

# Datengestützte Analyse der Stauentstehung und -ausbreitung auf Autobahnen

[Data-driven Analysis of Traffic Congestion Dynamics on Highways]

Arne Kesting und Martin Treiber

Verfasseranschrift:

Dr.-Ing. A. Kesting, keasting@vwi.tu-dresden.de,  
Dr. rer.nat. M. Treiber, treiber@vwi.tu-dresden.de  
Institut für Wirtschaft und Verkehr, Technische Universität Dresden  
Würzburger Str. 35, 01187 Dresden

## Kurzfassung

Eine detailgetreue Rekonstruktion der Verkehrslage bildet die Grundlage für ein Verständnis der Verkehrsdynamik, insbesondere der Entstehung und Ausbreitung von Staus. In diesem Aufsatz wird ein Algorithmus vorgestellt, welcher kontinuierliche raumzeitliche Geschwindigkeitsprofile anhand von aggregierten Querschnittsdaten, Floating-Car-Daten sowie weiteren Datenkategorien rekonstruiert. Dabei werden sowohl die Übergangsbereiche zwischen freiem und gebundenem Verkehr als auch einzelne Strukturen (wie Stop-and-go-Wellen) detailliert aufgelöst. Der Algorithmus wird auf Querschnittsdaten der deutschen Autobahnen A5, A8 und A9 angewandt, welche insgesamt mehr als 400 Verkehrsstaus enthalten. Die Analyse der Daten zeigt, dass bei nahezu allen Verkehrszusammenbrüchen neben hohem Verkehrsaufkommen eine Störung des Verkehrsflusses und eine Streckeninhomogenität als Auslösefaktoren wirkten. Der „Stau aus dem Nichts“ ist eine seltene Ausnahme. Die raumzeitliche Ausbreitung der Staus lässt sich anhand weniger idealtypischer Muster verstehen. Als Anwendungen werden Datenfusion, Fehlerkompensation bei Ausfall von Detektoren und die Abschätzung der Zeitverluste im Stau diskutiert.

**Stichwörter:** Verkehrslage, Querschnittsdaten, Stauformen, Stauentstehung; Traffic State, Cross-sectional data, Congested Traffic States.

## Abstract

A detailed reconstruction of the traffic situation is essential for understanding traffic dynamics and particularly traffic flow breakdowns and traffic congestion dynamics. In this contribution, we present a method for estimating continuous spatiotemporal profiles of dynamic quantities such as local traffic density or velocity. The method is based on aggregated cross-sectional detector data that may be augmented by probe-vehicle (floating-car) data and other traffic information. The resulting profiles give the locations of transitions between free and congested traffic in great detail, as well as structures within the traffic states such as stop-and-go waves. We apply the algorithm to detector data of sections from the German motorways A5, A8, and A9 including more than 400 traffic breakdowns. The results indicate that traffic breakdowns generally follow from the simultaneous effect of (i) high traffic demand, (ii) a local bottleneck, and (iii) a temporary perturbation of the traffic flow. The “phantom traffic jam” is a rare exception. Moreover, the spatiotemporal dynamics of the resulting congestions can be classified into few generic traffic patterns. As applications, we discuss data fusion, detector error compensation, and estimating travel times.

## 1 Einleitung

Stau gehört inzwischen zu den alltäglichen, meist leidvollen Erfahrungen beim Autofahren. Aus Sicht des Beobachters können Verkehrsstaus dagegen aufgrund ihrer vielfältigen und komplexen Strukturen faszinierend sein, denn die kollektive Dynamik des Verkehrs führt zu Mustern, die sich über viele Kilometer und mehrere Stunden erstrecken können. Mit Hilfe einer detailgetreuen Darstellung der Verkehrssituation in Raum und Zeit lassen sich zahlreiche Aspekte der Stauentstehung und -ausbreitung analysieren. Beispielsweise kann sich ein Stau in Form von Stop-and-go-Wellen über viele Kilometer entgegen der Fahrtrichtung ausbreiten, so dass ein Autofahrer ihn als „Stau aus dem Nichts“ wahrnimmt. Verdeutlicht man sich den räumlichen und zeitlichen Bezug der Stauausbreitung, entsteht ein Stau in den allermeisten Fällen durch das Zusammenwirken eines hohen Verkehrsaufkommens (zeitlicher Bezug), einer Engstelle (räumlicher Bezug) sowie Störungen im Verkehrsfluss als auslösendes Moment. Im folgenden Beitrag wollen wir diesen und weitere Aspekte der Staudynamik auf Autobahnen anhand raumzeitlicher Darstellungen empirischer Daten diskutieren.

Zunächst wird dabei das Verfahren vorgestellt, welches anhand der Zeitreihen von Detektorschleifen ein kontinuierliches räumlich-zeitliches Geschwindigkeitsprofil für einen Streckenabschnitt rekonstruiert. Aus der Analyse eines großen Bestands historischer Daten verschiedener deutscher Autobahnen entwickeln wir eine Systematik für die Stauentstehung und -ausbreitung. Als Hauptergebnis der Arbeit werden diese Beobachtungen in einem Katalog über die „Gesetzmäßigkeiten“ der Stauausbreitung zusammengefasst. Daraus ergibt sich eine Klassifikation von im Wesentlichen sechs verschiedenen Grundformen des Staus. Diese idealtypischen Staumuster konnten alle im untersuchten Datenbestand auf der A5 bei Frankfurt/Main beobachtet werden.

## 2 Algorithmus zur Rekonstruktion der Verkehrslage

Im Folgenden wird ein Interpolationsverfahren zur Rekonstruktion der raumzeitlichen Verkehrslage vorgestellt. Als Eingangsgrößen dienen Geschwindigkeitswerte, die zu festen Zeiten an definierten Orten gemessen wurden. Dies können Minutenwerte von Querschnittsdetektoren, aber auch Floating-Car-Daten sein. Als Output erhält man eine kontinuierliche Geschwindigkeitschätzung als Funktion von Ort und Zeit.

Der Algorithmus basiert auf einer zweidimensionalen Interpolation in Raum und Zeit (Abschnitt 2.1). Im Gegensatz zur isotropen Glättung berücksichtigt das Verfahren die zwei typischen Geschwindigkeiten, mit denen sich Informationen im freien und gestauten Verkehr ausbreiten (Abschnitt 2.2). Zur Unterscheidung dieser Richtungen wird ein nichtlinearer, adaptiver Geschwindigkeitsfilter verwendet (Abschnitt 2.3). Zur Validierung der Methode (Abschnitt 2.4) dient eine Verkehrslageschätzung mit reduzierter Information (weggelassene Messquerschnitte), die mit der vollen Information verglichen wird.

### 2.1 Raumzeitliche Interpolation

Allgemein besteht die Aufgabe eines zweidimensionalen, raumzeitlichen Interpolationsalgorithmus darin, aus den an bestimmten Orten  $x_i$  zu bestimmten Zeitpunkten  $t_i$  vorliegenden *diskreten* Geschwindigkeitspunkten  $v_i = v(x_i, t_i)$  eine *kontinuierliche, mittlere* Geschwindigkeit  $V(x, t)$  als Funktion des Ortes und der Zeit zu schätzen. Dieses Problem entspricht einer

diskreten Faltung mit einem Glättungskern  $\phi_0$  über alle zu berücksichtigenden Datenpunkte  $i$ :

$$V(x, t) = \sum_i \phi_0(x - x_i, t - t_i) v_i. \quad (1)$$

Als Wichtungskern ist jede lokalisierte Funktion geeignet, welche für große Werte  $|x - x_i|$  bzw.  $|t - t_i|$  hinreichend schnell auf null abfällt. In der vorliegenden Anwendung hat sich die symmetrische Exponentialfunktion

$$\phi_0(x - x_i, t - t_i) = \frac{1}{\mathcal{N}} \exp \left[ - \left( \frac{|x - x_i|}{\sigma} + \frac{|t - t_i|}{\tau} \right) \right] \quad (2)$$

bewährt, wobei  $\sigma$  und  $\tau$  die Glättungsbreiten in der räumlichen bzw. zeitlichen Koordinate festlegen. Der Nenner  $\mathcal{N}$  bezeichnet die Normierung der Wichtungsfunktion, welche sich durch die Summation der Einzelbeiträge ergibt. Die Exponentialfunktion wirkt als *Tiefpass-Filter*, so dass zeitliche Schwankungen (mit Frequenzen größer als  $1/\tau$ ) und räumliche Fluktuationen (auf der Skala kleiner als  $\sigma$ ) geglättet werden. Für die Interpolation von über 1 min aggregierten Detektorwerten eignen sich Werte für  $\tau$  im Bereich von 30 s bis 60 s. Für die Glättung im Raum sollte  $\sigma$  Werte annehmen, die in der Größenordnung des halben mittleren Detektorabstands liegen.

## 2.2 Verkehrsadaptives Glättungsverfahren

Die durch den Kern (2) beschriebene *isotrope* Glättung ist für die Anwendung auf Verkehrsdaten bei den in der Praxis meist vorliegenden Detektorabständen oberhalb etwa 1 km nicht geeignet. Für einen Beleg dieser Aussage sind in den Diagrammen 1(a) und (b) die isotrope und die hier vorzustellende verkehrsadaptive Glättungsmethode einander gegenübergestellt (siehe auch Abschnitt 2.4). Die isotrope Glättung kann die einzelnen Stauwellen nicht deutlich voneinander absetzen, während die verkehrsadaptive Glättung die vorliegenden Stauwellen detailliert und plausibel rekonstruieren kann. Letzterer Algorithmus berücksichtigt, dass alle Störungen im Verkehrsfluss, also „Strukturen“ in der raumzeitlichen Geschwindigkeitsdarstellung, entweder stationär sind oder sich mit einer von zwei bemerkenswert reproduzierbaren Geschwindigkeiten ausbreiten:

1. Im *freiem Verkehr* breiten sich Störungen gemäß empirischer Beobachtungen im Wesentlichen *mit dem Verkehrsfluss* aus (Kerner, 2004). Die damit verbundene charakteristische Geschwindigkeit ergibt sich aus der mittleren Geschwindigkeit der Fahrzeuge.
2. Bei *gestautem Verkehr* breiten sich Störungen im Verkehrsfluss (bedingt durch Reaktionen der Fahrer auf das jeweilige Vorderfahrzeug) *entgegen* der Fahrtrichtung aus. Aus empirischen Daten ist bekannt, dass die Geschwindigkeit mit etwa -15 km/h als erstaunlich konstant angesehen werden kann (Kerner, 2004). Insbesondere breiten sich die stromabwärtigen Fronten von einzelnen Stauwellen mit dieser charakteristischen Geschwindigkeit aus (siehe Bilder 3 und 4).

Um diese wesentlichen Eigenschaften der Verkehrsdynamik zu berücksichtigen, werden nun *zwei* geglättete Geschwindigkeitsfelder mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten

in freiem und gestautem Verkehr,  $c_f$  und  $c_s$ , betrachtet:

$$V_f(x, t) = \sum_i \phi_0 \left( x - x_i, t - t_i - \frac{x}{c_f} \right) v_i, \quad (3)$$

$$V_s(x, t) = \sum_i \phi_0 \left( x - x_i, t - t_i - \frac{x}{c_s} \right) v_i. \quad (4)$$

Während die charakteristische Geschwindigkeit im freien Verkehr positiv ist (und etwas niedriger als die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit anzusetzen ist, z.B.  $c_f = 70$  km/h für Autobahnen), berücksichtigt der Parameter  $c_s = -15$  km/h die Ausbreitung von Störungen im gestauten Verkehr *entgegen der Fahrtrichtung*. Diese Transformation der Zeitkoordinate entspricht einer Scherung des Glättungskerns  $\phi_0(x - x_i, t - t_i)$  mit den Raten  $1/c_f$  bzw.  $1/c_s$ . Im Grenzfall  $c_f = c_s \rightarrow \infty$  geht die verkehrsadaptive Interpolation in eine isotrope Interpolation über.

### 2.3 Adaptiver Geschwindigkeitsfilter

Durch die unterschiedlichen Glättungsrichtungen in freiem und gestautem Verkehr wird die mittlere Geschwindigkeit nun als Überlagerung der beiden Geschwindigkeitsfelder  $V_s$  und  $V_f$  aufgefasst:

$$V(x, t) = w(x, t) V_s(x, t) + [1 - w(x, t)] V_f(x, t). \quad (5)$$

Der Gewichtungsfaktor  $w(x, t)$  hängt von den beiden mittleren Geschwindigkeiten  $V_f$  und  $V_s$  ab. Offensichtlich soll bei niedrigen Geschwindigkeiten  $w$  ungefähr 1 sein, während bei hohen Geschwindigkeiten  $w = 0$  zu fordern ist. Der unscharfe Übergang zwischen diesen beiden Grenzfällen ist durch folgende  $s$ -förmige nichtlineare Funktion charakterisiert:

$$w(x, t) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \tanh \left( \frac{V_c - V^*}{\Delta V} \right) \right]. \quad (6)$$

Der Prädiktor  $V^*(x, t) = \min[V_f, V_s]$  wurde dabei durch die Minimums-Funktion so definiert, dass gestaute Verkehrszustände durch den resultierenden nichtlinearen Filter besser geglättet werden als freie. Der Übergang dieser  $s$ -förmigen Funktion wird durch die Breite  $\Delta V$  charakterisiert, während der Schwellwert zwischen gestautem und freiem Verkehr durch  $V_c$  festgelegt ist. Geeignete Werte sind z.B.  $V_c = 60$  km/h und  $\Delta V = 20$  km/h.

### 2.4 Validierung

Die sechs Parameter der vorgestellten Methode sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Eine Kalibrierung im engeren Sinne ist bei diesem datenbasierten Verfahren zur Rekonstruktion und Interpretation der Verkehrslage nicht möglich, aber auch nicht zwingend erforderlich. Die Glättungsparameter  $\tau$  und  $\sigma$  sind weiterhin für die Darstellung verantwortlich und daher hinsichtlich der Anwendung frei wählbar.

Eine Möglichkeit zur Validierung der vorgestellten Interpolationsmethode besteht darin, dass man sie auf unvollständige Detektordaten anwendet und das Ergebnis mit der auf Basis der vollständigen Information rekonstruierten Verkehrslage vergleicht. Für diese Untersuchungen wird ein Abschnitt der A9 bei München betrachtet, für den Minutenwerte von neun stationären Detektoren zur Verfügung stehen. Während der morgendlichen Belastungsspitze kommt es in Richtung München zu einem Stau mit ausgeprägtem Stop-and-go-Verkehr. Die rekonstruierte Verkehrslage auf der Basis der neun Querschnitte ist in den Abb. 1(a) und (b)

Parameter	Wert
Glättungsbreite im Ort $\sigma$	600 m
Glättungsbreite in der Zeit $\tau$	60 s
Ausbreitungsgeschwindigkeit von Störungen im freien Verkehr $c_f$	70 km/h
Ausbreitungsgeschwindigkeit von Störungen im gestauten Verkehr $c_s$	-15 km/h
Übergangsschwelle vom freien in gestauten Verkehr $V_c$	60 km/h
Übergangsbreite vom freien in gestauten Verkehr $\Delta V$	20 km/h

**Tabelle 1:** Übersicht der Parameter mit verwendeten Werten für Bild 1.

für die verkehrsadaptive und naive isotrope Glättung dargestellt (vgl. auch Bild 3). Die berücksichtigten Messquerschnitte sind durch horizontale Linien gekennzeichnet. Die verwendeten Parameterwerte sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Die rekonstruierte Verkehrslage unter Verwendung von lediglich 6 der 9 Detektoren ist in den Abb. 1(c) und (d) dargestellt. Zum einen wird deutlich, in welcher Weise die Informationen benachbarter Messquerschnitte bei der Interpolation berücksichtigt werden. Zum anderen wird gezeigt, dass das verkehrsadaptive Glättungsverfahren die Information über die Verkehrslage plausibel rekonstruieren kann. Das isotrope Verfahren führt dagegen z.B. zu einer fehlerhaften Zuordnung der Geschwindigkeitseinbrüche bei Streckenkilometer 500.

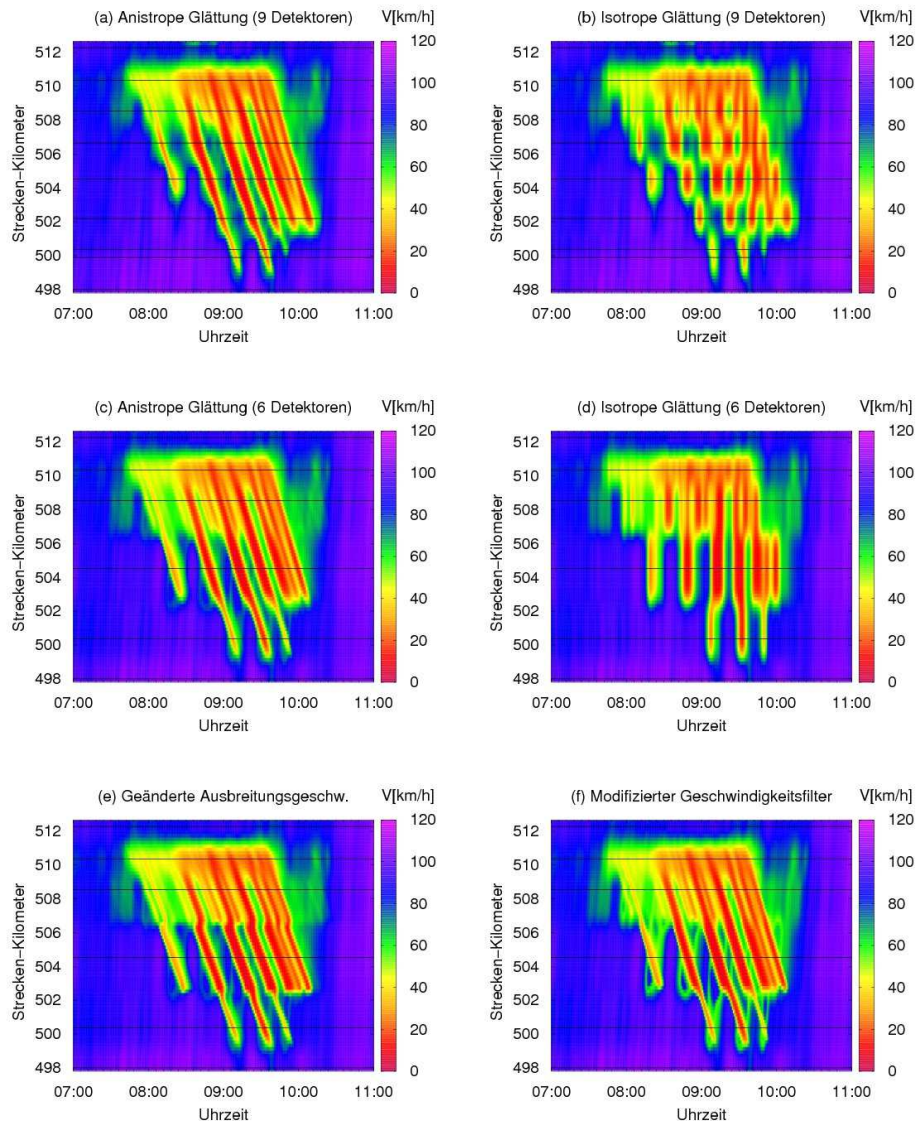
Durch eine Variation der Referenzwerte aus Tabelle 1 kann man überprüfen, wie „robust“ die Verkehrslageschätzung ist bzw. wie sensitiv das Ergebnis von den verwendeten Parameterwerten abhängt. Im Diagramm 1(e) sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten gegenüber den Referenzwerten in Tab. 1 variiert worden zu  $c_f = 200$  km/h und  $c_s = -12$  km/h. Und im Diagramm (f) ist der nichtlineare Filter deutlich sensitiver eingestellt ( $\Delta V = 5$  km/h) und der Schwellwert ( $V_c = 45$  km/h) verschoben worden. Die resultierende mittlere Geschwindigkeit, insbesondere die Unterscheidung von freiem und gestautem Verkehr hängt in beiden Fällen nur schwach von den verwendeten Parameterwerten ab. Der wichtigste Einfluss ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Störungen im gestauten Verkehr. Ein zu hoher Wert (mit dem Grenzfall der isotropen Interpolation) wie auch ein zu niedriger Wert (kleiner als 12 km/h) führen zu artifiziellen, diskreten Stufen.

Nach unseren Erfahrungen kann die vorgestellte Methode die Verkehrslage zwischen Detektordaten mit einem Abstand bis zu ca. 3 km zuverlässig interpolieren. Für die detaillierte Rekonstruktion der meist ortsfesten stromabwärtigen Staufront (siehe Abschnitt 3) sollten die Abstände von Detektoren in der Nähe von Engstellen aber möglichst geringer sein.

## 3 Systematik der Stauentstehung und -ausbreitung

### 3.1 Datengrundlage

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellte Verkehrslage-Rekonstruktion wird nun auf Querschnittsdaten von Streckenabschnitten mehrerer deutscher Autobahnen angewandt. Die Daten eines jeden Querschnitts liegen als fahstreifen aufgelöste Ein-Minuten-Aggregate für Geschwindigkeit und Verkehrsstärke vor, teilweise aufgelöst nach verschiedenen Fahrzeugklassen wie PKW und LKW. Der Umfang beträgt mehr als 10 000 Richtungsfahrbahn-Kilometer-tage, in denen etwa 400 Verkehrszusammenbruchs-Ereignisse enthalten sind. Da in gebundenen Verkehrszuständen die Geschwindigkeiten bezüglich der verschiedenen Fahstreifen weitgehend



**Bild 1:** Vergleich mit isotroper Interpolation und Validierung des verkehrsadaptiven Verfahrens am Beispiel von Detektordaten auf der A9 in Fahrtrichtung Süd.

„synchronisiert“ und von der Fahrzeugklasse unabhängig sind (Kerner, 2004), werden die Daten vor der Auswertung bezüglich der Fahrstreifen und Fahrzeugklassen aggregiert.

### 3.2 Stauentstehung und Stauwahrnehmung

Die Analyse der Daten mit dem Rekonstruktionsalgorithmus ergab zunächst das bemerkenswerte Ergebnis, dass Staus und gebundene Verkehrszustände nahezu ausschließlich an durch Streckeninhomogenitäten bewirkten Engstellen entstehen: Jeder der etwa 400 Verkehrszusammenbrüche ließ sich einer solchen räumlichen Engstelle zuordnen. Exemplarisch ist dies in den Bildern 3 bis 5 gezeigt. Wir schließen daraus, dass die in realen Straßennetzen immer vorhandenen Engstellen quasi als „Kondensationskeime“ für Verkehrszusammenbrüche wirken. Das Phänomen und der Mechanismus des „Staus aus dem Nichts“ existiert zwar (Sugiyama et al., 2008), ist aber praktisch nicht relevant, da die dazu nötigen Flüsse auf freier Strecke aufgrund der Engstellen nicht erreicht werden können.<sup>1</sup>

Die Verkehrslage-Rekonstruktionen belegen jedoch, dass der *subjektive Eindruck* eines „Staus aus dem Nichts“ für den Autofahrer sehr wohl häufig gegeben sein kann. Dies liegt daran, dass sich ein einmal entstandener Stau in Form einer oder mehrerer Stauwellen in stromaufwärtiger Richtung ausbreiten kann. Solche Stauwellen, z.B. die in Bild 3, 4 sowie 5(b) und (c), werden vom Autofahrer in der Regel räumlich und zeitlich von der Ursache entkoppelt durchfahren. Dies kann, insbesondere bei unfallbedingtem Staus, so weit gehen, dass zum Wahrnehmungszeitpunkt die Ursache gar nicht mehr existiert. Beispielsweise laufen in Bild 3(b) zwischen 18:30 und 19:00 Uhr drei Stop-and-go-Wellen durch den Bereich zwischen Streckenkilometer 30 und 34. Diese Stauwellen wurden durch eine unfallbedingte Sperrung des rechten Fahrstreifens bei Streckenkilometer 43,5, also etwa 10 km stromabwärts, verursacht (räumliche Entkopplung). Außerdem wurde die Streckensperrung bereits um 18:20 Uhr, also mindestens 10 min davor, aufgehoben (zeitliche Entkopplung).

Die Engstellen können verschiedenster Natur sein. Die häufigsten Beispiele sind:

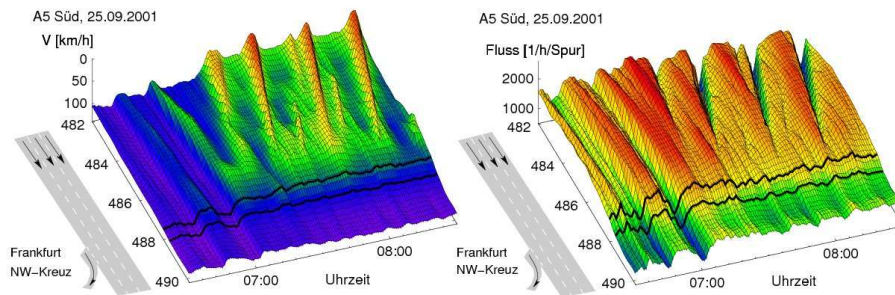
- Zu- und Abfahrten bei Autobahnkreuzen oder Anschlussstellen: Dies trifft zu für alle Staus in den Abb. 2, 3(a), 4(c), 5(a)-(d), außerdem in Abb. 4(a) für die Verkehrszusammenbrüche bei Kilometer 489 und in Bild 4(b) für die ausgedehnten Staus mit den Stauköpfen bei Kilometer 472 und 482.
- Steigungen: In Bild 3(b) wurde der ausgedehnte Stau mit einem Staukopf bei etwa Kilometer 40 durch den Irschenberg verursacht. Auf der A5-Nord zwischen dem AK Bad Homburg und der AS Friedberg existiert ebenfalls eine bei etwa Kilometer 477 beginnende 4%-ige Steigung (Bild 4(a)).
- Unfallinduzierte Engstellen: Auf der A8 in Fahrtrichtung Ost (Bild 3(b)) entsteht der Stau als Folge der Sperrung des rechten Fahrstreifens bei Streckenkilometer 43,5 zwischen 17:40 und 18:20 Uhr. Und in Bild 5(f) kommt es durch eine unfallbedingte Vollsperrung auf der A5 in Fahrtrichtung Süd bei Kilometer 478 zwischen 11:40 und 12:40 Uhr zu einem ausgedehnten Stau. Selbst Unfälle auf der Gegenfahrbahn können prinzipiell als *verhaltensinduzierte Engstelle* wirken. Dies wäre eine mögliche Erklärung dafür, dass am 25.06.2001 ein Stau bei Kilometer 477 auf der A5 in nördlicher Richtung mit der

---

<sup>1</sup>Unfallereignisse finden natürlich auch außerhalb infrastruktureller Engstellen statt, so dass eine unfallbedingte temporäre Engstelle *selbst* quasi „aus dem Nichts“ entstehen kann. Der Stau bildet sich in jedem Fall aber erst als *Folge*.

Vollsperrung auf der A5-Süd auf derselben Höhe zu dieser Zeit koindiziert. Zwar existiert auf der A5-Nord an dieser Stelle die bereits erwähnte Steigungs-Engstelle, allerdings ist der Staukopf viel lokalisierter als bei allen anderen durch die Steigung verursachten Staus.

- Reduktionen der Fahrstreifenzahl einer Richtungsfahrbahn: Auf der A9-Süd (Bild 3(a)) liegt bei Kilometer 525 ein mit einer Reduktion von 3 auf 2 Fahrspuren kombiniertes Autobahnkreuz (München-Nord) vor. Ansonsten sind derartige Engstellen oft an Baustellen anzutreffen.



**Bild 2:** Visualisierung der drei Faktoren für einen Verkehrszusammenbruch am Beispiel der A5 in Fahrtrichtung Süd anhand der raumzeitlichen Darstellung der Geschwindigkeit und Verkehrsstärke.

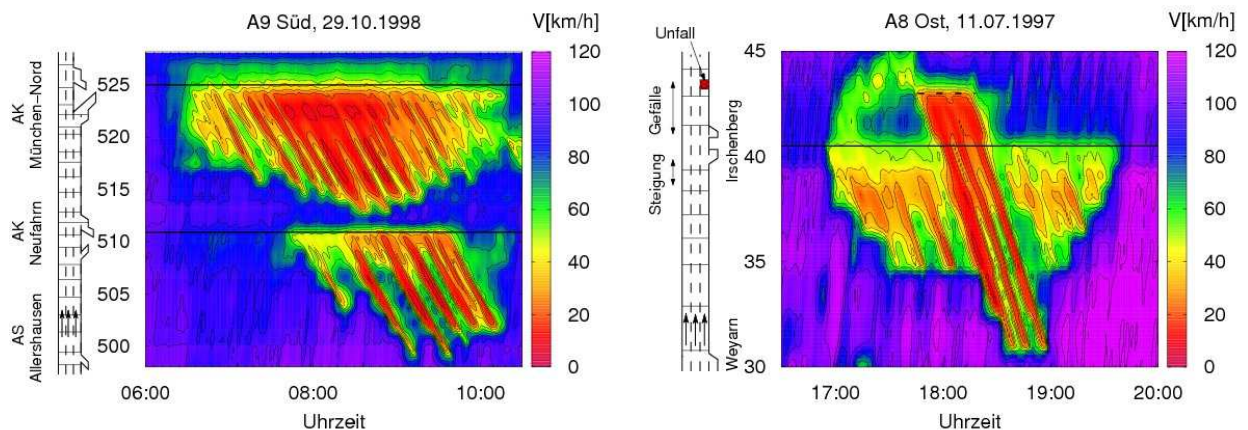
Die Auswertung der raumzeitlichen Profile der Geschwindigkeit und Verkehrsstärke zeigt weiterhin, dass eine Engstelle jedoch nur ein notwendiger, jedoch nicht hinreichender Faktor zur Stauauslösung ist. Neben einer Engstelle bedarf es außerdem eines *hohen Verkehrsaufkommens* sowie einer temporären *Störung im Verkehrsfluss*. Ein hohes Verkehrsaufkommen wird vor allem während der morgendlichen und abendlichen Spitzenzeiten beobachtet. Störungen im Verkehrsablauf kommen dagegen permanent vor und werden beispielsweise durch Unachtsamkeit, fehlerhafte Fahrstreifenwechsel, mangelnden Sicherheitsabstand, nicht angepasste Geschwindigkeit oder einander überholende LKWs verursacht. Allerdings sind derartige Störungen in aggregierten Detektordaten nicht direkt beobachtbar. Die als Folge dieser Störungen entstehende Kolonne dicht auffahrender Fahrzeuge ist allerdings häufig in Darstellungen des Verkehrsflusses als kurzfristiger „Hochflusszustand“ zu erkennen, teilweise sogar in den Geschwindigkeitsprofilen wie im Bild 2 gezeigt: Kurz nach 7:00 Uhr wird auf der A5-Süd am Frankfurter NW-Kreuz ein Verkehrszusammenbruch beobachtet. Das hohe Verkehrsaufkommen ist durch die morgendliche Rush-Hour gegeben, während die Abfahrt des Autobahnkreuzes die Engstelle bildet. Die Störung im Verkehrsfluss (möglicherweise sich überholende langsame LKWs) führt zu einem vergleichsweise langsam (mit etwa 75 km/h) in Fahrtrichtung sich bewegenden Geschwindigkeitsbereich. Die Gleichheit von Ausbreitungs- und Fahrzeuggeschwindigkeit lässt auf eine Fahrzeugkolonne schließen. Der eigentliche Verkehrszusammenbruch mit den typischen entgegen der Fahrtrichtung sich ausbreitenden Stauwellen findet jedoch erst statt, wenn diese Kolonne die Engstelle bei Streckenkilometer 488 passiert.



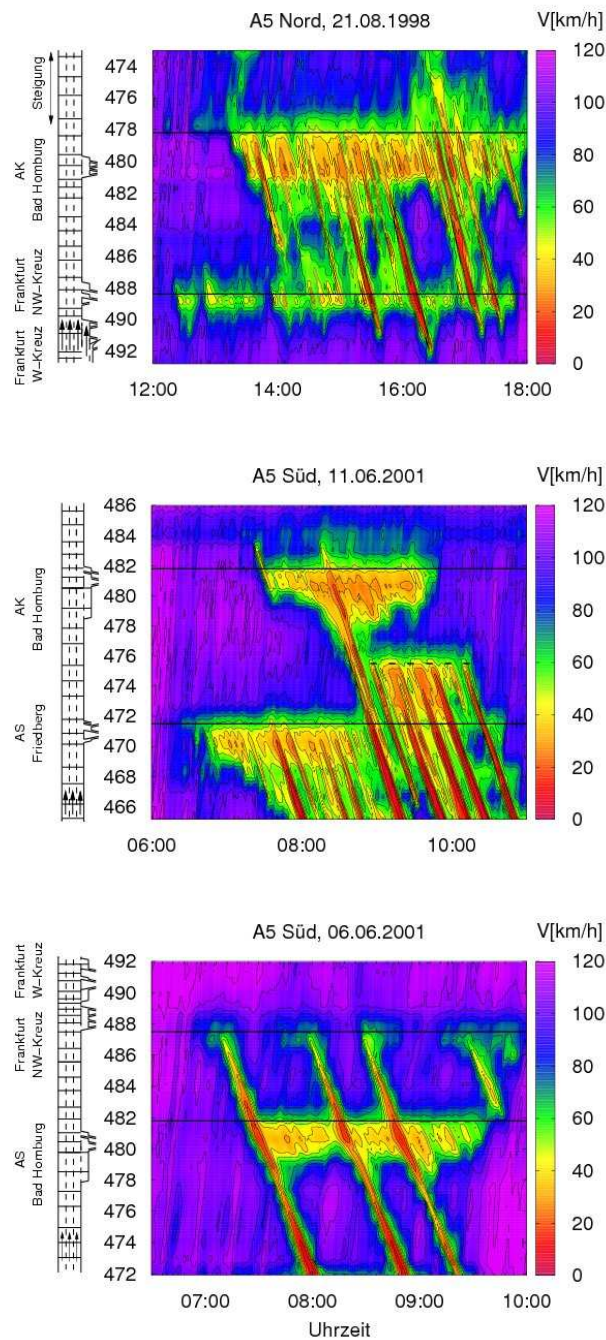
### 3.3 Stauausbreitung

Die Analyse der rekonstruierten raumzeitlichen Dynamik der Staumuster zeigt bemerkenswerte Regelmäßigkeiten, welche folgendermaßen charakterisiert werden können:

1. Der Bereich gestauten Verkehrs ist entweder lokalisiert mit einer konstanten Ausdehnung von typischerweise 1 bis 2 km (Bild 4(c) bei Streckenkilometer 480) oder ausgedehnt mit variabler räumlicher Ausdehnung (z.B. alle Staus in Bild 3).
2. Der stromabwärtige Übergang von gestautem in freien Verkehr, der „Staukopf“, ist entweder an die Engstelle fixiert oder bewegt sich stromaufwärts mit einer charakteristischen Geschwindigkeit von etwa -15 km/h. Beide Ausbreitungsgeschwindigkeiten können innerhalb eines einzigen Staus beobachtet werden, z.B. in Bild 3(a): Der stationäre Staukopf bei Streckenkilometer 510 löst sich um etwa 9:45 h von der Engstelle ab und breitet sich mit etwa 17 km/h in stromaufwärtiger Richtung aus. Bei unfallbedingten Staus wird die Ablösung durch die Aufhebung der temporären Engstelle (Bild 3(b) bei Streckenkilometer 43,5 um 18:30 Uhr) bewirkt, sie kann aber auch an permanenten Engstellen beobachtet werden wie am AK Neufahrn (Bild 3(a) bei Kilometer 510 um etwa 10:00 Uhr.)
3. Da die beiden Ausbreitungsgeschwindigkeiten auch für räumlich beschränkte Staus zutreffen, sind diese entweder ortsfest oder bewegen sich als „Stop-and-go-Welle“ stromaufwärts (vgl. Bild 4(c)).
4. Die stromaufwärtige Staufront ausgedehnter Staus (Übergangsbereich von freiem in gestauten Verkehr) hat keine charakteristische Geschwindigkeit. Insbesondere kann sie sich sowohl in stromaufwärtiger als auch stromabwärtiger Richtung entsprechend der Kapazität der Engstelle und der stromaufwärtigen Verkehrsnachfrage fortpflanzen. Zur Veranschaulichung können alle in Bild 3 gezeigten Staumuster dienen.



**Bild 3:** Raumzeitliche Geschwindigkeitsprofile auf den Autobahnen A9 (Fahrtrichtung Süd) und A8 (Fahrtrichtung Ost).



**Bild 4:** Raumzeitliche Geschwindigkeitsprofile auf der Autobahn A5 nördlich des Frankfurter West-Kreuzes in beiden Fahrtrichtungen.

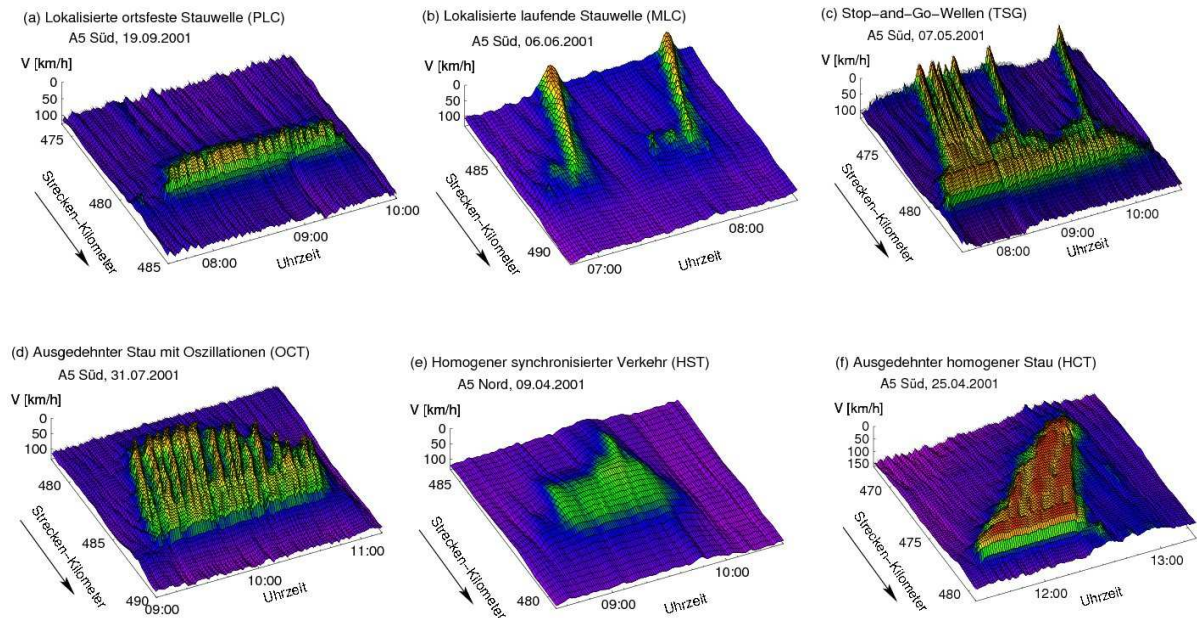
Für räumlich ausgedehnte Staus können aus den Daten weitere Gesetzmäßigkeiten gefolgert werden:

1. Meist wird eine signifikant von statistischen Schwankungen unterschiedliche innere Struktur in Form von mehr oder weniger ausgeprägten Stauwellen beobachtet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Strukturen ist konstant und gleich der sich bewegender stromabwärtiger Staufronten entgegen der Fahrtrichtung der Fahrzeuge (etwa -15 km/h). Damit sind in den raumzeitlichen Darstellungen *alle* Strukturen einer gestauten Region sowie eine eventuell vorhandene sich bewegende stromabwärtige Staufront zueinander parallel.
2. Nur für sehr stark oder gering ausgeprägte Staus bzw. Engstellen werden teilweise auch ausgedehnte Regionen gebundenen, gleichmäßigen Verkehrs gefunden, welche, abgesehen von statistischen Schwankungen, als stationär und homogen angesehen werden können (vgl. 5(e) und (f)).
3. Im Gegensatz zur Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt die Wellenlänge der Stauwellen signifikant von der Stärke des Staus ab. Die zeitliche Periode nimmt mit der Stärke des Staus ab und beträgt zwischen 4 min und 60 min, was aufgrund der charakteristischen Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa 15 km/h (Punkt 5) Wellenlängen zwischen 1 und 15 km entspricht. Diese Abhängigkeit ist deutlich in Bild 3(b) zu sehen: Die Steigung des Irschenbergs um den Streckenkilometer 40 stellt eine vergleichsweise schwache Engstelle dar und führt zu Stop-and-go-Verkehr mit größeren Wellenlängen als die des überlagerten, durch einen Unfall bei Kilometer 43,5 verursachten Staus.
4. Generell wachsen die Störungen ausgedehnter Staus während ihrer Ausbreitung an. Insbesondere ist dies für *alle* hier abgebildeten ausgedehnten Staumuster der Fall. Am Staukopf in der Nähe der Engstelle ist der gestaute Verkehr meist weitgehend stationär bzw. gleichmäßig. Weiter stromaufwärts beobachtet man wachsende Dichteschwankungen, die sich bis hin zu isolierten Stop-and-go-Wellen verstärken können, wenn sie die stromaufwärtige Grenze der Stauregion schließlich erreichen. In Grenzfällen, wie in Bild 5(c), ist eine eindeutige Definition einer stromaufwärtigen Staufront nicht mehr sinnvoll und die Stauwellen werden besser als eigenständige lokalisierte Staus betrachtet.

### 3.4 Idealtypische Staumuster

Die beobachteten Staumuster (z.B. die der Bilder 3 und 4) sind in der Regel das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels von stauerzeugenden Streckeninhomogenitäten mit bereits vorher entstandenen Staus sowie der Wechselwirkung verschiedener Stauregionen. Beispielsweise breitet sich der durch einen Unfall bei Kilometer 43,5 verursachte ausgedehnte Stau auf der A8-Ost, Bild 3(a), durch den bereits vorhandenen ausgedehnten Stau am Irschenberg mit Staukopf bei etwa Kilometer 40 hindurch aus. In den in den Abb. 4(a) bis (c) gezeigten Staumustern interagieren einzelne laufende Stauwellen mit weiteren Engstellen und bereits vorhandenen Staus. Beispielsweise ist in Bild 4(c) ab 7:00 h eine laufende Stauwelle zu sehen, welche beim Passieren des AK Bad Homburg bei Kilometer 481 eine zusätzliche stehende Welle erzeugt. Die laufende Stauwelle stellt damit den dritten Faktor zur Stautentstehung – Störung im Verkehrsfluss – dar. Weitere laufende Stauwellen passieren die stehende Welle nahezu unbeeinflusst. Besonders komplex sind die Wechselwirkungen in Bild 4(b): Eine sich aus einem Stau am Bad Homburger Kreuz lösende laufende Stauwelle verursacht um etwa 9:00 Uhr bei Kilometer 476 eine temporäre Engstelle (vermutlich aufgrund eines Unfalls), die ihrerseits einen ausgedehnten Stau hervorruft. Sowohl die laufende Stauwelle als auch der ausgedehnte Stau

treffen bei Kilometer 471 auf eine weitere Engstelle (AS Friedberg) und beeinflussen den dort bereits früher entstandenen ausgedehnten Stau. Ferner führt der Zusammenbruch bei Kilometer 476 zu einer Reduktion des Verkehrsflusses stromabwärts (sog. *Capacity Drop*), welcher zu einer beschleunigten Auflösung des Staus am AK Bad Homburg führt.



**Bild 5:** Idealtypische Staumuster, beobachtet auf der Autobahn 5 in Fahrtrichtung Frankfurt.

In fast allen Fällen kann man diese komplexen Staumuster jedoch als Überlagerung weniger *idealtypischer Stauformen* verstehen (Helbing et al., 2009). Aus der Analyse aller Verkehrszusammenbrüche auf der A5 bei Frankfurt konnten die sechs wichtigsten Grundformen gestauten Verkehrs nachgewiesen werden (vgl. Bild 5). Die zwei lokalisierten Stauformen, die stehende und die laufende Stauwelle, ergeben sich direkt aus den beobachteten Gesetzmäßigkeiten 1 und 2 bzw. 3. Ausgehend von der englischen Bezeichnung werden sie auch als *Pinned Localized Cluster* (PLC) und *Moving Localized Cluster* (MLC) bezeichnet (Treiber et al., 2000). Die vier ausgedehnten idealtypischen Muster unterscheiden sich durch ihre innere Struktur, welche im Wesentlichen aus den Gesetzmäßigkeiten 5, 7 und 8 abgeleitet werden kann:

- Bild 5(c) zeigt Stauwellen, welche sich von einer nahezu stationären Zone gebundenen Verkehrs ablösen bzw. von dieser Zone erzeugt werden (*Triggered Stop-and-go Pattern*, TSG). In gewisser Weise setzt sich dieses, auch als *Pinch-Effekt* (Kerner, 2004) bezeichnete Staumuster aus den beiden lokalisierten Staumustern PLC und MLC zusammen. Da das Gesamtmuster aber eine feste räumliche Anordnung besitzt und durch eine einzige Engstelle ausgelöst wird, fassen wir es als eigenes elementares Muster auf.
- Die Grundform 5(d) zeigt einen ausgedehnten Stau mit oszillierender innerer Struktur (Gesetzmäßigkeit 6), welche in der englischsprachigen Literatur als *Oscillating Congested Traffic* (OCT) bezeichnet wird. Diese Stauform ist weit verbreitet. Beispielsweise sind alle vier in Bild 3 gezeigten Staumuster von diesem Typ. Die Wellenlängen der Oszil-

lationen ist dabei unterschiedlich, die Ausbreitungsgeschwindigkeit aller Strukturen ist aber nahezu dieselbe (Gesetzmäßigkeiten 7 und 5).

- Homogene ausgedehnte Staus ohne starke Geschwindigkeitsschwankungen treten ebenfalls auf. Zähflüssig kriechender Verkehr (*Homogeneous Congested Traffic*, HCT) wird fast nur als Folge starker, meist unfallbedingter Engstellen beobachtet (z.B. Bild 5(f)). Der andere Grenzfall – gebundener Verkehr an der Grenze zwischen freiem Verkehr und Stau – kann ebenfalls weitgehend homogen sein (siehe Bild 5(e)) und wird als *Homogeneous Synchronized Traffic* (HST) bezeichnet.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein verkehrsadaptives Rekonstruktionsverfahren vorgestellt, welches aus historischen Verkehrsdaten von Autobahnen eine Verkehrslage in Form kontinuierlicher raumzeitlicher Profile der lokalen Geschwindigkeit und ggf. anderer Größen wie Verkehrsstärke oder -dichte schätzt. Aufgrund der Datenverfügbarkeit basierten die hier gezeigten Rekonstruktionen ausschließlich auf aggregierten Querschnittsdaten. Die Methode erlaubt aber auch die Verarbeitung weiterer Input-Kategorien wie Floating-Car-Daten oder ereignisorientierte Verkehrsmeldungen sowie eine Fusion dieser Daten (Kesting and Treiber, 2008). Im Gegensatz zu Methoden wie ASDA/FOTO (Kerner et al., 2000) ist das vorgestellte Rekonstruktionsverfahren nicht direkt für Realtime-Anwendungen oder Prognosen vorgesehen, stellt aber historische Verkehrslagen detaillierter mit kontinuierlichen Verkehrsgrößen und außerdem modellunabhängig dar. Dadurch eignet sich das Verfahren z.B. für eine objektive Bewertung von Verkehrslageprognosen (Bogenberger, 2003). Eine weitere Anwendungsmöglichkeit der Methode liegt in der Kompensation von Fehlern bei einem Ausfall von einzelnen Detektoren (räumliche Interpolation) oder einem kurzfristigen Ausfall aller Detektoren (zeitliche Interpolation) (Treiber et al., 2009). Aus der Basis der raumzeitlichen Geschwindigkeitskontour lassen sich auch „virtuelle“ Fahrzeugtrajektorien rekonstruieren, die für die Schätzung von Reisezeiten herangezogen werden können (Kesting and Treiber, 2008).

Ein Hauptanwendungsgebiet des Verfahrens ist die systematische Analyse umfangreicher historischer Datenbestände, um daraus heuristische Regeln der Stauentstehung und -ausbreitung abzuleiten. Als Ergebnis der Analyse von mehr als 400 Stauereignissen auf verschiedenen Autobahnen fanden wir, dass nahezu alle Verkehrszusammenbrüche die Folge des gleichzeitigen Zusammentreffens dreier Faktoren sind: hohes Verkehrsaufkommen, eine Streckeninhomogenität sowie eine Störung im Verkehrsfluss. Die Streckeninhomogenität wirkt dabei als „Kondensationskeim“ bzw. als schwächstes Glied in der Abfolge der Streckenkapazitäten. Anhand der raumzeitlichen Geschwindigkeitsprofile konnten die Wirkungen von permanenten Engstellen (Auffahrten, Abfahrten, Steigungen, Baustellen), aber auch temporären Bottlenecks (Unfälle) analysiert werden. Insbesondere ist damit gezeigt, dass der oft zitierte und in künstlichen Situationen auch beobachtete „Stau aus dem Nichts“ für reale Strecken irrelevant ist.

Auch einmal entstandene Staus folgen Gesetzmäßigkeiten. In dieser Arbeit wurden empirische Beobachtungen in einem Katalog von acht Punkten zusammengefasst. Diese *Stylized Facts* können für die Bewertung, Überprüfung und Verbesserung von regelbasierten oder modellgestützten Realtime-Verkehrslageschätzern herangezogen werden. Durch die Berücksichtigung der empirischen Erkenntnisse ist auch die Entwicklung verbesserter Prognoseverfahren denkbar. Das vorgestellte Regelwerk zur Staudynamik und insbesondere die idealtypischen

Staumuster können aber auch in Verkehrssimulationen reproduziert werden, siehe beispielsweise die Online-Simulationen unter [www.traffic-simulation.de](http://www.traffic-simulation.de). Viele raumzeitliche Aspekte der Staudynamik sind inzwischen sogar theoretisch verstanden (Helbing et al., 2009; Treiber et al., 2000).

## Danksagung

Die Autoren danken der Verkehrszentrale Hessen sowie der Autobahndirektion Südbayern für die Bereitstellung der Daten.

## Literaturverzeichnis

- Bogenberger, K., 2003. Qualität von Verkehrsinformationen. *Straßenverkehrstechnik* 10, 518.
- Helbing, D., Treiber, M., Kesting, A., Schönhof, M., 2009. Theoretical vs. empirical classification and prediction of congested traffic states. *The European Physical Journal B* 69, 583–598.
- Kerner, B., Rehborn, H., Aleksic, M., Haug, A., Lange, R., 2000. Verfolgung und Vorhersage von Verkehrsstörungen auf Autobahnen mit ASDA und FOTO im online-Betrieb in der Verkehrsrechnerzentrale Rüsselsheim. *Straßenverkehrstechnik* 10, 521–527.
- Kerner, B. S., 2004. *The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory*. Springer, Heidelberg.
- Kesting, A., Treiber, M., September 2008. Calculating travel times from reconstructed spatiotemporal traffic data. In: Martin, U., et al. (Eds.), *Networks for Mobility (Proceedings of the 4th International Symposium)*. Stuttgart, p. 41, ISBN: 978-3-921882-24-5.
- Sugiyama, Y., Fukui, M., Kikuchi, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Nishinari, K., Tadaki, S., Yukawa, S., 2008. Traffic jams without bottlenecks – experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. *New Journal of Physics* 10, 033001.
- Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D., 2000. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E* 62, 1805–1824.
- Treiber, M., Kesting, A., Wilson, R. E., 2009. Reconstructing the traffic state by fusion of heterogenous data. Eingereicht bei *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*.