

Schlussbericht der Universität Duisburg-Essen zum
Projekt

UR:BAN
(Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme
und Netzmanagement)

Förderkennzeichen: 19P11007Q

Universität Duisburg-Essen
Fakultät für Physik
Physik von Transport und Verkehr
Prof. Dr. Michael Schreckenberg

Inhalt

1.	Kurze Darstellung.....	3
1.1.	Aufgabenstellung.....	3
1.2.	Voraussetzungen	4
1.3.	Planung und Ablauf.....	5
1.4.	Wissenschaftlicher Stand zu Projektbeginn	5
1.5.	Zusammenarbeit mit Partnern	6
2.	Eingehende Darstellung.....	7
2.1.	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	7
	Empirische Untersuchungen.....	8
	Simulationen von übersättigtem Verkehr	10
	Anwendbarkeit der makroskopischen Matrizen auf das gesamte Düsseldorfer Straßennetz	14
	Einfluss des Fahrerverhaltens im Modell	15
	Kumulierte Beschleunigung	19
	Breakdown Minimization (BM)-Prinzip	25
	Erreichung der Ziele	27
2.2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	27
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit	28
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen	28
2.5.	Fortschritte durch Dritte	29
2.6.	Veröffentlichungen.....	30
2.7.	Literaturangaben.....	33

1. Kurze Darstellung

1.1. Aufgabenstellung

Ziel der Forschungsinitiative UR:BAN war es, innovative Fahrerassistenz- und Verkehrsmanagementsysteme für urbane Räume zu entwickeln, zu testen und deren Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit und Effizienz zu bewerten. In der Projektsäule „Vernetztes Verkehrssystem“ (UR:BAN-VV) sollte die Verkehrseffizienz in urbanen Räumen bei gleichzeitiger Senkung des Emissionsausstoßes optimiert werden. Dieses Ziel sollte durch den Ausbau von intelligenter Infrastruktur und deren Vernetzung mit intelligenten Fahrzeugen unter spezieller Berücksichtigung verschiedener Antriebskonzepte erreicht werden.

Im Rahmen einer energieoptimierten Navigation sollten im Teilprojekt „Regionales Netz“ (RN) nicht mehr nur „kurze“ oder „schnelle“ Routen ermittelt werden. Sondern dem Fahrzeug bzw. dem Fahrer sollte basierend auf einer hochgenauen, aktuellen Verkehrslage und -prognose und unter Berücksichtigung von Verkehrsmanagementstrategien eine zur Antriebsform (Verbrenner, Elektroantrieb) passende energieeffiziente Route errechnet werden. Dabei kann es zu unterschiedlichen energieoptimierten Routen für Verbrenner- und Elektro-Fahrzeuge kommen.

Hochpräzise Verkehrsinformationen, die durch verschiedene Anbieter wie z.B. TomTom (GPS-Flotten und GSM-Ortungssysteme) in regionalen Verkehrsnetzen immer mehr verfügbar werden, bieten neue Möglichkeiten für die nachhaltige Entwicklung eines funktionsfähigen und effizienten Verkehrsmanagementsystems in Ballungsräumen. Da der Verkehr in einem Verkehrsnetz eine hohe Dynamik und Komplexität zeigt, sollten diese hochpräzisen aktuellen Verkehrsinformationen zur mikroskopischen Modellierung der Ermittlung und Prognose des Verbrauchs verwendet werden.

Aufgabe der Universität Duisburg-Essen war es, möglichst realitätsnahe mikroskopische Verkehrsflusssimulationen für den innerstädtischen Verkehr durchzuführen und gemeinsam mit den Partnern eine Methode zu entwickeln, die die Bestimmung von energieeffizienten Routen im Live-Betrieb ermöglicht. Voraussetzung für die Simulationen war zunächst eine empirische Analyse des Verkehrsgeschehens in Düsseldorf gemeinsam mit der Daimler AG.

Es wurden neue Konzepte und Methoden zur urbanen Netzsteuerung zur Verkehrsflussoptimierung entwickelt. Städtische Strategien wurden in die Modellbildung (zusammen mit der Stadt Düsseldorf, TomTom und der Daimler AG) eingearbeitet. Die hier entwickelten Strategien und Modelle insbesondere der Energieeffizienz werden im urbanen Raum der Stadt Düsseldorf über das Projekt hinaus verwendet werden können. Weiterhin wurde eine Modellierung einer optimalen Verteilung des Verkehrs durchgeführt.

Die Vorhabenziele beinhalteten: (i) Modellierung einer optimalen Verteilung des Verkehrs im Netz, (ii) energieeffiziente Navigation mit einer individuellen Informationsverteilung bei gleicher Ausgangslage, (iii) Berechnung und Abschätzung der Folgen von Strategemaßnahmen auf den Verkehrsfluss, (iv) Entwicklung der Methoden zur Modellierung der netzweiten Verkehrsprognose, (v) eine Entwicklung der Szenarien und Berechnungen der Verbräuche von Fahrzeugen unterschiedlicher Antriebsarten.

Insgesamt waren dafür die folgenden Arbeiten notwendig:

- Entwicklung einer Simulationsumgebung auf Basis eines stochastischen Kerner-Klenov-Modells
- Import von Infrastrukturdaten der Teststrecken in Düsseldorf, wie Streckenlayout, Schaltpläne von Lichtsignalanlagen
- Analyse von empirischen Daten der Stadt Düsseldorf (Detektoren) und von TomTom (anonymisierte GPS-Daten) gemeinsam mit der Daimler AG
- Mikroskopische Verkehrsflusssimulationen auf Basis der aus den empirischen Daten gewonnenen Erkenntnisse über Zuflüsse und typische auftretende Verkehrsmuster
- Entwicklung einer Klassifizierung von Fahrzeugprofilen (empirisch und simuliert) mit der Daimler AG
- Entwicklung und Einführung der neuen Kenngröße „Kumulierte Beschleunigung“
- Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf beliebige innerstädtische Straßen
- Modellierung einer optimalen Verteilung des Verkehrs im Netz auf der Basis des „Breakdown Minimization“ (BM)-Prinzips

1.2. Voraussetzungen

Die Grundlage für die in 1.1 dargelegte Aufgabenstellung bildete die Erfahrung der Antragsteller in ihren verschiedenen Disziplinen.

Die Erforschung der Mobilität mittels Simulationen ist ein zentraler Forschungs- und Innovationsschwerpunkt des Lehrstuhls „Physik von Transport und Verkehr“ der Universität Duisburg-Essen. Eine der größten Herausforderungen auf dem Weg zur emissionsfreien Mobilität ist eine deutliche Verbesserung des Verkehrsgeschehens in urbanem Verkehr, insbesondere in den regionalen Netzen. Hier hat der Lehrstuhl „Physik von Transport und Verkehr“ der Universität Duisburg-Essen während der letzten Jahre vielfältige Forschungsarbeiten sowie deren praktische Umsetzung realisiert.

Projektleiter an der Universität Duisburg-Essen war Prof. Dr. Michael Schreckenberg. Er ist anerkannter Experte in den Verkehrswissenschaften und beschäftigt sich seit Jahren mit der Simulation von Straßenverkehr mittels Zellularautomatenmodellen. Bedeutende frühere Projekte am Lehrstuhl waren „BAB NRW“, das offizielle Internet-Portal des Landes NRW zur Verkehrslage auf den Autobahnen in NRW (www.autobahn.nrw.de), hinter der eine große Online-Simulation stand. In detaillierten Studien wurde insbesondere auch der Einfluss von Verkehrsinformationen auf das Fahrerverhalten untersucht.

Prof. Dr. Boris S. Kerner ist ebenfalls anerkannter Experte in den Verkehrswissenschaften und Begründer der Drei-Phasen-Verkehrstheorie. Er untersuchte bei der Daimler AG unter anderem die verkehrliche Wirkung von Verkehrssteuerungsmaßnahmen, Fahrerassistenzsystemen und der Vernetzung von Fahrzeugen. Durch sein altersbedingtes Ausscheiden bei der Daimler AG und seinen anschließenden Wechsel als außerplanmäßiger Professor an den Lehrstuhl von Prof.

Schreckenbergs wurden die Erfahrungen und Kenntnisse zweier Experten kombiniert, was zu neuen Synergien für die Forschung geführt hat.

1.3. Planung und Ablauf

Die Planung der Arbeiten sah vor, dass in der ersten Projektphase eine intensive Analyse des städtischen Verkehrs in Düsseldorf vorgenommen werden sollte. Dabei sollten anhand von empirischen Verkehrsdaten von stationären Detektoren und von GPS-Navigationsdaten typische Verkehrsmuster in Düsseldorf identifiziert werden. Die Daten wurden von TomTom und der Stadt Düsseldorf zur Verfügung gestellt, die Analyse erfolgte in Zusammenarbeit mit der Daimler AG (siehe Abschlussbericht der Daimler AG).

Auf Basis der aus dieser Analyse gewonnenen Erkenntnisse über den Verkehr in Düsseldorf sollte von der Universität Duisburg-Essen eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation aufgebaut werden, die die gefundenen typischen Verkehrsmuster reproduzieren konnte. Dies erfolgte auf der Basis eines stochastischen mikroskopischen Kerner-Klenov-Modells.

Die Ergebnisse der Simulationen wurden der Daimler AG zur Verfügung gestellt und in Zusammenarbeit mit dieser eine Methode zur Berechnung der energieeffizienten Routen ermittelt.

Alle Arbeiten wurden wie geplant im vorgesehenen Zeit- und Kostenrahmen durchgeführt.

Die Universität Duisburg-Essen hat im Rahmen der Teilprojekte Regionales Netz (RN) in der Projektsäule Vernetztes Verkehrssystem (UR:BAN-VV) an den folgenden drei Teilaufgaben mitgewirkt:

1. Energieeffiziente Navigation: Modellierung der Informationsverteilung bei gleicher Ausgangslage mit dem Ziel einer optimalen Verteilung des Verkehrs im Netz,
2. Verkehrsabhängige Verbräuche: Mikroskopische und makroskopische Simulationen,
3. Verkehrs- und Umweltlage: Berechnung und Abschätzung der Folgen von Strategemaßnahmen auf den Verkehrsfluss.

1.4. Wissenschaftlicher Stand zu Projektbeginn

Moderne Navigationssysteme bieten neben den Möglichkeiten eine „schnellste“ und eine „kürzeste“ Route zu wählen, zum Teil auch die Wahl einer „ökologischen“ Route an. Die Berechnungen dieser ökologischen Routen beruhen jedoch auf statischen Streckenattributen wie Steigung oder Straßenklasse und berücksichtigen zudem nicht die Antriebsart eines Fahrzeugs. Die in diesem Teilprojekt neu entwickelte Methode ermöglicht es dagegen, im Live-Betrieb eine energieeffiziente Route je nach Antriebsart und auf Basis von Floating-Car-Daten zu berechnen.

Die Arbeitsgruppe Physik von Transport und Verkehr der Universität Duisburg-Essen arbeitet seit über 15 Jahren an der Modellierung und Simulation von Verkehr und dem Einfluss menschlichen Verhaltens auf die Verkehrsdynamik. So entwickelte und betrieb sie bis Ende 2015 das offizielle Internet-Portal des Landes NRW zur Verkehrslage auf den Autobahnen in NRW (www.autobahn.nrw.de), hinter der eine große Online-Simulation steht [1]. In

detaillierten Studien wurde insbesondere auch der Einfluss von Verkehrsinformationen auf das Fahrerverhalten untersucht, z.B. in [2].

Der Zusammenhang von Routenwahl und Fahrerverhalten mit Verbrauch und Emissionen ist in den letzten Jahren in einigen Arbeiten [3-11] untersucht worden. Der wissenschaftliche und technische Stand in der Forschung des innerstädtischen Verkehrs an Lichtsignalanlagen wird exemplarisch durch die Arbeiten [12-17] wiedergegeben. Demzufolge wird übersättigter Verkehr an einer Lichtsignalanlage als Folge von Warteschlangen aufgefasst, die sich stromaufwärts fortbewegen („Moving Queues“) und in denen Fahrzeuge anhalten. Dieser Vorstellung liegen Methoden der Verkehrssteuerung etwa bei der Berechnung von Zeitverlusten an übersättigten Lichtsignalanlagen, zugrunde.

Entscheidende Voraussetzung für die Arbeit im Projekt war die Drei-Phasen-Verkehrstheorie von Prof. Kerner. Diese Theorie ist umfänglich in den Büchern „The Physics of Traffic“ [18] und „Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control“ [19] beschrieben.

Vor Projektbeginn war von Prof. Kerner die Existenz des Synchronisierten Verkehrs für den städtischen Verkehr vorausgesagt worden [20]. Nach Kenntnis der Antragsteller gab es jedoch zu diesem Zeitpunkt weder einen empirischen Nachweis dieses Verkehrsmusters im städtischen Verkehr, noch gab es Veröffentlichungen über eine gelungene Reproduktion des Synchronisierten Verkehrs in Simulationen.

1.5. Zusammenarbeit mit Partnern

Die Universität Duisburg-Essen hat in diesem Projekt mit den Projektpartnern Daimler AG, TomTom Development Germany GmbH, der GEVAS software GmbH, der Landeshauptstadt Düsseldorf und der Heusch-Boesefeldt GmbH zusammengearbeitet.

Die Entwicklung der Methode zur Berechnung von energieeffizienten Routen im Live-Betrieb erfolgte in ständiger Absprache mit den Projektpartnern.

Von der Stadt Düsseldorf wurden LSA-Lage- und Schaltpläne zur Verfügung gestellt sowie Informationen zu Streckenlayouts (z.B. Anzahl Spuren einer Strecke). Dazu kommen Detektorpositionen und Verkehrsdaten dieser Detektoren. Für den Datenaustausch mit der Stadt Düsseldorf wurde unter anderem auch der MDM (Mobilitäts Daten Marktplatz) genutzt.

Von TomTom wurden anonymisierte GPS-Daten von Navigationsgeräten für die empirische Untersuchung und Simulation des übersättigten innerstädtischen Verkehrs zur Verfügung gestellt. Diese Untersuchung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Daimler AG.

Von der Universität Duisburg-Essen wurden der Daimler AG die Ergebnisse der mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen zur Berechnung des Energieverbrauchs zur Verfügung gestellt sowie die neue Kenngröße „Kumulierte Beschleunigung“. Bei der statistischen Untersuchung der Auswirkung von übersättigtem Verkehr auf die Energieeffizienz von Fahrzeugen arbeitete die Universität Duisburg-Essen ebenfalls mit der Daimler AG zusammen.

Das Ergebnis dieser Untersuchung wurde von der Daimler AG in Form makroskopischer Energiematrizen an TomTom und GEVAS software zur Implementierung in einer Online-Anwendung des Verkehrsmanagements weitergereicht. Diese Online-Anwendung wurde in der Landeshauptstadt Düsseldorf getestet.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Entwicklung einer neuen Methode, um den Energieverbrauch von Fahrzeugen in Städten in Abhängigkeit von ihrer Antriebsart (Benziner, Elektrofahrzeug) zu bestimmen, war das Ziel der Arbeiten, an denen die Universität Duisburg-Essen beteiligt war. Entscheidend für die Berechnung des Energieverbrauchs sind Stärke und Häufigkeit der Beschleunigungsvorgänge eines Fahrzeugs. Der momentanen Beschleunigung könnte zusammen mit der momentanen Fahrzeuggeschwindigkeit in einer mikroskopischen Verbrauchsmatrix ein Verbrauchswert pro Zeiteinheit (typischerweise eine Sekunde) zugeordnet werden. Mit heutigen technischen Mitteln gibt es aber keine Möglichkeit, ausreichend präzise Beschleunigungswerte zu gewinnen, um damit den Verbrauch aus einer mikroskopischen Verbrauchsmatrix zu bestimmen, weil typische Floating-Car-Daten nur alle 5 oder 10 Sekunden eine neue Positionsangabe liefern und die Beschleunigung gar nicht direkt erfasst wird.

Es musste daher ein anderer Weg gewählt werden, die mikroskopische Verbrauchsmatrix mit den GPS-Daten zu verknüpfen. Die im Teilprojekt Regionales Netz (RN) entwickelte Methode basiert auf der Kombination einer empirisch ermittelten mikroskopischen Verbrauchsmatrix mit mikroskopischen Verkehrssimulationen zu einer makroskopischen Verbrauchsmatrix.

Diese Simulationen waren die Kernaufgabe der Universität Duisburg-Essen. Dafür waren die folgenden Arbeiten notwendig:

- Entwicklung einer Simulationsumgebung auf Basis eines stochastischen Kerner-Klenov-Modells
- Import von Infrastrukturdaten der Teststrecken in Düsseldorf, wie Streckenlayout, Schaltpläne von Lichtsignalanlagen
- Analyse von empirischen Daten der Stadt Düsseldorf (Detektoren) und von TomTom (anonymisierte GPS-Daten) gemeinsam mit der Daimler AG
- Mikroskopische Verkehrsflusssimulationen auf Basis der aus den empirischen Daten gewonnenen Erkenntnisse über Zuflüsse und typische auftretende Verkehrsmuster

Die in RN entwickelte Lösung besteht darin, dass eine neue Kenngröße erarbeitet wurde, die direkt aus den Floating-Car-Daten berechnet werden kann: die „Kumulierte Beschleunigung“ [V15]. Diese ist ein makroskopisches Maß für Stärke und Häufigkeit aller Beschleunigungsvorgänge eines Fahrzeugs entlang der Strecke. Die Kumulierte Beschleunigung erhält man, wenn man alle positiven Geschwindigkeitsdifferenzen entlang der Wegstrecke addiert. Daher steigt ihr Wert sowohl mit der Häufigkeit der Beschleunigungsvorgänge als auch mit ihrer Stärke. Zusammen mit dem ebenfalls makroskopischen Maß der mittleren Fahrzeug-Geschwindigkeit bildet sie ein eindeutiges und typisches Merkmal einer Verkehrssituation.

Für die Entwicklung der Methodik zur Berechnung energieeffizienter Routen waren daher die folgenden Arbeiten notwendig:

- Entwicklung einer Klassifizierung von Fahrzeugprofilen (empirisch und simuliert) mit der Daimler AG

- Entwicklung und Einführung der neuen Kenngröße „Kumulierte Beschleunigung“
- Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf beliebige innerstädtische Straßen

Im Live-Betrieb soll einem Wertepaar aus mittlerer Geschwindigkeit und Kumulierter Beschleunigung schnell eine typische Kennzahl für den Verbrauch zugeordnet werden können, um so energieeffiziente Routen zu ermitteln. Statt der mikroskopischen Verbrauchsmatrix, die als Eingangsgrößen die momentane Geschwindigkeit und die momentane Beschleunigung benötigt, wurde von der Daimler AG eine neue makroskopische Verbrauchsmatrix ermittelt, die den Eingangsgrößen mittlere Geschwindigkeit und Kumulierter Beschleunigung einen typischen Verbrauchskennwert zuweist [V27]. Diese Werte können im Live-Betrieb auf GPS-Daten ermittelt werden, so dass für jeden Streckenabschnitt der aktuelle Energieverbrauch nach Antriebsart ermittelt werden kann. Darauf kann ein Navigationsdienstleister wie TomTom die energieeffizienteste Route für die jeweilige Antriebsart bestimmen [V26].

Für die Berechnung der makroskopischen Verbrauchsmatrix stehen nicht genügend Floating-Car-Daten zur Verfügung, um die typischen Wertepaare aus mittlerer Geschwindigkeit und Kumulierter Beschleunigung für verschiedene Verkehrssituationen zu ermitteln. Eine erheblich größere Datenbasis für die Berechnung der charakteristischen Werte eines Verkehrsmusters kann aber durch Verkehrsflusssimulationen geschaffen werden. Daher wurden insgesamt über 400.000 Fahrtprofile von Einzelfahrzeugen in verschiedensten Verkehrssituationen von freier Fahrt bis hin zu sehr stark gestautem Verkehr simuliert und ausgewertet. Dabei wurde großer Wert auf eine realistische Simulation der Fahrweisen, insbesondere des Synchronisierten Verkehrs, gelegt.

Empirische Untersuchungen

Für ausgewählte Streckenabschnitte wurde zunächst von der Daimler AG mit Daten eines stationären Detektors sowie mit anonymisierten GPS-Einzelfahrzeugdaten der TomTom AG die reale Verkehrssituation auf typische zeitlich-räumliche Verkehrsmuster untersucht [V23,V31]. Abbildung 1 zeigt eine Skizze des 630 m langen Abschnitts der Völklinger Straße in Düsseldorf in Fahrtrichtung vom Südring zur Fährstraße. Der Abschnitt hat am Ende eine Lichtsignalanlage (LSA) und am Anfang einen stationären Detektor.

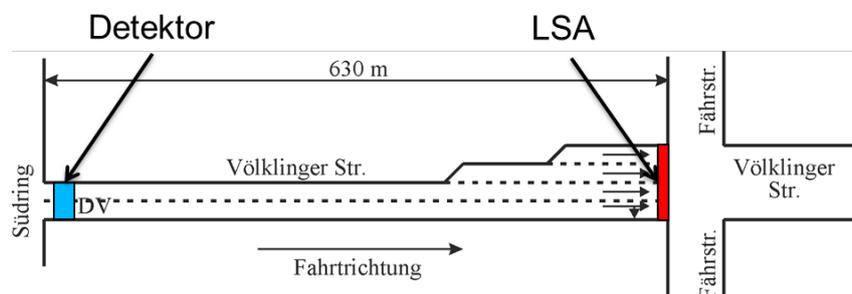


Abbildung 1 Skizze des betrachteten Streckenabschnitts „Völklinger Straße“ in Düsseldorf mit Position der Lichtsignalanlage und des Detektors

An innerstädtischen Straßen mit LSA ist ein Verkehrszusammenbruch ein Übergang vom untersättigten zum übersättigten Verkehr. Bei der Analyse der Daten wurden als zeitlich-räumliche Verkehrsmuster des übersättigten Verkehrs neben den klassischen „Moving Queues“ und „Mega Queues“ auch der Synchronisierte Verkehr der Kerner'schen Drei-Phasen-Verkehrstheorie empirisch nachgewiesen [V23]. Die Moving Queues sind ein aus klassischen Verkehrstheorien bekanntes Verkehrsmuster, das aus Folgen von Warteschlangen vor einer LSA besteht, die sich stromaufwärts bewegen. Ein Fahrzeug, das dieses Muster durchfährt, beschleunigt aus dem Stand vom Ende einer Warteschlange heraus bis es die nächste Warteschlange stromabwärts erreicht, in der es erneut stehen bleiben muss. Dies führt zu einem Stop-and-Go-Verhalten. Im Synchronisierten Verkehr dagegen kommt ein Fahrzeug in der Regel nur einmal kurz vor der LSA zum Stehen, während es im übrigen Teil der Strecke mit einer Geschwindigkeit fährt, die sich deutlich unterhalb der Freiflussgeschwindigkeit bewegt. In einer Mega Queue sind für ein Fahrzeug die zeitliche Abfolge von Stillstand und langsamem Fahren zufällig, es gibt keine einzelnen Warteschlangen.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch aus GPS-Daten ermittelte Geschwindigkeitsprofile von Einzelfahrzeugen in verschiedenen Situationen des übersättigten Verkehrs auf der Teststrecke. In Abbildung 2 (a) und (b) fährt das Fahrzeug nacheinander durch eine Reihe von Warteschlangen. Es beschleunigt aus einer Warteschlange heraus bis zu einer Geschwindigkeit, die deutlich unter der Freifluss-Geschwindigkeit liegt, und muss dann wieder abbremsen, weil es die nächste Warteschlange flussabwärts erreicht. Dieses Verhalten wiederholt sich mehrfach entlang der Fahrt. In Abbildung 2 (c) und (d) dagegen fährt das Fahrzeug im ersten Teil der Strecke durchgehend mit geringer Geschwindigkeit ohne zum Halten zu kommen. Nur im letzten Teil der Strecke muss es anhalten. Der Teil, in dem das Fahrzeug langsam ohne Anhalt fährt ist ein typisches Beispiel für den Synchronisierten Verkehr. In Abbildung 2 (e) schließlich fährt das Fahrzeug durch eine Mega-Queue, es kommt nur sehr langsam voran, weil es durch die sehr hohe Fahrzeugdichte immer nur kurze, langsame Fahrten zwischen seinen Anhalten durchführen kann. Für weitere Details zur empirischen Untersuchung des städtischen Verkehrs siehe den Abschlussbericht der Daimler AG.

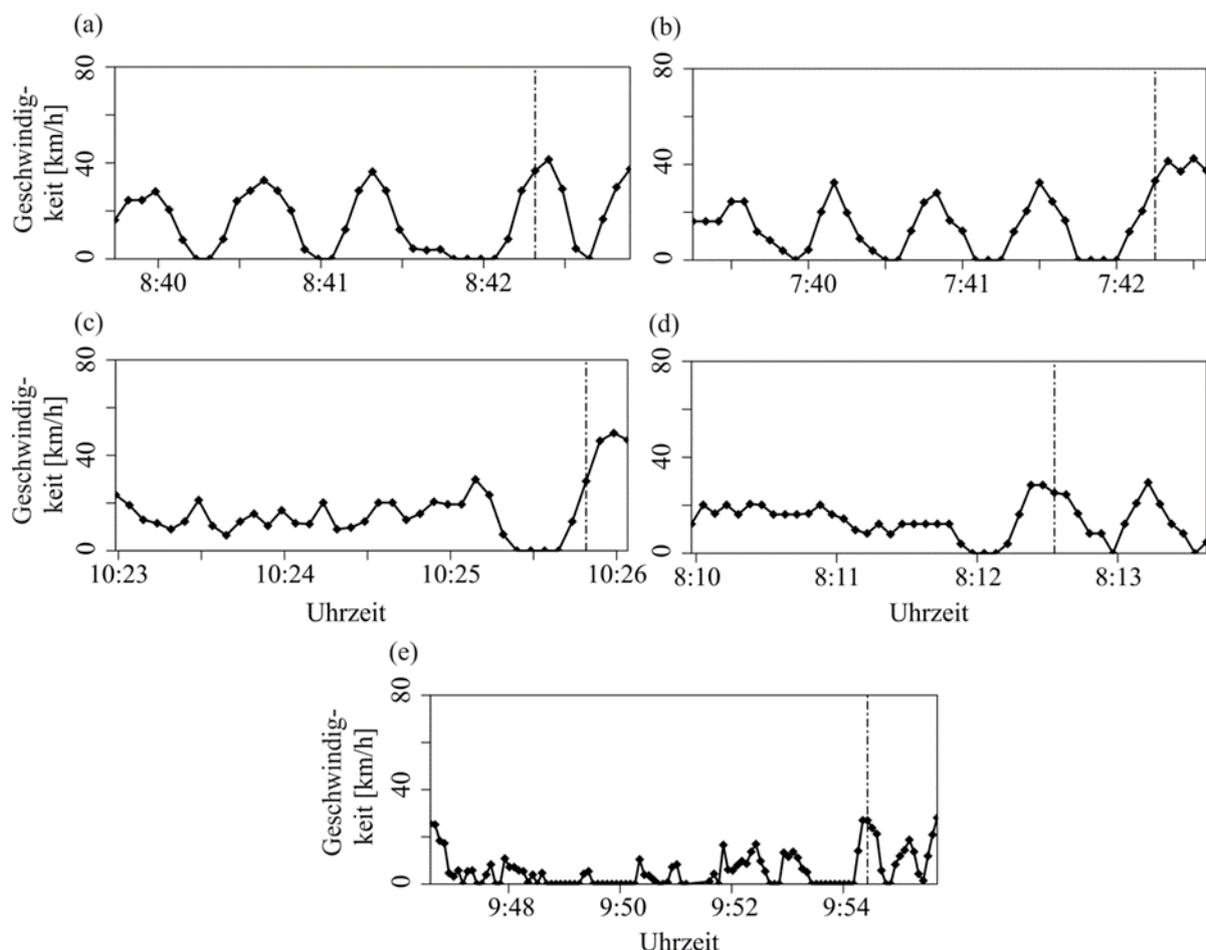


Abbildung 2 Beispiele empirischer Geschwindigkeitsverläufe des innerstädtischen übersättigten Verkehrs, abgeleitet aus GPS-Daten: (a) und (b) Moving Queues, (c) und (d) Synchronisierter Verkehr, (e) Mega-Queue. Die gestrichelte Linie markiert jeweils den Zeitpunkt, zu dem das Fahrzeug die Position der LSA passiert. Quelle: Daimler AG.

Simulationen von übersättigtem Verkehr

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen zeitlich-räumlichen Verkehrsmuster wurden in mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen mit einem stochastischen Kerner-Klenov-Modell [20,21] reproduziert. Für diese Simulationen des urbanen Verkehrs wurden Teile des Straßennetzes der Stadt Düsseldorf in die Simulation überführt, als Quelle dienten sowohl Lagepläne der Stadt Düsseldorf als auch Daten von OpenStreetMap [22], ergänzt um Vor-Ort-Kenntnisse. Die übernommenen geografischen Informationen umfassen Lage, Form und Länge der Streckenabschnitte sowie Anzahl der Fahrspuren und Position von Lichtsignalanlagen. Weiterhin wurden zusätzliche streckenbezogene Informationen wie Tempolimits, Vorfahrtsregeln und Schaltphasen von Lichtsignalanlagen importiert, für die LSA-Phasen wurden Pläne der Stadt Düsseldorf ausgewertet. Die aus OpenStreetMap importierten Daten haben sich hierbei als hinreichend präzise sowie als leicht zugänglich und verfügbar erwiesen. Dennoch wurden die Daten manuell abgeglichen, entweder mit Plänen der Stadt Düsseldorf oder (insbesondere für die Hauptteststrecke „Völklinger Straße“) auch durch Inaugenscheinnahme vor Ort. Die Fahrzeuge der Simulation sind indiziert und die exakte (spurgenaue) Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung jedes Fahrzeugs wurde zu jedem

Zeitpunkt der Simulation erfasst. Die zeitliche Auflösung der Simulationen beträgt eine Sekunde, die räumliche Auflösung beträgt $dx = 0,01$ m.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch simulierte Einzelfahrzeugtrajektorien für die Teststrecke der Völklinger Straße: oben das Geschwindigkeitsprofil eines einzelnen Fahrzeugs, unten in blau die zugehörige Raum-Zeit-Trajektorie desselben Fahrzeugs, gemeinsam mit den Trajektorien einiger weiterer Fahrzeuge.

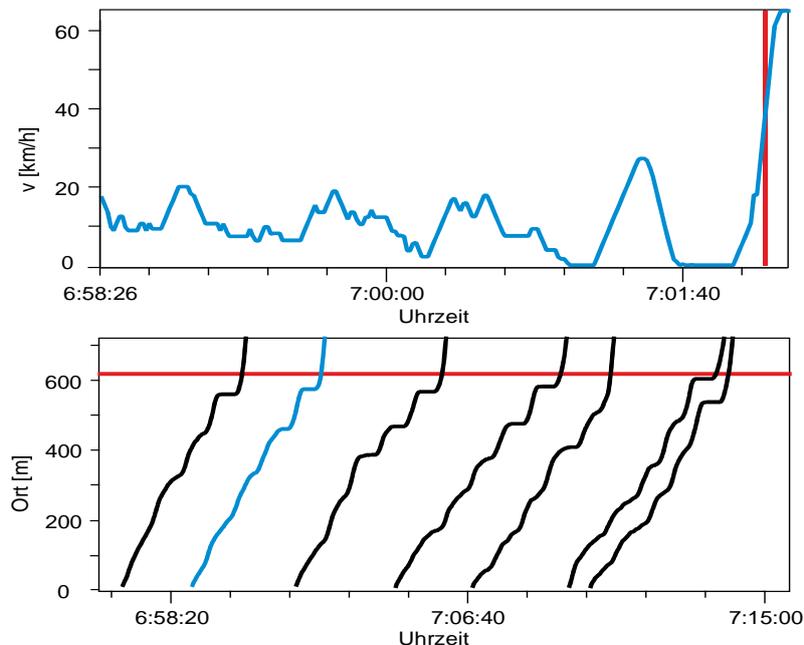


Abbildung 3 Oben: Simuliertes Geschwindigkeitsprofil eines einzelnen Fahrzeugs im Synchronisierten Verkehr; unten: Raum-Zeit-Trajektorien einiger zufällig ausgewählter Fahrzeuge, darunter die Trajektorie zum obigen Geschwindigkeitsprofil (blau). Die rote Linie zeigt den Zeitpunkt des Überfahrens bzw. die Position der LSA an.

Der Synchronisierte Verkehr spielt eine entscheidende Rolle beim Zusammenbruch des Straßenverkehrs an einer Lichtsignalanlage und beim übersättigten Verkehr an einer LSA. Um reale Verkehrszustände zu simulieren ist es entscheidend, das Verkehrsmuster des Synchronisierten Verkehrs in den mikroskopischen Simulationen zu reproduzieren, um so realistische Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile von Einzelfahrzeugen zu erhalten. Im Gegensatz zu klassischen Simulationsmodellen [12-17], die nicht in der Lage sind, Synchronisierten Verkehr zu simulieren, haben wir ein stochastisches Kerner-Klenov-Modell [20,21] verwendet, um den städtischen Verkehr zu simulieren. Das Modell wurde anhand empirischer Daten von TomTom für den städtischen Verkehr validiert.

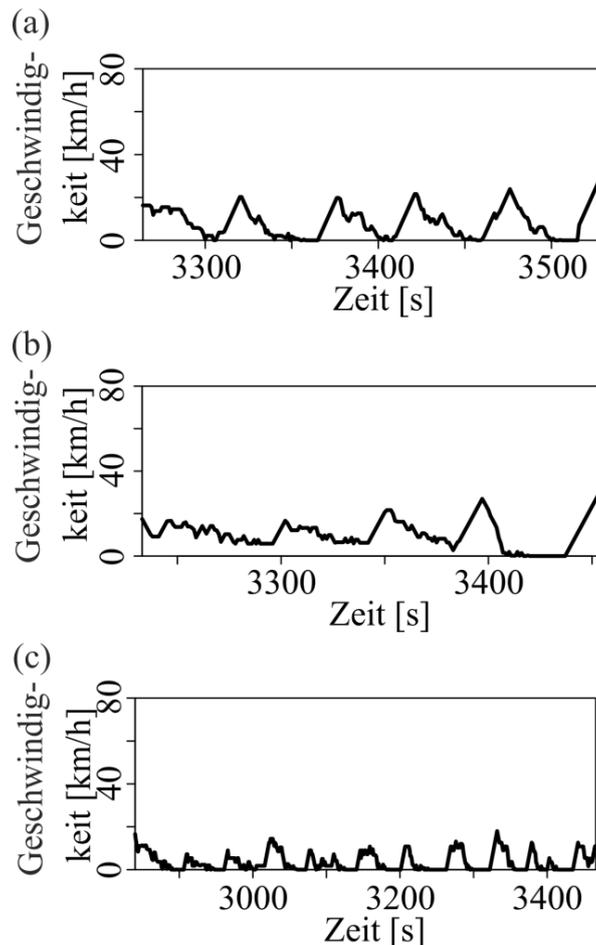


Abbildung 4 Geschwindigkeitsprofile zu simulierten Fahrten im übersättigten innerstädtischen Verkehr: (a) klassische Moving Queues, (b) Synchronisierter Verkehr, (c) Mega Queue.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch simulierte Geschwindigkeitsprofile von Einzelfahrzeugen in verschiedenen Situationen des übersättigten Verkehrs, entsprechend den im vorigen Abschnitt beschriebenen typischen Verkehrsmustern: in Abbildung 4 (a) fährt das Fahrzeug durch Moving Queues, in Abbildung 4 (b) fährt das Fahrzeug im ersten Teil der Strecke im Synchronisierten Verkehr und in Abbildung 4 (c) schließlich fährt das Fahrzeug durch eine Mega-Queue. Es ist damit gezeigt, dass die mikroskopische Verkehrssimulation mit dem stochastischen Kerner-Klenov-Modell alle empirisch gefundenen Muster des übersättigten Verkehrs (siehe Abbildung 2) reproduzieren kann, insbesondere den Synchronisierten Verkehr.

Somit ist gewährleistet, dass die Simulationen realistische Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile für den innerstädtischen Verkehr als Grundlage für die Erstellung der Verbrauchsmatrizen erzeugen können. Abbildung 5 zeigt exemplarisch eine Gegenüberstellung eines Geschwindigkeitsprofils im Synchronisierten Verkehr (a) aus empirischen Daten, (b) aus der mikroskopischen Verkehrssimulation und (c) das zum simulierte Profil gehörende Beschleunigungsprofil.

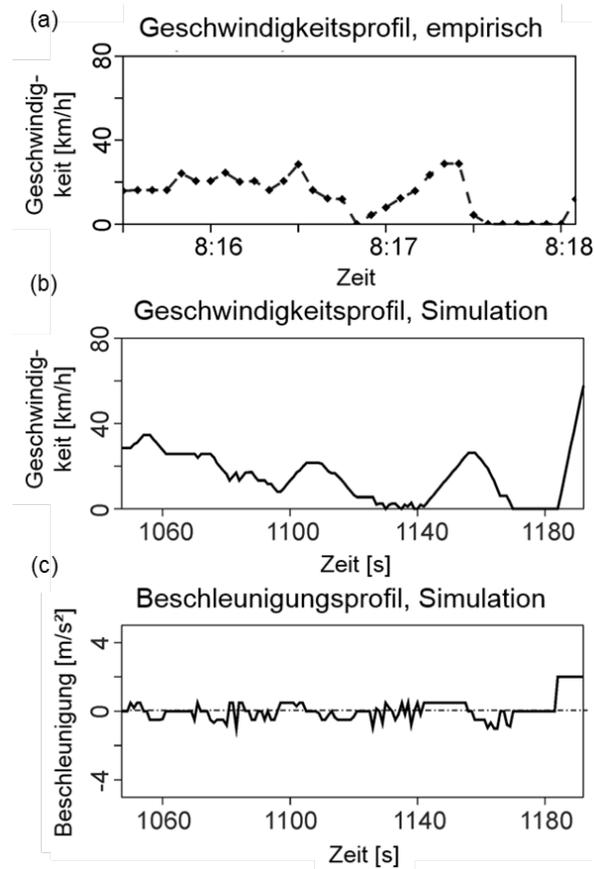


Abbildung 5 Vergleich eines Geschwindigkeitsprofils eines Fahrzeugs im Synchronisierten Verkehrs aus empirischen Daten (a) und der Simulation (b); (c): zugehöriges Beschleunigungsprofil des simulierten Fahrzeugs

Abbildung 6 zeigt exemplarisch für die Völklinger Straße eine Gegenüberstellung von Simulationen mit Zuflüssen von realen Detektordaten in unterschiedlichen Verkehrssituationen: Moving Queues (links) und Synchronisierter Verkehr (rechts) sowie Einzelfahrzeugtrajektorien und Geschwindigkeitsprofile aus diesen Simulationen.

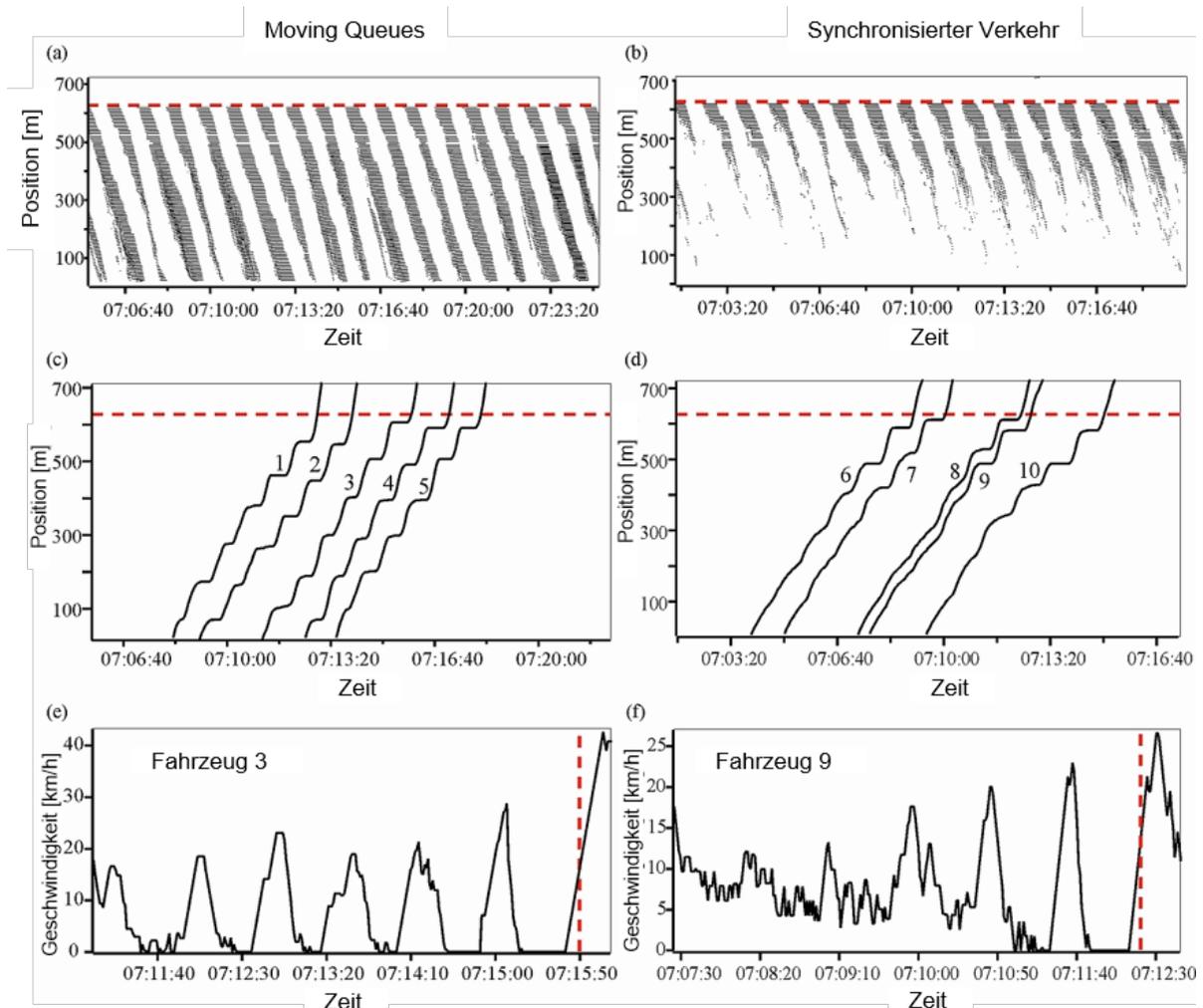


Abbildung 6 Mikroskopische Verkehrsflussimulation: Moving Queues (links) und Synchronisierter Verkehr (rechts). (a) und (b): Fragmente von Fahrzeugtrajektorien für Geschwindigkeiten unter $v=0,5$ m/s; (c) und (d) Einzelfahrzeugtrajektorien aus (a) und (b); (e) und (f): Geschwindigkeitsprofile der Fahrzeuge 3 und 9 aus (c) und (d). Aus: [V28] (übersetzt).

Anwendbarkeit der makroskopischen Matrizen auf das gesamte Düsseldorfer Straßennetz

Simulationen des Verkehrs auf verschiedenen einspurigen, zweispurigen und dreispurigen Stadtstraßen mit verschiedenen Längen und Verläufen, die die Universität Duisburg-Essen durchgeführt hat, haben gezeigt, dass die Muster des übersättigten Verkehrs in allen Fällen gleich sind. Wie in anonymisierten GPS-Daten von TomTom, die auf verschiedenen Straßen in der Stadt Düsseldorf gemessen wurden, bestehen diese Verkehrsmuster, die durch einen Geschwindigkeitszusammenbruch zustande kommen, aus synchronisiertem Verkehr, klassischen „Moving Queues“, oder einer Mischung des synchronisierten Verkehrs und klassischen „Moving Queues“. Falls ein Geschwindigkeits- und Verkehrsflusszusammenbruch geschieht, wie in empirischen Daten nachweisbar, zeigen die Simulationen sogenannte „Mega-Jam“-Muster. Fazit zu den Simulationen:

- a) Simulationen können verlässlich alle TomTom-Daten und alle anderen bekannten empirischen Daten simulieren.

- b) Die Ergebnisse der Simulationen, die wir in Projektsitzungen am Beispiel der Völklinger Straße gezeigt haben, sind völlig und ohne Einschränkung übertragbar auf alle Stadtstraßen der Stadt Düsseldorf.

Einfluss des Fahrerverhaltens im Modell

Das für die Verkehrsflusssimulationen verwendete Kerner-Klenov-Modell ist ein Modell auf stochastischer Basis, d.h. es bildet das Fahrerverhalten nicht direkt ab, sondern über physikalische Parameter. Das Verhalten einzelner Fahrzeuge folgt dabei statistischen Vorgaben, die dann jedoch im Mittel zur Reproduktion der typischen Verkehrsmuster führen.

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes haben gezeigt, dass der Effekt der Geschwindigkeitsanpassung eine entscheidende Rolle für das Verständnis der Simulation des Synchronisierten Verkehrs spielt. In klassischen Simulationsmodellen wird in der Regel ein schnelleres Fahrzeug, das auf einen Vordermann aufläuft und diesen nicht überholen kann, auf dessen Geschwindigkeit abbremsen und ihm dann in einem mittleren Abstand folgen, der in etwa dem Sicherheitsabstand entspricht. Diese Art des Hinterherfahrens führt in den klassischen Modellen zu den Moving Queues, es kann jedoch kein Synchronisierter Verkehr simuliert werden. Dagegen passt sich im Kerner-Klenov-Modell zwar das nachfolgende Fahrzeug ebenfalls der Geschwindigkeit des Vordermanns an, es kann dies jedoch in jedem beliebigen Abstand innerhalb eines gewissen Bereichs tun. Dies wird realisiert durch unterschiedlich schnelles Angleichen der Geschwindigkeit an den Vordermann. Dabei führt eine späte Geschwindigkeitsanpassung zu einem kleineren und eine frühzeitige Geschwindigkeitsanpassung zu einem größeren Abstand zum Vordermann. Abbildung 7 zeigt diesen Sachverhalt.

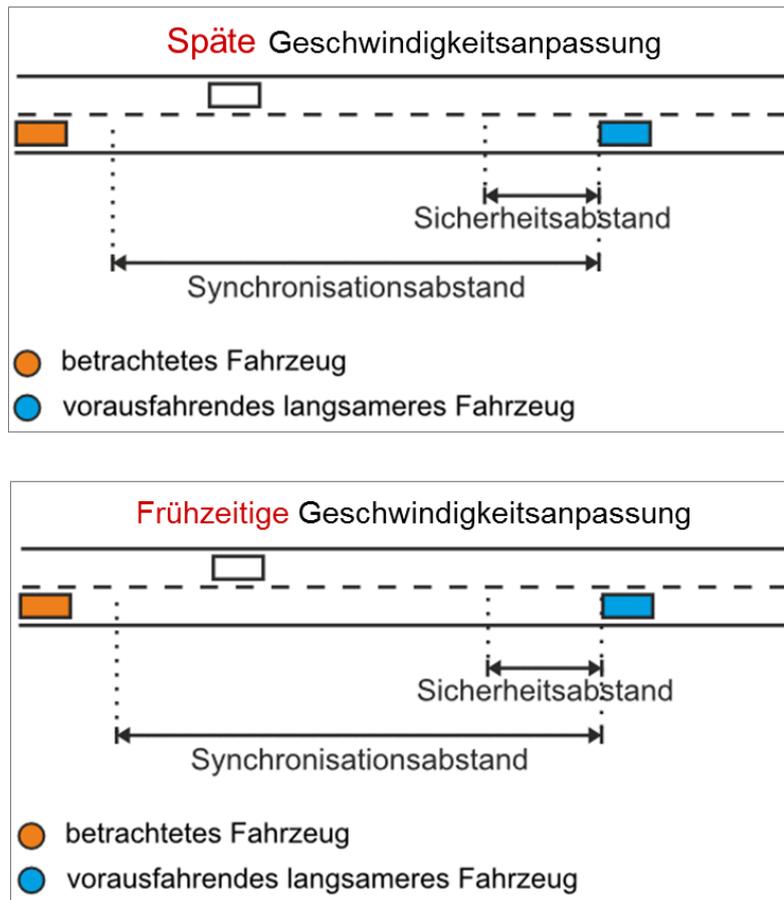


Abbildung 7 Erklärung des Effekts der Geschwindigkeitsanpassung

Durch die Wahl der Stärke dieses Effekts, angegeben mit dem Parameter ϵ [V7], kann die Entstehung unterschiedlicher Verkehrsmuster in der Simulation erzielt werden. Die folgenden Abbildungen zeigen, wie in Simulationen mit unterschiedlichen Werten für die Geschwindigkeitsanpassung jeweils übersättigter städtischer Verkehr an einer LSA entsteht, aber mit unterschiedlichen Verkehrsmustern. Während der simulierten Zeit von zwei Stunden wandert das stromaufwärtige Ende des gestauten Bereichs immer weiter von der LSA weg. Der Grund hierfür ist, dass die vor der LSA wartenden Fahrzeuge diese nicht alle in derselben Grünphase passieren können. Für den Fall der späten Geschwindigkeitsanpassung ($\epsilon = 0$, Abbildungen 8 und 9) besteht der gestaute Bereich aus den klassischen Warteschlangen. Die Standdauer der Fahrzeuge innerhalb der einzelnen Warteschlangen ist im Mittel nahezu konstant, wie in Abbildung 8 (b) zu sehen. Diese Abbildung zeigt für den in Abbildung 8 (a) rot umrandeten Bereich die Trajektorien der einzelnen Fahrzeuge auf der rechten Spur. Hervorgehoben sind zwei Fahrzeuge 1 und 2, welche dieselbe Grünphase der LSA als erstes bzw. als letztes Fahrzeug passieren. Diese beiden Fahrzeuge passieren die LSA auf der rechten Spur, sind jedoch spurunabhängig eingezeichnet, um den Vergleich mit den mikroskopischen Geschwindigkeitsprofilen der beiden Fahrzeuge in Abbildung 9 zu ermöglichen.

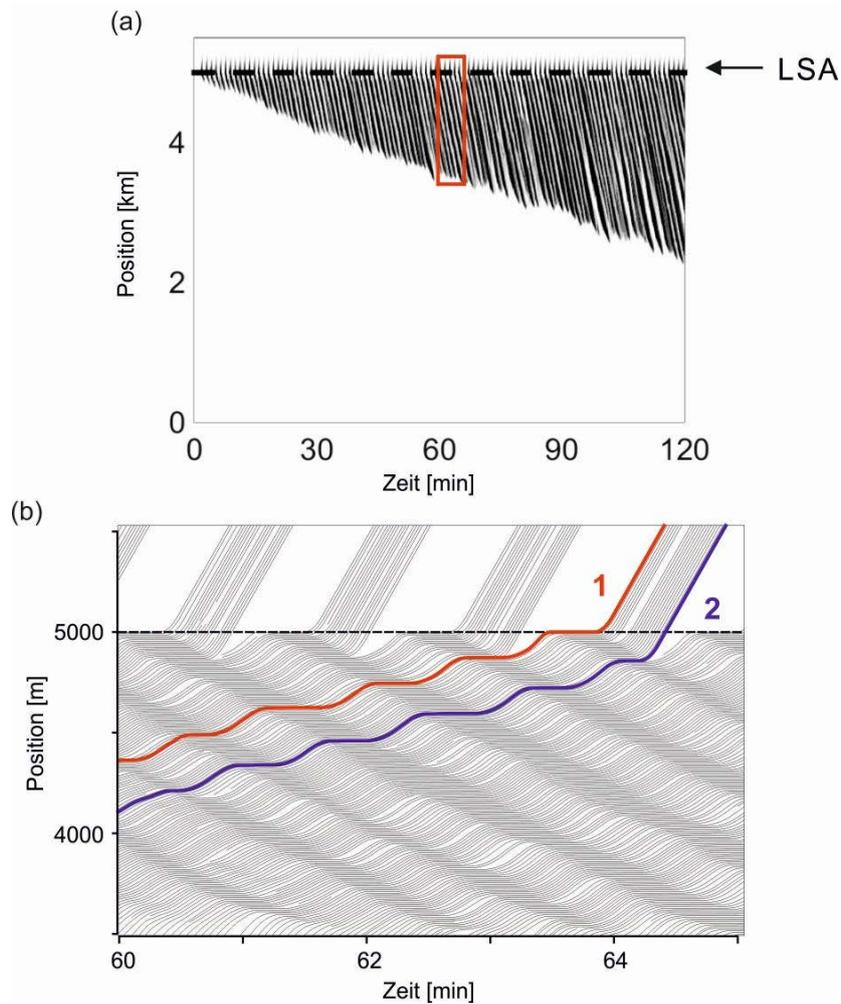


Abbildung 8 Simulation mit später Geschwindigkeitsanpassung ($\epsilon = 0$). (a) Geschwindigkeiten der Fahrzeuge in der Raum-Zeit-Ebene als Grauskalen-Plot: In den weißen Bereichen ist die Geschwindigkeit größer als 30 km/h, in den schwarzen Bereichen ist sie Null. (b) Einzelfahrzeug-Trajektorien der rechten Spur stromaufwärts der LSA in der Raum-Zeit-Ebene für den in (a) rot umrandeten Ausschnitt; erstes (rot) und letztes (blau) Fahrzeug, das die LSA in einem Umlauf passiert. Die gestrichelten Linien geben die Position der LSA an; die Trajektorien 1 und 2 sind spurunabhängig. Zufluss $q_{in} = 948$ Fz./h/Spur, Umlaufzeit der LSA $\vartheta = 70$ s, Rotzeit $T_R = 35$ s, Gelbzeit $T_Y = 4$ s.

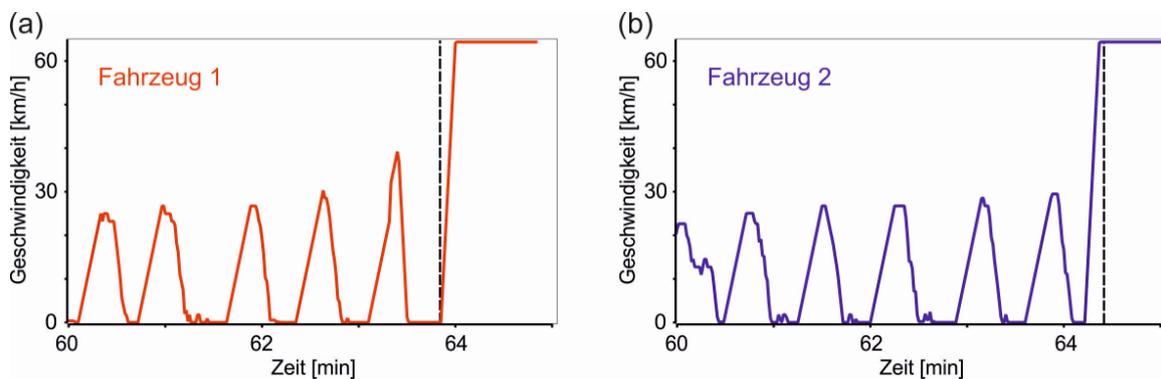


Abbildung 9 Mikroskopische Geschwindigkeitsprofile der in Abbildung 8 mit 1 (a) und 2 (b) gekennzeichneten Fahrzeuge. Die gestrichelten Linien geben den Zeitpunkt an, zu dem die Fahrzeuge die Position der LSA passieren.

Mögliche Spurwechsel der Fahrzeuge sind im Mittel zu vernachlässigen, da sich die untersuchten Verkehrsmuster auf beide Spuren erstrecken. Fahrzeug 1 muss bei Erreichen der stromaufwärtigen Front des gestauten Bereichs abbremsen bis zum Stillstand. Nach einigen Sekunden, wenn sein Vordermann aus der Warteschlange heraus beschleunigt, kann auch der Fahrer von Fahrzeug 1 wieder beschleunigen. Er fährt nun bis zum Erreichen der nächsten Warteschlange stromabwärts, wo er wieder abbremsen und zum Stillstand kommen muss. Dieses Stop-&-Go-Verhalten setzt sich durch mehrere Warteschlangen fort, bis das Fahrzeug schließlich unmittelbar vor der LSA zum Stehen kommt. In der anschließenden Grünphase beschleunigt es bis zur maximal erlaubten Geschwindigkeit. Fahrzeug 2 zeigt das qualitativ gleiche Verhalten.

Ein deutlich anderes Verhalten erhält man bei Verwendung von frühzeitiger Geschwindigkeitsanpassung in der Simulation. Ein Fahrzeug, das unter dem Einfluss der frühzeitigen Geschwindigkeitsanpassung das stromaufwärtige Ende des gestauten Bereichs erreicht, beginnt bereits kurz nach Unterschreiten des Synchronisationsabstands zum langsamer fahrenden Vordermann mit dem Verzögern. Dies ist in den Abbildungen 10 und 11 für den Fall ($\epsilon = 1,33$) gezeigt. Die Fahrzeuge 1 und 2 durchfahren den ersten Teil des gestauten Verkehrs mit einer zwar relativ langsamen Geschwindigkeit von 10 km/h bis 20 km/h, kommen dabei aber nicht zum Stehen. Erst kurz vor der LSA müssen sie einmal (Fahrzeug 2) bzw. zweimal (Fahrzeug 1) stehen bleiben und warten. Das Fahrverhalten unterscheidet sich also deutlich zwischen den beiden Teilen der Fahrt. Während auf dem letzten Abschnitt vor der LSA wieder die klassischen Warteschlangen vorherrschen, fehlen diese auf dem ersten Abschnitt ganz. In Abbildung 10 (b) sieht man, dass die Warteschlangen nur ein paar Hundert Meter stromaufwärts der LSA reichen und sie sich dann auflösen. Die mittlere Standzeit der Fahrzeuge in den Warteschlangen nimmt dabei mit zunehmender Entfernung von der LSA ab. Das Fahrerverhalten auf dem ersten Teilstück mit langsamem Fahren ohne Anhalten ist charakteristisch für den Synchronisierten Verkehr.

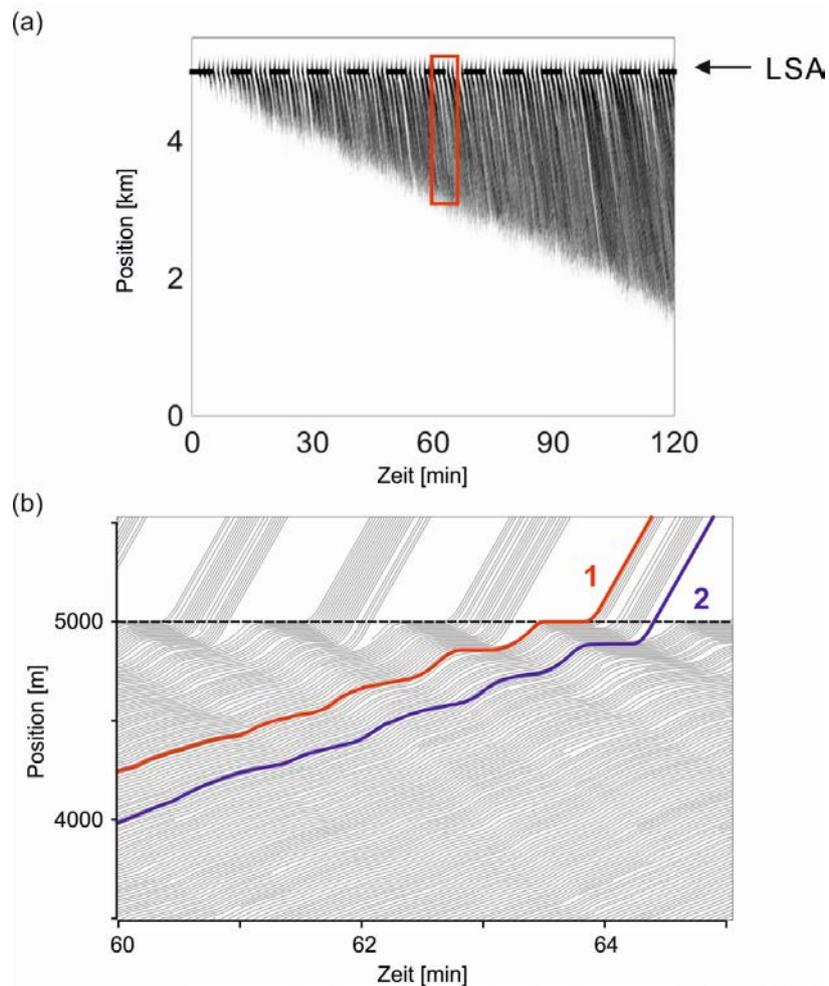


Abbildung 10 Simulation mit frühzeitiger Geschwindigkeitsanpassung ($\varepsilon = 1,33$). Übrige Angaben wie in Abbildung 8.

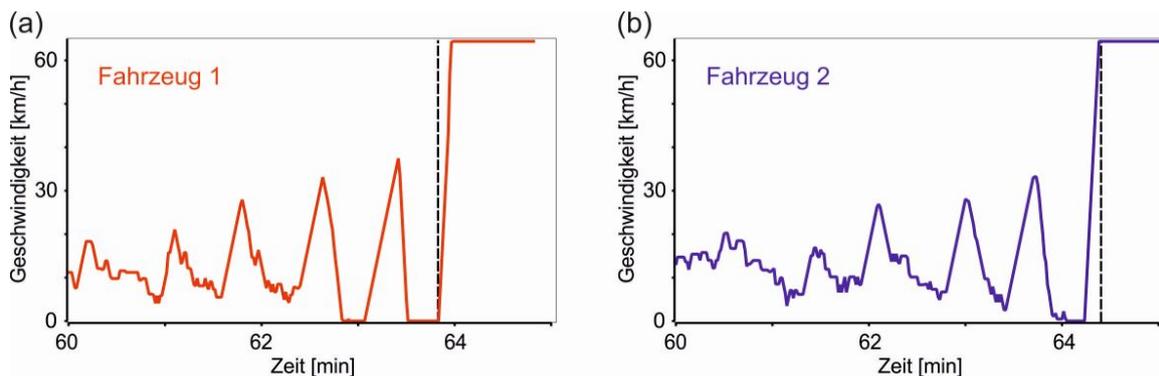


Abbildung 11 Mikroskopische Geschwindigkeitsprofile der in Abbildung 10 mit 1 (a) und 2 (b) gekennzeichneten Fahrzeuge. Die gestrichelten Linien geben den Zeitpunkt an, zu dem die Fahrzeuge die Position der LSA passieren.

Kumulierte Beschleunigung

Entscheidend für die Berechnung des Energieverbrauchs sind Stärke und Häufigkeit der Beschleunigungsvorgänge eines Fahrzeugs. Von der Daimler AG wurde eine empirische

mikroskopische Verbrauchsmatrix bereitgestellt, die jedem Paar aus momentaner Geschwindigkeit und momentane Beschleunigung einen normierten relativen Verbrauchswert zuordnet [V11]. Für Verbrauchsberechnungen werden diese Eingangsdaten entlang Fahrzeugtrajektorien in sekundlicher Auflösung benötigt. Typische Floating-Car-Daten liefern jedoch nur alle 5 oder 10 Sekunden eine neue Positionsangabe, die Beschleunigung wird gar nicht direkt erfasst. Mit heutigen technischen Mitteln gibt es daher keine Möglichkeit, ausreichend präzise Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte zu gewinnen, um damit den Verbrauch aus der mikroskopischen Matrix zu bestimmen (vgl. Abschlussbericht der Daimler AG).

Es musste daher ein anderer Weg gewählt werden, die mikroskopische Verbrauchsmatrix mit den GPS-Daten zu verknüpfen. Die in RN entwickelte Lösung besteht darin, zum einen anstatt der mikroskopischen momentanen Geschwindigkeit die makroskopische Größe der mittleren Geschwindigkeit eines Fahrzeugs entlang einer Strecke zu verwenden und zum anderen eine analoge makroskopische Kenngröße zur mikroskopischen momentanen Beschleunigung zu ermitteln. Diese neu entwickelte Kenngröße, die direkt aus den Floating-Car-Daten berechnet werden kann, ist die Kumulierte Beschleunigung [V15]. Sie ist ein makroskopisches Maß für Stärke und Häufigkeit aller Beschleunigungsvorgänge eines Fahrzeugs entlang der Strecke.

Die Kumulierte Beschleunigung A_j pro Streckenlänge (bezogen auf eine Strecke j eines Straßennetzes) ist eine makroskopische Kenngröße, die von B. Kerner zur Abschätzung des Verbrauchs anhand von GPS-Livedaten aus Navigationsgeräten eingeführt wurde. Sie entspricht der Summe positiver Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen GPS-Messungen entlang einer Fahrzeugtrajektorie, dividiert durch die Länge des Streckenabschnittes. Die Definition der Kumulierten Beschleunigung lautet:

$$A_j = \frac{1}{L_j} \sum_{n=1}^{N-1} (v_{n+1} - v_n) \theta_n ,$$

L_j ist die Länge des Streckenabschnitts mit der Nummer „ j “ (z. B. zwischen zwei Lichtsignalanlagen) eines Straßennetzes; v_n ist die Fahrzeuggeschwindigkeit, die durch das TomTom-Gerät zum Zeitpunkt „ n “ gemessen wurde (siehe Abbildung 12). Die Berechnung der Kumulierten Beschleunigung erfolgt unter Berücksichtigung des Schwellwertes Δv für die Differenz der Geschwindigkeiten zweier aufeinander folgender GPS-Datenpunkte der empirischen Daten. Dieser Schwellwert findet auch Anwendung in den Berechnungen der Kumulierten Beschleunigungen zu den simulierten:

$$\theta_n = \begin{cases} 1, & \text{falls } (v_{n+1} - v_n) \geq \Delta v \\ 0, & \text{falls } (v_{n+1} - v_n) < \Delta v \end{cases} ,$$

mit $\Delta v = 1 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ für 10s-TomTom-Daten und $\Delta v = 0,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ für 1s- und 5s-TomTom-Daten. Die Dimension der Kumulierten Beschleunigung ist $[\text{Zeit}]^{-1}$ und nicht $[\text{Beschleunigung}]$. Bei der Bearbeitung der Aufgabe wurde die Einheit h^{-1} verwendet.

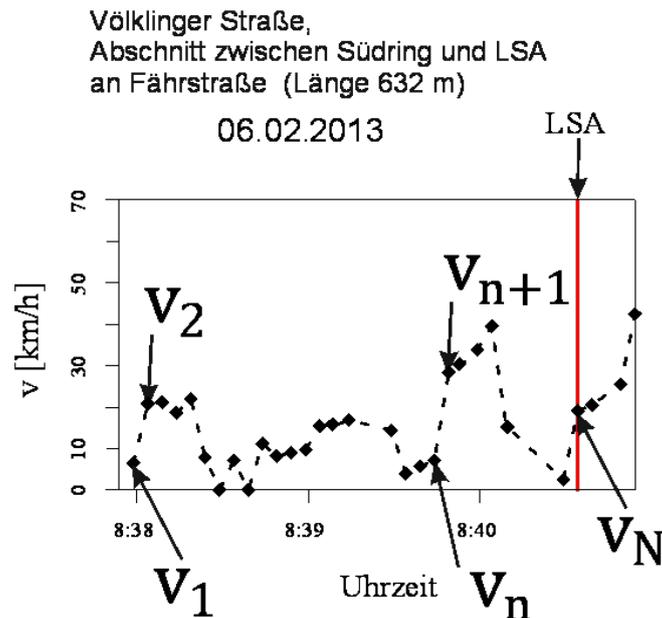


Abbildung 12 Erklärung zur automatischen Berechnung der Kumulierten Beschleunigung A_j eines Fahrzeugs des Streckenabschnitts mit der Nummer „j“ in der TomTom-Zentrale: Geschwindigkeitsverlauf aus anonymisierten GPS-Daten.

Die Kumulierte Beschleunigung erhält man, wenn man alle positiven Geschwindigkeitsdifferenzen entlang der Wegstrecke addiert. Daher steigt ihr Wert sowohl mit der Häufigkeit der Beschleunigungsvorgänge als auch mit ihrer Stärke. So ist z.B. die Kumulierte Beschleunigung typischerweise deutlich größer, wenn ein Fahrzeug in einer Folge von Warteschlangen vor einer LSA (Moving Queues) anhalten und anschließend wieder beschleunigen muss, als wenn es Synchronisierten Verkehr durchfährt [V26]. Zusammen mit dem ebenfalls makroskopischen Maß der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit bildet sie ein eindeutiges und typisches Merkmal einer Verkehrssituation. In Abbildung 13 sind künstliche und idealisierte Geschwindigkeitsprofile für Fahrten auf einer Strecke der Länge 1 km gezeigt. Sie geben einen Eindruck von der Größenordnung der Kumulierten Beschleunigung in einigen Situationen.

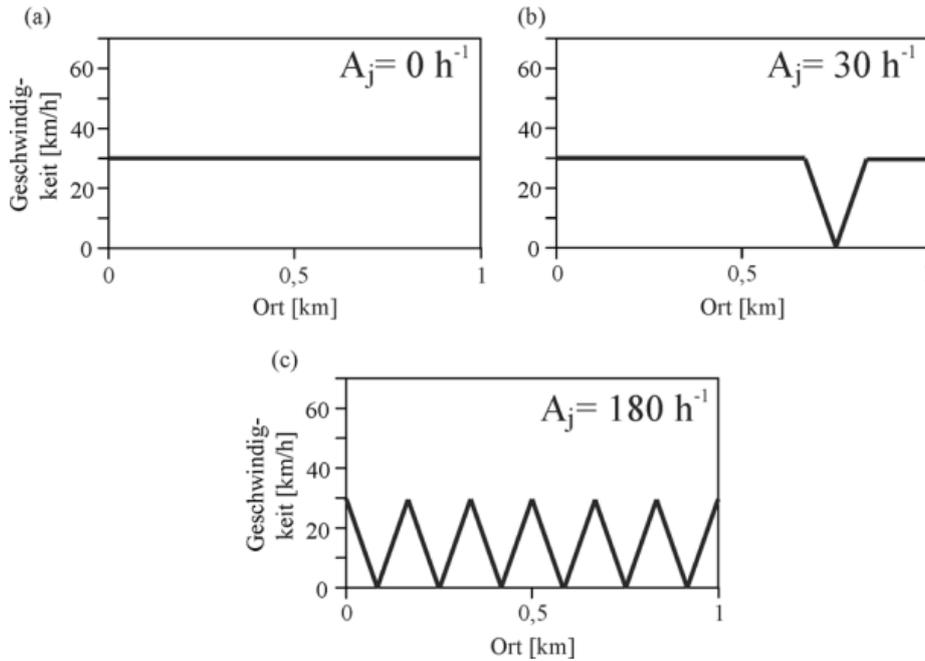


Abbildung 13 Idealisierte Geschwindigkeitsprofile für Fahrten auf einer Strecke der Länge 1 km und resultierende Kumulierte Beschleunigungen A_j [V31]. (a) Fahrt mit zeitunabhängiger Geschwindigkeit. (b) Fahrt mit einem Beschleunigungsvorgang von 0 auf 30 km/h. (c) Fahrt mit 6 Beschleunigungsvorgängen von 0 auf 30 km/h.

Analog zur Kumulierten Beschleunigung wird die Kumulierte Verzögerung definiert, mit der für Elektrofahrzeuge die an der Batterie anfallende Energie (positiv und negativ) ermittelt werden kann. Die Kumulierte Verzögerung D pro Streckenlänge ist ein makroskopisches Maß zur Abbildung der rekuperierten Energie. Analog zur Kumulierten Beschleunigung A pro Streckenlänge ist sie definiert durch die Formel

$$D = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^{N-1} (v_{n+1} - v_n) \theta_n^-,$$

wobei v_n die zum n^{ten} von n Zeitschritten gemessene Geschwindigkeit ist, und

$$\theta_n^- = \begin{cases} 1, & \text{falls } (v_{n+1} - v_n) \leq -\Delta v \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Wir verwenden $\Delta v = 0,5 \text{ km/h}$.

Von der Daimler AG ist die Abhängigkeit der Kumulierten Beschleunigung vom Verkehrsmuster für empirische GPS-Daten untersucht worden [V31]. Im Live-Betrieb soll einem Wertepaar aus mittlerer Geschwindigkeit und Kumulierter Beschleunigung schnell eine typische Kennzahl für den Verbrauch zugeordnet werden können, um so energieeffiziente Routen zu ermitteln. Zu den neuen makroskopischen Eingangsgrößen musste daher auch eine passende makroskopische Verbrauchsmatrix entwickelt werden. Diese wurde von der Daimler AG auf Basis der empirischen mikroskopischen Verbrauchsmatrix und der Auswertung der über 400.000 simulierten Einzelfahrzeug-Trajektorien der Universität Duisburg-Essen

ermittelt. Für diese Trajektorien wurden die Kumulierte Beschleunigung A und die mittlere Geschwindigkeit V bestimmt.

Abbildung 14 zeigt die makroskopische Verbrauchsmatrix. Die Verbrauchswerte zu den simulierten Trajektorien wurden anhand V und A in Klassen unterteilt. Die Klassenbreite ist für A jeweils 40 h^{-1} und sie variiert für V . Für jede Klasse wurde der Verbrauchsmittelwert berechnet. Es gilt: Je geringer die mittlere Geschwindigkeit, desto höher der mittlere Verbrauch und je größer die Kumulierte Beschleunigung, desto größer der mittlere Verbrauch.

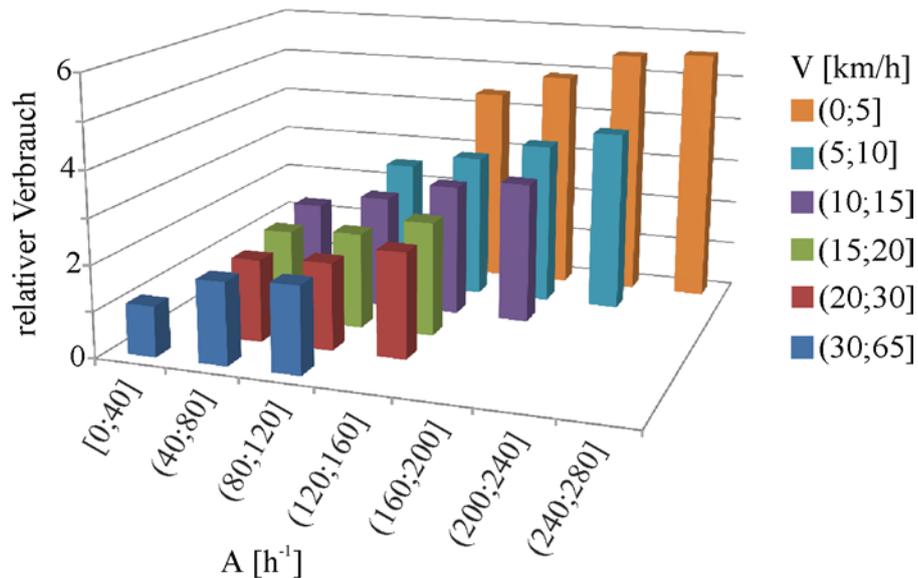


Abbildung 14 Makroskopische Verbrauchsmatrix für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren [22,25]. Die makroskopische Verbrauchsmatrix stellt die mittlere Abhängigkeit des Verbrauchs von mittlerer Geschwindigkeit V und Kumulierter Beschleunigung A dar. Zusammenarbeit der Daimler AG mit der Universität Duisburg-Essen.

Die Kumulierte Beschleunigung ist in Moving Queues deutlich größer als in Synchronisiertem Verkehr. Hieraus lässt sich schlussfolgern: Der Verbrauch ist in Moving Queues deutlich größer als in Synchronisiertem Verkehr. Der Verbrauch in übersättigtem innerstädtischem Verkehr kann also reduziert werden, wenn der übersättigte Verkehr nur aus Synchronisiertem Verkehr besteht und keine Moving Queues auftreten [V31].

Die aus den Simulationen erhaltenen Wertepaare aus kumulativer Beschleunigung und mittlerer Geschwindigkeit können typischen Verkehrssituationen zugeordnet werden. Und über die mikroskopische Matrix können die dafür typischen Verbrauchswerte angegeben werden. So entsteht eine makroskopische Verbrauchsmatrix, in der zu jeder typischen Verkehrssituation ein relativer Verbrauch gegenüber einer freien Fahrt angegeben werden kann. Beispiel: mittlere Geschwindigkeit 25 km/h und Kumulierte Beschleunigung 100 h^{-1} ergeben den 1,9-fachen Verbrauch gegenüber einer freien Fahrt.

Die Vorgehensweise für Elektrofahrzeuge ist analog, für die hier verwendete Energiematrix wird aber zusätzlich die rekuperierte Energie beim Bremsen berücksichtigt. Die Entwicklung der Szenarien zur Berechnung der Verbräuche von Fahrzeugen unterschiedlicher Antriebsarten wurde im Projekt basierend auf Verbrauchsmessungen von Fahrzeugen mit

Verbrennungsantrieb (Daimler AG) und Elektrofahrzeugen (Heusch-Boesefeldt GmbH) durchgeführt. Analog zur mikroskopischen Verbrauchsmatrix für Verbrennerfahrzeuge erstellte die Daimler AG auf der Grundlage von Daten aus Testfahrten, die die Firma Heusch-Boesefeldt GmbH und die Landeshauptstadt Düsseldorf bei Testfahrten mit einem Smart Electric Drive erhoben haben, auch eine mikroskopische Energiematrix für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb. Für weitere Details zur mikroskopischen Matrix für Elektrofahrzeuge siehe den Abschlussbericht der Daimler AG.

Für den Online-Betrieb der Routing-Anwendung im Projekt UR:BAN-RN ist bisher nur die Berechnung von V und A, jedoch nicht von D implementiert worden. Insbesondere ist im verwendeten Protokoll zum Verkehrsdatenaustausch, das auf DATEX-II basiert, kein weiteres Datenfeld für D vorgesehen. Da der Einfluss der Rekuperation im Vergleich mit dem Energieverbrauch durch das Beschleunigen gering ist, haben die Universität Duisburg-Essen und die Daimler AG daher ein alternatives, praktisches Verfahren für zur Berechnung der relativen elektrischen Energie vorgeschlagen, das auf die Berechnung der Kumulierten Verzögerung verzichtet. Dieses Verfahren und die notwendige Verwendung von Korrekturfaktoren für die einzelnen Matrizen in Abhängigkeit von der Durchschnittsgeschwindigkeit sind im Abschlussbericht der Daimler AG beschrieben. Abbildung 15 zeigt die makroskopische Energiematrix für das „praktische Verfahren“ zur Berechnung der Energieverbräuche der Elektrofahrzeuge.

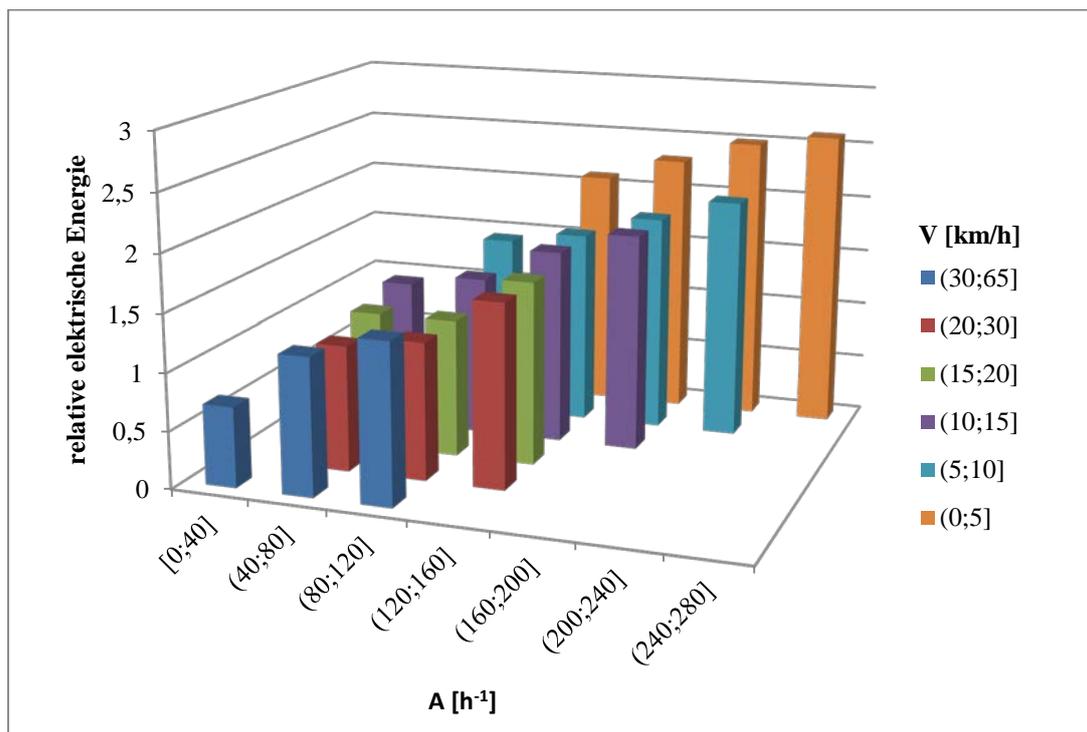


Abbildung 15 „Praktische“ makroskopische Energiematrix $M_{EP}(V,A)$, die die Abhängigkeit der elektrischen Energie von mittlerer Geschwindigkeit V und Kumulierter Beschleunigung A angibt. Zusammenarbeit der Daimler AG und der Universität Duisburg-Essen.

Fazit: Wie im Abschnitt „Anwendbarkeit der makroskopischen Matrizen auf das gesamte Düsseldorfer Straßennetz“ beschrieben, sind die Ergebnisse der Simulationen der Universität

Duisburg-Essen auf beliebige Stadtstraßen der Stadt Düsseldorf anwendbar. Die Verbrauchs- und Energiematrizen, die im Projekt von der Daimler AG in Zusammenarbeit mit der Universität Duisburg-Essen entwickelt wurden, sind ebenfalls ohne Einschränkung auf alle Stadtstraßen der Stadt Düsseldorf übertragbar.

Breakdown Minimization (BM)-Prinzip

Die Modellierung einer optimalen Verteilung des Verkehrs im Netz wurde auf der Basis des „Breakdown Minimization“ (BM)-Prinzips gemacht. Dazu wurden mikroskopische Modelle zur optimalen Verteilung des Verkehrs im Netz auf der Basis des BM-Prinzips weiterentwickelt. Das BM-Prinzip wurde von B. Kerner entwickelt [23] und besagt, dass die optimale Verteilung in einem Verkehrsnetzwerk mit N Knoten dann erreicht ist, wenn das Verkehrsmanagement in diesem Netz dergestalt ist, dass die Wahrscheinlichkeit für einen spontanen Zusammenbruch des Verkehrs an einer beliebigen Engstelle des Netzes für die Dauer einer gegebenen Beobachtungszeit den minimal möglichen Wert annimmt. Dies ist äquivalent zu der Formulierung, dass die Wahrscheinlichkeit maximal wird, dass ein Zusammenbruch an einer Engstelle Null ist.

Die Kapazität einer Straße beschreibt den Fluss an einer Engstelle, bei der der Verkehr zusammenbricht. Der Verkehrszusammenbruch an einer Engstelle ist ein lokaler Phasenübergang vom Freifluss (F) zum gestauten Verkehr. Der Zusammenbruch kann sowohl spontan als auch induziert sein (Abbildung 16) und erfolgt dabei stets anhand einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Eine äußere, kurze Störung kann einen Zusammenbruch induzieren, d.h. nach Ende der Störung erfolgt nicht zwangsläufig eine Rückkehr zum Freifluss. Daraus folgt, dass es nicht eine bestimmte Kapazität der Straße gibt, sondern dass es eine unendliche Anzahl von Kapazitäten gibt, bei denen ein Zusammenbruch an der Engstelle induziert werden kann. Abbildung 17 zeigt die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs an einer Engstelle in Abhängigkeit vom Verkehrsfluss.

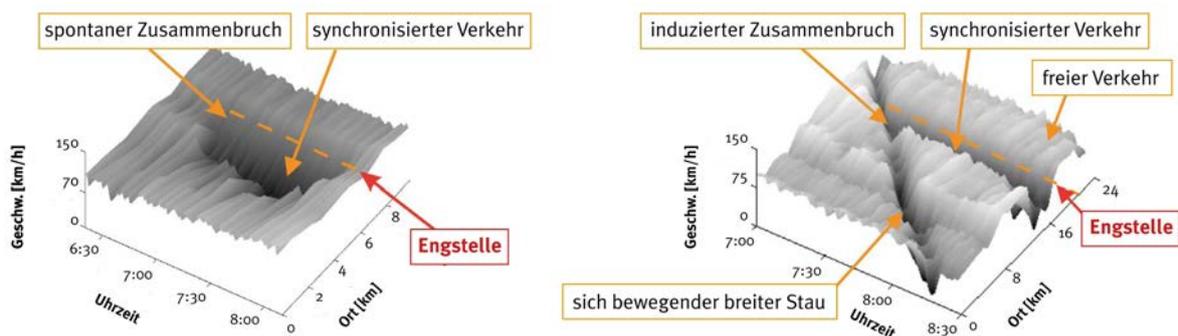


Abbildung 16 Empirische Eigenschaften des Verkehrszusammenbruchs an einer Engstelle, mittlere gemessene Geschwindigkeiten in Raum und Zeit. Links: spontaner Verkehrszusammenbruch, rechts: induzierter Zusammenbruch.

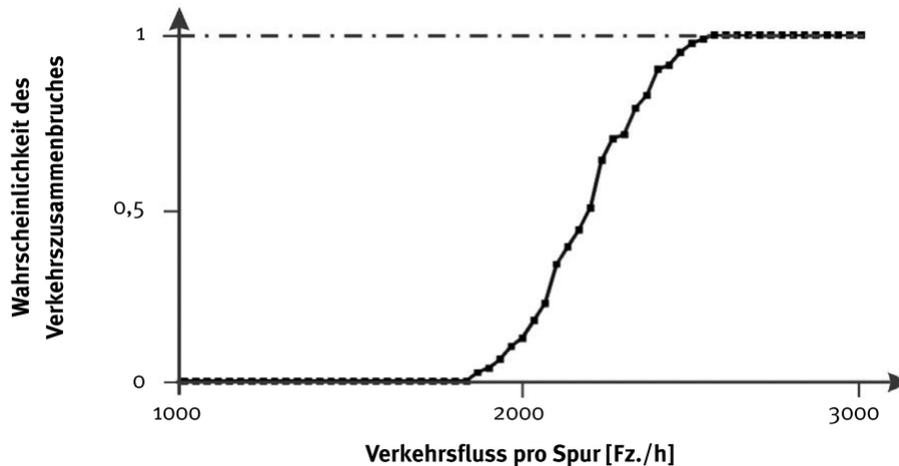


Abbildung 17 Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs in Abhängigkeit vom Verkehrsfluss an einer Engstelle

Abbildung 18 zeigt die Simulation des Verkehrsflusses für ein einfaches Verkehrsnetz. Links die Darstellung des Netzes mit zwei Routen 1 und 2, zwei Engstellen und den Zuflüssen q_0 , q_{on1} und q_{on2} , rechts die zugehörige Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenbruch P_{netz} an einer beliebigen Engstelle des Netzes in Abhängigkeit von der Verteilung der Flüsse.

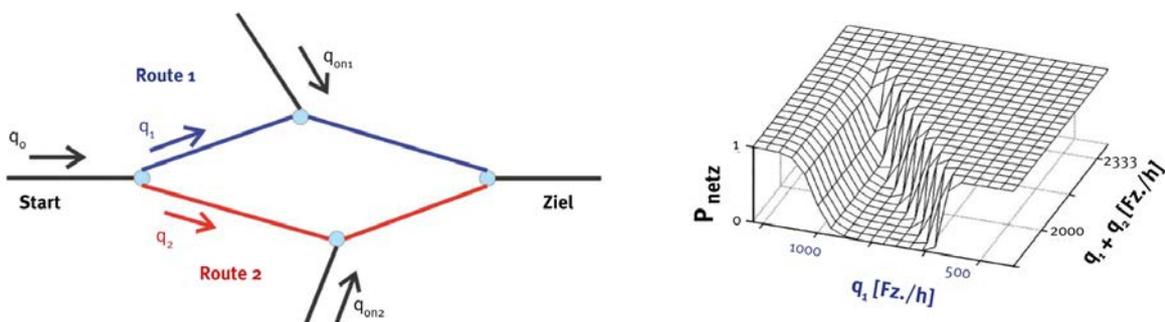


Abbildung 18 Minimierung der Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs in einem einfachen Netz. Links: Darstellung eines Netzes mit zwei Routen und Zuflüssen q_0 , q_{on1} und q_{on2} ; rechts: Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs P_{netz} an irgendeiner Stelle des Netzes

Die Wahrscheinlichkeiten des Verkehrszusammenbruchs an jeweiligen Engstellen im Netz wurden im UR:BAN Projekt auf der Basis der empirischen Untersuchungen der LSA [V23] und Schnellstraßen [V32] validiert. Es wurde gezeigt, dass eine optimale Verteilung des Verkehrs im Netz auf der Basis des BM-Prinzips zu deutlich größerem Throughput (Leistung) des Netzes führt, im Vergleich mit bekannten Verfahren die auf der Basis von Wardrops „User Equilibrium“ (UE)- oder „System Optimum“ (SO)-Prinzips [24] normalerweise gemacht worden sind.

Energieeffiziente Navigation mit einer individuellen Informationsverteilung bei gleicher Ausgangslage wurde auf der Basis des BM-Prinzips gemacht. Dazu wurde das BM-Prinzip weiter entwickelt. Das neue im UR:BAN Projekt weiter entwickelte BM-Prinzip

[V14,V33,V36] erlaubt es, eine energieeffiziente Navigation mit einer individuellen Informationsverteilung bei gleicher Ausgangslage so zu machen, dass die Wahrscheinlichkeiten des Verkehrszusammenbruchs an jeweiligen Engstellen im Netz minimal bleibt.

Die Berechnung und Abschätzung der Folgen von Strategemaßnahmen auf den Verkehrsfluss wurden im Projekt auf der Basis des BM-Prinzips in Zusammenhang mit den Weiterentwicklungen des mikroskopischen, stochastischen Kerner-Klenov-Modells durchgeführt. Das Modell verwendet für eine Berechnung und Abschätzung der Folgen von Strategemaßnahmen auf den Verkehrsfluss das BM-Prinzip.

Die Entwicklung der Methoden zur Modellierung der netzweiten Verkehrsprognose wurde im Projekt auf der Basis der Entwicklung des mikroskopischen, stochastischen Kerner-Klenov-Modells für urbane Netze durchgeführt. Dabei wurde ein Modell für die Simulationen der Verkehrsprognose im Verkehrsnetz der Stadt Düsseldorf entwickelt. Mit dem Modell wurden Berechnungen des Verkehrs in untersättigtem und übersättigtem Verkehr der Stadt Düsseldorf durchgeführt. Eine Validierung des Modells hat gezeigt, dass die Simulationen mit diesem Modell eine sehr gute Übereinstimmung mit der gemessenen Daten haben, die durch Detektoren der Stadt Düsseldorf bzw. durch TomTom-GPS-Daten erhoben wurden.

Erreichung der Ziele

Die Ziele wurden unter Einhaltung des geplanten Kostenrahmens erreicht.

Das vorgegebene Ziel, eine neue Methode zu entwickeln, mit der die Bestimmung des Energieverbrauchs von Fahrzeugen in Städten in Abhängigkeit von ihrer Antriebsart (Verbrenner, Elektrofahrzeug) möglich ist, wurde vollständig erreicht. Die entwickelte Methode der Kombination einer empirisch ermittelten Verbrauchsmatrix mit mikroskopischen Verkehrssimulationen ermöglicht es über die makroskopischen Kenngrößen der mittleren Geschwindigkeit und der kumulierten Beschleunigung Fahrzeug im Livebetrieb einen typischen Verbrauchskennwert zuzuordnen.

Die entwickelte Methode ist eine für den städtischen Verkehr allgemein gültige Methode. Sie ist für Straßen unterschiedlicher Geometrien anwendbar, d.h. es spielt keine Rolle, ob die Straßen ein- oder mehrspurig sind. Ebenso ist sie für unterschiedliche Phasen und Umlaufzeiten von Lichtsignalanlagen anwendbar. Ausschlaggebend für ein Routing, das auf den oben beschriebenen makroskopischen Verbrauchs- bzw. Energiematrizen basiert, ist lediglich eine ausreichende Informationslage des Anwenders in Bezug auf das Vorhandensein von Verkehrsdaten zur Bestimmung des vorherrschenden Verkehrsmusters.

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind:

- Personalkosten
- Unteraufträge an WES-Office (Ergebnisverbreitung und Bürodienstleistungen)
- Reisekosten
- Kauf eines Servers

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit

Die Ziele wurden unter Einhaltung des geplanten Kostenrahmens erreicht. Es wurden weitgehend alle Mittel ausgeschöpft, da die ursprüngliche Planung der Antragstellung eingehalten wurde. Die wesentliche Abweichung von der ursprünglichen Planung besteht darin, dass ein namentlich geplanter Mitarbeiter für das Projekt sich gegen eine Anstellung an der Universität entschieden hat. Die entsprechenden Aufgaben konnten durch Beschäftigung anderer Mitarbeiter erledigt werden. Da diese Mitarbeiter eine geringere Gehaltseinstufung hatten, blieben am Projektende entsprechend Personalmittel übrig.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen

Als zentrales Projektergebnis gab die Universität Duisburg-Essen die Daten der Verkehrsflusssimulationen sowie die Definition der neu entwickelten Kenngröße „Kumulierte Beschleunigung“ (und analog dazu die „Kumulierte Verzögerung“) an die Daimler AG weiter.

Die dort entwickelten makroskopischen Verbrauchs- bzw. Energiematrizen (Abbildungen Abbildung 14 und Abbildung 15) wurden an die Partner TomTom und GEVAS software zur Verwertung in Online-Anwendungen von Routenberechnung und Verkehrsmanagement weitergereicht. Dadurch wird es ermöglicht, auf den Servern von TomTom den streckenbezogenen Verbrauch dynamisch zu berechnen. Die Firma GEVAS software kann Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch von Verbrenner- und Elektrofahrzeugen als Kriterien für die optimale Route ins Verkehrsmanagement einbinden. Dies ist für einige Tage und mehrere Start-Ziel-Beziehungen im Düsseldorfer Straßennetz getestet worden (Abbildung 19). Es wurde gezeigt, dass infolge von Verkehrsstörungen die energieeffizienteste Route für Verbrennerfahrzeuge von der energieeffizientesten Route für Elektrofahrzeuge abweichen kann.

Als Projektergebnis werden die streckenbezogenen Verbrauchs- und Energieeffizienzwerte, die auf der Grundlage der makroskopischen Matrizen der Daimler AG berechnet werden, von der Landeshauptstadt Düsseldorf online an den MDM (Mobilitäts Daten Marktplatz, <http://www.mdm-portal.de/>) übertragen, und sind dort Anbietern von Verkehrsdiensten zugänglich.

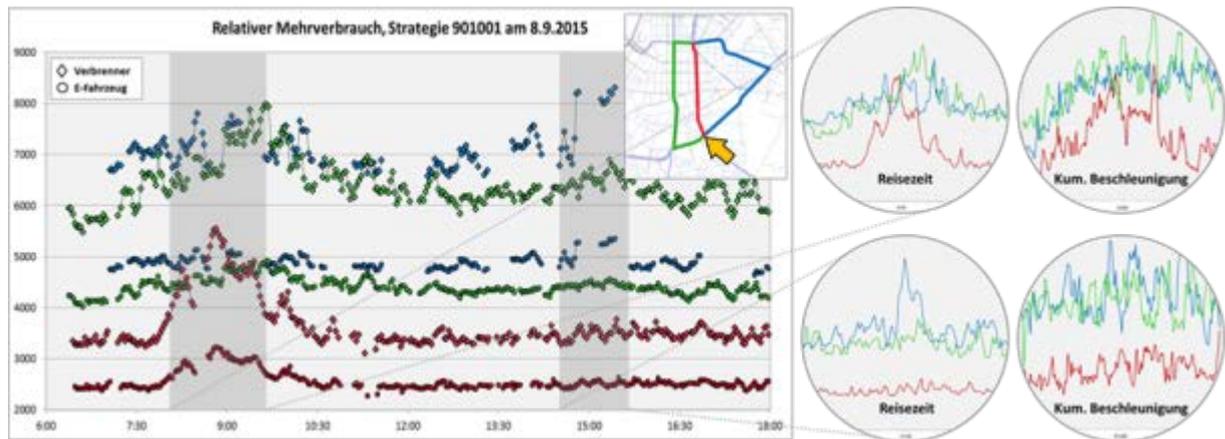


Abbildung 19: Beispiel für die Anwendung der makroskopischen Energiematrizen in der Verkehrsmanagement-Software der Firma GEVAS.

Aus wissenschaftlicher Sicht sind die im Verlauf des Projektes gewonnenen Erkenntnisse über den Nachweis des Synchronisierten Verkehrs in der Stadt, über die Voraussetzungen zur Reproduktion des Synchronisierten Verkehrs mit Hilfe des Kerner-Klenov-Modells und über den Einfluss des Effektes der Geschwindigkeitsanpassung (siehe Kapitel 2.1) von besonderem Interesse. Diese werden Eingang sowohl in weitere zukünftige Forschungsarbeiten als auch in die Lehre finden.

Die Existenz des Synchronisierten Verkehrs an einer LSA war vor Projektbeginn zwar vorausgesagt, aber noch nicht nachgewiesen worden. Durch die empirische Untersuchung des städtischen Verkehrs anhand von anonymisierten GPS-Daten von TomTom und Detektordaten der Stadt Düsseldorf konnte der Synchronisierte Verkehr nachgewiesen werden. Zudem führte die empirische Untersuchung zur Untermauerung der Drei-Phasen-Theorie von B. Kerner, insbesondere dessen Kritik an klassischen Modellen, die dazu im Widerspruch stehen [V6].

Die Reproduktion des Synchronisierten Verkehrs in den Simulationen war entscheidender Bestandteil der Arbeiten der Universität Duisburg-Essen. Die Erkenntnisse über den Einfluss der verschiedenen Parameter des stochastischen Kerner-Klenov-Modells, insbesondere der Effekt der Geschwindigkeitsanpassung, auf die Entstehung von Verkehrsmustern an Lichtsignalanlagen sind Bestandteil mehrerer Veröffentlichungen und werden Eingang sowohl in weitere zukünftige Forschungsarbeiten als auch in die Lehre finden.

Die Entwicklung der neuen makroskopischen Kenngröße „Kumulierte Beschleunigung“ zur Bestimmung von Stärke und Häufigkeit der Beschleunigungsvorgänge eines Fahrzeugs auf einer Strecke war entscheidende Voraussetzung zur Umsetzbarkeit des Vorhabens.

2.5. Fortschritte durch Dritte

Wie in Abbildung 2 gezeigt wurde, besteht der reale innerstädtische übersättigte Verkehr (abgeleitet aus GPS-Daten der Fahrzeuge) aus klassischen „Moving Queues“ und „Synchronisiertem Verkehr“. Den Antragstellern sind keine Fortschritte durch Dritte während der Projektlaufzeit im Bereich der mikroskopischen Simulation des Synchronisierten Verkehrs bekannt.

2.6. Veröffentlichungen

- [V1] Schäfer, R. P., Lorkowski, S., Witte, S., Palmer, J., Rehborn, H. und Kerner, B. S.: Eine Analyse von Verkehrsdaten aus GPS- und GSM-Quellen mit der Drei-Phasen-Verkehrstheorie. *Straßenverkehrstechnik*, 56(11), 2012.
- [V2] Rehborn, H., Kerner, B. S., and Schäfer, R. P.: Traffic Jam Warning Messages from Measured Vehicle Data with the Use of Three-Phase Traffic Theory. In: *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2012*, pp. 241-250, 2012. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-29673-4_22.
- [V3] Kerner, B. S.: Complexity of spatiotemporal traffic phenomena in flow of identical drivers: Explanation based on fundamental hypothesis of three-phase theory. *Physical Review E*, 85(3), 036110, 2012, DOI: 10.1103/PhysRevE.85.036110.
- [V4] Kerner, B. S.: Theory of self-organized traffic at light signal. *arXiv preprint arXiv:1211.2535*, 2012.
- [V5] Kerner, B. S., Klenov, S. L., Hermanns, G., and Schreckenberg, M.: Effect of driver over-acceleration on traffic breakdown in three-phase cellular automaton traffic flow models. *Physica A* 392, 2013, pp. 4083-4105.
- [V6] Kerner, B.: Criticism of generally accepted fundamentals and methodologies of traffic and transportation theory: A brief review. *Physica A* 392, 2013, pp. 5261–5282.
- [V7] Kerner, B. S., Klenov, S. L., Hermanns, G., Hemmerle, P., Rehborn, H., and Schreckenberg, M.: Synchronized Flow in Over-Saturated City Traffic. *Phys. Rev. E* 88, 054801 (2013).
- [V8] Hermanns, G., Kulkov, I. N., Hemmerle, P., Rehborn, H., Koller, M., Witte, N., Kannenberg, O., Lorkowski, S., Kerner, B. S., and Schreckenberg, M.: Simulations of TomTom vehicle data in urban traffic with the Kerner-Klenov model in the framework of the three-phase traffic theory. In: *Proc. of Traffic and Granular Flow '13*, S. 563-569, Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-319-10629-8_63.
- [V9] Kerner, B. S., Rehborn, H., Schäfer, R.-P., Klenov, S. L., Palmer, J., Lorkowski, S., and Witte N.: Traffic Dynamics in Empirical Probe Vehicle Data studied with Three-Phase Theory: Spatiotemporal Reconstruction of Traffic Phases and Generation of Jam Warning Messages. *Physica A* 392, pp. 221-251, 2013.
- [V10] Kerner, B.: The physics of green-wave breakdown in a city. *Europhysics Letters*, 102, 28010, 2013.
- [V11] Koller, M., Rehborn, H., Kerner, B. S., Hermanns, G. und Schreckenberg, M.: Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs an Lichtsignalanlagen. *Straßenverkehrstechnik*, 47 (11), 2013, S. 699-706.
- [V12] Kerner, B. S.: Fundamental Empirical Features of Traffic Breakdown. *Traffic Engineering & Control*, 54(2), 2013.
- [V13] Kerner, B. S.: Empirical and Theoretical Fundamentals for Reliable Control and Optimization of Vehicular Traffic and Transportation Networks. In: *Traffic and Granular Flow'13* (pp. 369-377). Springer International Publishing, 2015.

- [V14] Kerner, B. S.: Three-phase theory of city traffic: Moving synchronized flow patterns in under-saturated city traffic at signals. *Physica A* 397, pp. 76-110, 2014, DOI: 10.1016/j.physa.2013.11.009.
- [V15] Kerner, B. S.: Cumulated vehicle acceleration. *Traffic Engineering and Control*, 2014, 55, (4), pp. 139-141.
- [V16] Kerner, B. S. (2014). Cumulated Vehicle Acceleration: An Attribute of GPS Probe Vehicle Traces for On-Line Assessment of Vehicle Fuel Consumption in Traffic and Transportation Networks. *arXiv preprint arXiv:1410.6992*.
- [V17] Kerner, B. S., Klenov, S. L., and Schreckenberg, M.: Traffic breakdown at a signal: classical theory versus the three-phase theory of city traffic. *J. Stat. Mech.* (2014) P03001, DOI: 10.1088/1742-5468/2014/03/P03001.
- [V18] Hemmerle, P., Koller, M., Rehborn, H., Hermanns, G., Kerner, B. S., and Schreckenberg, M.: Increased Consumption in Oversaturated City Traffic Based on Empirical Vehicle Data. In: Fischer-Wolfahrt, J., Meyer, G. (Hrsg.): *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2014. Smart Systems for Safe, Clean and Automated Vehicles*, Springer, 2014, pp. 71-79.
- [V19] Rehborn, H., Schreckenberg, M., Kerner, B. S., Hermanns, G., Hemmerle, P., Kulkov, I. N., Kannenberg, O., Lorkowski, S., Witte, N., Böhme, H., Finke, T. und Maier, P.: Eine methodische Einführung zur antriebsartabhängigen Routensuche in einem Ballungsraum. *Straßenverkehrstechnik*, 48, (3), 2014, S. 151-157.
- [V20] Kerner, B. S., Klenov, S. L., and Schreckenberg, M.: Probabilistic physical characteristics of phase transitions at highway bottlenecks: Incommensurability of three-phase and two-phase traffic-flow theories. *Phys. Rev. E* 89, 052807, 2014, DOI: 10.1103/PhysRevE.89.052807.
- [V21] Hemmerle, P., Rehborn, H., Koller, M., Hermanns, G., Kerner, B. S., and Schreckenberg, M.: Classification of Empirical Urban Traffic Patterns. In: *Proc. of 10th ITS European Congress*, Helsinki, Finland, 16-19 Juni 2014, TP 0008.
- [V22] Koller, M., Hemmerle, P., Rehborn, H., Hermanns, G., Kerner, B. S., and Schreckenberg, M.: Increased Consumption in Synchronized Flow in Oversaturated City Traffic. In *Proc. of 10th ITS European Congress*, Helsinki, Finland, 16-19 Juni 2014, TP 0054.
- [V23] Kerner, B. S., Hemmerle, P., Koller, M., Hermanns, G., Klenov, S. L., Rehborn, H., and Schreckenberg, M.: Empirical synchronized flow in oversaturated city traffic. *Phys. Rev. E* 90, 2014, 032810.
- [V24] Rehborn, H., Hemmerle, P., Koller, M., Schreckenberg, M., Kerner, B., Hermanns, G., Kulkov, I., Kannenberg, O., Lorkowski, S., Witte, N., Böhme, H., Finke, T., P. Maier, P., and Offermann, F.: The Influence Of Urban Traffic Congestion On Resource Consumption In Vehicles. In: *Proc. of 23. IKA Motorenkongress, Aachen*, 2014.
- [V25] Hermanns, G., Kulkov, I. N., Kerner, B. S., Schreckenberg, M., Hemmerle, P., Koller, M., and Rehborn, H.: Microscopic Simulation of Synchronized Flow in City Traffic: Effect of Driver's Speed Adaptation. In *SIMUL 2014 – The 6th International Conference on Advances in System Simulation*, Nizza, Frankreich, 2014.
- [V26] Koller, M., Hemmerle, P., Rehborn, H., Kerner, B. S., Hermanns, G. und Schreckenberg, M.: Mehrverbrauch im gestauten Stadtverkehr. *Straßenverkehrstechnik*, (12), 2015, S. 820-824.

- [V27] Hemmerle, P., Hermanns, G., Koller, M., Rehborn, H., Kerner, B. S., and Schreckenberg, M.: Macroscopic Consumption Matrix for Energy-Efficient Route Guidance. In: *Proc. of Transportation Research Board 2015 Annual Meeting*, TRB Paper 15-2751, Washington D.C., January 2015.
- [V28] Hermanns G., Hemmerle, P., Rehborn, H., Koller, M., Kerner, B. S., and Schreckenberg, M.: Microscopic Simulation of Synchronized Flow in Oversaturated City Traffic. Effect of Driver's Speed Adaptation. *Transportation Research Record*, 2490, pp. 47-55, 2015, DOI: 10.3141/2490-06.
- [V29] Hemmerle, P., Hermanns, G., Koller, M., Rehborn, H., Kerner, B. S., Schreckenberg, M.: Effect of Synchronized Flow on On-line Energy-efficient Route Guidance in an Urban Road Network. In: *Proc. of mobilTUM 2015 International Scientific Conference on Mobility and Transport*, München, Juni/Juli 2015.
- [V30] Kerner, B. S., Koller, M., Klenov, S. L., Rehborn, H., and Leibel, M.: Empirical Features of Spontaneous and Induced Traffic Breakdowns in Free Flow at Highway Bottlenecks. 2015, *arXiv preprint arXiv:1502.02862*.
- [V31] Hemmerle, P., Koller, M., Rehborn, H., Kerner, B. S., and Schreckenberg, M.: Fuel consumption in empirical synchronised flow in urban traffic. *IET Intelligent Transport Systems*, 2015. DOI: 10.1049/iet-its.2015.0014.
- [V32] Kerner, B. S., Koller, M., Klenov, S. L., Rehborn, H. and Leibel, M.: The physics of empirical nuclei for spontaneous traffic breakdown in free flow at highway bottlenecks. *Physica A*, 438, pp. 365–397, 2015.
- [V33] Kerner, B. S.: Failure of classical traffic flow theories: A critical review. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 132, Issue 7, pp. 417-433, 2015, DOI: 10.1007/s00502-015-0340-3.
- [V34] Hemmerle, P., Koller, M., Hermanns, G., Schreckenberg, M., Rehborn, H., Kerner, B. S.: Impact of Synchronised Flow in oversaturated City Traffic on Energy Efficiency of conventional and electrical Vehicles. In: *Proc. 11th Conference on Traffic and Granular Flow 2015*, Nootdorp/Delft, Niederlande (geplante Veröffentlichung: 2016).
- [V35] Hermanns, G., Hemmerle, P., Rehborn, H., Kerner, B. S., and Schreckenberg, M.: Microscopic Simulations Of Oversaturated City Traffic: Features Of Synchronised Flow Patterns. In: *Proc. 11th Conference on Traffic and Granular Flow 2015*, Nootdorp/Delft, Niederlande (geplante Veröffentlichung: 2016).
- [V36] Kerner, B. S.: Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving. *Physica A*, available online 22 January 2016, DOI: 10.1016/j.physa.2016.01.034.
- [V37] Kerner, B. S.: Microscopic theory of traffic-flow instability governing traffic breakdown at highway bottlenecks: Growing wave of increase in speed in synchronized flow. *Physical Review E*, 92(6), 062827, 2015.
- [V38] Kerner, B. S.: Criticism of generally accepted fundamentals and methodologies of traffic and transportation theory. In: *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUMERICAL ANALYSIS AND APPLIED MATHEMATICS 2014 (ICNAAM-2014)* (Vol. 1648, p. 530002). AIP Publishing.

[V39] Kerner, B. S.: Test bed for simulations of the effect of a vehicle ad hoc network on traffic flow. *Vehicular communications and networks*, pp. 223-254, 2015.

2.7. Literaturangaben

Veröffentlichungen mit Beteiligung der Universität Duisburg-Essen während der Projektlaufzeit sind im Kapitel 2.6 zusammengefasst.

[1] Brüggemann, J., Schreckenberg, M., and Luther, W.: Real-time traffic information system using microscopic traffic simulation. In: K. Al Begain, D. Al Dabass, A. Orsoni, R. Cant, R. Zobel (Eds.), *EUROSIM 2013 – 8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, EUROSIM, IEEE – The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Cardiff, Wales, UK, 2013, pp. 448–453.

[2] Knorr, F., und Schreckenberg, M.: Influence of inter-vehicle communication on peak hour traffic flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(6), 2012, pp. 2225-2231. DOI: 10.1016/j.physa.2011.11.027

[3] Nesamani, K. S., Chu, L., McNally, M. G. and Jayakrishnan, R.: Estimation of Vehicular Emissions by Capturing Traffic Variations. In *Atmospheric Environment*, 41, (14), 2007, pp. 2996–3008.

[4] Ahn, K. and Rakha, H.: Field evaluation of energy and environmental impacts of driver route choice decisions. In: *Proceedings 2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, Seattle, USA, 2007.

[5] Barth, M. and Boriboonsomsin, K.: Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2058, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2008, pp. 163-171.

[6] Minett, C. F., Salomons, A. M., Daamen, W., von Arem, B., and Kuijpers, S.: Eco-routing: comparing the fuel consumption of different routes between an origin and destination using field test speed profiles and synthetic speed profiles. In *Proceedings 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, Vienna, Austria, 2011.

[7] Barth, M. and Boriboonsomsin, K.: Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. In *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14, (6), 2009, pp. 400-410.

[8] Servin, O., Boriboonsomsin, K., and Barth, M.: An Energy and Emissions Impact Evaluation of Intelligent Speed Adaptation. In: *Proceedings 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, Toronto, Canada, 2006.

[9] Frey, H. C., Zhang, K. S., and Roupail, N. M.: Fuel use and emissions comparisons for alternative routes, time of day, road grade, and vehicles based on in-use measurements. In: *Environmental Science & Technology*, 42, (7), 2008, pp. 2483-2489.

- [10] Boriboonsomsin, K. and Barth, M.: Impacts of Road Grade on Fuel Consumption and Carbon Dioxide Emissions Evidenced by Use of Advanced Navigation Systems. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2139, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2009, pp. 21-30.
- [11] Zhai, H., Frey, H. C., and Roupail, N. M.: A Vehicle-Specific Power Approach to Speed- and Facility-Specific Emissions Estimates for Diesel Transit Buses. In *Environmental Science And Technology*, 42, (21), 2008, pp. 7985–7991.
- [12] Webster, F.V.: Traffic signal settings. In: *Road Research Laboratory Technical Paper No. 39*, 1958.
- [13] Newell, G.F.: Approximation methods for queues with application to the fixed-cycle traffic light. *Siam Review*, 1965, 7, (2), pp. 223-240.
- [14] Robertson, D. I. :TRANSYT. a traffic network study tool. Transport and Road Research Laboratory Report LR 253. Crowthorne: TRL, 1969.
- [15] Gartner, N. H., Stamatiadis, C.: Traffic Networks, Optimization and Control of Urban. In Meyers, R.A. (Ed.): *Encyclopedia of Complexity and System Science*, (Springer, 2009), pp. 9470–9500.
- [16] Dion, F., Rakha, H., Kang, Y. S.: Comparison of delay estimates at under-saturated and over-saturated pre-timed signalized intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2004, 38, (2), pp. 99-122.
- [17] Geroliminis, N., Skabardonis, A.: Identification and analysis of queue spillovers in city street networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12, (4), pp. 1107-1115.
- [18] Kerner, B. S.: *The Physics of Traffic* (Springer, Berlin, 2004).
- [19] Kerner, B. S.: *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control* (Springer, New York, 2009).
- [20] Kerner, B. S.: Physics of traffic gridlock in a city. *Physical Review E*, 84(4), 2011, 045102. DOI: 10.1103/PhysRevE.84.045102
- [21] Kerner, B. S. and Klenov, S. L.: A microscopic model for phase transitions in traffic flow. In: *Journal of Physics A: Mathematical and General* 35 (2002), Nr. 3, p. L31.
- [22] www.openstreetmap.org
- [23] Kerner, B. S.: Optimum principle for a vehicular traffic network: minimum probability of congestion, *J. Phys. A: Math. Theor.* 44, 092001, 2011, DOI:10.1088/1751-8113/44/9/092001.
- [24] Wardrop, J. G.: Some theoretical aspects of road traffic research. In: *Proc. of Inst. of Civil Eng. II.*, Vol. 1, 1952, pp. 325–378.