

Verkehr verstehen und beherrschen

Dr. Martin Treiber, Dipl.-Phys. Arne Kesting und Prof. Dr. Dirk Helbing

Institut für Wirtschaft und Verkehr an der Technischen Universität Dresden,
treiber@vwitme011.vkw.tu-dresden.de

Zusammenfassung

Ein reibungsloser Verkehrsfluß ist zentral für eine florierende Volkswirtschaft. Maßnahmen zur Vermeidung von Verkehrszusammenbrüchen und zur Reduktion der Unfallzahlen haben daher höchste Priorität. In diesem Beitrag werden für den Straßenverkehr der aktuelle Stand der Stau- und Unfallforschung zusammengefaßt sowie aktuelle Forschungsstrategien und zukünftige Maßnahmen vorgestellt.

Da in Deutschland in Ballungsräumen und auch aus ökologischen und finanziellen Gründen ein Ausbau des vorhandenen Verkehrsnetzes nur noch bedingt möglich ist, konzentrieren sich die heutigen Forschungsansätze auf eine „intelligentere“ und effektivere Nutzung der vorhandenen Infrastruktur. Dabei spielen die Vernetzung der jetzt noch größtenteils getrennt betrachteten Komponenten Informationstechnik/Telematik, Fahrzeugtechnik und ihre verkehrlichen Wirkungen eine entscheidende Rolle.

Zunächst werden der Stand des Wissens über Stautentstehung, Verkehrsdynamik und Unfallwahrscheinlichkeit sowie offene Fragen erläutert. Eine bereits gesicherte Erkenntnis ist vor allem, daß die Entstehung von Verkehrszusammenbrüchen in der Regel an drei Bedingungen gekoppelt ist: Ein hohes Verkehrsaufkommen, eine lokale Störstelle („Bottleneck“) und eine letztendlich als Auslöser wirkende temporäre Störung im Verkehrsfluß selbst. Dieses Szenario ist sowohl durch Verkehrsdatenanalyse als auch durch Simulationen gut bestätigt. Forschungsbedarf gibt es dagegen bei der Definition von Indikatoren für die Unfallwahrscheinlichkeit.

Weiterhin diskutieren wir aktuelle und zukünftige technologische Maßnahmen zur Stauvermeidung und zur Erhöhung der Effektivität des Verkehrsflusses unter Fokus auf Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK-Technologien). Gegenwärtig eingesetzte Mittel beinhalten Verkehrsbeeinflussungs-Maßnahmen wie adaptive Tempolimits oder dynamisches Routing und zum Teil eine Zuflußsteuerung an Einfahrten von Fernstraßen durch sog. „Pfortnerampeln“ („ramp metering“). Mögliche zukünftige Maßnahmen betreffen unter anderem die Implementation von systemoptimalem Routing sowie eine automatisch der Verkehrssituation angepaßte Fahrweise durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation im Zusammenspiel mit automatischen Längsreglern („Adaptive Cruise Control“), welche schon jetzt in einigen Oberklassefahrzeugen zur Verfügung stehen.

Die Ergebnisse aus der Forschung und ersten Praxiserfahrungen zeigen ein erhebliches Chancenpotential. So steht bereits heute fest, daß typische Staus bei einem geringen Ausstattungsgrad mit Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation vollständig

vermieden werden können. Die Einführung solcher Systeme setzt begleitende Initiativen voraus, z.B. die Zulassung von Pförtnerampeln mit extrem kurzen Schaltfrequenzen und LKW-Überholverbote in Verbindung mit einer vorgeschriebenen Lkw-Mindestgeschwindigkeit. Generell bietet sich für die Auslegung von Verkehrswegen und die Definition der Verkehrsqualität als bessere Kalkulationsbasis die Fahrzeit an.

.2 Einleitung

Im Jahre 2004 gab es in Deutschland 5844 Verkehrstote und über 440 000 Verletzte. Der durch Verkehrsstaus - hauptsächlich durch Zeitverluste, aber auch durch zusätzliche Emissionen und Unfälle - verursachte volkswirtschaftliche Schaden wird unterschiedlich hoch angegeben. Eine der jüngsten Studien des EU-Weißbuchs beziffert ihn europaweit auf 0.5 % des Bruttoinlandprodukts (was für Deutschland 21 Mrd. Euro entsprechen würde) mit einer Prognose von 1 % für das Jahr 2010. Eine andere, von BMW Ende der Neunziger Jahre in Auftrag gegebene Studie gibt sogar 100 Milliarden Euro pro Jahr für Deutschland an. In jedem Falle stellen Verkehrsstaus einen der größten volkswirtschaftlichen Schadensfaktoren dar.

Vorschläge zur Stau- und Unfallvermeidung beinhalten unter anderem einen massiven Ausbau der Verkehrsinfrastruktur. Dieser ist in Deutschland aus den verschiedensten Gründen aber nur begrenzt möglich. Eine Alternative besteht in Verkehrsvermeidung, z.B. durch stark erhöhte Steuern. Die damit einhergehende Einschränkung an individueller Mobilität kann jedoch eine empfindliche Einbuße an Lebensqualität darstellen und unabsehbare Auswirkungen auf die Wirtschaft haben.

Damit kommt einer dritten Stoßrichtung, der Verkehrsoptimierung durch technologische Maßnahmen, vor allem aus dem Bereich IuK, eine überragende Bedeutung zu. Ansatzpunkte dazu liegen in der Informationstechnik (Telematik), Fahrzeugtechnik und Verkehrstechnik. Gerade auf dem Gebiet der Fahrzeugtechnik wurde in den letzten Jahrzehnten bereits viel erreicht. So ist - bedingt vor allem durch Sicherheitsgurte, Airbags, im Hinblick auf das Crashverhalten optimierte passive Sicherheit und nicht zuletzt durch Fahrerassistenzsysteme wie ABS und ESP - die Zahl der Verkehrstoten gegenüber den siebziger Jahren bereits um mehr als den Faktor drei zurückgegangen. Auf die Verkehrsleistung in Personen-Kilometern bezogen, entspricht dies sogar einem Faktor von etwa sechs.

Von Seiten der Verkehrstechnik und Telematik werden bereits heute Maßnahmen zur Stauvermeidung erfolgreich eingesetzt, wie z.B. adaptive Tempolimits oder dynamisches Routing, teilweise auch adaptive Zufluß-Steuerungen an Autobahnzufahrten. Verschiedene weitere Ansätze sind in der Vergangenheit aus verschiedenen Gründen gescheitert oder verschoben worden, da sie zu sehr auf die technologische Machbarkeit ausgerichtet waren und zu wenig die politischen, gesetzlichen, haftungsrechtlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen im Auge hatten. Auch Fragen der Finanzierung, Geschäftsmodelle und Markteinführungsstrategien sowie der technische Reife und Nutzerakzeptanz haben teilweise zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Umsetzung neuer Technologien geführt.

In den letzten Jahren hat man diesen Problemen bei den Leitprojekten des BMBF und der EU verstärkt Aufmerksamkeit geschenkt. Außerdem wird zunehmend erkannt, daß sich aus den zum Teil überraschenden Erkenntnissen der theoretischen Erforschung von Verkehrsflüssen und komplexen Systemen neue Potenziale ergeben, die von den zu stark pragmatisch ausgerichteten Ansätzen der Vergangenheit übersehen wurden. Zudem werden die drei Sektoren Informationstechnik, Fahrzeug- und Verkehrstechnik heute noch weitgehend isoliert betrachtet. Eine

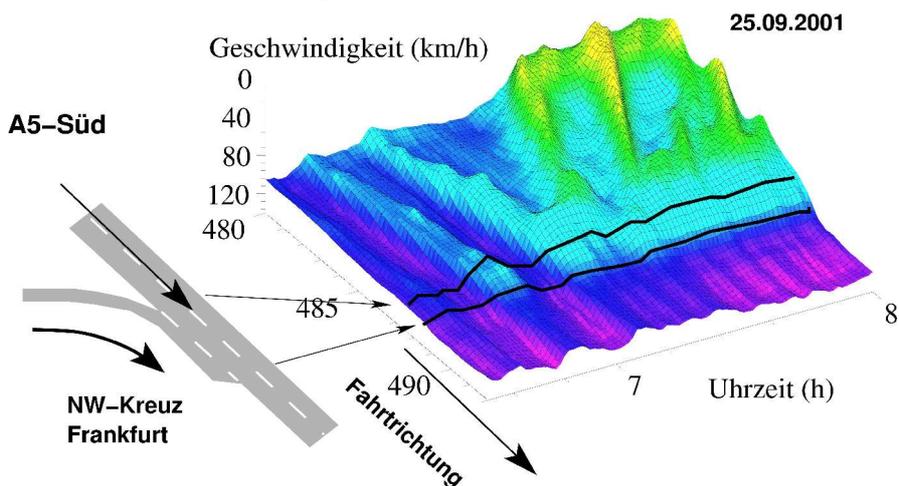
Vernetzung dieser Sektoren zu einem einheitlichen Ansatz birgt jedoch das größte Optimierungspotenzial, wie im Folgenden dargestellt wird.

.3 Stand des Wissens

Einen wesentlichen Beitrag zum aktuellen Kenntnisstand der Verkehrsdynamik und Stautentstehung haben BMBF-Verbundprojekte und Forschungsinitiativen wie PROMETHEUS, SANDY („Straßenverkehrsanwendungen der Nichtlinearen Dynamik“), MoTiV („Mobilität und Transport im Intermodalen Verkehr“), und INVENT („Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik“) geleistet.

Statistische Auswertungen von Verkehrsdaten – vor allem von stationären Detektordaten – ergeben ein klares Bild des Mechanismus’ der Stautentstehung auf Autobahnen und Fernstraßen: In fast allen Fällen entstand ein Verkehrszusammenbruch durch das gleichzeitige Zusammenwirken von drei Komponenten:

- einem hohen Verkehrsaufkommen,
- einer lokalen Störstelle (Ungleichmäßigkeit) der Strecke (welche als Engpaß oder „Bottleneck“ wirkt), und
- einer temporären Störung des Verkehrsflusses, die den Stau letztlich initiiert.



Die Abbildung des aus stationären Detektordaten rekonstruierten raumzeitlichen Verlaufs eines Verkehrszusammenbruches auf der A5-Süd bei Frankfurt zeigt dies deutlich anhand der umgekehrt aufgetragenen Geschwindigkeit:

Abbildung 1: Raumzeitlicher Verlauf eines Verkehrszusammenbruches

In Abb. 1 ist freier Verkehr mit dunklen, blau-violetten Farbtönen, deutlich gestörter Verkehr hellblau und gestauter Verkehr mit grün und gelb markiert. Die hohe Verkehrsnachfrage ist hier durch die morgendliche Rushhour bedingt. Als stationäre Störstelle, auch als „Bottleneck“ oder Engpaß bezeichnet, fungiert hier die Einfahrt des „Nordwestkreuzes Frankfurt“ bei Kilometer 488. Als temporäre Störung wirkt schließlich eine Kolonne dicht aufeinander folgender Fahrzeuge, die in der Abbildung als hellblauer Streifen zu erkennen ist und die gegen 7:00 h die Einfahrt passiert. Die dort zusätzlich stattfindenden Störungen durch Spurwechsel der einfahrenden Fahrzeuge führen zum Aufschaukeln der Störung, die letztend-

lich ihre Richtung umkehrt und sich als „Stop&Go-Welle“ stromaufwärts fortpflanzt. An der Störstelle werden zu späteren Zeitpunkten weitere Stop&Go-Wellen erzeugt, bis sich der Stau nach Ende der Rushhour wieder auflöst. Dieses Auflösen setzt jedoch eine um mindestens 10-20% reduzierte Verkehrsnachfrage voraus, da mit dem Verkehrszusammenbruch nicht nur eine drastische Verlängerung der Fahrtzeit, sondern auch eine merkliche Kapazitätsreduktion einher geht („capacity drop“). Gerade dann, wenn während der Hauptverkehrszeit ein besonders hoher Bedarf an Straßenkapazität besteht, wird diese durch die Stautenstehung um 10 bis 20% reduziert. Die Strategie muß also lauten, die Entstehung von Staus zu unterdrücken oder so lange wie möglich herauszuzögern.

Die lokale Ungleichmäßigkeit bzw. Störstelle der Strecke kann

- eine Anschluß-Stelle oder ein Autobahnkreuz,
- ein Streckenabschnitt mit Baustelle,
- ein Unfallort,
- eine Steigungs-, Gefälle- oder Kurvenstrecke,
- eine Tunneleinfahrt mit veränderten Licht- und Sichtverhältnissen oder
- (durch die damit einher gehende Ablenkung der Fahrer) ein Unfall auf der Gegenfahrbahn sein.

Statistische Untersuchungen des ADAC zufolge machen Ein- und Ausfahrten, Baustellen und Unfälle je 30% der Stau verursachenden Ursachen aus. Nur 10% der Staus haben andere Ursachen wie Steigungen.

Der Mechanismus der Stautenstehung kann inzwischen sehr detailliert durch Verkehrsmodelle und -simulation verstanden werden. Selbst eine empirisch fundierte Kategorisierung der Stauarten ist möglich: Für kleinere Engpässe bilden sich bevorzugt einzelne stehende oder mit einer charakteristischen Geschwindigkeit von 15 km/h entgegen der Fahrtrichtung laufende Stauwellen aus. Ist die Störung größer, z.B. bei Baustellen mit Spurzahl-Reduktion oder nach Unfällen, bilden sich ausgedehnte Stauzonen mit homogenem Verkehrsfluß („zähfließender Verkehr“) oder mit Stop&Go-Verkehr.

Wesentlich für eine Rekonstruktion der aktuellen Verkehrs-Situation in Echtzeit ist, daß die Ausbreitung der Staufronten festen Gesetzmäßigkeiten unterliegt. Beispielsweise ist die stromabwärtige Staufront entweder ortsfest oder wandert mit etwa 15 km/h entgegen der Fahrtrichtung. Die Bewegung der stromaufwärtigen Staufront folgt hingegen Gesetzmäßigkeiten, die nur von der Nachfrage und der Kapazität der Engstelle abhängen. Auf diesen Erkenntnissen beruhende Anwendungen zur Verkehrszustandsanalyse und Kurzzeit-Voraussage werden bereits angeboten wie die von Prof. Kerner entwickelten Tools ASDA (automatische Stauanalyse) und FOTO (Forecasting of Traffic Objects). Die in Abb. 1 gezeigte Rekonstruktion des Verkehrszustandes anhand der „Adaptive Smoothing Method“ beruht ebenfalls auf solchen Erkenntnissen. Auch explizit modellgestützte Verfahren zur Rekonstruktion und Kurzzeitprognose des Verkehrs werden erfolgreich angewandt, beispielsweise in dem System von T-Traffic oder der Simulation des Autobahnverkehrs in Nordrhein-Westfalen.

Hingegen besteht bezüglich der Quantifizierung der *Unfallwahrscheinlichkeit* noch viel Forschungsbedarf. Dafür wird gegenwärtig vor allem die *Time-To-Collision* herangezogen, welche die Zeitspanne bis zur Kollision mit dem Vorderfahrzeug unter der Annahme angibt, daß während der Annäherung keine Beschleuni-

gungen oder Bremsverzögerungen stattfinden. Während bei gleichmäßiger Fahrt ohne Geschwindigkeitsdifferenzen die Time-to Collision gegen unendlich geht, gelten Werte unterhalb von 4 s als kritisch. Die Unfallwahrscheinlichkeit steigt rapide, falls gehäuft Werte unterhalb von 4 s auftreten. Eine noch nicht gelöste Herausforderung stellt eine empirisch belastbare dynamische Modellierung der Unfallwahrscheinlichkeiten dar. Da auf Fernstraßen gehäuft Auffahrunfälle am stromaufwärtigen Stauende auftreten, bedeutet eine Stauvermeidung indirekt eine Reduzierung der Unfallhäufigkeit. Im Gegensatz zu den konventionellen Ansätzen zur Stauvermeidung ist bei der Unfallvermeidung auch ein einzelfahrzeugbasierter Ansatz Erfolg versprechend. Neben dem Schutz der motorisierten Verkehrsteilnehmer selbst ist dabei verstärkt ebenfalls auf den wachsenden Anteil von Fußgängern und Radfahrern an den Verkehrsoffern hinzuweisen. Auch hierbei helfen neue Technologien, die z.B. im Projekt VESUV ("Videobasiertes Assistenzsystem zur Erhöhung der Sicherheit ungeschützter Verkehrsteilnehmer") untersucht wurden.

.4 Maßnahmen zur Verkehrsoptimierung – heute und im Jahre 2020

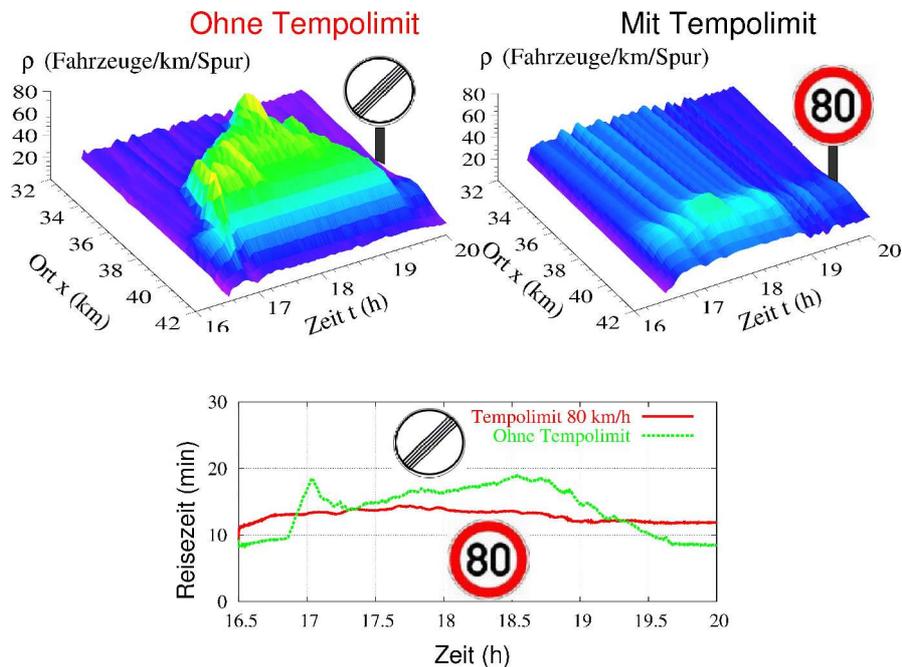
Das Verständnis der drei Stau verursachenden Faktoren bildet den Schlüssel der aktuell und künftig eingesetzten Maßnahmen zur Verkehrsoptimierung. Nimmt man die Verkehrsnachfrage und damit ein zeitweilig hohes Verkehrsaufkommen als gegeben hin, so verbleiben als Ansatzpunkte die Verringerung oder Vermeidung der beiden anderen Stauursachen, also der Streckenungleichmäßigkeiten und der Störungen im Verkehrsfluß selbst. Damit ergibt sich als Grundsatz der Verkehrsoptimierung die *Homogenisierung des Verkehrsflusses bezüglich Ort und Zeit und die Minimierung von inneren Störfaktoren*.

Während als Zielgröße der Verkehrsoptimierung in der Vergangenheit vor allem die Kapazität und Verkehrsdichte oder Geschwindigkeit im Mittelpunkt stand, erkennt man zunehmend, daß zur Charakterisierung der Verkehrsqualität eine differenziertere Herangehensweise nötig ist. Als Zielgrößen rücken daher immer mehr

- die Minimierung der Gesamtreisezeit,
- die Maximierung der Unfallsicherheit und
- die Maximierung des Fahrkomforts

in den Vordergrund, zumal dies relevante Faktoren für den individuellen Kaufanreiz sind und damit für die Markteinführung von Systemen, die nicht vom Staat finanziert werden.

Die Minimierung von inneren Störfaktoren im Verkehrsfluß ist zum Beispiel die Grundlage für die verkehrliche Wirksamkeit von adaptiven Tempolimits.



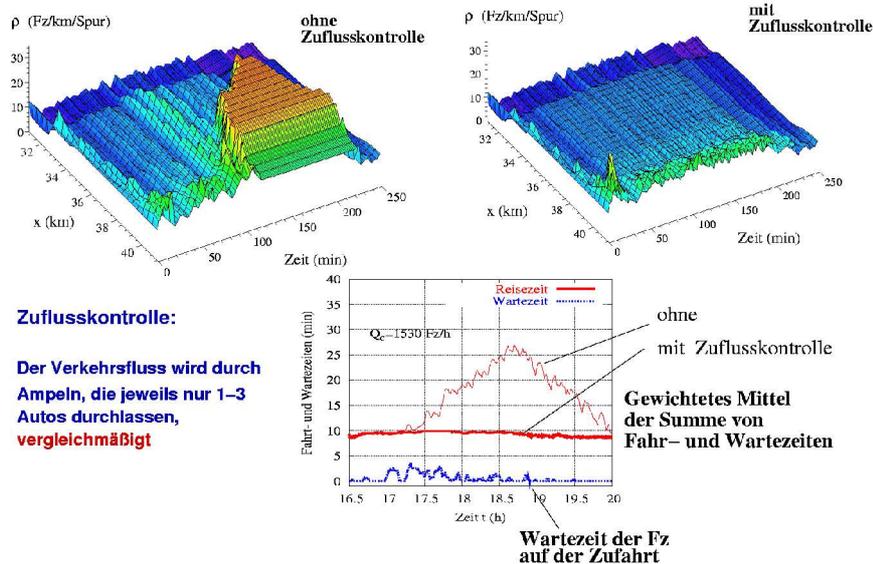
Ein Tempolimit im dichten Verkehr von beispielsweise 80 km/h (vgl. Abb. 2) paßt die Geschwindigkeiten der PKWs an die der LKWs an, so daß Geschwindigkeitsunterschiede innerhalb des Verkehrsstroms deutlich reduziert werden. Dadurch entfällt einerseits die Motivation für häufige Spurwechsel – die in jedem Fall eine Störung des Verkehrsflusses und damit eine mögliche Stauursache darstellen. Andererseits können die dennoch durchgeführten Spurwechsel vergleichsweise störungsarm durchgeführt werden, da die Notwendigkeit starker Beschleunigungs- oder Bremsmanöver entfällt. Dies ist vor allem bei Spurnzahl-Reduktionen im Vorfeld von Baustellen relevant. Als Ergebnis können Tempolimits Staus vermeiden, es gilt also hier das Prinzip „Langsamer ist schneller“! Die Erhöhung der Reisezeiten bei geringem Verkehrsaufkommen und der deutsche Grundsatz „Freie Fahrt für freie Bürger“ legt jedoch die Beschränkung auf Strecken und Zeiträume mit Gefahr von Verkehrszusammenbrüchen nahe. Dies setzt voraus, daß Tempolimits zur Verkehrsflussoptimierung nur gezielt bei hoher Verkehrsnachfrage, also verkehrsadaptiv, und vor Engstellen aktiviert werden. (Andere Gründe für Tempolimits wie Lärmschutz werden hier nicht diskutiert.) Während adaptive Tempolimits wegen teilweise unausgereifter Steuerungen anfangs Akzeptanzprobleme hatten, sind sie mittlerweile weit verbreitet und in Deutschland und anderen mitteleuropäischen Ländern akzeptiert.

Abbildung 2: Verkehrsverflüssigungseffekte durch harmonisierte Geschwindigkeiten

Eine weitere, vor allem in den USA häufig angewandte Strategie zur Stauvermeidung ist die Zufluß-Steuerung an Einfahrten von Fernstraßen („ramp metering“). Diese zielt auf eine Reduktion des Zuflusses bei starker Belastung der Hauptstrecke. Akzeptanzprobleme ergaben sich aber daraus, daß es nur schwer gelang, die Interessen von Lang- und Kurzstreckenpendlern auf faire Weise auszubalancieren. So hatten stadtnah wohnende Pendler zum Teil Probleme, in die Stadt zu

gelingen. Ein weiteres Problem ergab sich aus der unflexiblen, nur von der Tageszeit abhängigen Steuerung. Heutige Ansätze verfolgen eine andere Strategie. Sie koordinieren die Zuflüsse, anstatt sie zu kontrollieren. Das heißt konkret, daß Fahrzeuge dann in die Autobahn eingespeist werden, wenn Sensoren einen vorübergehend abgeschwächten Verkehrsfluß diagnostizieren, während die Einfahrt während Lastspitzen verzögert wird. Dadurch wird der Verkehrsfluß auf der Hauptstrecke geglättet, was seinerseits Verkehrszusammenbrüche verhindern kann. Abb. 3 illustriert dies für den Fall eines nachsimulierten realen Verkehrszusammenbruchs gegen 7:00 Uhr auf der Autobahn A5 (Abb. 3/links oben). Durch kurzfristiges Verzögern des Einfahrens von Fahrzeugen mittels „Pfortnerampeln“ läßt sich in einem Alternativszenario mit adaptiver Zuflußsteuerung der Zusammenbruch vermeiden (Abb. 3/rechts oben). In diesem Fall sind die resultierenden Fahrtzeiten unter Berücksichtigung der Wartezeiten an der Zufahrt nur unwesentlich erhöht, während sich bei einem Verkehrszusammenbruch die Fahrtzeiten mehr als verdoppeln (Abb. 3/untere Grafik).

Abbildung 3: Verkehrsverflüssigungseffekte durch Zuflußsteuerung



Wie bei adaptiven Tempolimits liegt das Optimierungspotenzial in einer flexibleren, IT-gestützten Steuerung des Verkehrs und der Berücksichtigung von nutzerorientierten Zielgrößen wie der Fahrtzeit. Diese beschreibt die Verkehrsqualität und die volkswirtschaftlichen Begleiterscheinungen wesentlich sensibler als die Straßenkapazität, die der Verkehrsplanung und dem klassischen Level-of-Service-Konzept heute zugrunde liegen.

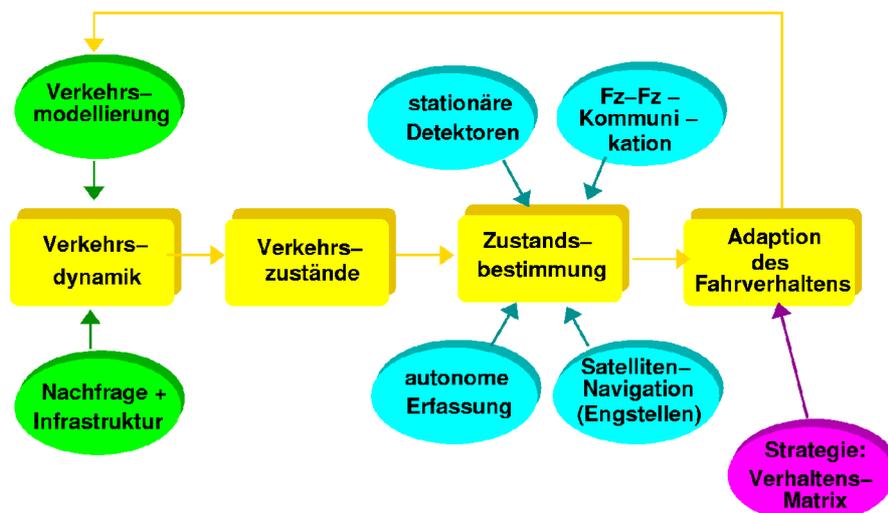
In den vergangenen Jahren hat sich die Entwicklung zunehmend auf die Nutzung der Möglichkeiten moderner Informationstechnologien (Internet, Handy, Floating Cars usw.) konzentriert. Fortgeschrittene Fahrerinformationssysteme wie Verkehrszustandsinformationen und -prognosen sowie individualisierte Routenwahlempfehlungen ermöglichen es den Straßenverkehrsteilnehmern zunehmend, ihre Routenwahl und die Startzeit ihrer Fahrt zu optimieren. Auch die Entwicklung von

Mautsystemen zur Erreichung einer systemoptimalen Nutzung vorhandener Infrastruktur verdient hier Erwähnung¹.

In den kommenden Jahren werden die neu verfügbaren Möglichkeiten der IuK-Technologie im Mittelpunkt stehen. Dies wird dazu führen, daß Fahrzeuge Funktionen der bordautonomen Verkehrsdatenerhebung und der computergestützten Informationsverarbeitung sowie Kommunikationsaufgaben als Sende-, Relais- und Empfangsstationen übernehmen werden. Damit führt die Verkehrstelematik der Zukunft weg von Verkehrszentralen zu lokalen Steuerungs- und Selbstregelungskonzepten nach dem Prinzip der „kollektiven Intelligenz“. So wird derzeit an Verfahren zur selbstorganisierten (dezentralen, autonomen, adaptiven und flexiblen) Steuerung von Straßennetzen durch Koordination zwischen benachbarten Ampeln gearbeitet, die zukünftig durch drahtlose Kommunikation miteinander in Kontakt stehen und zusätzlich mit billig verfügbar werdenden Meß-Sensoren ausgestattet sein werden.

Im Folgenden konzentrieren wir uns aber mit Blick auf den Verkehr im Jahre 2010 oder 2020 beispielhaft auf eine innovative Optimierungsmaßnahme, die auf einer Verknüpfung der Fahrzeug-, Verkehrs- und Kommunikationstechnik beruht.

Abbildung 4: Dezentrale Selbstregelung von Verkehr

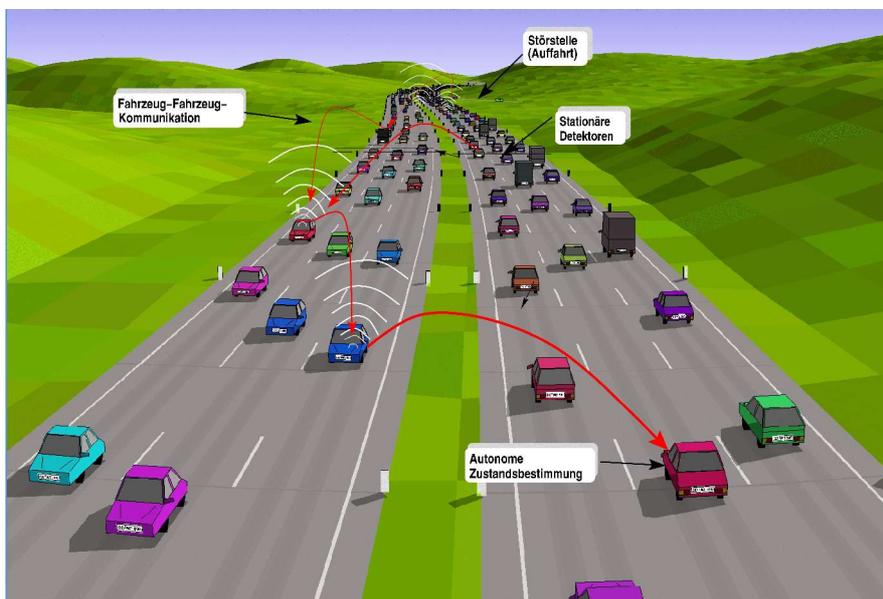


Sie verbindet in innovativer Weise die Erhöhung des Fahrkomforts und der Verkehrssicherheit mit verkehrlichen Wirkungen wie der Stabilisierung des Verkehrsflusses und der Steigerung der effektiven Kapazität von Straßen an Bottlenecks (Engpässen). Das Flußdiagramm (Abb. 4) erläutert die einzelnen Komponenten:

- Die fahrzeugseitige Komponente stellt dabei ein adaptiver Temporegler dar. Solche, auch *Adaptive Cruise Control* (ACC) genannten Fahrerassistenzsysteme übernehmen die Längsregelung, d.h. sie beschleunigen und bremsen das Fahrzeug selbstständig in Abhängigkeit vom Abstand zum Vorderfahrzeug und von der eigenen Geschwindigkeit und der des Vorderfahrzeuges. Solche Systeme werden in Oberklassefahrzeugen bereits angeboten.

¹ [vgl. dazu Beitrag Krank, bes. S. ff.](#)

- Die informationstechnische Komponente besteht in der automatischen Erfassung des aktuellen und des voraus liegenden Verkehrszustandes. Dies geschieht durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation sowie anschließende Analyse und Fusion mehrerer Datenquellen:
- von bordautonomen Daten, d.h. Zeitreihen der eigenen Geschwindigkeit sowie der vom ACC-Sensor bereitgestellten Information über Abstand vom und Geschwindigkeit zum Vorderfahrzeug,
- von Informationen über die Position verkehrlich relevanter Engpässe auf der Basis von GPS- und digitalen Karten-Daten²,
- von Verkehrsdaten in der Nähe liegender Detektoren,



und schließlich von per Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation empfangenen Daten von anderen, mit kompatiblen Systemen ausgestatteten „mitschwimmenden“ Fahrzeugen („floating cars“).

Abbildung 5: Start-Szenario für dezentrale Selbstregelung von Verkehr durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation

- Schließlich besteht die verkehrliche Komponente des Systems in einer automatischen und verkehrsadaptiven Anpassung des „Fahrstils“, d.h. der Parameter des ACC-Systems. In einem konkreten, im Rahmen der BMBF-Initiative INVENT erstellten Machbarkeitsstudie wird dabei der ACC-Regler durch komfort- und sicherheitsrelevante Verhaltensparameter beschrieben, die in Abhängigkeit von verschiedenen diskreten Verkehrszuständen wie „freier Verkehr“, „Annähern an einen Stau“, „Verlassen eines Staus“ sowie „Passage einer Engstelle“ angepaßt werden. Eine der wichtigsten Ergebnisse der Opti-

² _____ da hier fahrzeugeitige Einrichtungen gemeint sind, gilt das gleiche wie für [die GraphikAbb. 4](#)

mierung dieser „Strategiematrix“ ist die kapazitätssteigernde Wirkung von erhöhten Beschleunigungen bei der Ausfahrt aus dem Stau und beim Verlassen von Engstellen sowie eine – unter Berücksichtigung der Verkehrssicherheit – sinnvoll verkürzte Zeitlücke bei der Passage von nicht zu langen Engstellen.

Zur Kommunikation der Informationen von anderen ausgestatteten Fahrzeugen oder stationären Datenquellen wird derzeit ein auf der Wireless Local-Area Network-Technik (WLAN) basierendes Ad-Hoc-Netzwerk getestet. Zur effektiven Kommunikation auch bei sehr kurzen Reichweiten (von der Größenordnung < 100 m) erweist sich dabei wegen der anfänglich geringen Ausstattungsgrade die Informationsübertragung über die Gegenfahrbahn als effektive Lösung.

Dabei wird die Nachricht (vgl. Abb. 5) zunächst an ein ausgestattetes Fahrzeug auf der Gegenfahrbahn übertragen und von diesem nach einiger Zeit – wenn die Information für Fahrzeuge in der ursprünglichen Richtung verkehrlich relevant geworden ist – auf Fahrzeuge in dieser Richtung zurück übertragen. Jedes ausgestattete Fahrzeug kann also gleichzeitig als Sender, Sendbote und Empfänger von ereignisgesteuert generierten Nachrichten fungieren. Die daraus resultierende Informationsverarbeitung und Komplexität stellt eine Herausforderung für die Zukunft dar.

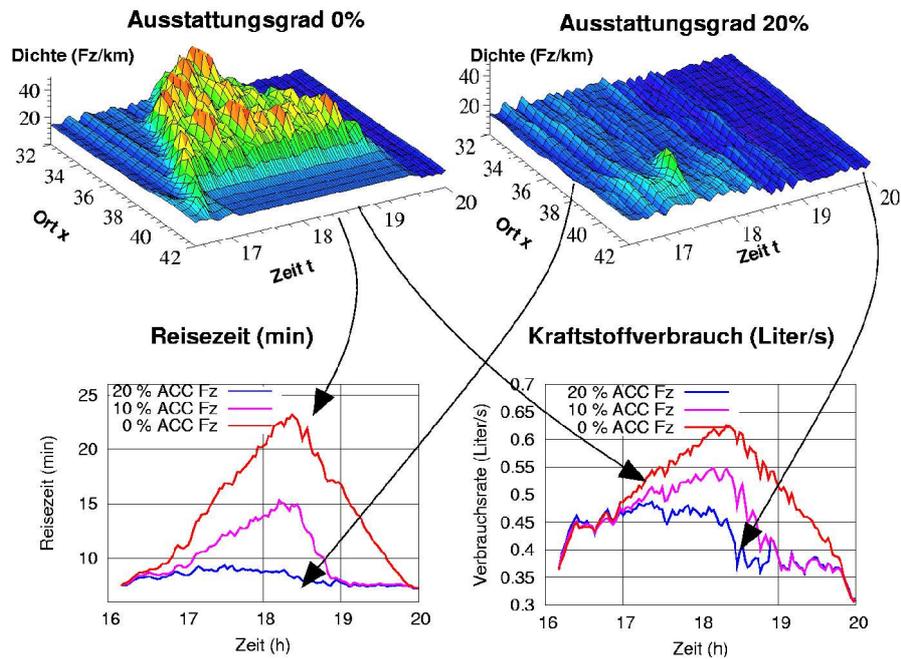
Eine integrierte Verkehrs-Simulation aller Komponenten im Zusammenspiel ergibt für dieses System bereits bei einem Ausstattungsgrad von wenigen Prozent eine funktionierende Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Ferner zeigt sich bereits bei einem Ausstattungsgrad von 10% eine deutliche verkehrliche Wirkung, während bei 20% ein typischer heutiger Stau (helle, gelbe und rote Bereiche in der linken 3D-Grafik/Abb. 6) gänzlich vermieden werden kann (s. Abb. 6/rechte 3D-Grafik). Insbesondere wird bereits bei 10% Ausstattungsgrad die Gesamtzunahme der Reisezeit (Abb. 6/Fläche zwischen der roten und blauen bzw. zwischen der violetten und blauen Kurve/Teilgrafik links unten) mehr als halbiert, was für alle betroffenen Fahrzeuge auf dem dargestellten Streckenstück einer Gesamtersparnis von 500 Stautunden pro Tag entspricht. Ferner werden in diesem Streckenabschnitt bereits bei 10% Ausstattungsgrad in jeder Stunde bis zu 360 Liter Kraftstoff eingespart.

.5 Diskussion und Bewertung.

In diesem Beitrag wurde anhand von konkreten Beispielen das Optimierungspotenzial aufgezeigt, welches eine Integration der heute noch weitgehend getrennt gesehenen Komponenten der Fahrzeug-, Verkehrs-, Informations- und Kommunikationstechnik zu einer einheitlichen Verkehrsoptimierungsstrategie verspricht. Neben den technologischen Herausforderungen dieser Vision, deren Realisierbarkeit in Machbarkeitsstudien bereits nachgewiesen werden konnte, gibt es jedoch auch legislative und rechtliche Aspekte, die noch geklärt werden müssen. Insbesondere ist bei ACC³-Systemen – im Gegensatz etwa zu anderen Assistenzsystemen wie ABS oder ESP – stets der Fahrer die letzte Instanz und muß im Fehlerfall jederzeit die Kontrolle übernehmen.

Abbildung 6: Verkehrsflüsseffekte durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation

³ [Adaptive Temporegelung \(Adaptive Cruise Control\)](#)



Auch bei anderen Aspekten kollidiert die Verkehrsflussoptimierung mit der aktuellen Gesetzeslage. Zum Beispiel sind für Pflötnerrampeln zur Zufluß-Steuerung vorschriftswidrig kurze Grünzeiten (bis zu 2 s) notwendig, um in einer Grünphase nur ein Fahrzeug passieren lassen zu können.

Ein anderer Aspekt betrifft den LKW-Verkehr, der bei der Stauentstehung aufgrund seines wachsenden Umfangs eine immer wichtigere Rolle spielt. Simulationen zeigen, daß ein LKW-Überholverbot zusammen mit einer vorgeschriebenen Mindestgeschwindigkeit ein überragendes Verbesserungspotential zeigt. Auch eine generelle Erhöhung des Tempolimits für LKW wirkt in der Regel kapazitätssteigernd.

Von verkehrspolitisch überragender Bedeutung ist jedoch, daß die kritische Schwelle für erhebliche Verbesserungen des Verkehrsflusses nicht besonders hoch ist. Staubedingte Reisezeitverzögerungen lassen sich mehr als halbieren, wenn 10 % der Fahrzeuge an einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation teilnehmen. Und bereits bei einem Ausstattungsgrad von 20 % sind Staus gänzlich vermeidbar.

