

Ganzheitliche Modellierung von Verkehrsabläufen auf Autobahnen

Dr.-Ing. Martin Rose
Institut für Bauinformatik
Universität Hannover
(rose@bauinf.uni-hannover.de)

Es wird die Entwicklung einer ganzheitlichen Modellierung von Autobahnverkehr gezeigt, deren Implementierung in einem computergestützten Simulationsmodell eine einheitlich vergleichende Beurteilung unterschiedlicher Modellierungen zur Simulation von Verkehrsabläufen und eine systematische Kopplung verschiedenartiger Verkehrssimulationen, Verkehrsbeeinflussungen und Verkehrsmessungen für verschiedene Verkehrsszenarien in einem Autobahnnetz ermöglicht.

Üblicherweise basiert die Simulation von Verkehrsabläufen auf mikroskopischen, makroskopischen oder mesoskopischen Verkehrsmodellierungen. Es wird eine regelbasierte mikroskopische Modellierung und eine, aus Navier-Stokes-ähnlichen Gleichungen bestehende, makroskopische Modellierung gezeigt. Eine Integration der mikroskopischen Modellierung in eine makroskopische Modellierung führt zu einer neuen regelbasierten mesoskopischen Modellierung. Die drei verschiedenen Modellierungen werden numerisch durch verschieden numerische Verfahren umgesetzt. Insbesondere wird die Finite-Elemente-Methode erfolgreich auf die makroskopische Modellierung angewendet.

Die Simulationen, die durch die Implementierung der numerischen Umsetzung der drei Modellierungen entstehen, werden innerhalb des Programmsystems einheitlich und systematisch auf ihre Brauchbarkeit mit Hilfe einer Störungsanalyse und eines Vergleichs von Simulationsergebnissen mit Detektordaten geprüft. Sowohl die mikroskopische wie auch die makroskopische Simulation sind in der Lage, typische Verkehrsphänomene, wie Verkehrsstaus oder Stop-and-Go-Wellen zu reproduzieren. Mit einer geeigneten Wahl der Geschwindigkeit-Abstand-Relation erweist sich die mesoskopische Simulation als konsistente Verbindung zwischen den mikroskopischen und makroskopischen Simulationen. Die Geschwindigkeit-Abstand-Relation beziehungsweise die Geschwindigkeit-Dichte-Relation sind die entscheidenden Parameter der gezeigten Simulationen. Auf Änderungen dieser Parameter reagieren die Simulationen besonders sensitiv.

Einleitung

Die Sicherheit und Leistungsfähigkeit des Straßenverkehrs erfordert zunehmend direkte Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen, die auf der Basis möglichst zutreffender Verkehrsprognosen durchgeführt werden. Für kurz- und mittelfristige Verkehrsprognosen ist eine hinreichend genaue Kenntnis sowohl des aktuellen Verkehrszustands als auch des daraus resultierenden zukünftigen Verhaltens der Verkehrsabläufe notwendig. Die aktuellen Verkehrszustände lassen sich aus Verkehrsmessungen und die Verhaltensweisen der Verkehrsabläufe mit dynamischen Simulationen bestimmen.

Die Untersuchung von Verkehrsabläufen in einem Autobahnnetz mit Hilfe von Verkehrssimulationen ist seit längerer Zeit ein Forschungsschwerpunkt im Bereich des Verkehrswesens. Es existieren bereits zahlreiche Programme zur dynamischen Simulation von Verkehrsabläufen [2]. Da jedoch aufgrund der individuellen Einflüsse des Straßenverkehrs keine geschlossene analytische Lösung für das Verhalten real auftretender Verkehrsabläufe existiert, ist es nicht möglich, festzustellen, ob eine Modellierung zur Simulation von Verkehrsabläufen korrekt ist. Eine Beurteilung der Brauchbarkeit einer dynamischen Verkehrssimulation kann ausschließlich durch Vergleiche getroffen werden. Üblicherweise werden Ergebnisse eines Simulationsprogramms mit Ergebnissen einer Messung oder anderer Simulationsprogramme verglichen. Hierbei wird weder auf die Beschaffenheit der Verkehrsmodellierung noch auf die Qualität der Vergleichsdaten eingegangen.

Ein umfassender Vergleich makroskopischer Modellierungen von Verkehrsabläufen auf einem Fahrbahnabschnitt einer Autobahn unter Berücksichtigung der mathematischen Modellansätze

ze, der numerischen Umsetzung und der Simulationsergebnisse für ausgewählte und nachvollziehbare Verkehrsszenarien wird in [1] beschrieben. Es zeigt sich, dass eine solche Untersuchung auch auf mikroskopische und mesoskopische Verkehrsmodellierungen anzuwenden ist und dass entsprechend der gegebenen Verkehrsprobleme Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen und Verkehrsmessungen von Anfang an in der Modellierung zu berücksichtigen sind.

Es wird eine ganzheitliche Modellierung gezeigt, die innerhalb eines Programmsystems einen einheitlichen Rahmen für eine vergleichende Beurteilung unterschiedlicher Modellierungen zur Simulation von Verkehrsabläufen und eine systematische Kopplung von Verkehrsmessungen und Verkehrssimulationen unter besonderer Berücksichtigung von Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen darstellt.

Die Grundlagen für die ganzheitliche Modellierung bildet eine allgemein Beschreibung von Autobahnverkehr. Mit dieser Beschreibung lässt sich der Autobahnverkehr so modellieren, dass er sich bezüglich unterschiedlicher Verkehrsprobleme variabel nutzbar ist. Dabei wird die Modellierung der Verkehrsabläufe exemplarisch an einer mikroskopischen, einer makroskopischen und einer mesoskopischen Modellierung aufgezeigt. Die Modellierungen sind numerisch umzusetzen. Hierzu eignen sich, die aus anderen Ingenieurbereichen bekannten, numerischen Verfahren, wie Finite-Differenzen-Verfahren oder Finite-Elemente-Verfahren. Die Implementierung der numerischen Umsetzungen führt zu den Simulationen, die anhand einer Störungsanalyse und eines Ergebnisvergleichs mit Messdaten verifiziert wird.

Autobahnverkehr

Die Grundlage der Modellbildung besteht aus einer Beschreibung von Autobahnverkehr. In Anlehnung an eine objektorientierte Analyse werden die Komponenten eines Autobahnverkehrs mit ihren strukturellen, geometrischen und physikalischen Eigenschaften beschrieben. Bei der Beschreibung des Autobahnnetzes sowie der Kraftfahrzeuge, der Verkehrsabläufe, der Verkehrsbeeinflussung und der Verkehrsmessung im Autobahnnetz können ihre Eigenschaften und Zusammenhänge deutlicher als in bisherigen Autobahnmodellen herausgearbeitet werden. Wesentlich ist die Berücksichtigung von Verkehrsbeeinflussungen und -messungen als Verkehrskomponenten. Die Integration von Beeinflussungen und Messungen in die Beschreibung von Autobahnverkehr ermöglicht ihre implizite Berücksichtigung in der folgenden Modellierung von Autobahnverkehr. Ebenso ist die Modellierung in das Gesamtsystem von Verkehr, Beeinflussung und Messung zu integrieren, um sie als Prognose-Werkzeug anwenden zu können.

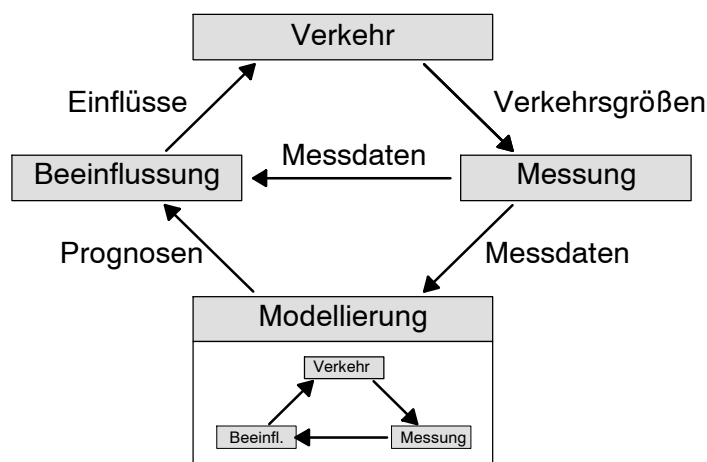


Abbildung 1: Abhängigkeiten zwischen Verkehr und seiner Beeinflussung, Messung und Modellierung

Modellierung von Autobahnverkehr

Die Modellierung von Autobahnverkehr lässt sich für die Autobahnnetze, Verkehrsbeeinflussungen und Verkehrsmessungen sowie in unterschiedliche Abbildungen der Verkehrsabläufe in den Autobahnnetzen aufteilen.

Das Wesentliche bei der Modellierung eines Autobahnnetzes ist die Abbildung seiner Netzstruktur. Die Abbildung entspricht einem hierarchischen System von Autobahnnetzen mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Damit wird berücksichtigt, dass verschiedene Verkehrsaufgaben verschieden detaillierte Modellierungen des Autobahnnetzes benötigen. Zum Beispiel erfordert die Suche nach einer optimalen Route durch das Netz einen Kürzeste-Wege-Algorithmus in einem wenig detaillierten Graphen des Netzes. Wohingegen eine Simulation von Verkehrsabläufen einen sehr detaillierten Graph des Netzes erfordert. Das System ergibt sich aus einer sukzessiven Zerlegung des Autobahnnetzes in Autobahnabschnitte, Fahrbahnabschnitte, Fahrbahnsegmente und Fahrbahnquerschnitte sowie Segments- und Querschnittsfahrstreifen. Die Zerlegungen einer Zelle in einen Zellkomplex, beispielsweise eines Autobahnabschnitts in einen Graph benachbarter Fahrbahnabschnitte, wird als Abbildung des Zellkomplexes auf die Zelle modelliert. Dadurch wird die geometrische und strukturelle Konsistenz des hierarchischen Systems sicher gestellt. Bei der Modellierung der Verkehrsabläufe, der Beeinflussungsmaßnahmen und der Messungen ist die Sicherstellung der Konsistenz auch in diesen Bereichen von hohen zu geringen Detaillierungsgraden zu gewährleisten.

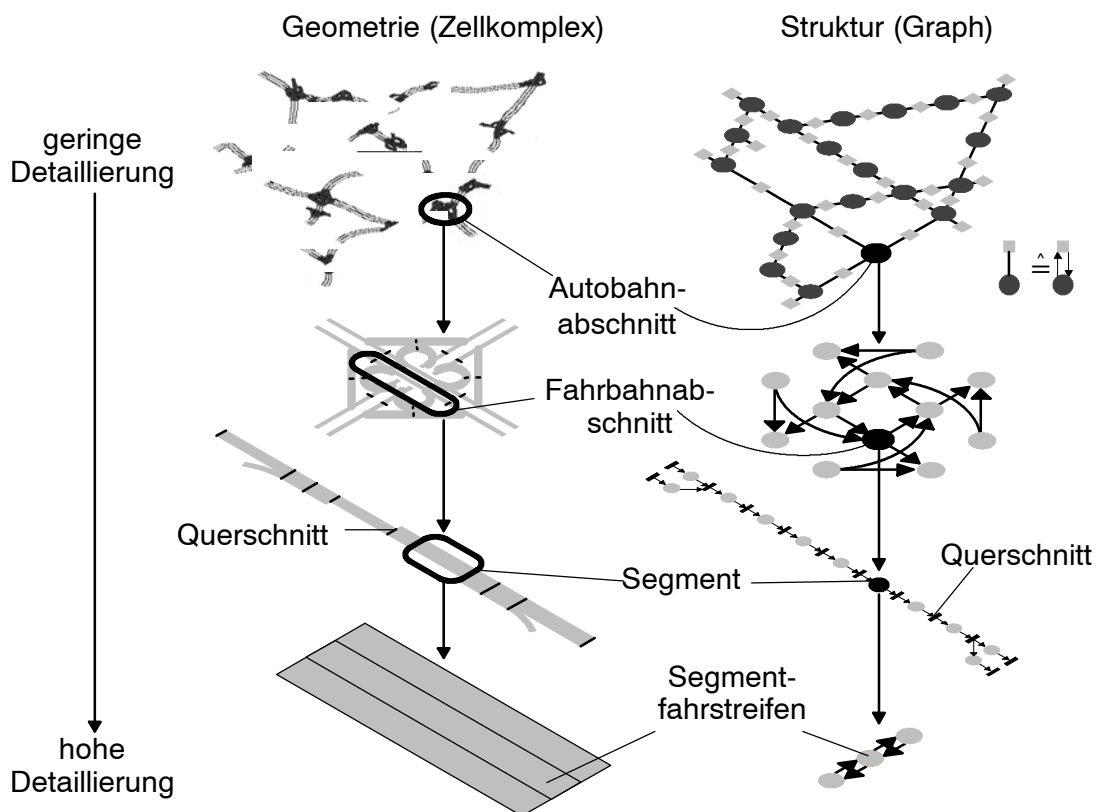


Abbildung 2: Hierarchisches System eines Autobahnnetzes mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden

Die Beeinflussungen und Messungen in einem Autobahnverkehr lassen sich abhängig davon, ob sie an einem Querschnitt oder einem Segment auf die Verkehrsabläufe wirken, an den Fahrbahnquerschnitten oder Fahrbahnsegmenten modellieren. Die Verkehrsabläufe in den Fahrbahnabschnitten eines Autobahnnetzes lassen sich mikroskopisch, makroskopisch oder mesoskopisch abbilden. Es wird für jede der drei Betrachtungsweisen eine Modellierung gezeigt.

Mikroskopische Modellierung der Verkehrsabläufe

Die mikroskopische Modellierung von Verkehrsabläufen auf einem Fahrbahnabschnitt entspricht der Grundversion einer regelbasierten Modellierung, die jederzeit durch Regeländerungen oder -erweiterungen modifiziert werden kann.

$$\begin{aligned} \frac{dx_a(t)}{dt} &= v_a(t) \\ \frac{dv_a(t)}{dt} &= \frac{v_a^0 - v_a(t)}{\tau_a^0} \cdot (1 - \Xi(v_a^0 - V_a^s(\Delta x_a))) \\ &+ \frac{V_a^s(\Delta x_a) - v_a(t)}{\tau_a^s} \cdot \Xi(v_a^0 - V_a^s(\Delta x_a)) \\ &- \gamma \frac{\Delta v_a^2}{\Delta x_a - l_b} \cdot \Xi(-\Delta v_a) \cdot \Xi(v_a(t) - V_a^s(\Delta x_a)) \end{aligned} \quad , \quad \Xi(X) = \begin{cases} 0 & \text{if } X \geq 0 \\ 1 & \text{if } X < 0 \end{cases}$$

Im Gegensatz zu anderen mikroskopischen Modellierungen zeichnet sich diese Modellierung durch anschauliche Regeln aus, die aus dem Fahrverhalten eines Kraftfahrzeugführers nachvollzogen werden können. Diese Regeln beschreiben das Beschleunigungs- oder Bremsverhalten eines Kraftfahrzeugs. In der Grundversion sind sie durch Sprungfunktionen miteinander kombiniert. Diese Regeln lassen sich jedoch auch durch beliebige kontinuierliche Übergänge wie Fuzzy-Regelungen abbilden. Die Kenngrößen der mikroskopisch modellierten Verkehrsabläufe sind wie bei Verkehrsmessungen durch Zählung zu gewinnen und erfordern somit eine Integration von Verkehrsmessungen in die Modellierung.

Makroskopische Modellierung der Verkehrsabläufe

Die makroskopische Modellierung von Verkehrsabläufen in einem Fahrbahnabschnitt entspricht einem System aus einer Kontinuitäts- und Navier-Stokes-ähnlichen Bewegungsgleichung [4]. Fahrstreifenwechsel werden durch räumlich konstante oder variable Massenänderung abgebildet. Die Kenngrößen der makroskopisch modellierten Verkehrsabläufe entsprechen den Zustandsgrößen der Modellierung. Sie sind aufgrund unterschiedlicher Definitionen nur indirekt mit Verkehrskenngrößen aus Verkehrsmessungen vergleichbar.

Mesoskopische Modellierung der Verkehrsabläufe

Die mesoskopische Modellierung von Verkehrsabläufen auf einem Fahrbahnabschnitt entspricht einer makroskopischen Modellierung, in die die zuvor aufgezeigte mikroskopische Modellierung integriert ist. Die Integration erfolgte über eine zusätzliche Gleichung für einen Zusammenhang der makroskopischen Dichte und des mikroskopischen Abstands.

$$\begin{aligned} \int_0^s \rho(x + \xi, t) d\xi &= 1 \quad \rho \geq 0, s \geq 0 \\ \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} + v(x, t) \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} &= \frac{v^0 - v(x)}{\tau} \cdot (1 - \Xi(v^0 - V^s(s))) \\ &+ \frac{V^s(s) - v(x)}{\tau} \cdot \Xi(v^0 - V^s(s)) \\ &- \gamma \frac{(v(x + s) - v(x))^2}{s - l} \cdot \Xi(v(x) - v(x + s)) \cdot \Xi(v(x) - V^s(s)) \end{aligned}$$

Dieser neuartige Übergang der mikroskopischen Modellierung zu einer makroskopischen Modellierung von Verkehrsabläufen auf einem Fahrbahnabschnitt ist konsistent und einfach nachvollziehbar. Mit Hilfe der leicht modifizierbaren Regeln der mikroskopischen Modellierung lassen sich unter anderem Fahrstreifenwechsel zeitlich nachvollziehbar begrenzen.

Numerische Umsetzung der Modellierungen

Die numerische Umsetzung einer Verkehrsmodellierung ist nicht Teil der Modellierung und kann daher verschiedenen numerischen Verfahren angepasst werden. Es wird exemplarisch für die mikroskopische, die makroskopische und die mesoskopische Modellierung jeweils eine numerische Umsetzung gezeigt. Insbesondere lässt sich die Methode der finiten Elemente erfolgreich auf die makroskopische Verkehrsmodellierung angewenden. Die Anwendung führt zu den gleichen Ergebnissen, wie das von Kerner und Konhäuser [3] verwendete Verfahren.

Simulation der Verkehrsabläufe

Durch die Implementierung einer numerischen Umsetzung ergibt sich ein Programm, mit dem Simulationen von Verkehrsabläufen in einem Autobahnnetz durchgeführt werden können. Die Simulationsprogramme aus den numerischen Umsetzungen der mikroskopischen, makroskopischen und mesoskopischen Modellierung werden in einer Störungsanalyse auf ihre Brauchbarkeit untersucht. Dabei zeigt sich, dass alle drei Modellierungen in der Lage sind, typische Verkehrsphänomene wie Staus oder Stop-and-Go-Wellen qualitativ wiederzugeben. Allerdings reagieren die Simulationen besonders sensitiv auf Änderungen der Modellparameter.

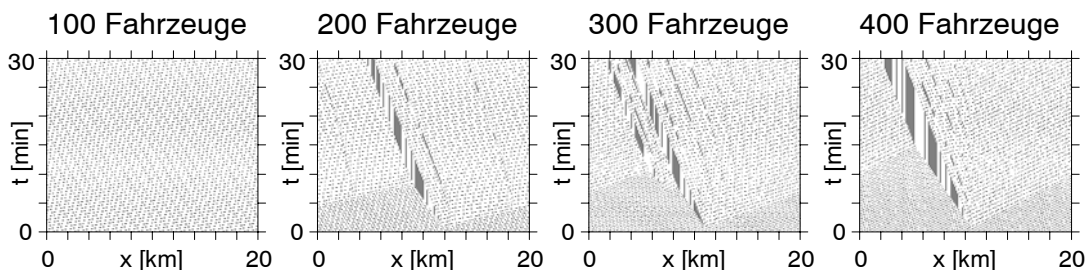


Abbildung 3: Bewegungsbahnen der mikroskopischen Verkehrssimulation

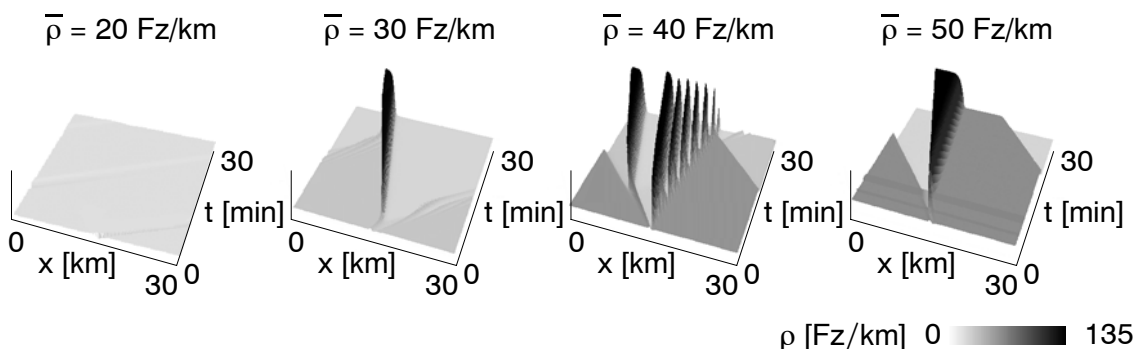


Abbildung 4: Dichteverteilungen der makroskopischen Verkehrssimulation

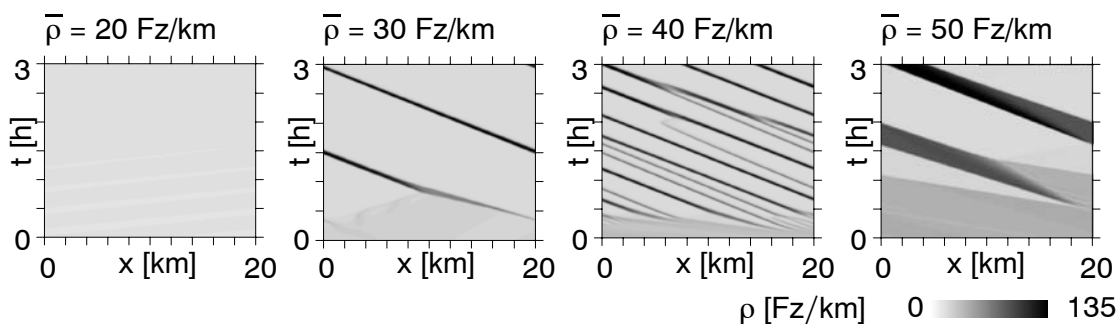


Abbildung 5: Dichteverteilungen der mesoskopischen Verkehrssimulation

Anschließend werden die mikroskopischen, makroskopischen und mesoskopischen Modellierungen in einem Vergleich von Simulationsergebnissen mit Daten aus Detektormessungen untersucht. Es zeigt sich, dass alle drei Modellierungen in der Lage sind, die Verkehrsszenarien in einer Simulation qualitativ und quantitativ wiederzugeben.

A5 bei Frankfurt am Main, Kilometer 485 - 472.4, 1:00 - 4:00 Uhr, 27. Januar 2001

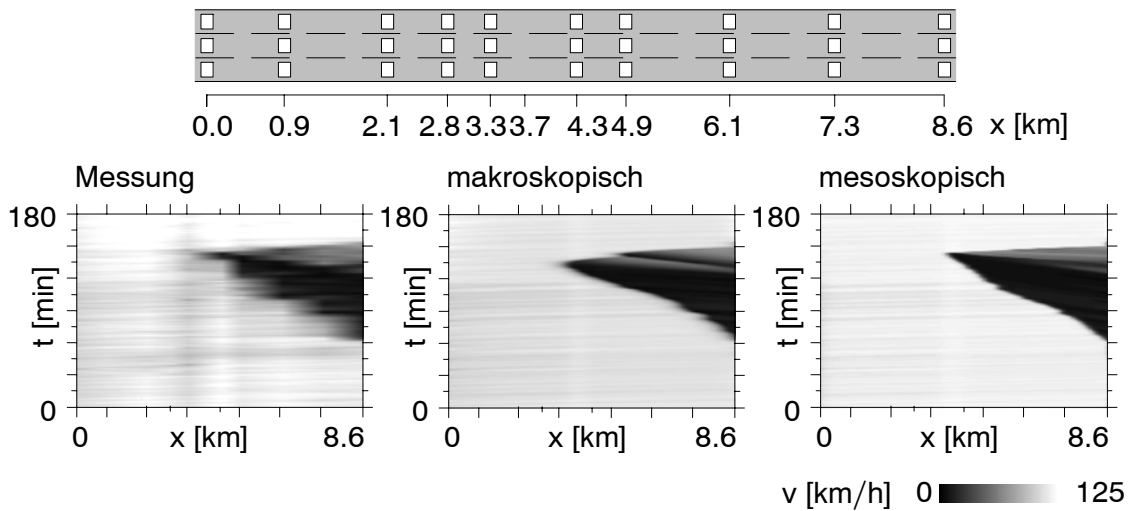


Abbildung 6: Verkehrsszenario 1: Bildung und Auflösung eines ortsfesten Staus

A5 bei Frankfurt am Main, Kilometer 488 - 481.7, 4:25 - 4:40 Uhr, 16. Januar 2001

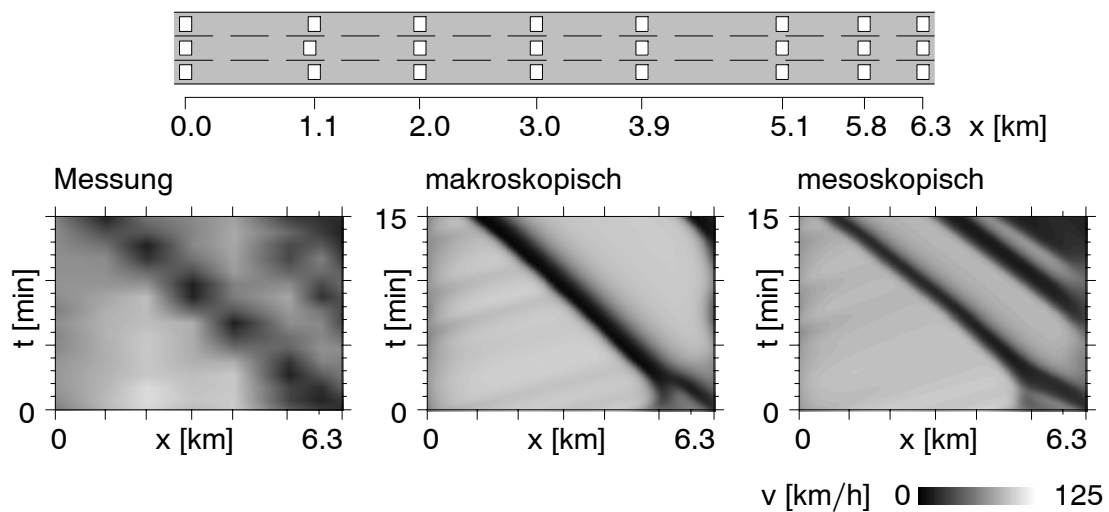


Abbildung 7: Verkehrsszenario 2: Bewegter Stau

Auch bei diesen Vergleichen reagieren die Simulationen besonders sensitiv auf Änderungen der Modellparameter. Die Festlegung der Parameter für die Simulation eines Verkehrsszenarios lässt sich nicht auf die Simulation eines anderen Verkehrsszenarios übertragen. Verkehrssphänomene, die bei einem festgelegten Parametersatz auftreten, können bei einer kleinen Parameteränderung anders ausgeprägt oder verschwunden sein. Als entscheidender Parameter hat sich die hypothetische Form der Geschwindigkeit-Abstand-Relation beziehungsweise der Geschwindigkeit-Dichte-Relation im Anpassungsterm als Antriebskraft der Verkehrsabläufe herausgestellt. Bei geeigneter Wahl der Geschwindigkeit-Abstand-Relation zeigt sich die mesoskopische Verkehrsmodellierung in den Simulationsergebnissen als konsistente Verbindung zwischen mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsmodellierungen.

Ausblick

Die gezeigte ganzheitliche Modellierung ermöglicht die programmtechnische Umsetzung eines Autobahnnetzes mit heterogen modellierten Verkehrsabläufen. So können unterschiedliche Fahrbahnabschnitte des Autobahnnetzes mit unterschiedlichen mikroskopisch, makroskopisch oder mesoskopisch modellierten Verkehrsabläufen entwickelt und zu einem Verkehrsgebiet zusammengefügt werden. Dabei ist der Übergang von einem Fahrbahnabschnitt zu einem anschließenden Fahrbahnabschnitt mit geeigneten Übergangsbedingungen konsistent abzubilden.

Die Modellierungen zur Reproduktion von Verkehrsabläufen auf Autobahnen erfordert für jede Verkehrssimulation eine geeignete Festlegung aller maßgebenden Modellparameter. Besonders der Anpassungsterm mit der Geschwindigkeit-Abstand-Relation beziehungsweise der Geschwindigkeit-Dichte-Relation als treibende Kraft des Verkehrsablaufs muss korrekt festgelegt sein. Außer theoretisch abschätzbaren Gültigkeitsbereichen und Erfahrungswerten stehen keine Verfahren zur Bestimmung dieser Parameter aus Verkehrsmessungen zur Verfügung. Eine systematische Untersuchung des quantitativen Einflusses der maßgebenden Parameter an nachvollziehbaren Referenzszenarien und die Entwicklung von Vorgehensweisen zur Bestimmung dieser Parameter aus Verkehrsmessungen sind erforderlich.

Für ein nachvollziehbares Referenzszenario sind geeignete Verkehrsmessungen erforderlich. Diese Verkehrsmessungen müssen Laborcharakter besitzen, um konkrete Aussagen über beobachtete Verkehrsphänomene treffen und diese Verkehrsphänomene anschließend in Simulationen exakt wiedergeben zu können. Solche Messungen von "Laborversuchen" sind zeit- und kostenintensiv. Sie sind im Sinne einer genauen Modellierung von Verkehrsabläufen auf Autobahnen jedoch unerlässlich.

Referenzen

- [1] Damrath, R.; Rose, M. (2002): *Dynamische Verkehrsprognosen auf der Basis makroskopischer Modellansätze*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 854, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn
- [2] Helbing, D. (1995): *Verkehrsdynamik*. Springer, Berlin, Heidelberg
- [3] Kerner, B.S.; Konhäuser, P.; Schilke, M. (1996): *A New Approach to Problems of Traffic Flow Theory*. In: Lessort, J.-B. (ed.): *Transportation and Traffic Theory*, Pergamon, 119-147
- [4] Kühne, R.D. (1991): *Traffic pattern in unstable traffic flow on freeways*. In: Brannolte, U. (Id.): *Highway Capacity and Level of Service*, Balkema, Rotterdam, 211-225
- [5] Rose, M. (2003): *Modellierung und Simulation von Autobahnverkehr*. Dissertation, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover