

Simulative Untersuchungen abstrakter und realer Verkehrsmanagementansätze zur Emissionsreduktion

Daniel Krajzewicz, Yun-Pang Flötteröd

Institut für Verkehrssystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Rutherfordstr. 2,
12489 Berlin; daniel.krajzewicz@dlr.de, yun-pang.floetteroed@dlr.de

Zusammenfassung

Verkehrsflusssimulationen sind ein etabliertes Werkzeug des Verkehrsmanagements, die auch zur Bewertung von schadstoffreduzierenden Verkehrsmanagementmaßnahmen herangezogen werden können. Vorgestellt werden abgeschlossene und laufende Arbeiten zur simulationsgestützten Entwicklung und Bewertung solcher Maßnahmen.

Einleitung

Die durch den Verkehr erzeugte Umweltbelastung mit Schadstoffen steht schon seit längerem im Fokus der Öffentlichkeit und erfährt durch die Erderwärmung zusätzliches Gewicht. Die europäische Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft fordert ein Handeln der Verantwortlichen bei der Überschreitung vorgegebener Grenzwerte. Das den CO₂-Ausstoß regulierende Kyoto-Protokoll erhöht den Druck zusätzlich, die durch den Verkehr erzeugten Schadstoffe zu minimieren.

Neben der Reduktion des Flottenverbrauchs durch die Fahrzeughersteller sucht auch das Verkehrsmanagement nach Ansätzen, die den Schadstoffausstoß reduzieren oder räumlich begrenzen, respektive aus bestimmten örtlichen Bereichen herauszuhalten suchen. Hierbei kommt eine große Spanne möglicher Ansätze zum Einsatz, die sich in ihrer zeitlichen und räumlichen Ausdehnung sowie in dem Umfang des Eingriffs stark unterscheiden. Die Bandbreite möglicher Ansätze reicht von der Implementierung neuer ÖPNV-Routen über Verkehrsbeschränkungen bis zur Optimierung einzelner Lichtsignalanlagen.

Die Betrachtung der ökologischen Auswirkungen des Verkehrs wird zunehmend auch durch Simulationen unterstützt, einem der Hauptplanungswerkzeuge des Verkehrsmanagements. Verkehrsflusssimulationen erlauben die Bemessung der Auswirkungen von Eingriffen in ein existierendes Verkehrssystem vor deren Realisierung in der realen Welt und so den Nutzen einer Aktion gegen ihre Kosten zu setzen. Durch den Zugriff auf alle modellierten Teile des Verkehrssystems, erlauben sie zudem, zusätzliches Wissen über die Abhängigkeiten zwischen Nachfrage, Straßennetz, Infrastruktur und Schadstoffemission zu erhalten und so bessere Ansätze zur Schadstoffreduktion zu entwickeln.

Im Nachfolgenden wird eine Auswahl der am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (ITS/DLR) durchgeführten Arbeiten zu emissionsreduzierenden Verkehrsmanagementansätzen vorgestellt. Den vorgestellten Arbeiten ist die Nutzung der durch die Autoren mitentwickelten Simulationssoftware „SUMO“ ([DLR, 2002], [Krajzewicz et al., 2012]) gemein. Der Bericht ist wie folgt gegliedert: zunächst wird die eingesetzte Verkehrsflusssimulation „SUMO“ sowie das in ihr eingebettete Emissionsmodell beschrieben. Danach wird der aktuelle Wissensstand zur abstrakten Routenwahl anhand von Schadstoffemissionen wiedergegeben. Danach

werden aktuelle Arbeiten zur Umsetzung realer Verkehrsmanagementmaßnahmen vorgestellt. Der Artikel endet mit einer Zusammenfassung.

Benutztes Simulationsmodell

Innerhalb der in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen kam die am ITS/DLR entwickelte Verkehrssimulation „SUMO“ („Simulation of Urban MObility“) zum Einsatz. SUMO ist eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation, ausgelegt für die Simulation großer Straßennetze, wie in Abbildung 1 gezeigt. Im Laufe ihrer 2001 begonnenen Entwicklung ist SUMO um die Fähigkeit unterschiedliche Fahrzeugtypen, inklusive der Unterscheidung verschiedener Verkehrsträger wie PKWs, Taxen, Busse oder Straßenbahnen mit den dazugehörigen Spur- bzw. Straßennutzungsbeschränkungen abzubilden, erweitert worden. SUMO kann neben solchem multi-modalen Verkehr auch inter-modale, also verschiedene Verkehrsmodi nutzende Wegeketten einzeln modellierter Personen abbilden ([Behrisch et al., 2010]).

Zur Abbildung des Längsverhaltens von Fahrzeugen nutzt SUMO per Voreinstellung eine Erweiterung des Fahrzeugfolgemodell nach Krauß ([Krauß et al. 1997]), welche wie das für die Spurwahl benutzte Modell in [Krajewicz, 2010] beschrieben ist. SUMO erlaubt die Simulation verschiedener Kreuzungstypen, wie rechts-vor-links, Vorfahrtskreuzungen sowie von statischen und adaptiven Lichtsignalanlagen. Ein auf Sockets basierendes Interface ([Wegener et al., 2008]) erlaubt es, das Verhalten von simulierten Objekten, wie Lichtsignalanlagen oder Fahrzeugen, während eines Simulationslaufs zu beeinflussen.

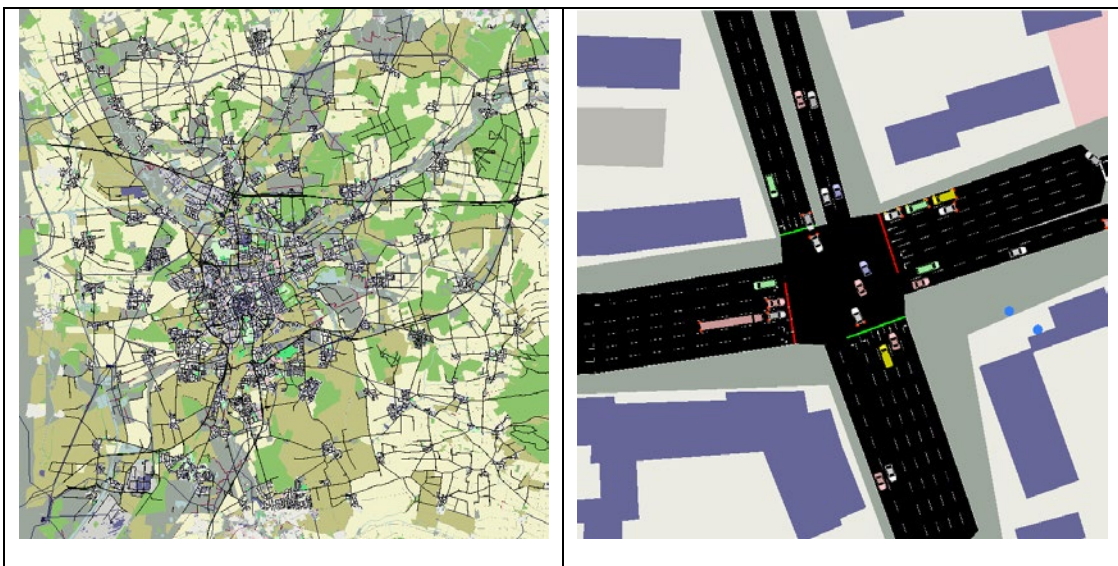


Abbildung 1: Darstellung der Simulation der Stadt Braunschweig in SUMO; links: Gesamtszenario, rechts: Vergrößerung auf eine einzelne Kreuzung des Szenarios

Im Rahmen des von der Europäischen Kommission kofinanzierten Projektes „iTETRIS“ ([Lazaro, Robert, 2009], [iTETRIS, 2010]) ist SUMO um ein Modell des Schadstoffausstoßes sowie um ein Modell von Geräuschemissionen erweitert worden. Innerhalb von iTETRIS ist ein System zur Simulation von Verkehrsmanagementmethoden, die auf durch Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation erhobenen Daten basieren, entwickelt worden. Die Erweiterung um Modelle für Schadstoff- und Geräuschemission sollte die ökologischen Auswirkungen der in iTETRIS entwickelten Verkehrsmanagementmaßnahmen zu bestimmen erlauben. Im Nachfolgenden wird die

Wahl und die Einbettung des Emissionsmodells verkürzt wiedergegeben. Eine genauere Beschreibung findet sich in [Krajzewicz et al., 2011].

Innerhalb von iTETRIS sind die Emission der Schadstoffe CO, CO₂, NO_x, PM_x und HC sowie der Kraftstoffverbrauch als die zu berechnenden Größen festgesetzt worden, zum Einen aufgrund ihrer toxischen bzw. krebserregenden Wirkung sowie aufgrund ihrer Regulierung durch die Gesetzgebung. Bei der Realisierung wurde davon ausgegangen, dass ein bereits verfügbares und wissenschaftlich beschriebenes Modell verwendet werden kann. Daher sind zunächst publizierte Emissionsmodelle zusammengetragen und ausgewertet worden. Für die gefundenen Modelle sind im nächsten Schritt die jeweils notwendigen Eingabegrößen und -parameter sowie die durch das jeweilige Modell errechneten Schadstoffe bestimmt worden. Es zeigte sich, dass nur ein Teil der Modelle in genügendem Maße beschrieben ist, oft sind nicht alle Parameter hinreichend präzise abgedeckt. Auch war eine vorhersehbare Diskrepanz zwischen Modellgenauigkeit und der Abdeckung der gesamten Fahrzeugpopulation zu beobachten. Dabei bilden vor allem genauere Modelle nicht alle der in iTETRIS geforderten Schadstoffe ab.

Nach dem Vergleich verfügbarer Modelle ist die HBEFA-Datenbank ([INFRAS, 2010]) in der zu diesem Zeitpunkt aktuellen Version 2.1 als Grundlage für das zu implementierende Modell gewählt worden, weil sie die Fahrzeugpopulation weitestgehend abdeckt und Daten für alle gewünschten Schadstoffe beinhaltet. Die HBEFA Datenbank beschreibt die Emission für Fahrzeugklassen und für verschiedene, durch Geschwindigkeit und Steigung definierte Verkehrszustände. Das Simulationsmodell benötigt jedoch kontinuierliche Inputgrößen für Geschwindigkeit und Beschleunigung. Die Umformulierung in ein kontinuierliches Modell erfolgte über einen Export der Datenbank. An die so erhaltenen Daten einer jeden Fahrzeugklasse sind im nächsten Schritt die Parameter einer Formel für die für die Fahrt aufzuwendenden Energie ([Treiber et al., 2008]) gefittet worden. Dabei wurde die in HBEFA enthaltene Information über die Steigung der befahrenen Straße in eine Beschleunigung umgerechnet. Damit kann man die HBEFA Daten in das kontinuierliche Modell für die Berechnung der Emissionen als Funktion von Geschwindigkeit und Beschleunigung umsetzen.

Um den Aufwand der Definition einer Fahrzeugpopulation bei der Erstellung eines Szenarios zu reduzieren sind die so erhaltenen Kurven der sechs gewählten Größen der über 130 in HBEFA enthaltenen Fahrzeugklassen mit Hilfe des clustering-Algorithmus von Hartigan und Wong ([Hartigan, Wong, 1979]) zu Klassen mit ähnlichem Schadstoffausstoß zusammen gefasst worden. Als Ergebnis sind zwei Varianten mit sieben bzw. vierzehn Fahrzeugklassen für PKWs sowie drei Varianten mit drei, sechs bzw. zwölf Klassen für LKWs umgesetzt worden.

Innerhalb der Simulation wird – wenn der Nutzer die Ausgabe der Emissionen wünscht – der Ausstoß eines Fahrzeugs in jeder simulierten Sekunde errechnet. Diese Werte können in der Simulationsoberfläche visualisiert (siehe Abbildung 2a) oder über die on-line-Schnittstelle abgefragt werden. Zudem ist die Simulation um eine Reihe von Ausgabedateien erweitert worden. So ist es möglich, aus einem Simulationslauf für jedes Fahrzeug die von ihm emittierten Schadstoffe zu erhalten, sowie über Zeit aggregierten Emissionen an Spuren oder Kanten (Straßen). Die in Abbildung 2b) gezeigte flächige Darstellung der Emissionen ist zurzeit in der Entwicklung.



Abbildung 2: a) Darstellung der aktuellen CO₂-Emissionen simulierter Fahrzeuge; b) Darstellung des simulierten CO₂-Ausstoßes in Braunschweiger Innenstadt, normaler Wochentag, 6:00 bis 7:00, Aggregation in Flächen von 100 m x 100 m

Routenwahl nach Schadstoffemission

Innerhalb von iTETRIS sollten die durch das Modell errechneten Schadstoffemissionen direkt als eine Steuergröße für die innerhalb dieses Projektes entwickelten Verkehrsmanagementansätze genutzt werden. Als ein möglicher Ansatz wurde hier die Reduktion von Schadstoffemissionen durch eine geschickte Routenwahl angesehen. Nach Ablauf des Projektes „iTETRIS“ wurden die im Nachfolgenden beschriebenen Forschungen zu diesem Thema innerhalb des Projektes „Verkehrs- und Mobilitätsmanagement“ (VMM) fortgeführt.

Bei der Modellierung des Verkehrs großer Regionen ist das sog. „traffic assignment“, oder auf deutsch „Verkehrsumlegung“, einer der grundlegenden Vorbereitungsschritte. Hierbei erhält jeder simulierter Straßennutzer, bei makroskopischer Modellierung eine Nutzermenge, explizite Routen durch das gegebene Straßennetz zugewiesen. Bei der Verkehrsumlegung wird häufig angenommen, der Verkehr eines gegebenen Untersuchungsgebiet würde sich selbstorganisiert dem sogenannten Nutzeroptimum (1. Prinzip von Wardrop [1952]) annähern. Das heißt, dass die Mehrzahl der Fahrer bei ihren Reisen versucht, die für sie günstigsten Routen zu benutzen, um ihre Reisekosten zu minimieren. Zumeist wird davon ausgegangen, dass die Straßennutzer den schnellsten Weg durch das Straßennetz nehmen. Dieser hängt allerdings stark von dem Fluß, d.h. von der Menge der Verkehrsteilnehmer über Zeit auf einer Straße ab, weil die Durchschnittsgeschwindigkeit mit steigender Anzahl von Verkehrsteilnehmern sinkt [Sheffi, 1992]. Da für komplexe Straßennetze eine analytische Umlegung nicht errechnet werden kann, wird im Allgemeinen die gegebene Nachfrage inkrementell oder iterativ auf das Straßennetz umgelegt. Inkrementelle Ansätze teilen die gegebene Nachfrage und errechnen nach der Routenberechnung für einen dieser Teile die resultierenden Netzgewichte um diese für die Wegesuche des nächsten Teils zu benutzen. Iterative Methoden führen zumeist die Routensuche und die Simulation wiederholt durch und passen die Routenwahl an die sich aus der aktuellen Routenverteilung ergebenden, durch die Simulation bestimmten Netzgewichte an. Innerhalb von SUMO wird der iterative Algorithmus von Christian Gawron [Gawron, 1999] benutzt, der Oszillationen in der Routenwahl durch einen Gedächtnisspeicher des Fahrers sowie eine gewichtete, stochastische Entscheidung eine neue Route zu übernehmen, vermeidet.

Im Unterschied zu diesem Standardverfahren der Umlegung sollte bei den nachfolgend vorgestellten Untersuchungen die Emissionsmengen eines bestimmten Schadstoffes für die Routenwahl genutzt

werden. Statt der Reisezeit versuchen die Nutzer ihre Emissionsmenge zu optimieren. In einem ersten Schritt sind die innerhalb von SUMO für die Umlegung benutzten Programme, hauptsächlich der den Gawron-Algorithmus beinhaltende *duarouter*, um die Fähigkeit zwei Zeitreihen für die Routenwahl zu benutzen, erweitert worden. Die erste Zeitreihe beinhaltet wie bei konventionellen Umlegungen die durchschnittliche Reisezeit auf den simulierten Kanten, die zweite die als Kantengewicht interpretierte Menge auf der jeweiligen Kante durchschnittlich ausgestoßenen Schadstoffe. Die Reisezeit wird immer noch benötigt, weil die zeitlichen Änderungen der Kantenbelastung über die Fahrdauer berücksichtigt werden sollen und daher die Zeit für das Passieren einer Kante benötigt wird.

In einem ersten Versuch ist die Umlegung nach den modellierten Schadstoffen für einen Ausschnitt des innerhalb von iTETRIS modellierten Gebietes um die Stadt Bologna durchgeführt worden. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse dieses Versuchs. Die Ordinatenachse gibt stets die Größe wieder, nach der die Kanten während der Umlegung gewichtet worden sind. Es zeigt sich, dass die Umlegung nach Schadstoffen zumeist zu qualitativ ähnlichen Ergebnissen führt wie die Umlegung nach der Reisezeit. Allerdings ist zu beobachten, dass nicht in jedem Fall die zu minimierende Größe im Vergleich zur Umlegung nach der Reisezeit auch tatsächlich geringer wird.

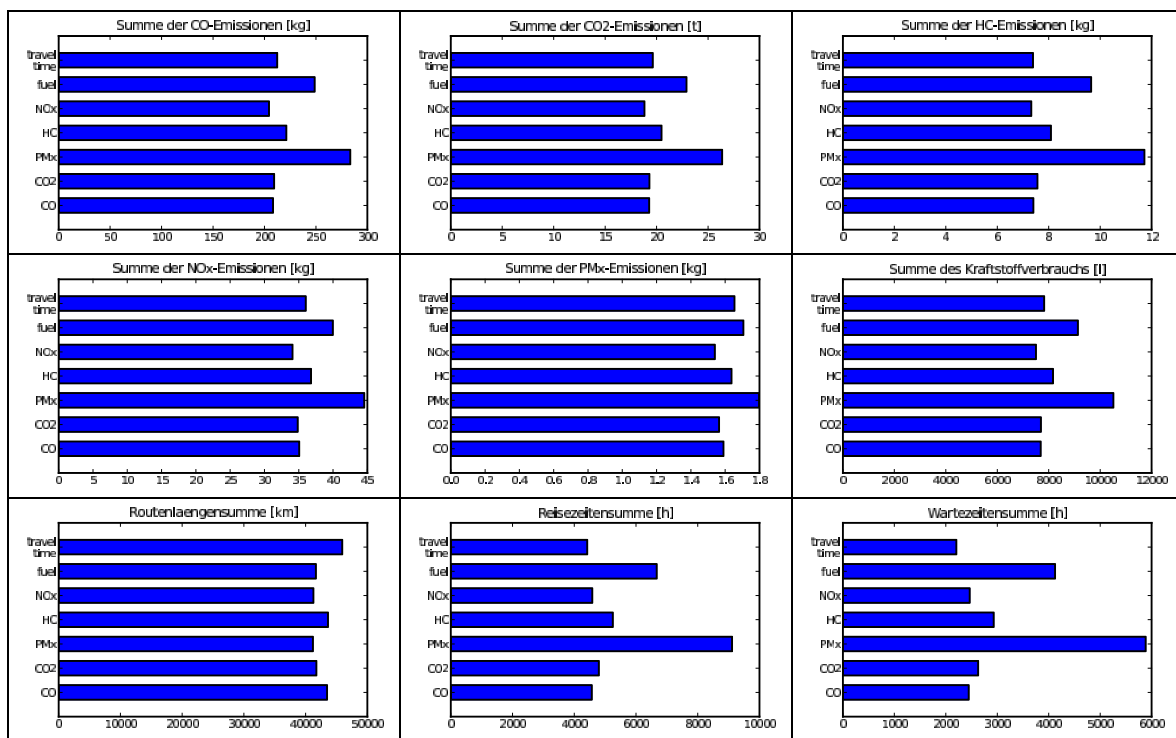


Abbildung 3: Vergleiche zwischen der Benutzung unterschiedlicher Größen für Kantengewichte hinsichtlich der betrachteten Kenngrößen; aus [Krajewicz et al., 2011]

Dieser Beobachtung wurde zunächst analytisch in einem vereinfachten Modell nachgegangen, siehe [Behrlich et al., 2012]. In Abbildung 4 ist ein einfaches Modell für die Abhängigkeit zwischen der Verkehrsnachfrage und der Reisezeit, sowie dem hier exemplarisch gewählten Kraftstoffverbrauch dargestellt. Es fällt auf, dass der Kraftstoffverbrauch im Gegensatz zur Reisezeit nicht kontinuierlich mit steigender Nachfrage steigt. Statt dessen ist von einer für den Verbrauch optimalen Geschwindigkeit von ca. 60km/h auszugehen, die in dem gewählten Beispiel bei einer Nachfrage von 1000 Fz/h zu einem Minimum des Verbrauches führt.

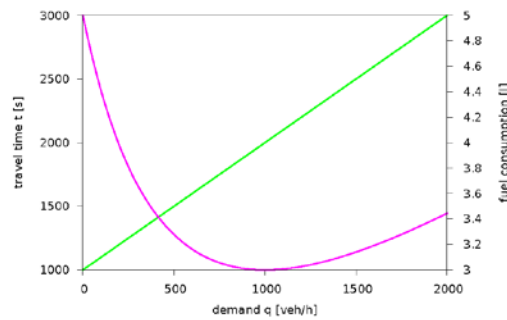


Abbildung 4: Abhängigkeit der Reisegeschwindigkeit und des Kraftstoffverbrauchs vom Fluß; aus [Behrisch et al., 2012]

Diese Eigenschaft des Kraftstoffverbrauchs zeigt im Hinblick auf eine Umlegung bzw. Routenwahl einige interessante Besonderheiten. So können sich höhere Auslastungen einer Straße, die eine Verringerung der Durchschnittsgeschwindigkeit nach sich ziehen, auf den Schadstoffausstoß positiv auswirken. Bei der Betrachtung einfacher Netze zeigt sich zudem, dass nicht mehr von nur einem Optimum für die Routenverteilung ausgegangen werden kann, sondern, in Abhängigkeit von der Nachfrage, auch mehrere Optima auftreten können, siehe Abbildung 5a). Diese analytisch bestimmte Eigenschaft konnte auch simulativ bestätigt werden, wie Abbildung 5b) zeigt. Bei der Errechnung einer Umlegung für komplexere Netze kann dies zur Oszillation der gewählten Routen führen und somit eine eindeutige Lösung verhindern.

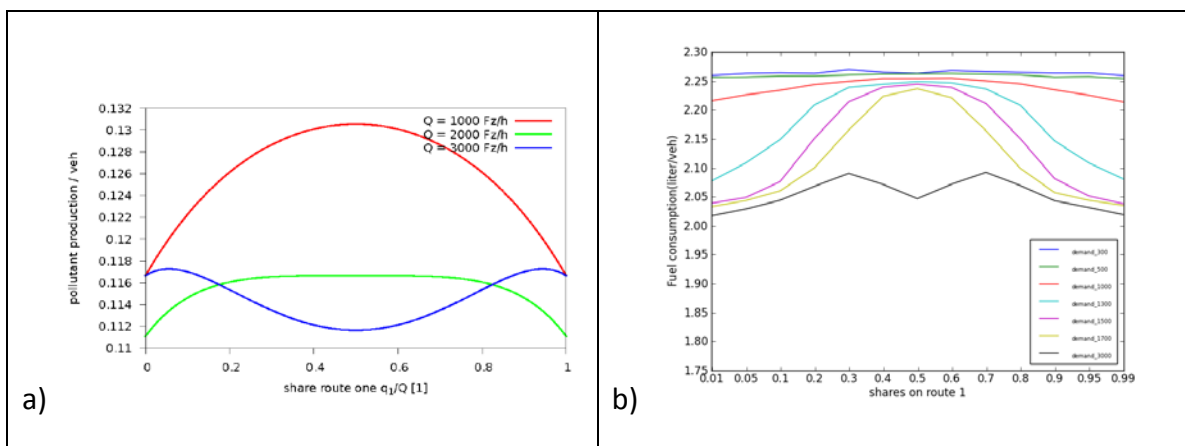


Abbildung 5: Güte von Routenverteilungen in einem einfachen Netz mit zwei Routenalternativen; a) analytische Bestimmung, b) Bestimmung mittels der Simulation; aus [Behrisch et al., 2012]

Werden die Schadstoffemissionen stark bedingenden Beschleunigungen ebenfalls in Betracht gezogen ([Flötteröd et al., 2012]), scheint sich die Problematik mehrerer Optima teilweise aufzulösen. Allerdings sollte bemerkt werden, dass Beschleunigungsvorgänge unterschiedliche Gründe und Ausprägungen besitzen können, während in [Flötteröd et al., 2012] lediglich das Einnehmen einer gemeinsamen Spur durch zwei Flüsse betrachtet worden ist. Die Auswirkungen des Zusammenspiels aus unbeschleunigter Fahrt und Beschleunigungsvorgängen innerhalb komplexer Straßennetze auf Emissionen und die diese zu optimieren versuchende Routenwahl können daher noch nicht abschließend beschrieben werden.

Auch prinzipiell stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit einer schadstoff-/verbrauchsoptimierten Routenwahl ins reale Leben. So fehlt es an Sensorik, die reale Emissionen bemessen und für die Routenwahl zur Verfügung stellen könnte. Die unterschiedlichen Kennkurven für die verschiedenen Schadstoffe erlauben auch keine einheitliche Routenwahl – hier wäre eine z.B. über Monetarisierung hergeleitete Funktion nötig, in der die Schadstoffe unterschiedlich bewertet

werden würden. Letztendlich ist auch die Nutzung einer bereits stark benutzten Straße für die Senkung der Emissionen nur schwer zu vermitteln. So bleiben die aufgezeigten Untersuchungen zunächst rein abstrakter Natur.

Simulation realer Verkehrsmanagementmaßnahmen

Neben grundlegenden, abstrakten Untersuchungen wird im Rahmen des Projektes VMM mit der Evaluation bereits vorliegender, realer Verkehrsmanagementideen, -konzepten und -maßnahmen zur Schadstoffreduktion begonnen. Zunächst werden „grobe“ Konzepte, wie stadtglobale Geschwindigkeitsreduktion oder -erhöhung, respektive die Änderung der Geschwindigkeitsbeschränkungen an umliegenden Autobahnen betrachtet. Hierbei kommt hauptsächlich das innerhalb des DLR-Großforschungsprojektes „Anwendungsplattform Intelligente Mobilität“ (AIM) im Aufbau befindende Simulationsszenario der Stadt Braunschweig, siehe auch Abbildung 1, zur Anwendung, welches sich durch einen hohen Modellierungsgrad auszeichnen soll. Neben synthetischen Modellen der Bevölkerung, die auf Änderungen mobilitätsbeeinflussender Faktoren reagieren, wird das Szenario den ÖPNV, Parkmöglichkeiten sowie reale Pläne für die Lichtsignalanlagen, beinhalten.

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse von Szenarien gegeneinander gesetzt, innerhalb der die Geschwindigkeitsbeschränkungen global verändert worden sind. Ausgangspunkt war die aktuelle Version des AIM-Szenarios, wobei zurzeit:

- a) die Nachfrage auf einer 24h-Matrix beruht, die disaggregiert worden ist, d.h. zeitliche Änderungen spiegeln sich nur in der Fahrzeuganzahl wieder, nicht jedoch in der Richtung der Ströme,
- b) noch nicht die realen LSAs in der Simulation umgesetzt worden sind.

Für das Straßennetz sind zunächst innerstädtische Straßen sowie Autobahnstraßen bestimmt worden, wie in Abbildung 6 gezeigt.

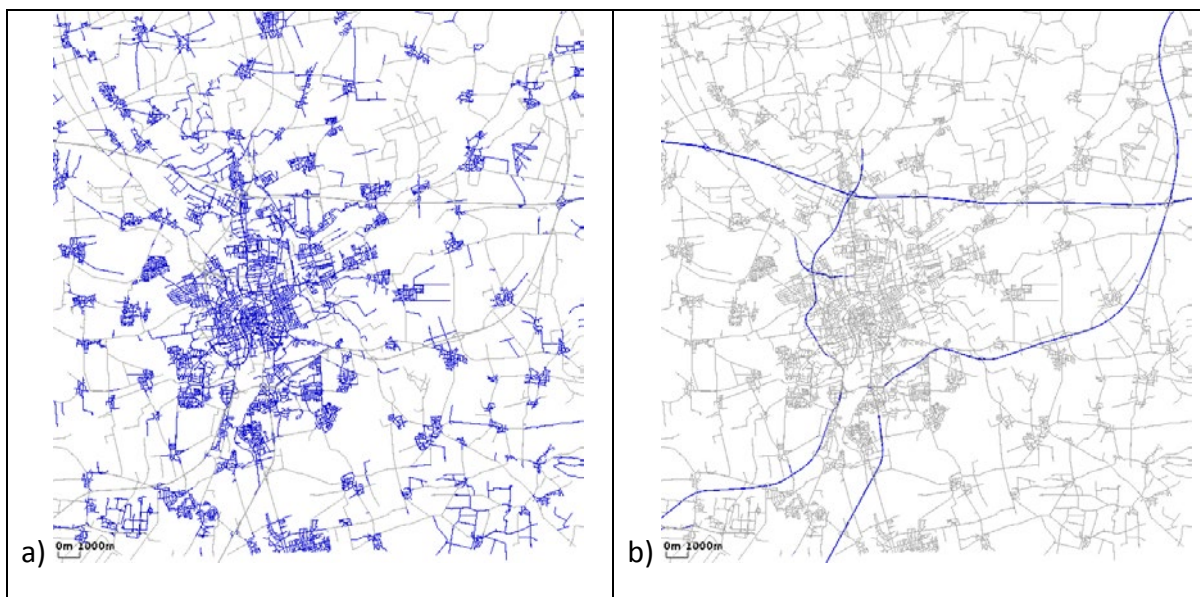


Abbildung 6: a) als „Stadtstraßen“ gewählte Straßen des Straßennetzes (blau); b) als „Autobahnen“ gewählte Straßen

Auf dieser Auswahl basierend sind drei Alternativszenarien erstellt worden:

- „Stadt30“: Geschwindigkeitsbeschränkung auf 30km/h für alle „Stadtstraßen“
- „Stadt60“: Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60km/h für alle „Stadtstraßen“
- „Autobahn80“: Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60km/h für alle „Autobahnstraßen“

Bei den nachfolgenden Simulationen ist berücksichtigt worden, dass Fahrer/Fahrerinnen aufgrund der veränderten Reisezeiten eine neue Route wählen. Die Auswertung, siehe Abbildung 7, zeigt, dass eine Änderung der innerstädtischen Geschwindigkeit nur wenig Auswirkungen auf den Gesamtausstoß an CO₂ hat, bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 30km/h aber mehr Fahrzeuge, insbesondere während der Spitzenstunden, unterwegs sind. Trotz ähnlicher Fahrzeuganzahl, bringt eine Reduktion der erlaubten Geschwindigkeit auf Autobahnen jedoch eine deutliche Reduktion des CO₂-Ausstosses.

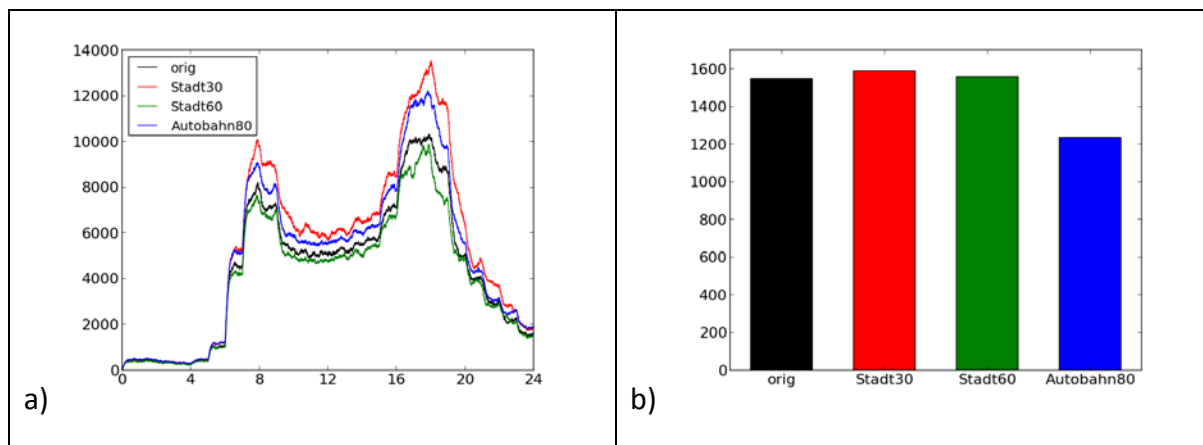


Abbildung 7: Vergleiche der Ergebnisse der vier Szenarien; a) Fahrzeuganzahl über Zeit (in Stunden), b) errechnete CO₂-Gesamtausstoß simulierter Fahrzeuge in t

Da Schadstoffe vorrangig in den bewohnten, innerstädtischen Bereichen problematisch sind, ist es notwendig zu betrachten, wo Schadstoffe entstehen. Die Abbildungen 8 zeigen auf der linken Seite wie sich der Verkehr aufgrund der veränderten Geschwindigkeitsbegrenzungen verlagert. Wie erwartet werden innerstädtische Straßen seltener benutzt, wenn die erlaubte Geschwindigkeit auf 30km/h reduziert wird. Eine Erhöhung der erlaubten Geschwindigkeit auf 60km/h macht die Nutzung innerstädtischer Straßen attraktiver, verlagert also mehr Verkehr in die Stadt hinein. Dies spiegelt sich in der innerhalb der Stadt ausgestoßenen Menge an CO₂ wieder.

Die simulierte Reduktion der auf Autobahnen erlaubten Geschwindigkeit verlagert den Verkehr hauptsächlich auf die umliegenden Landstraßen, sowie in den innerstädtischen Bereich. Die meiste Zunahme an CO₂-Emissionen ist jedoch nur auf den Landstraßen zu beobachten, die innerstädtischen Bereiche scheinen nicht im hohen Maße betroffen zu sein, genaueres müssen weitere Auswertungen klären.

Die vorgestellten Untersuchungen sollten prinzipielle Möglichkeiten, Verkehrsmanagementmaßnahmen zur Schadstoffausstoßminderung mit Hilfe von Simulationen zu untersuchen, aufzeigen. Im nächsten Schritt sollen die in der MARLIS-Datenbank ([BASt, 2013]) vorliegenden Maßnahmen in der Simulation abgebildet und ausgewertet werden. Eine hierbei zu lösende Frage ist die nach der Übertragbarkeit der Szenarien auf andere Gebiete. Da der Aufwand für das Erstellen eines mikroskopischen Szenarios einer Stadt hoch ist, wird versucht werden, die

Maßnahmen auf bereits verfügbare Szenarien, insbesondere das AIM-Szenario der Stadt Braunschweig zu übertragen.

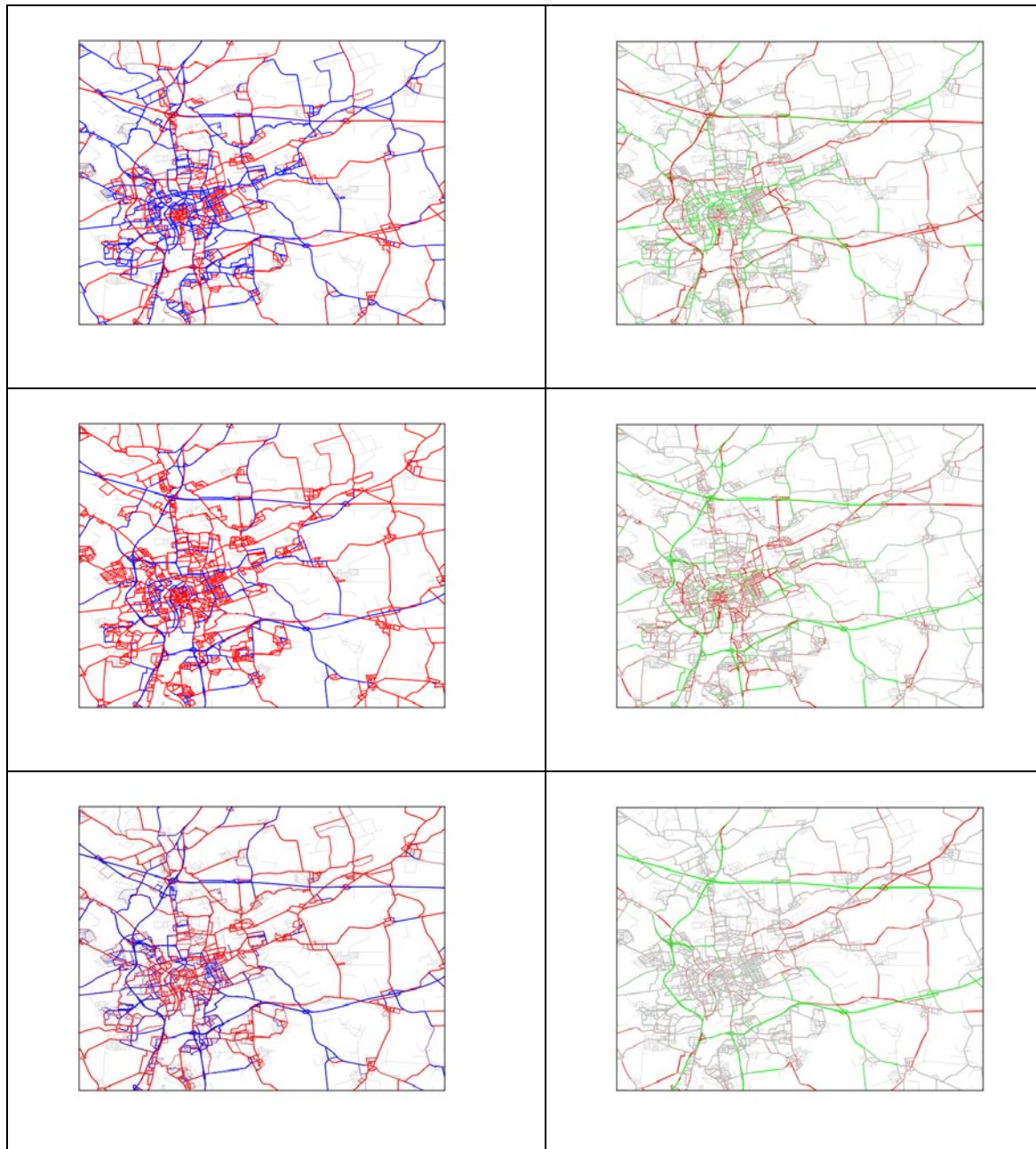


Abbildung 8: links: Veränderungen in der Straßennutzung (blau: weniger Fahrzeuge als im Originalszenario, rot mehr Fahrzeuge); rechts: Veränderungen in den Emissionen (grün weniger CO₂-Emissionen, rot mehr); von oben nach unten: Szenarien „Stadt30“, „Stadt60“, „Autobahn80“

Da die Untersuchung das Hauptaugenmerk auf Verkehrsmanagementmaßnahmen zur Steuerung des Verkehrs legt, die sich direkt in der Änderung der Nachfrage wiederfinden, sind nicht alle in der MARLIS-Datenbank enthaltene Maßnahmen relevant. So werden Öffentlichkeitsarbeiten oder – mit einigen Ausnahmen – die Änderungen in der Fahrzeugflotte nicht betrachtet werden.

Zusammenfassung

Gezeigt wurden die Ergebnisse abgeschlossener und laufender Arbeiten des ITS/DLR zum schadstoffreduzierenden Verkehrsmanagement in denen die Simulationssoftware „SUMO“

eingesetzt worden ist, sowie das in dieser Software benutzte Modell zur Schadstoffemission. Sie zeigen die Potentiale von Verkehrssimulationen für die Bemessung schadstoffreduzierender Maßnahmen des Verkehrsmanagements auf.

Die vorgestellten Untersuchungen zur Routenwahl anhand emittierter Schadstoffe zeigen weiteren Forschungsbedarf. Offene Fragen sind zum Beispiel: Welche Auswirkungen hat die Oszillation bei der Routenwahl? Wie stark ist der Einfluß von Beschleunigungsvorgängen, wie stark der der freien Fahrt in realen Netzen? Wenn ein solches „Routing“ kaum in der Realität zum Einsatz kommen wird, so helfen die Untersuchungen die Beziehungen zwischen Verkehrsfluß und Schadstoffemission besser zu verstehen.

Quellenverzeichnis

[DLR, 2002] SUMO Webseite. Online: <http://sumo.sf.net>. Zuletzt besucht am 16.01.2013.

[Krajzewicz et al., 2012] Krajzewicz, D.; Erdmann, J.; Behrisch, M.; Bieker, L. (2012) *Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility*. In: International Journal On Advances in Systems and Measurements, 5 (3&4), Seiten 128-138. ISSN 1942-261x.

[Behrisch et al., 2010] Behrisch, M.; Erdmann, J.; Krajzewicz, D. (2010) *Adding intermodality to the microscopic simulation package SUMO*. MESM 2010, 01-03.Dez. 2010, Alexandria, Ägypten.

[Krauß et al., 1997] Krauss, S.; Wagner, P.; Gawron, C. (1997) *Metastable states in a microscopic model of traffic flow*. Phys. Rev. E, American Physical Society, 1997, 55, Seiten 5597-5602.

[Krajzewicz, 2010] Krajzewicz, D. (2010) *Traffic Simulation with SUMO - Simulation of Urban Mobility*. In: Barceló, J. (Ed.) *Fundamentals of Traffic Simulation*, Springer, 2010, Seiten 269-294.

[Wegener et al., 2008] Wegener, A.; Piórkowski, M.; Raya, M.; Hellbrück, H.; Fischer, S.; Hubaux, J.-P. (2008) *TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators*. In: 11th Communications and Networking Simulation Symposium (CNS), ACM, 2008, Seiten 155-163.

[Lazaro, Robert, 2009] Lazaro, O.; Robert, E. (2009) *iTETRIS: The Simulation Platform to Valorise Cooperative ITS in Effective Traffic Management*. In: ITS Traffic Technology International Magazine, August/September 2009.

[iTETRIS, 2010] iTETRIS Konsortium (2010) Internetauftritt des Projektes iTETRIS, <http://www.ict-itetris.eu/>, zuletzt besucht am 16.01.2013.

[INFRAS, 2010] INFRAS (2010). Handbuch der Emissionsfaktoren. <http://www.hbefa.net/>, zuletzt besucht am 16.01.2013

[Krajzewicz et al., 2011] Krajzewicz, D.; Bieker, L.; Brockfeld, E.; Nippold, R. & Ringel, J. (2011) *Ökologische Einflüsse ausgewählter Verkehrsmanagementansätze*. Heureka '11.

[Treiber et al., 2008] Treiber, M.; Kesting, A.; Thiemann, C. (2008). *How Much does Traffic Congestion Increase Fuel Consumption and Emissions? Applying a Fuel Consumption Model to the NGSIM Trajectory Data*. Präsentation Nr. 08-2715 at the Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 13-17, 2008, Washington, DC.

[Hartigan, Wong, 1979] Hartigan, J. A.; Wong, M. A. (1979) *A K-means clustering algorithm*. In: Applied Statistics 28, 100–10, 1979.

[Wardrop, 1952] Wardrop, J. G. (1952) Some theoretical aspects of road traffic research. In: Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Vol 1, 325-378.

[Sheffi, 1992] Sheffi, Y. (1992) *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ 07632, online: <http://web.mit.edu/sheffi/www/urbanTransportation.html>

[Gawron, 1999] Gawron, C. *Simulation-Based Traffic Assignment -Computing User Equilibria in Large Street Networks*. Dissertation, Universität zu Köln, Informatik, Universität zu Köln, 1999

[Behrisch et al., 2012] Behrisch, M.; Flötteröd, Y.-P.; Krajzewicz, D.; Wagner, P. (2011) *Ecological User Equilibrium?* In: DTA 2012, 4.-6. Juni 2012, Martha's Vineyard, Massachusetts, USA.

[Flötteröd et al., 2012] Flötteröd, Y.-P.; Wagner, P.; Behrisch, M.; Krajzewicz, D. (2012) *Simulated-based Validity Analysis of Ecological User Equilibrium*. In: Winter Simulation Conference Archive. 2012 Winter Simulation Conference, Berlin, Deutschland

[BASt, 2013] BASt (2013) Internetseite zur MARLIS-Datenbank, online: http://www.bast.de/nn_42544/DE/Publikationen/Datenbanken/MARLIS/MARLIS.html. Zuletzt besucht am 17.01.2013