

Analytische Methoden zur Interpretation von Verkehrsdaten

Klaus Bogenberger, Robert Bertini und Steven Boice

Es wird eine analytische Methode zur Interpretation von realen Verkehrsdaten vorgestellt. Hiermit lassen sich Engpässe genau lokalisieren und deren Aktivierungszeitpunkte mit hoher Genauigkeit bestimmen. Insgesamt wurden sieben Wochentage detailliert analysiert. Dabei wurden 12 Staus von unterschiedlicher Dauer und räumlicher Ausprägung beobachtet. Der Mittelwert der Kapazität im freien Verkehrsfluss lag bei 5760 Fahrzeugen pro Stunde für die dreistreifige Richtungsfahrbahn. Die aus dem Stau ausfahrende Verkehrsstärke war immer geringer, die Reduktion schwankte zwischen 3 und 13 %. Es wurde hiermit bestätigt, dass unterschiedliche Kapazitäten für den freien und den gestauten Verkehr auftreten.

The analysis tools used were curves of cumulative vehicle arrival number versus time and curves of cumulative time-averaged velocity versus time. These cumulative plots were carefully and systematically transformed to produce the resolution necessary to reveal important details of the evolution of traffic flow features. These high-resolution transformed curves have made it possible to identify key time-dependant features related to the activation and deactivation of the bottleneck. Several bottlenecks were identified by systematically examining the excess vehicle accumulation and excess travel time (delay) that arose between measurement locations.

1. Einführung

Straßenverkehr ist ein komplexer Prozess. Viele unterschiedliche Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge nehmen daran teil und bewegen sich auf vielfältigsten Straßen und Routen. Vor allem der Verkehrsfluss ist ein z.T. noch immer nicht vollständig verstandenes Phänomen. Trotz sehr wichtiger, gerade in den letzten Jahren neu entstandener Theorien für Autobahnen sind nach wie vor viele Fragen offen. Zum Beispiel: Wie hoch ist die Kapazität eines Autobahnabschnitts? Ist diese Kapazität immer und überall gleich hoch? Was sind die Ursachen für Staus?

Vor allem das so genannte „two-capacity“ Phänomen beschäftigt seit Jahren die Wissenschaft [May und Keller, 1966; Hall und Agyemang-Duah, 1991; Hall et al., 1992; Cassidy und Bertini, 1999; Kerner, 2005]. Es besagt, dass im nicht-gestauten Verkehrszustand eine höhere Kapazität eines Streckenabschnitts vorhanden ist als im Stauzustand. Es gilt also alles zu unternehmen, um Stau am besten gar nicht entstehen zu lassen, da er automatisch zu einer zusätzlichen Schwächung des Verkehrssystems führt und noch mehr Stau erzeugt. Tritt Stau auf, so können weniger Fahrzeuge

eine Straße als bei nicht-gestautem, freiem Verkehr fahren.

Nachfolgend werden verschiedene analytische Methoden zur Interpretation von Verkehrsdaten präsentiert. Die Verfahren stammen aus den USA und wurden hierbei erstmals für deutsche Autobahnen angewandt [Bertini et al., 2005]. Es wurden zahlreiche Messdaten ausgewertet und analysiert. Der Unterschied zwischen nicht-gestauter Kapazität und Staukapazität betrug zwischen 2 % und 13 %.

2. Definition eines Engpasses

Einfahrten und Ausfahrten einschließlich der Verflechtungstrecken sind die bedeutsamsten, weil sehr häufig auch kapazitätsbestimmenden Komponenten eines Autobahnsystems. Engpässe (engl.: „bottlenecks“) und Staus treten häufig in räumlich unmittelbarer Nähe solcher Streckenelemente auf. Ein Engpass wird definiert als ein Punkt auf einer Autobahn, der stromaufwärtigen, gestauten Verkehr von stromabwärtigem, ungestautem Verkehr separiert [Daganzo, 1997] (Bild 1). Da Verkehrsmesseinrichtungen, wie z. B.

Induktionsschleifen, typischerweise in diskreten Abständen im Autobahnnetz angebracht werden, lässt sich meist nur der Streckenabschnitt in dem sich ein Engpass befindet lokalisieren und nicht der exakte Ort.

Ein Engpass ist entweder „statisch“ (z. B. Spurreduktion, Tunnelportal, Verflechtungszone, etc.) oder „dynamisch“ (z. B. eine Störung durch einen Unfall, ein langsames Fahrzeug, etc.). Der Engpass ist „aktiv“, wenn die oben genannte Bedingung erfüllt wird (Bild 1). Er wird „deaktiviert“, wenn die Verkehrsnachfrage stromaufwärts abnimmt und sich der Stau stromaufwärts des Engpasses vollständig aufgelöst hat oder wenn ein weiterer Stau von einem weiter stromabwärts liegenden Engpass zurückwandert und den aktiven Engpass überstaut. Dies wird dann als „verdeckter Engpass“ (engl.: „hidden bottleneck“) bezeichnet [Daganzo, 1997; May, 1990].

Bei einem „aktiven“ Engpass kann die Stauausfahrtsverkehrsstärke am stromabwärtigen Detektor gemessen werden. Diese Verkehrsstärke wird häufig als die Kapazität des Engpasses bezeichnet. Gingen der Aktivierung eines Engpasses

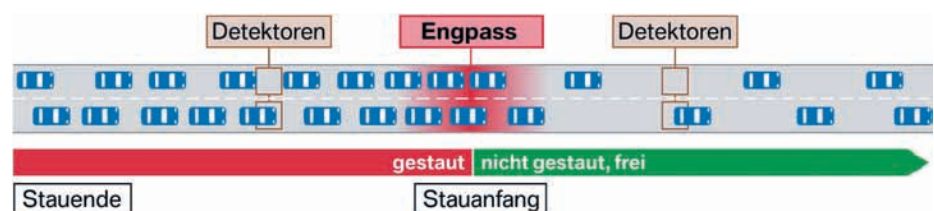


Bild 1: Definition eines „aktiven“ Engpasses

Verfasserschriften: Dr. K. Bogenberger, BMW AG, 80788 München, Klaus.Bogenberger@bmw.de; Prof. Dr. R. Bertini, Bertini@pdx.edu, S. Boice, boicest@cecs.pdx.edu, Portland State University, Portland, Oregon, 97207 USA

freie Verkehrsverhältnisse voraus, so ist es natürlich möglich, die Verkehrsstärke im nicht-gestauten Zustand zu ermitteln und mit der Staukapazität zu vergleichen.

3. Konventionelle empirische Methoden der Verkehrsdatenanalyse

Für die Analyse empirischer Messgrößen des Verkehrsflusses haben sich einige Standardverfahren über die Jahre entwickelt. Das Zustandsdiagramm des Verkehrs, auch als „Fundamentaldiagramm“ bezeichnet, ist eine meist zweidimensionale grafische Darstellung der makroskopischen Verkehrskenngrößen Verkehrsdichte k [Fz/km] und Verkehrsstärke q [Fz/h] bzw. der mittleren momentanen Geschwindigkeit v [km/h]. Diese stehen auch in einem funktionalen Zusammenhang:

$$q \text{ [Fz/h]} = v \text{ [km/h]} \cdot k \text{ [Fz/km]}.$$

Eines der ersten Modelle zur Beschreibung des Verkehrsablaufs auf einer freien Strecke basiert auf den Beobachtungen von Greenshields [1935]. Über einfache Regressionsrechnung stellte er einen linearen Zusammenhang zwischen den

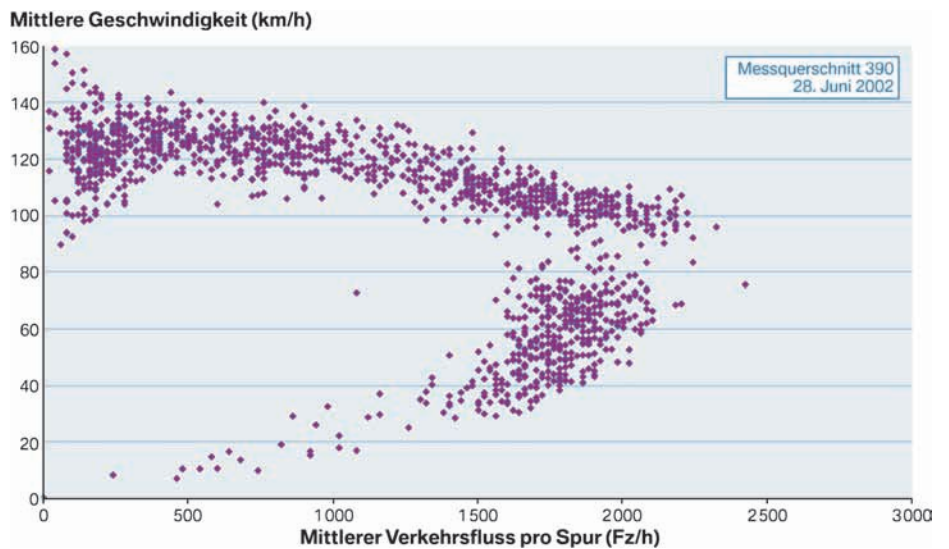


Bild 2: Verkehrsstärke – Geschwindigkeitsdiagramm vom 28.6.2002

Kenngrößen Geschwindigkeit und Verkehrsdichte her. Für die Beziehung zwischen der Verkehrsdichte k und der Verkehrsstärke q ergibt sich daraus der bekannte parabolische Zusammenhang. Im Fundamentaldiagramm kann man erkennen, dass bei gleicher Verkehrsstärke zwei unterschiedliche Verkehrszustände auftreten können (Bild 2). Der erste Zustand wird als „freier Verkehr“ bezeichnet und ist durch hohe Geschwindigkeiten

und niedrige Dichten charakterisiert. Der zweite Verkehrszustand wird durch niedrige Geschwindigkeiten bei gleichzeitig hohen Verkehrsdichten beschrieben, man bezeichnet diesen auch als „instabilen“ oder „gestörten“ Verkehr. Das Fundamentaldiagramm in seiner ursprünglichen Form gibt einen guten, aber doch nur groben Gesamtüberblick über die Verkehrssituation an einem einzelnen lokalen Messquerschnitt. Die zeitliche Ab-

folge der Zustände und damit die Dynamik des Verkehrsablaufs wird daraus nicht deutlich. Jüngere Untersuchungen greifen Hysteresephänomene zwischen den Verkehrszuständen und deren zeitliche Abfolge auf. Es werden diese mittels Definition verschiedener Stadien des Verkehrsablaufs [Zhang, 1999] oder durch Darstellung des Fundamentaldiagramms als Zustandsdiagramm [Kerner, 2005] berücksichtigt. Kim und Keller [2001] teilen hierfür das Fundamentaldiagramm in insgesamt sechs Verkehrszustandsbereiche ein: freier, teilgebundener, synchroner, dichter, gestauter und stehender Verkehr. Kerner [2005] verwendet insgesamt drei Verkehrszustandsbereiche.

Das Bild 2 zeigt ein typisches Fundamentaldiagramm bestehend aus Messungen der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit am Messquerschnitt 390 (etwa bei der Anschlussstelle Garching) der BAB A9 München Richtung Nürnberg nach Norden (Bild 4) vom 28. 6. 2002 gemittelt über alle Fahrstreifen pro Minute. Man kann deutlich den freien, ungestauten Verkehrszustand (oberer Bereich) und den gestauten Verkehr (unterer Bereich) erkennen. Die 1-Minuten Daten können z.T. mehreren Verkehrszuständen zugeordnet werden, da sich innerhalb des

1-Minuten Intervalls der Verkehrszustand veränderte. Dies führt auch zu der Streuung der Messdaten.

Die Analyse einzelner Messquerschnitte erlaubt keine Interpretation des räumlich-zeitlichen Ablaufs des Verkehrs auf einer Strecke. Nur eine Analyse aufeinander folgender Messquerschnitte und deren Einzeldiagramme würde diese räumliche Aussage ermöglichen.

4. Verkehrsstärkesummen-Diagramme

Stufenfunktion

Die Verkehrsstärkemessungen eines einzelnen Messquerschnitts können als Summenlinie dargestellt werden. Die Funktion wird nachfolgend mit $N(x,t)$ bezeichnet. Es wird die Fahrzeuganzahl (N [Fz]) nach oben auf der y-Achse angetragen und die Zeit (t) zu der ein einzelnes Fahrzeug die stationäre Messstelle passiert auf der x-Achse. Im Bild 3 ist die kumulierte Verkehrsstärke als typische Stufenfunktion illustriert. $N(x,t)$ ist hierfür in gleichmäßige Zeitintervalle (z.B. 1-Minute) unterteilt. Eine geglättete Funktion für $N(x,t)$ ergibt sich durch die Interpolation

der Eckpunkte des jeweiligen Stufenanfangs der Treppenfunktion.

Nachfolgend werden alle kumulativen Verkehrsstärke-Diagramme als geglättete $N(x,t)$ -Funktionen dargestellt. Die momentane Verkehrsstärke $q(t)$ [Fz/h] ergibt sich als erste Ableitung von $N(x,t)$ nach t . In der Verkehrsstärkesummenlinie an einem Messquerschnitt ist eine Änderung des Verkehrsflusses als Änderung der Steigung erkennbar.

Räumliche Transformation

Durch die Darstellung zweier Summenlinien aufeinander folgender Messquerschnitte können die Verkehrszustände in einem Autobahnabschnitt ermittelt werden. Im Bild 4 werden links hypothetische kumulierte Verkehrsstärkesummenlinien für zwei hintereinander liegende Messstellen dargestellt. N ist die kumulierte Anzahl der Fahrzeuge die x_1 und x_2 zum Zeitpunkt t passierten. Die Zeit t wird ab einem Zeitpunkt, zu dem ein hypothetisches Referenzfahrzeug die Messquerschnitte passierte, gemessen [Newell, 1982]. Somit wird $N(x,t)$ für die identische Stichprobe von Fahrzeugen ermittelt. Schreibt ein Beobachter am Messquerschnitt x_1 die Fahrzeugankunftszeiten auf

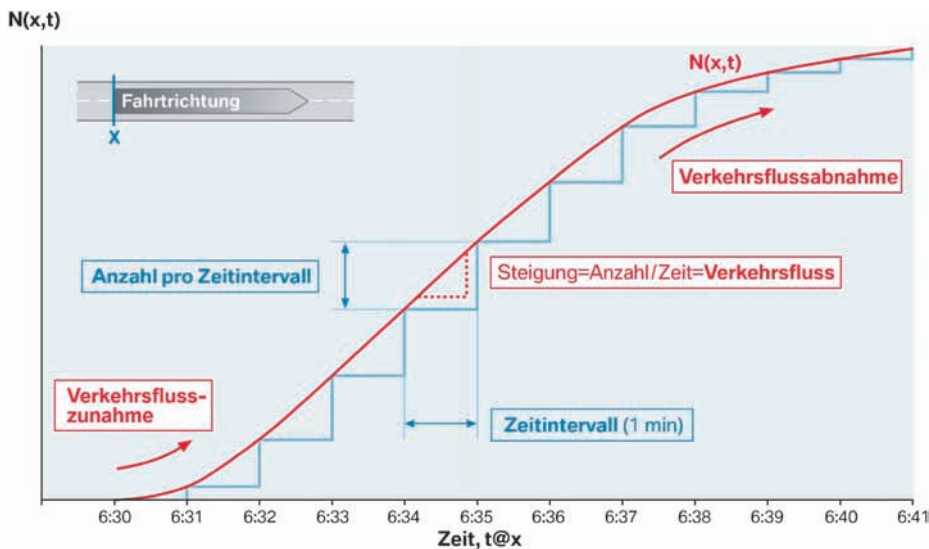


Bild 3: Summenlinie der Verkehrsstärke an einem Messquerschnitt

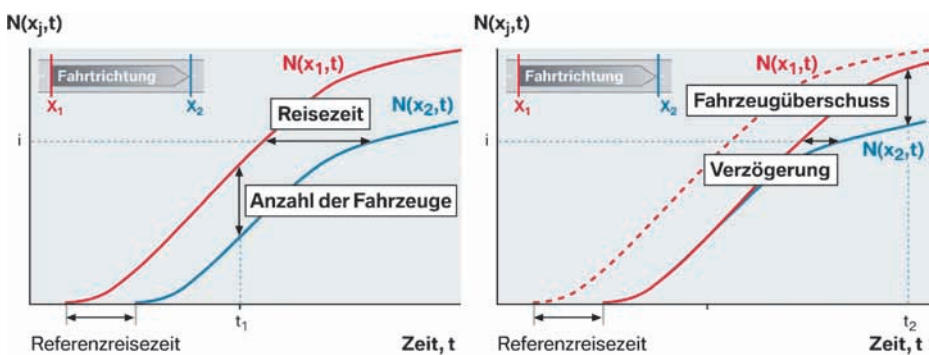


Bild 4: Summenlinien der Verkehrsstärke an zwei Messquerschnitten (links: einfache Darstellung zweier Summenlinien; rechts: horizontal verschobene Darstellung zweier Summenlinien)

und stellt die Summenlinie der Fahrzeuge dar, so würde sich die Kurve $N(x_1,t)$ ergeben. Nimmt man nun an, dass die Fahrzeuge sich in einem FIFO-Warteschlangenverhalten („first in first out“) durch das Autobahnsegment bewegen, d.h. keine Ein- und Ausfahrten, kein Spurwechsel und kein Überholen, so könnten in x_2 die Ankunftszeiten ebenfalls notiert und eine kumulierte Verkehrsstärkefunktion $N(x_2,t)$ ermittelt werden [Cassidy und Bertini, 1999; Cassidy und Windover, 1997]. Diese Methode ermöglicht die Darstellung und Ermittlung einiger wichtiger Zusammenhänge und Parameter eines Autobahnabschnitts, die bei einer rein lokalen Betrachtungsweise nicht möglich sind. Der horizontale Abstand der beiden Kurven bei $N = i$ ist z.B. die Reisezeit des i -ten Fahrzeugs von x_1 nach x_2 . Der vertikale Abstand zum Zeitpunkt $t = t_1$ ist die Anzahl der Fahrzeuge, die sich zwischen x_1 und x_2 befinden.

Um die Verkehrszustände in einem Autobahnabschnitt deutlicher zu machen, ist es möglich, die stromaufwärtsliegende Funktion $N(x_1,t)$ horizontal um die Reisezeit von x_1 und x_2 bei freiem Verkehr nach rechts zu verschieben (Bild 4 rechts). Ist

kein Stau im Segment vorhanden, so werden Verkehrsstärkefluktuationen einfach stromabwärts propagiert. Eine horizontale Abweichung der beiden Summenlinien bedeutet nun eine Abweichung von der normalen Reisezeit bei freiem Verkehr, diese wird häufig auch als Verzögerung bezeichnet. Der vertikale Abstand zum Zeitpunkt $t = t_2$ entspricht der zusätzlichen Anzahl der Fahrzeuge zwischen x_1 und x_2 abzüglich der Fahrzeuge die bei frei fließendem Verkehr zwischen den beiden Messstellen vorhanden waren (Fahrzeugüberschuss).

Sind Fahrzeitverzögerung und Fahrzeugüberschuss groß genug, so ist zwischen x_1 und x_2 ein Stau vorhanden. Der Zeitpunkt, ab dem beide Kurven voneinander abweichen, ist der Zeitpunkt, zu dem ein Stauende eines stromaufwärts wandernden Staus den stromaufwärts liegenden Detektor x_1 erreicht. Hierbei liegt die Annahme zu Grunde, dass der Stau innerhalb des Abschnitts seinen Ursprung hat. Durch die horizontal verschobene Summenliniendarstellung $N(x,t)$ ist es also möglich, nicht nur die Fahrzeitverzögerung und den Fahrzeugüberschuss innerhalb eines Abschnitts aufzuzeigen, sondern auch den Zeitpunkt eines Staubeginns innerhalb eines Abschnitts.

Die idealisierte Darstellung im Bild 4 zeigt deutlich die Änderungen der Verkehrszustände auf. Verwendet man aber reale Messdaten einer Autobahn zur Konstruktion der Summenlinien, so wird schnell deutlich, dass durch die Skala der x-Achse kleine aber wichtige Änderungen, wie z.B. der zeitliche Staubeginn, visuell nicht mehr zu erkennen sind. Das Bild 5 zeigt links eine Summenlinie $N(x,t)$ basierend auf Verkehrsstärkemessdaten gemittelt über alle Fahrstreifen für eine Zeitdauer von zwei Stunden des Detektors 390 der Autobahn BAB A9 München – Nürnberg für den 28.6.2002. Diese erscheint in der Grafik fast als Gerade.

Durch den Einsatz einer nicht orthogonalen linearen Transformation können jedoch die Zeitpunkte, zu denen entscheidende Änderungen des Verkehrsgeschehens eintreten, deutlicher sichtbar gemacht werden [Cassidy und Windover, 1997; Cassidy und Bertini, 1999; Muñoz und Daganzo, 2002]. Es wird die y-Achse durch die Subtraktion des Terms $q_0 t'$ neu skaliert. q_0 ist dabei eine quasi frei wählbare Basisverkehrsstärke bzw. Skalierungsgröße und t' die Zeitdauer ab der Durchfahrt des hypothetischen Referenzfahrzeugs [Cassidy und Bertini, 1999]. Im Bild 5 links ist

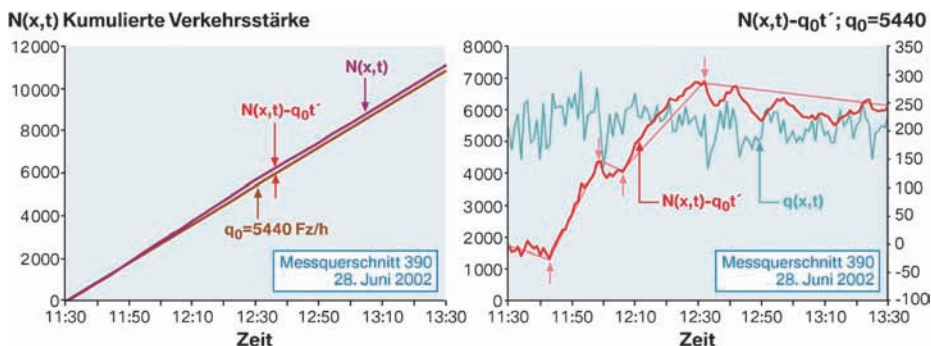


Bild 5: Summenlinie der Verkehrsstärke an einem Messquerschnitt und Basisverkehrsstärke q_0 (links); Differenz der Summenlinie der Verkehrsstärke und der Basisverkehrsstärke im Vergleich zur Verkehrsstärke $q(x,t)$ (rechts)

eine Gerade mit der Steigung der Basisverkehrsstärke $q_0 = 5440$ Fz/h dargestellt. Diese wird durch einen grafischen Iterationsprozess ermittelt. Ziel ist die optimale Visualisierung der zeitlich-räumlichen Verkehrszusammenhänge und eine anschließende Analyse und Interpretation der Verkehrsgeschehnisse.

$N(x,t)-q_0t$ ergibt sich aus der vertikalen Differenz der Gerade mit Steigung q_0 und der Summenlinie $N(x,t)$. Im Bild 5 rechts wird diese Differenz als rechte Ordinate verwendet, die Abszisse ist die Zeit. Man kann deutlich erkennen (rote Linie), dass ein gut gewählter Wert für q_0 einen sehr guten Überblick über die zeitabhängigen Änderungen des Verkehrsgeschehens ermöglicht. In grün dargestellt ist die Verkehrsstärke $q(x,t)$ pro Minute bezogen auf die linke y-Achse. Die Änderungen der Verkehrsstärke und deren Zeitpunkte (kleine rote Pfeile) können der transformierten Summenlinie deutlich besser entnommen werden als der einfachen Zeitreihe der Verkehrsstärke. Zusätzlich zur Verkehrsstärke können auch Geschwindigkeitssummenlinien in ähnlicher Weise erzeugt und analysiert werden.

Durch die Darstellung des Verkehrsaufkommens als Summenlinie ist keine Aggregation der Messdaten auf z.B.

5-Minuten oder 15-Minuten Intervalle notwendig, und es können trotzdem wesentliche verkehrliche Phänomene transparent gemacht werden. Die transformierte Summenliniendarstellung erlaubt die Identifikation des zeitlichen Beginns eines Engpasses direkt aus den Messdaten. Außerdem ist automatisch gewährleistet, dass die Bedingungen für einen „aktiven“ Engpass erfüllt werden, ein Stau stromaufwärts und freier, ungehinderter Verkehr stromabwärts, der den Stauausfluss aus dem Engpass nicht beeinträchtigt.

5. Empirische Ergebnisse für die BAB A 9 München – Nürnberg

Die Autobahn BAB A9 im Norden Münchens ist eine der höchst belasteten Straßen Deutschlands. Es überlagern sich dort der tägliche Münchener Berufsverkehr und seine typischen Pendlerströme mit dem Fernverkehr. Täglich wiederkehrende, kilometerlange Staus sind die Folge.

Die neuen empirischen Analysemethoden wurden an mehreren Tagen im Jahr 2002 für die BAB A 9 München Richtung Nürnberg angewendet. Es wurde dabei ein Streckenabschnitt von insgesamt 17,8 km

Länge zwischen den Anschlussstellen Frankfurter Ring und Autobahnkreuz Neufahrn betrachtet. Insgesamt befanden sich 17 Detektormessquerschnitte innerhalb des untersuchten Abschnitts. Die Ein- und Ausfahrten, die Kilometrierung der Strecke, die Messquerschnittsbezeichnungen und -abstände können dem Bild 6 entnommen werden. Eine Streckenbeeinflussungsanlage mit 5 Anzeigenquerschnitten befindet sich ebenfalls innerhalb des Autobahnabschnitts.

5.1 Geschwindigkeitsverlauf auf dem Autobahnabschnitt über die Zeit

Einen sehr guten Überblick über die gesamte Verkehrssituation am 28.6.2002 auf der BAB A 9 München Richtung Nürnberg vermittelt das Bild 7, eine farbige Darstellung des Geschwindigkeitsfeldes der realen Messdaten. Horizontal ist die Zeit (von 11:00 bis 20:00 Uhr) dargestellt, vertikal die räumliche Entfernung. Die Färbung des Zeitpunkts t am Ort x gibt die dort aktuell gemessene bzw. interpolierte Geschwindigkeit in km/h an. Die klassische verkehrstechnische Farbskala reicht von grün (hohe Geschwindigkeit; freier Verkehr) über gelb (mittlere Geschwindigkeit; gebundener Verkehr) zu



Bild 6: Schematische Darstellung der BAB A9 München Richtung Nürnberg

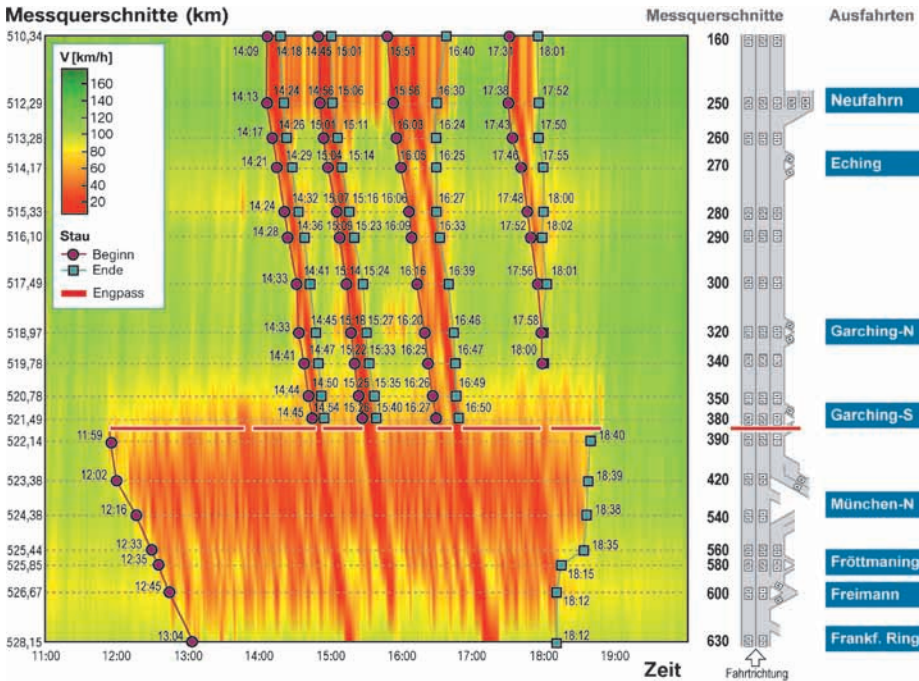


Bild 7: Darstellung eines Raum-Zeit Geschwindigkeitsfeldes für die BAB A9 München Richtung Nürnberg vom 28.6.2002

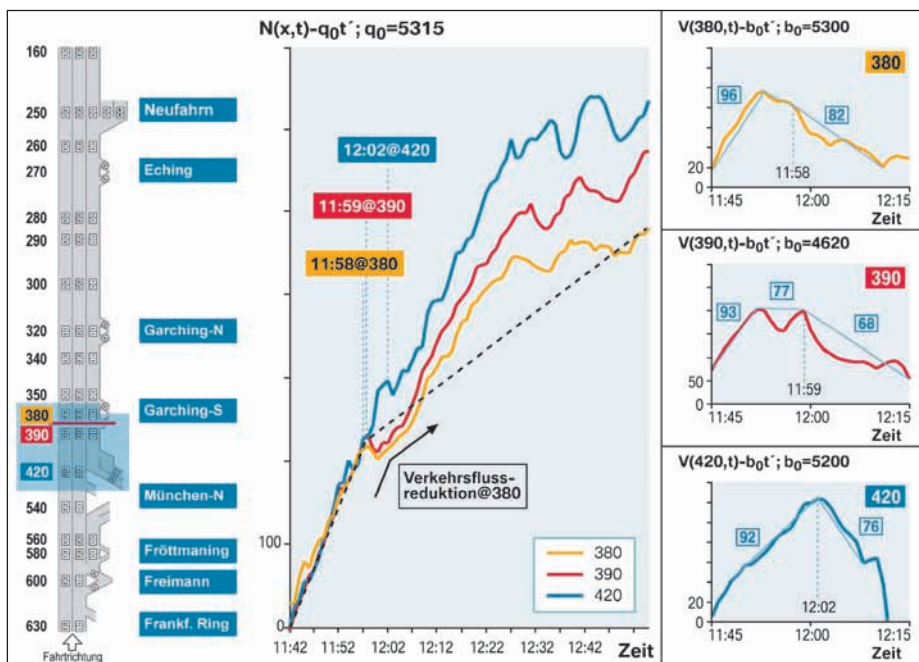


Bild 8: Transformierte Verkehrsstärkesummenlinien $N(x,t)-q_0t'$ (Mitte) und transformierte Geschwindigkeitssummenlinien $V(x,t)-b_0t'$ (rechts) der Detektoren 420, 390 und 380

rot (langsame Geschwindigkeit; Stau). Die 1-Minuten Messwerte der Geschwindigkeiten wurden für die Darstellung über den gesamten Messquerschnitt gemittelt und anschließend wurde die Farbdarstellung durch lineare Interpolation erzeugt. Es wird deutlich, dass substantielle Änderungen der Geschwindigkeiten in der Nähe der Messquerschnitte 380 und 390 ihren Ursprung haben. Die Aktivierung eines potenziellen Engpasses kann um ca. 12:00 Uhr festgestellt werden. Der Geschwindigkeitseinbruch beginnt etwa um 12:00 Uhr und dauert fast sieben Stunden an, dabei erstreckt er sich ca. 5 km stromaufwärts und z.T. aus dem betrachteten Streckenabschnitt hinaus. Am Nachmittag kann man insgesamt vier Geschwindigkeitseinbrüche, die aus einem stromabwärtigen Autobahnabschnitt in das Untersuchungsgebiet wandern, erkennen. Der genaue Zeitpunkt des Staubeginns und des Stauendes sind für jeden Messquerschnitt einzeln bestimmt worden und in der Grafik eingetragen.

5.2 Aktivierung des Engpasses – stromaufwärts

In der Mitte des Bildes 8 sind räumlich verschobene, orthogonal transformierte Verkehrsstärkesummenlinien $N(x,t)-q_0t'$ der Detektoren 420, 390 und 380 für den Zeitraum von 11:42 bis 12:55 Uhr des 28.6.2002 dargestellt. Jede Kurve basiert hierbei auf Zählwerten aller Fahrstreifen eines Messquerschnitts. Die Darstellung der Verkehrsstärkesumme des Messquerschnitts 380 enthält zusätzlich die Messdaten der Ausfahrt Garching Süd. Somit beschreibt jede Linie eine identische Stichprobe an Fahrzeugen. Die drei Verkehrsstärkesummenlinien der Messquerschnitte 380, 390 und 420 wurden zeitlich um die freie Reisezeit verschoben und übereinander gelegt (Bild 4). Zwischen 11:42 und 11:58 Uhr sind kaum Abweichungen der Linien voneinander zu erkennen, dies deutet auf frei fließendem Verkehr in diesem Zeitraum in diesem Autobahnabschnitt hin. Ab ca. 11:58 Uhr weichen die Linien der beiden Detektoren 380 und 390 voneinander ab. Ein Fahrzeugüberschuss zwischen den Detektoren 380 und 390 kann beobachtet werden. Zusätzlich kann eine Verkehrsflussreduktion am Querschnitt 380 festgestellt werden. Die Abweichung der beiden Linien bedeutet außerdem, dass sich irgendwo zwischen den beiden Messstellen ein Stau gebildet haben muss. Die Abweichung der 390er Summenlinie von der Kurve des Detektors 420 ist ge-

kennzeichnet durch eine Verkehrsflussreduktion am Messquerschnitt 390 um 11:59 Uhr. Die ist ein Indiz für die Ankunft des rückwärts wandernden Staus am Querschnitt 390. Durch weitere Analysen kann um 12:02 Uhr das Rückwandern des Staus bis Detektor 420 ermittelt werden.

Der exakte Ankunftszeitpunkt der rückwandernden Stauwelle an jedem Messquerschnitt wird durch eine skalierte Geschwindigkeitssummandarstellung $V(x,t)-b_0t'$ verdeutlicht, b_0 ist hierbei mit dem Wert q_0 für die Verkehrssummenstärke vergleichbar. Im Bild 8 sind rechts diese Geschwindigkeitssummenlinien für die Messquerschnitte 420, 390 und 380 dargestellt. Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten sind als Gerade in km/h zusätzlich gekennzeichnet und zusätzlich sind die Zeitpunkte, zu denen deutliche Geschwindigkeitsveränderungen eintreten, markiert.

Die skalierte $V(x,t)$ Darstellung für Detektor 390 zeigt einen Geschwindigkeitsabfall von 77 km/h auf 68 km/h. Die Stauwelle erreichte diesen Detektor somit um 11:59 Uhr. Voraus ging bereits ein Geschwindigkeitseinbruch von 93 auf 77 km/h.

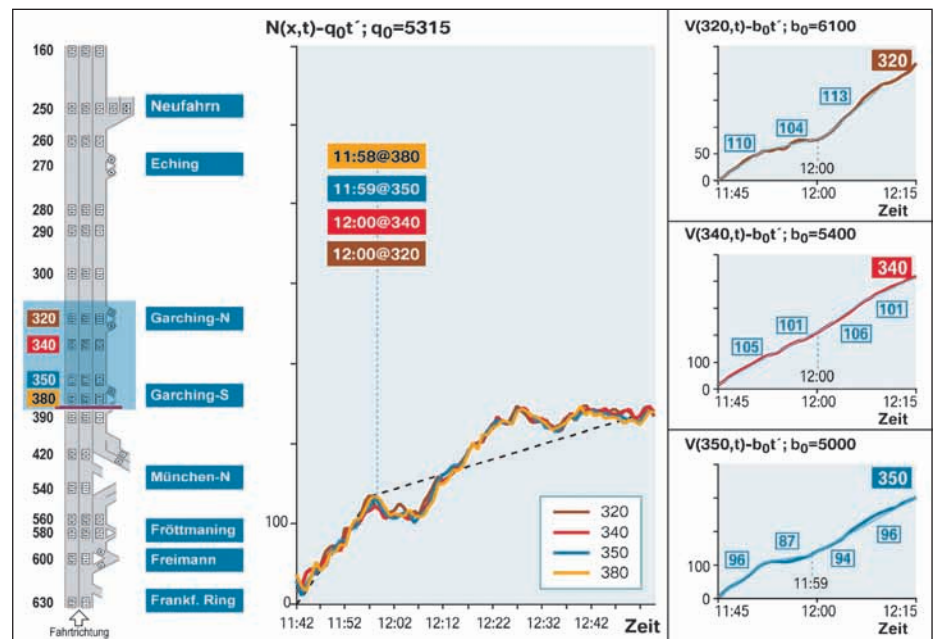


Bild 9: Transformierte Verkehrsstärkesummenlinien $N(x,t)-q_0t'$ (Mitte) und transformierte Geschwindigkeitssummenlinien $V(x,t)-b_0t'$ (rechts) der Detektoren 320, 340 und 350

Im $V(x,t)$ Diagramm für die Messstation 420 kann man eine Reduktion der Geschwindigkeit von 92 km/h auf 76 km/h um 12:02 Uhr beobachten. Dadurch kann der Stau an diesem Querschnitt verifiziert werden. Die Propagierung des gegen die Fahrtrichtung wandernden Staus kann

man bei der Analyse weiterer stromaufwärtiger Detektoren deutlich erkennen (nicht in der Grafik dargestellt). Um 13:04 Uhr erreicht der Stau Messstelle 630 (Bild 7).

Man kann also bisher feststellen, dass ein Stau zwischen den Messquerschnitten

380 und 390 existierte. Die Voraussetzungen für einen sog. „aktiven“ Engpass, nämlich frei fließender Verkehr stromabwärts, wurde noch nicht nachgewiesen.

5.3 Aktivierung des Engpasses – stromabwärts

Das Bild 9 zeigt transformierte $N(x,t)-q_0t'$ Kurven für die Messstellen 380, 350, 340 und 320, die Verkehrsstärken wurden hierbei für den gesamten Querschnitt ermittelt. Messstation 380 beinhaltet dabei die Daten der Einfahrt Garching Süd und die Verkehrsstärken der Ausfahrt Garching Nord wurden der Messstelle 320 hinzu addiert. Dies garantiert die Einhaltung des Fahrzeugerhaltungssatzes innerhalb des betrachteten Streckenabschnitts. Bei der Berechnung und für die Darstellung wurden die identischen Werte für q_0 und die gleiche Skalierung der Achsen wie im Bild 8 verwendet. Durch die Überlagerung der Daten der vier Messstellen kann man deutlich erkennen, dass frei fließender Verkehr zwischen 11:42 Uhr und 12:55 Uhr in diesem Streckenabschnitt vorherrschte. Die Reduktion des Verkehrsflusses bei Querschnitt 380 um 11:58 pflanzte sich in Fahrtrichtung fort und kann bei 350 um 11:59 Uhr, bei 340 um 12:00 Uhr und bei 320 um 12:00 Uhr beobachtet werden. In einer hier nicht dargestellten Auswertung von $N(x,t)$ und $V(x,t)$ der einzelnen Fahrstreifen können dieses Phänomen und ebenfalls die Zeitpunkte bestätigt werden. Der freie Verkehrsfluss stromabwärts des Engpasses wird durch die Geschwindig-

keitsdiagramme $V(x,t)$ der Messstellen 380, 350, 340 und 320 verifiziert. Nach einem Rückgang des Verkehrsflusses, der durch die gestrichelten Linien in den einzelnen Diagrammen dargestellt wird, konnten weiterhin relativ hohe Geschwindigkeiten gemessen werden. Die Bilder 8 und 9 erlauben eine exakte Lokalisierung des Engpasses, nämlich zwischen den Detektoren 380 und 390. Der Aktivierungszeitpunkt des Engpasses war ungefähr um 11:58 Uhr. Der Stau dehnte sich bis zum Detektor 630 aus.

5.4 Analyse der transformierten Geschwindigkeitssummenlinien aller Messquerschnitte

Zur Analyse der durchschnittlichen Geschwindigkeit der Fahrzeuge über alle Fahrstreifen des gesamten Autobahnabschnitts wurde eine Grafik der transformierten Geschwindigkeitssummenlinien $V(x,t)$ erzeugt (Bild 10). Diese wurde aus den über die Zeit und allen Fahrstreifen gemittelten Geschwindigkeitsmessdaten für den Zeitraum von 11:30 bis 19:00 Uhr konstruiert. Die transformierte Darstellungsform erlaubt es, räumliche und zeitliche Trends der mittleren Geschwindigkeiten und eindeutige Geschwindigkeitsänderungen bzw. deren Orte und Zeitpunkte zu identifizieren. Betrachtet man um ca. 12:00 Uhr die Messstellen 390 bis 630 in der Nähe bzw. stromabwärts des Engpasses, so kann man deutlich den Trend sinkender Geschwindigkeiten erkennen. Außerdem kann man auch die später auftretenden Geschwin-

digkeitsturbulenzen und deren zeitliche Propagierung stromaufwärts des Engpasses deutlich erkennen. Die maximalen mittleren Geschwindigkeiten im Bereich der Messstellen 380 bis 160 vor den Turbulenzen liegen im Bereich von ca. 100 km/h.

7. Ursachen für die Aktivierung eines Engpasses

Einfahrten

Eine mögliche Ursache für die Aktivierung eines Engpasses sind Einfahrten. Die Auswirkung der Verkehrsstärkefluktuationen der Einfahrt im Autobahnkreuz München Nord (Messstelle 420) auf die Aktivierung des Engpasses auf der Hauptfahrbahn um 11:58 Uhr wurde detailliert untersucht. Diese Einfahrt liegt unmittelbar stromabwärts des Engpasses. Es handelt sich hierbei um eine hoch belastete zweispurige Autobahneinfahrt von der BAB A99 auf die zweispurige BAB A9 aus München kommend Richtung Nürnberg. Im Bild 11 wird die Verkehrsstärkesummenlinie $N(x,t)$ der Einfahrt 420 für den Zeitraum zwischen 11:30 und 13:00 Uhr dargestellt. Zusätzlich wurden stückweise lineare Approximationen in (Fz/h) in das Bild eingetragen. Diese sollen möglichst wenig von der ursprünglichen Kurve abweichen, aber doch deutlicher den zeitlichen Trend wiedergeben. Einige Minuten vor der Aktivierung des Engpasses um 11:58 Uhr zwischen den Messstationen 380 und 390 auf der Hauptfahrbahn kann man einen 23%igen Anstieg der Verkehrsstärken auf der Einfahrt von 2400 auf 2960 Fahrzeuge pro Stunde beobachten. Eine Minute bevor der Engpass „entstand“, stieg die Verkehrsstärke der Einfahrt um 9,5% von 2960 auf 3240 Fz/h an. Eine Möglichkeit ist, dass ein Anstieg der Verkehrsstärke der Einfahrt zu einer Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn führte, die die aktuelle Kapazität überschritt, und der Verkehr brach zusammen. Eine weitere Möglichkeit könnte eine Beeinflussung des Fahr- bzw. Fahrerverhaltens durch die gestiegene Einfahrtsverkehrsmenge sein. Mehr einfahrender Verkehr führt zu einem veränderten Spurwechselverhalten vor allem auf der durchgehenden Hauptfahrbahn, die Kapazität sinkt und ein Stau entsteht.

Lastkraftwagen

Zusätzlich zu den Effekten der steigenden Verkehrsstärke der Einfahrt BAB A9 auf

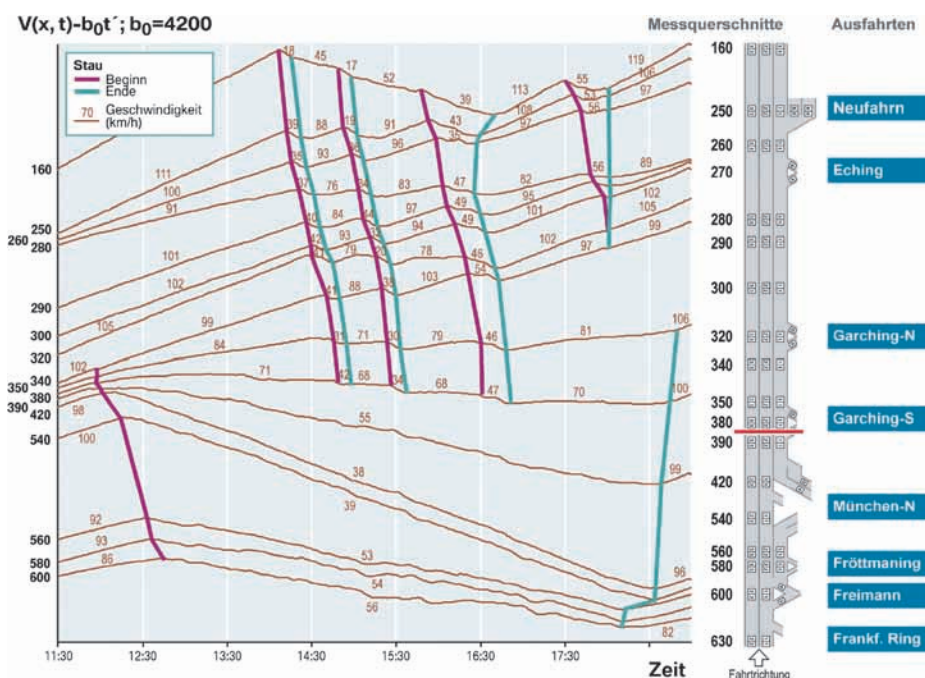


Bild 10: Transformierte Geschwindigkeitssummenlinien $V(x,t)-b_0t'$ aller Detektoren des Autobahnabschnitts

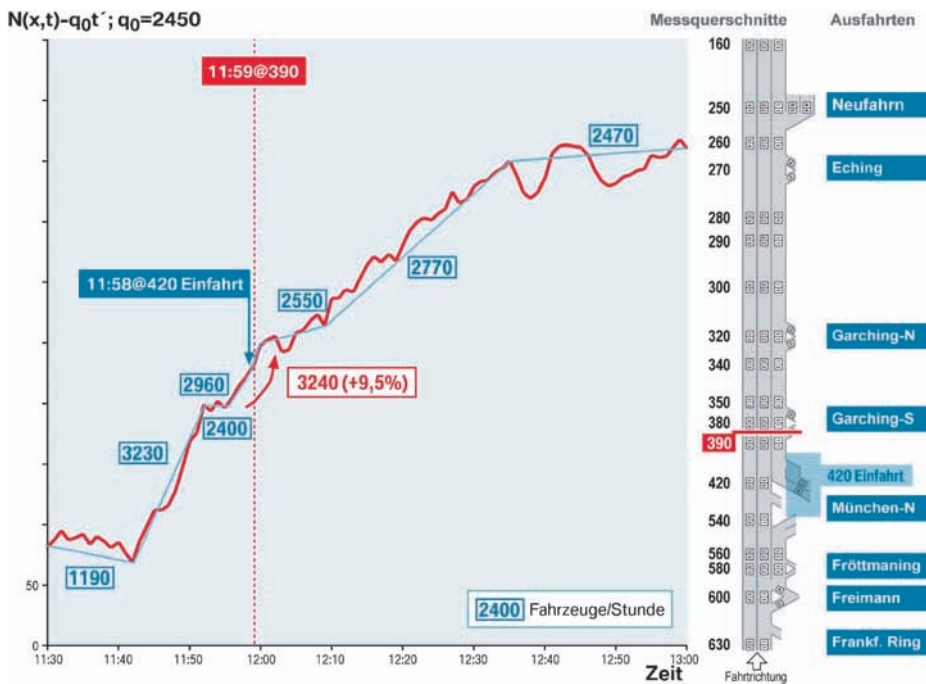


Bild 11: Transformierte Verkehrsstärkesummenlinie der Einfahrt 420 – Autobahnkreuz München Nord

die Aktivierung des Engpasses gegen 11:59 Uhr wurde auch eine detaillierte Analyse der Lkw-Verkehrsstärken durchgeführt. Lastkraftwagen haben im Vergleich zu Personenkraftwagen eine andere Performance bezüglich ihres Brems- und Beschleunigungsverhaltens. Für die Analyse wurde der dem Engpass nächste stromaufwärts liegende Detektor 390 herangezogen.

Das Bild 12 illustriert transformierte Lkw-Verkehrsstärkesummenlinien $N(x,t)$ getrennt nach Fahrstreifen. Zusätzlich wurden stückweise lineare Approximationen

in (Lkw/h), gerundet auf 10 Lkw/h, in das Bild eingetragen. Zu beachten in dieser Grafik ist, dass für jede Fahrspur ein anderer Wert für q_0 verwendet wurde und somit die Steigungen der einzelnen Kurven nicht miteinander verglichen werden können.

Wie nicht anders zu erwarten benutzen die meisten Lkw die rechte Fahrspur. Wenige Minuten bevor der Stau sich bildete, sind jedoch einige interessante Phänomene beobachtbar. Erstens, innerhalb eines 3-Minuten Zeitraums, wurden auf der linken Fahrspur des Querschnitts 390 vier

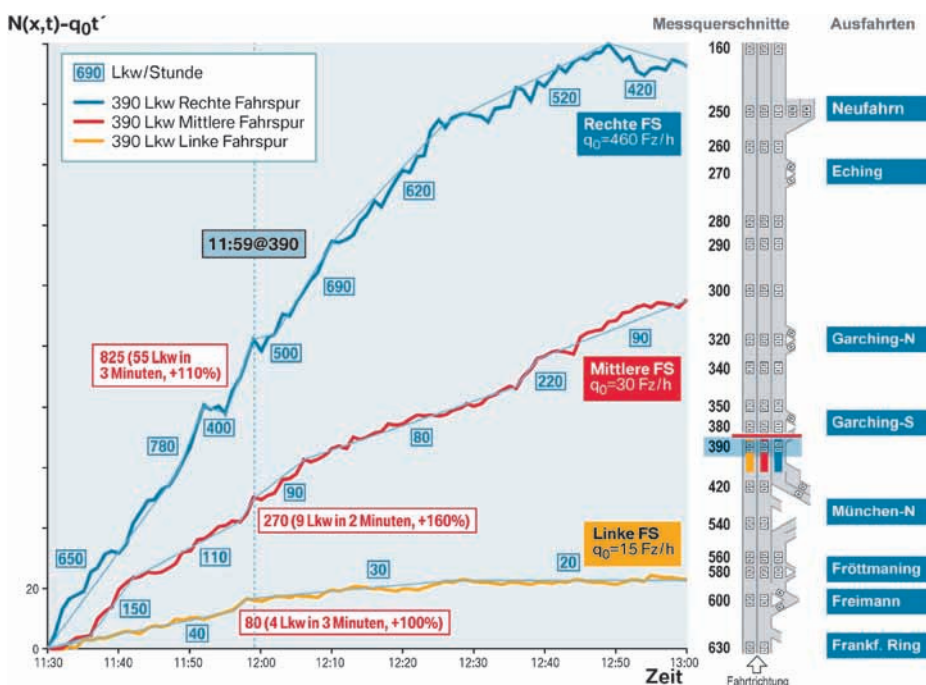


Bild 12: Transformierte Lkw-Verkehrsstärkesummenlinie der linken, mittleren und rechten Fahrspur am Messquerschnitt 390

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse

Tag	Datum	Freier Verkehr Dauer	Freie Verkehrsstärke (Fz/h)	Stau-dauer	Stauausfahrts-verkehrsstärke (Fz/h)	Verkehrs-fluss-reduktion	Stoßwellen-geschwin-digkeit (km/h)
Donnerstag	28.6.2002	0:23	5800	1:41	5550	-4%	-18.8
	28.6.2002			0:55	5270		
	28.6.2002			0:30	5360		
	28.6.2002			1:46	5390		
Mittwoch	27.6.2002	0:42	5510	2:13	5370	-2%	-13.8
	27.6.2002			0:33	5430		
Dienstag	26.6.2002	0:21	5890	0:21	5740	-3%	-23.4
Montag	2.7.2002	0:14	5970	1:34	5180	-13%	-14.7
Dienstag	3.7.2002	0:11	5840	0:11	5490	-6%	-10.7
	3.7.2002			1:40	5020		
Mittwoch	4.7.2002			3:30	5560		-15.8
Donnerstag	5.7.2002	0:59	5530	1:22	5430	-2%	-11.9
Mittelwert:			5760		5400		
Standardabweichung:			180		190		
Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) '01					5400-5499		
Highway Capacity Manual (HCM) 2000					6285-6858		

Lastwagen gezählt, ein Anstieg um 100 %. Zweitens, eine 160 %-ige Zunahme der Lkw-Verkehrsstärke auf der mittleren Spur. Hierbei wurden in zwei Minuten 9 Lkw gezählt. Drittens, fast simultan stieg auch die Anzahl der Lastkraftwagen auf der rechten Spur um 110 % auf 55 Lkw in 3 Minuten an.

Wie oben bereits beschrieben, könnte die steigende Verkehrsstärke auf der Einfahrt zu einem veränderten Spurwechselverhalten geführt haben. Auch Lkw wechseln vermehrt die Fahrstreifen, sie benutzen zusätzlich die mittlere Spur und auch die ganz linke Überholspur. Die Kapazität sinkt, der Verkehr bricht zusammen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Mit den im Beitrag ausführlich dargestellten Methoden lassen sich Engpässe genau lokalisieren und deren Aktivierungszeitpunkte mit hoher Genauigkeit bestimmen. Insgesamt wurden 7 Wochentage detailliert analysiert. Dabei wurden 12 Staus von unterschiedlicher Dauer und räumlicher Ausprägung beobachtet.

Interessant erscheint nun ein Vergleich der maximal gemessenen Verkehrsstärken vor der Stauentstehung und der Verkehrsstärke des aus dem Stau herausfahrenden Verkehrsstroms. Der Mittelwert der Kapazität im freien Verkehrsfluss liegt bei 5760 Fahrzeugen pro Stunde für die dreispurige Richtungsfahrbahn. Die aus dem Stau ausfahrende Verkehrsstärke war immer geringer, die Reduktion schwankte zwischen 3 bis 13 % (Tabelle 1). Es kann also bestätigt werden, dass unterschiedliche Kapazitäten für den freien und den gestauten Verkehr auftreten.

Eine gute Lokalisierung von Engpässen, Staus und der Wirkungen ist einer der wichtigsten Bestandteile eines hochwertigen Verkehrsinformationsdienstes. Gerade die Auswirkungen von Verkehrszusammenbrüchen auf die Reisezeiten sind für Navigationsgeräte und deren Kunden von höchstem Interesse. Eine exakte Beschreibung der verkehrlichen Phänomene wie Verkehrsfluss und Spurwechsel kann auch bei der Entwicklung und Auslegung von Fahrerassistenzsystemen genutzt werden.

Literaturverzeichnis

Bertini, R.L.; Hansen, S.; Bogenberger, K.: Empirical Analysis of Traffic Sensor Data Surrounding a Bottleneck on a German Autobahn, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2005. (In Press).

Cassidy, M.J.; Bertini, R.L.: Some Traffic Features at Freeway Bottlenecks. Transportation Research, Vol. 33B, 25–42, 1999.

Cassidy, M.J.; Bertini, R.L.: Observations at a Freeway Bottleneck. Transportation and Traffic Theory, 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Jerusalem, Israel, 107–124, 1999.

Cassidy, M.J.; Windover, J.R.: Methodology for Assessing Dynamics of Freeway Traffic Flow, In Transportation Research Record 1484, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 73–79, 1997.

Daganzo, C.F.: Fundamentals of Transportation Engineering and Traffic Operations, Elsevier Science, Oxford, U.K., 1997.

Greenshields, B.D.: A Study of Traffic Capacity, Proceedings of Highway Research Board, Vol. 14, 448–477, 1935.

Hall, F.L.; Agyemang-Duah, K.: Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity, In Transportation Research Record 1320, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 91–98, 1991.

Hall, F.L.; Hurdle, V.F.; Banks, J.H.: Synthesis of Recent Work on the Nature of Speed-Flow and Flow-Occupancy (or Density) Relationships on Freeways, In Transportation Research Record 1365, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 12–18, 1992.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Köln, 2002.

Kerner, B.S.: The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory, Springer, 2005.

Kim, Y.; Keller, H.: Zur Dynamik zwischen Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm, Straßenverkehrstechnik, 2001.

Newell, G.F.: Applications of Queuing Theory, Chapman and Hall, Cambridge, U.K., 1982.

May, A.D.: Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall, 1990.

May, A.D., Keller, H.: Non-Integer Car Following Models. Transportation Research Record 199, Transportation Research Board, Washington D.C., 1966.

Muñoz, J.C.; Daganzo, C.F.: Fingerprinting Traffic from Static Freeway Sensors, Cooperative Transportation Dynamics, Vol. 1, 1.1–1.11, 2002.

Rudjanakanoknad, J.; Cassidy, M. J.: Traffic-Responsive Ramp Metering to increase Merge Bottleneck Capacity, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2005 (In Press). Transportation Research Board: Highway Capacity Manual. National Research Council, Washington, D.C., 2000.

Zhang, H.M.: A Mathematical Theory of Traffic Hysteresis, Transportation Research, B, Vol. 33, No. 1, 1–23, 1999.

Für die Bereitstellung der Daten und die technische Unterstützung bedanken sich die Autoren sehr herzlich bei den Herren der Autobahndirektion Südbayern und denen der Verkehrsrechnerzentrale Freimann.