



Stau in der Stadt.

# Staus vermeiden, Abgase reduzieren

## Simulationen optimieren Verkehrsleitstrategien

Frankfurt, an einem gewöhnlichen Morgen gegen 8:00 Uhr: Von Osten strömen zahlreiche Pendler über die A 66 in Richtung Innenstadt. Spätestens »Am Erlenbruch« kommt es zu Staus und zäh fließendem Verkehr. Frankfurter Informatiker können diese Staus mithilfe eines Simulationssystems vorhersagen. Mehr noch: Sie berechnen den Ausstoß von Schadstoffen und deren Verteilung über das Stadtgebiet. Ziel ist die Optimierung von Verkehrsleitstrategien.

von Jörg  
Dallmeyer und  
Andreas Lattner

Die Straßennetze in Großstädten wie Frankfurt sind häufig überlastet. Was für die Autofahrer ein Ärgernis und für die Anwohner eine Belastung ist, bringt auch wirtschaftliche und gesundheitliche Probleme mit sich: Im Stop-and-go-Verkehr erhöhen sich sowohl der Kraftstoffverbrauch als auch die erzeugten Abgase. Da es aus ökonomischen Gründen meist nicht möglich und aus ökologischen Gründen auch nicht wünschenswert ist, neue Straßen zu bauen oder bestehende um zusätzliche Spuren zu erweitern, sind verbesserte Verkehrsleitstrategien das Mittel der Wahl. Wegen ihrer hohen Kosten und Risiken können sie nicht direkt in einer Stadt getestet werden. An dieser Stelle setzen Computersimulationen von Verkehrsszenarien an.

Eine realistische Simulation des urbanen Verkehrs versucht, relevante Teilaspekte der Realität nachzubilden. Ist das gelungen, können zukünftige Situationen abgeschätzt werden. Die Herausforderung besteht bei einem Szenario mit einer Stadt der Größe Frank-

furts am Main in der Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Autos, Fahrradfahrern und Fußgängern. Fahrräder fahren langsamer als Autos, können aber dort, wo es keine Fahrradwege gibt, je nach Verkehrssituation nicht immer überholt werden. Ebenso zwingen Fußgänger-Ampeln den Autoverkehr zum Halten. Busse und oberirdisch fahrende U-Bahnen verringern zwar die Zahl der Pkws auf der Straße, behindern andererseits aber den Autoverkehr, wenn sie an Haltestellen nicht überholt werden können. Einen großen Einfluss auf die Entstehung von Staus haben außerdem Ampelschaltungen, vor allem entlang großer Ausfallstraßen.

### Jeder Autofahrer, Radfahrer und Fußgänger wird simuliert

Zusätzlich muss ein Szenario mit vielen tausend Verkehrsteilnehmern in einem Straßennetz dieser Größenordnung simuliert werden können. Die Modelle sollten das Fahrverhalten und die Verkehrsnachfrage

in der Region realistisch abbilden. Um möglichst umweltfreundliche Verkehrsleitstrategien ermitteln zu können, muss die Simulation auch Schadstoffemissionen über große geographische und zeitliche Bereiche berechnen können. Schließlich interessieren auch die Auswirkungen nicht regelkonformen Verhaltens. Das bedeutet, dass jeder Verkehrsteilnehmer als eigener Akteur simuliert werden muss.

Eine manuelle Modellierung des Raums um Frankfurt am Main ist wegen seiner Größe zu zeitaufwendig. Daher entwickelte die Arbeitsgruppe für Wirtschaftsinformatik und Simulation ein Verkehrssimulationssystem, welches das Straßennetz automatisiert aus Kartenmaterial extrahiert. MAINSIM (**M**ultimodale **I**nnerstädtische Straßenverkehrss**im**ulation) verwendet lizenzkostenfreies Kartenmaterial von OpenStreet-Map (OSM), bei dem jedermann kartografieren kann. Aufgrund der freiwilligen und unvergüteten Arbeit zur Erfassung von Straßenkarten verhält sich das Projekt hinsichtlich des Wachstums und seiner Qualität ähnlich zur Online-Enzyklopädie Wikipedia. MAINSIM kann OSM-Kartenmaterial automatisiert in ein zur Simulation geeignetes Format konvertieren.

Nach dem Einlesen wird das Kartenmaterial zur weiteren Analyse in verschiedene Ebenen aufgeteilt. Das Programm berechnet einen einfachen Graph, der an-

### Auf den Punkt gebracht

- Simulationen helfen, die Entstehung von Staus zu verstehen und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung zu testen.
- Die Software MAINSIM kann das Straßennetz automatisch aus Kartenmaterial extrahieren, so dass auch große Verkehrsräume effizient modelliert werden können.
- Die Kopplung des Verkehrs-Simulationssystems an eine Gassimulation und Wetterdaten erlaubt Vorhersagen zur Verbreitung von Schadstoffen.

### Fußgänger verschätzen sich oft beim Überqueren der Straße

Die Simulation verwendet Verkehrsmodelle für Autos, Fahrräder und Fußgänger. Das Automodell basiert auf dem primär für die Verkehrssimulationen von Autobahnverkehr entwickelten Nagel-Schreckenberg-Modell: »Beschleunige, wenn möglich«, »Halte den Sicherheitsabstand zum Vordermann«, »Trödele zufällig«. Zur Anwendung in innerstädtischen Szenarien haben wir im Rahmen des MAINSIM-Systems



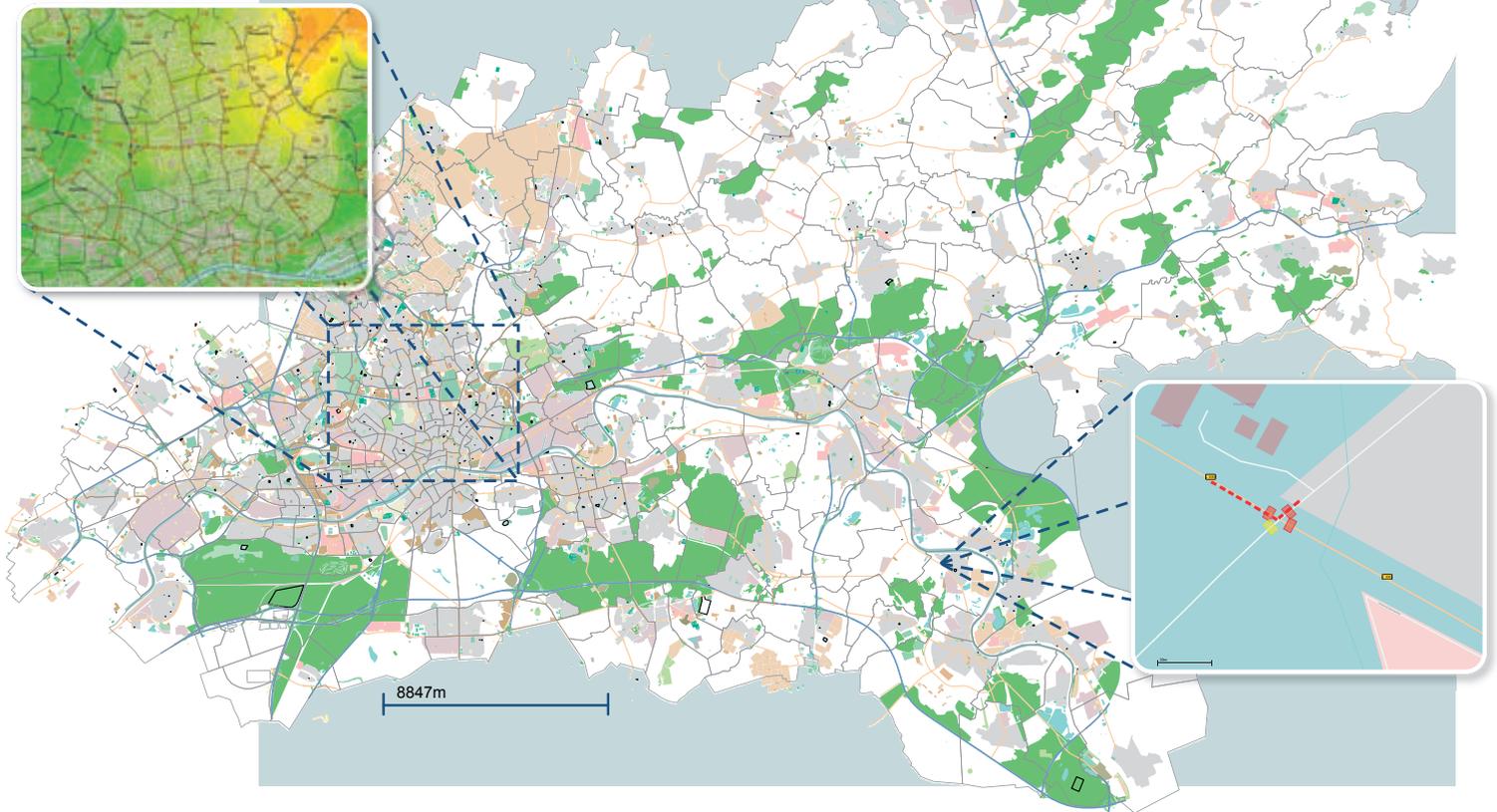
Ein neuralgischer Streckenabschnitt im Frankfurter Osten ist die Straße »Am Erlenbruch«. Hier treffen Autos von der A 66, aus Bergen-Enkheim und Seckbach zusammen, die allesamt stadteinwärts pendeln.

schließlich diverse komplexe Analyse- und Verfeinerungsschritte durchläuft. Fehlende Informationen, etwa zu Geschwindigkeitsbegrenzungen, werden anhand des Straßentyps abgeschätzt. Eine Landstraße erhält somit 100 km/h. Wenn die Landstraße jedoch durch einen Ort verläuft, wird der innerörtlich verlaufende Teil der Straße auf 50 km/h begrenzt. Zusätzlich werden Kurvenverläufe analysiert, damit das Programm realistisch fahrbare Geschwindigkeiten verwendet.

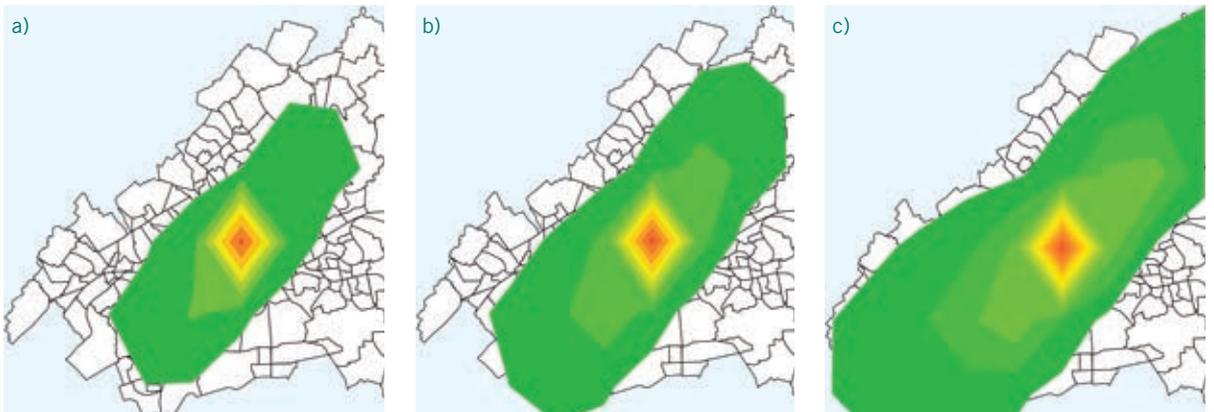
zahlreiche Verfeinerungen und Erweiterungen vorgenommen. Autos können Fahrräder überholen, wenn die Lücke im Verkehr dies zulässt oder die Straße breit genug ist. Fahrräder verhalten sich ähnlich wie Autos, sind jedoch langsamer. Sie verfügen über gesonderte Verhaltensweisen und bevorzugen andere Routen durch das Straßennetz. Bei den Fußgängern haben wir besonderen Wert auf eine realistische Abbildung der Geschwindigkeiten und des Straßenüberquerungs-

## Auftakt

3 Simulationsbereich von MAINSIM mit den genutzten Zellen als Quell- beziehungsweise Zielregionen. Dargestellt ist das Straßennetz mit hinterlegten Höheninformationen. Der vergrößerte Ausschnitt rechts zeigt eine Kreuzung mit Ampelschaltung. Der andere Ausschnitt erfasst ungefähr den Bereich, der zur Messung der Emissionen genutzt wird.



4 Verteilung der Schadstoffemissionen bei der Simulation des durchschnittlichen Wetters im Jahr 2011. Es werden variierende Emissionsmengen von minimal [a] über durchschnittlich [b] bis maximal [c] gezeigt. Diese Emissionsmengen resultieren aus unterschiedlichen Verkehrssituationen.



verhaltens gelegt. Alle Verhaltensweisen basieren auf Daten aus Feldstudien.

Jedes der Modelle wurde gesondert analysiert und für hinreichend realistisch befunden. Da jeder Verkehrsteilnehmer einzeln simuliert wird, ermöglichen die Modelle individuelle Verhaltensparameter. Autos können beispielsweise unterschiedlich beschleunigen oder dicht auffahren. Fußgänger müssen bei Straßenüberquerungen abschätzen, wie lange sie dafür benötigen. Dabei verschätzen sie sich unterschiedlich stark – in der Simulation wie in der Realität. Eine Studie belegt, dass Fußgänger oft annehmen, eine Straße schneller überqueren zu können, als es tatsächlich der Fall ist. Die Simulation einzelner Verkehrsteilnehmer ist auch deshalb notwendig, weil diese ihre Routen anhand der aktuellen Verkehrssituation umplanen können oder an Kreuzungen auf ihre Vorfahrt verzichten können.

### Staus aus Simulationsdaten vorhersagen

In einer Studie mit MAINSIM haben wir die Entstehung von Staus in Frankfurt untersucht. Wir wollten wissen, ob der eingangs erwähnte morgendliche Stau an der Straße »Am Erlenbruch« vorhersagbar ist. 4 Für die Prognose haben wir maschinelle Lernverfahren eingesetzt, die Regelmäßigkeiten aus Simulationsdaten (mit und ohne Stau) automatisiert identifizieren können. Diese Daten haben wir generiert, indem wir die Anzahl der Autos in den umliegenden Stadtteilen Bergen-Enkheim, Seckbach, Riederwald und auf der A 66 Richtung Frankfurt in einem Simulationslauf zu einem bestimmten Zeitpunkt gezählt haben. Anschließend wurde die Simulation für fünf Minuten fortgesetzt, also nach einer einfachen Schätzung die Zeit, welche die Autos bis zum Erreichen der Straße »Am Erlenbruch« benötigen. Die dann vorliegende Verkehrssituation wurde als Stau klassifiziert, wenn

## Zur Person



**Privatdozent Dr. Andreas D. Lattner**, 37, studierte Informatik an der Universität Bremen. Anschließend arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Intelligente Systeme des Technologie-Zentrums Informatik (TZI) an der Universität Bremen, unter anderem in den Bereichen Wissensmanagement, Intelligente Fahrzeuge und (Multi-)Agentensysteme. 2007 promovierte er, 2012 habilitierte er sich an der Universität Trier. Seit 2007 arbeitet er als Akademischer Rat in der Arbeitsgruppe für Wirtschaftsinformatik und Simulation an der Goethe-Universität. Zu seinen Forschungsinteressen zählen unter anderem Wissensentdeckung und Automatisierung in der Simulation, maschinelles Lernen und Wissensrepräsentation für autonome Systeme in dynamischen Umgebungen.

### Andreas Lattner .....

- Ein guter Arbeitstag beginnt mit* einem Becher Kaffee.
- Am liebsten bewege ich mich* fort mit meinen Beinen und mit dem Fahrrad.
- Rat suche ich im* Gespräch mit Familie, Freunden und Kollegen.
- Zuhause ist für mich* das (mobile) Basislager des täglichen Lebens.
- Den Kindern rate ich:* »Genießt Ratschläge mit Vorsicht und bildet Euch eure eigene Meinung.«
- Mein Weg führt mich* an schöne Orte, wo ich schöne Zeiten verbringe.

[lattner@informatik.uni-frankfurt.de](mailto:lattner@informatik.uni-frankfurt.de)

die mittlere Geschwindigkeit der Autos unter 3,6 m/s lag. Zur zeitlichen Mittelung wurde eine Minute lang gemessen.

Die Ergebnisse von 20 000 Simulationsläufen dieser Art haben wir anschließend genutzt, um maschinell zu lernen, wann ein Stau entstehen wird. In weiteren Analysen wurde das Verfahren auf neu generierte Simulationsläufe angewendet. Dabei konnten in circa 84 Prozent der Verkehrssituationen Staus korrekt vorhergesagt werden. Fahrräder und Fußgänger wurden ebenfalls simuliert, dienten aber nicht zur Vorhersage von Staus, sondern als zusätzliche Einflussgröße, mit der wir die Robustheit des Verfahrens testeten.

### Wetterlage und Verteilung von Abgasen

In einer weiteren Studie haben wir das Simulationssystem um ein Kraftstoffverbrauchsmodell sowie die Erfassung von Schadstoffausstoßen erweitert. Das Modell berücksichtigt relevante Parameter des Fahrzeugs, wie Gewicht und Kraftstoffart, sowie die aktuelle Geschwindigkeit, Beschleunigung und Steigung der Straße. In die Berechnung geht ein digitales Geländemodell mit Höheninformationen ein. Darüber hinaus werden tatsächliche Verkehrsdaten in Form von Quelle-Ziel-Matrizen verwendet, die angeben, von welcher Quellregion wie viele Verkehrsteilnehmer in bestimmte Zielregionen fahren. Ist der aktuelle Kraft-

stoffverbrauch ermittelt, lässt sich auch der individuelle Schadstoffausstoß einzelner Kraftfahrzeuge bestimmen. Derzeit berechnen wir den CO<sub>2</sub>-Ausstoß. So lassen sich mit MAINSIM Schadstofflandkarten für beliebige Regionen erfassen, die einen schnellen Überblick geben, wo die meisten Schadstoffe entstehen. ■

Aufgrund atmosphärischer Bedingungen bleiben Schadstoffe nicht dort, wo sie entstehen. In einer Kooperation mit Prof. Guido Cervone der George Mason University (Department of Geography and GeoInformation Science) haben wir die Verkehrssimulation deshalb an eine Gassimulation angekopelt. Um zu sehen, wie sich die Schadstoffe ausbreiten, nutzten wir Wetterdaten, die am Flughafen Frankfurt gemessen wurden. Die Ergebnisse zeigen einerseits, dass multimodaler Verkehr und Höhenunterschiede messbaren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben. Andererseits ist deutlich geworden, dass je nach Wetter große Unterschiede in der Verteilung der Schadstoffe entstehen. ■ Darüber hinaus konnten wir zeigen, dass auch komplexe Szenarien auf handelsüblichen Computern mit MAINSIM simuliert werden können.

### Schneller ankommen oder weniger Benzin verbrauchen?

Die Simulation urbanen Verkehrs bietet vielfältige Möglichkeiten, bestehende Situationen zu analysieren und neue Verkehrsleitstrategien zu überprüfen. Eine Anwendungsmöglichkeit besteht darin, Verkehrssysteme nach verschiedenen Kriterien zu optimieren, beispielsweise geringe durchschnittliche Fahrtzeiten versus geringen durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch. Die aktorsorientierte Modellierung ermöglicht es auch, weitere Szenarien durchzuspielen, etwa, welche Effekte es hat, wenn sich ein Teil der Verkehrsteilnehmer nicht an vorgegebene Regeln hält. Für Studien zur Mobilität der Zukunft werden Verkehrssimulationssysteme wie MAINSIM in den nächsten Jahren immer mehr Bedeutung erlangen. ◆

## Zur Person



**Dr. Jörg Dallmeyer**, 27, absolvierte an der Goethe-Universität den Bachelor- und Masterstudiengang Informatik. Er promovierte in der Arbeitsgruppe für Wirtschaftsinformatik und Simulation bei Prof. Ingo Timm. Inzwischen arbeitet er als »Solution Architect« in der Forschungsabteilung »Pattern Science« der CID GmbH in Freigericht.

### Jörg Dallmeyer .....

- Ein guter Arbeitstag beginnt mit* einer Tasse Kaffee.
- Am liebsten bewege ich mich* mit dem Auto fort.
- »Entschleunigen« bedeutet für mich,* Zeit mit der Familie, Freunden, dem Fahrrad oder der Gitarre zu verbringen.
- Als Jugendlicher wollte ich* Informatiker werden.
- Zuhause* ist es am schönsten.
- Den Kindern rate ich,* den eigenen Weg zu gehen und gelegentlich auf die Älteren zu hören.

[dallmeyer@informatik.uni-frankfurt.de](mailto:dallmeyer@informatik.uni-frankfurt.de)