

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/314101051>

Ableitung von Verkehrsengpässen anhand Staudetektion mit Fahrzeugtrajektorien

Chapter · February 2017

CITATIONS

2

READS

295

1 author:



[Andreas Keler](#)

Technische Universität München

68 PUBLICATIONS 210 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



RASCH - Bicycle Highways: Designing efficient and secure Infrastructure [View project](#)



@CITY-AF - Automated Driving Functions [View project](#)

Ableitung von Verkehrsengpässen anhand Staudetektion mit Fahrzeugtrajektorien

Andreas KELER

Angewandte Geoinformatik · Institut für Geographie · Universität Augsburg · Alter Postweg 118 · 86159 Augsburg
E-Mail: andreas.keler@geo.uni-augsburg.de

Zusammenfassung

Tägliche Mobilität in hochbesiedelten urbanen Regionen der Welt ist auf gut funktionierende effektive Straßennetzwerke angewiesen. Verkehrsengpässe sind jedoch typisch für urbane Regionen mit periodischen Verkehrsstauereignissen. Diese Arbeit hat zum Ziel zu untersuchen, wie Stau mit komplizierten Kreuzungen zusammenhängt. Als erstes wird ein Ansatz gewählt, um anhand von Geodaten aus dem OpenStreetMap-Projekt (OSM) die Komplexität von Straßensegmenten zu klassifizieren und komplexe Kreuzungen abzuleiten. In einem zweiten Schritt wird Verkehrsstau anhand Floating Taxi Data (FTD) von Shanghai Taxis aus dem Jahre 2007 berechnet. Anschließend wird eine Polygonverschneidungstechnik entwickelt, um Stau mit komplizierten Kreuzungen zu verknüpfen. Hierbei wird das Konzept definiert, Verkehrsengpässe als Polygone darzustellen. Die abgeleiteten Verkehrsengpässe indizieren Standorte, dessen Verkehrsinfrastruktur komplex ist und die periodisch von Stau beeinflusst sind. In einem letzten Schritt werden kartographische Darstellungen für die Visualisierung von Verkehrsengpässen gewählt. Dies hat zur Absicht mögliche thematische Verkehrskarten zu ergänzen.

1 Einleitung

Die menschliche Wahrnehmung von komplizierten Kreuzungen hat oft Assoziationen mit gefährlichen Situationen für den am Verkehr teilnehmenden Autofahrer. Oft geschieht dies in Zusammenhang mit der Annahme von dort stattfindenden Verkehrsunfällen und Stauerignissen. Besonders in dicht bevölkerten Städten mit aufgeständerten Straßenelementen könnte die folgende Schlussfolgerung getroffen werden: es gibt einen unwiderlegbaren Zusammenhang zwischen komplizierten Kreuzungen und Autoverkehrsstau. Die Frage hier ist: können wir diese Behauptung begründen?

Die Idee dieser Arbeit ist es, diese Behauptung durch einen datengetriebenen Ansatz mit massive Floating-Car-Datensätzen (FCD) und OpenStreetMap-Daten (OSM) zu untersuchen.

In der vorliegenden Arbeit werden FCD, genauer gesagt Floating Taxi Data (FTD), für die Ableitung von Verkehrsstau und OSM für die Detektion von komplizierten Kreuzungen genutzt. Anschließend wird eine Verschneidungsmethode verwendet, um komplizierte Kreuzungen mit Stauerignissen aus unterschiedlichen Zeiträumen zu verknüpfen. Die daraus resultierenden Verkehrsengpässe sind Grundlage für eine kartographische Aufbereitung.

2 Aktueller Forschungsstand

Aktuelle Forschung zur Analyse von sich bewegenden Objekten ist vielfältig und oft interdisziplinär. Diese Arbeit setzt den Fokus auf die Floating-Car-Data-Methode (FCD) und auf die unterschiedlichen Möglichkeiten der Analyse und Anwendung (Sektion 2.1). Des Weiteren werden in Abschnitt 2.2 Methoden vorgestellt, Verkehrsstau aus aufgezeichneten Bewegungsdaten abzuleiten. Sektion 2.2 und 2.3 beschreibt die Komplexität urbaner Verkehrsinfrastruktur und erläutert die Möglichkeiten der visuellen Darstellung von Autoverkehrsstau.

2.1 Tracking von Fahrzeugen: die Floating-Car-Data-Methode (FCD)

FCD ist eine relative neue Technologie, Daten aus einer Vielzahl von beobachteten GNSS-bestückten Fahrzeugen zu sammeln. Auf Grundlage von FCD-Sätzen ist es möglich Straßen-segmente abzuleiten (LI et al. 2015a), Pendlerbewegungsmuster zu untersuchen (DEWULF et al. 2015), typische periodische Verkehrsflussmuster in Teilen des Straßennetzes zu detektieren (KÖRNER 2011) und durch Fahrzeuge verursachte Emissionen zu modellieren (GÜHNEMANN et al. 2004, BRÖRING et al. 2015). Ähnlich DUAN et al. (2009) zielt diese Arbeit auf die Ableitung von Verkehrsstaus anhand FCD und die Detektion von periodisch durch Verkehrsstau beeinflussten Standorten.

2.2 Detektion von Verkehrsstau anhand Bewegungsdaten

Für LI et al. (2015b) ist für Autobahnen der Übergang von freiem Verkehrsfluss zu Verkehrsstau durchgehend gut erforscht. Der Grund dafür ist die geringere Komplexität im Vergleich mit dem gesamten Verkehrsnetzwerk einer Großstadt. Die Unterscheidung der Untersuchungsskala ist für LI et al. (2015b) entscheidend für die Verknüpfung von lokalen und globalen Verkehrsflüssen in einer Stadt. Der Fall von Verkehrsstaus kann nach YUAN et al. (2014) vor allem mit statischen Sensoren wie Induktionsschleifen und Videokameras erfasst werden. Diese sind oft jedoch nur spärlich installiert und erschweren die Ableitung von täglichen Änderungen der Verkehrsdynamik. Staudetektion ist aber auch möglich über mobile Sensoren. Eine einfache Methode für Stauerkennung anhand mobiler GNSS-Daten ist die Segmentierung von Bewegungstrajektorien in Stopps und Bewegung des beobachteten Objekts (KANG et al. 2004). Es gibt vielfältige Möglichkeiten der Staudetektion aus FCD. Clusteranalyse (RINZIVILLO et al. 2008, ANDRIENKO et al. 2015), Regression (HAWORTH et al. 2014) und Klassifikation (WEN et al. 2014) können dabei für die gleichen Bewegungstrajektorien vergleichbare Ergebnisse von detektierten Stauereignissen liefern.

Bei der Untersuchung der Bewegungstrajektorien können noch zusätzliche Attributierungen eingebunden werden: hier wird die Objektbewegung mit Kontextinformationen angereichert. BRAKATSOULAS et al. (2004) definiert zwei Arten dieser Kontextinformation: Relationen zwischen einzelnen Trajektorien und zwischen Trajektorien und ihrer Umgebung. Erstes ist wichtig für die Ableitung von Gruppendynamikmustern wie beispielsweise Schwarm- und Konvoibewegungen oder Aufenthalt an Treffpunkten, wie es auch in GUDMUNDSSON et al. (2012) und LONG & NELSON (2013) beschrieben wird. Letzteres ist wichtig für die Generierung von semantischen Trajektorien (YAN et al. 2013). Hierfür definiert BRAKATSOULAS et al. (2004) fünf Basisrelationen (aufhalten in, umgehen, verlassen, betreten und überqueren).

Verkehrsstaus geschehen gewöhnlich auf Straßen. Deshalb nutzen LONG et al. (2008) die Konnektivität von Straßensegmenten für die Detektion von Stauausbreitungsbewegung. Bestimmte Bewegungsmuster sind oft schwierig zu unterscheiden. Hierzu gehören Anhalten an einer Verkehrsampel (PROTSCHKY et al. 2015), stockender Verkehr (RANACHER et al. 2016) und echte Stauereignisse wo Fahrzeuge zum Stillstand kommen. Außer den durchschnittlichen Reisezeiten für Straßensegmente zu bestimmten Tageszeiten (SOHR et al. 2010), können typische und abnorme Verkehrsmuster basierend auf historischen und aktuellen Bewegungsdaten detektiert werden (LAN et al. 2014, LONG et al. 2008). Diese Unterscheidung beruht auf Statistiken von momentanen und durchschnittlichen Geschwindigkeiten. Aus beiden Größen resultieren Reisezeiten und Staudauer (Verkehrsverzögerungen).

Andere Ansätze nutzen Clusteranalysen. Bei von Fahrzeugsensoren generierten massiven Bewegungsdaten nutzen RINZIVILLO et al. (2008) OPTICS (ANKERST et al. 1999) für die Detektion von Autoverkehrsstau. Dieser ist charakterisiert durch höhere Fahrzeugdichten. Die individuellen Fahrzeugtrajektorien werden vor dem Clustering in Autobewegungsströme zwischen Flächen- oder Straßensegmenten aggregiert. Aktuelle Forschung untersucht auch die Clusteranalyse von (nahe) Echtzeit-Bewegungsdaten (COSTA et al. 2014). LIU & BAN (2013) nutzen hierarchisches Clustering für die Auswahl von FTD-Punkten mit geringen Geschwindigkeiten.

2.3 Die Komplexität urbaner Verkehrsinfrastruktur

Für BARTHÉLEMY (2011) sind räumliche Transport- und Mobilitätsnetzwerke Beispiele für die Wichtigkeit der räumlichen Komponente, die hier genauso wichtig ist wie die topologische Information. Urbane Netzwerke können multimodal sein und das Autoverkehrsnetz kann oft nur einen Teilaspekt bei der täglichen Mobilität spielen. Eine Möglichkeit urbane Netzwerke abzubilden bietet das OpenStreetMap-Projekt (OSM). Für STANICA et al. (2013) gehören diese zu den genauesten frei zugänglichen digitalisierten Straßennetzwerken. Außer der Repräsentation von Straßenfahrspuren gibt es auch Angaben über unterschiedliche Straßentypen: Autobahnen, Bundesstraßen oder unterschiedliche Verbindungsstraßen. Letzteres kann auch spezielle Verkehrsinfrastrukturelemente indizieren wie Auffahren und Beschleunigungstreifen. Eine fehlende Attributangabe in OSM ist die Kapazität von Straßensegmenten. Diese Angabe ist oft schwer abzuschätzen: Kapazität kann abhängig von Straßentyp und von der Anzahl an Fahrspuren sein (IMMERS & LOGGHE 2002). In der Realität können Standorte mit niedrigen Kapazitäten mit den genannten Verkehrsengpässen korrelieren.

Wie im Ansatz von KRISP & KELER (2015) basiert in dieser Arbeit Komplexität von Straßennetzwerken auf angenommener menschlicher Wahrnehmung. Dabei beruht dieser Ansatz auf einfacher Extraktion von Knoten aus Straßenpolylinien, die anschließend für eine Punktdichteschätzung verwendet werden. Knoten unterschiedlicher Straßentypen am gleichen Standort werden höher gewichtet, da dies von möglichen Autofahrern als verwirrend empfunden werden kann. Diese komplizierten Kreuzungen können gleichzeitig auch Verkehrsengpässe sein. In der Literatur wird auch zwischen strukturellen und dynamischen Verkehrsengpässen unterschieden (LI et al. 2015b). In dieser Arbeit wird auf letzteres Bezug genommen, da sich ändernde Standorte detektiert werden und nicht bestimmte Straßenelemente.

2.4 Verkehrsdatenvisualisierung

Schon seit den frühen Anfängen der Transport- und Verkehrsplanung nutzte man Visualisierungstechniken für Verkehrsinformationen. Diese Methoden basieren mehr auf dem Plotten von aufgezeichneten oder simulierten Attributwerten in Diagrammen, was das Verständnis für Verkehrsfluss durch menschliche Analytiker ungemein erleichtert. Die Verbindung zur Kartographie ist in dieser Domäne sehr speziell und wird auch heutzutage in der Verkehrsplanung nicht oft genutzt. Dieses Vernachlässigen der räumlichen Komponente resultiert mitunter aus der historischen Entwicklung dieses Arbeitsbereichs.

Thematische Kartographie von Autoverkehr ist ein wenig erforschtes Thema. Eine Ausnahme bietet die Arbeit von GOLDSBERRY (2005, 2008), der Online-Verkehrskarten und deren Wahrnehmung durch mögliche Nutzer untersucht hat. Neben frei zugänglichen Online-Services wie Google Maps (Traffic Layer) oder Bing Maps gibt es Visual-Analysis- und Visual-Analytics-Ansätze für das Erzeugen von interaktiven Kartenansichten (CHEN et al. 2015). Verkehrsdaten sind oft multidimensional und raumzeitlich, weshalb in den meisten Fällen Informationsvisualisierung oder Visual Analytics verwendet wird (CHEN et al. 2015). Pioniere des letztgenannten sind Gennady und Natalia Andrienko, die als erste selbsterklärende geovisuelle analytische Methoden für Bewegungsdaten definiert haben (ANDRIENKO & ANDRIENKO 2007, 2011, 2013). Ein wichtiger Teil dieser Arbeiten sind räumliche und zeitliche Bewegungsdatenaggregation (ANDRIENKO & ANDRIENKO 2011, ANDRIENKO et al. 2015, 2016). Durch interaktive Segmentierung des Raums kann Gruppenbewegung in unterschiedlichen Skalen verstanden werden. Letzteres beinhaltet Größenvariationen der untersuchten Polygoneinheiten, welche anschließend durch gerichtete Flusssymbolik in einer Kartenansicht visualisiert wird (ANDRIENKO et al. 2015).

Andere Methoden für die Verarbeitung von massiven Bewegungsdaten in der Form von Punkten mit Zeitkomponente sind Clusteranalysemethoden. Für diese Art von Daten werden oft dichte-basierte Clusteranalysemethoden genutzt. Beispiele dafür sind neben DBSCAN auch OPTICS (ANKERST et al. 1999). Ähnlich dem Ansatz von RINZIVILLO et al. (2008) werden in der hier vorgestellten Methode Regionen mit Autoverkehrsstau durch dichteverbundene Cluster abgeleitet. Das Ziel dieser Methode ist es, dichteverbundene Punkte zu finden. Letzteres geschieht nach einer Vorauswahl der FTD-Punkte nach hoher Punktedichte und niedrigen Momentangeschwindigkeiten.

3 Testdatengrundlage

In dieser Arbeit werden Autoverkehrsdynamiken und die Verkehrsinfrastruktur von Shanghai (Volksrepublik China) untersucht.

Die Fallstudie besteht aus mehr als 7.000 beobachteten Taxifahrzeugen in Shanghai, deren Daten für die Ableitung von Standorten mit häufigem Stau einfluss dienen. Hierfür werden nur Floating-Taxi-Data (FTD) einer anonymen Taxiflotte von bestimmten Tageszeiten extrahiert. Außerdem wird das Straßennetzwerk aus dem OpenStreetMap-Projekt (OSM) innerhalb der administrativen Grenzen Shanghais in dieser Arbeit genutzt.

3.1 Taxitrajektorien aus Shanghai 2007

Die FTD von Shanghai resultieren aus einer Aufzeichnung zwischen Februar und März 2007. Diese Daten sind Grundlage für die Erkenntnisse in KELER & KRISP (2016), wo periodische Reisezeitvariationen zwischen 13 bedeutenden Straßenkreuzungen Shanghais aufgezeigt werden konnten. Der Datensatz hat insgesamt 10.000 unterschiedliche Taxiidentifikationen mit einem Durchschnitt von 7.120 regelmäßig beobachteten Fahrzeugen. Es gibt 10 originale Attribute, von denen lediglich Fahrzeugidentifikation, Geographische Länge und Breite, Aufnahmezeit und Momentangeschwindigkeit für den vorgestellten Ansatz gewählt werden. Das zeitliche Abtastintervall variiert zwischen 1 und 30 Sekunden und beträgt im Durchschnitt 12 Sekunden für den gesamten Datensatz.

Als Vorverarbeitungsschritt werden die FTD, abhängig von der Zeitkomponente partitioniert. Es werden Zeitfenster definiert, die die zeitliche Auflösung der angestrebten Ergebnisse festlegen. Dies ist der erste Schritt der in dieser Arbeit beschriebenen Methode.

3.2 OSM-Straßennetz

OpenStreetMap (OSM) gibt es seit 2004 und das Projekt hat zum Ziel eine offene Geodatenbank der Erde durch freiwillige Kartographen zu realisieren. Das Straßennetz von OSM gehört nicht nur zu den genauesten verfügbaren digitalisierten Straßennetzwerken, es ermöglicht auch Routingapplikationen, wie es durch GRASER et al. (2014) schon für Wien getestet wurde. Bei Letzterem treten aber immer Probleme auf, zumutbare Routen wegen teilweise fehlender Konnektivität zwischen einzelnen Straßensegmenten zu berechnen,

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt weniger auf den Straßensegmenten als mehr auf den aus diesen Segmenten extrahierten Knoten. Deshalb wird auf ein Testen der Konnektivität von Shanghais Straßennetzwerk verzichtet. Der vorgestellte Ansatz nutzt alle verfügbaren, durch Fahrzeuge passierbaren Straßen für die Ableitung von Knoten. Zu den unterschiedlichen Straßentypen zählen Autobahnen, Hauptverkehrsstraßen und jede Form von Anschlussstraße. Zusätzlich werden alle Typen von lokalen Straßen zusammen mit Fahrrad- und Fußgängerwegen einbezogen.

4 Detektion und Visualisierung von Verkehrsengpässen

Die Struktur des vorgeschlagenen Ansatzes besteht aus zwei parallelen Prozessen: (1) Berechnung komplizierter Kreuzungen aus OSM-Daten und (2) Verkehrsstaudetektion anhand FTD. Beide Prozesse resultieren in einem weiteren Prozess, um Standorte mit Verkehrsengpässen im Untersuchungsgebiet abzuleiten. Abbildung 1 zeigt Prozessabläufe des Ansatzes in einem Diagramm.

Der obere Teil des Diagramms in Abbildung 1 fasst die Methode von KRISP & KELER (2015) zusammen. Im unteren Teil von Abbildung 1 sieht man die Bestandteile der Methode für die FTD-basierte Staudetektion. Resultierend aus beiden Prozessen werden durch Polygonverschneidung Verkehrsengpässe abgeleitet. Die Rechenschritte und Repräsentation der Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

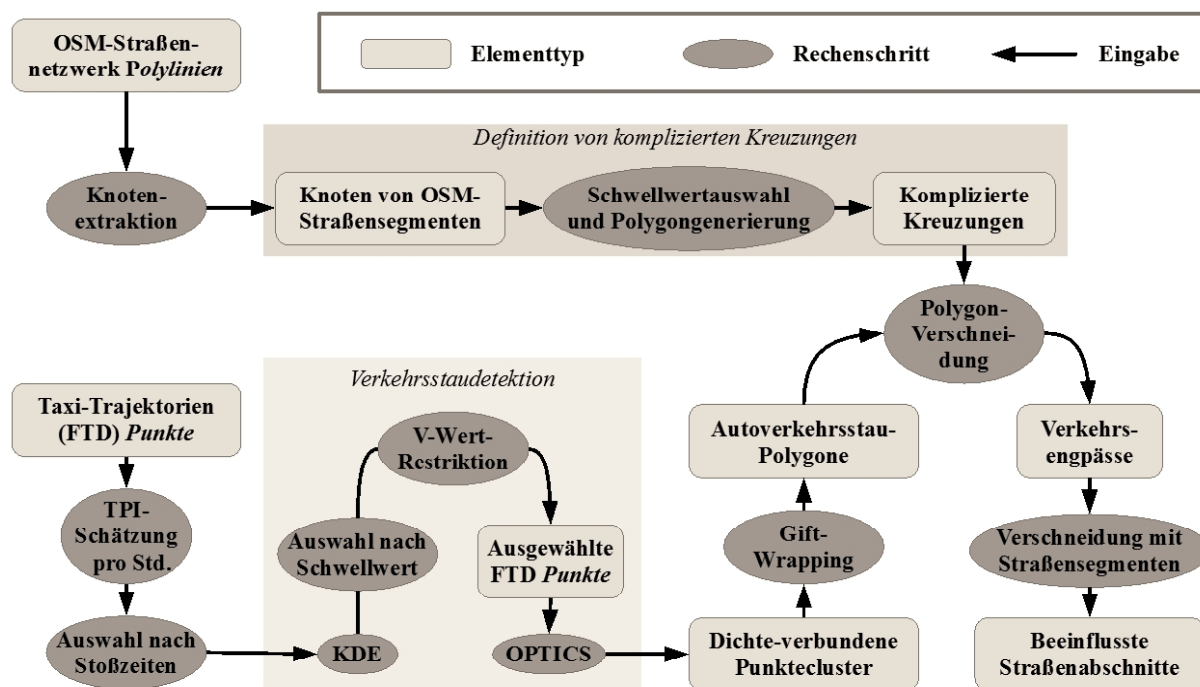


Abb. 1: Ablaufplan der Ansätze *Definition von komplizierten Kreuzungen* (oben), *Verkehrsstaudetektion* (unten) und *Definition von Verkehrsengepässen*.

4.1 Detektion und Klassifikation von komplizierten Kreuzungen

Die Ableitung von komplizierten Kreuzungen innerhalb von Straßennetzwerken ist eine schwierige Aufgabe, da lokales Wissen nur schwer durch Umfragen zugänglich ist. Im vorliegenden Ansatz werden Straßennetzwerke aus dem OSM-Projekt genutzt, um komplizierte Kreuzungen in Shanghai zu klassifizieren. Hierzu wird die Methode nach KRISP & KELER (2015) verwendet. Diese Methode wurde schon für das Testgebiet München getestet, wo komplizierte Kreuzungen für Fahranfänger definiert wurden. Für München wurde als Schwellwert für die Detektion 60 Meter eingeführt, was dem für München durchschnittlichen Durchmesser eines Kreisverkehrs entspricht. Nach ersten Untersuchungen des Straßennetzwerkes Shanghai wird ebenfalls 60 Meter als Bandbreite des biquadratischen Kerns einer zweidimensionalen Kerndichteschätzung gewählt. Letzteres ist der erste Teil der Methode nach KRISP & KELER (2015). Aus insgesamt 83.797 Straßenpolylinien Shanghais werden 777.377 Knoten extrahiert. Aus diesen Knoten wird eine Kerndichteschätzung durchgeführt. Im finalen Schritt der Methode werden 3.080 komplizierte Kreuzungen Shanghais als Polygone extrahiert.

4.2 Ableitung von Verkehrsstaus und -engepässen anhand FTD

In einem ersten Schritt zur Berechnung von Verkehrsstau- und Verkehrsengepässenstandorten werden globale Stauindizes für das gesamte Untersuchungsgebiet anhand eines eintägigen FTD-Satzes eingeführt. Ähnlich wie in KELER et al. (2016) wird ein Stauwert c eingeführt, der für die vorliegende Methode in 10 Klassen gleichen Intervalls eingeteilt wird:

$$c = k / v; \text{ mit Fahrzeugdichte } k \text{ [Fahrzeuge/km]} \text{ und Durchschnittsgeschwindigkeit } v \text{ [km/h]}$$

Durch Nutzung dieses Index, der vom Traffic Performance Index (TPI) beeinflusst ist (WEN et al. 2014), werden Stoßzeiten (Stunden) von ausgewählten Werktagen im Untersuchungsgebiet detektiert. Anschließend werden Datenpartitionen von Morgen- und Abendstoßzeiten bestimmter Werktage gewählt. Diese Datenpartitionen werden weiter aufgeteilt in kleinere Einheiten von 10 Minuten.

Im anschließenden zweiten Vorverarbeitungsschritt werden Kerndichten der FTD-Punkte berechnet: es werden nur FTD-Punkte mit einer Euklidischen Distanz unter 60 Meter ausgewählt. Der dritte Vorverarbeitungsschritt besteht aus der FTD-Restriktion, nur Punkte mit einer Momentangeschwindigkeit unter 20 km/h auszuwählen. 20 km/h ist nicht nur die maximale Geschwindigkeit für einen Verkehrsstau, sie ist motiviert durch vorherige Studien. ROBINSON (1984) fand heraus, dass Autoemissionen wie Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxyd bei Geschwindigkeiten unter 20 km/h besonders hoch sind.

Der weitere Schritt dieses Prozesses besteht aus dichtebasierter Clusteranalyse: OPTICS-Algorithmus, der durch ANKERST et al. (1999) eingeführt wurde. Die Eingangsparameter für die Clusteranalyse von FTD-Punkten sind wie folgt: 3 minimale Punkte (MinPts) und eine Suchdistanz von 50 Metern. Die daraus resultierenden Verkehrsstaucluster werden anschließend mithilfe des Gift-Wrapping-Algorithmus (JARVIS 1973) in Polygone umgewandelt.

4.3 Kartographische Darstellung von Verkehrsgängen

Detektierte Verkehrsstaupolygone und komplizierte Kreuzungen sind die Eingangswerte für die Ableitung von Verkehrsgängen. Letztere werden als jene Standorte definiert, die komplizierte Kreuzungen sind und durch Verkehrsstau beeinflusst sind. Da Stau ein dynamisches Phänomen ist und individuelle Ergebnisse für jedes 10-Minuten-Zeitfenster sich recht stark unterscheiden, wird eine visuelle Darstellung dieser raumzeitlichen Variation angestrebt. Um visuelle Überlastung zu vermeiden, werden zweidimensionale Polygondarstellungen mit 50 % Opazität dargestellt. Die zweite Option ist die dreidimensionale Ansicht mit extrudierten Polygonen. Wobei die Extrusion bei Letzterem die FTD-Punktdichte ausgewählter Zeitabschnitte repräsentiert.

5 Ergebnisse

Nach Anwendung der Methode nach KRISP & KELER (2015) kann eine hohe Anzahl an komplizierten Kreuzungen in Shanghai detektiert werden: hauptsächlich resultierend aus mehrfachen Überschneidungen unterschiedlicher Straßensegmente. Ein Ausschnitt von detektierten komplizierten Kreuzungen in Shanghai ist dargestellt in Abbildung 2b. Diese Erscheinung erscheint verständlicher nach einer Erklärung aus der Literatur: Shanghais gesamte Verkehrslast resultiert zu etwa 30 % von aufgeständerten Straßen (LI & ZUO 2004, ZHANG 2004, XU et al. 2012). Des Weiteren erwähnen XU et al. (2012) die Schwierigkeit Fahrzeugtrajektorien dem richtigen Segment im richtigen Höhenniveau zuzuweisen. Folglich ist es schwierig zu sagen, ob Stau auf dem aufgeständerten Autobahnsegment oder in der Straße darunter geschieht.

Im Zuge einer Demonstration der vorgestellten Methode werden Ergebnisse ausgewählter Zeitfenster von 10 Minuten des gesamten FTD-Satzes vorgestellt. Detektierte Stauregionen

von 10 Minuten in den Morgenstoßzeiten eines ausgewählten Arbeitstages (Montag, 12.02.2007, von 8:30 bis 8:40 Uhr) werden in Abbildung 2a dargestellt.



Abb. 2: Gebiete mit detektiertem Stau (a), komplizierte Kreuzungen (b) und detektierte Verkehrsengpässe (c) in Shanghai.

Durch Verschneidung von raumzeitlichen Staupolygonen mit komplizierten Kreuzungen werden Standorte möglicher Verkehrsengpässe für denselben Zeitraum wie Verkehrsstau abgeleitet. Die Ergebnisse für detektierte Verkehrsengpässe sind in Abbildung 2c abgebildet. In Abbildung 2a sieht man relative eckige Polygone wegen der Anwendung des Gift-Wrapping-Algorithmus. Abbildung 2b zeigt hingegen abgerundete Polygone, die hauptsächlich an komplexeren Kreuzungen vorkommen. Die verschnittenen Flächen zwischen den erwähnten Polygontypen sind Verkehrsengpässe in Teilen des untersuchten Straßennetzwerks (Abb.

2c). Dies zeigt, dass kein vorheriges Map Matching (MM) nötig ist, um Verkehrsinformationen mit Straßensegmenten zu verknüpfen.

Eine weitere Visualisierungsmöglichkeit ist die raumzeitliche Variation der Verkehrspasspolygone. Abbildung 3a zeigt die detektierten Verkehrspässe für drei konsecutive Zeitfenster zwischen 8:30 und 9:00 Uhr (19.02.2007) in einer kartographischen Ansicht. Hier ist zu sehen, dass die Farben mit 50 % Opazität dargestellt werden. Dadurch werden auch bei sich verschneidenden Polygonen die einzelnen Polygongrenzen erkennbar gemacht.



Abb. 3: Kartographische Visualisierungsmöglichkeiten für drei konsecutive Verkehrspasspolygone in einer (a) zweidimensionalen Ansicht und einer (b) dreidimensionalen Ansicht mit extrudierten Polygonen.

Die zweite Option für kartographische Darstellung ist die Extrusion von Polygonen in einer dreidimensionalen Ansicht. Das Ziel dieser Darstellung ist es eine mögliche Verkehrspassbewegung oder -ausbreitung zwischen aufeinanderfolgenden Zeitfenstern aufzuzeigen. Hierfür werden die Engpasspolygone mit der jeweiligen Anzahl der FTD-Punkte (mit Momentangeschwindigkeitswerten von unter 20 km/h) verknüpft und danach in einer 3D-Ansicht extrudiert. Diese Polygonextrusionen sieht man in Abbildung 3b mit teilweise hohen Variationen in Fahrzeugdichten und detektierten Verkehrspässen. Die Verkehrspässe im östlichen Teil Shanghais in Abbildung 3b zeigen eine Abnahme der Fahrzeugdichte, wohingegen der westliche Teil innerhalb einer halben Stunde eine Fahrzeugdichtesteigerung erfährt.

6 Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren für die Detektion und Visualisierung von Verkehrsengpässen vorgestellt. Erste Ergebnisse zeigen vielversprechende Erkenntnisse über die Verteilung von Verkehrsinfrastrukturelementen mit geringer Effizienz. Dies könnte hilfreich sein für mögliche Planungen, vor allem in der Organisation von Verkehr oder in der Gestaltung von zusätzlichen Elementen urbaner Verkehrsinfrastruktur.

Die vorgestellten Ergebnisse könnten auch hilfreich sein für Fahrzeugnavigationssdienste, vor allem in der kartographischen Darstellung von Straßennetzwerken. Die identifizierten Verkehrsengpässe könnten als zusätzlicher Layer in einem Fahrzeuginformationssystem mögliche Nutzer über Orte mit periodischen Verkehrsstaus informieren.

Die praktische Nutzung der in dieser Arbeit abgeleiteten Ergebnisse in einer Software könnte förderlich für das Verständnis des Auftretens und der Ausbreitung von Verkehrsstaus sein. Letzteres ist die wohl beste Art die errechneten Ergebnisse zu evaluieren, da die vorgestellte Methode sehr datenabhängig und skalierbar ist. Skalierbar bedeutet auch, dass die Schwellwerte für die Unterscheidung zwischen langsamen Verkehr und echtem Verkehrsstau recht unterschiedlich, da abhängig vom Betrachter, sein können. Im Allgemeinen kann man sagen, dass die vorgestellte Methode dieser Arbeit recheneffizient und einfach auszuführen ist. Dies ist für mögliche Analysten förderlich, da weniger Zeit und Aufwand in die Datenvorverarbeitung investiert wird.

Danksagung

Ein herzlicher Dank geht an das „Wireless and Sensor networks Lab (WnSN)“ an der Shanghai Jiao Tong University, besonders an Prof. Min-You Wu und Jia Peng für den Datenzugang (‘SUVnet-Trace Data’¹).

Literatur

- ANDRIENKO, N. & ANDRIENKO, G. (2007), Designing Visual Analytics Methods for Massive Collections of Movement Data. In: *Cartographica*, 42 (2), 117-138.
- ANDRIENKO, N. & ANDRIENKO, G. (2011), Spatial Generalization and Aggregation of Massive Movement Data. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17 (2), 205-219.
- ANDRIENKO, N. & ANDRIENKO, G. (2013), Visual analytics of movement: an overview of methods, tools, and procedures. In: *Information Visualization*, 12 (1), 3-24.
- ANDRIENKO, N., ANDRIENKO, G. & RINZIVILLO, S. (2015), Exploiting Spatial Abstraction in Predictive Analytics of Vehicle Traffic. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4 (2), 591-606.
- ANDRIENKO, N., ANDRIENKO, G. & RINZIVILLO, S. (2016), Leveraging spatial abstraction in traffic analysis and forecasting with visual analytics. In: *Information Systems*, 57, 172-194.

¹ http://wirelesslab.sjtu.edu.cn/taxi_trace_data.html

- ANKERST, M., BREUNIG, M. M., KRIEGEL, H.-P. & SANDER, J. (1999), OPTICS: Ordering Points to Identify the Clustering Structure. In: ACM SIGMOD international conference on Management of data. ACM Press, 49-60.
- BARTHÉLEMY, M. (2011), Spatial networks. In: *Physics Reports*, 499 (1-3), 1-101.
- BRAKATSOULAS, S., PFOSER, D. & TRYFONA, N. (2004), Modeling, storing and mining moving object databases. In: *Proceedings of the International Database Engineering and Applications Symposium 2004 (IDEAS '04)*, 68-77.
- BRÖRING, A., REMKE, A., STASCH, C., AUTERMANN, C., RIEKE, M. & MÖLLERS, J. (2015), enviroCar: A Citizen Science Platform for Analyzing and Mapping Crowd-Sourced Car Sensor Data. In: *Transactions in GIS*, 19 (3), 362-376.
- CHEN, W., GUO, F. & WANG, F. Y. (2015), A Survey of Traffic Data Visualization. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16 (6), 2970-2984.
- COSTA, G., MANCO, G. & MASCIARI, E. (2014), Dealing with trajectory streams by clustering and mathematical transforms. In: *Journal of Intelligent Information Systems*, 42, 155-177.
- DEWULF, B., NEUTENS, T., VANLOMMEL, M., LOGGHE, S., DE MAEYER, P., WITLOX, F., DE WEERDT, Y. & VAN DE WEGHE, N. (2015), Examining commuting patterns using Floating Car Data and circular statistics: Exploring the use of new methods and visualizations to study travel times. In: *Journal of Transport Geography*, 48, 41-51.
- DUAN, Z., LIU, L. & SUN, W. (2009), Traffic Congestion Analysis of Shanghai Road Network Based on Floating Car Data. In: *International Conference on Transportation Engineering, 2009*, 2731-2736.
- GOLDSBERRY, K. (2005), Limitations and potentials of real-time traffic visualization for wayfinding. In: *Proceedings of the 22nd ICA/ACI International Cartographic Conference; A Coruna, Spain, 9–16 July 2005*.
- GOLDSBERRY, K. (2008), GeoVisualization of automobile congestion. In: *Proceedings of the AGILE 2008 Conference: GeoVisualization of Dynamics, Movement and Change; Girona, Spain, 5 May 2008*.
- GRASER, A., STRAUB, M. & DRAGASCHNIG, M. (2014), Is OSM good enough for vehicle routing? A study comparing street networks in Vienna. In: GARTNER, G. & HUANG, H. (Eds.), *Progress in Location-Based Services, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer, Berlin, 3-18.
- GUDMUNDSSON, J., LAUBE, P. & WOLLE, T. (2012), Computational Movement Analysis. In: KRESSE, W. & DANKO D. M. (Eds.), *Springer Handbook of Geographic Information*. Berlin, Springer, 423-438.
- GÜHNEMANN, A., SCHÄFER, R.-P., THIESSENHUSEN, K.-U. & WAGNER, P. (2004), Monitoring Traffic and Emissions by Floating Car Data. Working Paper ITS-WP-04-07.
- HAWORTH, J., SHAW-TAYLOR, J., CHENG, T. & WANG, J. (2014), Local online kernel ridge regression for forecasting of urban travel times. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 151-178.
- IMMERS, L. H. & LOGGHE, S. (2002), Traffic Flow Theory. Course H 111, Verkeerskunde Basis, Faculty of Engineering, Department Of Civil Engineering, Section Traffic and Infrastructure, Katholieke Universiteit Leuven.
- JARVIS, R. A. (1973), On the identification of the convex hull of a finite set of points in the plane. In: *Information Processing Letters*, 2, 18-21.
- KANG, J. H., WELBOURNE, W., STEWART, B. & BORRIELLO, G. (2004), Extracting Places from Traces of Locations. In: *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Wireless mobile applications and services on WLAN hotspots (WMASH '04)*, 110-118.

- KELER, A. (2016), Öffentliche Geobasisdaten. In: BRAND, K., BLANKENBACH, J. & KOLBE, T.H. (Eds.), *Mobile GIS – Hardware, Software, IT-Sicherheit, Indoor-Positionierung. Version 2.1. Runder Tisch GIS e. V., München*, 115-118.
- KELER, A., DING, L. & KRISP, J. M. (2016), Visualization of traffic congestion based on Floating Taxi Data. In: *Kartographische Nachrichten*, 66 (1), 7-13.
- KELER, A. & KRISP, J. M. (2016), Visual Analysis of Floating Taxi Data Based on Interconnected and Timestamped Area Selections. In GARTNER, G., JOBST, M. & HUANG, H. (Eds.), *Progress in Cartography (EuroCarto 2015)*. Springer International Publishing, Cham, 115-131.
- KÖRNER, M. (2011), Nutzungsmöglichkeiten von Floating Car Data zur Verkehrsflussoptimierung. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (Hrsg.), *Angewandte Geoinformatik 2011. Beiträge zum 23. AGIT-Symposium Salzburg*. Wichmann, Berlin/Offenbach, Wichmann 381-386.
- KRISP, J. M. & KELER, A. (2015), Car Navigation – Computing Routes That Avoid Complicated Crossings. In: *International Journal of Geographical Information Science*, 29 (11), 1988-2000.
- LAN, J., LONG, C., WONG, R.C.-W., CHEN, Y., FU, Y., GUO, D., LIU, S., GE, Y., ZHOU, Y. & LI, J. (2014), A New Framework for Traffic Anomaly Detection. In: *Proceedings of the 2014 SIAM International Conference on Data Mining*, 875-883.
- LI, D., FU, B., WANG, Y., LU, G., BEREZIN, Y., STANLEY, H. E. & HAVLIN, S. (2015b), Percolation transition in dynamical traffic network with evolving critical bottlenecks. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (3), 669-672.
- LI, H., KULIK, L. & RAMAMOHANARAO, K. (2015a), Robust inferences of travel paths from GPS trajectories. In: *International Journal of Geographical Information Science*, 29 (12), 2194-2222.
- LI, J. & ZUO, L. (2004), Shanghai urban elevated roads and metropolis traffic. In: *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 21 (6), 14-17.
- LIU, X. & BAN, Y. (2013), Uncovering Spatio-Temporal Cluster Patterns Using Massive Floating Car Data. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2, 371-384.
- LONG, J. A. & NELSON, T. A. (2013), A review of quantitative methods for movement data. In: *International Journal of Geographical Information Science*, 27 (2), 292-318.
- LONG, J. C., GAO, Z. Y., REN, H. L. & LIAN, A. P. (2008), Urban traffic congestion propagation and bottleneck identification. In: *Science in China Series F: Information Sciences*, 51 (7), 948-964.
- PROTSCHKY, V., RUHHAMMER, C. & FEIT, S. (2015), Learning Traffic Light Parameters with Floating Car Data. In: *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2015)*, 2438-2443.
- RANACHER, P., BRUNAUER, R., VAN DER SPEK, S. C. & REICH, S. (2016), A model to estimate and interpret the energy-efficiency of movement patterns in urban road traffic. In: *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, 152-163.
- RINZIVILLO, S., PEDRESCHI, D., NANNI, M., GIANNOTTI, F., ANDRIENKO, N. & ANDRIENKO, G. (2008), Visually driven analysis of movement data by progressive clustering. In: *Information Visualization*, 7 (3-4), 225-239.
- ROBINSON, R. (1984), Problems in the urban environment: traffic congestion and its effects. In: *Wollongong Studies in Geography*, Vol. 14. Department of Geography, University of Wollongong, NSW, Australia.

- SOHR, A., BROCKFELD, E. & KRIEG, S. (2010), Quality of floating car data. In: Conference Proceedings, Paper No. 02392, www.digitalpapers.org. 12th World Conference on Transport Research (WCTR), Lisbon, Portugal, 11–15 July 2010.
- STANICA, R., FIORE, M. & MALANDRINO, F. (2013), Offloading Floating Car Data. In: Proceedings of the 2013 IEEE 14th International Symposium and Workshops on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 1-9.
- WEN, H., SUN, J. & ZHANG, X. (2014), Study on Traffic Congestion Patterns of Large City in China Taking Beijing as an Example. In: *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 138, 482-491.
- XU, X., LI, X., HU, Y. & PENG, Z. (2012), A novel algorithm to identifying vehicle travel path in elevated road area based on GPS trajectory data. In: *Frontiers of Earth Science*, 6 (4), 354-363.
- YAN, Z., CHAKRABORTY, D., PARENT, C., SPACCAPIETRA, S. & ABERER, K. (2013), Semantic trajectories: Mobility data computation and annotation. In: *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST) – Special Sections on Paraphrasing; Intelligent Systems for Socially Aware Computing; Social Computing, Behavioral-Cultural Modeling, and Prediction*, 4 (3), 1-38.
- YUAN, Q., LIU, Z., LI, J., ZHANG, J. & YANG, F. (2014), A traffic congestion detection and information dissemination scheme for urban expressways using vehicular networks. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 47 (2), 114-127.
- ZHANG, Y. M. (2004), The thinking of relieving the congestion of elevated road system. In: *Traffic and Transportation*, 5, 37-38.