

Fortentwicklung und Bereitstellung eines bundeseinheitlichen Simulationsmodells für Bundesautobahnen

FA 1.157

Forschungsstellen: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen (Prof. Dr.-Ing. W. Brilon) und Lehrstuhl für Bauinformatik (Prof. Dr.-Ing. D. Hartmann)

Bearbeiter: Brilon, W. / Harding, J. / Erlemann, K. / Seifarth, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: November 2004

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde ein mikroskopisches Simulationsmodell entwickelt, mit dem der Verkehr auf Autobahnen nachgebildet werden kann.

Der Gebrauch mikroskopischer Simulationsmodelle zur Lösung verkehrstechnischer und planerischer Fragestellung ist heute Stand der Technik. Für die Anwendung der Modelle in der Praxis stehen auf dem deutschen und internationalen Markt eine Reihe leistungsfähiger Programme zur Verfügung, die auch kommerziell vertrieben werden.

Die verfügbaren Programme haben jedoch den Nachteil, dass sie nicht ausführlich dokumentiert sind und der zugrunde liegende Quellcode aufgrund kommerzieller Zwänge der Anbieter nicht zugänglich ist. Dies bringt mit sich, dass für keines dieser Programme ein verlässlicher Nachweis der Realitätstreue vorliegt. Hinzu kommt, dass bis auf die Gruppe der Zellularautomaten keines der bekannten mikroskopischen Simulationsmodelle in der Lage ist, durch Überlastung bedingte Verkehrszusammenbrüche auf einer gleichförmigen Strecke („Stau aus dem Nichts“) nachbilden zu können.

Gegenstand dieser Forschungsarbeit war daher die Entwicklung und Bereitstellung eines Simulationsmodells, mit dem die Ziele einer verstärkten Anwendung der mikroskopischen Simulation sowie der Überwindung der Nachteile bisher bekannter Simulationsprogramme erreicht werden sollen. Dabei soll die Neuentwicklung unter Verwendung modernster, objektorientierter Programmier-Techniken den gesamten Kenntnisstand der Simulation des Verkehrsflusses auf Schnellstraßen nutzen. Für die Abstandshaltung sollen in dem Programm mehrere Modellkonzepte wahlweise einsetzbar werden. Aus- und Einfahrten von Anschlussstellen sollen ebenso nachgebildet werden können wie Steigungs- und Gefällestrecken.

2. Untersuchungsmethodik

Ein makroskopisches Simulationsprogramm kann durch die verwendeten Modellansätze für Fahrzeugfolgervorgänge und für die Fahrstreifenwahl charakterisiert werden.

Die theoretischen Grundlagen für die mikroskopische Modellierung der Abstandshaltung wurden für insgesamt sechs verschiedene Grundkonzepte erläutert und eingehend hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit untersucht. Die dabei berücksichtigten Ansätze umfassen ein einfaches kinematisches Modell, das psycho-physische Modelle nach Wiedemann (1974), das Modell der Fahrzeugfolgetheorie (Gazis, Herman, Rothery, 1961), das Optimal-Velocity-Modell nach Bando (1995), ein auf Fuzzy-Logic basierendes Modell nach Rekerbrink (1994) sowie einen auf Nagel, Schreckenberg (1992) und Brilon, Wu (1999) zurückgehenden Zellularautomaten.

Bei den Verhaltensmodellen für die Fahrstreifenwahl wurde sowohl ein Ansatz für die gleichförmige Strecke, der sich auf die rein lokale Betrachtung der Verkehrssituation beschränkt, als auch ein Ansatz für den Bereich von Anschlussstellen berücksichtigt, mit dem auch strategisches, vorausschauendes Fahrverhalten in der Simulation nachgebildet werden kann.

Zur Neukalibrierung und Weiterentwicklung der Abstandsmodelle wurden im Rahmen der Forschungsarbeit Messungen im fließenden Verkehr durchgeführt, für die von der "Adam Opel AG" freundlicherweise ein Fahrzeug kostenlos zur Verfügung gestellt wurde. Mit zwei getrennten Messreihen wurde das Abstandsverhalten nachfolgender Fahrzeuge und verschiedener Testfahrer untersucht. Insgesamt wurden Messfahrten im Umfang von etwa 800 Kilometern durchgeführt und ausgewertet.

Aus den Messungen liegen Einzelfahrzeugdaten mit den erforderlichen kinematischen Größen mit einer zeitlichen Auflösung von 0,1 Sekunden für 116 Folgevorgänge vor. Anhand dieser Daten wurde das Abstandsmodell der Fahrzeugfolgetheorie überprüft und im Rahmen der Neuanpassung der Modellparameter weiterentwickelt. Für die Anpassung der Parameter kam die Methode der kleinsten Fehlerquadrate zum Einsatz, wobei die Beschleunigung des nachfolgenden Fahrzeugs als Zielgröße gewählt wurde. Zur Bewertung der Anpassung wurde der resultierende Wert der Standardfehler SR herangezogen. Die Ergebnisse der Parameteranpassung wurden unmittelbar bei der Umsetzung des Fahrzeugfolgemodells im Simulationsprogramm berücksichtigt.

In einer weitergehenden Untersuchung wurde überprüft, ob sich anhand der erhobenen Messdaten ein Zusammenhang zwischen dem Abstandsverhalten und der Motorisierung nachweisen lässt. Dank freundlicher Unterstützung durch das Kraftfahrt-Bundesamt konnten dazu anhand der amtlichen Kennzeichen für 15 ausgesuchte Folgevorgänge die erforderlichen technischen Daten der beteiligten Fahrzeuge ermittelt werden. Die Überprüfung des Einflusses der Motorisierung wurde mit Hilfe von Regressionsanalysen durchgeführt.

Für die Entwicklung des Computerprogramms wurde die Programmiersprache JAVA gewählt. Diese objektorientierte und leistungsfähige Programmiersprache gewährleistet sowohl die Plattformunabhängigkeit als auch die Zukunftssicherheit der Neuentwicklung. Durch die konsequente Anwendung der Objektorientierung konnte ein sowohl flexibler als auch leicht nachvollziehbarer Programmaufbau umgesetzt werden. Der modulare Aufbau des Programms erlaubt eine vergleichsweise einfache Erweiterung des Systems. Bei der Programmentwicklung wurde besonderer Wert auf ein hohes Maß an Benutzerfreundlichkeit und die praktische Anwendbarkeit gelegt. Dazu wurde eine komfortable Benutzeroberfläche geschaffen, die unter anderem einen grafischen Streckeneditor bereithält, der eine interaktive und unkomplizierte Netzerzeugung ermöglicht. Selbsterklärende Werkzeuge und menügesteuerte Eingaben erleichtern die Bedienung des Programms. Die einzelnen Befehle und Eingabemöglichkeiten sind in der Programm-Hilfe zusätzlich erklärt. Für die Auswertung der Simulation wurden zahlreiche Funktionen bereitgestellt, mit denen auch Ausgabedateien in einem Excel-kompatiblen Format oder als PDF-Dokument erzeugt werden können. Neben der zweidimensionalen Visualisierung der Simulationsabläufe wurde auch eine dreidimensionale Ansicht implementiert, mit der für Präsentationszwecke anschauliche Animationen im Videoformat erzeugt werden können.

Bei der Umsetzung der Verhaltensmodelle in dem Simulationsprogramm wurden zunächst alle sechs Modellansätze für das Abstandsverhalten berücksichtigt. Da das Modell der Fuzzy-Logik jedoch hinsichtlich einer praktischen Anwendbarkeit noch nicht ausreichend erforscht ist, wurde für diesen Ansatz lediglich ein Modul in Form einer Machbarkeitsstudie entwickelt. Auch für den Zellularautomaten besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf, hinzu kommt die fehlende Kompatibilität zu den anderen Verhaltensmodellen. Daher wurde für den Zellularautomaten im Rahmen dieser Forschungsarbeit lediglich ein vereinfachter Ansatz als Plattform für denkbare zukünftige Weiterentwicklungen bereitgestellt. Die verbleibenden vier Ansätze für das Abstandsverhalten (Kinematisches Modell, Wiedemann, Fahrzeugfolgetheorie und Bando) wurden als vollwertige, untereinander austauschbare Module in das Programm implementiert. Besonderes Augenmerk galt dabei einer Erweiterung der Modelle zur Nachahmung der teilweise in der Realität zu beobachtenden zögerlichen Fahrweise. Dazu wurde ein Ansatz entwickelt, mit dem die Fahrzeugbeschleunigung mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit zu unvorhersehbaren Zeitpunkten ohne äußere Beeinflussung reduziert wird. Als Ausgangsbasis für die Kalibrierung der Verhaltensmodelle dienten die Parameter-Werte, wie sie sich aus der Literatur entnehmen lassen. Die schrittweise Anpassung der Parameter geschah nach der sachkundigen Einschätzung der Bearbeiter. Übergeordnetes Ziel war es dabei, die Anzahl der veränderlichen Parameter so weit wie möglich zu begrenzen. So soll erreicht werden, dass mit möglichst einfachen Abänderungen der Parameter eine Anpassung an eine örtliche Situation erreicht werden kann. Zur Vereinfachung dieses Prozesses wurde eine Programmfunktion entwickelt, mit der systematisch Simulationsabläufe mit einer vorgegebenen Variation der Parameter durchgeführt und für die weitere Auswertung aufbereitet werden.

Zur Bewertung der Kalibrierung wurden die resultierenden Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Beziehungen und Fahrstreifenaufteilungen der Simulation den Vergleichswerten des HBS bzw. Literaturangaben zu früheren Untersuchungen gegenübergestellt. Die vier verschiedenen Abstandsmodelle wurden dabei unabhängig voneinander untersucht.

Die praktische Anwendbarkeit des Simulationsprogramms wurde anhand zweier konkreter Beispiele überprüft. Dazu wurde die Wirkung eines LKW-Überholverbotes für den Fall eines fiktiven Autobahnabschnittes mit dem Programm analysiert. Die Bewertung der Simulationsergebnisse stützt sich auf die empirischen Daten, die aus früheren Forschungsarbeiten vorliegen (Drews, 1996). Als zweites Anwendungsbeispiel wurde die Steigungsstrecke eines konkreten Neubauprojektes untersucht. Hierbei wurde in der Simulation zusätzlich auch die Ausbauvariante mit einem Zusatzfahrstreifen umgesetzt. Für die Überprüfung der Realitätsnähe dienten in diesem Fall die Forschungsergebnisse von Breßler (2001).

3. Untersuchungsergebnisse

Mit dem neu entwickelten und bereitgestellten Simulationsprogramm kann der Verkehr auf zwei- und dreistreifigen Richtungsfahrbahnen einschließlich Aus- und Einfahrten von Anschlussstellen nachgebildet werden. Vier verschiedene untereinander austauschbare Modelle für das Abstandsverhalten wurden umgesetzt.

Aus den parallel zur Programmentwicklung durchgeführten mikroskopischen Messungen wurden Daten für insgesamt 116 Folgevorgänge ermittelt. Damit wurden die Parameter der Fahrzeugfolgetheorie für aktuelle deutsche Verhältnisse kalibriert. Es zeigt sich, dass der Parameter m (Exponent des Ge-

schwindigkeitsniveaus) als lineare Funktion des Parameters l (Exponent des Abstands) angegeben werden kann. Dadurch kann die Anzahl der unabhängigen Größen reduziert werden. Aus dem modifizierten Modell ergibt sich ein Standardfehler von $\pm 0,3342 \text{ m/s}^2$, der im Vergleich zum Ausgangsmodell um etwa 10 Prozent geringer ausfällt.

Mit dem modifizierten Modell wird also eine bessere Anpassung an die Realität erreicht. Die Untersuchung des Einflusses der Motorisierung auf das Abstands- und Folgeverhalten lässt keine eindeutigen Rückschlüsse zu, ein unmittelbarer Zusammenhang konnte – nicht zuletzt aufgrund der geringen Stichprobe – nicht nachgewiesen werden.

Als Ergebnis der Umsetzung der verschiedenen Verhaltensmodelle und der Auswertung der durchgeführten Simulationsläufe lässt sich festhalten, dass mit drei der vier letztendlich untersuchten Abstandsmodelle (Kinematisch, Wiedemann und Bando) für den Bereich niedriger und mittlerer Verkehrsstärken hinsichtlich der untersuchten makroskopischen Kenngrößen (q - v -Beziehung und Fahrstreifenaufteilung) eine gute Anpassung an die entsprechenden Vergleichsdaten aus realen Messungen bzw. dem HBS 2001 erreicht wird. Dem gegenüber liefert der Ansatz der Fahrzeugfolgetheorie in der in dem Programm umgesetzten Form und im Zusammenspiel mit dem Fahrstreifenwechselmodell keine realitätsnahe Abbildung der untersuchten makroskopischen Kenngrößen.

Dank der vorgenommenen Modifikationen zeigt sich allein das auf dem Ansatz von Wiedemann basierende Modell mit der Erweiterung zur Berücksichtigung des „Trödeleffektes“ in der Lage, die in der Realität auftretenden plötzlichen und zufälligen Staubildungen auf gleichförmigen Strecken nachzubilden. Damit setzt sich dieser Ansatz nicht nur von den anderen untersuchten Modellen ab, sondern er überwindet auch einen der entscheidenden Nachteile bisheriger mikroskopischer Simulationsmodelle.

Die grundsätzliche Umsetzbarkeit konkreter Fragestellungen aus der Praxis konnte durch die testweise Anwendung des Programms nachgewiesen werden. Die aus der Literatur zu entnehmenden, aus empirischen Untersuchungen abgeleiteten Auswirkungen von Lkw-Überholverböten wurden mit dem Simulationsprogramm unter Verwendung der voreingestellten Verhaltensparameter mit einer für Planungszwecke ausreichend hohen Genauigkeit nachgebildet. Damit konnte gezeigt werden, dass die Auswirkungen einer solchen Maßnahme einfach und schnell mit Hilfe der Simulation quantifiziert werden kann.

Das zweite Anwendungsbeispiel belegt, dass auch der Verkehrsablauf an Steigungsstrecken realitätsnah mit dem Simulationsprogramm nachgebildet werden kann. Aus dem Vergleich mit den Ergebnissen empirischer Untersuchungen wird jedoch deutlich, dass für den konkret vorliegenden Anwendungsfall eine aufwändigere Einstellung der Verhaltensparameter notwendig ist, um eine noch genauere Anpassung an die Vergleichswerte erreichen zu können. Für die zusätzlich durchgeführte Überprüfung der Auswirkungen eines Zusatzfahrstreifens ergeben sich aus der Simulation keine realistischen Ergebnisse. Hier wird deutlich, dass das im Programm vorhandene Verhaltensmodell mit realistischen Daten kalibriert werden muss. Eine einfache Übertragung der Parameter für Aus- und Einfahrten hat sich als nicht sinnvoll herausgestellt.

Insgesamt wird mit dem neu entwickelten Programm ein leistungsfähiges mikroskopisches Simulationsmodell für den Verkehr auf Autobahnen bereitgestellt, für das sich Anwendungsmöglichkeiten sowohl bei der Entwurfsplanung als auch bei Fragestellungen des laufenden Betriebs bieten. Das Programm erreicht dabei ein hohes Maß an Funktionsfähigkeit und Benutzerfreundlichkeit, das vergleichbar mit anderen kommerziell

verfügbaren Produkten ist. Der Quellcode des Programms steht dem Auftraggeber zur Verfügung und kann zur Kontrolle der eingesetzten Modelle herangezogen werden. Der modulare und objektorientierte Aufbau sichert dabei die Erweiterbarkeit des Programms, die sich sowohl auf die Funktionalität als auch auf die Einbindung neuer Verhaltensmodelle bezieht.

4. Folgerungen für die Praxis

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem neu entwickelten Simulationsprogramm ein leistungsfähiges Werkzeug zur Verfügung gestellt wird, mit dem der Verkehrsablauf (Geschwindigkeit, Staubbildung) auf hochbelasteten Autobahnabschnitten vorhergesagt werden kann.

Dabei bietet die Anwendung der Simulation im Vergleich zu den analytischen Methoden des HBS den Vorteil, dass die Teilabschnitte nicht getrennt voneinander betrachtet werden müssen, sondern der entsprechende Autobahnabschnitt in seiner Gesamtheit bewertet werden kann.

Mit dem im Rahmen dieser Forschungsarbeit erreichten Leistungsstand des Programms lassen sich zahlreiche Aspekte aus der Praxis untersuchen:

- Streckenabschnitte bis ca. 50 Kilometer,
- Folge von Anschlussstellen,
- Einfluss von Steigungsstrecken,
- Test unterschiedlicher Gradientenführungen,
- Einfluss von Geschwindigkeitsbeschränkungen,
- Einfluss von Lkw-Überholverböten.

Auf diese Weise eignet sich das Programm in der vorliegenden Form zur Überprüfung von Entwürfen für Autobahnen und zur Auslegung von steuernden Eingriffen in den Verkehrsablauf.

Durch den gewählten modularen und objektorientierten Aufbau ist eine zukünftige Erweiterung der Funktionalität des Programms möglich. Dabei können bisher noch nicht berücksichtigte geometrische Entwurfselemente sowie weitere steuernde Maßnahmen nachgebildet werden. □