen Zustands mit Überlasteffekten anhand des virtuellen MFD auf jene Zuflüsse geschlossen werden, anhand derer die reale Überlastsituation im Verkehrsflusssimulationsmodell reproduzierbar wird.
- Die anwendungsgetriebene Methodik baut auf einen abschnittsweisen Vergleich zwischen den relevanten Zu- und Abflüssen.
- Die Bilanz aufgrund dieses Vergleichs erlaubt eine Aussage zur Auslastung des betrachteten Abschnitts.
- Darüber hinaus sind, insbesondere unter Verwendung von Daten zu Geschwindigkeitsprofilen, auch Auswirkungen von Massnahmen und allfälliger Verlagerungseffekte abschätzbar.

Was wird in diesem Merkblatt präsentiert?

- Dieses Merkblatt hält fest, welche Aspekte bei verkehrlichen Analysen und Planungsarbeiten in Systemen

mit Überlasteffekten zu beachten sind.

- Für die auf dem wissenschaftsgetriebenen Ansatz entwickelte Methodik wird aufgezeigt, wie bei einem Einsatz von Verkehrsflusssimulationsmodellen auf jene Verkehrsflüsse, die eine Reproduktion der Überlasteffekte erlauben, geschlossen werden kann.
- Zur anwendungsgetriebenen Methodik wird aufgezeigt, wie unter Verwendung der entsprechenden Daten abschnittsweise eine Aussage zur Verkehrslage möglich wird.

1. Welches sind die Herausforderungen bei der Bestimmung der Verkehrsnachfrage in Überlastsituationen?

Wer sich ein Bild des Verkehrs und dessen Nachfrage auf Strassen verschaffen will, misst üblicherweise die Anzahl Fahrzeuge, die eine bestimmte Örtlichkeit im System passiert. Doch im Falle einer Überlastsituation reicht dies nicht aus. Denn wie aus *Abb. 2* ersichtlich, lässt sich aus der Kenntnis des Zu- und des Abflusses nicht auf den Pegelstand in der Wanne schliessen. Sind die beiden Flüsse gleich gross, so kann der Pegelstand tief oder hoch sein. Analoges gilt auch für Strassensysteme: Gemäss *Abb. 1* kann ein bestimmter Verkehrsfluss mit einer hohen oder auch mit einer tiefen Dichte in Bezug stehen. Es reicht somit nicht aus, Analyse- und Planungsarbeiten einzig auf die gezählten Fahrzeuge abzustützen. Ebenso ist eine Kenntnis des relevanten Pegelstands respektive der Dichte erforderlich.

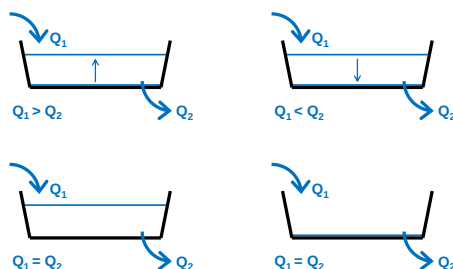


Abb. 2 Zusammenhang zwischen Zu- und Abfluss und Pegelstand einer Wanne

Im Hinblick auf eine methodische Berücksichtigung und Reproduzierbarkeit

dieser Zusammenhänge und der damit einhergehenden Überlasteffekte bei Analyse- und Planungsarbeiten wurden zwei Methoden entwickelt, und zwar eine, die auf eine wissenschaftsgetriebene Optik abstützt, und eine, die einer anwendungsorientierten Sichtweise folgt.

2. Auf welche Grundlagen und Überlegungen stützt die wissenschaftsgetriebene Methodik ab?

Gegenwärtige Kalibrierungsansätze wenden im Allgemeinen eine auf Sensitivität basierte, globale Kalibration an. Diese richtet sich insbesondere an die Fahrzeugfolgemodelle. Um die Nachfrage zu kalibrieren, eignen sich diese komplexen Verfahren allerdings nur bedingt. Aus der Sicht der Wissenschaft bietet es sich für die vorliegende Fragestellung daher an, eine Methode zu entwickeln, die eine makroskopische Perspektive offeriert. Allerdings ist eine aggregierte Kalibrierungsmethode, basierend auf makroskopischen Eigenschaften des Verkehrs, noch nicht erforscht. Eine solche würde es erlauben, mittels globaler Kennwerte wie der Durchschnittsgeschwindigkeit und dem durchschnittlichen Verkehrsfluss zu kalibrieren. Dadurch würde sich der Kalibrierungsaufwand signifikant verringern. Eine solch aggregierte Sichtweise liefert das MFD.

3. Welche Arbeitsschritte sieht die wissenschaftsgetriebene Methodik vor?

Die folgenden Schritte bilden eine Übersicht der Methodik:

- **Raumgrenzen:** In einem ersten Schritt geht es darum, den Raum abzugrenzen und den räumlichen Fokus der Simulation festzulegen.
- **Definition Nachfragegerüst:** Eruiert einer Initialnachfrage für ein kalibriertes mikroskopisches Modell. Normalerweise ist ein makroskopisches Nachfragegerüst vorhanden, das aus einem übergelagerten Netz hergeleitet wurde. Insbesondere wenn das Nachfragegerüst anhand von Verkehrszählungen erhoben worden ist, entspricht dieses oft nicht der latenten Nachfrage.

- **Empirische Punkte des MFD:** Um Punkte eines MFD zu erhalten, müssen zwei von den drei folgenden Variablen ermittelt werden: mittlerer Verkehrsfluss, mittlere Verkehrsdichte und/oder Verkehrsgeschwindigkeit. Diese werden entweder mittels Schleifendetektoren oder FCD berechnet.
- **Simuliertes MFD:** Die definierte Initialnachfrage ist so zu skalieren, dass ein MFD gebildet werden kann. Dazu wird die Nachfrage mit einem variablen Faktor α multipliziert. Inkrementelle Veränderung von α stellen sicher, dass das ganze MFD, sprich sowohl ungestaute wie auch gestaute Zustände, simuliert werden. Dieser Vorgang wird bestenfalls dynamisch in der Simulation selbst durchgeführt, d. h. die Nachfrage wird z. B. alle 20 min schrittweise erhöht.
- **Vergleich der Nachfrage:** Die empirischen MFD-Punkte werden mit dem simulierten MFD verglichen. Dabei wird nach Punkten im simulierten MFDs gesucht, die am ehesten mit den empirischen MFD-Punkten übereinstimmen. Die entsprechend skalierte Nachfrage der MFD-Simulation stellt die gesuchte latente Nachfrage dar.

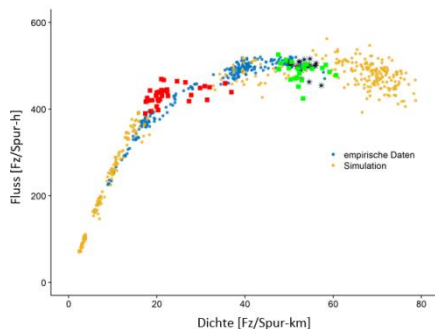


Abb. 3 Empirisches und simuliertes MFD: Blau dargestellt sind die empirischen Daten aus Schleifen, Gelb die Simulation. Rot stellt den Zustand dar, welcher mit der Simulation mit dem initialen Nachfragegerüst herrscht. Sterne den Soll-Zustand gemäss empirischer Auswertung. Grün stellt den Simulationszustand bei kalibrierter Nachfrage dar.

4. Auf welche Grundlagen und Überlegungen stützt die anwendungsgetriebene Methodik ab?

Die anwendungsgetriebene Methodik stützt auf die Überlegung, dass die Verkehrslage und damit verbundene Verkehrsdichte auf einem Strassenabschnitt in Funktion der entsprechenden Zu- und Abflüsse zu sehen ist, und dies ganz in Analogie zur Illustration gemäss Abb. 2. Wird demzufolge ein zu analysierendes Strassensystem in entsprechende Abschnitte unterteilt und für diese Abschnitte die jeweiligen Zu- und Abflüsse erhoben und nach Möglichkeit um einen Datensatz zur Dichte oder zur Geschwindigkeit ergänzt, so wird die Verkehrslage für die einzelnen Abschnitte und in deren Kombination auch für das betrachtete System einschätzbar. Darauf aufbauend lassen sich auch die Auswirkungen von Massnahmen erörtern: Massnahmen führen zu punktuell veränderten Zu- oder Abflüssen. Daraus geht eine veränderte Verkehrslage auf dem betrachteten Abschnitt hervor. Die veränderte Verkehrslage wiederum geht mit einer veränderten Reisezeit auf dem Abschnitt hervor. Infolgedessen entstehen Verlagerungspotentiale, die auf Basis der Reisezeitenveränderung abschätzbar sind.

5. Welche Arbeitsschritte sieht die anwendungsgetriebene Methodik vor?

Die anwendungsgetriebene Methodik schlägt die folgenden Arbeitsschritte vor:

- Unterteilung des betrachteten Verkehrsnetzes in die relevanten (un-) geregelten Knoten und Streckenabschnitte inklusive Anzahl der Spuren wie auch der Signalgruppen bei per LSA geregelten Knoten
- Identifikation und Lokalisierung der Stauwurzel(n) aufgrund der Beobachtung vor Ort oder gegebenenfalls aufgrund der verfügbaren Daten
- Analyse der Zu- und Abflüsse durch Gegenüberstellung und Identifikation allfälliger Rückstaueffekte
- Analyse der zugehörigen Grünzeiten insbesondere dahingehend, ob die angebotenen Grünzeiten genutzt werden oder nicht (z. B. aufgrund wenig Verkehr oder nachgelagerter Rückstau)

- Analyse der Dichte resp. Geschwindigkeit durch Beobachtung vor Ort oder indirekt aus der Geschwindigkeit oder der Belegungszeit
- Ermittlung von Reisezeitveränderungen und Verlagerungseffekten als Folge von Massnahmen durch abschnittsweises Schätzen des Δt und damit einhergehender Verlagerungspotentiale

5. Fazit

Es ist sehr wesentlich, dass beim Umgang mit Daten zum Verkehrsfluss

stets der Zusammenhang zwischen Verkehrsfluss und Dichte beachtet wird. Das Bewusstsein für diese Abhängigkeit ist die Voraussetzung für einen adäquaten Umgang mit überlasteten Verkehrsnetzen und die belastbare Bearbeitung von Fragestellungen in diesem Kontext. Gerade in urbanen Verkehrsnetzen ist es daher essentiell, Analysen u. ä. nicht einzig auf erhobene Zählraten abzustützen, sondern diese konsequent um Daten zur Dichte respektive zur Verkehrsflussqualität zu ergänzen.

Grundlagen

Bestimmung der Verkehrsnachfrage für überlastete Strassen im urbanen Raum (SVI 2016/003)

Roland Müller Küsnacht AG: Dr. Christian Heimgartner (Projektleitung), Angelo Orlando.

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT): Dr. Monica Menendez, Dr. Qiao Ge, Mireia Roca-Riu, Dr. Lukas Ambühl, Igor Dakic.

TomTom Development Germany: Oliver Kannenberg, Peter Mieth.

Prof. Nikolas Geroliminis.

Glossar

Begriff	Bedeutung
FCD	Floating Car Data
MFD	Makro-Fundamental-Diagramm

Literaturverzeichnis

- [1] Ambühl, L. and M. Menendez (2016) Data fusion algorithm for macroscopic fundamental diagram estimation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71, 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.07.013>
- [2] Kanton Zürich (2010) Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich GVM-ZH, Kanton Zürich, Zürich.
- [3] Chu, L. and H. X. Liu, J. S. Oh, W. Recker, (2003) A calibration procedure for microscopic traffic simulation, *Intelligent Transportation Systems, 2003, Proceedings 2003 IEEE* (2) 1574–1579.
- [4] Daamen, W., C. Buisson and S. Hoogendoorn (2014) *Traffic Simulation and Data: Validation Methods and Applications*. CRC Press.
- [5] Daganzo, C. F., M. J. Cassidy, M. J. and R. L. Bertini (1999) Possible explanations of phase transitions in highway traffic. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(5), 365–379. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(98\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(98)00034-2)
- [6] Daganzo, C. F. and N. Geroliminis (2008) An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), 771–781. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.06.008>
- [7] Ge, Q., B. Ciuffo and M. Menendez (2014) An Exploratory Study of Two Efficient Approaches for the Sensitivity Analysis of Computationally Expensive Traffic Simulation Models. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(3), 1288–1297. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2311161>
- [8] Ge, Q. and M. Menendez (2012) Sensitivity analysis for calibrating VISSIM in modeling the Zurich network. In *12th Swiss Transport Research Conference, Ascona*. Retrieved from <https://edit.ethz.ch/ivt/svt/publications/papers/svtr31.pdf>
- [9] Ge, Q. and M. Menendez (2012) Calibration Study for Vissim (CSV), Final Report, Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zurich, on behalf of Stadt Zürich, Dienstabteilung Verkehr, Zürich.
- [10] Geroliminis, N. and C. F. Daganzo (2008) Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), 759–770. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.02.002>
- [11] Greenshields, B. D. (1935) A study of traffic capacity. *14 Annual Meeting of the Highway Research Board Proceedings, 1935*, 448–477. Retrieved from <http://pubsindex.trb.org/view.aspx?id=120649>
- [12] Heimgartner, Ch. (2012) Virtual ITS-Evaluation – Establishment of Micro-Simulation for the City Centre of Zurich, presentation at the *19th ITS World Congress*, Vienna, October 2012. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1263465>
- [13] Heimgartner, Ch. and M. Menendez (2013) Challenges for Better Understanding and Simulating Urban Traffic - the Zurich Experience, in Albrecht, Th., B. Jaekel and M. Lehnert (Hrsg.) *Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013*, 11–22, TUDpress, Dresden.
- [14] Mahmassani, H. S., M. Saberi and A. Zockaie (2013) Urban network gridlock: Theory, characteristics, and dynamics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 480–497. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.07.002>
- [15] Menendez, M., J. Ortigosa, L. Ambühl, K.W. Axhausen, F. Ciari, P. Bösch, N. Geroliminis und N. Zheng (2016) NetCap: Intermodale Strecken-/Linien- und Netzleistungsfähigkeit Schlussbericht, SVI 2004/032, Schriftenreihe, 1563, UVEK, Bern.
- [16] PTV AG (2015) *PTV Vissim 8 User Manual*. Karlsruhe, Germany: PTV AG.
- [17] Punzo, V. and M. Montanino (2016) Speed or spacing? Cumulative variables, and convolution of model errors and time in traffic flow models validation and calibration. *Transportation Research Part B: Methodological*, 91, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.04.012>
- [18] Saltelli, A., M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana and S. Tarantola (2008) *Global Sensitivity Analysis. The Primer. Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470725184>
- [19] Speirs, P. (2014) Ever taken strategic model forecast outputs, such as a cordon matrix, and found they don't fit into a micro-simulation model? Discussion on LinkedIn-Group Transport & Traffic Modelling, <https://www.linkedin.com/groups/2168238/2168238-5882773824956567556>
- [20] Tarantola, S. (2011) *Sensitivity Analysis. Analysis*. New York, USA: John Wiley & Sons, Ltd.
- [21] Treiber, M., A. Hennecke and D. Helbing (2000) Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations. *Physical Review*, 62(2), 1805–1824. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.1805>
- [22] van Wageningen-Kessels, F., H. van Lint, K. Vukic and S. Hoogendoorn (2015) Genealogy of traffic flow models. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(4), 445–473. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5>

-
- [23] Wahlstedt, M. (2014) Arterial Intersection Calibration, Discussion on LinkedIn-Group PTV Vissim Forum, <https://www.linkedin.com/groups/2524087/2524087-5879630169911615490>.
-
- [24] Widmer, P., P. Aemisegger, M. Ruesch, G. Moreni, M. Wagner und K.W. Axhausen (2016) Anforderungen an zukünftige Mobilitätshebungen, Schlussbericht, SVI 2011/015, *Schriftenreihe*, **1549**, UVEK, Bern.
-
- [25] Widmer, P. und Th. Klink (2004) Verkehrsumlegungs-Modelle für stark belastete Strassennetze, SVI 2001/541, *Schriftenreihe*, **1077**, UVEK, Bern.
-
- [26] Williams, J. C. (2001) Macroscopic Flow Models. *Traffic-Flow Theory, Chapter 6*, 1–31. Retrieved from <http://tft.eng.usf.edu/docs/chap6.pdf>
-

Projektabschluss



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

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 03.09.2021

Grunddaten

Projekt-Nr.: SVI 2016/003
Projekttitel: Bestimmung der Verkehrsnachfrage für überlastete Strassen im urbanen Raum
Enddatum: 31.08.2021

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Der Verkehrsfluss in urbanen Verkehrssystemen bewegt sich insbesondere in den Hauptverkehrszeiten meist an oder gar über der Kapazitätsgrenze. Die Folge davon sind stockender Verkehr und Staus. Die analytische Beurteilung solcher Verkehrssysteme im Rahmen von Projekten sieht sich dabei mit speziellen Herausforderungen konfrontiert: Wird etwa in überlasteten Systemabschnitten die Verkehrsnachfrage durch Zählung erfasst und diese den Berechnungen der Leistungsfähigkeit mit statischen Verfahren oder Verkehrssimulationen zugrunde gelegt, so wird es damit nicht gelingen, die Überlasteffekte rechnerisch reproduzieren zu können: Aufgrund der infolge der Überlast reduzierten Verkehrsflüsse wird sich in den Berechnungen kein Stau zeigen, weil die Verkehrsflüsse eben gerade tief sind, was für die Beurteilung entsprechender Projekte fatal ist. Wie aber lassen sich Überlasteffekte und damit einhergehende Rückstaus bei infolge der Überlast reduzierten Verkehrsflüssen rechnerisch reproduzieren?

Hierzu wurde je mit einem wissenschaftsgetriebenen und einem anwendungsgetriebenen Ansatz eine Methodik entwickelt, welche die Berücksichtigung und Reproduzierbarkeit von Überlasteffekten bei der rechnerischen Analyse erlaubt.

Der wissenschaftsgetriebene Ansatz wurde auf Basis einer Methode entwickelt, die eine makroskopische Perspektive aufzeigt. Eine solche erlaubt es, mittels globaler Kennwerte wie die Durchschnittsgeschwindigkeit und dem durchschnittlichen Verkehrsfluss zu kalibrieren. Dadurch verringert sich der Kalibrierungsaufwand signifikant. Eine solch aggregierte Sichtweise liefert das makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD), welches die durchschnittliche Verkehrsdichte und den durchschnittlichen Verkehrsfluss in einem relativ homogenen Gebiet zusammenfasst. Grundsätzlich werden die gemessenen, empirischen MFD Punkte mit dem simulierten MFD verglichen. Dabei wird nach Punkten im simulierten MFDs gesucht, die am ehesten mit den empirischen MFD Punkten übereinstimmen. Die entsprechende skalierte Nachfrage der MFD Simulation stellt die gesuchte latente Nachfrage dar.

Der anwendungsgetriebene Ansatz wurde auf Basis eines umfangreichen Datensatzes, der im Rahmen eines effektiven Projektes zur Verfügung stand und Detektor-Zählungen, Grünzeiten wie auch Geschwindigkeitsprofile umfasste, entwickelt. Im Kern stützt die Methodik auf die abschnittsweise Bilanzierung der jeweiligen Zu- und Abflüsse ab, nachdem zunächst die Lage der Stauwurzel identifiziert wurde. So lässt sich für jeden Abschnitt herleiten, ob der Verkehrsfluss behindert ist und mit Stauwirkungen einhergeht oder ob er ungehindert abgewickelt werden kann. Bei lichtsignalgesteuerten Knoten sind dabei neben Zählungen auch die Grünzeiten zu beachten. Ist etwa der nachfolgende Abschnitt überlastet, so kann dies zur Folge haben, dass die am vorgelagerten Knoten verfügbare Grünzeit nicht genutzt werden kann. Oder aber die Grünzeiten werden als Folge des Staus im nachfolgenden Abschnitt gezielt reduziert. Insbesondere wenn Geschwindigkeitsprofile oder sonstige Grundlagen für eine Aussage zur Reisezeit auf den einzelnen Abschnitten zur Verfügung stehen, sind mittels Schätzung der Routenwahl auch grobe Aussagen zu Verkehrsverlagerungen möglich.

Mit den im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten und getesteten Methoden stehen neue Instrumente, die eine wesensgerechte Berücksichtigung von Überlasteffekten erlauben, zur Verfügung. So wird es im Rahmen von Verkehrsflussstudien möglich, gestützt auf das Makrofundamentaldiagramm jene Zuflüsse zu bestimmen, die eine Erzeugung der Überlasteffekte im abgebildeten Verkehrssystem erlaubt. Aber auch durch eine gezielte und abschnittsweise Analyse jeweiliger Zu- und Abflüsse lässt sich auf praktische Weise ein rechnerisches Bild der Überlast und deren Effekte gewinnen. Voraussetzung in beiden Fällen ist ein kombiniertes Abstützen sowohl auf Verkehrszählungen als auch auf Daten zur Verkehrsdichte. Nur so lässt sich letztlich differenzieren, ob ein bestimmter Verkehrsfluss, der unterhalb der Kapazitätsgrenze liegt, als Folge von Überlasteffekten reduziert ist oder nicht. Im Hinblick auf eine erfolgreiche Planung und Umsetzung von Projekten ist es essentiell, dass man sich von Beginn weg diese Aspekte vor Augen führt.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Den Projektzielen wurde mit der Etablierung zweier Methoden, welche die Bearbeitung von Fragestellungen in Verkehrssystemen mit Überlast erlauben, Rechnung getragen. Die eine der Methoden ist dabei wissenschaftsgeprägt und auf den Einsatz von Verkehrssimulationsmodellen fokussiert, während die andere der Methoden einen anwendungsorientierten, pragmatischen Umgang mit den Überlasteffekten erlaubt. Mit beiden Methoden wird für die essentielle Bedeutung der Überlasteffekte und deren Auswirkungen im Zuge der Bearbeitung von verkehrsplanerischen und -technischen Fragestellungen sensibilisiert.

Folgerungen und Empfehlungen:

Bei der Bearbeitung von verkehrlichen Fragestellungen im urbanen Raum ist es wesentlich, allfälligen Überlasteffekten und den damit einhergehenden Auswirkungen Rechnung zu tragen. Entsprechend sind die Erkenntnisse aus dieser Arbeit angemessen zu berücksichtigen, kann dadurch doch eine erhöhte Robustheit der Resultate und Erkenntnisse erzielt werden.

Publikationen:

Heimgartner, Ch. und L. Ambühl (2018) Bestimmung der Verkehrsnachfrage für überlastete Strassen im urbanen Raum, Referat an der Fachtagung Forschung SVI 2018, September 2018, Olten

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Heimgartner

Vorname: Christian

Amt, Firma, Institut: Lumisera AG (bis 31.12.2020 Roland Müller Küsnacht AG)

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:

Die Ziele des Forschungsauftrages sind erreicht.
Bei der Bewertung von Verkehrsprojekten insbesondere des motorisierten Individualverkehrs wird im urbanen Raum öfters die Verkehrsnachfrage des Ist-Zustands herangezogen anstelle einer Prognose, weil in den Spitzenstunden die Verkehrszählungen über Jahre kaum zugenommen haben. Die Leistungsfähigkeit ist erreicht, oft werden auch Einfallsachsen und untergeordnete Strassen dosiert. Zahlreiche Verkehrsfluss-Simulationen basieren daher auf Verkehrszählungen. Dies führt zu sehr optimistischen Resultaten und zur Negierung der Überlastungssituation an der Grenze des betrachteten Systems oder aus das übergeordnete Strassennetz, da die latente Nachfrage, d.h. die Menge, die im betrachteten Zeitintervall den Querschnitt nicht passieren konnte, nicht berücksichtigt wird. Nur der bewältigbare Verkehr innerhalb des Systems wird beurteilt. Mit den im Forschungsprojekt entwickelten Methoden, basierend auf dem makroskopischen Fundamentaldiagramm (wissenschaftlicher Ansatz) und auf der abschnittsweisen Bilanzierung der jeweiligen Zu- und Abflüsse sowie der Lage der Stauwurzel (anwendungsgetriebener Ansatz), stehen zwei einfach verständliche und in der Praxis anwendbare Vorgehen zur Schätzung der latenten Nachfrage zur Verfügung. Damit lassen sich bessere Ergebnisse und Erkenntnisse zum Verkehrsfluss in überlasteten Netzen innerhalb der dichten städtischen Räumen aber auch an den Schnittstellen, d.h. an der Stadtgrenze oder zum übergeordneten Netz, ermitteln. Massnahmen und Ressourcen können besser beurteilt, geplant und monitort werden. Empfehlungen für Verkehrszählungen lassen sich ebenfalls entnehmen (z.B. Berücksichtigung der Verkehrsdichte).

Umsetzung:

Die Bearbeitung der Fragestellung hat unweigerlich zu Tage geführt, wie komplex und herausfordernd die Thematik insbesondere für urbane engmaschige Verkehrsnetze ist und dass nicht sämtliche Fragen auf Anhieb beantwortet werden können. Durch das gewählte zweispurige Vorgehen aus einer wissenschaftsgetriebenen und einer anwendungsgetriebenen Sichtweise heraus gelang es, das Phänomen der Überlast und deren Effekte sichtbar und quantifizierbar zu machen. Damit stehen erste Grundlagen für die Beantwortung von projektspezifischen Fragestellungen zur Verfügung.

weitergehender Forschungsbedarf:

Insbesondere besteht Forschungsbedarf dahingehend, welchen Einfluss Überlasteffekte auf grössere Verkehrsnetze haben und wie sich dabei die Verkehrsteilnehmenden bezüglich Routenwahl verhalten. Darüber hinaus stellt sich auch die Frage, wie nicht nur Verkehrsflusssimulationsmodelle, sondern auch makroskopische Verkehrsmodelle angesichts von Überlasteffekte robust kalibriert und die zu hinterlegende Nachfrage ermittelt werden könnte.

Einfluss auf Normenwerk:

Aus den Ergebnissen resultiert kein Einfluss auf das Normenwerk.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Müller

Vorname: Danièle

Amt, Firma, Institut: Kanton Luzern, Dienststelle Verkehr und Infrastruktur (vif)

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: