

Erkennung von raum-zeitlichen Bewegungsmustern aus GPS-Trajektorien

Karl REHRL, Roland HACKL, Stefan KRAMPE und Enrico STEIGER

Zusammenfassung

Durch steigende Mobilitätsansprüche der Bevölkerung ist davon auszugehen, dass der Faktor Zeit in der Reise- und Verkehrsplanung, insbesondere im ökonomischen Kontext zunehmender Globalisierung, eine immer wichtigere Rolle spielen wird. Die entscheidende Frage lautet, in welcher Zeit Güter und Personen von A nach B bewegt werden können. Bisher werden dynamische Verkehrsdaten vor allem erhoben, um allgemeine Aussagen zum Verkehrsfluss treffen zu können. Dazu werden die Durchschnittsgeschwindigkeiten auf einzelnen Wegsegmenten gemessen und mit den Standard-Geschwindigkeiten (v_0) verglichen. Auf Basis dieser Abweichungen wird ein Verkehrslagebild erstellt, das den Verkehrsfluss mithilfe von Level-of-Service-Kategorien darstellt. Eine weitere, tiefergehende Analyse der Bewegungsdaten findet nicht statt. In diesem Kontext ergibt sich das Potenzial der spezifischen Betrachtung von räumlichen und zeitlichen Auffälligkeiten in Bewegungsmustern, die aus GPS-Positionstrajektorien extrahiert werden können. Die Anzahl wiederkehrender Stillstände und ihre jeweilige Länge in einer gerichteten Abfolge sind beispielsweise Indizien für Verkehrsbeeinträchtigungen und einem typischen Stop & Go Fahrverhalten. Gelingt es solche Bewegungsmuster automatisiert zu erkennen, können sie zur Analyse von Transport- und/oder Fahrtrouten bzw. zur Analyse von verkehrssteuernden Maßnahmen genutzt werden. Ohne die Analyse von Bewegungsmustern lassen sich selbst für Experten die maßgebenden dynamischen Faktoren der Verlängerungen von Reisezeiten nur schwer abschätzen (GRÜBER & RÖHR 2007).

Zielsetzung

Die in diesem Beitrag beschriebenen Verfahren wurden im Rahmen des I2V-Projekts HOTSPOT¹ entwickelt. Ziel des HOTSPOT-Projekts ist die Konzeption und Evaluierung eines selbstlernenden Reisezeitmodells. Dabei steht das automatisierte Lernen von Reisezeiten durch die Analyse von GPS-Trajektorien im Mittelpunkt. Das Reisezeitmodell bietet folgende Vorteile gegenüber bisherigen Reisezeitmodellen: (1) Das Modell ist unabhängig von Straßengraphen oder Fahrplänen, (2) es lernt mit zunehmender Anzahl an Trajektorien (selbstlernendes Modell), (3) es ist flächendeckend einsetzbar und beliebig skalierbar und (4) es kann multi- bzw. intermodal angewandt werden.

Durch die Extraktion von wiederkehrenden Bewegungsmustern und der Untersuchung der räumlich-zeitlichen Dynamik dieser Bewegungsmuster lassen sich beliebige Straßen- und

¹ Das Projekt HOTSPOT wurde im Forschungsprogramm IV2Splus – Intelligente Verkehrssysteme und Services Plus des bm:vit in der Förderlinie I2V – Intermodalität und Interoperabilität von Verkehrssystemen gefördert.

Routensegmente hinsichtlich ihrer Verkehrsflussqualität bewerten. Im Mittelpunkt des Projekts steht vor allem die Frage, wie sich sowohl Reisezeiten als auch Bewegungsmuster für verschiedene Verkehrsmittel automatisiert detektieren lassen. Für die Generierung der Datengrundlage werden *Floating Traveller Data (FTD)* eingesetzt (KRAMPE 2006). In diesem Beitrag wird die Analyse von Verkehrsflusssituationen anhand Bewegungsmustern aus GPS-Trajektorien beschrieben.

Analyse von Bewegungsmustern

Im Rahmen des I2V-Projekts HOTSPOT wurden grundlegende Verfahren für die Detektion von Bewegungsmustern aus GPS-Trajektorien entwickelt und validiert (REHRL, LEITINGER, KRAMPE & STUMPTNER 2010). Mithilfe der entwickelten Verfahren können die qualitativen Bewegungsaktivitäten (1) *Stillstand*, (2) *positive Beschleunigung*, (3) *negative Beschleunigung*, (4) *gleichmäßige Bewegungen* sowie (5) *keine Drehung*, (6) *Drehung links* und (7) *Drehung rechts* automatisiert und zuverlässig aus GPS-Bewegungsdaten extrahieren werden. Eine empirische Validierung hat ergeben, dass sich die Bewegungsmuster zu ca. 80 % korrekt aus den GPS-Trajektorien erkennen lassen. Sind die grundlegenden Bewegungsaktivitäten erkannt, lässt sich die räumlich-zeitliche Dynamik dieser Muster untersuchen, um Zusammenhänge der Muster mit typischen Verkehrsflusssituationen aufzuzeigen und die Verkehrsflusssituationen hinsichtlich qualitativer und quantitativer Kriterien zu bewerten. Dadurch können zum Beispiel mehrerer Trajektorien entlang von Routen gegenübergestellt und tageszeitabhängige Bewegungsprofile ausgewertet werden. Die Abbildungen 1 bis 3 zeigen beispielhaft die Muster von typischen Verkehrsflusssituationen für einen ausgewählten Streckenabschnitt in Salzburg. Es lassen sich mithilfe der Bewegungsmuster vor allem Vergleiche anstellen, wie sich die Bewegungsmuster im Tagesverlauf verändern.

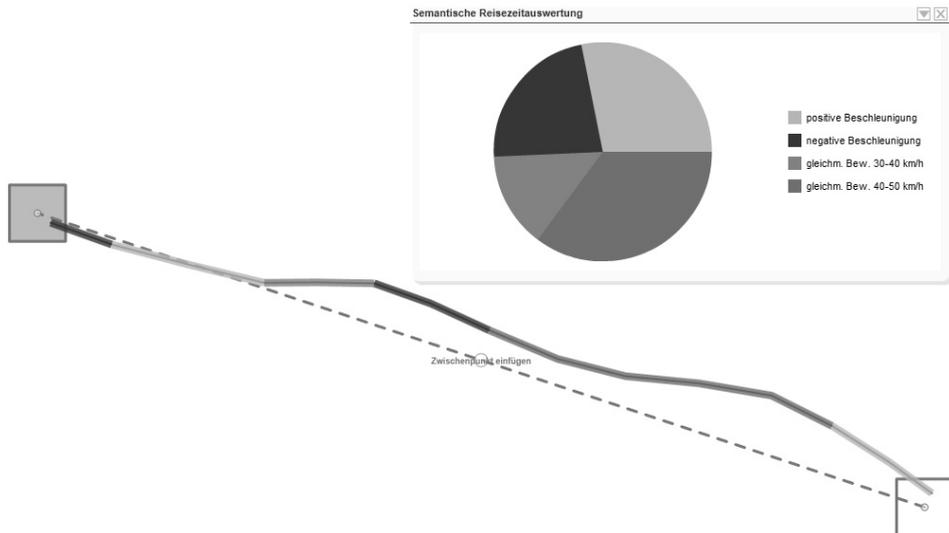


Abb. 1: Beispiel für eine Verkehrsflusssituation „flüssiger Verkehr“ entlang der Imbergstraße in Salzburg

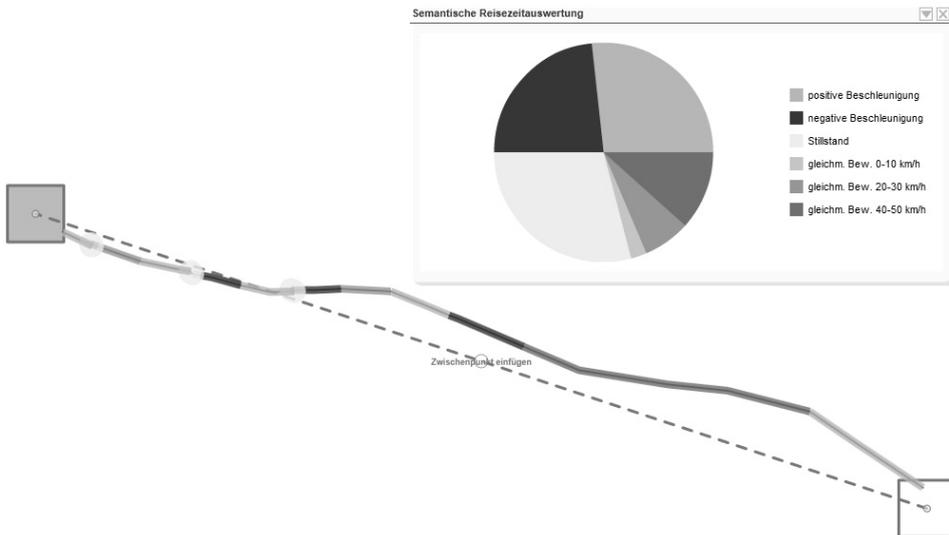


Abb. 2: Beispiel für eine Verkehrsflusssituation „durchwegs flüssiger Verkehr mit vereinzelten Stillständen vor einer Lichtsignalanlage“ entlang der Imbergstraße in Salzburg

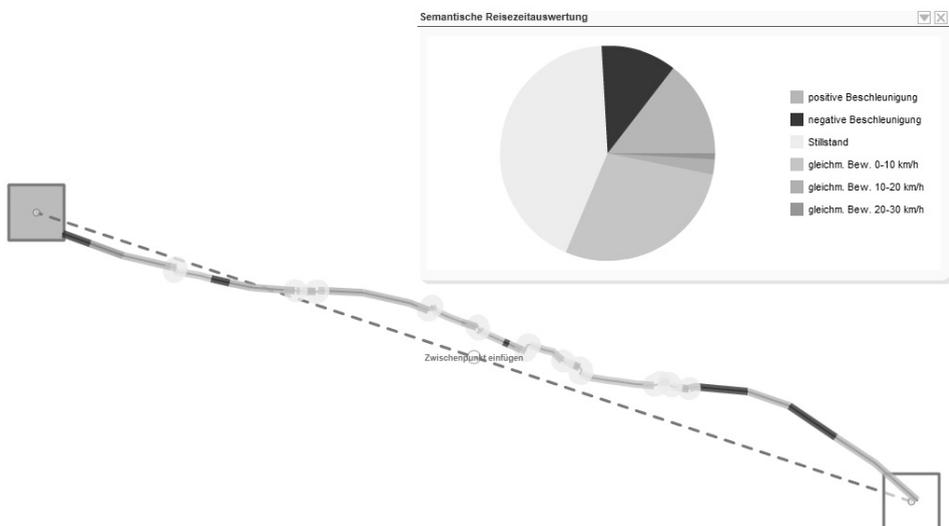


Abb. 3: Beispiel für eine Verkehrsflusssituation „längerer Stop & Go Verkehr mit wiederkehrenden Stillständen vor einer Lichtsignalanlage“ entlang der Imbergstraße in Salzburg

Anhand der Abbildungen 1 bis 3 wird ersichtlich, dass sich mit steigendem Verkehrsaufkommen die aus den GPS-Trajektorien extrahierten Bewegungsmuster ändern. Zum Beispiel steigt der Anteil an Stillständen (helle Kreise) von 0 % (Abb. 1) bis auf 42 % (Abb. 3).

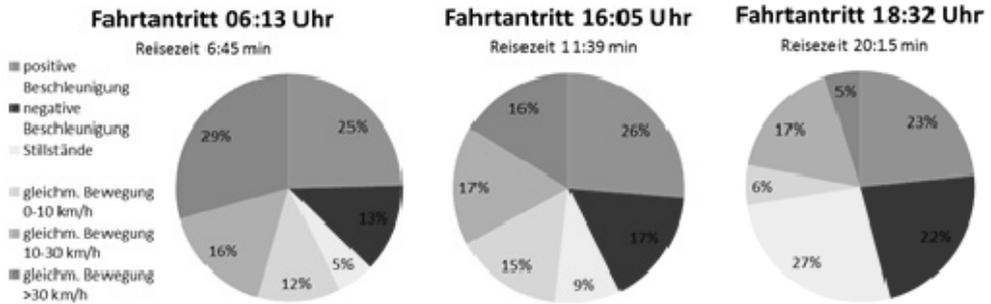
Der Verkehrsfluss wird dadurch qualitativ schlechter. Während die Verkehrsflusssituation in Abbildung 1 noch keinen Stillstand aufweist, sind in Abbildung 2 bereits mehrere Stillstände vor einer Lichtsignalanlage zu erkennen. In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass sich die Stillstände räumlich bereits weit ausgedehnt haben und daher der Verkehrsfluss durch die Lichtsignalanlage massiv beeinträchtigt ist. Mithilfe der Auswertung von Bewegungsaktivitäten kann nicht nur ausgesagt werden, dass sich die Durchschnittsgeschwindigkeit auf diesem Straßensegment verringert hat, sondern es können auch qualitative Aussagen abgeleitet werden, welche Bewegungsaktivitäten welchen Einfluss auf die Geschwindigkeit bzw. die Reisezeit haben.

In der weiteren Verarbeitung können nun die aus den einzelnen GPS-Trajektorien erkannten Bewegungsmuster über alle Trajektorien aggregiert werden. Streckensegmente, auf denen die Mehrzahl der Trajektorien ein bestimmtes Muster aufweisen, werden auf Basis von geclusterten Bewegungsmustern der Einzeltrajektorien segmentiert und klassifiziert. Aufbauend auf den komplexen Bewegungsmustern werden ebenfalls räumlich-zeitliche Dynamiken betrachtet. Mit unterschiedlichem Verkehrsaufkommen ist anzunehmen, dass sich auch die auftretenden Bewegungsmuster unterscheiden werden. Wiederholte Stillstände vor einer Lichtsignalanlage treten wahrscheinlich nur bei erhöhtem Verkehrsaufkommen auf. Bei der Beschreibung räumlich-zeitlicher Dynamik werden die Cluster innerhalb einzelner Zeitintervalle als Untermenge der Trajektorien auf dieser Strecke gebildet. Für die aggregierten Bewegungsmuster ist außerdem anzunehmen, dass sie in zeitlicher Hinsicht nicht immer gleich verteilt sind, denn häufig treten auf einem bestimmten Streckensegment verschiedene Muster zu verschiedenen Zeiten auf. Daher sollten sich die Muster in der Dimension Zeit abbilden lassen, d. h. die oben genannten Streckensegment-Klassifizierungen werden in die zeitliche Dimension übertragen. So kann zum Beispiel festgestellt werden, ob es sich bei einem Streckensegment-spezifischen Muster um ein statisches oder dynamisches Muster handelt: Während statische Streckensegmente durch konstantes Auftreten eines bestimmten Musters gekennzeichnet sind, definieren sich dynamische Streckensegmente durch nicht-simultanes Auftreten mindestens zweier komplexer Bewegungsmuster. Da die Segmentierung von GPS-Trajektorien für unterschiedliche Verkehrsträger durchgeführt werden kann, kann auch festgestellt werden, inwieweit sich die Bewegungsmuster unterschiedlicher Verkehrsträger gegenseitig beeinflussen. Dadurch kann zum Beispiel festgestellt werden, ob die Infrastruktur (z. B. eine Busspur) auch den erwünschten Effekt hinsichtlich des Verkehrsflusses nach sich zieht.

Tageszeitabhängige, semantische Analyse von Reisezeiten

Das HOTSPOT-Reisezeitmodell kann aufgrund der Segmentierung von GPS-Trajektorien in semantische Bewegungsaktivitäten neben der Abfrage von realen Reisezeiten auch zur Analyse genutzt werden, zu welchen Anteilen die semantischen Bewegungsmuster in der berechneten Reisezeit enthalten sind (vgl. Abb. 4).

Abbildung 4 zeigt für einen ausgewählten Streckenabschnitt in Salzburg, wie das aus GPS-Trajektorien extrahierte Bewegungsprofil zu unterschiedlichen Tageszeiten variiert. Deutlich ist zu erkennen, dass bei Fahrten um ca. 6 Uhr eine wesentlich ungestörtere Fahrt im Vergleich zu einer Fahrt um 18 Uhr stattfindet. Die Anzahl der Stillstände ist dabei deutlich minimiert. Neben den Anteilen der Bewegungsaktivitäten an der Reisezeit, können die



Häufigkeitsverteilung der Bewegungsmuster bei Fahrtantritt um 06:13 Uhr

Häufigkeitsverteilung der Bewegungsmuster bei Fahrtantritt um 16:05 Uhr

Häufigkeitsverteilung der Bewegungsmuster bei Fahrtantritt um 18:32 Uhr

Abb. 4: Analyse der Fahrzeiten zu unterschiedlichen Tageszeiten am Beispiel eines Streckenabschnitts in Salzburg (Lieferinger Kreisverkehr) (STEIGER, E.)

Aktivitäten auch dazu verwendet werden, um wiederkehrende Muster in GPS-Trajektorien zu identifizieren. Das mehrmalige Warten vor einer Lichtsignalanlage (LSA) (vgl. Abb. 2 und Abb. 3) ist ein typisches komplexes Bewegungsmuster, das in unterschiedlichen Variationen immer wieder auftritt. Je nach vorhandener Infrastruktur ist es wahrscheinlich, dass sich räumlich unterschiedliche Muster ergeben. Es ist davon auszugehen, dass sich die Bewegungsmuster vor dem Einfahren in einen Kreisverkehr von jenen vor einer Lichtsignalanlage unterscheiden. Zwischen Bewegungsmustern und Verkehrsinfrastruktur lassen sich daher folgende Zusammenhänge näher analysieren:

- Explorative Untersuchung von spezifischen Verkehrsflusssituationen in Hinblick auf Zusammenhänge mit der Verkehrsinfrastruktur
- Ableitung von Rückschlüssen auf die infrastrukturellen Gegebenheiten (baulich, Maßnahmen der Verkehrssteuerung, etc.)

Die zuverlässige Erkennung von Verkehrsflusssituationen bildet die Grundlage für die Einleitung verkehrssteuernder und verkehrslenkender Maßnahmen im dynamischen Verkehrsmanagement. Dabei sollen die Situationen vor allem auch verkehrsträgerübergreifend betrachtet werden. Denkbar wäre zum Beispiel, dass das räumlich kombinierte Auftreten von „Stop&Go-Verkehr“ im Individualverkehr und „Fließender Verkehr“ im ÖV als positiv zu bewerten ist. Gleichzeitig könnte aber das gleichzeitige Auftreten von „Stop&Go-Verkehr“ bei beiden Verkehrsträgern als „Problem-HotSpot“ identifiziert werden. Die Erkennung dieser Verkehrsflusssituation kann dazu führen, dass infrastrukturelle Veränderungen (Erweiterung einer Busspur) vorgenommen werden müssen, oder z. B. die Steuerung von Lichtsignalanlagen angepasst werden muss.

Fazit

Die Ermittlung der maßgeblichen Faktoren der Verlängerung von Reisezeiten mithilfe einer automatisierten, verkehrsträgerübergreifenden Verkehrsflussanalyse verbessert entscheidend den aktuellen Verkehrsinformationsbestand. Detektierte Verkehrssituationen können durch die Analyse zeitlich wiederkehrender Bewegungsmusterabfolgen mit auftretenden Netzstörungen besser in einem Gesamtmodell in mehreren zeitlichen Schichten und Detailstufen erklärt werden. Bestimmte tagesabhängige Bewegungsprofile sind Indikatoren für spezifische Verkehrssituationen, deren Gesamtanalyse aller Fahrmuster zu einer effektiveren Umsetzung mobilitätssteuernder, verkehrlicher Maßnahmen führt. Der längerfristige Nutzen der Analyse von Bewegungsmustern ist in der energieeffizienten Verkehrssteuerung sowie in einem wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit zu sehen. Für die Verkehrsplanung ergibt sich die Möglichkeit einer optimierten Anpassung verkehrsbeeinflussender Maßnahmen, um Beispielsweise häufiges Beschleunigungsverhalten (LSA-Knotenpunkte) zu reduzieren. Problematische Verkehrssituationen lassen sich somit automatisiert detektieren und die Verkehrsflussqualität verkehrsträgerübergreifend bewerten. Bewegungsmuster dienen auch zur Analyse hinsichtlich eines energieeffizienten Mobilitätsverhaltens. Ein kontinuierlicher Verkehrsfluss minimiert den durchschnittlichen Energieverbrauch pro Kilometer und verringert damit gleichzeitig die Schadstoffemission.

Literatur

- GRÜBER, B. & RÖHR, T. (2007): Reisezeitmessungen setzen sich durch. *Zeitschrift Straßenverkehrstechnik*, 5/2007.
- KRAMPE, S. (2006): Nutzung von Floating Traveller Data (FTD) für mobile Lotsendienste im Verkehr. Dissertation, TU Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie.
- REHRL, K., LEITINGER, S., KRAMPE, S. & STUMPTNER, R. (2010): An Approach to Semantic Processing of GPS Traces. In: GOTTFRIED, B., LAUBE, P., KLIPPEL, A., VAN DEN WEGHE, N. & BILLEN, R. (Eds.): *Proceedings of the 1st Workshop on Movement Pattern Analysis, MPA'10*, Zurich, Switzerland, September 14, CEUR Workshop Proceedings, S. 136-142.
- STEIGER, E. (2011): Verfahren zur Verkehrsdatengenerierung aus freien Geographischen Informationssystemen: innerstädtische Verkehrsanalyse am Beispiel Salzburg im Kontext eines verbesserten Verkehrsmanagements. Diplomarbeit Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Institut für Geographie.