

## **Kalibrierung von Zellular-Automaten für die Simulation des Verkehrsflusses**

Werner Brilon und Ning Wu<sup>1</sup>

Ein Zellular-Automat (CA) ist ein stark vereinfachtes Programm für die Simulation von komplexen Verkehrssystemen. Ein CA-Programm erreicht eine extrem hohe Rechengeschwindigkeit. Andererseits legt es keinen ausdrücklichen Wert auf Realitätsnähe im mikroskopischen Detail. Die erste Anwendung des CA für die Simulation von Verkehrsflüssen auf Straßen wurde von Nagel und Schreckenberg (1992) durchgeführt. Im Rahmen des von der Landesregierung Nordrhein-Westfalen initiierten Verbund-Projekts FVU wurde der sogenannte Standard-CA von Nagel-Schreckenberg ausführlich kalibriert und auf seine praktische Anwendbarkeit ausgetestet. Dieser Aufsatz präsentiert die wesentlichen Ergebnisse dieser Kalibrierung. Der Standard-CA von Nagel-Schreckenberg wird mit Meßdaten aus realen Verkehrsflüssen auf städtischen Straßen und Autobahnen verglichen. Dabei wurde herausgefunden, daß die gemessenen Kapazitäten auf Autobahnen nicht zufriedenstellend reproduziert werden können. Für städtische Straßen ist es allerdings möglich, die Verkehrscharakteristiken an Knotenpunkten darzustellen. Zugleich wird ein neues Konzept für den CA vorgestellt. Dieses Konzept verwendet ein zeit-orientiertes Modell. Das Modell bildet das reale Fahrverhalten auf Autobahnen genauer ab als das Nagel-Schreckenberg Modell. Das Konzept des neuen Modells erreicht eine realistische Modellbildung und eine hohe Rechengeschwindigkeit.

---

<sup>1</sup> Anschrift der Verfasser: Prof. Dr.-Ing. W. Brilon, Privatdozent Dr.-Ing. N. Wu  
Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, D-44780 Bochum  
email: [verkehrswesen@ruhr-uni-bochum.de](mailto:verkehrswesen@ruhr-uni-bochum.de)  
<http://www.verkehr.bi.ruhr-uni-bochum.de>

## 1 Einführung

Das Verkehrsaufkommen auf den Straßen steigert sich ständig. Aus vielfältigen Gründen können nicht in gleichem Umfang neue Straßen gebaut werden. Statt dessen setzen Ingenieure und Verkehrspraktiker ihre Hoffnung auf eine effiziente Steuerung und Lenkung des Verkehrsablaufs, um steigende qualitative und quantitative Anforderungen zu befriedigen. Zur Einrichtung solcher Steuerungsstrategien, aber auch zur Vorhersage von Verkehrssituationen im laufenden Betrieb werden leistungsfähige Modelle gesucht. Besonders schwierig ist dabei die Abbildung des Verkehrs in großen – z.B. landesweiten - Straßennetzen. Hier hat sich in den letzten Jahren die Simulationstechnik der sogenannten Zellular-Automaten (CA) einen entscheidenden Stellenwert verschafft.

Der hier vorliegende Artikel verfolgt zweierlei Ziele:

- Einerseits soll er der eher bauingenieur-orientierten Gemeinde der Verkehrsingenieure Kenntnisse dieser Technik verschaffen.
- Andererseits will er neuere Entwicklung dazu vorstellen.

Der Inhalt des Artikels ist - teilweise auch in ausführlicher Form - bereits von Brilon, Wu (1998, 1999) und Brilon et al. (1998) veröffentlicht worden.

Was ist ein CA? Ein CA ist ein Simulationsprogramm, das alle einzelnen Fahrzeuge, die sich in einem Straßennetz befinden, über den Lauf der Zeit hinweg bei ihrer Fahrt abbildet. Insofern ist es ein mikroskopisches Modell. Anders als bei der in Deutschland von Wiedemann (1974) begründeten und später in vielen Arbeiten unterschiedlicher Autoren immer weiter verfeinerten Programmen<sup>2</sup> geht es hier nicht darum, das Verhalten von Fahrern und ihren Fahrzeugen immer feiner und realitätsgerechter abzubilden. Im Gegenteil: Die Abbildung des Fahrverhaltens ist so grob, daß eine Ähnlichkeit mit der Realität kaum zu

erkennen ist. Dadurch kann aber eine extrem hohe Rechengeschwindigkeit erreicht werden. Diese ist so hoch, daß die Verkehrszustände weiträumiger Autobahnnetze mit sehr kurzer Rechenzeit nachgebildet werden können. Dies hat natürlich nur dann Sinn, wenn trotz grober mikroskopischer Modellannahmen die Ergebnisse hinsichtlich der makroskopischen Verkehrsdaten (z. B. Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, mittlere Geschwindigkeiten) realistisch sind.

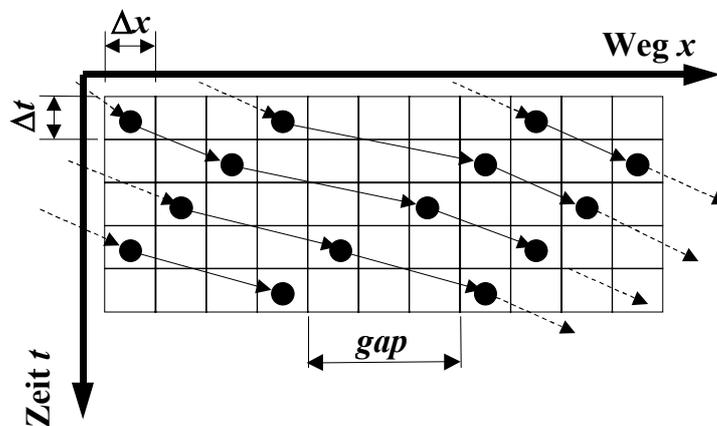
Die erste Anwendung der CA-Technik im Straßenverkehr stammt von Nagel und Schreckenberg (1992). Das dort begründete Modell wird hier als Standard-CA (STCA) bezeichnet.

Der Begriff "Zellular-Automaten" wurde erstmals von Wolf und Kertesz (1987) für ein mathematisches Modell zur Rauschreduktion verwendet. Gemeint ist damit eine Repräsentation von kontinuierlich über Zeit und Raum ablaufenden Prozessen durch einen stufenweise arbeitenden Algorithmus. Bezogen auf den Verkehrsablauf auf Straßen bedeutet das: Der Weg wird in Intervalle eingeteilt. Zweckmäßig ist eine Einteilung in Wegabschnitte, in die bei dichtestem Verkehr (Stau) gerade ein Pkw paßt. Damit im Dezimalsystem runde Zahlen erreicht werden, erweist sich eine Abschnittlänge von  $\Delta x = 7,5$  m als sinnvoll. Dies entspricht einer maximalen Verkehrsdichte von 133,3 Pkw/(km und Fahrstreifen). Ebenso wird die Zeit in Intervalle der Länge  $\Delta t = 1$  s unterteilt. Dies entspricht in etwa der Reaktionszeit der Fahrer. Die Zeit-Weg-Ebene wird also in Zellen der Größe  $\Delta t = 1$  s mal  $\Delta x = 7,5$  m eingeteilt. Eine Zelle kann entweder von einem Pkw besetzt oder leer sein. Ein Lkw kann dadurch repräsentiert werden, daß er immer zwei räumlich benachbarte Zellen besetzt. Die in Wirklichkeit kontinuierlich über Zeit und Weg verlaufende Fahrt der Fahrzeuge wird dann durch einen Sprung der Autos von einer Zelle zu einer anderen ersetzt.

---

<sup>2</sup> Aktuelle besonders leistungsfähige Versionen der mikroskopischen Simulation nach Wiedemann sind in Deutschland z.B. die Programme VISSIM (PTV, Karlsruhe) und PELOPS (RWTH Aachen; IKA).

Kai Nagel hat dafür einmal das englische Wort geprägt: "vehicle hopping process" (vgl. Abb. 1). Weil in einem Zeitschnitt von  $\Delta t = 1$  s immer nur um eine ganze Anzahl von Zellen vorgerückt werden kann, können auch nur bestimmte Geschwindigkeiten eingehalten werden: 0; 1 Zelle/s = 7,5 m/s = 27 km/h; 2 Zellen/s = 54 km/h;...; 6 Zellen/s = 162 km/h. Demgemäß sind auch Änderungen der Geschwindigkeit jedes einzelnen Fahrzeugs immer nur in Stufen von 27 km/h pro Sekunde ( $= 7,5 \text{ m/s}^2$ ) möglich. Dies wiederum ist völlig unrealistisch: Als Verzögerung wäre dies eine extreme Notbremsung und als Beschleunigung ist dies mit keinem handelsüblichen Auto möglich.



**Abb. 1 – Prinzip eines Zellular-Automaten**

Das erste Fazit ist also: So ein CA ist bei der Abbildung des mikroskopischen Fahrverhaltens absolut unrealistisch und zur Simulation von realem Verkehr völlig ungeeignet. Dies war z.B. auch die Reaktion des Arbeitsausschusses "Theorie des Straßenverkehrs" der FGSV bei seiner Sitzung am 21.02.1995, als Kai Nagel dort seine Ideen vorstellte. Dennoch ist es auch schon mit dem STCA (Nagel, Schreckenberg, 1992) möglich gewesen, Phänomene wie den "Stau aus dem Nichts" abzubilden. Schließlich sind CA-Lösungen zur praktischen Anwendung in sehr großen Straßennetzen weiterentwickelt und zur Anwendung vorgeschlagen worden. Diese Entwicklung machte es erforderlich, die Realitätstreue der CA-Technik im Straßenverkehr ernsthaft zu überprüfen. Das Land Nordrhein-Westfalen (NRW) hat dazu

1995 die Initiative ergriffen und ein Forschungsprojekt ins Leben gerufen, das von mehreren Forschungsinstituten an verschiedenen Hochschulen in NRW getragen wurde. In diesem "Forschungsverbund Verkehr und Umweltwirkungen" (Internet: [http://www.zpr.uni-koeln.de/Forschungsverbund-Verkehr-NRW/index\\_d.html](http://www.zpr.uni-koeln.de/Forschungsverbund-Verkehr-NRW/index_d.html)) hatte die Ruhr-Universität Bochum die Aufgabe, die Realitätstreue des CA im Straßenverkehr zu überprüfen und nötigenfalls zu verbessern.

## **2 Der Standard-Zellular-Automat (STCA)**

### **2.1 Modellbeschreibung**

Als STCA bezeichnen wir das ursprünglich von Nagel, Schreckenberg (1992) vorgestellte Modell. Darin ist die bereits beschriebene Einteilung der Zeit und des Weges in Zellen der Größe  $1 \text{ s} \times 7,5 \text{ m}$  entwickelt worden. Die Geschwindigkeiten  $v$  besitzen dann die Einheit "Zellen pro Sekunde" (es wird  $0 \leq v \leq 6$  verwendet). Diese Einheit wird üblicherweise der Kürze wegen nicht genannt.

Wie bei jedem Simulationsmodell müssen zunächst am Streckenanfang sogenannte "Fahrer-Fahrzeug-Elemente (FFE)" erzeugt werden. Diese FFE repräsentieren einzelne Fahrzeuge und deren Verhalten. "Erzeugen" heißt: Durch einen Zufallsgenerator<sup>3</sup> werden für jedes FFE vorgegeben:

- Maximale Wunschgeschwindigkeit  $v_{\max}$  = gewünschte maximale Fahrgeschwindigkeit des FFE (z. B. etwa normalverteilt).
- Zeitlücke = Zeitlicher Abstand zwischen den Fahrzeugen am Streckenanfang; hier angegeben in Zeiteinheiten der Länge  $\Delta t = 1 \text{ s}$  (z. B. etwa exponentialverteilt).

Zusätzlich zu diesen Grunddefinition sind aber auch noch Regeln für die Bewegung der Fahrzeuge zu formulieren. Diese Regeln sind von drei Grundsätzen geprägt:

- Die Fahrer-Fahrzeug-Elemente (FFE) versuchen die ihnen eigene Wunschgeschwindigkeit  $v_{\max}$  einzuhalten, sofern vor ihnen freier Raum ist. Sie fahren aber nie schneller als  $v_{\max}$ .
- Die FFE halten einen Sicherheitsabstand ein.
- Die FFE verzögern gelegentlich (d.h. zu unvorhersehbaren Zeitpunkten ohne äußeren Grund, d.h. sie "trödeln").

Diese Gedanken lassen sich in folgende Regeln fassen, die bereits die Form einer Rechenanweisung in einem Computerprogramm besitzen:

**(1) Beschleunigen:**

Wenn  $v < v_{\max}$  dann:  $v = v + 1$

(d.h. es wird in Stufen von  $\Delta v = 1$  auf eine Geschwindigkeit von maximal  $v_{\max}$  ( $v_{\max} \leq 6$ ) beschleunigt.  $v_{\max}$  ist die Wunschgeschwindigkeit des FFE.)

**(2) Abstand halten:**

Wenn  $v > \text{gap}$  dann:  $v = \text{gap}$

(gap = Anzahl freier Zellen bis zum nächsten vorausfahrenden Fahrzeug; d.h. es werden immer so viele Zellen bis zum nächsten vorausfahrenden Fahrzeug frei gehalten, wie dies der eigenen Geschwindigkeit  $v$  entspricht. Dabei werden auch Verzögerungen von  $> 1$  (also  $> 7,5 \text{ m/s}^2$ ) in Kauf genommen. Auffahrunfälle werden so auf jeden Fall vermieden.

Die Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen bleibt dadurch immer deutlich über  $\Delta t = 1 \text{ s.}$ )

**(3) Trödeln:**

Wenn  $v > 0$  dann (mit Wahrscheinlichkeit  $p_{\text{brake}}$ ):  $v = v - 1$

---

<sup>3</sup> Zufallsgenerator = Rechenprogramm, das eine Reihe von Zahlen ausgibt, die entsprechend einer vorgegebenen statistischen Verteilungsfunktion verteilt sind.

(d.h. mit einer Wahrscheinlichkeit  $p_{\text{brake}}$  wird die Geschwindigkeit - auch ohne einen zwingenden Einfluß - um 1 zurückgesetzt.)

Diese drei Regeln werden in jedem Zeitschritt für alle Fahrzeuge in der genannten Reihenfolge durchgeführt. Daraus ergibt sich die Fahrt aller FFE im nächsten Zeitschritt der Länge  $\Delta t = 1$  s. Dem entsprechend wird im einem vierten Rechenschritt die Position aller FFE um  $v$  Einheiten (mit dem jeweiligen  $v$ -Wert der einzelnen FFE) nach vorne gerückt.

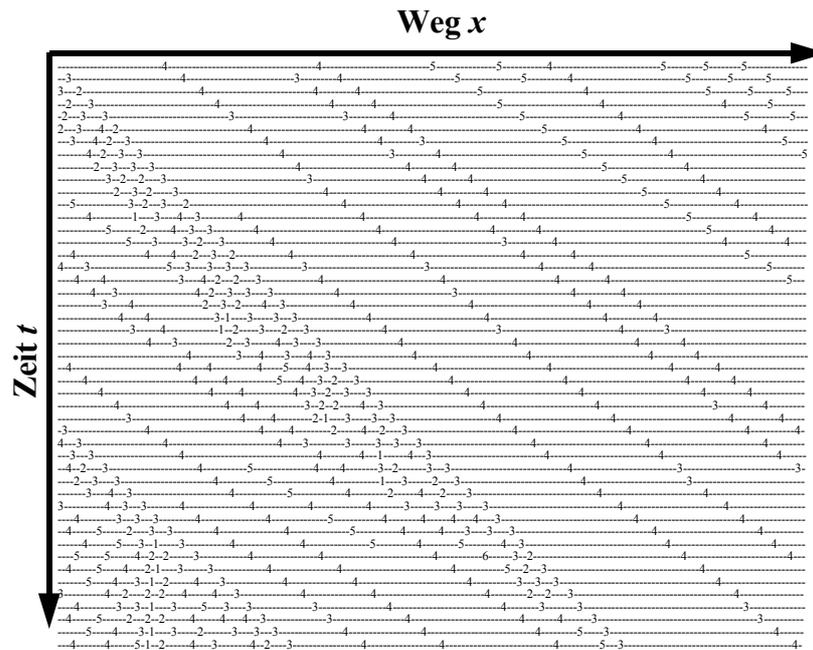
#### **(4) Vorrücken:**

$$x = x + v \text{ für alle FFE}$$

Bemerkenswert an dieser Rechentechnik ist: Für das Ergebnis ist es gleichgültig, ob im Verkehrsstrom von vorn nach hinten oder umgekehrt gerechnet wird. Die Geschwindigkeit der FFE hängt nicht von der Geschwindigkeit der jeweils vorausfahrenden FFE ab. Beschleunigungen und Verzögerungen ergeben sich nur aus dem momentanen Abstand. Demnach können die Reaktionen und Bewegungen der FFE gleichzeitig errechnet werden. Der Algorithmus eignet sich also für eine parallele Datenverarbeitung.

Ort, Zeit und Fahrzustand lassen sich durch ganze Zahlen vollständig darstellen. Bei einer Programmierung in einem Computer-nahen Code läßt sich eine hohe Rechengeschwindigkeit bei geringem Speicherbedarf erreichen.

$p_{\text{brake}}$  (also die Wahrscheinlichkeit einer nicht von außen erzwungenen Bremsung) ist neben der maximalen Wunschgeschwindigkeit  $v_{\text{max}}$  der einzige Parameter des Modells. Je nach Wahl von  $p_{\text{brake}}$  werden sich andere Formen des Verkehrsablaufs einstellen. Wenn man also das Modell an die Realität anpassen (= Kalibrierung) will, so verbleibt  $p_{\text{brake}}$  als einzige Stellschraube. Der größte gewählte Wert für  $v_{\text{max}}$  entspricht in der Größenordnung der Geschwindigkeit, die auf der simulierten Straße üblicherweise gefahren wird.



**Abb. 2 – Beispiel eines Zeit-Weg-Diagramms aus einem Simulationslauf für den linken Fahrstreifen einer 2-streifigen Richtungsfahrbahn erzeugt mit dem STCA. Die Zahlen im Diagramm stellen die aktuellen Geschwindigkeitsstufen der FFE dar. Eine unterbrochen Fahrlinie bedeutet einen Fahrstreifenwechsel.**

Das Modell läßt sich auch verwirklichen, wenn man den durch  $p_{brake}$  gesteuerten "Trödeleffekt" weglassen würde. Nagel, Schreckenberg (1992) beschreiben aber, daß sich nur durch Einbeziehung der Regel 3 makroskopische reale Effekte, wie plötzliche Staubildungen im dichten Verkehr ("Stau aus dem Nichts", Leutzbach, 1972) einstellen (vgl. Abb. 2). Ohne Regel 3 streben alle FFE gleichmäßig nach vorne. Auch im dichtesten Verkehr würde sich noch ein gleichförmiger Verkehrsfluß ergeben. Demnach scheint das gelegentliche Verzögern einzelner FFE - verursacht durch die ungenaue Kontrolle des Fahrers über die Geschwindigkeit und andere Störungen, z.B. Einstellung des Radios, Telefonat, Rhythmuswechsel beim Fahren, etc. - ein besonders wesentliches Charakteristikum des realen Verkehrs zu sein. Andere mikroskopische Simulationsmodelle im Stil von Wiedemann (1974) kennen solche "Trödeleffekte" nicht. Mit ihnen läßt sich deshalb auf einer gleichförmigen Strecke (d.h. bei Gleichbleiben aller Parameter über die Strecke) auch nicht ein durch

Überlastung bedingter Verkehrszusammenbruch nachahmen. Hier können diese hoch entwickelten mikroskopischen Simulationen möglicherweise von den einfachen CA-Modellen lernen.

Alle folgenden Überlegungen richten sich auf die Frage: Wie realistisch kann eine Simulation mit dem STCA die makroskopischen Eigenschaften des Verkehrsflusses wiedergeben. Es geht also um die folgenden Details:

- Welche Kapazität (= maximal mögliche Verkehrsstärke) erzeugt ein STCA?
- Welcher Wert von  $p_{\text{brake}}$  ist anzuwenden?
- Wie stellen sich die Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärke  $q$ , Verkehrsdichte  $k$  und mittlerer momentaner Geschwindigkeit  $\bar{v}_m$  dar?
- Wie stimmen diese Resultate mit der Realität überein?
- Wie läßt sich die Realitätstreue steigern?

Zur Beantwortung dieser Fragen sind viele Simulationsläufe mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt worden.

## 2.2 *Einstreifiger Verkehr und Knotenpunkte*

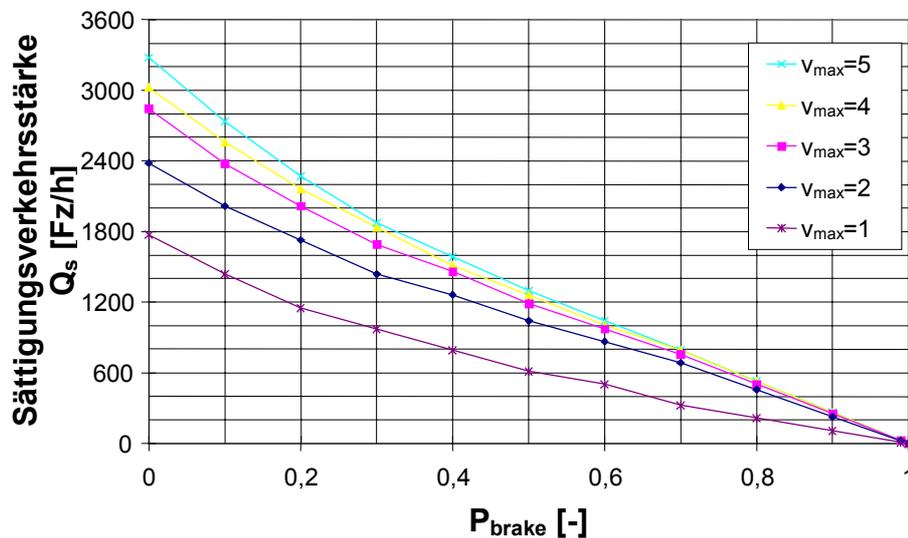
Im einfachsten Fall wurden mit dem STCA Simulationen für einen einzelnen Fahrstreifen durchgeführt. Zunächst wird das Anfahren einer stehenden Fahrzeugkolonne beschrieben. Die dabei erreichte Kapazität  $Q_s$  ist in Abb. 3 dargestellt.

Es zeigt sich:  $Q_s$  hängt von  $p_{\text{brake}}$  und von der maximalen Wunschgeschwindigkeit  $v_{\text{max}}$  ab.

Die simulierten Situationen lassen sich interpretierten als

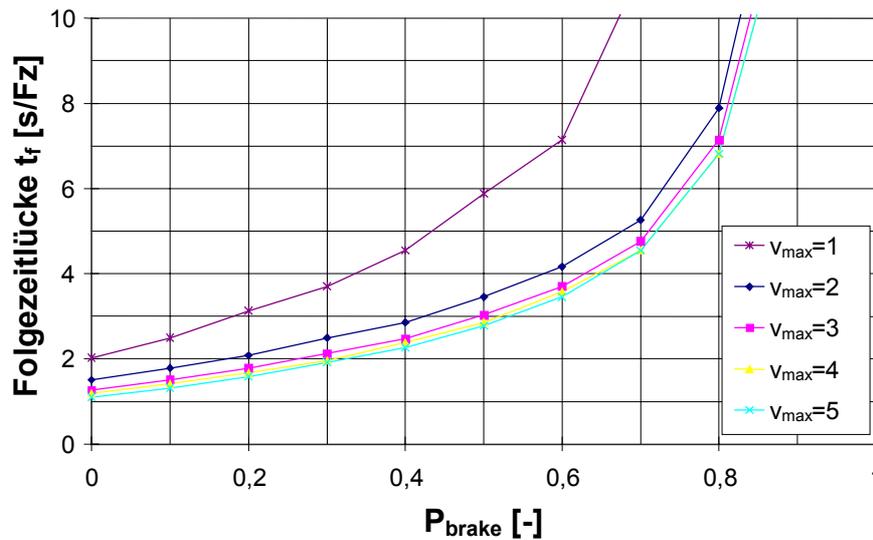
- Anfahren aus einem stehenden Stau im Autobahnverkehr,
- Anfahren an einer Lichtsignalanlage.

$Q_s$  läßt sich deshalb mit der sogenannten Sättigungsverkehrsstärke an Lichtsignalanlagen vergleichen - einer praktisch angewendeten Dimensionierungsgröße für Lichtsignalanlagen. Auf der Basis von sehr vielen Beobachtungen werden  $Q_s$ -Werte von 1800 bis 2000 Pkw/(h und Fahrstreifen) als realistisch angesehen. Dies bedeutet nach Abb. 3: Bei städtischen Geschwindigkeiten ( $v_{\max} \approx 2$  Zellen/s = 54 km/h) ergibt sich mit dem STCA eine realistische Simulation des Verkehrsablaufs an Lichtsignalanlagen, wenn für  $p_{\text{brake}} \approx 0,2$  eingesetzt wird.



**Abb. 3 – Kapazität  $Q_s$  des STCA bei Anfahren aus einem Stau**

Ein solches Ergebnis läßt sich auch für vorfahrtgeregeltete Knotenpunkte beschreiben. Hier ergibt sich die Kapazität aus der sogenannten Grenzzeitlücke  $t_g$  und der Folgezeitlücke  $t_f$  (Einzelheiten: vgl. Brilon e.a., 1994).  $t_f$  ist der mittlere zeitliche Abstand zwischen zwei Fahrzeugen des Nebenstroms, die in dieselbe Lücke des Hauptstroms einfahren.  $t_f$  ist der Kehrwert der Kapazität für den Fall, daß der Hauptstrom die Verkehrsstärke Null hat. Damit ist  $t_f = 1/Q_s$ . Analog zu Abb. 3 stellt demgemäß Abb. 4 die Folgezeitlücke als Ergebnis der STCA-Simulation dar.



**Abb. 4 – Folgezeitlücke  $t_f$  für einen Knotenpunkt ohne Lichtsignalanlage als Ergebnis des STCA für verschiedene Parameter  $p_{brake}$  und  $v_{max}$ .**

Realistische Werte der Folgezeitlücke  $t_f$  liegen in der Größenordnung von 2,6 bis 4,0 (Brilon, Weinert, 1999). Demnach (vgl. Abb. 4) müssen zur STCA-Simulation von vorfahrtsregulierten Knotenpunkten im Nebenstrom  $p_{brake}$ -Werte zwischen 0,3 und 0,6 verwendet werden ( $v_{max} = 2$  ist im Nebenstrom als realistische Grenze anzusehen).

Die Grenzzeitlücke  $t_g$  ist in der Theorie der vorfahrtsregulierten Knotenpunkte definiert als diejenige Lücke, die im Hauptstrom mindestens frei von Fahrzeugen sein muß, damit genau ein Nebenstromfahrzeug einfahren kann.  $t_g$  wird entsprechend im CA durch eine Anzahl  $T$  freier Zellen im Hauptstrom repräsentiert. Dabei entspricht  $T$  der Nettozeitlücke zwischen zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen im Hauptstrom. Die mittlere Geschwindigkeit im Hauptstrom ist gemäß den Regeln der STCA gleich  $v_{max} - p_{brake}$ . Daher ergibt sich eine erforderliche Bruttogrenzzeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen im Hauptstrom

$$T_{brutto} = t_g \cdot (v_{max,h} - p_{brake,h}) \quad (\text{Zellen})$$

und eine erforderliche Nettogrenzzeitlücke

$$T = t_g \cdot (v_{\max,h} - p_{\text{brake},h}) - 1 \quad (\text{Zellen})$$

mit

$$T = \text{Anzahl freier Zellen im Hauptstrom (ganzzahlig gerundet)} \quad (\text{Zellen})$$

$$t_g = \text{Grenzzeitlücke} \quad (\text{s})$$

$$v_{\max,h} = \text{maximale Wunschgeschwindigkeit im Hauptstrom} \quad (\text{Zellen/s})$$

$$p_{\text{brake},h} = \text{Parameter } p_{\text{brake}} \text{ im Hauptstrom} \quad (-)$$

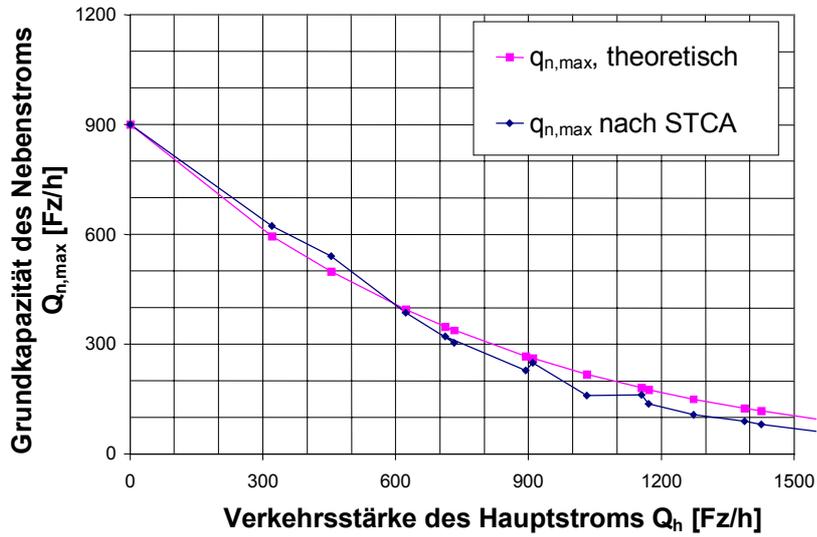
Für  $t_g$  sind nach neueren Resultaten (Brilon, Weinert, 1999) Werte zwischen 5,9 und 7,4 s realistisch. Bei  $v_{\max,h} = 2$  und  $p_{\text{brake},h} = 0,2$  ergeben sich für  $T$  Werte zwischen 8 und 12 Zellen. In Abb. 5 ist die durch einen STCA ermittelte Kapazität eines vorfahrtgeregelten Knotenpunkts mit der theoretischen Kapazität verglichen (Parameter:  $p_{\text{brake},h} = 0,2$ ;  $v_{\max,h} = 2$ ;  $t_g = 5$  s,  $t_f = 4$  s; 1 Fahrstreifen im Hauptstrom, 1 Fahrstreifen im Nebenstrom;  $T = 8$ ). Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

Als Fazit für die Simulation an Knotenpunkten mit dem STCA kann an dieser Stelle festgestellt werden: Mit dem STCA können die Kapazitäten von Lichtsignalanlagen und vorfahrtgeregelten Knotenpunkten realistisch abgebildet werden. Für den Parameter  $p_{\text{brake}}$  sind folgende Werte zu wählen:

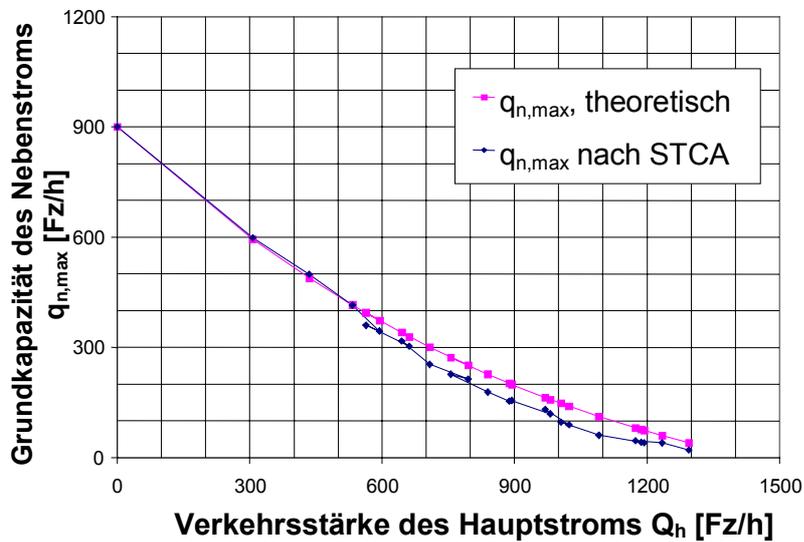
- LSA:  $p_{\text{brake}} \approx 0,2$ .
- Vorfahrt:  $p_{\text{brake}} \approx 0,4$  bis  $0,6$ , je nach der Art des Nebenstroms.

Dabei ist es für die Programmierung des CA außerordentlich unpraktisch, daß an verschiedenen Stellen des Straßennetzes unterschiedliche Parameter  $p_{\text{brake}}$  einzusetzen sind. Zumindest ist dies eine Verkomplizierung, mit der die Erfinder nicht gerechnet haben.

Zusätzlich zum Anfahren aus dem Stand kann selbstverständlich auch der fließende Verkehr mit dem STCA simuliert werden. Auch hier hängt die Kapazität von  $p_{brake}$  und  $v_{max}$  ab (Abb. 6).



a)



b)

Abb. 5 – Kapazität des Nebenstroms an einem vorfahrtgeregelten Knotenpunkt

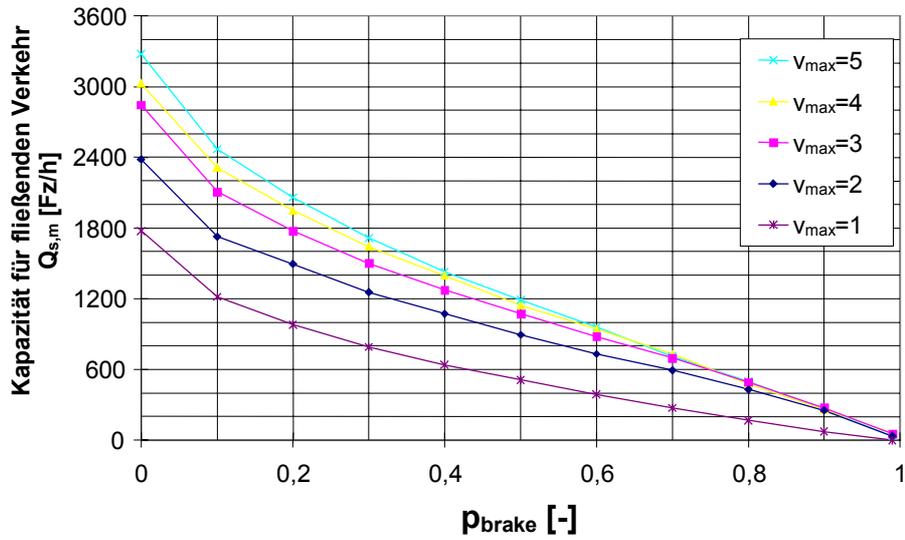


Abb. 6 – Kapazität im fließenden Verkehr für den STCA bei 1-streifigem Verkehr

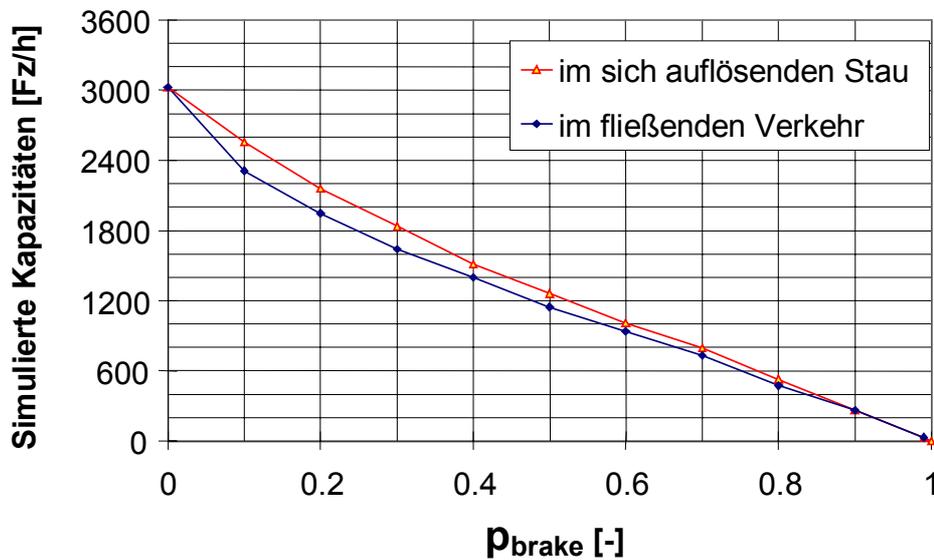


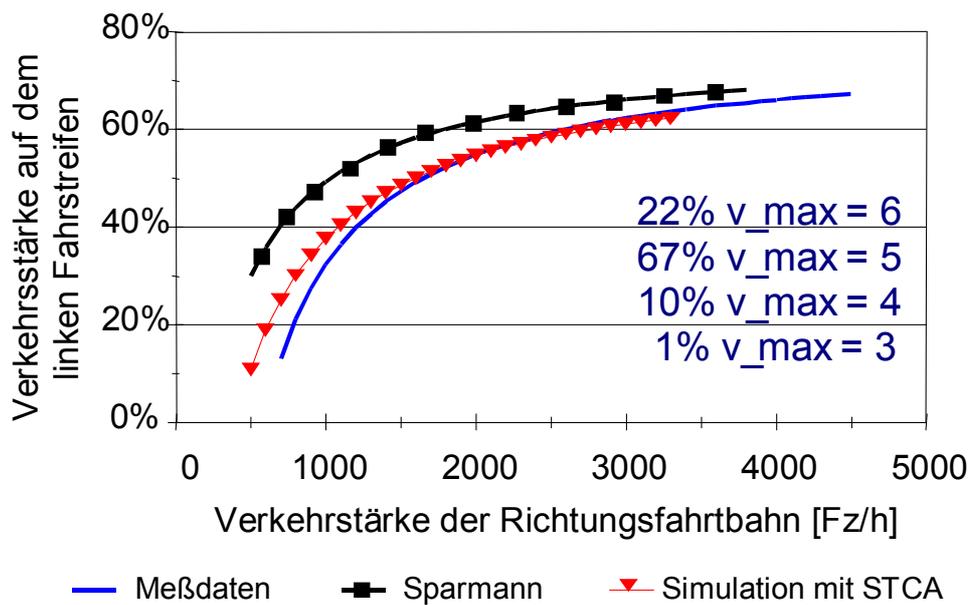
Abb. 7 – Vergleich der Kapazitäten im fließenden Verkehr und im sich auflösenden Stau für  $v_{max} = 4$  für eine 1-streifige Fahrbahn

Wenn man hier von Geschwindigkeiten ausgeht, wie sie auf Autobahnen gefahren werden ( $v_{max} = 4 - 6$ ), so ergibt ein  $p_{brake}$  zwischen 0,2 und 0,3 eine realistische Größenordnung für die Kapazität.

Wenn man Abb. 3 und Abb. 6 vergleicht, ergibt sich ein unrealistischer Effekt (vgl. Abb. 7): In allen Fällen ist die Kapazität für Anfahren aus dem Stau (Abb. 3) größer als für den frei fließenden Verkehr (Abb. 6). Dies ist in der Abb. 7 für  $v_{\max} = 4$  dargestellt. In der Realität ist es jedoch genau umgekehrt: Im frei fließenden Verkehr wird meistens ein höherer (niemals jedoch ein geringerer) Durchsatz erreicht als im Stau oder bei der Auflösung eines Staus. Diesen real zu beobachtenden Unterschied der beiden Kapazitäten nennt man "capacity drop". Diese Wirkung läßt sich im STCA nicht nachbilden.

### 2.3 *Mehrstreifiger Verkehr auf Autobahn*

Für mehrstreifigen Verkehr auf Autobahnen müssen die drei einfachen Regeln erweitert werden um diejenigen Regeln, nach denen die FFE ihren Fahrstreifen wählen oder nach denen sie auf einen anderen Fahrstreifen überwechseln. Derartige Regeln sind auch für sonstige mikroskopische Simulationsmodelle zu formulieren (vgl. Wiedemann, Hubschneider, 1987). Solche Regeln werden meist aus der eigenen Anschauung des Modellentwicklers hergeleitet. Für den STCA werden Regeln zur Fahrstreifenwahl von Nagel, Wagner, Wolf (1996) vorgeschlagen. Diese Regeln sind für eine zweistreifige Richtungsfahrbahn (für drei- oder mehrstreifige Richtungsfahrbahnen gelten die gleichen Regeln zum Fahrstreifenwechsel) in Anhang 1 erklärt. Sie bedeuten zusammengefaßt: Ein Fahrstreifenwechsel von rechts nach links wird vorgenommen, wenn ein langsames rechts vorausfahrendes FFE zu überholen ist. Ein Wechsel vom linken zum rechten Fahrstreifen findet statt, wenn das FFE auf dem linken Fahrstreifen nicht mehr den Anschluß (Abstand  $> v_{\text{offset}}$ ) an einen Vordermann halten kann. In beiden Fällen wird der Wechsel nur durchgeführt, wenn dadurch an keiner Stelle gefährlich geringe Abstände entstehen. Es wird also einerseits ein sehr auf der sicheren Seite liegendes Verhalten unterstellt. Andererseits wird mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ( $p_{r2l}$ : rechts nach links,  $p_{l2r}$ : links nach rechts), sofern ein Wunsch zum Fahrstreifenwechsel vorliegt, dieser auch in aggressiver oder riskanter Weise vorgenommen.



**Abb. 8 – Aufteilung des Verkehrs auf die beiden Fahrstreifen einer Autobahn: Vergleich des STCA mit Meßergebnissen.**

Zusätzlich ist das Verbot zum Rechts-Überholen, das in Deutschland auf Autobahnen gilt, zu berücksichtigen.

Dieses in Anhang 1 in Detail erklärte Modell der Fahrstreifenwahl ist insgesamt plausibel und mit den Verkehrsregeln sowie der Erfahrung verträglich. Dennoch ist auch dieses Modell als relativ grob einzustufen. Es bringt drei zusätzliche Parameter in die Simulation ein:  $v_{offset}$ ,  $p_{r2l}$ ,  $p_{l2r}$  (zusätzlich zu  $p_{brake}$  und  $v_{max}$ ).

Diese Parameter sind ebenfalls zu kalibrieren. Dabei wird angestrebt, die makroskopischen Zusammenhänge im Verkehrsfluß auf Autobahnen in möglichst realistischer Weise zu treffen.

Als Maßstab hierfür sollen verwendet werden:

- Verteilung des Verkehrs auf die beiden Fahrstreifen,
- Verkehrsstärke ( $q$ ) - Geschwindigkeit ( $\bar{v}_m$ ) - Diagramm.

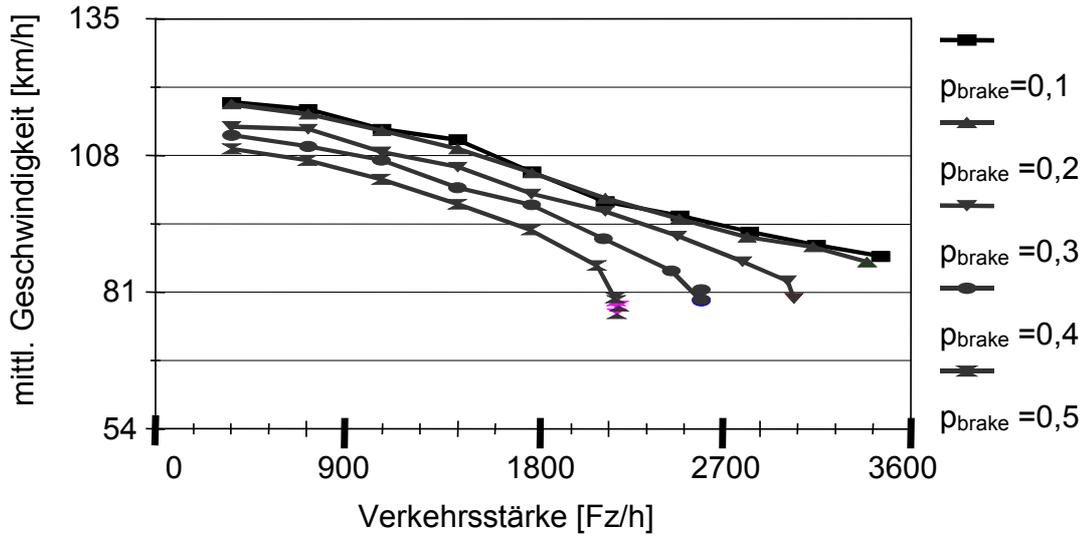


Abb. 9 – q - v - Diagramm des Verkehrsflusses auf einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn als Ergebnis des STCA

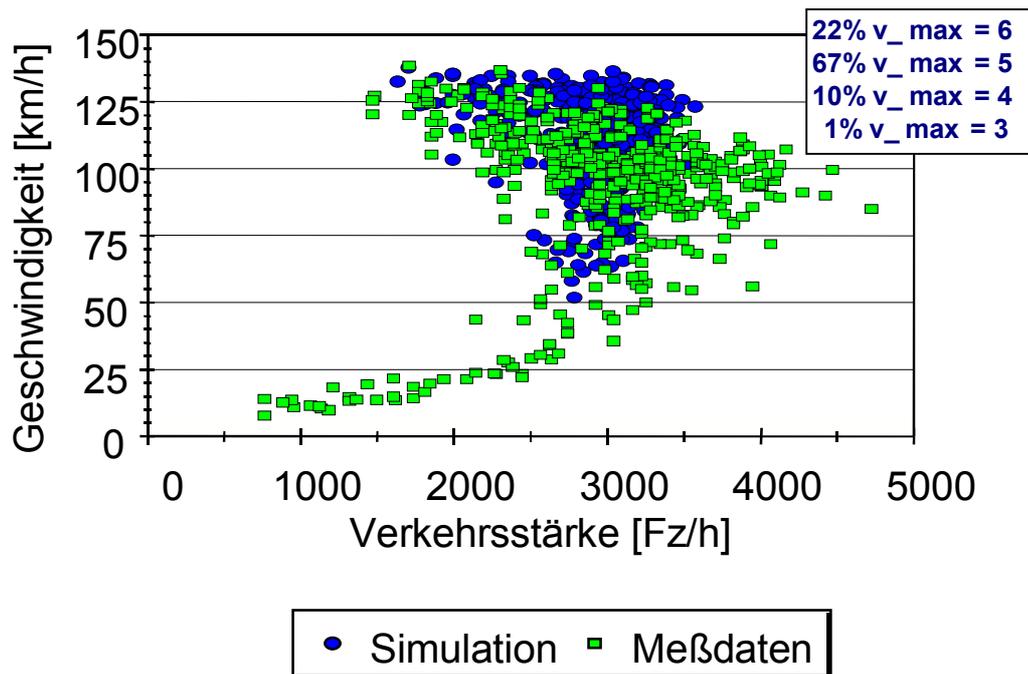


Abb. 10 – Vergleich eines realen (eckige helle Punkte) q - v - Diagramms mit einem STCA-simulierten (runde dunkle Punkte) q - v - Diagramm

Eine große Serie von Simulationen hat gezeigt, daß

- $v_{\text{offset}}$ ,  $p_{r2l}$ ,  $p_{l2r}$  festzulegen sind, um eine realistische Fahrstreifenaufteilung zu erreichen (vgl. Abb. 8). Als sinnvoll ergaben sich:  $v_{\text{offset}} = 6 - 8$ ;  $p_{r2l} = 0,2$ ;  $p_{l2r} = 0,05$ .
- die Form des  $q - \bar{v}_m$  - Diagramms im wesentlichen von  $p_{\text{brake}}$  beeinflusst wird (vgl. Abb. 9).

Der Vergleich in Abb. 9 zeigt: Die Kapazität geht mit zunehmenden  $p_{\text{brake}}$  zurück. Ebenso reduziert ein größeres  $p_{\text{brake}}$  erwartungsgemäß die Geschwindigkeiten.

Der Vergleich mit realen  $q - v$  - Diagrammen zeigt: Eine hinreichende Übereinstimmung ist nicht zu erreichen. Dies wird an zwei Vergleichen verdeutlicht.

Abb. 10 zeigt das  $q - v$  - Diagramm von der A1 bei Ladbergen (Osnabrück - Münster) für ca. 10 Stunden, aufgeteilt in 1-Minuten-Intervalle (eckige helle Punkte). Die Messung fand an einem Sonntag mit nahezu ausschließlich Pkw-Verkehr statt. Die bei der Messung erfaßten Ganglinien der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeitsverteilung wurden als Eingabe in eine STCA-Simulation (mit  $p_{\text{brake}} = 0,1$ ) verwendet. Daraus ergab sich das zweite in Abb. 10 dargestellte  $q - v$  - Diagramm (runde dunkle Punkte). Es ist deutlich zu erkennen:

- Die realen maximalen Verkehrsstärken von bis zu 4000 Kfz/h werden von STCA mit maximal 3400 Kfz/h nicht erreicht.
- Im STCA gehen die Geschwindigkeiten nicht so stark mit der Verkehrsstärke  $q$  zurück wie in der Realität.
- Die real aufgetretenen 6 vorübergehenden Verkehrsstaus werden vom STCA nicht nachgebildet.

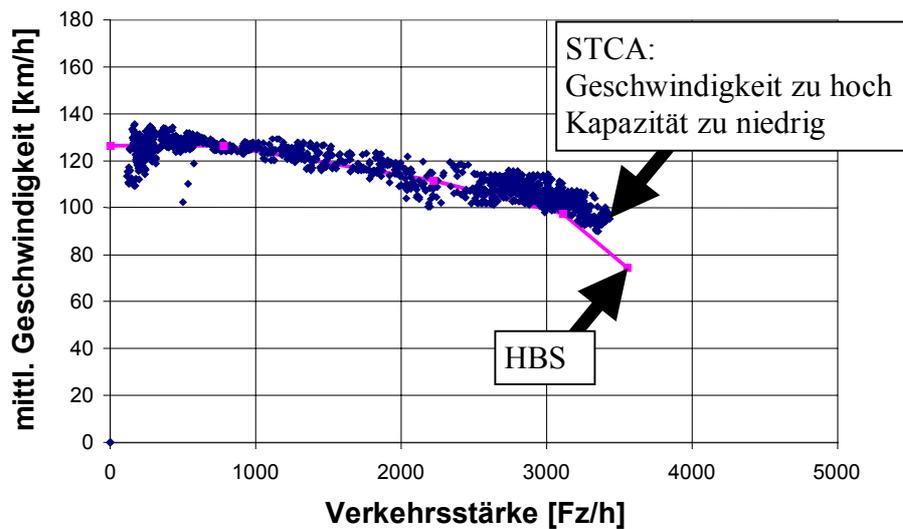


Abb. 11 – Abweichungen zwischen STCA und  $q - v$  - Diagramm für eine Autobahn mit  $p_{\text{brake}} = 0,1$  (2 Fahrstreifen pro Richtung)

Tab. 1 – Parameter - Katalog für ideale Verkehrsbedingungen

Parameter	2-streifige Verbindungsstrecke	2-streifige Stadtautobahn	3-streifige Verbindungsstrecke
$p_{\text{brake}}$	0.1	0.05	0.05
$v_{\text{Pkw}}: v_{\text{max}}=6$	25% des Pkw-Anteils		
$v_{\text{Pkw}}: v_{\text{max}}=5$	50% des Pkw-Anteils		
$v_{\text{Pkw}}: v_{\text{max}}=4$	25% des Pkw-Anteils		
$v_{\text{Lkw}}: v_{\text{max}}=3$	100% des Lkw-Anteils		
$p_{\text{l2r}}$	0.05		
$p_{\text{r2l,Pkw}}$	0.2		
$p_{\text{r2l,Lkw}}$	0		
$v_{\text{offset}}$	6	3	3

Als weiterer Vergleich soll Abb. 11 dienen. Hier ist in das  $q - v$  - Diagramm die Linie für reinen Pkw-Verkehr nach Brilon, e.a. (1994) eingetragen. Sie wird als eine Standardlösung für das  $q - v$  - Diagramm einer zweistreifigen (pro Richtung) Autobahn im Fernverkehr angesehen. Mit dem STCA gemäß Tab. 1 sind bei unterschiedlichen Verkehrsstärken Simulationen durchgeführt worden. Deren Ergebnisse aus 15-Minuten-Intervallen sind in

Abb. 11 eingetragen. Hier wird erneut deutlich: Auch bei sehr geringem Parameter  $p_{\text{brake}} = 0,1$  wird nicht die reale Kapazität erreicht. Trotzdem ist bei der im STCA maximal möglichen Verkehrstärke die Geschwindigkeit höher als in der Realität.

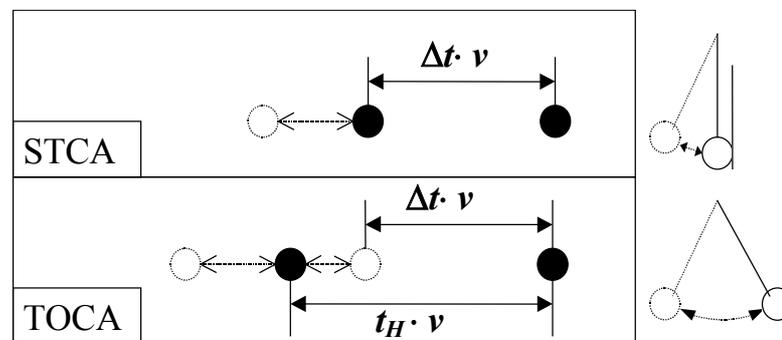
Am Ende bleibt für Autobahnen festzustellen: Der STCA ist nicht geeignet, um realitätsnah Verkehr auf Autobahnen zu simulieren. Er würde vielfach Verkehrsüberlastungen diagnostizieren, obwohl die Strecken noch stärkeren Verkehr verkraften können. Eine realistische Stauprognose ist somit nicht möglich.

**Tab. 2 – Simulierte Kapazitäten in Fz/h nach STCA für ideale Verkehrsbedingungen**

Anteil von LKW	2-streifige Verbindungsstrecke	2-streifige Stadtautobahn	3-streifige Verbindungsstrecke
5%	3300	3500	4900
10%	3250	3450	4800
15%	3200	3400	4700

Ein Nachdenken über das STCA-Modell ergibt als Ursache für die mangelnde Realitätsnähe das Fahrzeugfolgemodell, wie es durch die Regeln 1 bis 3 dargestellt wird. Als ein Aspekt der Realitätsferne sind wohl die extrem großen Verzögerungen und Beschleunigungen anzusehen. Als noch schwerwiegenderer Nachteil stellt sich aber heraus: Die im realen Verkehr zu beobachtenden Pendelbewegungen bei der Abstandshaltung werden unzureichend nachgeahmt. Diese systematischen Pendelbewegungen werden z. B. von Wiedemann (1974) und Wiedemann, Hubschneider (1987) als Charakteristikum des Autobahnverkehrs beschrieben. Sie wurden von Hoefs (1972) auch durch Messungen erfaßt. Diese Pendelbewegungen führen die FFE in der Realität in einer symmetrischen Weise um einen mittleren Folgeabstand durch. Sie nähern sich in teilweise riskanter Weise dem Vordermann an, da sie auf die Geschwindigkeitsänderung des Vordermanns erst nach einer bestimmten Reaktionszeit ( $\approx 1$  s) reagieren können. Manche Autofahrer nähern sich absichtlich sehr stark

dem Vordermann an, um dann durch geringe Verzögerungen wieder allmählich zurückzufallen. Dagegen prallen im STCA nach Regel 2 die FFE gleichsam an ihrem Vordermann ab. Sofern sie in irgendeiner Phase die Tendenz haben, sich dem Vordermann stärker anzunähern, werden sie abrupt zurückgehalten. Bildlich läßt sich dies wie in Abb. 12 (oben) veranschaulichen: Der Vordermann wirkt auf ein FFE wie eine starre Wand auf ein Pendel. Jede Reaktion auf den Vordermann erfolgt erst dann, wenn bereits der minimal zulässige Abstand (gleichzeitig den Nullpunkt der Pendelbewegung) erreicht ist. Eine vollständige Pendelbewegung kann dabei nicht in Gang gesetzt werden.



$\Delta t = \text{update-Zeit}$   $t_H = \text{mittlere Reaktionszeitlücke}$

$\Delta t \cdot v = \text{Mindestabstand}$   $t_H \cdot v = \text{mittlerer Folgeabstand}$

Abb. 12 – Analogie des Fahrzeug-Folgeverhaltens mit einem Pendel

### 3 Der zeit-orientierte Zellular-Automat (TOCA)

Die Notwendigkeit, ein für den Autobahnverkehr besseres Modell als den STCA zu schaffen und die genannten kritischen Überlegungen haben zu einem neuen Modell geführt, dem zeitorientierten Zellular-Automaten (time-oriented CA, TOCA). Die Grundidee richtet sich darauf, das Fahrzeug-Folgeverhalten mehr in Richtung auf ein gleichmäßiges Pendeln des Abstandes um den im Mittel gewünschten Folgeabstand zu verändern. Dieser mittlere Folgeabstand soll von dem minimalen zulässigen Abstand entkoppelt werden. Dabei werden

diese beiden Größen des Folgeabstands durch zeitliche Größen, also Zeitlücken, ausgedrückt.

Entsprechend werden definiert:

- mittlerer angestrebter Folgeabstand =  $t_H \cdot v$
- minimaler zulässiger Folgeabstand =  $\Delta t \cdot v$

mit

$$\begin{aligned} t_H &= \text{mittlere Reaktionszeitlücke} \\ &= \text{mittlere Folgezeitlücke in einer Fahrzeugkolonne} \end{aligned} \quad (\text{s})$$

$$\begin{aligned} \Delta t &= \text{minimal zulässige Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen} \\ &= \text{Aktualisierungszeitschritt des CA (= 1 s)} \end{aligned} \quad (\text{s})$$

Es gilt immer  $t_H > \Delta t$ .

Die Regeln für die Abstandshaltung im TOCA bleiben trotz dieser neuen Definition sehr ähnlich denen des STCA (Absatz 2). Die neuen TOCA-Regeln lauten:

### (1) Beschleunigen:

Wenn  $t_H \cdot v < \text{gap}$  und  $v < v_{\max}$  dann (mit Wahrscheinlichkeit  $p_{ac}$ ):  $v = v + 1$

d.h.: Wenn die Zeitlücke (=  $\text{gap}/v$ ) zum Vordermann größer als  $t_H$  ist und wenn zugleich des FFE langsamer als mit seiner Wunschgeschwindigkeit  $v_{\max}$  fährt, dann beschleunigt es mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p_{ac}$  um eine Geschwindigkeitsstufe. Auch wenn im konkreten Fall die Beschleunigung = 1 Zelle/s =  $7,5 \text{ m/s}^2$  ist, so betragen durch den zwischengeschalteten Zufallsprozeß alle derartigen Beschleunigungen im Mittel  $p_{ac}$  Zellen/s<sup>2</sup>. Die Entscheidung, ob im jeweiligen Einzelfall beschleunigt wird, ist mit einem Zufallsgenerator für (0,1)-gleichverteilte Zufallszahlen getroffen: Wenn die Zufallszahl  $< p_{ac}$  ist, wird um 1 beschleunigt sonst nicht. ( $v$ ,  $\text{gap}$  und  $v_{\max}$  wie in Absatz 2.)

**(2) Abstandhalten:**

Wenn  $v > \text{gap}$  dann:  $v = \text{gap}$

Diese Regel ist identisch mit der Regel 2 in STCA (Abkürzung siehe Absatz 2).

**(3) Verzögern:**

wenn  $t_H \cdot v > \text{gap}$  und  $v > 0$  dann (mit Wahrscheinlichkeit  $p_{dc}$ ):  $v = v - 1$

Damit wird zusätzlich zu der Notbremsung nach Regel 2 eine Verzögerung um 1 Geschwindigkeitsstufe bereits dann eingeführt, wenn die Zeitlücke (=  $\text{gap}/v$ ) zum Vordermann kleiner als  $t_H$  wird. Durch die Verknüpfung mit dem über  $p_{dc}$  gesteuerten Zufallsprozeß wird dieser Vorgang - verglichen mit dem STCA - relativ elastischer.

Der STCA hatte ein Element der Zufälligkeit durch seine Regel 3 ("Trödeln") eingeführt. Dieses Element wird in TOCA nicht mehr benötigt, weil der Charakter der Zufälligkeit bereits durch die beiden Wahrscheinlichkeiten  $p_{ac}$  und  $p_{dc}$  erreicht ist. Insgesamt entsteht durch die neuen Regeln ein Fahrzeugfolgeverhalten, das mit den Pendelbewegungen um einen mittleren Folgeabstand eher vergleichbar ist. Die Analogie mit einem Pendel (Abb. 12) soll dies veranschaulichen. Dadurch, daß  $p_{ac}$  und  $p_{dc}$  unterschiedlich gewählt werden, entstehen im Mittel bei der Annäherung an einen Vordermann (Verzögerung) und beim Wieder-Entfernen von einem Vordermann (Beschleunigung) unterschiedliche Raten für Beschleunigung und Verzögerung. Diese beiden Wahrscheinlichkeiten  $p_{ac}$  und  $p_{dc}$  sind zusammen mit der mittleren Reaktionszeitlücke  $t_H$  die Parameter des TOCA-Modells. Sie sind zur Anpassung an die Realität zu kalibrieren (anstelle  $p_{brake}$  im STCA).

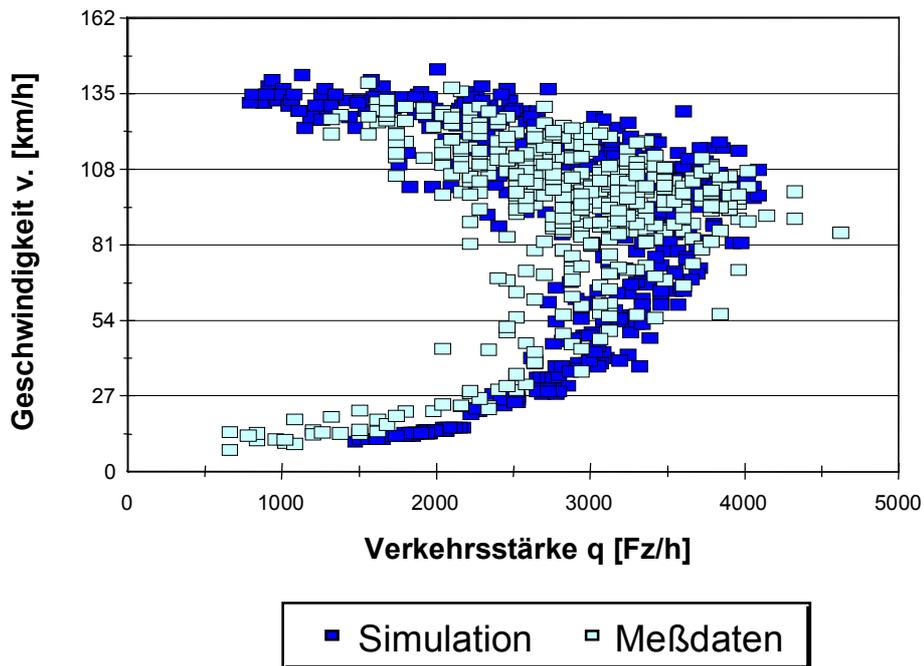
Zusätzlich zum Fahrzeugfolgeverhalten sind im TOCA auch die Regeln für den Fahrstreifenwechsel in analoger Weise angepaßt worden (vgl. Anlage 2). Als neue Parameter für den Verkehr auf mehrstreifigen Autobahnen kommen dadurch hinzu:

- $t_{H,r}$ : Reaktionszeitlücke zum Vordermann auf dem rechten Fahrstreifen

- $t_{H,l}$  : Reaktionszeitlücke zum Vordermann auf dem linken Fahrstreifen
- $t_{H,b}$  : Reaktionszeitlücke des nachfolgenden Fahrzeuges auf dem jeweiligen anderen Fahrstreifen

**Tab. 3 – Empfohlenen Parameter für das TOCA - Modell**

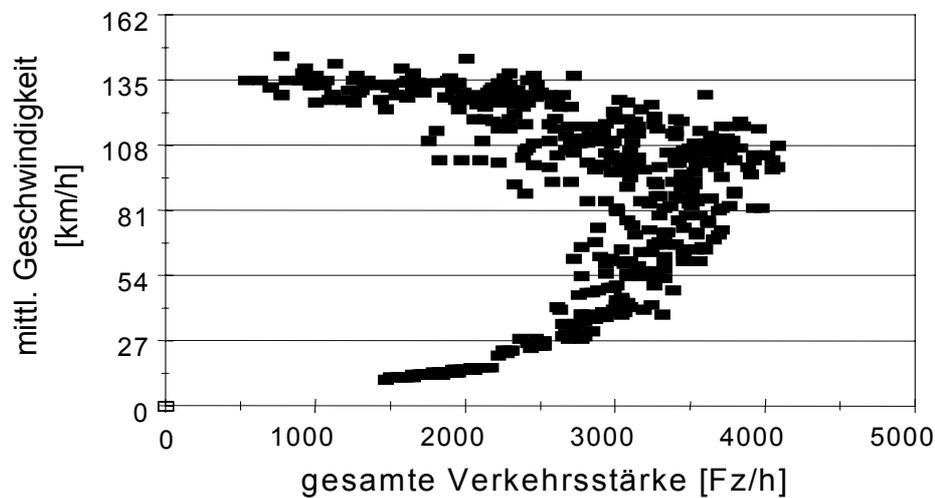
Fahrzeugfolgeverhalten			Fahrstreifenwechseln links nach rechts			Fahrstreifenwechseln rechts nach links		
$p_{ac}$	$p_{dc}$	$t_H$	$t_{H,r}$	$t_{H,l}$	$t_{H,b}$	$t_{H,r}$	$t_{H,l}$	$t_{H,b}$
0.9-1.0	0.9-1.0	1.1-1.2	3.0-4.0	2.5-3.0	1.5-2.0	1.8-2.0	1.2-1.4	1.2-1.4
-	-	s	s	s	s	s	s	s



**Abb. 13 – Vergleich eines realen (hellere Punkt) q - v - Diagramms mit einem TOCA-simulierten (dunklere Punkte) q - v - Diagramm**

Die Kalibrierung des Modells mit Daten aus dem realen Verkehr führt zur Empfehlung der Parameter nach Tab. 3. Mit diesen Parametern ist eine Simulation des Verkehrs auf der A1

(vgl. Abb. 10) durchgeführt worden. Das Ergebnis ist in Abb. 13 gezeigt. Es zeigt sich nun eine gute Übereinstimmung des simulierten  $q - v$  - Diagramms mit dem gemessenen. Auch in der TOCA-Simulation wird eine Kapazität von ca. 4000 Fz/h erreicht. Die Verringerung der Geschwindigkeit mit zunehmender Verkehrsstärke nimmt eine realistische Form an. Zusätzlich werden unvermittelt auftretende Stauerscheinungen - wie in der Realität - nachgebildet. Zur Verdeutlichung ist das simulierte  $q - v$  - Diagramm nochmals in Abb. 14 dargestellt.



**Abb. 14 - TOCA-simuliertes  $q - v$  - Diagramm für die A1**

Dieser Vergleich zeigt - ebenso wie weitere durchgeführte Vergleiche - daß das TOCA-Simulationsmodell Autobahnverkehr realistisch nachbilden kann, was die makroskopischen Ergebnisse betrifft.

Dazu wird nochmals klargestellt: Auch die Verhaltensmodelle des TOCA (Regeln 1 bis 3 und Fahrstreifenwahl nach Anhang 2) sind sehr grob und im Detail alles andere als realistisch. Diese Regeln ermöglichen jedoch eine sehr einfache Programmierung und einen sehr schnellen Programmablauf. Sie ergeben bei mikroskopischer Beurteilung der Ergebnisse (d.h.

in den Zusammenhängen zwischen Verkehrsstärke  $q$  und der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{v}_m$  und damit auch mit der Verkehrsdichte  $k$ ) eine realistische Wiedergabe des Verkehrs auf Autobahnen.

Dieser entscheidende Realitätsgewinn wird nur durch eine unwesentliche Verkomplizierung - im Vergleich mit dem STCA - erkauft. Das Modell ist weiterhin ein reiner Zellular-Automat. Es betrachtet die Strecke nicht als Kontinuum, wie dies die traditionellen Modelle nach der von Wiedemann (1974) begründeten Simulationstechnik tun. Vielmehr wird die Zeit-Weg-Ebene auch weiterhin nur durch Zellen der Größe  $\Delta x = 7,5 \text{ m} \cdot \Delta t = 1 \text{ s}$  repräsentiert. Auch der TOCA kann durch eine bit-orientierte Computer-nahe Programmierung umgesetzt werden. Die Behandlung aller Fahrzeuge kann auch hier parallel zueinander durchgeführt werden. Dadurch kann auch das TOCA-Modell - wie der STCA - in einem extrem schnellen Computercode umgesetzt werden.

#### **4 Anwendbarkeit**

Am Ende wird sich der eher pragmatisch orientierte Leser natürlich fragen: Kann man mit der Technik der CA auch etwas in der Praxis anfangen? Die Antwort ist: ja - und die praktische Bedeutung wird angesichts der zukünftig absehbaren Anforderungen und der wachsenden rechnerischen Möglichkeiten zunehmen.

Eine erkennbare Anwendungsmöglichkeit liegt in der Steuerung des Verkehrs auf Autobahnen. Man stellt sich folgendes Szenario vor: Für ein dichtes und stark befahrenes Autobahnnetz - z.B. das von Nordrhein-Westfalen - sei ein realistisches TOCA-Simulationsmodell erstellt worden, das leicht abrufbar auf einem Rechner der Straßenverkehrsbehörde installiert ist. Der Rechner kennt jederzeit die zu erwartende Verkehrsnachfrage der nächsten Stunden. Grundlage dafür sind Ganglinien aus der Vergangenheit und die Verkehrsentwicklung der jeweils letzten Stunden. Unvorhergesehen, z.B. durch einen Unfall, tritt eine längere Sperrung eines Teilabschnitts einer Autobahn ein. In

dieser Situation startet der Rechner mit mehreren als sinnvoll erscheinenden Umleitungs- und Steuerungsmaßnahmen je einen Simulationslauf. Durch die schnelle TOCA-Simulation kann er die Konsequenzen jeder Steuerungsmaßnahme für das gesamte Netz in wenigen Minuten durchrechnen und mit der Voraussicht auf die nächsten Stunden bewerten. Er wählt daraus die vorteilhafteste Steuerungsalternative aus und veranlaßt alle dafür erforderlichen Maßnahmen.

Dies ist in zweierlei Hinsicht allerdings heute noch Zukunftsmusik: Die zugehörigen Programme müßten erst noch geschrieben und in die Organisation der Verkehrssteuerung integriert sein. Zum anderen gibt es wohl zu vertretbaren Kosten heute noch nicht die Rechner, die das Autobahnnetz von Nordrhein-Westfalen mit allen einzelnen Fahrzeugen in Minuten simulieren können. Es wäre aber heute an der Zeit mit der Arbeit an den erforderlichen Programmen zu beginnen, damit sie fertig sind, wenn die geeigneten Rechner verfügbar sind. Daß solche Rechner verfügbar sein werden, ist angesichts der bisherigen Entwicklung der Computertechnik absehbar.

In gleicher Weise wie beim dargestellten Szenario einer Autobahnsperre können CA-Programme auch eingesetzt werden, um Steuerungsmaßnahmen privater Service-Anbieter, z.B. per Autotelefon, wie sie heute schon in unvollkommenen Ansätzen existieren, zu verbessern. Alle Dienste (z.B. Rundfunk-Verkehrsmeldungen, Tegaron (D1), Passo (D2) Dynaps (Mercedes)) können bisher nur gegenwärtige Störungen in ihren Empfehlungen berücksichtigen. Um eine Routenempfehlung für einen Kraftfahrer aber wirklich wertvoll zu gestalten, ist die weitere zeitliche Entwicklung der Verkehrssituationen entlang der Fahrtroute von entscheidendem Einfluß. Dies gilt um so mehr, je weiter die Fahrt geht. Dieser Arbeitsschritt der Verkehrsprognose für das gesamte Netz muß ständig nach der bereits eingetretenen Verkehrslage aktualisiert werden. Deshalb ist auch hier eine sehr schnelle und genaue Technik zur Vorhersage von Verkehrszuständen erforderlich. Auch hierfür bietet sich die CA-Technik an.

Ebenso wie die CA-Technik Varianten der Verkehrssteuerung ermitteln und verbessern kann, eignet sie sich auch dazu, Varianten zum Ausbau der Verkehrsinfrastruktur zu behandeln. Es ist also denkbar, daß die CA-Technik in der Zukunft die Umlegungstechnik der klassischen Verkehrsplanung ersetzt. In den USA ist mit - für deutsche Verhältnisse - gigantischem Aufwand dies bereits im TRANSIM-Projekt (Internet: <http://studguppy.tsasa.lanl.gov/>) umgesetzt worden. Auf hiesige Maßstäbe reduziert: Die CA-Technik ist als die genaueste - und zugleich aus heutiger Sicht realisierbare - Methodik anzusehen, mit der mittelfristig die Variantenbewertung bei der Bedarfsplanerstellung für die Bundesfernstraßen auf ein realistisches verkehrstechnisches Fundament gestellt werden könnte.

Im Sinne der Verkehrsinformation werden CA-Programme schon heute für die Stadt Duisburg eingesetzt (Prof. Dr. Schreckenber, 1999; Internet: <http://www.traffic.uni-duisburg.de/OLSIM/olsim.html>). Hier werden aktuelle Informationen durch Verkehrsdetektoren erhoben. Für die damit nicht erfaßten Streckenabschnitte wird die Verkehrslage durch CA-Simulationen eingeschätzt.

Zusätzlich zur direkten Nutzenanwendung der CA ergibt die Beschäftigung damit auch grundsätzliche Erkenntnisse, die sich möglicherweise ganz generell in der Theorie des Verkehrsflusses umsetzen lassen. Dazu gehören:

- Ein extrem rohes mikroskopisches Verhaltensmodell reicht aus, um realistische makroskopische Zusammenhänge zu erzeugen. Eine zu feine Modellierung im konventionellen Simulationsmodellen ist möglicherweise sinnlos. Es kann ausreichend sein, wesentliche Grundprinzipien des Verhaltens von Fahrern und Fahrzeugen zu isolieren und diese in ein Modell einzubeziehen. Welche Prinzipien des mikroskopischen Verhaltens unbedingt notwendig sind, ist allerdings noch festzustellen.

- Zu diesen Prinzipien gehört für den Autobahnverkehr (übertragbar auf Fahrzeugfolgeverhalten allgemeiner Art): Es gibt eine Reaktionszeitschwelle auf vorausfahrende Fahrzeuge, die oberhalb des fahrdynamischen minimalen Abstands liegt. Nur ein solches Verhalten kann die größere Kapazität im fließenden Verkehr im Vergleich zum gebundenen Verkehr erklären.
- Unvorhergesehene und nicht von der Fahrdynamik des Verkehr (Fahrzeugfolgeverhalten) veranlaßte Geschwindigkeitsverminderungen sind Veranlassung für "Verkehrszusammenbrüche" (plötzliche starke Verringerungen der Geschwindigkeit für längere Zeit). Solche "Trödeleffekte" sollten Grundbestandteil von realistischen Verkehrsflußmodellen sein. anders betrachtet: Wenn "Trödeleffekte" Stau verursachen können, so sollte man nach Ansätze dafür suchen, wie man sie vermeiden kann.

Insgesamt kann der CA-Simulation in der Straßenverkehrstechnik eine erhebliche Bedeutung in der Zukunft vorhergesagt werden. Sie steht dabei in Konkurrenz zu makroskopischen, rein theoretisch begründeten - und heute noch vielfach umstrittenen - Rechenmethoden. Mit zunehmend zu günstigen Kosten erhältlicher Computerleistung hat die CA-Simulation eine gute Chance sich durchzusetzen. Sie ist verhältnismäßig leicht zu verstehen und anschaulich zu vermitteln, z.B. durch eine Animation am Rechnerbildschirm. Sie läßt sich mit verschiedenen Methoden der Routensuche in Netzen kombinieren. Und sie bildet nachprüfbar die Verkehrsverhältnisse auf Strecken und Knoten zutreffend ab. Gerade zu dem zuletzt genannten Gesichtspunkt haben die hier beschriebenen Untersuchungen einen nennenswerten Beitrag geliefert. Für den praktischen Einsatz sind vor allem die Programmieretechniken für das Modell so weiterzuentwickeln, daß bei einem netzweiten Einsatz die größtmöglichen Rechengeschwindigkeiten erreicht werden.

## 5 Literaturverzeichnis

- Brilon, W.; Ponzlet, M. (1995): Application of traffic flow models. in: D. E. Wolf, M. Schreckenberg, A. Bachem (Herausgeber), *Proceedings of Workshop in Traffic and Granular Flow*, World Scientific, Singapore.
- Brilon, W.; Großmann, M.; Blanke, H. (1994): Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs auf Straßen (HBS). *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 669.
- Brilon, W., Wu, N.; Breßler, A.; Lemke, K. (1998): Kalibrierung und Validierung der Simulationsmodelle im Rahmen des NRW Forschungsverbunds Verkehrssimulation und Umweltwirkungen (NRW-FVU). *Jahresbericht 1997*. Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum.
- Brilon, W.; Weinert, A. (1999): Ermittlung aktueller Grenz- und Folgezeitlücken für Außerortsknoten ohne Lichtsignalanlagen. *Schlußbericht für den Forschungsauftrag FE-Nr.02.173/1997/GGB der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum.
- Brilon, W.; Wu, N. (1998): Evaluation of Cellular automaton for Traffic Flow Simulation on Freeway and Urban Streets. In W. Brilon, F. Huber, M. Schreckenberg, H. Wallentowitz (Herausgeber): *Traffic and Mobility*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Brilon, W.; Wu, N. (1999): Cellular Automata for Highway Traffic Flow Simulation. *Proceedings (Band II) of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Jerusalem, Israel, 20-23 July 1999*. Technion-Israel, Institute of Technology, Haifa, Israel.
- Helbing, D. (1995): High-fidelity macroscopic traffic equations. *Physica A*, 219: S. 391-407.

- Hoefs, D.H. (1972): Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen. *"Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik"* des Bundesministeriums für Verkehrs, Heft 140.
- Krauß, S. (1998): Microscopic Modelling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics. *Dissertation*, Universität Köln.
- Leutzbach, W. (1972): *Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses*. Springer Verlag.
- Lighthill, M.T.; Witham, G.B. (1955): On kinematic waves, A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal society*, London, Series A, Vol. 229.
- Nagel, K. (1995): High-speed microsimulations of traffic flow. *Dissertation*, Universität Köln.
- Nagel, K.; Schreckenberg, M. (1992): A cellular automaton model for freeway traffic. *J. Phys. I France*, 2:2221-2229.
- Nagel, K.; Wagner, P.; Wolf, D. E.(1996): Lane-changing rules in two-lane traffic simulation using cellular automata: II. A systematic approach. *J. Phys.* A234, 687.
- Ponzlet M. (1996): Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflußmodellen (Dissertation). *Schriftenreihen des Lehrstuhls für Verkehrswesen*, Heft 16, Ruhr-Universität Bochum.
- Sparmann (1978): Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft. 263.
- Wagner, P. (1995): Traffic simulations using cellular automata: Comparison with reality. in: D. E. Wolf, M. Schreckenberg, A. Bachem (Herausgeber), *Proceedings of Workshop in Traffic and Granular Flow*, World Scientific, Singapore.

Wiedemann, R. (1974). Simulation des Verkehrsflusses. *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen*, Universität Karlsruhe, Heft 8.

Wiedemann, R.; Hubschneider, H. (1987): Simulationsmodelle. In: Lapierre, R.; Steierwald, G. (Herausgeber): *Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr*. Springer-Verlag.

Wolf, E.D.; Kertesz, J (1987): Noise reduction in Eden models: I. *J. Phys. A: Math. Gen.* 20, L257.

Wolfram, S. (1986) (Herausgeber): *Theory and Applications of Cellular Automata*. World Scientific, Singapore.

## Anhang 1:

### STCA-Regeln für den Fahrstreifenwechsel auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen

Es werden 2 Stufen unterschieden:

- Wunsch zum Überwechseln auf den anderen Fahrstreifen
- Prüfung der Möglichkeit zu einem sicheren Fahrstreifenwechsel

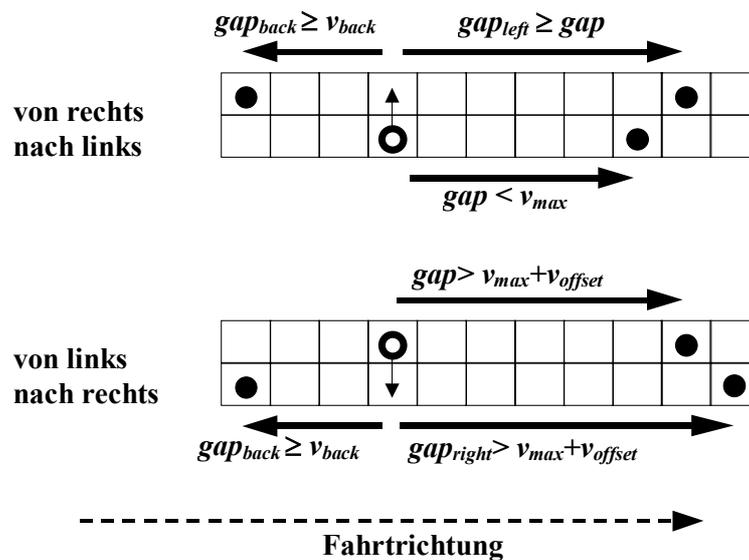


Abb. 15 – Prinzip des Fahrstreifenwechsels im STCA

In dieser Einstufung bauen sich die Regeln nach Nagel, Wagner, Wolf (1996) auf (siehe Abb. 15):

(a) für ein rechts fahrendes FFE:

- wenn  $v_{max} > gap$  und  $gap_{left} \geq gap$   
dann: Wunsch für Fahrstreifenwechsel von rechts nach links  
sonst: kein Wunsch für Fahrstreifenwechsel

- wenn  $v_{\text{back}} \leq \text{gap}_{\text{back}}$   
dann: Fahrstreifenwechsel durchführen  
sonst: kein Fahrstreifenwechsel
- wenn die Zelle neben dem FFE auf der linken Fahrstreifen leer ist, dann (mit Wahrscheinlichkeit  $p_{r2l}$ ): Wechsel nach links ohne Rücksicht auf die Abstände

mit  $v_{\text{max}}$  = Wunschgeschwindigkeit  
des betrachteten rechts fahrenden FFE (Zellen/s)

$\text{gap}$  = Lücke zum nächsten auf demselben Fahrstreifen vorausfahrenden FFE  
(Zellen)

$\text{gap}_{\text{left}}$  = Lücke zum nächsten auf dem linken Fahrstreifen vorausfahrenden FFE  
(Zellen)

$v_{\text{back}}$  = Geschwindigkeit des nächsten  
auf dem linken Fahrstreifen folgenden FFE (Zellen/s)

$\text{gap}_{\text{back}}$  = Lücke zum nächsten auf dem linken Fahrstreifen folgenden FFE  
(Zellen)

Diese kompliziert anmutenden Regeln bedeuten - verglichen mit der Realität auf deutschen Autobahnen - ein weitgehend auf der sicheren Seite liegendes Fahrstreifenwechselverhalten. Gewechselt wird nur, wenn das betrachtete FFE schneller fahren will als dies der sichere Abstand zum Vordermann zulässt und wenn auf dem linken Fahrstreifen durch den Wechsel keine gefährlich geringen Abstände entstehen. Allerdings wird mit der Wahrscheinlichkeit  $p_{r2l}$  (Steuerung durch einen Zufallsgenerator) auch riskant, d.h. ohne jede Rücksicht auf Abstände, nach links gewechselt.

(b) für ein links fahrendes FFE:

- wenn  $v_{\max} + v_{\text{offset}} < \text{gap}$  und  $v_{\max} + v_{\text{offset}} < \text{gap}_{\text{right}}$   
dann: Wunsch für Fahrstreifenwechsel von links nach rechts  
sonst: kein Wunsch für Fahrstreifenwechsel
- wenn  $v_{\text{back}} \leq \text{gap}_{\text{back}}$   
dann: Fahrstreifenwechsel durchführen  
sonst: kein Fahrstreifenwechsel
- wenn die Zelle neben dem FFE auf der rechten Fahrstreifen leer ist, dann (mit Wahrscheinlichkeit  $p_{l2r}$ ): Wechsel nach rechts ohne Rücksicht auf die Abstände

mit  $v_{\max}$  = Wunschgeschwindigkeit  
des betrachteten links fahrenden FFE (Zellen/s)

$\text{gap}$  = Lücke zum nächsten auf demselben Fahrstreifen vorausfahrenden FFE  
(Zellen)

$\text{gap}_{\text{right}}$  = Lücke zum nächsten auf dem rechten Fahrstreifen vorausfahrenden FFE  
(Zellen)

$v_{\text{back}}$  = Geschwindigkeit des nächsten  
auf dem rechten Fahrstreifen folgenden FFE (Zellen/s)

$\text{gap}_{\text{back}}$  = Lücke zum nächsten auf dem rechten Fahrstreifen folgenden FFE  
(Zellen)

$v_{\text{offset}}$  = Geschwindigkeitszuschlag  
(Modellparameter zur Kalibrierung des Modells) (Zellen/s)

Diese Regeln bedeuten: Ein links fahrendes FFE bemüht sich, nach rechts herüberzufahren, wenn es mit großen Abstand seinem Vordermann folgt. Dieser Abstand ist um  $v_{\text{offset}}$  größer als der erforderliche Sicherheitsabstand. Die Regeln für "rechts nach links" und "links nach

rechts" unterscheiden sich dadurch, daß für "rechts nach links" die Lücke (gap) zum Vordermann die Schwelle zum Fahrstreifenwechsel darstellt, während für "links nach rechts" die Lücke zum Vordermann ( $\text{gap} + v_{\text{offset}}$ ) die Schwelle zum Nichtmehrwechsel darstellt. Dadurch ergibt sich der realistische Effekt, daß die Spurenwechselbereitschaft auf den beiden Fahrstreifen unterschiedlich ist.

Zusätzlich ist das in Deutschland geltende Verbot des Rechtsüberholens dazustellen durch die Regel

(c)

- wenn  $v_{\text{right}} > \text{gap}_{\text{left}}$

dann:  $v_{\text{right}} = \text{gap}_{\text{left}}$

d.h. das rechts mit  $v = v_{\text{right}}$  fahrende FFE muß ebenso wie zu seinem Vordermann auf dem eigenen rechten Fahrstreifen auch einen Sicherheitsabstand zu dem links vor ihm fahrenden FFE einhalten.

Die Einbeziehung riskanter Fahrstreifenwechsel (d.h. mit Wahrscheinlichkeit  $p_{l2r}$  oder  $p_{r2l}$  wird ohne Rücksicht auf die Abstände gewechselt) ist wegen der Realitätsnähe erforderlich. Anderenfalls würden bei stärkeren Verkehr nach einer längeren Strecke alle FFE links fahren. Diese Abfragen und Entscheidungen für die Fahrstreifenwahl werden für alle FFE in jeder Sekunde durchgeführt. Sie müssen zeitlich vor den Regeln für die Abstandshaltung angeordnet werden.

## Anhang 2

### TOCA-Regeln für den Fahrstreifenwechsel auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen

Auch beim TOCA wird Zweistufigkeit (Wunsch des Fahrstreifenwechsels und Durchführung) unterschieden (Zur Illustration vgl. Abb. 16, Bezeichnung der Variablen: vgl. Anhang 1):

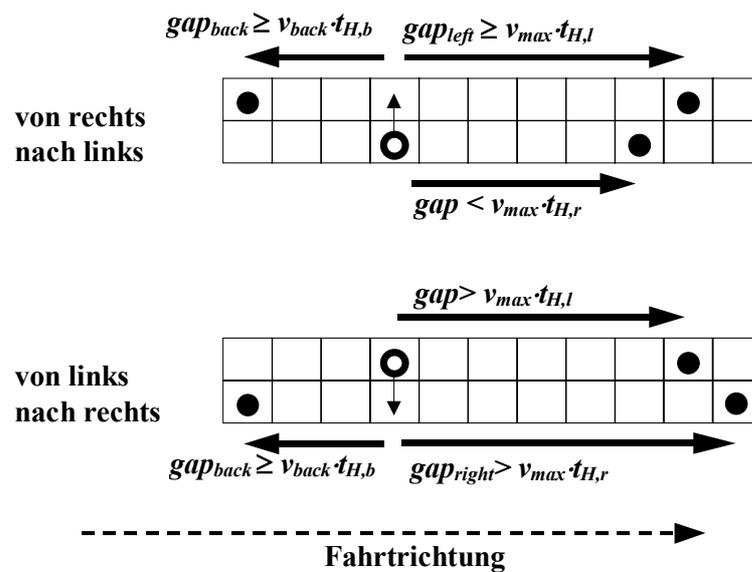


Abb. 16 – Prinzip des Fahrstreifenwechsels in TOCA

(a) für ein rechts fahrendes FFE:

- wenn  $t_{H,r} \cdot v_{max} > gap$  und  $t_{H,l} \cdot v_{max} \leq gap_{left}$   
dann: Wunsch für Fahrstreifenwechsel von rechts nach links  
sonst: kein Wunsch für Fahrstreifenwechsel
- wenn  $v_{back} \cdot t_{H,b} \leq gap_{back}$   
dann: Fahrstreifenwechsel durchführen  
sonst: kein Fahrstreifenwechsel
- wenn die Zelle neben dem FFE auf dem linken Fahrstreifen leer ist, dann (mit Wahrscheinlichkeit  $p_{r2l}$ ): Wechsel nach links ohne Rücksicht auf die Abstände

(b) für ein links fahrendes FFE:

- wenn  $t_{H,l} \cdot v_{\max} < \text{gap}$  und  $t_{H,r} \cdot v_{\max} < \text{gap}_{\text{right}}$   
dann: Wunsch für Fahrstreifenwechsel von links nach rechts  
sonst: kein Wunsch für Fahrstreifenwechsel
- wenn  $t_{H,b} \cdot v_{\text{back}} \leq \text{gap}_{\text{back}}$   
dann: Fahrstreifenwechsel durchführen  
sonst: kein Fahrstreifenwechsel
- wenn die Zelle neben dem FFE auf der rechten Fahrstreifen leer ist, dann (mit Wahrscheinlichkeit  $p_{l2r}$ ): Wechsel nach rechts ohne Rücksicht auf die Abstände

Dadurch daß  $t_{H,l}$  und  $t_{H,r}$  unterschiedlich gewählt werden, kann auf den Parameter  $v_{\text{offset}}$  aus dem STCA verzichtet werden. Neu sind hier die Zeiten:

$$t_{H,r} = \text{Zeitschwelle bezogen auf rechts vorausfahrendes FFE} \quad (\text{s})$$

$$t_{H,l} = \text{Zeitschwelle auf links vorausfahrendes FFE} \quad (\text{s})$$

$$t_{H,b} = \text{Zeitschwelle für Reaktion des auf dem Nachbarfahrstreifen nachfolgenden FFE} \quad (\text{s})$$

$$v_{\text{back}} = \text{Geschwindigkeit des auf dem Nachbarfahrstreifen nachfolgenden FFE} \quad (\text{Zellen/s})$$

(c) Zusätzlich gilt das Rechtsüberholverbot nach c) in Anhang 1.

Da der TOCA die Geschwindigkeit der FFE nicht mehr mit einem künstlichen "Trödeleffekt" beeinflusst, kann es vorkommen, daß zwei langsam fahrende FEE parallel auf beiden Fahrstreifen fahren und den hinterherfahrenden Verkehr blockieren. So können ab und zu Situationen des sogenannten "Elefantenrennens" entstehen, die auch in der Wirklichkeit vorkommen. Damit diese aber nicht auf Dauer festgesetzt werden, muß sich das

rechtsfahrende FFE verlangsamen, um die Überholung des linksfahrenden FFE zu ermöglichen. Eine zusätzliche Regel ist daher notwendig:

(d) Regel gegen "Elefantenrennen":

- wenn  $x_{\text{left}} = x_{\text{right}}$  und

$$v_{\text{left}} = v_{\text{max, left}} \text{ und}$$

$$v_{\text{right}} = v_{\text{max, right}} \text{ und}$$

$$v_{\text{max, left}} = v_{\text{max, right}} \text{ und}$$

$$\text{gap}_{\text{left}} > t_{H,l} \cdot v_{\text{max, left}} \text{ und}$$

$$\text{gap}_{\text{right}} > t_{H,r} \cdot v_{\text{max, right}}$$

dann:  $v_{\text{right}} = v_{\text{right}} - 1$

mit  $x_i$  = Position des FFE auf dem Fahrstreifen (i= rechts oder links) (Zellen)