

Flusssteuerung im Straßenverkehr

Mobilität und Verkehr bilden einen wichtigen Eckpfeiler unserer Gesellschaft. Die zunehmende örtliche Differenzierung der sozialen Funktionen Wohnen, Arbeit, Freizeit und Reisen haben zu einer starken Zunahme des Individualverkehrs geführt. Deutschland ist aufgrund seiner zentralen Lage in Europa ein bedeutender Verkehrsknotenpunkt. Die Osterweiterung der EU, die Globalisierung und eine zunehmend arbeitsteilige Wirtschaft werden auch in Zukunft zu einem verstärkten Anwachsen von Personen- und Güterverkehr führen. Abbildung 6.1 gibt einen Überblick über die Straßenbelastung auf den Autobahnen in Deutschland. Die Abbildung zeigt die Jahresfahrleistung in Milliarden km in Deutschland für den Zeitraum von 1975 bis 2004. Die jährliche Fahrleistung ist durch einen fortschreitenden starken Zuwachs geprägt, der sich tendenziell weiter fortsetzt. Im genannten Zeitraum hat sich die Jahresfahrleistung ungefähr vervierfacht. Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV), welche die durchschnittliche Anzahl an Fahrzeugen angibt, die in 24 Stunden einen Autobahnabschnitt befahren, hat sich in den etwa 30 betrachteten Jahren zwischen 1975 und 2004 von ca. 25.000 KFZ/24h auf ca. 50.000 KFZ/24h verdoppelt.

Ein der gestiegenen Jahresfahrleistung entsprechender Ausbau des Straßennetzes ist aus ökologischen und finanziellen Gründen aber nur eingeschränkt möglich. Der Ausbau des Autobahnnetzes von ca. 6000 km im Jahr 1975 auf ca. 12000 km im Jahr 2004 ist ebenfalls in Abbildung 6.1 dargestellt.

Einhergehend mit der oben aufgezeigten Entwicklung entstehen immer häufiger kilometerlange Staus auf Autobahnen, woraus sich die Notwendigkeit einer Verbesserung des Verkehrsablaufs ergibt.

Mit Hilfe von Verkehrsmodellen lassen sich Auswirkungen von Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen und Fahrerassistenzsystemen in der Simulation darstellen. Des Weiteren lassen sich auf Basis dieser Verkehrsmodelle Vorhersagen und Vergleiche für unterschiedliche Varianten von Infrastrukturerweiterun-

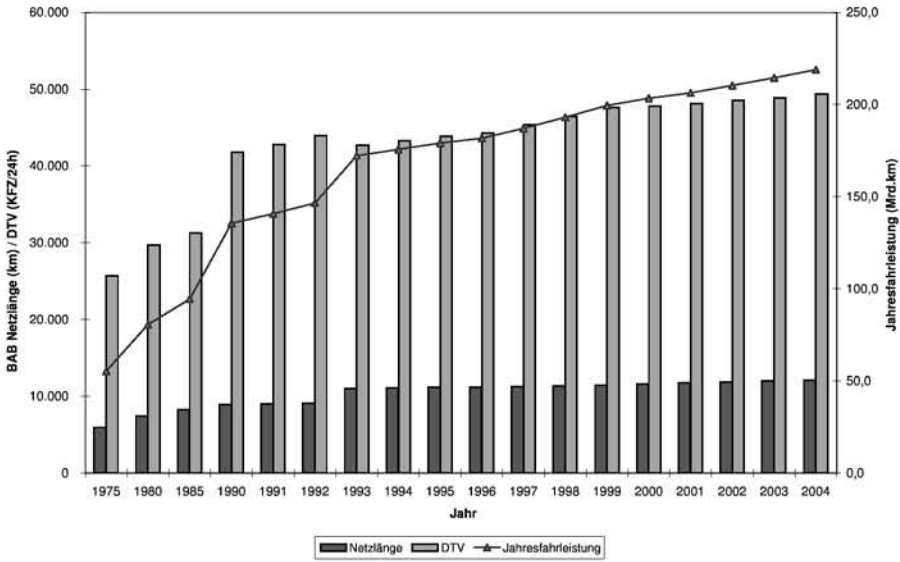


Abb. 6.1. Straßenbelastung - Kraftfahrzeugverkehr auf Autobahnen (DTV = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in KFZ je 24h; bis 1992 alte Bundesländer)
Quelle: (VerkehrInZahlen 2006)

gen und -veränderungen ableiten. Allgemein erlauben Verkehrsmodelle eine Beurteilung der Qualität, der Leistungsfähigkeit und der Sicherheit des Verkehrsablaufs. Für die Optimierung des Verkehrsablaufs ergibt sich somit ein Bedarf an verlässlichen Verkehrsmodellen.

Dieses Kapitel gibt eine Einführung in Konzepte zur Verkehrsflusssteuerung. Hierzu wird in Abschnitt 6.1 die allgemeine Zielsetzung der Regelungs- und Steuerungsaufgabe des Fahrers, die gegebenenfalls von Assistenzsystemen übernommen werden kann, beschrieben. Der anschließende Abschnitt 6.2 behandelt die mikroskopische Modellbildung des Verkehrsflusses mit der menschlichen und technisch unterstützten Regelung. Im Gegensatz zur Einzelfahrzeugbetrachtung der mikroskopischen Modelle werden in Abschnitt 6.3 Fahrzeugkollektive in makroskopischen Verkehrsmodellen betrachtet. Hier werden auch die wichtigsten Größen zur Beschreibung des Verkehrsflusses eingeführt. Abschließend werden in Abschnitt 6.4 aktuelle Konzepte zur Verkehrsflusssteuerung vorgestellt.

6.1 Zielsetzung der Regelungs- und Steuerungsaufgabe

Die Ziele der Verkehrsleittechnik wurden bereits allgemein in Abschnitt 2.4.2 beschrieben. Als Zielsetzung der Flusssteuerung des Straßenverkehrs ist ein

sicherer und effektiver fließender Verkehr zu formulieren. Als mögliche Gütekriterien lassen sich der Durchsatz der Fahrzeuge, der Komfort der Passagiere oder auch der Kraftstoffverbrauch bzw. die damit verbundenen Emissionen identifizieren. Die sich daraus ergebenden Optimierungsprobleme müssen getrennt für die individuelle Fahrzeugregelung und für die kollektive Fahrzeugbewegung betrachtet werden. Die relevanten Optimierungskriterien sind in Tabelle 6.1 dargestellt (SCHNIEDER 2004).

Tabelle 6.1. Optimierungskriterien für die individuelle und kollektive Fahrzeugbewegung

Gütekriterium	Individualbetrachtung	Kollektivbetrachtung
Reisezeit	$\int_{s_0}^{s_{Ziel}} dt \rightarrow \min$	Verkehrsverfügbarkeit
Komfort	$\int_{s_0}^{s_{Ziel}} a^2 dt \rightarrow \min$	Gleichmäßigkeit
Verbrauch (Emission)	$\int_{s_0}^{s_{Ziel}} P dt \rightarrow \min$	Kraftstoffverbrauch der Flotte

Verkehr ermöglicht den Transport, also die Änderung des Aufenthaltsortes, von Menschen und Gütern. Für den Kraftfahrzeugverkehr ergibt sich für den Fahrzeugführer eine Fahrzeugführungsaufgabe, die traditionell in drei hierarchischen Ebenen aufgeteilt werden kann. Die Regelungsaufgabe teilt sich dabei in die Navigationsebene, die Bahnführungsebene und die Stabilisierungsebene (WILTSCHKO 2004, WITTE 1996, RISSE 1991). Diese funktionale Strukturierung ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

- *Navigationsebene:* Aufgrund des Wunsches von einem Ort s_0 zu einem Ort s_{Ziel} im Straßenverkehrsnetz zu gelangen, findet meist vor Fahrtantritt eine Routenwahl in der Navigationsebene statt. Das Straßennetz und der Verkehrszustand sind in diesem Fall beeinflussende Umgebungen. Bei wiederkehrenden Fahrten findet diese explizite Auswahl meistens nicht (mehr) statt. Aufgrund von Unfällen oder Baustellen kann es jedoch notwendig sein, dass während der Fahrt eine neue Routenwahl notwendig ist. Die Auswahl findet aufgrund vorhandenen Wissens des Fahrers statt. Unterstützt wird der Fahrer hierbei durch die bereits verbreiteten Navigationssysteme (vgl. Abschnitt 12.3.5).
- *Bahnführungsebene:* Die nächste Ebene beschreibt die Bahnführung, d. h. die Quer- und Längsführung des Fahrzeuges. Aufgrund von Verkehrsregeln, des lokalen Verkehrszustandes und des Straßenverlaufs steuert der Fahrer basierend auf seiner Wahrnehmung und vorhandener Erfahrungswerte sein Fahrzeug. Dieses Verhalten kann als regelbasiert bezeichnet werden. Ein weit verbreitetes Assistenzsystem, welches den Fahrer auf dieser

Ebene unterstützt, ist das Adaptive Cruise Control (ACC), welches unter Berücksichtigung des Abstandes zu einem vorausfahrenden Fahrzeug eine vorgegebene Wunschgeschwindigkeit innerhalb systembedingter Grenzen einhält. Viele Assistenzsysteme dieser Ebene sind Komfortsysteme, die dem Fahrer die Fahrt erleichtern (vgl. Abschnitt 3.3.2).

- *Stabilisierungsebene:* Aufgrund des aktuellen Fahrzeugzustandes ist ein stabilisierender Eingriff des Fahrzeugführers notwendig, um die Fahrbewegung sicher und komfortabel durchzuführen. Die Stabilisierungsebene wird vom Fahrer durch fertigkeitstbasiertes, reflexartiges Handeln beherrscht. Als Stellglieder stehen ihm hierzu Gaspedal, Bremse, Gangwahl und Lenkrad zur Verfügung. In diesem Bereich in Serie befindliche Fahrerassistenzsysteme sind sicherheitsrelevante Systeme, wie z. B. das Antiblockiersystem (ABS), die Antischlupfregelung (ASR) oder das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP). Diesen ist es teilweise vorbehalten, Stellglieder auf eine Art und Weise zu beeinflussen, die dem Fahrer nicht möglich ist. So gibt es z. B. Fahrerassistenzsysteme, die die Bremse für jedes Rad einzeln beeinflussen können.

Eine detailliertere Einordnung und der Einfluss des Einsatzes von Fahrerassistenzsystemen auf den Verkehrsfluss werden in Abschnitt 6.2.5 betrachtet.

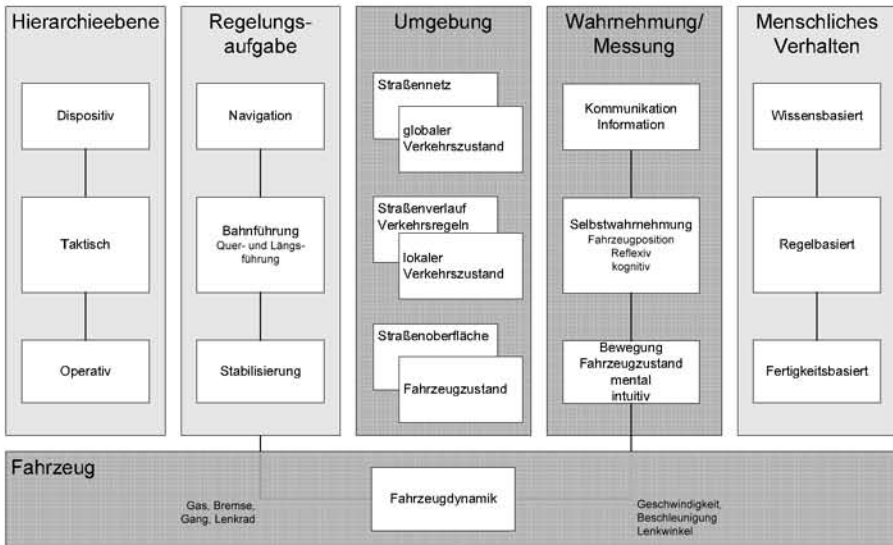


Abb. 6.2. Ebenen der Fahraufgabe, nach (WITTE 1996)

6.2 Mikroskopische Verkehrsmodelle

Bei der Modellierung des Verkehrsablaufs lassen sich im Wesentlichen die zwei Kategorien mikroskopische und makroskopische Modelle unterscheiden. Während bei der mikroskopischen Modellierung das Verhalten einzelner Fahrzeuge und Fahrzeugführer modelliert wird, werden bei den makroskopischen Modellen ausschließlich aggregierte Kenngrößen wie Verkehrsdichte oder mittlere Geschwindigkeit modelliert.

In diesem Abschnitt werden ausschließlich die mikroskopischen Modelle behandelt, welche sich aufgrund der Einzelfahrzeugbetrachtung bevorzugt für die Untersuchung der Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen eignen.

Im Abschnitt 6.3 wird dann auf die makroskopischen Verkehrsmodelle eingegangen. Diese Modelle eignen sich ebenso wie die mikroskopischen Modelle zur Untersuchung von Verkehrsbeeinflussungssystemen.

Zusätzlich zu den zwei genannten und hier behandelten Modellarten gibt es noch Mischformen, die mesoskopischen Modelle, oder Verfeinerungen der mikroskopischen Modelle, die nanoskopischen Modelle.

6.2.1 Grundlagen der mikroskopischen Modellbildung

Betrachtet man den Fahrzustand mikroskopisch gehören dazu mindestens die Position des Fahrzeugs auf der Straße, der Geschwindigkeitsvektor, sowie der Beschleunigungsvektor und deren zeitlicher Verlauf. In der Realität wird dieser Fahrzustand vom Menschen geregelt. Einflussparameter sind abhängig u. a. vom Fahrer selbst, vom Fahrzeugtyp, von den Fahrzuständen der anderen Verkehrsteilnehmer sowie von den Randbedingungen der Infrastruktur, wie z. B. Straßenart, Geschwindigkeitsbeschränkung oder Beschaffenheit der Straßenoberfläche. Besondere Bedeutung kommt der Reaktion des Fahrzeugführers auf das Fahrverhalten der anderen Fahrzeuge zu, insbesondere des vorausfahrenden Fahrzeugs. Zur Modellierung des menschlichen Fahrerverhaltens hat sich eine Vielzahl z. T. unterschiedlicher Modelle etabliert (RISSE 1991, CHEN 1992).

6.2.2 Fahrzeugfolgemodelle

Ein sehr einfaches mikroskopisches Modell ist die menschliche Regelung der Geschwindigkeit als Funktion der Fahrzeugabstände zwischen zwei Fahrzeugen i und $i-1$. Die Fahrzeugeigenschaften, wie z. B. eine Begrenzung von Beschleunigung und Verzögerung, werden in diesem Beispiel (Gleichung 6.1) nicht berücksichtigt. Die Beschreibung dieser Interaktion zwischen Fahrzeugen findet

sich in der Literatur auch unter den Begriffen „Fahrzeugfolgetheorie“ oder „car-following-theory“.

$$v_i(t) = F(s_{i-1}(t) - s_i(t)) = F(\Delta s_{i-1,i}(t)) \quad (6.1)$$

Aus (6.1) folgt durch Differenzieren:

$$\dot{v}_i(t) = F'(s_{i-1}(t) - s_i(t)) \cdot (v_{i-1}(t) - v_i(t)) = F'(\Delta s_{i-1,i}(t)) \cdot \Delta v_{i-1,i}(t) \quad (6.2)$$

Setzt man die Funktion $F'(\Delta s_{i-1,i}(t))$ als konstant zu λ mit der Dimension s^{-1} an, erhält man:

$$\dot{v}_i(t) = \lambda \cdot (v_{i-1}(t) - v_i(t)) = \lambda \cdot \Delta v_{i-1,i}(t) \quad (6.3)$$

Dabei beschreibt λ die Sensitivität des Fahrers auf Geschwindigkeitsdifferenzen zu reagieren. Damit ergibt sich die Regelung der Beschleunigung bzw. Verzögerung des Folgefahrzeuges als Funktion der Differenzgeschwindigkeit zwischen Führungsfahrzeug und Folgefahrzeug. Diese Art der Abstandshaltung wird auch als Fahren im relativen Bremswegabstand bezeichnet und in Abschnitt 7.3.3 im Vergleich zu Abstandshalteverfahren des Schienenverkehrs diskutiert. Die Gleichung (6.3) wurde bereits Anfang der 50er Jahre von Reuschel (REUSCHEL 1950) und Pipes (PIPES 1953) veröffentlicht und von Chandler, Herman und Montroll (CHANDLER et al. 1958) erweitert. Die Erweiterung bezieht sich hierbei auf die Hinzunahme einer zeitlichen Verzögerung durch die Reaktionszeit τ des Fahrers. Damit wird (6.3) zu:

$$\dot{v}_i(t) = \lambda \cdot (v_{i-1}(t - \tau) - v_i(t - \tau)) = \lambda \cdot \Delta v_{i-1,i}(t - \tau) \quad (6.4)$$

Es ergibt sich eine Aktion des Fahrers, die von der Sensitivität und dem Stimulus, im vorliegenden Fall der Geschwindigkeitsdifferenz, abhängig ist. In allgemeiner Form kann damit das Verhalten eines Fahrers mit Hilfe der Gleichung

$$\text{Aktion} = \text{Sensitivität} \cdot \text{Stimulus}$$

beschrieben werden (GABARD 1991).

Erste Stabilitätsuntersuchungen der menschlichen Abstandsregelung wurden bereits Ende der 50er Jahre durchgeführt (HERMAN et al. 1959). Abbildung 6.3 zeigt das zuvor beschriebene Modell für die menschliche Abstandsregelung zweier Fahrzeuge hinter einem Führungsfahrzeug. Die zugehörige Übertragungsfunktion für den offenen Kreis für ein Fahrzeug i bzw. einen Fahrzeugführer i lautet:

$$G_{oi}(s) = \lambda_i \cdot e^{-\tau_i s} \cdot \frac{1}{s} \quad (6.5)$$

Mit Hilfe der komplexen Übertragungsfunktion (6.5) des offenen Regelkreises kann anhand des Nyquist Kriteriums (LEONHARD 1992, LUTZ und WENDT

2003) leicht die Stabilität beurteilt werden. Für den Frequenzgang nach (6.5) erhält man

$$G_{oi}(jw) = \lambda_i \cdot e^{-jw\tau_i} \cdot \frac{1}{jw} = \frac{\lambda_i}{w} \cdot e^{-j(w\tau_i + \frac{\pi}{2})} \quad (6.6)$$

mit der Ortskurve in Abbildung 6.4 in der komplexen Ebene. Instabilität ergibt sich, wenn die infolge des Laufzeitverhaltens spiralförmige Ortskurve die negativ reelle Achse bei oder unterhalb von -1 schneidet, d. h.

$$|G_{oi}(jw)| = \frac{\lambda_i}{w} \leq -1 \quad (6.7)$$

$$\arg(G_{oi}(jw)) = -(w\tau_i + \frac{\pi}{2}) = -\pi \rightarrow w\tau_i = \frac{\pi}{2} \quad (6.8)$$

Daraus ergibt sich die Stabilitätsbedingung

$$k_i = \lambda_i \cdot \tau_i \leq \frac{\pi}{2} \quad (6.9)$$

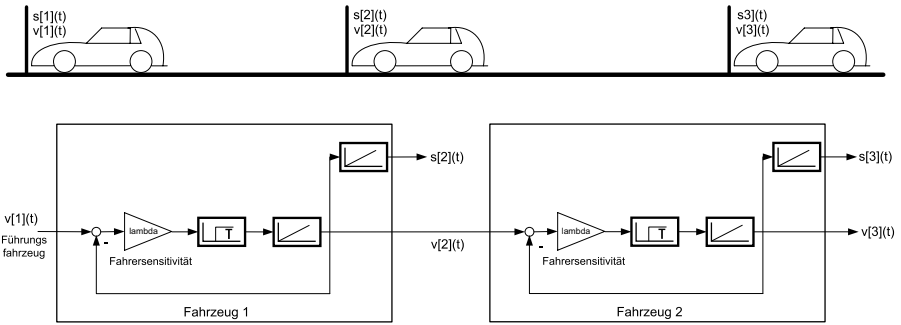


Abb. 6.3. Menschliche Regelung der Fahrzeugabstände

Die Stabilitätsbedingung (Gleichung 6.9) gilt nur für eine Folgefahrt mit einem nachfolgendem Fahrzeug. In einer Fahrzeugkolonne mit mehr als zwei Fahrzeugen kann dieses Verhalten aber langfristig auch zur Instabilität führen. Kolonnenstabil heißt ein Folgevorgang, wenn die Verstärkung von Fahrzeug zu Fahrzeug in der Kolonne stets jeweils gleich oder kleiner als 1 ist (KÖHLER 1974). Hierzu wird die Übertragungsfunktion von der Geschwindigkeit des Folgefahrzeuges zur Geschwindigkeit des Führungsfahrzeuges für den geschlossenen Regelkreis untersucht (mit $\lambda_i = \text{const}$, $\tau_i = \text{const}$):

$$|G(jw)| = \left| \frac{G_0(jw)}{1 + G_0(jw)} \right| \leq 1 \quad (6.10)$$

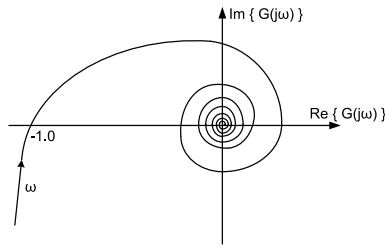


Abb. 6.4. Ortskurve der Frequenzgangsfunktion für den offenen Regelkreis mit Integral-Regler

Die Stabilität hierfür ist gegeben durch (STROBEL 2001)

$$k = \lambda \cdot \tau \leq \frac{1}{2} \quad (6.11)$$

Empirisch gewonnene Werte für die menschliche Regelung liegen gerundet bei

$$1,00 \text{ s} \leq \tau \leq 2,20 \text{ s}; \quad 0,17 \text{ s}^{-1} \leq \lambda \leq 0,74 \text{ s}^{-1}; \quad 0,18 \leq k \leq 1,04$$

und damit unter anderem auch im instabilen Bereich. Mögliche Auswirkungen sind anhand eines Beispiels im Folgenden beschrieben.

In Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6 sind die Fahrzeugpositionen und -abstände sowie die Fahrzeuggeschwindigkeiten und -differenzgeschwindigkeiten für eine Fahrzeugkolonne, die einem Führungsfahrzeug folgen für unterschiedliche Reaktionszeiten τ dargestellt. Das Führungsfahrzeug und alle Folgefahrzeuge fahren mit einer Geschwindigkeit von 72 km/h. Die Abstände der Fahrzeuge untereinander zum Anfangszeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ wurden vorgegeben und variieren zwischen 30 m und 40 m. Dies entspricht in etwa der Vorgabe „Abstand gleich halber Tacho“. Das Führungsfahrzeug leitet z. B. infolge eines vor ihm einscherenden Fahrzeuges nach zehn Sekunden ein Bremsmanöver ein und verzögert mit 2 m/s^2 . Abbildung 6.5 stellt den Fall dar, dass die Reaktionszeit aller Fahrer 1 s und die Sensitivität $0,4 \text{ s}^{-1}$ beträgt. Die Abstände zwischen den Fahrzeugen verringern sich zwar während des Bremsmanövers; zur Kollision kommt es aber nicht. Die neue Führungsgeschwindigkeit von 40 km/h wird von den Folgefahrzeugen nach kurzer Zeit mit vernachlässigbaren in der Abbildung nicht zu erkennenden Über- bzw. Unterschwingen erreicht.

Anders stellt sich die Situation dar, wenn sich die Reaktionszeit aller Fahrer von 1 s auf 1,5 s erhöht. Für diesen Fall ist $k > 0,5$. Abbildung 6.6 zeigt, dass es zur Kollision zwischen Fahrzeug 4 und 5 kommt, die bereits vor dem Bremsmanöver in sehr geringem Abstand hintereinander herfahren.

Die Weiterentwicklung der Gleichung (6.4) durch Gazis, Herman und Rothery führte zur nachstehenden Gleichung (GAZIS et al. 1961).

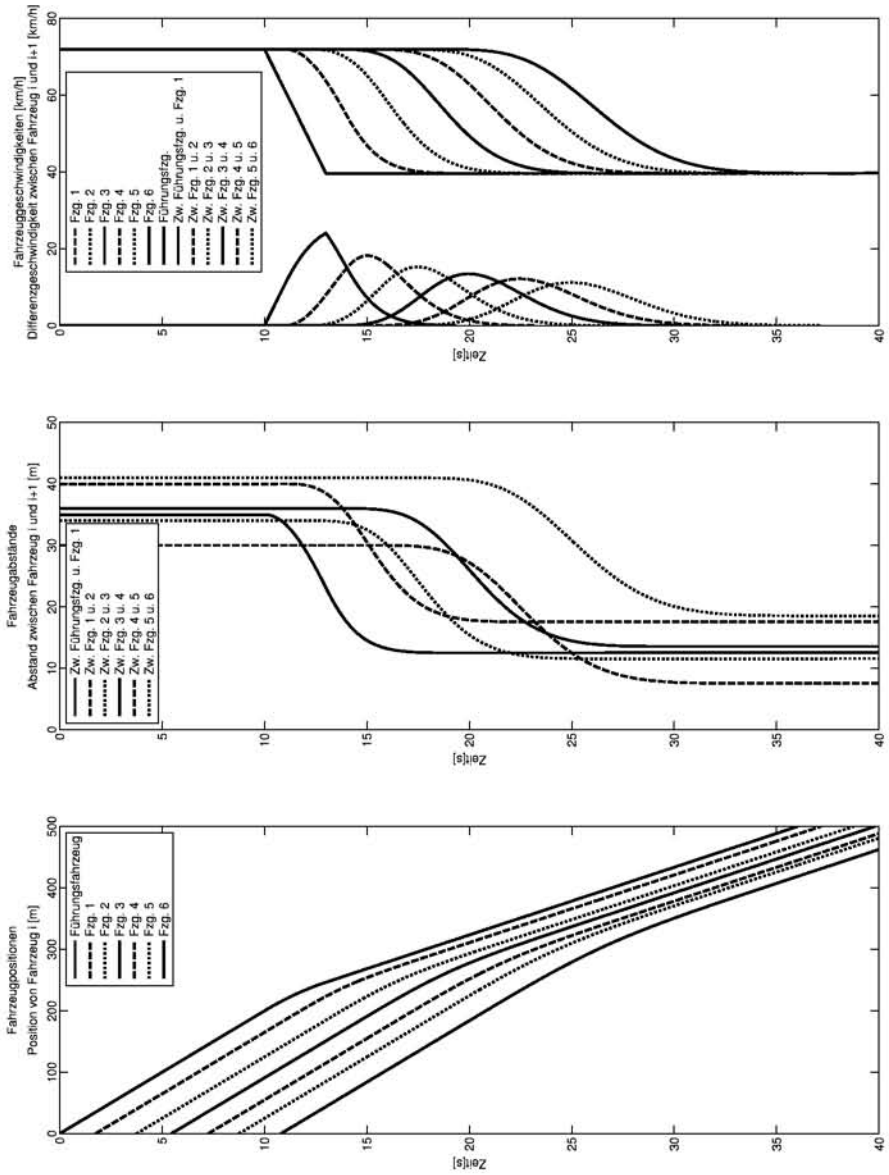


Abb. 6.5. Fahrzeugpositionen, -abstände, -geschwindigkeiten und -differenzgeschwindigkeiten für eine Reaktionszeit von 1 Sekunde

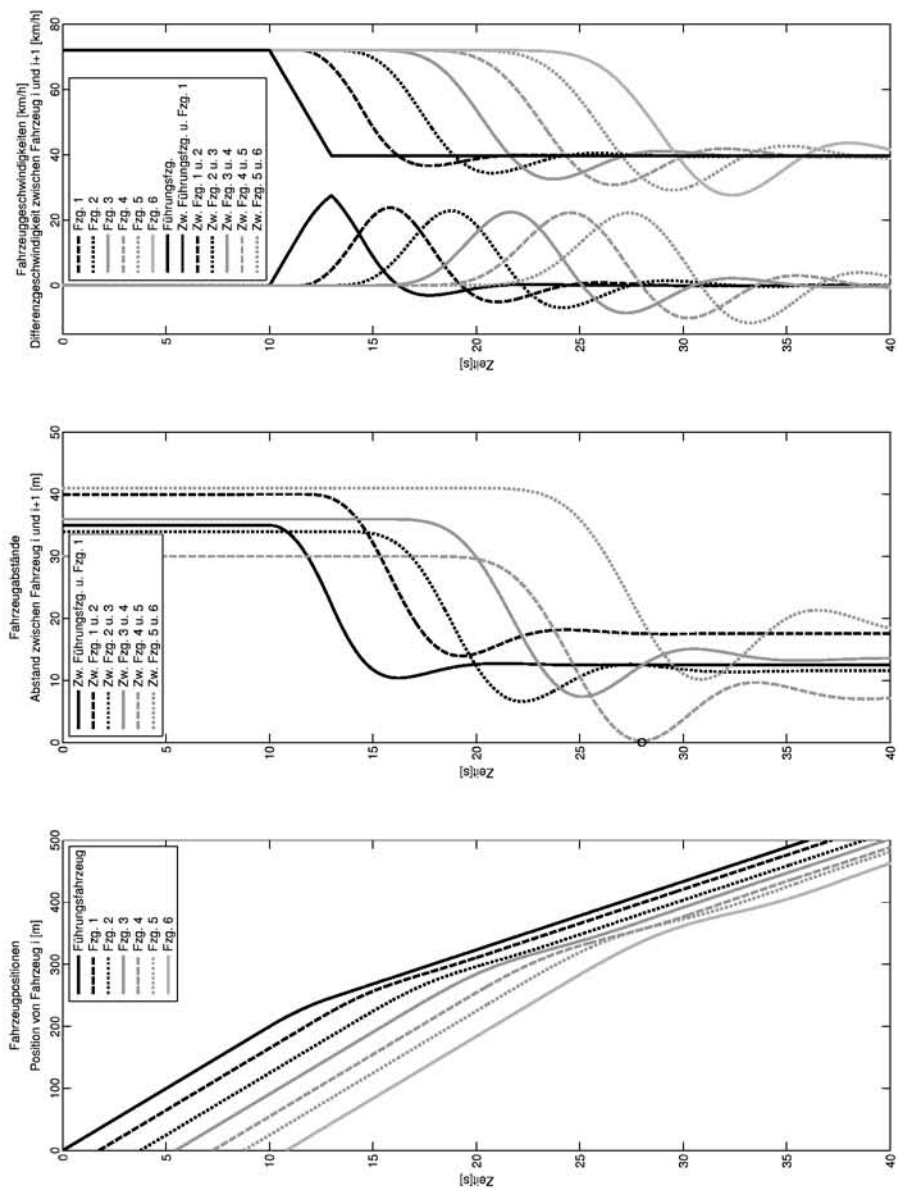


Abb. 6.6. Fahrzeugpositionen, -abstände, -geschwindigkeiten und -differenzgeschwindigkeiten für eine Reaktionszeit von 1,5 Sekunden

$$\dot{v}_i(t) = \frac{\lambda_0 [v_i(t)]^m}{[\Delta s_{i-1,i}(t - \tau)]^l} \cdot \Delta v_{i-1,i}(t - \tau) \quad (6.12)$$

m und l sind dabei empirisch durch Verkehrsbeobachtung zu bestimmende Parameter. Hierbei wird die Geschwindigkeitsänderung nicht nur von der Differenzgeschwindigkeit und der Sensitivität des Fahrers sondern zusätzlich vom Abstand zum Führungsfahrzeug und von der eigenen Geschwindigkeit bestimmt. Werden m und l zu Null gesetzt, ergibt sich die zuvor betrachtete Gleichung 6.3.

6.2.3 Verfeinerung der mikroskopischen Modellierung

Bei den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Modellen bleiben viele Aspekte des realen Verkehrs unberücksichtigt. Überholvorgänge, sowie durch das Fahrzeug maximal realisierbare Beschleunigungen und Verzögerungen sind nicht dargestellt.

Des Weiteren wurde bisher davon ausgegangen, dass ein Fahrer zum einen auch sehr kleine Geschwindigkeitsdifferenzen zum vorausfahrenden Fahrzeug wahrnimmt und darauf reagiert und zum anderen dies auch bei sehr großen Abständen zum Vordermann gilt. Untersuchungen haben aber gezeigt, dass Fahrer nur begrenzt auf externe Stimuli reagieren. Diese die Fahrzeugführung beeinflussende *Wahrnehmungsschwelle* des Fahrers ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Im Fall von sehr großen Fahrzeugabständen Δs wird der Fahrer durch Geschwindigkeitsunterschiede Δv zum vorausfahrenden Fahrzeug nicht beeinflusst. Dieser Bereich ist in der Abbildung als „Bereich ohne Reaktion“ gekennzeichnet. Mit Verringerung des Abstandes wird der Fahrer sensibler für Geschwindigkeitsunterschiede. Die „Bereiche mit Reaktion“ sind ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Das Verhalten ist in der Abbildung anhand einer Beispieltrajektorie visualisiert. Im Beispiel fährt das Folgefahrzeug um Δv schneller als das Führungsfahrzeug, sodass sich der Abstand Δs verringert. Der Fahrer erkennt unterhalb der Wahrnehmungsschwelle den Geschwindigkeitsunterschied, sodass er seine Geschwindigkeit verringert und Δv wiederum kleiner wird und der Abstand etwa konstant bleibt. Da es dem Fahrer nicht gelingt $\Delta v = 0$ einzuhalten, vergrößert sich für $\Delta v < 0$ der Abstand wieder, was zur Folge hat, dass der Fahrer wieder beschleunigt.

Die Wahrnehmungsschwelle des Fahrers kann nicht als fester Wert angenommen werden. Es muss vielmehr ein Übergangsbereich berücksichtigt werden, durch welchen es zu Oszillationen bei der Abstands- und Geschwindigkeitsanpassung kommen kann. Eine regelungstechnische Deutung ist mit Hystereseeffekten möglich, die zu Grenzyklen führt. Dieses ist in Abbildung 6.8 in der sich ergebenden typischen „close following spiral“ dargestellt, die mit einem Versuchsfahrzeug im realen Verkehrsgeschehen bei einer Folgefahrt aufgezeichnet wurde.

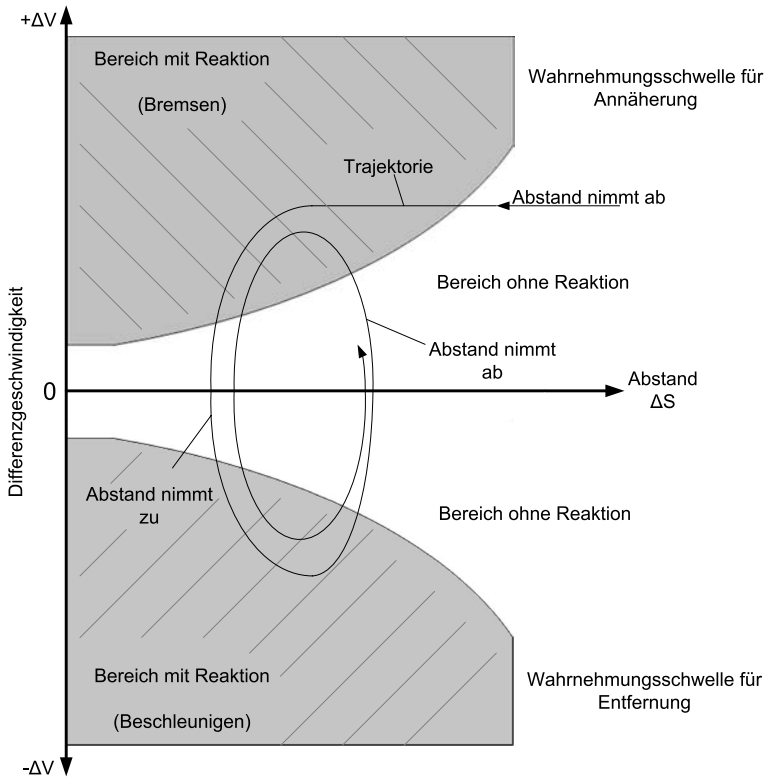


Abb. 6.7. Wahrnehmungsschwelle des Fahrers, nach (HELBING 1997, LEUTZBACH 1988)

Insgesamt gibt es eine Vielzahl von Einflussfaktoren, welche im Rahmen der Modellierung berücksichtigt werden können, an dieser Stelle aber nicht ausführlich behandelt werden sollen. Der Vollständigkeit halber, sollen hier einige Faktoren – die auch zum größten Teil noch untersucht werden und nicht vollständig modelliert werden können – beschrieben werden. Einen guten Überblick hierzu bietet (KOPPA 2001).

In Abschnitt 6.2.2 wurde eine Reaktionszeit für den Fall eines Bremsvorganges des vorausfahrenden Fahrzeuges beschrieben. Zur realistischen Beschreibung einer Reaktionszeit muss diese situationsabhängig betrachtet werden und grundsätzlich eine Verteilungsfunktion zur Beschreibung des Verhaltens unterschiedlicher Fahrer verwendet werden. Zusätzlich zur Reaktionszeit ist zu betrachten, wie lange der Fahrer für die Durchführung der Reaktion benötigt, also z. B. das Entlasten des Gaspedals und das Betätigen der Bremse oder das schnelle Bewegen des Lenkrads, um ein Ausweichmanöver durchzuführen.

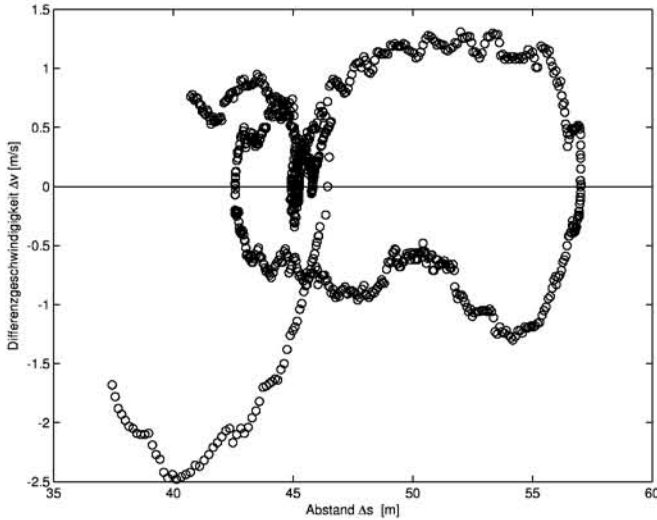


Abb. 6.8. Typische „close following spiral“

Hierbei wurde z. B. beobachtet, dass die Zeit zur Betätigung der Bremse nur gering bis gar nicht mit der zuvor benötigten Reaktionszeit korreliert.

Ein weiteres Forschungsgebiet ist die Untersuchung der Reaktion des Fahrers auf Verkehrszeichen. Um die Information eines Verkehrszeichens verwerten zu können, können drei Zwischenschritte unterschieden werden: Erkennen des Verkehrszeichens, Lesen des Verkehrszeichens und Interpretation der Information (vgl. Abschnitt 5.3.5).

- Das *Erkennen* des Verkehrszeichens wird zum einen durch die Größe, die Form, die Farbe und die Umgebung des Verkehrszeichens beeinflusst, zum anderen durch den Fahrer selbst, z. B. durch seine Aufmerksamkeit.
- Das *Lesen* des Verkehrszeichens ist sowohl abhängig von der Ausleuchtung des Verkehrszeichens, der Helligkeit und dem Kontrast als auch der verwendeten Zeichen und Symbole. Weitere Einflussgrößen sind Dauer der Sichtbarkeit des Verkehrszeichens und die Menge der dargestellten Information.
- Für die *Interpretation* des Verkehrszeichens ist es notwendig, dass die Bedeutung von Form, Farbe und Symbolen festgelegt sind und dem Fahrer bekannt sind.

Für die Konzepte zur Verkehrsflusssteuerung in Abschnitt 6.4 sowie die Verkehrslenkung und individuelle Fahrzeugnavigation in Abschnitt 12.3.5 sind ergonomische Untersuchungen zum Fahrerverhalten dieser drei Zwischenschritte von Bedeutung, um sicherzustellen, dass die gewünschte Information den Fahrer möglichst ohne Beeinflussung seiner normalen Fahraufgabe erreicht.

Das Fahrerverhalten auf seine Umgebung im Fall eines vorausfahrenden Fahrzeuges wurde im vorherigen Abschnitt behandelt. Speziell untersucht werden kann auch das Verhalten des Fahrers bei vorhandenen Hindernissen auf seinem Fahrweg. Hierzu gehören das (visuelle) Erkennen eines Hindernisses und anschließend die Bewertung, ob es ein für den Fahrer relevantes ggf. gefährliches Hindernis ist und eine entsprechende Handlung (Ausweichen, Bremsen).

Ein weitreichendes Forschungsfeld ergibt sich aus den individuellen Eigenschaften der Fahrer. Die Unfallstatistiken zeigen, dass PKW-Fahrerinnen seltener als PKW-Fahrer die Hauptschuld an Verkehrsunfällen tragen. Insbesondere sind die Unfälle von PKW-Fahrerinnen meist weniger folgeschwer als die von PKW-Fahrern (DeStatis 2006). Für die Modellierung des Verkehrsablaufs werden Einflüsse durch Unterschiede zwischen den Geschlechtern in der Regel jedoch als minimal angesehen und nicht berücksichtigt (KOPPA 2001). Das Alter des Fahrzeugführers ist eine weitere Einflussgröße. Zum einen kann der Fahrer im Alter auf viele Erfahrungswerte zurückgreifen, zum anderen verschlechtern sich in der Regel aber die visuellen Aufnahmefähigkeiten sowie die effektive Filterung von Informationen aus der Umgebung.

Erweitert man den Betrachtungsgegenstand auf Fahrsituationen kann z. B. das Verhalten bei Überholvorgängen oder auch die so genannte gap-acceptance (wann nutzt der Fahrer eine Fahrzeuglücke z. B. des Gegenverkehrs beim Links-Abbiegen oder des kreuzenden Verkehrsstroms beim Überqueren einer Kreuzung) untersucht werden.

Insgesamt ergibt sich damit eine Vielzahl von Einflüssen auf den Ablauf von Verkehrsströmen, die bei weitem noch nicht vollständig beschrieben sind.

6.2.4 Verkehrsmodellierung mit Zellularautomaten

Von Nagel und Schreckenberg wurde 1992 ein Verkehrsmodell basierend auf Zellularautomaten vorgestellt [Nagel 1992]. Für das Modell wird der betrachtete Straßenabschnitt in gleich lange Teile diskretisiert; ebenso werden die Geschwindigkeit und die Zeit diskretisiert. In den ersten Veröffentlichungen wurde ein Fahrstreifen einer Straße in Abschnitte konstanter Länge von $\Delta s = 7.5 \text{ m}$ eingeteilt. In jedem dieser Abschnitte kann sich genau ein oder kein Auto befinden. Jedes sich auf einem dieser Abschnitte befindliche Auto besitzt eine weitere Variable, seine diskretisierte Geschwindigkeit v . Eine entsprechende Darstellung eines Straßenabschnitts zeigt Abbildung 6.9. Mit Hilfe von vier Regeln, die für jedes Fahrzeug nacheinander ausgeführt werden,

wird die Verkehrssituation simuliert. Diese sequenzielle Abarbeitung der vier Regeln wird in der Simulation gleichzeitig für alle Fahrzeuge durchgeführt. Die Regeln lauten (SCHRECKENBERG et al. 1996):

- *Regel 1:* Beschleunigen: Alle Fahrzeuge mit einer normierten Geschwindigkeit v , die kleiner als die Maximalgeschwindigkeit v_{\max} ist, beschleunigen um eine Geschwindigkeitseinheit [$v \rightarrow v + 1$]. Damit realisiert diese Regel den Fahrerwunsch, so schnell wie möglich bzw. wie erlaubt zu fahren.
- *Regel 2:* Abbremsen: Ist der Abstand Δs eines Fahrzeuges zum vorausfahrenden Fahrzeug (d. h. die Anzahl der freien Zellen vor dem Fahrzeug) nicht größer als seine momentane Geschwindigkeit v , so wird es auf die neue Geschwindigkeit [$v \rightarrow \Delta s - 1$] abgebremst. Somit wird die Wechselwirkung der Fahrzeuge zueinander hergestellt und sichergestellt, dass keine Unfälle passieren.
- *Regel 3:* Trödeln: Mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit p wird die Fahrzeuggeschwindigkeit eines fahrendes Fahrzeuges, das eine Geschwindigkeit größer als Null hat, um den Wert 1 verringert [$v \rightarrow v - 1$]. Würde diese Regel nicht verwendet, läge ein deterministisches Modell vor, das nach Vorgabe einer Startbedingung stets dieselben Folgezustände erreicht. Hierdurch werden Schwankungen der Wunschgeschwindigkeit, Überreaktionen beim Bremsen oder Schwankungen beim Bremsen und Beschleunigen abgebildet (vgl. auch Abschnitt 6.2.3).
- *Regel 4:* Fahren: Jedes Fahrzeug wird um v Plätze weiterbewegt. Somit wird letztendlich die eigentliche Bewegung der Fahrzeuge realisiert.

Wird die Aktualisierung aller Regeln im Zeitschritt eines Ein-Sekundenrasters durchgeführt, entspricht dies bei der häufig verwendeten normierten Maximalgeschwindigkeit $v_{\max} = 5$ einer physikalischen Maximalgeschwindigkeit von 135 km/h.

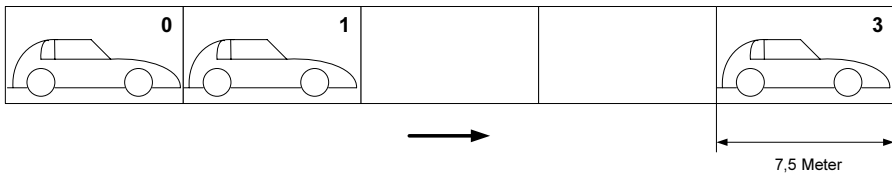


Abb. 6.9. Zellularautomaten-Darstellung eines Straßenabschnitts

Aufgrund der einfachen Struktur des Modells können auch sehr große Straßenabschnitte in mehrfacher Echtzeitgeschwindigkeit berechnet werden. Trotz seiner Vereinfachungen kann das Modell verschiedene Verkehrsphänomene dar-

stellen. Hierzu gehören z. B. Stop-and-Go-Wellen, d. h. Phasen von alternierendem Beschleunigen und Abbremsen, die oberhalb einer kritischen Dichte entstehen. Gründe hierfür sind die Randomisierung und die um eine Zeitspanne Δt verzögerte Anpassung an Geschwindigkeitsänderungen des vorausfahrenden Fahrzeugs (HELBING 1997).

Seit seiner ersten Veröffentlichung wurde das Modell mehrfach erweitert und verbessert. Unter anderem wurde eine begrenzte Beschleunigung und ein begrenztes Bremsvermögen der Fahrzeuge bei zusätzlich von der Verkehrssituation abhängigem Fahrerverhalten (optimistisch, defensiv) mit aufgenommen. Statt der ursprünglichen Zellgröße von 7,5 m wird neuerdings mit einer Zellgröße von 1,5 m gerechnet, sodass ein Fahrzeug nun zwei bis fünf aufeinander folgende Zellen belegt. Zum anderen wurde die oben eingeführte Wahrscheinlichkeit p durch eine von der Geschwindigkeit abhängige Wahrscheinlichkeitsfunktion ersetzt. Des Weiteren besteht in neueren Modellen die Möglichkeit mehrspurige Straßen mit Spurwechsel und Überholmanöver zu simulieren (LEE et al. 2004, MAZUR et al. 2005).

In Nordrhein-Westfalen wird dieses Modell zur Simulation und Vorhersage des Autobahnverkehrs innerhalb des Bundeslandes genutzt. Mit Hilfe von ca. 4000 Zählschleifen auf 2250 km wird das Verkehrsmodell im Minutentakt mit Informationen über den aktuellen Verkehrszustand versorgt (MAZUR et al. 2005). Im Internet sind der aktuelle Verkehrszustand sowie Prognosen für die Straßenauslastung in 30 und 60 Minuten verfügbar (AutobahnNRW 2007).

6.2.5 Einfluss von Assistenzsystemen auf den Verkehrsfluss

In Abschnitt 6.2.2 wurde die Auswirkung längerer Reaktionszeiten, welche z. B. aufgrund von Unaufmerksamkeiten des Fahrers entstehen können, auf die Stabilität des Kolonnenverkehrs dargestellt. Mit zunehmender Reaktionszeit wurde das Kolonnenverhalten instabil. Moderne Fahrerassistenzsysteme, wie z. B. das ACC, welches wie oben beschrieben die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges in Abhängigkeit einer Wunschgeschwindigkeit, der Relativgeschwindigkeit und dem Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeuges regelt, können durch geeignete Regelungsstrategien zu einem homogenen und damit sichereren Verkehrsfluss beitragen. In Simulationen konnte gezeigt werden, dass sich ein oder mehrere durch ACC unterstützte Fahrzeuge im Kolonnenverkehr stabilisierend auswirken (WITTE 1996).

Eine Weiterentwicklung der Fahrerassistenzsysteme von der assistierten Einzelfahrzeugregelung zur einer kooperativen, dezentralen und dem Einzelfahrzeug übergeordneten Regelung verspricht weiteres Potenzial zur Erhöhung des Verkehrsflusses und der Sicherheit.

Vor der detaillierteren Betrachtung der kooperativen Regelung soll zunächst eine Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen erfolgen. Eine Einteilung ist

hinsichtlich Assistenzstrategie, Assistenzebene und Assistenzkonzept möglich (WILTSCHKO 2004, ZAMBOU 2005).

- In der Kategorie *Assistenzstrategie* sind informierende, warnende, intervenierende und agierende Assistenzsysteme zu unterscheiden.
- Die *Assistenzebenen* lassen sich in die drei in Abschnitt 6.1 dargestellten Ebenen dispositiv, taktisch und operativ unterteilen.
- Das *Assistenzkonzept* lässt sich in die drei Bereiche fahrzeugautonom, infrastrukturgestützt und kooperativ einteilen.

Aktuell auf dem Markt erhältliche Fahrerassistenzsysteme decken alle Assistenzstrategien ab. Innerhalb der Assistenzebene herrschen die navigierenden und stabilisierenden vor. Außerdem arbeiten die meisten Systeme ausschließlich fahrzeugautonom. Durch neue in der Forschung befindliche Systeme können auch infrastrukturgestützt und kooperativ arbeitende Assistenzsysteme in Zukunft den Verkehr beeinflussen. Viele davon sind der Bahnführungsebene zuzuordnen.

Auf diesem Gebiet zählt zu den bedeutenden Forschungsprogrammen der letzten Jahre unter anderem das, von der Daimler-Benz AG 1996 ins Leben gerufene, Programm PROMOTE CHAUFFEUR mit dessen Fortsetzung PROMOTE CHAUFFEUR 2 in den Jahren 2000-2003. Ziel war der automatisierte Kolonnenverkehr von LKW, wodurch eine Erhöhung der Verkehrsdichte des Frachtverkehrs erreicht werden sollte. Die Fahrzeugführung geschieht dabei nach dem Vehicle-Follower-Prinzip. Dieses Prinzip beruht im Wesentlichen auf einer Fahrzeug-Fahrzeug Kommunikation und auf Bildverarbeitungssystemen, welche sowohl den Abstand als auch den lateralen Versatz zum Vordermann bestimmen. So können mehrere hintereinander fahrende LKW über eine sog. Elektronische Deichsel miteinander verbunden werden.

Ähnliche Themen wurden im Programm California PATH (Partners for Advanced Transit and Highways), welches aus einer Kooperation aus dem Jahr 1986 von Caltrans (California Department of Transportation) und der Berkeley Universität von Kalifornien hervorgeht, bearbeitet. Ein Forschungsschwerpunkt liegt hier auf der Entwicklung von Fahrerassistenz- und Sicherheitssystemen sowie der Erforschung von Unfallvermeidungssystemen. Dabei werden insbesondere die in den USA einfach strukturierten Fernverbindungen, die Highways (Bundesstraßen) und Freeways (Autobahnen), betrachtet. Im Gegensatz zum Programm PROMOTE CHAUFFEUR, deren Assistenzsysteme ohne spezielle Infrastruktur auskommen, untersucht PATH auch die automatische Konvoiführung auf gesonderten Fahrstreifen, welche zum Teil mit speziellen Automatisierungseinrichtungen entlang der Strecke ausgerüstet sind.

Die Arbeit im Rahmen des Programms California PATH wird aktuell in unterschiedlichen neuen Projekten fortgesetzt.

Im 6. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission wurde das Forschungsprojekt PREVENT bearbeitet. Dieses beinhaltet unter anderem das von 2004 bis 2007 laufende Teilprojekt INTERSAFE, welches sich mit der Verbesserung der Sicherheit an Kreuzungen beschäftigt. Im Rahmen dieses Projektes wird unter anderem verstärkt die Einbindung der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur, insbesondere zu Lichtsignalanlagen, untersucht (vgl. Abschnitt 8.5.3).

Tabelle 6.2 zeigt eine Zuordnung oben genannter Forschungsprogramme zur vorgestellten Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen in den Einteilungen Assistenzstrategie, -ebene und -konzept. Für das breitgefächerte Programm California PATH wurde beispielhaft das PATH's magnetic guidance system ausgewählt, bei dem Fahrzeuge eine durch Magnete vorgegebene Fahrspur einhalten.

Tabelle 6.2. Zuordnung aktueller Forschungsprojekte zu Assistenzstrategie, -ebene und -konzept

Projekt	Assistenzstrategie	Assistenzebene	Assistenzkonzept
Promote Chauffeur	agierend	taktisch operativ	kooperativ
California Path am Beispiel PATH's magnetic guidance system	agierend	taktisch operativ	infrastrukturgestützt
Intersafe	warnend	taktisch	infrastrukturgestützt

Für die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen ist es notwendig, dass die Hersteller einheitliche Standards für die Kommunikation verwenden. Die notwendige Zusammenarbeit der unterschiedlichen Beteiligten für die Kommunikation im Automobilbereich wurde erkannt, sodass initiiert von europäischen Automobilherstellern das Car2Car Communication Consortium gegründet wurde. Dieses steht Herstellern, Zulieferern und Forschungseinrichtungen offen und soll die Verbesserung der Verkehrssicherheit durch Fahrzeug-Fahrzeug Kommunikation vorantreiben (vgl. Abschnitt 5.2.1).

Die oben genannten Arbeiten binden alle die Infrastruktur und bzw. oder andere Fahrzeuge in die Regelung der eigenen Bewegung mit ein. Hierdurch wird die Möglichkeit gegeben, dass die weitestgehend autonom agierenden Verkehrsteilnehmer durch Informationen lokal kooperieren. Eine übergeordnete Regelung in Abhängigkeit des Verkehrszustandes und weiterer Verkehrsteilnehmer zur Realisierung einer neuen Verkehrsorganisation zwischen autonomer Fahrzeugführung und zentraler fahrwegseitiger Verkehrslenkung wird bislang noch nicht untersucht, bietet aber weiteres Potenzial zur Erhöhung von Verkehrsfluss bzw. Flüssigkeit und Verkehrssicherheit.

6.3 Makroskopische Verkehrsmodelle

In der Praxis der Verkehrssteuerung interessieren häufig nicht die Beschreibung der Dynamik der Einzelfahrzeuge, sondern die sich aus vielen Fahrzeugen ergebenden makroskopischen Größen wie Verkehrsfluss, Verkehrsdichte oder mittlere Geschwindigkeit. Daher werden makroskopische Verkehrsmodelle als vereinfachte Beschreibung von Verkehrsabläufen bei Verkehrsplanung und -steuerung eingesetzt. In der Regel werden die makroskopischen Daten aus empirisch ermittelten mikroskopischen Einzelfahrzeugdaten durch Aggregation gewonnen. Durch die Aggregation gehen allerdings zwangsläufig Details des Verkehrsablaufs verloren.

6.3.1 Kenngrößen des Verkehrsablaufs

Zum Verständnis der Betrachtungen in den folgenden Abschnitten ist zunächst die Einführung mehrerer den Verkehrsfluss beschreibenden Größen notwendig.

Die Größen sind im Einzelnen:

Verkehrsdichte: Anzahl der Fahrzeuge auf einem Straßenabschnitt Δs zu einem Zeitpunkt:

$$\rho = \frac{N_\rho}{\Delta s} \quad (6.13)$$

mit

ρ Verkehrsdichte (KFZ/km)
 N_ρ Anzahl der Fahrzeuge auf einem Straßenabschnitt
 Δs Straßenabschnitt

Verkehrsstärke: Anzahl der Fahrzeuge an einem Straßenquerschnitt je Zeitabschnitt Δt :

$$q = \frac{N_q}{\Delta t} \quad (6.14)$$

mit

q Verkehrsstärke (KFZ/h)
 N_q Anzahl der Fahrzeuge
 Δt Zeitabschnitt

Mit ρ und q kann die mittlere momentane Geschwindigkeit v ermittelt werden:

$$v = \frac{q}{\rho} \quad (6.15)$$

mit v mittlere momentane Geschwindigkeit (km/h)

6.3.2 Bestimmung der Kenngrößen aus Messergebnissen

Die im vorherigen Abschnitt definierten Kenngrößen des Verkehrsablaufs können zum einen lokal an einem Ort innerhalb eines begrenzten Zeitabschnitts, zum anderen aber auch als eine Momentaufnahme innerhalb eines begrenzten Raumabschnitts ermittelt werden.

Abbildung 6.10 zeigt Trajektorien von Fahrzeugen, die sich auf einem Streckenabschnitt bewegen, sowie die Verkehrskenngrößen, die sich auf der Strecke ermitteln lassen. Die Unterscheidung nach lokaler und momentaner Messung ist ebenfalls in Abbildung 6.10 dargestellt.

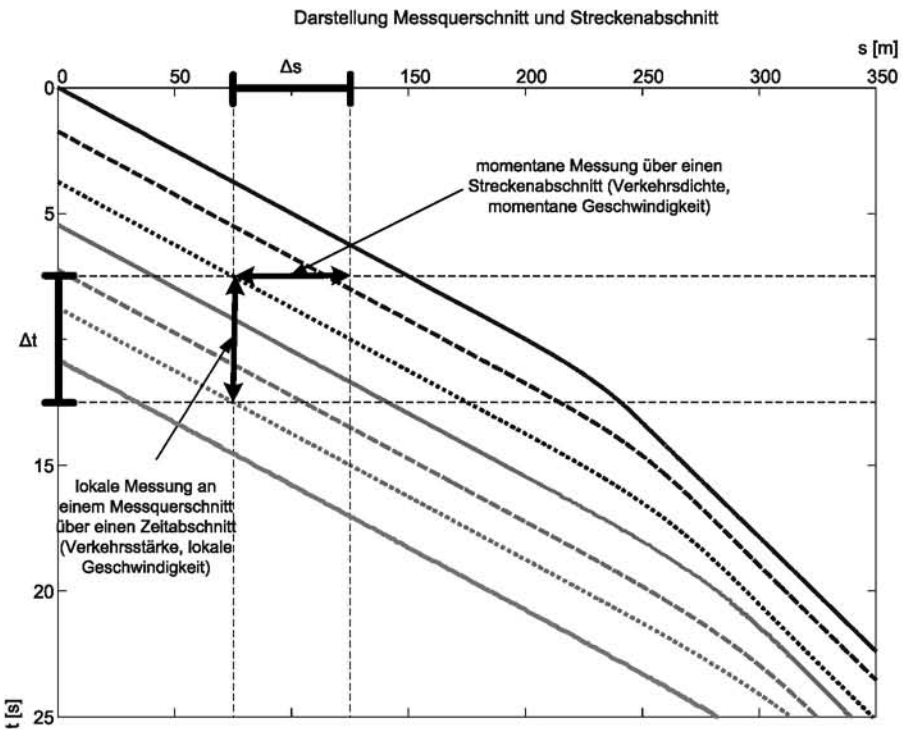


Abb. 6.10. Verkehrskenngrößen eines Messquerschnitts und eines Streckenabschnitts

Die Messung der *Verkehrsdichte* ist unmittelbar nur durch Momentaufnahme zu einem Zeitpunkt auf einem Straßenabschnitt Δs z. B. durch Luftbildauswertung möglich.

Die *Verkehrsstärke* kann lokal an einem Messquerschnitt innerhalb eines Zeitabschnittes Δt z. B. über Induktionsschleifen (vgl. Abschnitt 4.5.1) bestimmt werden.

Die mittlere Geschwindigkeit muss in Abhängigkeit der Art der Messung nach *mittlerer lokaler Geschwindigkeit* und *mittlerer momentaner Geschwindigkeit* unterschieden werden.

Beide Geschwindigkeiten können nicht direkt durch Messungen ermittelt werden, sodass quasi-lokale bzw. quasi-momentane Messungen durchgeführt werden müssen. Dabei wird zur Bestimmung der lokalen Geschwindigkeit eines Fahrzeuges die Überfahrzeit t_i über einen festen (möglichst kurzen (und damit quasi-lokal)) Straßenabschnitt $\Delta\sigma$ bestimmt (angewendet bei der Messung mit Induktionsschleifen) und aus dem Verhältnis von Abschnittslänge $\Delta\sigma$ zur Überfahrzeit t_i die Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt. Die *mittlere lokale Geschwindigkeit* \bar{v}_l wird als arithmetisches Mittel der Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten bestimmt (Gleichung 6.16).

$$\bar{v}_l = \frac{\Delta\sigma \cdot \sum_i^{N_q} \frac{1}{t_i}}{N_q} \quad (6.16)$$

Für die Bestimmung der mittleren momentanen Geschwindigkeit werden für einen festen (möglichst kurzen (und damit quasi-momentanen)) Zeitabschnitt $\Delta\tau$ die zurückgelegten Wege s_i aller Fahrzeuge ermittelt (angewendet bei der Messung durch Luftbildauswertung). Das Verhältnis der Summe der Wegabschnitte s_i zur Zeitabschnittsdauer $\Delta\tau$ und Anzahl der beobachteten Fahrzeuge N_ρ ergibt die *mittlere momentane Geschwindigkeit* (Gleichung 6.17).

$$\bar{v}_m = \frac{\sum_i^{N_\rho} s_i}{N_\rho \cdot \Delta\tau} \quad (6.17)$$

Dabei ist die mittlere momentane Geschwindigkeit stets kleiner als die mittlere lokale Geschwindigkeit. Nur für den Fall, dass alle betrachteten Fahrzeuge mit der gleichen Geschwindigkeit fahren, sind die beiden Werte gleich groß.

Da momentane Beobachtungen in der Praxis sehr aufwendig sind, werden meist lokale Geschwindigkeiten ermittelt und in momentane Geschwindigkeiten umgerechnet.

Es ist zu beachten, dass die Verkehrsstärke q an einem Ort gemessen wird, also eine lokale Größe ist. Die Verkehrsdichte ρ hingegen zu einem Zeitpunkt gemessen wird, also eine momentane Größe ist. Nur für den Fall stationären Verkehrsflusses können die beiden Größen über die mittlere momentane Geschwindigkeit verknüpft werden (Gleichung 6.15). Die mathematisch korrekte

Verknüpfung der Größen ist über eine zeitlich-räumliche Betrachtungsweise möglich (SCHNABEL und LOHSE 1997, HÖFLER 2006). Möglichkeiten zur Überprüfung der Stationarität von Verkehrsströmen sind in (HÖFLER 2006) beschrieben.

6.3.3 Stationäre makroskopische Verkehrsmodelle

Durch Beobachtung des Verkehrsgeschehens lässt sich der in Abbildung 6.11 und Gleichung (6.18) dargestellte, erstmals von Greenshields (GREENSHIELDS 1935) ermittelte, vereinfachte Zusammenhang zwischen mittlerer Geschwindigkeit v und Verkehrsdichte ρ ermitteln.

$$v(\rho) = v_f \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}}\right) \quad (6.18)$$

Der Fahrzeugführer kann bei sehr geringer Verkehrsdichte seine Geschwindigkeit frei wählen. Diese Geschwindigkeit wird als freie Geschwindigkeit v_f bezeichnet. Mit zunehmender Dichte beeinflussen sich die Fahrzeuge gegenseitig, sodass es zu einer Abnahme der mittleren Geschwindigkeit kommt. Die maximale Dichte auf der Straße wird erreicht, wenn die Fahrzeuge auf der Straße stehen. Somit ist die mittlere Geschwindigkeit bei maximaler Dichte Null.

Durch Einsetzen von Gleichung (6.18) in Gleichung (6.15) erhält man für die Verkehrsstärke q einen nicht-linearen, parabolischen Zusammenhang (Gleichung (6.19)). Dieser Zusammenhang ist grafisch in Abbildung 6.11 dargestellt. Diese Darstellung des Verhältnisses der Verkehrsstärke zur Verkehrsdichte ist die häufigste grafische Darstellung der Zusammenhänge der Gleichung (6.15) und wird als Fundamentaldiagramm bezeichnet.

$$q = v_f \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}}\right) \quad (6.19)$$

Folgende Zusammenhänge können im Diagramm erkannt werden:

- Wenn die Verkehrsdichte Null ist, ist auch der Verkehrsfluss Null, da keine Fahrzeuge auf der Straße sind.
- Mit Zunahme der Dichte nimmt auch der Verkehrsfluss zu, bis bei der so genannten kritischen Dichte ρ_{cr} der maximale Fluss q_{\max} erreicht ist. Gleichzeitig nimmt dabei die mittlere Geschwindigkeit v_f , die durch die Sekantensteigung der Geraden durch den Koordinatenursprung und dem zugehörigen betrachteten Verkehrszustand im Fundamentaldiagramm gegeben ist, ab (vgl. auch Abbildung 6.15a).

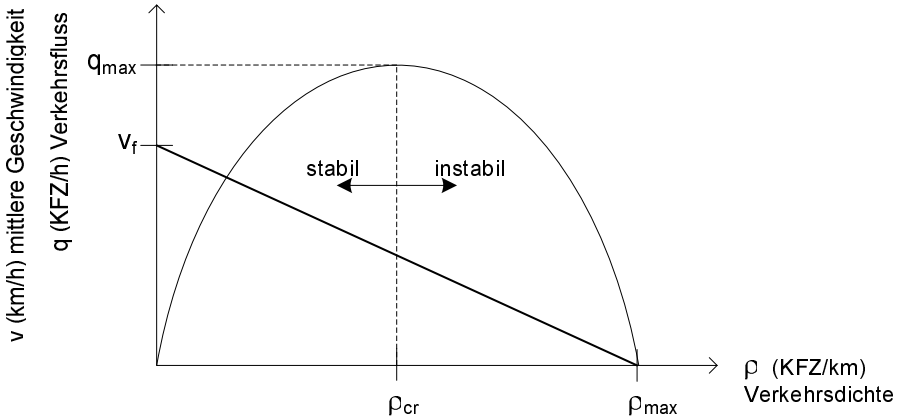


Abb. 6.11. v - ρ und v - q Diagramm (Fundamentaldiagramm) des Straßenverkehrs

- Bei weiterer Erhöhung der Dichte kommt es zu einer Abnahme des Verkehrsflusses und zu einer weiteren Verringerung der mittleren Geschwindigkeit bis zum Stillstand. In diesem Bereich oberhalb der kritischen Dichte sind die Abstände der Fahrzeuge bereits sehr gering, sodass es leicht durch Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen zum Verkehrszusammenbruch kommen kann. Ein solches Szenario wird in der Umgangssprache auch als „Stau aus dem Nichts“ bezeichnet. Für diese Art der Staus ist keine Ursache, wie z. B. ein Unfall oder eine Baustelle, feststellbar. Dieser Bereich wird instabiler Verkehr bezeichnet. Eine systemdynamische Analyse dieses Phänomens behandelt Abschnitt 6.3.5.
- Bei maximaler Dichte (Fahrzeuge stehen quasi Stoßstange an Stoßstange) erreicht der Fluss wieder Null, da die Geschwindigkeit der Fahrzeuge gegen Null geht.

In experimentell gewonnen Messdaten kann häufig bis zur kritischen Dichte eine sehr gute Übereinstimmung mit dem theoretischem Modell festgestellt werden. Oberhalb der kritischen Dichte im instabilen Bereich nimmt die Abweichung zwischen theoretischem Modell und gemessenen Daten hingegen zu (HELBING 1997, KERNER 2004, PAPAGEORGIOU 2004a, HÖFLER 2006).

6.3.4 Dynamische makroskopische Verkehrsmodelle

Die oben beschriebenen Gleichungen gelten für den stationären Verkehrsfluss. Lighthill und Whitham haben diese Gleichungen auch auf den nicht stationären Verkehrsfluss angewendet. Hierbei liegt die Idee zugrunde, die Grundsätze der Theorie der Hydrodynamik auf den Verkehrsstrom anzuwenden (COHEN 1991).

Dabei wird das Fahrzeuggeschehen als kontinuierliches Fließgeschehen in Analogie zu flüssigen oder gasförmigen Medien betrachtet (HELBING 1997, KERNER 2004).

Hierzu wurden als erste Voraussetzung die notwendigen Variablen in Abschnitt 6.3.1 bereits als kontinuierlich definiert und die Beziehung untereinander in Gleichung (6.15) beschrieben. Als weitere Voraussetzung gilt die Annahme der Erhaltung der Masse, die für den Verkehr aus Abbildung 6.12 mit dem Ansatz in Gleichung (6.20) hergeleitet werden kann.

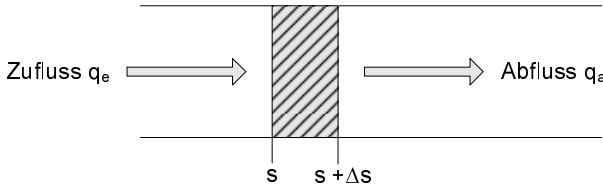


Abb. 6.12. Zufluss und Abfluss in einem Straßenabschnitt Δs

$$\rho(s, t + \Delta t) \Delta s = \rho(s, t) \Delta s + q(s, t) \Delta t - q(s + \Delta s, t) \Delta t \quad (6.20)$$

Die Gleichung drückt aus, dass die Anzahl der Fahrzeuge in einem Abschnitt der Länge Δs zu einem Zeitpunkt $t + \Delta t$ gleich der Anzahl der Fahrzeuge zum Zeitpunkt t in diesem Abschnitt ist, ergänzt um die Fahrzeuge, die am Ort s während der Zeit Δt eingefahren sind, abzüglich der Fahrzeuge, die am Ort $s + \Delta s$ während der Zeit Δt herausgefahren sind.

Aus (6.20) ergibt sich folgender Differenzenquotient (6.21) und daraus folgender Differenzialquotient (6.22):

$$\frac{\rho(s, t + \Delta t) - \rho(s, t)}{\Delta t} = \frac{q(s, t) - q(s + \Delta s, t)}{\Delta s} \quad (6.21)$$

$$\frac{\Delta \rho(s, t)}{\Delta t} + \frac{\Delta q(s, t)}{\Delta s} = 0 \quad (6.22)$$

Unter der Annahme, dass die Grenzwerte $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta \rho}{\Delta t}$ und $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta s}$ existieren, folgt die partielle Differenzialgleichung, wie sie aus der Theorie von Wellen bekannt ist:

$$\frac{\partial \rho(s, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(s, t)}{\partial s} = 0 \quad (6.23)$$

Im nächsten Schritt soll eine Lösung für die Differenzialgleichung (6.23) gesucht werden. Dieses führt zum „Kinematic wave model“ nach (LIGHTHILL und WHITHAM 1955).

Unter der Annahme, dass die Verkehrsstärke nur von der Dichte abhängig ist, also mit $q = q(\rho)$ ist:

$$\frac{\partial q(\rho)}{\partial s} = \frac{\partial q(\rho)}{\partial \rho(s, t)} \frac{\partial \rho}{\partial s} \quad (6.24)$$

Damit ergibt sich mit (6.23):

$$\frac{\partial \rho(s, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(\rho)}{\partial \rho(s, t)} \frac{\partial \rho}{\partial s} = 0 \quad (6.25)$$

$$\frac{\partial \rho(s, t)}{\partial t} + c \frac{\partial \rho(s, t)}{\partial s} = 0 \quad c = \frac{\partial q(\rho)}{\partial \rho} \quad (6.26)$$

Eine graphische Darstellung des Zusammenhangs $c = \frac{\partial q(\rho)}{\partial \rho}$ zeigt Abbildung 6.13. Der Parameter c ist die Tangentensteigung im aktuellen Arbeitspunkt im Fundamentaldiagramm, der ebenfalls die Dimension einer Geschwindigkeit hat.

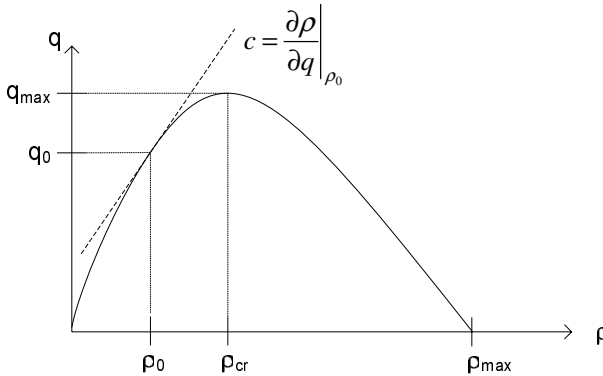


Abb. 6.13. Bestimmung der Geschwindigkeit c mit Hilfe des Fundamentaldiagramms

Als allgemeine Lösung erhält man für die Differenzialgleichung 6.26 eine Schar von Geraden:

$$\rho(s, t) = F(s - c \cdot t) \quad (6.27)$$

Anschaulich kann man diese Lösung anhand der Darstellung in Abbildung 6.14 erklären: Sei die Verkehrsdichte zum Zeitpunkt $t_1 = 0$ an der Stelle

$s = s_1$ bekannt. Mit Gleichung 6.27 ergibt sich: $\rho(s_1, t) = F(s_1)$. Zum anderen betrachte man die Verkehrsdichte zum Zeitpunkt $t = t_2 > t_1$ und an der Stelle $s_2 = s_1 + ct_2$. Diese ist $\rho(s_2, t_2) = \rho(s_1 + ct_2, t_2) = F(s_1 + ct_2 - ct_2) = F(s_1)$. Zusammengefasst ergibt sich:

$$\rho(s_1, 0) = F(s_1) = \rho(s_1 + ct_2, t_2) \quad (6.28)$$

Hieraus folgt, dass die Verkehrsdichten zum Zeitpunkt $t_1 = 0$ an der Stelle $s = s_1$ und zum Zeitpunkt $t = t_2$ an der Stelle s_2 gleich groß sind.

Der Verlauf der konstanten Verkehrsdichte über die Zeit und den Ort in Abhängigkeit des Parameters c ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Die gestrichelten Linien in der Abbildung kennzeichnen Bereiche, in denen in Abhängigkeit von c die Verkehrsdichte und damit auch der Verkehrsfluss und die mittlere Geschwindigkeit gleich bleiben. Damit können diese Linien als Wellenfronten angesehen werden, die sich mit der Geschwindigkeit c bewegen. In anderen Worten: Ein Beobachter aus der Luft, der sich stets mit der Geschwindigkeit c entlang einer Straße bewegt, würde keine Veränderung in der Verkehrsdichte auf der Straße wahrnehmen.

Es können folgende drei Unterscheidungen beschrieben werden:

$c \leq v$	$\forall \rho \in [0, \rho_{\max}]$	Die Geschwindigkeit der kinematischen Welle ist stets langsamer als die mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge, d. h. die Welle wandert relativ zum Fahrzeugstrom flussaufwärts.
$c \geq 0$	$\forall \rho \in [0, \rho_{cr}]$	Die Wellenfront bewegt sich relativ zu einer festen Position flussabwärts.
$c < 0$	$\forall \rho \in (\rho_{cr}, \rho_{\max}]$	Die Wellenfront bewegt sich relativ zu einer festen Position flussaufwärts.

Die erste Aussage für $c \leq v$ bedeutet, dass ein Fahrer, der einen Stau auslöst, z. B. ein überholender, langsamer LKW von diesem Stau nicht betroffen ist.

Insgesamt werden durch die obigen Unterscheidungen vergleichbar mit Abschnitt 6.3.3 zwei Verkehrsbereiche, nämlich der des freien Flusses ($\rho < \rho_{cr}$) und der des gestauten Verkehrs ($\rho_{cr} < \rho < \rho_{\max}$), identifiziert. In anderen Arbeiten werden weitere Phasen unterschieden, auf welche hier nicht näher eingegangen werden sollen, welche jedoch der Vollständigkeit halber genannt werden sollen. So betrachtet beispielsweise (KERNER 2004) die drei Phasen freier Verkehr, synchronisierter Verkehr im Bereich der kritischen Dichte und sich bewogender breiter Stau.

Werden aneinander grenzende Straßenabschnitte mit unterschiedlichen Verkehrsdichten ρ_1 und ρ_2 betrachtet, muss im vorliegenden Modell in einigen Fällen ein diskontinuierliche Dichtesprung berücksichtigt werden. Abbildung

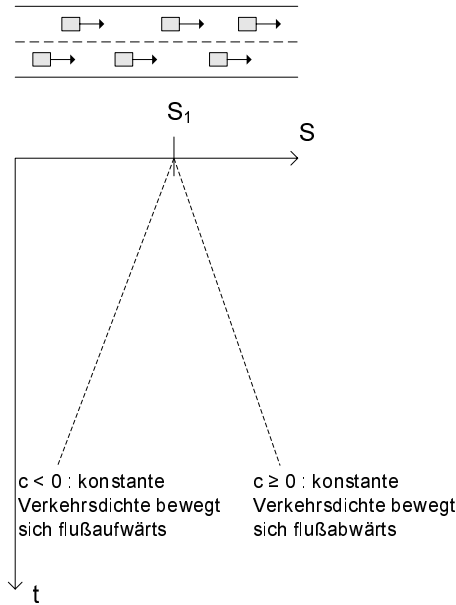


Abb. 6.14. Verkehrsdichteausbreitung über den Ort und die Zeit

6.15a zeigt einen Straßenabschnitt mit zwei unterschiedlichen Verkehrsdichten $\rho_1 > \rho_2$. Die Geschwindigkeit w sei die Angabe, mit welcher Geschwindigkeit sich die Stelle des Sprungs der beiden Verkehrsdichten fortbewegt. Sie wird auch als Stoßwellengeschwindigkeit bezeichnet. Diese Situation bzw. diese Welle wird als Stoßwelle (shock wave) bezeichnet.

Die Geschwindigkeit w kann über die Rate der ausfahrenden Fahrzeuge $q_1 - w\rho_1$ und der Rate der einfahrenden Fahrzeuge $q_2 - w\rho_2$ jeweils an der Stelle des Dichtesprungs bestimmt werden.

$$q_2 - w\rho_2 = q_1 - w\rho_1 \quad (6.29)$$

$$w = \frac{q_1 - q_2}{\rho_1 - \rho_2} \quad (6.30)$$

Die Steigung der Sekante der beiden Arbeitspunkte im Fundamentaldiagramm entspricht diesem Quotienten w (vgl. Abbildung 6.15c).

Insgesamt können damit drei Geschwindigkeiten im Fundamentaldiagramm identifiziert werden. Dieses sind die Fahrzeuggeschwindigkeit v sowie die Wellengeschwindigkeit c (Abbildung 6.15b) und die Stoßwellengeschwindigkeit w (Abbildung 6.15c).

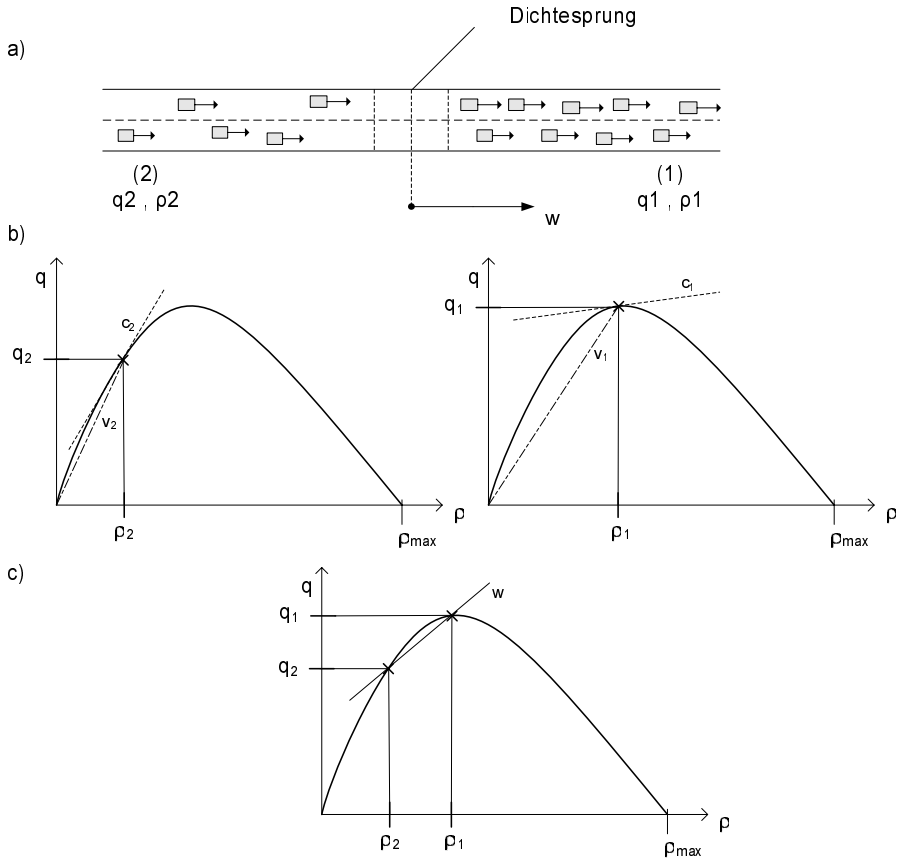


Abb. 6.15. Straßenabschnitt mit unterschiedlichen Verkehrsdichten- und -stärken, a) Schematische Darstellung des Straßenabschnitts, b) Fundamentaldiagramm mit Fahrzeug- und Wellengeschwindigkeit, c) Fundamentaldiagramm mit resultierender Stoßwelle

Abbildung 6.16 zeigt eine Darstellung der sich aus zwei unterschiedlichen Verkehrsdichten zweier aneinander grenzender Straßenabschnitte ergebenden Wellengeschwindigkeiten c_1 und c_2 und den Dichtesprung (Stoßwelle) zwischen den beiden Zuständen. Zusätzlich wurde in der Abbildung die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges dargestellt, welches sich flussaufwärts der Stoßwelle mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v_2 fortbewegt, flussabwärts der Stoßwelle mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v_1 .

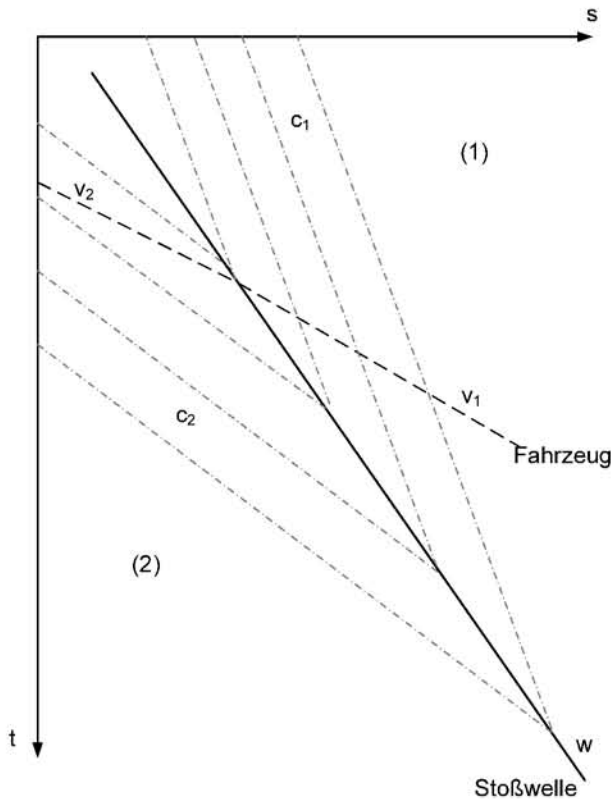


Abb. 6.16. Geschwindigkeiten von Fahrzeug, Welle und Stoßwelle im Weg-Zeit-Diagramm

6.3.5 Regelungstechnische Stabilitätsbetrachtung

Bereits bei der Herleitung des Fundamentaldiagramms in Abschnitt 6.3.3 klang das Phänomen an, dass oberhalb einer gewissen Verkehrsdichte der Verkehr manchmal zusammenbricht. Aus der Anschauung wird daher der rechte Teil im Fundamentaldiagramm zwar zutreffend als instabiler Bereich bezeichnet, eine theoretische Begründung für die Instabilität insbesondere aus systemdynamischer Sicht leistet diese Anschauung aufgrund ausschließlich stationärer Betrachtungsweise nicht. Eine umfassende Darstellung verschiedener Modellansätze für die Instabilität von Verkehrsströmen gibt (BOTMA 1995), wobei er betont, „knowledge about this phenomenon is rather scarce“ und leider über keine überzeugende theoretische Analyse berichtet.

Die systemdynamische Erklärung der Instabilität ist noch nicht vollständig untersucht. Erste wissenschaftliche Ansätze hierzu sollen hier unter Nutzung der dynamischen Verkehrsmodellierung des vorangegangenen Abschnitts 6.3.4

genannt werden. Ausgangspunkt ist die räumlich diskretisierte Kontinuitätsbetrachtung des makroskopischen Verkehrsflusses, welche darin besteht, dass in einem Straßenabschnitt i der Länge Δs die Differenz zwischen hinein- und hinausfahrendem Verkehrsstrom der zeitlichen Dichteänderung im betreffenden i -ten Abschnitt entspricht (Gl. 6.31).

$$q_{ei} - q_{ai} = \Delta s \frac{d\rho_i}{dt} \quad (6.31)$$

Dabei ist die hinausfließende Verkehrsstärke des vorherigen Abschnitts $i - 1$ gleich der einfließenden Verkehrsstärke des Abschnitts i :

$$q_{ei} = q_{a(i-1)} \quad (6.32)$$

Die Stärke des ausfließenden Verkehrsstroms q_{ai} sei von dem im Abschnitt i und von dem im folgenden Abschnitt $i + 1$ herrschenden Verhältnissen abhängig.

Dies sei im Folgenden durch Gleichung (6.33) formuliert:

$$q_{ai} = f_3(f_1(\rho_i), f_2(\rho_{i+1})) = f_3(q_D(\rho_i), q_S(\rho_{i+1})) \quad (6.33)$$

Hier beschreibt die Funktion f_1 die Verkehrsstärke q_D , die aus dem Abschnitt i abfließen möchte. Die Funktion f_2 beschreibt die Verkehrsstärke q_S , die von Abschnitt $i + 1$ aufgenommen werden kann. Abbildung 6.17 zeigt zwei mögliche Realisierungen dieser Funktionen.

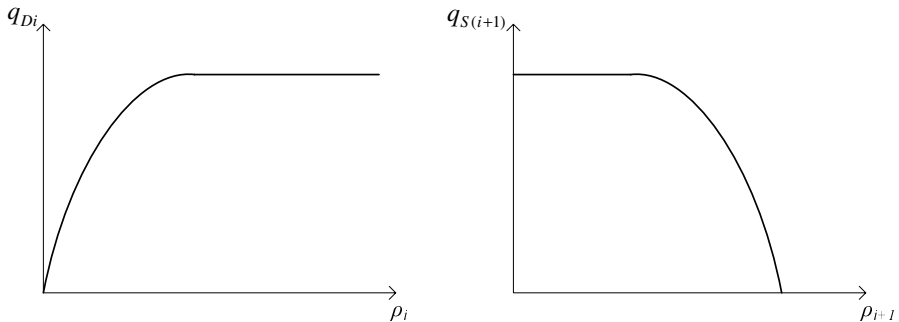


Abb. 6.17. Beispielhafter Verlauf der Verkehrsstärken q_D und q_S , nach (PAPAGEORGIOU 2004a)

Die Funktion f_3 beschreibt den Zusammenhang der Verkehrsstärken q_D (angefordert) und q_S (max. aufnehmbar). Diese Funktion muss notwendigerweise den Zusammenhang abbilden, dass aus dem i -ten Straßenabschnitt maximal

der Verkehrsstrom abfließen kann, der vom Folgeabschnitt $i + 1$ aufgenommen werden kann.

Für zwei Streckenabschnitte ergibt sich das in Abbildung 6.18 dargestellte Blockschaltbild. Der dritte Straßenabschnitt ($i + 2$) ist hier nur über dessen Rückwirkung auf die Funktion $f_2(\rho_{i+2})$ angedeutet worden.

Für den ersten Straßenabschnitt sei der diesbezügliche einströmende Verkehrsfluss q_{ei} Stellgröße des Systems. In der Praxis kann man sich dies beispielsweise über eine Lichtsignalsteuerung realisiert denken.

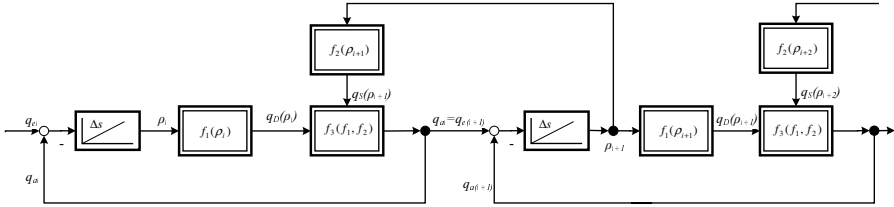


Abb. 6.18. Blockschaltbild für den Verkehrsfluss von zwei Streckenabschnitten

Um die Stabilität dieses laut 6.31 unendlichdimensionalen Systems beurteilen zu können, sei an dieser Stelle der Ansatz genannt, zunächst eine endliche Anzahl an Straßenabschnitten zu berücksichtigen und adäquate Randbedingungen für den letzten Straßenabschnitt einzuführen.

Des Weiteren muss bei der anschließenden Stabilitätsanalyse, deren Methoden aus der Regelungstechnik hinlänglich bekannt sind, eine maximale Verkehrsdichte berücksichtigt werden. Die Anwendung und Erweiterung dieser Methoden auf das System des Straßenverkehrs ist aktuelles Forschungsthema.

6.3.6 Zusammenhang zwischen mikro- und makroskopischen Verkehrsmodellen

In Abschnitt 6.3.3 wurde das Fundamentaldiagramm eingeführt, dass auf der Annahme beruht, dass eine Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit von der Dichte auf dem Abschnitt besteht. Hierzu wurde in Gleichung 6.18 ein linearer Zusammenhang angenommen.

Die extreme Darstellung, Verkehrsflüsse und -dichten auf einzelne Fahrzeuge abzubilden, führt zu einer Überführung des makroskopischen Ansatzes auf den mikroskopischen. Hierzu wird das weite Spektrum des unterschiedlichen Fahrerhaltens mit Hilfe von statistischen Verteilungen modelliert (vgl. (MARQUES und NEVES-SILVA 2006)).

Hierzu sei die Verkehrsdichte

$$\rho = \frac{1}{\Delta s + l} \quad (6.34)$$

mit

$$\begin{array}{ll} \Delta s & \text{Fahrzeugabstand} \\ l & \text{Fahrzeuglänge} \end{array}$$

Es sei weiterhin der Abstand abhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeuges

$$\Delta s = \Delta s_{\min} + \beta \cdot v \quad (6.35)$$

mit

$$\begin{array}{ll} \Delta s_{\min} & \text{Minimaler Fahrzeugabstand (bei maximaler Fahrzeugdichte)} \\ \beta & \text{Sensitivität für menschliche Abstandsregelung} \end{array}$$

Aus 6.34 und 6.35 folgt für die Geschwindigkeit v :

$$v(\rho) = \frac{1}{\beta} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{\max}} \right) \quad (6.36)$$

Durch die Vorgabe einer freien Geschwindigkeit v_f , die von der örtlichen Geschwindigkeitsbeschränkung und der Einhaltung dieser durch den Fahrer abhängig ist, kann ein ρ_f bestimmt werden (vgl. auch Abbildung 6.19).

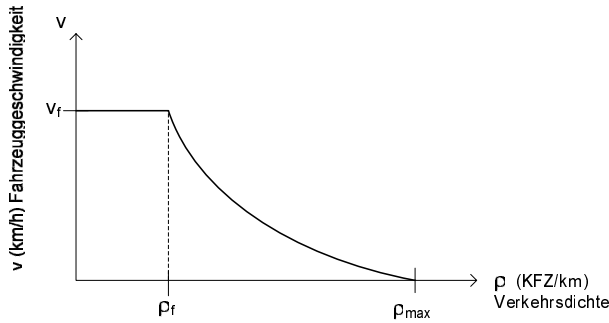


Abb. 6.19. v - ρ Diagramm für ein Fahrzeug

$$\rho_f = \frac{\rho_{\max}}{\beta v_f \rho_{\max} + 1} \quad (6.37)$$

Damit ergibt sich folgender Zusammenhang für die Geschwindigkeit (Gleichung 6.38) und damit für die Verkehrsstärke (6.39).

$$v(\rho) = \begin{cases} v_f, & \rho < \rho_f \\ \frac{1}{\beta} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{\max}} \right), & \rho \geq \rho_f \end{cases} \quad (6.38)$$

$$q(\rho) = \begin{cases} v_f \rho, & \rho < \rho_f \\ \frac{\rho}{\beta} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{\max}} \right), & \rho \geq \rho_f \end{cases} \quad (6.39)$$

Da die Fahrer unterschiedliches Verhalten zeigen, müssen v_f und β mit Hilfe statistischer Verteilungen beschrieben werden. Abbildung 6.20 zeigt ein v - ρ und q - ρ Diagramm, die durch Simulation mit 75 Fahrzeugen, die mit einer freien Geschwindigkeit v_f von 90 km/h mit einer Standardabweichung von 18 km/h fahren, wobei die Sensitivität für die Abstandshaltung β zu 0.6 s mit einer Standardabweichung zu 0.15 s angesetzt wurde, gewonnen wurden.

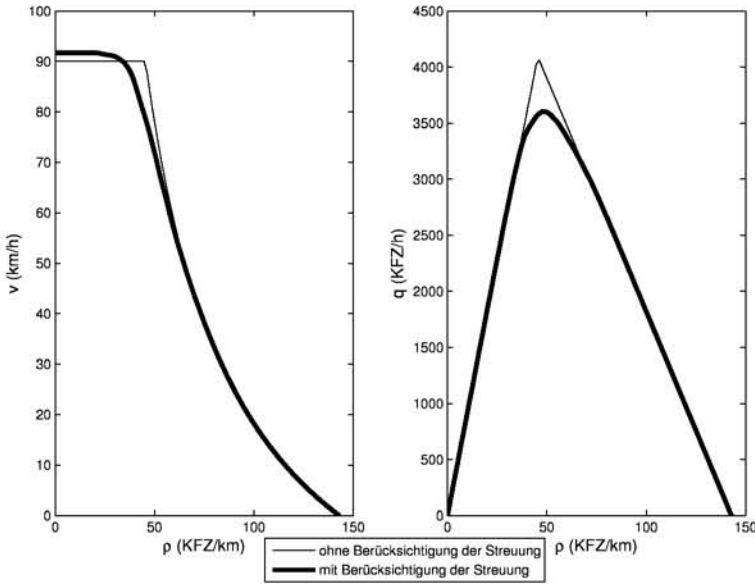


Abb. 6.20. v - ρ und q - ρ Diagramm (Mittelwerte) für 75 Fahrzeuge mit unterschiedlichem Fahrerverhalten

6.4 Konzepte zur Verkehrsflusssteuerung

In Abschnitt 6.3.2 wurde dargestellt, dass der Verkehrsfluss abhängig von der aktuellen Verkehrsdichte ist und ein maximaler Verkehrsfluss bei der so-

genannten kritischen Dichte existiert. Durch Verkehrsstauungen sowohl im innerstädtischen Bereich als auch auf Autobahnen wird der maximale Verkehrsfluss aber häufig nicht erreicht und damit die mögliche Transportkapazität nicht genutzt. Sowohl in Innenstädten als auch Autobahnen gilt, dass die Straßen aus Raum- und Kostengründen nicht beliebig vergrößert werden können. Daher können sowohl einfache als auch sehr komplexe Kontrollstrategien angewendet werden, um die Effizienz des Verkehrs auf den vorhandenen Straßen zu steigern.

Um diese Effizienzsteigerung zu erreichen, können vier Bereiche für Maßnahmen unterschieden werden: Maßnahmen an der innerstädtischen Infrastruktur, an der Infrastruktur von Autobahnen, Verkehrslenkungs- und Fahrerinformationsmaßnahmen sowie durch den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen. Der erste Bereich wird in Kapitel 8 zum Thema Kreuzungsmanagement ausführlich behandelt, der zweite Bereich in Abschnitt 6.4.2 dieses Kapitels, der dritte Bereich im Abschnitt 12.3.5 Verkehrslenkung und individuelle Fahrzeugnavigation sowie der letzte Bereich wurde in Abschnitt 6.2.5 beschrieben. In Abschnitt 6.4.1 wird die grundsätzliche Regelungsstruktur für Beeinflussungsmaßnahmen dargestellt.

6.4.1 Grundsätzliche Regelungsstruktur

Die grundsätzliche Regelungsstruktur zur Beeinflussung zeigt Abbildung 6.21. Auf der einen Seite liegt die reale Welt vor, welche durch das Verkehrsnetz bestimmt wird. Auf dieses Verkehrsnetz wirken Störungen, wie Nachfrage, Wetter, Unfälle und weitere. Daten über den Verkehrszustand können über Sensoren erfasst werden und in einem Rechensystem weiterverarbeitet werden. Das Verkehrsverhalten wird überwacht und unter Berücksichtigung der Zielvorgaben ggf. unter Einflussnahme eines Bedieners in Echtzeit geregelt. Mit den Ergebnissen werden die Stellglieder im Verkehrsnetz beeinflusst. Die Effizienz der Regelung hängt insbesondere von der Qualität der Sensorinformation und der verwendeten Regelungsstrategie ab.

6.4.2 Verkehrsbeeinflussung auf Autobahnen

Die auf Autobahnen verwendeten Maßnahmen lassen sich grob in drei Bereiche gliedern. Zum einen die Zuflusssteuerung, das sogenannte Ramp Metering, zum anderen die Beeinflussung durch Wechselverkehrszeichen. Diese Maßnahmen sind der Bahnführungsebene des in Abschnitt 6.1 vorgestellten Ebenenmodells zuzuordnen. Als weiterer Bereich ist die Verkehrslenkung und Fahrerinformation zu nennen, die in Abschnitt 12.3.5 behandelt wird. Diese Maßnahmen sind der Navigationsebene zuzuordnen.

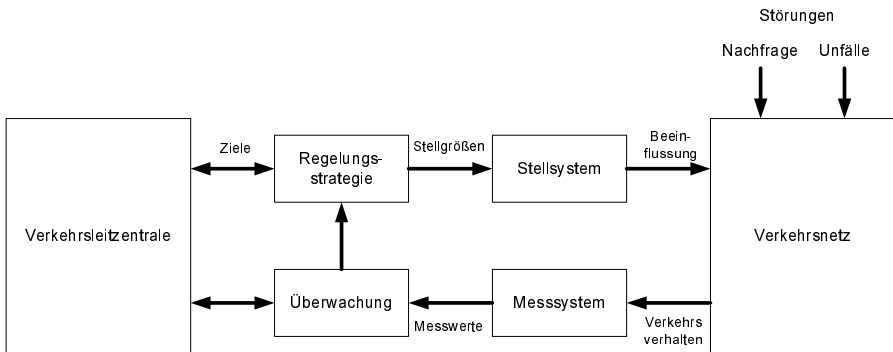


Abb. 6.21. Grundsätzliche Regelungsstruktur zur Verkehrsflusssteuerung für den Straßenverkehr

Zuflusssteuerung

Beim Ramp Metering wird durch Lichtzeichenanlagen auf Zufahrten von Autobahnen oder Autobahnkreuzen der Zufluss auf die Autobahn gesteuert. Abbildung 6.22 zeigt eine Schemadarstellung dieser Zuflussregelung.

Kommt es zum Stau auf der Autobahn sinkt der maximale Verkehrsfluss, der aus dem Stau herausfließenden Fahrzeuge. Dieses Phänomen wird in der Literatur als „capacity drop“ bezeichnet. Durch eine geeignete Regelung der zufließenden Verkehre durch Lichtzeichenanlagen in den Auffahrten können Staus auf der Autobahn vermieden werden und somit kann ebenfalls der „capacity drop“ vermieden werden.

Insgesamt können verschiedene positive Auswirkungen des Ramp Metering beobachtet werden:

- *Zunahme der Verkehrsstärke* auf der Autobahn aufgrund der Vermeidung oder Verringerung der Anzahl von Staus sowie
- *Zunahme der Verkehrssicherheit* durch sicheres Einfädeln.
- Es kann sogar von einer *Entlastung des Gesamtnetzes* ausgegangen werden. Da durch die Regelung letztendlich mehr Fahrzeuge über die Autobahn geführt werden können, werden mehr Fahrer von den Stadtstraßen auf die Autobahn wechseln, sodass der Stadtverkehr durch die effektivere Nutzung der Autobahnen sogar entlastet wird.

Innerhalb der Ramp Metering Strategien sind die Festzeitstrategien und die reaktiven Strategien zu unterscheiden (PAPAGEORGIOU und KOTSIALOS 2002).

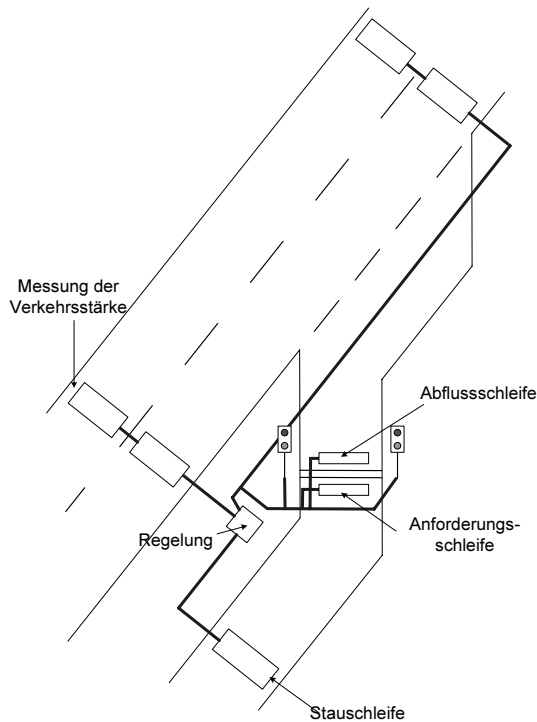


Abb. 6.22. Schemadarstellung der Zufussregelung durch Ramp Metering

Bei den *Festzeitstrategien* werden die Lichtzeichen, die den Verkehr auf die Autobahn zulassen oder unterbinden, mit einem zeitlich festen Signalprogramm betrieben. Die Zeitdauern für die unterschiedlichen Phasen werden dabei aus Verkehrsmessungen der Vergangenheit gewonnen. Diese sind in der Regel als Tagesganglinien für den Ablauf innerhalb eines Tages, in Wochenganglinien für den Ablauf innerhalb der Tage einer Woche und Jahresganglinien für den Ablauf innerhalb eines Jahres aufgezeichnet. Eine Berücksichtigung des unterschiedlichen Verkehrsaufkommens in Abhängigkeit der Tageszeit, des Wochentages oder besonderem Verkehrsaufkommen an bestimmten Tagen eines Jahres kann durch eine Zeitsteuerung erfolgen. Diese feste Vorgabe der Signalisierungszeiten kann nach unterschiedlichen Optimierungskriterien ausgelegt werden, hat aber unabhängig davon mehrere Nachteile, so sind z. B. die ermittelten Ganglinien Schwankungen unterworfen oder Unfälle oder Baustellen können den Verkehrsablauf in unerwarteter Weise stören.

Deutlich bessere Ergebnisse im Vergleich zur Steuerung erreichen die *reaktiven Strategien* zur Regelung des Zuflusses an den Auffahrten. Je nach Ausbau werden hierbei lokal oder über einen größeren Autobahnabschnitt verschiedene Messwerte und Kenndaten zur Berechnung der Schaltzeiten in Echtzeit

berücksichtigt. Messwerte können der aktuelle Verkehrszustand auf der Autobahn bzw. auf dem Autobahnabschnitt, der aktuelle Verkehrszustand auf den Auffahrten oder Informationen über Unfälle sein. Mindestens notwendig sind dafür Messungen der Verkehrsstärke vor und hinter der Auffahrt. Zusätzlich ist die Messung von ankommenden und abfahrenden Fahrzeugen in der Auffahrt notwendig (vgl. Abbildung 6.22). Bei der Auswahl der Messgrößen ist auf Ihre Eignung zu achten. Wie im Fundamentaldiagramm (Abbildung 6.11) zu erkennen ist, kann z. B. ein gemessener Verkehrsfluss nicht eindeutig einer Verkehrsdichte, sondern muss zwei unterschiedlichen Verkehrsdichten zugeordnet werden.

Eine zusätzliche Messung am Anfang der Zufahrt ermöglicht es die Regelung so auszulegen, dass ein Rückstauen in die Zubringer- bzw. Stadtstraßen vermieden wird. Als Kenndaten können für die Regelung die begrenzte Aufnahmekapazität der Auffahrten und der Autobahn hinterlegt werden.

Beispiel für eine reaktive lokale ramp-metering Strategie ist die „demand-capacity-strategy“, die folgendermaßen zeitdiskret beschrieben werden kann (vgl. Abbildung 6.23):

$$r(k) = \begin{cases} q_{cap} - q_{in}(k-1), & \text{if } o_{out}(k) \leq o_{cr} \\ r_{min}, & \text{else} \end{cases} \quad (6.40)$$

Vorgegeben wird für die Realisierung die Kapazität q_{cap} der Autobahn flussabwärts. Die Kapazität ist der maximale Verkehrsfluss, bevor es zu einem Zusammenbruch des fließenden Verkehrs kommt. In einfacher Annahme kann er zu q_{max} im Fundamentaldiagramm (vgl. Abbildung 6.11) angenommen werden. Eine Diskussion über den Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen beschreibt (BRILON et al. 2005), auf die hier nicht eingegangen wird. q_{in} ist der Verkehrsfluss, der vor der Auffahrt gemessen wird. Der Belegungsgrad (occupancy) o_{out} ist vergleichbar mit der Verkehrsdichte, ist allerdings eine prozentuale Angabe. Sowie es eine kritische Verkehrsdichte gibt (vgl. Abschnitt 6.3.3), gibt es dementsprechend einen kritischen Belegungsgrad o_{cr} . Die „demand-capacity-strategy“ sieht vor, genau so viele Fahrzeuge einfließen zu lassen, sodass die flussabwärts vorhandene Kapazität q_{cap} erreicht wird. Ist diese Kapazität bereits überschritten, wird nur noch ein minimaler Zufluss r_{min} zugelassen.

Eine andere häufig in der Literatur genannte Strategie ist ALINEA (ZHANG et al. 2001, PAPAGEORGIOU und KOTSIALOS 2002). Diese kann folgendermaßen beschrieben werden (vgl. Abbildung 6.23):

$$r(k) = r(k-1) + K_r[\hat{o} - o_{out}(k)] \quad (6.41)$$

K_r beschreibt dabei einen einzustellenden Reglerparameter. \hat{o} wird typischerweise zu o_{cr} festgesetzt. Durch den integrierenden Anteil reagiert dieser Regler

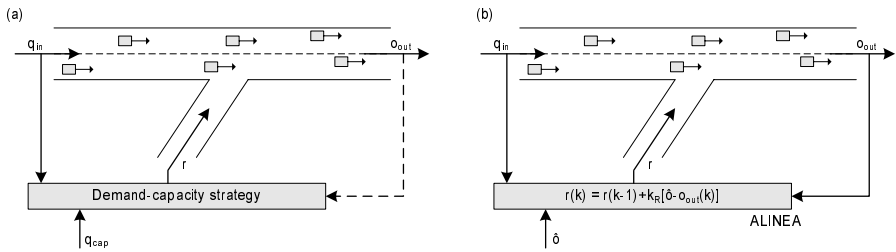


Abb. 6.23. Lokale Zuflussregelungsstrategien, a) Demand-capacity, b) ALINEA, nach (PAPAGEORGIOU und KOTSIALOS 2002)

sehr viel sanfter auf Regelabweichungen als die Umsetzung bei der demand-capacity-strategy mit einem schaltenden Regler. Aus den berechneten zulässigen Zuflüssen $r(k)$ müssen anschließend die Grünzeiten für die Signalisierung berechnet werden.

Als Erweiterung der vorstellten ALINEA Strategie kann METALINE angesehen werden, bei der auch die weiteren Zufahrten der Umgebung und die dort gemessenen Verkehrsdaten in die Regelung mit einbezogen werden.

Insgesamt kann der Erfassungsbereich soweit erweitert werden, sodass wir zu einer Netzregelung kommen. Hierbei können auch Werte von prognostizierten Fahrzeugströmen, und damit implizit über Verkehrsmodelle, die erwartete Verkehrssituation berücksichtigt werden. Großes Potential in der Regelung der Verkehrsströme ergibt sich durch eine Verbindung der Regelung des Autobahnnetzes mit der Netzregelung der Zubringer- und Stadtstraßen.

Wechselverkehrszeichensteuerung

Über Wechselverkehrszeichen können dynamisch Beschränkungen für einen Straßenabschnitt vorgegeben werden, z. B. Tempolimit oder gesperrte Fahrstreifen oder Informationen und Warnungen, z. B. Stauwarnungen oder Baustellenhinweise, an den Fahrer übermittelt werden.

In der Region Hannover betreibt z. B. die move Entwicklungs-, Infrastruktur und Servicegesellschaft mbH Wechselverkehrszeichen auf der A2. Durch Anzeige von Geschwindigkeitsbeschränkungen können die Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer angeglichen werden und damit ein einheitlicher Verkehrsfluss erzeugt und damit Staus vermieden werden. Die Geschwindigkeitsbeschränkungen sollen dynamisch anhand des aktuellen Verkehrszustandes visualisiert werden bzw. situationsabhängig komplett entfallen. Grundsätzlich kommt es dabei zu dem Konflikt, zum einen die mittlere Geschwindigkeit der einzelnen Fahrzeuge möglichst zu maximieren, auf der anderen Seite aber den Verkehrsfluss im Interesse aller Autofahrer zu maximieren, indem homoge-

ne Verkehrsflüsse mit geringer Streuung der Fahrzeuggeschwindigkeiten angestrebt werden. Das Maximum des Verkehrsflusses liegt etwa bei einer Dichte von 30 Fahrzeugen pro Kilometer, was einer mittleren Geschwindigkeit von etwa 80 km/h entspricht. Der Verkehrsfluss fällt bei höherer Geschwindigkeit geringer aus, da – aufgrund des Sicherheitsabstandes – die Fahrzeugdichte geringer ist (HELBING 1997) (vgl. auch Abschnitt 6.3.3). Außerdem können mit Hilfe von Wechselverkehrszeichen frühzeitig Warnungen über Baustellen, Unfälle oder Glatteis an die Fahrer übermittelt werden (MOVE 2004). Die in Abbildung 6.24 dargestellten Messungen zeigen, dass eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 120 km/h zu einem deutlich homogenen Verkehrsfluss beiträgt. So fahren über 80% der Fahrzeuge bei geschalteten 120 km/h im Geschwindigkeitsbereich von 100-130 km/h. Insgesamt fahren dabei nur ca. 3% der Fahrzeuge mehr als 130 km/h. In der Abbildung ist zu erkennen, dass ohne eine Geschwindigkeitsbeschränkung eine deutlich inhomogenere Geschwindigkeitsverteilung vorliegt. Wie in Abbildung 6.25 zu erkennen ist, kann die Regelung des Verkehrsablaufs durch Wechselverkehrszeichen auf Autobahnen zu einer deutlichen Abnahme der Unfallzahlen und einer verringerten Anzahl von Verletzten führen.

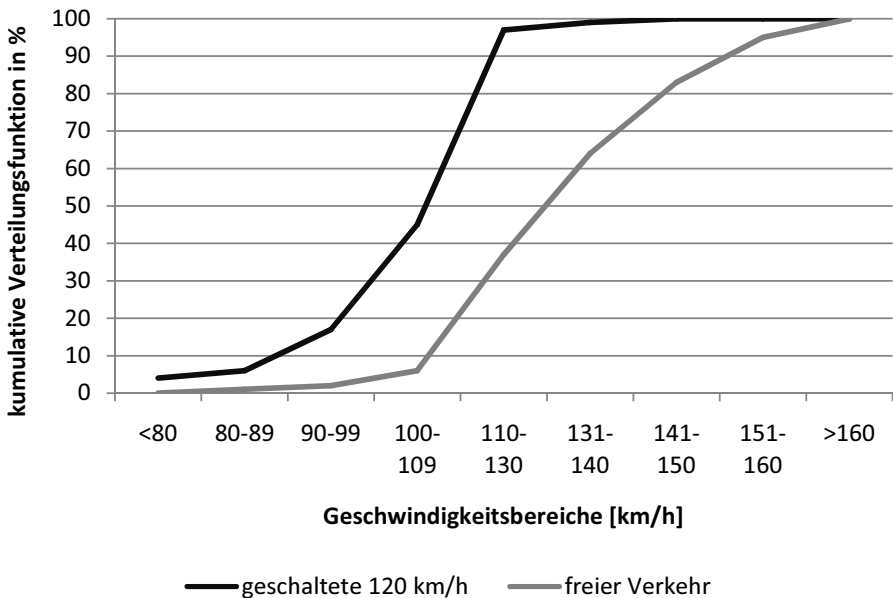


Abb. 6.24. Vergleich des Geschwindigkeitsverhaltens von Fahrzeugführern bei freiem Verkehr und geschaltetem 120 km/h (aufgenommen an einem Querschnitt einer Richtungsfahrbahn des Verkehrsleitsystems München Nord), nach (SCHNABEL und LOHSE 1997)

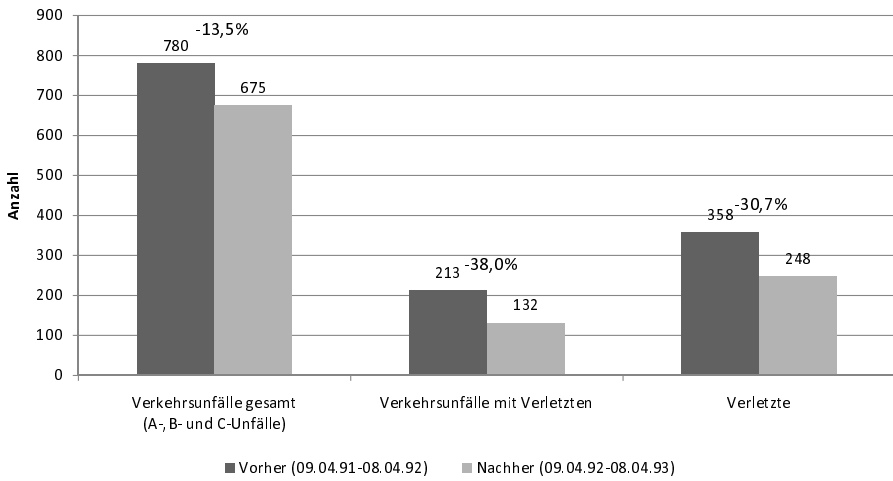


Abb. 6.25. Unfallentwicklung im Bereich einer Wechselverkehrszeichenanlage (A9 Nürnberg-München), nach (SCHNABEL und LOHSE 1997)

Verkehrsleittechnik

Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs

Schnieder, E. (Hrsg.)

2007, XX, 505 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-48296-3