

# Makroskopische Modelle zur Kapazitätsschätzung städtischer Netze

Dieses Merkblatt zeigt, wie mit Hilfe eines makroskopischen Ansatzes die multimodale Kapazität urbaner Verkehrssysteme modelliert und geschätzt werden kann. Dabei dient das makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD) als Grundlage für die Beschreibung des städtischen Verkehrs. Die in diesem Merkblatt präsentierten Inhalte, Empfehlungen und Vorgehensweisen basieren auf dem SVI-Projekt NetCap.

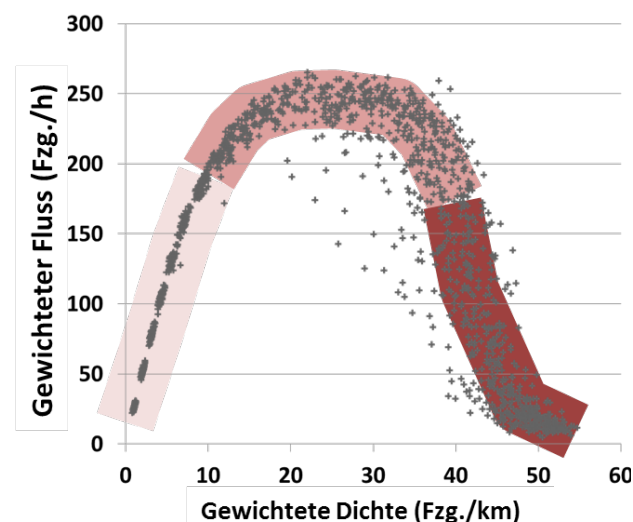
## Für die eilige Leserin, den eiligen Leser

Worin besteht der makroskopische Ansatz zur Kapazitätsschätzung?

- Klassische Verkehrsvariablen wie Verkehrsfluss oder Verkehrsdichte werden bisher auf einzelnen Strassen erhoben.
- Neuste Forschungsergebnisse zeigen, dass die Variablen über ein grösseres Gebiet aggregiert werden können und damit ein makroskopisches Bild des Verkehrs geben können.
- Das makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD) zeigt das Verhältnis zwischen der mittleren Verkehrsdichte und dem mittleren Verkehrsfluss auf (gewichtet zur Länge eines Streckenabschnittes, s. Abb. 1).
- Das MFD ist unabhängig von Quell-Ziel-Beziehungen und ist vor allem durch die Topologie des Strassennetzes gegeben. Es weist eine klar definierte Form auf (s. Abb. 1). Somit ist das MFD – im Gegensatz zu anderen makroskopischen Betrachtungsweisen, wie z.B. dem Gesamtverkehrsmodell (GVM) – eine zeitlich unabhängige Relation zwischen Verkehrsdichte und -fluss. Dabei lassen sich verschiedene Verkehrsregime unterscheiden: Freier Fluss, Sättigung, Stau.
- Mit dem MFD lässt sich die Gesamtkapazität eines städtischen Netzes relativ einfach bestimmen.
- Das MFD kann neue und bestehende Verkehrsmanagementstrategien verbessern und deren Effizienz bewerten.

- Diese makroskopische Betrachtungsweise kann Interaktionen zwischen Individualverkehr und öffentlichem Verkehr quantifizieren und modellieren.
- Eine Erweiterung des MFDs, das 3D-MFD, gibt Aufschluss darüber, wie der verfügbare Strassenraum zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln zu verteilen ist, um Passagierflüsse zu maximieren.

MFD der Innenstadt von Zürich:



Quelle: NetCap-Bericht

Abb. 1: Makroskopisches Fundamentaldiagramm (MFD) der Innenstadt von Zürich. Drei Verkehrsregime sind erkennbar: hellrosa ist der Bereich des freien Flusses, im rosa Bereich ist das Netz gesättigt (Kapazität) und rot ist der Staubereich.

## Impressum

Herausgeber:  
SVI Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten  
www.svi.ch

Verfassende des Merkblattes:  
Lukas Ambühl, Javier Ortigosa, Monica Menendez, IVT ETH

## Genehmigung

Dieses Merkblatt wurde am 19.09.2018 durch den Vorstand der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten genehmigt und zur Veröffentlichung frei gegeben.

Das Merkblatt darf unter Angabe der Quelle vollständig oder auszugsweise kopiert und in Unterlagen sowie Berichte eingefügt werden.

## 1 Was ist ein makroskopisches Fundamentaldiagramm (MFD)?

Das klassische Fundamentaldiagramm für eine einzelne Strasse stellt die Variablen Verkehrsfluss und Verkehrsdichte gegenüber. Dabei wird Folgendes beobachtet: Der Verkehrsfluss nimmt gleichzeitig mit der Verkehrsdichte zu, bis eine kritische Dichte erreicht wird. Anschliessend sinkt der Verkehrsfluss (Fz/h) mit steigender Verkehrsdichte (Fz/km) (siehe Abb. 2). In anderen Worten, das Fundamentaldiagramm ist mehr oder weniger ein Dreieck. Der maximale Verkehrsfluss kann dann als die Kapazität einer Strasse gesehen werden. Des Weiteren ist die Steigung der Linie, die den Ursprung mit dem jeweiligen Verkehrszustand verbindet, die Verkehrsgeschwindigkeit.

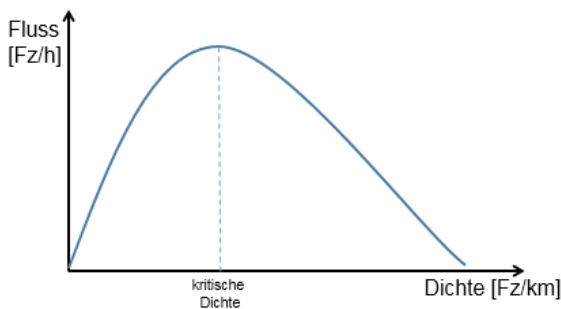


Abb. 2: Fundamentaldiagramm. Verkehrsfluss und Verkehrsdichte steigen an, bis eine gewisse kritische Dichte erreicht wird, anschliessend nimmt der Fluss mit steigender Dichte ab.

Eine ähnliche Überlegung kann auch für ein städtisches Gebiet gemacht werden. Wenn mehrere Strassen in einem Gebiet zusammengefasst und deren Verkehrsdichten und Verkehrsflüsse gemittelt werden, kann ein makroskopisches Fundamentaldiagramm (MFD) erstellt werden. Analog zum Fundamentaldiagramm zeichnet sich dieses damit aus, dass es drei Verkehrsregime beinhaltet: freier Fluss, Sättigung und Stau. Abb. 1 zeigt ein MFD für die Innenstadt der Stadt Zürich (siehe auch Abb. 4). Der hellrosa eingefärbte Teil repräsentiert den freien Verkehrsfluss. Die Leistung des Systems steigt linear an, wenn mehr Fahrzeuge die Strassen des Verkehrsnetzes nutzen. Im rosa Bereich erreicht das Netz die Sättigung. Dieser maximale Verkehrsfluss wird Kapazität genannt. Die Fahrzeugdichte, bei welcher die Kapazität erreicht wird, ist die kritische Dichte. Es ist wichtig, die kritische Dichte zu kennen, da effiziente Verkehrsmanagementstrategien das Ziel verfolgen sollten, das Verkehrssystem möglichst unterhalb dieser Grenze zu halten. Wenn sich trotzdem mehr und mehr Fahrzeuge im Netz bewegen, resultieren Staus, die sich in der Folge ausbreiten. Fahrzeuge müssen verlangsamen oder kommen sogar ganz zum Stillstand – der Verkehrsfluss geht also zurück bis gegen Null. Die Leistung des Systems sinkt, wie im roten Bereich im Diagramm ersichtlich ist.

Ursprünglich wurde das MFD für unimodale Verkehrsnetze entwickelt. Allerdings bewegen sich mehr und mehr Menschen multimodal. Mittlerweile konnte das MFD mehrdimensional auf andere Verkehrsmittel erweitert werden. Diese sogenannten 3D-MFDs ermöglichen es, die Verkehrsdynamik zwischen öffentlichen Verkehrsmitteln (ÖV) und dem motorisierten Individualverkehr (MIV) gesamtheitlich zu betrachten. Ein 3D-MFD gibt Auskunft darüber, wie sich die Gesamtverkehrskapazität in Abhängigkeit von verschiedenen Verkehrsmitteln verhält.

Mit Hilfe des 3D-MFD können Behörden den Zielkonflikt zwischen verschiedenen Betriebsmöglichkeiten des Strassennetzes verstehen und quantifizieren. Zusätzlich erleichtert das 3D-MFD zum Beispiel die Aufteilung von Strassenraum auf die verschiedenen Verkehrsmittel in Bezug auf Passagierfluss. Weitere Informationen zum 3D-MFD werden unter Ziffer 6 gegeben.

## 2 Worin bestehen die Vorteile eines MFD?

Der Vorteil des MFD besteht darin, dass es den Verkehrszustand eines städtischen Gebietes in relativ einfacher Form wiedergibt. Eine wichtige Eigenschaft des MFD ist seine Unabhängigkeit von Quell-Ziel-Beziehungen in einem Netz. Einfach gesagt, das MFD hängt vor allem von den Eigenschaften des Netzes ab, z.B. von der mittleren Strassenlänge oder der Lichtsignalsteuerung. Das heisst, wenn das MFD für eine Stadt gefunden ist, ändert es sich nicht grundlegend über längere Zeit, sondern weist immer die gleiche Form auf, was eine Bestimmung des Verkehrszustandes vereinfacht.

Die Kenntnis der Gesamtverkehrskapazität einer Stadt und die Beurteilung des Verkehrszustandes in Echtzeit bringen diverse weitere Vorteile:

Mit dem MFD kann der Einfluss von Netzeigenschaften und Verkehrsmanagement auf das gesamte System untersucht werden.

Dadurch können entsprechende Massnahmen und Strategien evaluiert und entwickelt werden sowie entsprechende Entscheidungen erleichtert werden.

Mit dem MFD können Informationen über den Zustand des Verkehrssystems in Echtzeit direkt der Verkehrssteuerung zugeführt werden.

Das MFD kann ermittelt werden, indem die Messgrößen Verkehrsfluss und -dichte (bspw. erhoben mit Schleifendetektoren) untersucht werden. Diese Beziehung erlaubt es, die Verkehrsbedingungen einer Stadt zu einem bestimmten Zeitpunkt zu beurteilen, indem die Verkehrsflüsse und -dichten an verschiedenen Orten gemessen werden. Dosieranlagen können neu implementiert bzw. verbessert werden, um das System vom Überschreiten der kritischen Dichte und somit der

Bildung von Staus zu bewahren. Das MFD bildet demzufolge eine verbesserte Grundlage für die Steuerung eines Dosierungskonzeptes. Trotz dieses Potentials war der Einsatz von MFDs in realen Situationen bis anhin aber limitiert.

### 3 Wie wird das MFD erstellt?

Die folgenden Abschnitte beschränken sich auf die Anwendung des MFD zur Analyse des MIV. Das für weitere Verkehrsmittel entwickelte 3D-MFD wird in Ziffer 6 vorgestellt.

Das MFD kann mit bereits existierenden und/oder implementierten Technologien und Geräten erhoben werden. Für das MFD werden typischerweise Erhebungsintervalle von fünf Minuten verwendet (Details können im Abschnitt 4 entnommen werden). Dabei werden der Verkehrsfluss und die Verkehrsdichte mit der Länge der einzelnen Strassenabschnitte gemittelt und für ein bestimmtes Gebiet berechnet. Ein langer Strassenabschnitt erhält ein zur Länge proportional höheres Gewicht als ein kürzeres. Da das vollständige MFD verschiedene Verkehrszustände des Systems repräsentiert, müssen diese Mittelwerte über einen längeren Zeitraum erhoben werden. Damit können alle Verkehrsregime (freier Fluss, Sättigung und Stau) berücksichtigt werden.

Genauere Informationen (inklusive Formeln und Randbedingungen) können dem SVI-Forschungsbericht entnommen werden.

Wie bereits erwähnt, ist das MFD unabhängig von der Nachfragestruktur (Quell-Ziel-Beziehungen). Es wird empfohlen, Beobachtungen an verschiedenen Tagen und zu verschiedenen Zeiten durchzuführen.

### 4 Ein MFD aus empirischen Daten?

Damit das MFD einer Stadt bzw. eines städtischen Gebietes mit empirischen Daten erhoben werden kann, sollten relativ viele Detektoren im Gebiet verteilt sein, die Aussagen über die Verkehrsflüsse und -dichten erlauben. Messungen müssen in kurzen Zeitintervallen (5 min) durchgeführt werden. Die Kenngrößen können mit Hilfe von Schleifendetektoren, Radargeräten, Kameras und anderen Detektoren (z.B. Bluetooth) bestimmt werden. Abb. 3 oben zeigt die Fluss-Dichte-Beziehung für zwei einzelne Strassen in Yokohama (Japan). Werden diese und alle anderen Schleifendetektoren in der ganzen Stadt aggregiert, erhält man Abb. 3 unten, die das MFD für die gesamte Stadt zeigt. Dabei verschwindet die Streuung, die auf Abb. 3 oben noch zu sehen ist, da alle Detektoren gemittelt werden. Allerdings ist bei der Auswahl der Detektoren Vorsicht geboten. Je nachdem können Detektoren kurz vor Lichtsignalanlagen wegen Ihrer wiederkehrenden Warteschlangen die Verkehrsdichte lokal überschätzen.

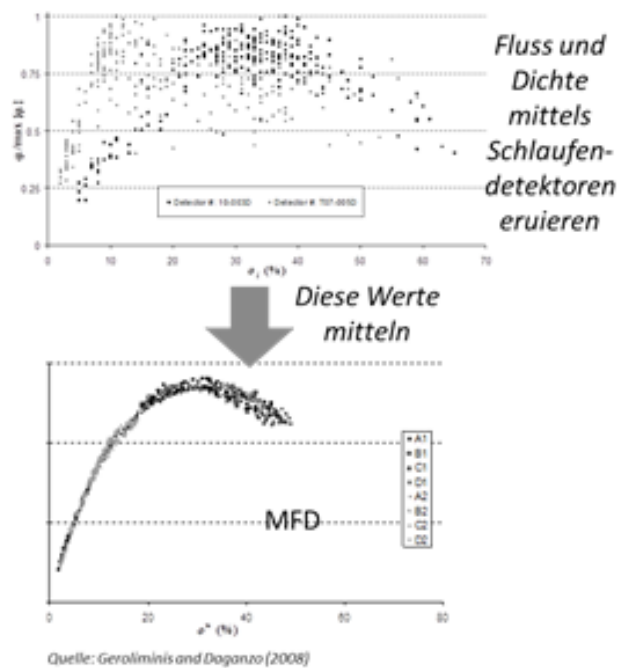


Abb. 3: Erstellen eines MFD für Yokohama (Japan). Oben: Fluss-Dichte-Auswertungen zweier Schleifendetektoren. Unten: Aggregieren aller Detektoren in der Stadt zu einem MFD.

Oftmals sind nicht alle Strassen in einem Verkehrsnetz mit Detektoren ausgerüstet. Dennoch ist es möglich, das MFD zu approximieren. Beispielsweise können bereits mit einer Abdeckung von 25% zufällig ausgewählten Strassen in einem Gebiet Abweichungen vom realen MFD von unter 15% erreicht werden. Abdeckungen in dieser Grössenordnung sind keine Seltenheit für Schweizer Städte. Das zeigt, dass das MFD auch mit einer nur moderaten Überwachung der Strassen relativ genau eruiert werden kann. Wenn man bereits auf Verkehrsinfos aus bestehenden Überwachungssystemen oder aus Simulationsmodellen zurückgreifen kann, ist es möglich, eine optimale Kombination von Strassen auszuwählen, sodass bereits mit nur wenigen überwachten Strassen repräsentative MFDs erzeugt werden können. Beispielsweise konnte in einer Simulation für die Innenstadt von Zürich gezeigt werden, dass mit nur 5% überwachter Strassen ein Fehler unter 5% erreicht werden kann. Ein guter Ansatz ist es, sich auf die Strassen mit hoher Verkehrsbelastung zu konzentrieren. Dabei ist es aber wichtig, dass die Verkehrsflüsse der gewählten Strassen nicht zu stark untereinander korrelieren, damit sie dem MFD jeweils neue Informationen liefern.



## 5 Ein MFD aus Simulationsdaten?

Das MFD kann auch über Verkehrssimulationen erzeugt werden. Die Berechnungen bleiben analog wie unter Ziffern 3 und 4 beschrieben. Abb. 1 ist ein aus der kalibrierten Simulation der Innenstadt von Zürich erzeugtes MFD (siehe auch Abb. 4). Das Verwenden von Simulationen erlaubt die Untersuchung verschiedener Einflüsse auf die Form des MFDs, deren Überprüfung in Realität typischerweise schwierig sind. Zusätzlich können im Simulationsmodell später Änderungen im Netz vorgenommen werden und es kann untersucht werden, wie diese die Kapazität des Verkehrsnetzes beeinflussen. Mikrosimulationsmodelle sind am besten für diesen Zweck geeignet, da sie genau über dynamische Verkehrsinformationen und Verkehrsverhalten informieren.

Die meisten simulationsbasierten MFDs beruhen auf Mikrosimulationen, die fixe Routen aus statischen Verkehrsumlegungsmethoden verwenden. Dieser Ansatz benötigt nur wenig Rechenleistung, da die Mikrosimulationen nur einmal durchgeführt werden müssen. Dies ist vergleichsweise stabil, da die Routenführung fix ist. Andererseits weist er auch zwei bedeutende Nachteile auf. Erstens muss die Routenführung zuerst mit einer entsprechenden Software berechnet werden und zweitens verändert sich der Verkehr nicht dynamisch mit der Staubildung (z. B. bei neuen Angeboten).

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

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

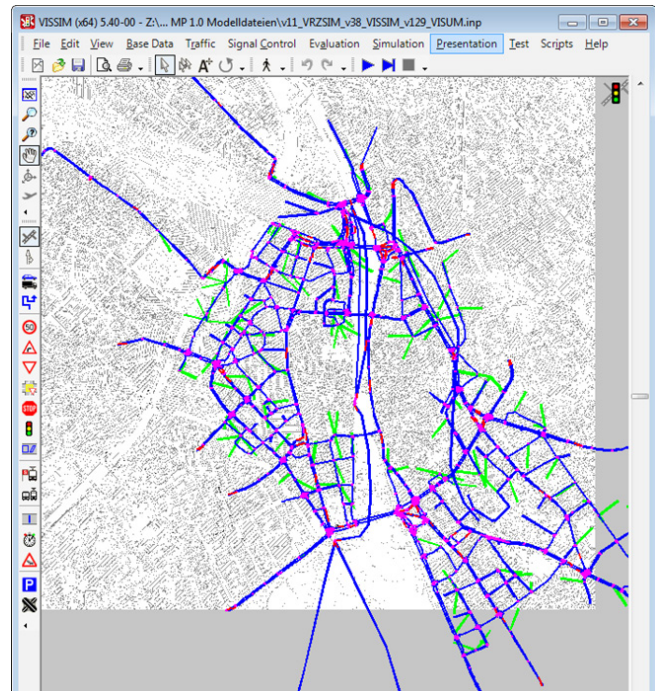


Abb. 4: Ausschnitt der Simulation der Innenstadt von Zürich (VISSIM).

## 6 Was ist ein 3D-MFD und wie wird es erzeugt?

Das 3D-MFD ist eine Erweiterung des MFD. Es berücksichtigt zusätzlich zum MIV in einer dritten Dimension auch den öffentlichen Verkehr (Busse und Trams). Das 3D-MFD zeigt den Einfluss der verschiedenen Modi auf die Dynamik und Leistung des Verkehrsnetzes. Mit den gewonnenen Erkenntnissen können Strategien, wie bspw. Buspriorisierungen oder die Aufteilung des städtischen Strassenraumes, untersucht und insbesondere quantifiziert werden. Damit können leichter Aussagen über die gesamte verkehrliche Leistung einer Stadt gemacht werden. Die Form des 3D-MFD hängt insbesondere vom Verhältnis des dem ÖV und dem privaten Verkehr zugeordneten Strassenraumes ab.

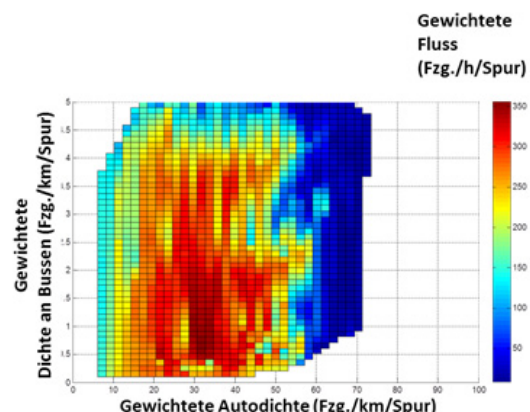


Abb. 5: Konturdiagramm des 3D-MFD der Stadt Zürich. Für gewisse Busdichten und MIV-Dichten kann der Fahrzeugfluss maximiert werden: Die Farbstufe zeigt die Anzahl Fahrzeuge pro Fahrstreifenkilometer. Das Maximum kann bei relativ tiefen Busdichten gefunden werden.

Das 3D-MFD kann, analog zum unimodalen MFD, mit empirischen Daten oder Verkehrssimulationen erzeugt werden. Dabei müssen die Daten getrennt nach Verkehrsmittel (MIV, ÖV) erhoben werden. Die Herausforderung, ein 3D-MFD zu erhalten, besteht darin, dass viele verschiedene Zustände des Verkehrssystems beobachtet werden müssen. Die Anzahl benötigter Punkte wird durch die zusätzliche Dimension des ÖV vervielfacht. Werden für den ÖV Taktfahrpläne verwendet, wird die Herausforderung noch grösser, da dann die nötige Variation im ÖV für eine breite Abdeckung der ÖV-Dichten kaum erreicht wird.

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

Das 3D-pMFD ist das dreidimensionale MFD, das resultiert, wenn Fahrgastflüsse statt Fahrzeugflüsse betrachtet werden. Offensichtlich unterscheidet sich die Form des 3D-pMFD, das die Fahrgastkapazität des Systems beschreibt, deutlich vom einfachen 3D-MFD, das nur die Fahrzeugkapazität beschreibt. Wenn die (potentielle) Fahrgastkapazität des Systems bekannt ist, kann das 3D-pMFD verschiedene Szenarien quantifizieren, bspw. wie sich eine Änderung im Modalsplit oder eine Änderung der ÖV-Frequenzen auf die Gesamtverkehrsleistung auswirken. Diese Information kann von Verkehrsplanern und Entscheidungsträgern verwendet werden, um die Interaktionen zwischen ÖV und MIV genauer zu quantifizieren, neue Verkehrsstrategien zu entwickeln oder die Strassenraumaufteilung optimieren zu können.

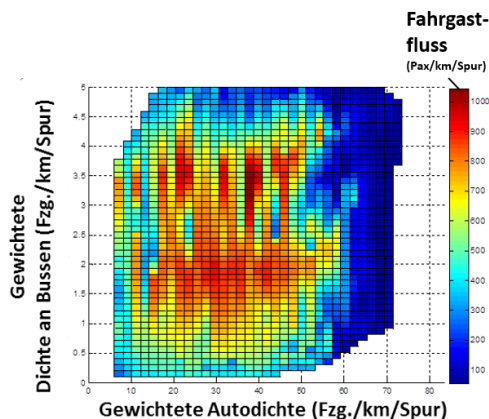


Abb. 6: Konturdiagramm des 3D-pMFD der Stadt Zürich. Für gewisse Busdichten und MIV-Dichten kann der Fahrgastfluss maximiert werden: Die Farbstufe zeigt die Anzahl Passagiere pro Fahrstreifenkilometer; das Maximum befindet sich demnach bei rund 40 Autos und 3.5 Bussen pro Fahrstreifenkilometer.

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

Abb. 6 zeigt das 3D-pMFD der Innenstadt der Stadt Zürich. Dabei können Bereiche identifiziert werden, in denen der Fahrgastfluss im gesamten Verkehrsnetz maximiert wird. Dieses Diagramm stammt von der kalibrierten Simulation der Stadt Zürich. Weitere Details können dem Bericht entnommen werden, in dem ebenfalls ein 3D-pMFD inklusive Fussgängerinteraktionen enthalten ist.

## 8 Fazit

Auch wenn die Forschung noch in den Anfängen steht, ist das (3D-)MFD eine elegante und vielseitig anwendbare Methode, makroskopisch den Zustand von Verkehrssystemen zu beurteilen. Die vorgestellten Ansätze zeigen viel Potential für die effiziente, gesamtheitliche Quantifizierung der Kapazitäten von urbanen Verkehrssystemen, für deren Überwachung und Steuerung sowie für die Analyse und Diskussion diverser Verkehrsszenarien.

## Grundlagen