

Von der Meßwerterfassung bis zur automatisch generierten Verkehrsmeldung

Kurzfassung

Vorraussetzung für zahlreiche verkehrstelematische Dienste ist die ortsgenaue und aktuelle Kenntnis der Verkehrslage. Vorgestellt wird ein interdisziplinäres Verfahren, das in der Lage ist, eine örtlich und zeitlich dynamische Beschreibung der Verkehrslage zu liefern, indem es Verkehrsdomänen einheitlichen Verkehrszustandes ausweist. Dabei ist es an keine feste Streckeneinteilung gebunden. Für diese Mustererkennungsaufgabe in einem dynamischen Prozeß, der auch chaotische Zustandsübergänge hervorbringen kann, werden die zugrundeliegenden Verkehrsdaten in verschiedene Verkehrszustände (gestaut, stockend, dicht, frei) klassifiziert. Dabei treten einige spezifische Probleme auf, die konsistent gelöst werden: 1) Es werden bzgl. Ort und Zeit stark lückenhafte Daten unterschiedlicher Quellen und verschiedener physikalischer Größen integriert („data fusion“). 2) Über morphologische Filterungen unter Erhalt des Orts-Zeitbezuges werden Daten von „Floating-Cars“ genutzt. 3) Verrauschte Daten werden gefiltert, ohne dabei signifikante Zustandsübergänge zu unterdrücken. 4) Dem subjektiven Empfinden der Verkehrsteilnehmer, daß Verkehrszustände nicht klar abgrenzbar sind, wird über eine Fuzzy-Klassifikation Rechnung getragen. 5) Über ein Wachstumsverfahren wird das Segmentationsproblem zur Abgrenzung der Verkehrsdomänen gelöst. 6) Es wird eine gute Stabilität der Verkehrsmeldungen erreicht trotz einer hohen örtlichen Auflösung, einer schnellen Reaktionszeit und der Unterscheidung von mehreren Verkehrszuständen. Die theoretischen Überlegungen werden durch Ergebnisse im realen Verkehr bestätigt.

Keywords: fuzzy-classification, data-fusion, dynamic segmentation, morphology, traffic announcements, traffic state, floating cars (FCD)

1 Einleitung und Problemstellung

Im Straßenverkehr, insbesondere auf den Autobahnen, können sich die Verkehrszustände sehr schnell ändern. Infolge des hohen Verkehrsflusses und der individuellen Fahrweise der Verkehrsteilnehmer entsteht eine Dynamik im Verkehr, die kaum vorausschauend erkannt werden kann. Dazu kommen Störungseinflüsse wie Geschwindigkeitsbegrenzungen, Änderung der Anzahl der Fahrspuren, Baustellen oder Unfälle. Daraus resultierende Verkehrsstörungen breiten sich dann aus und führen auch in größeren Entfernungen zur Beeinträchtigung des Verkehrs. Dadurch kommt es häufig zu Unfällen, weil die Verkehrsteilnehmer diese kritische Verkehrsdynamik dann einfach nicht mehr beherrschen. Neben diesem Sicherheitsaspekt entstehen in Staus auch täglich im Mittel große Wartezeiten mit den entsprechenden wirtschaftlichen Folgekosten.

Es besteht deshalb ein dringender Bedarf an rechtzeitigen und aktuellen Informationen über die Verkehrszustände in örtlich möglichst genau bezeichneten Streckenabschnitten. Dabei ist nicht nur das Stauereignis wichtig, sondern auch die streckenbezogene Angabe von Verkehrszuständen, welche einem Verkehrsstau in der Regel vorausgehen, z.Bsp. stockender oder dichter Verkehr. Es ist also eine differenzierte Erkennung der Verkehrszustände erwünscht und notwendig.

Die Verkehrsdomänen, in denen jeweils gleiche oder ähnliche Verkehrszustände herrschen, breiten sich aus, sie wachsen, teilen sich auf, wandern, gehen ineinander über, bis sie sich schließlich wieder auflösen, d.h. wieder freie Fahrt besteht. **Diese Domänen müssen also gefunden, klassifiziert, lokalisiert und dynamisch verfolgt werden.** Daran schließt sich das Meldungsmanagement an, das letztlich die Ergebnisse in einer für die Autofahrer geeigneten Form aufbereitet.

Vorgestellt wird ein robustes und vielseitig einsetzbares neues Verfahren zur automatischen Erzeugung von Verkehrsmeldungen ¹. **Es werden dazu interdisziplinäre Ansätze aus den Bereichen Mustererkennung, Segmentation, Data-Fusion und Morphologie kombiniert.**

Zunächst werden die Eigenschaften der zu verarbeitenden Meßdaten beschrieben sowie die dabei auftretenden Probleme beleuchtet. Danach werden andere Verfahren mit ähnlichen Zielsetzungen erläutert, bevor das neue Verfahren im einzelnen vorgestellt wird. Nachfolgend werden die erzielten Ergebnisse graphisch dargestellt. Zuletzt wird auf darauf aufsetzende, bereits existierende Anwendungen sowie weitere Anwendungsmöglichkeiten eingegangen.

2 Eigenschaften der Meßdaten

Es gibt derzeit im wesentlichen 3 Arten der Meßwerterfassung:

1. Induktionsschleifen in der Fahrbahn,
2. stationäre Erfassungssysteme (SES),
3. Daten von mobilen Fahrzeugen, die sogenannten „Floating-Car-Data (FCD)“.

Die Induktionsschleifen liefern in einem festen Takt von z.Bsp. einer Minute Verkehrsfluß- und Geschwindigkeitswerte. Der Verkehrsfluß steht dabei für die Zahl der Fahrzeuge pro Zeit. Es wird also ortsfest gemessen, und die Daten liegen synchron getaktet vor. Aus den Fluß- (f) und Geschwindigkeitswerten (v) lassen sich auch Werte für die lokale Dichte berechnen: $d = f/v$.

Die Detektoren im SES-Netz liefern die gleichen physikalischen Meßgrößen von festen Orten, aber, ökonomisch bedingt, asynchron, d.h. mit einem veränderlichen ereignisinduzierten Übertragungsverhalten in Abhängigkeit vom lokalen Verkehrsgeschehen. Diese Daten werden über Mobilfunk an eine Auswertezentrale gesendet. Dabei kommen Radar-, Infrarot- und Lasersensoren zum Einsatz.

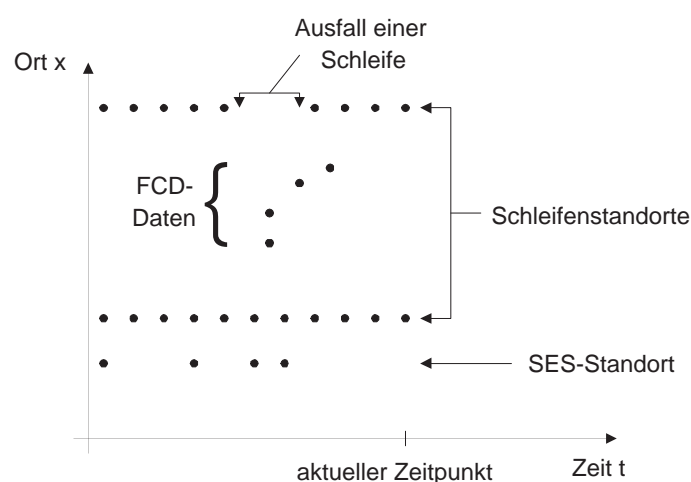


Bild 1: Skizze der Stellen über den Ort x und die Zeit t , an denen tatsächlich Meßwerte vorliegen

¹ Das Verfahren ist in verschiedenen Ländern zum Patent angemeldet.

Floating-Cars wiederum liefern nur Geschwindigkeitswerte, und zwar asynchron und von variablen Orten. Dazu speichern sie in einer Historie Fahrzeuggeschwindigkeiten zusammen mit den über GPS (Global Positioning System) ermittelten Ortskoordinaten und senden diese Daten ereignisgesteuert über Mobilfunk an eine Rechnerzentrale.

Die erfaßten Daten sind also aufgrund der endlichen Anzahl der Detektoren, deren unterschiedlichen Detektoreigenschaften, aber auch bedingt durch einzelne zeitweise Ausfälle der Detektoren, nur sehr lückenhaft und unregelmäßig über den Ort und die Zeit verfügbar (siehe Bild 1). Erschwerend kommt hinzu, daß die Meßwerte aufgrund der statistischen Eigenschaften des Verkehrs stark verrauscht und z.T. sogar inkonsistent zu den Daten anderer Detektorsysteme sind. Mit anderen Worten ist die statistische Vorhersagbarkeit der Daten an einem Ort und zu einer Zeit aus den Daten an einem anderen Ort und zu einer anderen Zeit nur für kurze Abstände und Zeitdifferenzen möglich. Dies ist in Bild 2 zu sehen, in dem verschiedene Meßgrößen in einem Stauereignis über die Zeit aufgetragen sind. Dabei ist zu beachten, daß die Übergänge normalerweise nicht so deutlich in Erscheinung treten wie in diesem ausgewählten Beispiel.

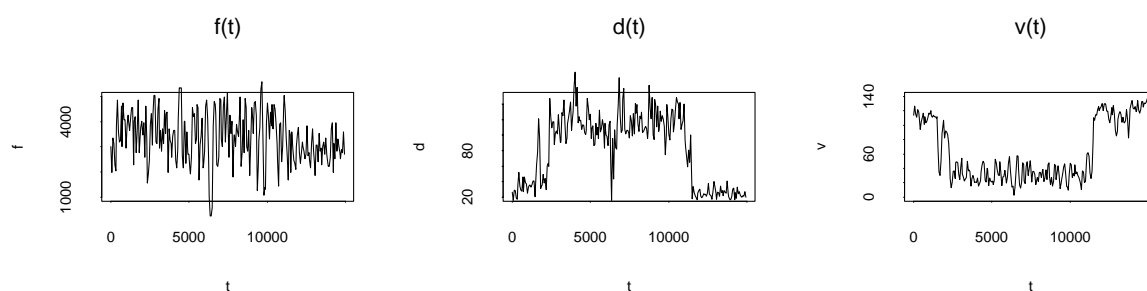


Bild 2: Zeitfunktionen der Meßwerte von Induktionsschleifen für ein Stauereignis
 Meßgrößen: Fluß (f), Dichte (d) und Geschwindigkeit (v)
 Fluß in KFZ/h; Dichte in KFZ/km; Geschwindigkeit in km/h

Die besondere Herausforderung besteht nun darin, in dieser lückenhaften und verrauschten Mischung aus Daten unterschiedlicher physikalischer Meßgrößen mehrere Verkehrszustände schnell, stabil und konsistent unterscheiden zu können, um daraus aktuelle Verkehrsmeldungen zu erzeugen. Dies ist eine Problemstellung der Mustererkennung in einem dynamischen Prozeß.

3 Vergleich mit anderen Verfahren

Andere Verfahren werden hier nur kurz angesprochen, ohne ins Detail zu gehen.

In einigen Verkehrsinformationszentralen (VIZ) wird derzeit ein Verfahren zur Erzeugung von Verkehrsmeldungen eingesetzt, das eine Schwelle von 50 km/h an einzelne Geschwindigkeitsmeßwerte von Induktionsschleifen anlegt. Wird diese Schwelle unterschritten, wird der gesamte Autobahnabschnitt von der vorhergehenden bis zur nachfolgenden Anschlußstelle als gestaut angenommen.

Dieses mit einer festen Schwelle arbeitende Verfahren trifft demnach eine binäre Entscheidung aufgrund jedes einzelnen Meßwertes: gestaut oder frei. Es ist bei verrauschten Meßwerten daher recht instabil. Um die Stabilität zu erhöhen, wird ein Stau erst gemeldet, wenn mindestens 10 Minuten lang Meßwerte auf einem betrachteten Autobahnabschnitt die Schwelle unterschreiten.

Es wird also versucht, die Stabilität dieser binären Entscheidungsfindung durch gemeinsame Betrachtung mehrerer Meßstellen auf einem Autobahnabschnitt in Verbindung mit einer Maßnahme im Meldungsmanagement aufzufangen. Zu beachten ist, daß dadurch dieses Verfahren an eine feste Streckeneinteilung, den Straßensegmenten zwischen den Autobahnanschlußstellen, gebunden ist.

Dieses lokale Verfahren ist nicht in der Lage, stabil mehr als nur zwei Verkehrszustände zu unterscheiden. Die Folge wäre eine Menge instabiler Verkehrsmeldungen.

Daneben gibt es streckenbezogene Verfahren [Krause96, Steinauer97], welche zur Steuerung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen gedacht sind. Betrachtet wird ein Straßensegment einer bestimmten Länge, an dessen Anfang und Ende jeweils Geschwindigkeiten und Verkehrsflüsse erfaßt werden. Das Prinzip dieser Verfahren ist eine Bilanzierung der Verkehrsflüsse zwischen Segmentanfang und -ende. Reißt z.Bsp. der Fluß am Ende ab, ohne daß der Zufluß am Anfang abnimmt, läßt dies auf eine Verkehrsstörung innerhalb des betrachteten Segmentes schließen.

Der Vorteil solcher streckenbezogener Verfahren im Gegensatz zu lokalen Verfahren liegt darin, daß Störungen erkannt werden können, bevor die Störung durch Rückstau eine Meßstelle erreicht und von einem Detektor direkt „gesehen“ werden kann.

Solche streckenbezogenen Verfahren haben jedoch auch erhebliche Nachteile:

- Sie stellen wesentlich höhere Anforderungen an die Eigenschaften der Meßdaten. Asynchrone Datenströme (SES) oder gar asynchrone Daten von variablen Orten (FCD) können prinzipiell nicht verarbeitet werden.
- Es treten Probleme bzgl. der Stabilität der Flußbilanzierung bei Meßfehlern auf. Detektorausfälle am Anfang oder Ende einer betrachteten Strecke führen gar zum Ausfall der Verfahren.
- Sie sind gebunden an eine fest vorgegebene Streckeneinteilung. Die reale Dynamik von Verkehrsdomänen kann damit nicht wiedergegeben werden.

Das nachfolgend vorgestellte Verfahren ist ein lokales Verfahren, das jedoch die zahlreichen Aspekte der dynamischen Verkehrszustandsbeschreibung berücksichtigt. Es ist wesentlich robuster und vielseitiger einsetzbar als die bilanzierenden Verfahren, kann jedoch mit diesen auch kombiniert werden, sofern die Datengrundlage einen Einsatz bilanzierender streckengebundener Verfahren zuläßt.

4 Spezifische Probleme einer dynamischen Verkehrszustandsbeschreibung

Die spezifischen Probleme bei der Erzeugung einer dynamischen Verkehrszustandsbeschreibung sind nachfolgend genauer erläutert.

Es sind Meßdaten, die

- örtlich und zeitlich lückenhaft sind,
 - aus unterschiedlichen Erfassungssystemen stammen und inkonsistent sein können,
 - verschiedene physikalische Größen repräsentieren und
 - stark statistischer Natur sind (verrauscht),
- konsistent zu einer stabilen Gesamtaussage zu verarbeiten.

Dazu sollen nicht nur zwei, sondern mehrere Verkehrszustände stabil unterschieden werden. Nach dem subjektiven Empfinden der Verkehrsteilnehmer lassen sich die Verkehrszustände aber gar nicht klar gegeneinander abgrenzen.

Anschließend soll die Dynamik des Verkehrsgeschehens in Form von Verkehrsmeldungen wiedergegeben werden. Da Verkehrsdomänen örtlich und zeitlich variabel sind, stellt sich hier nicht nur ein dynamisches Segmentationsproblem, sondern sie müssen auch über Ort und Zeit stabil verfolgt werden. Es ist dazu eine Beschreibungsform von Verkehrsdomänen erforderlich, die einen Ähnlichkeitsvergleich zwischen Verkehrsdomänen unter Berücksichtigung des herrschenden Verkehrszustandes erlaubt. Hinzu kommt, daß eine Bindung an eine feste Streckeneinteilung, wie sie bei anderen Verfahren gegeben ist, vermieden werden muß, da sonst die wirkliche Verkehrsdynamik nicht adäquat erfaßt und beschrieben werden kann.

Die Stabilität ist dabei mehrfach angeklungen. Die Kunst liegt darin, eine hohe Meldungsstabilität zu erreichen trotz der gegensätzlichen Forderungen nach

- einer hohen Ortsauflösung der Verkehrsbeschreibung,
- einer schnellen Reaktionszeit auf veränderte Verkehrsverhältnisse sowie
- der Unterscheidung möglichst vieler Verkehrszustände.

5 Beschreibung von Verkehrsmustern

Verkehrszustände stellen Verkehrsmuster dar, für die bestimmte örtliche und zeitliche Eigenschaften der gemessenen oder auch verarbeiteten Verkehrsdaten vorliegen. **Verkehrsdomänen** sind Strecken, auf denen die vorliegenden Verkehrszustände über eine gewisse Ausdehnung und eine gewisse Dauer einander ähnlich sind.

Es ist nun eine Beschreibungsart von Verkehrszuständen bzw. -mustern erforderlich, die es erlaubt, für diese

- ein kontinuierliches Ähnlichkeitsmaß zu definieren und
- eine Klasseneinteilung zur Unterscheidung verschiedener Muster angeben zu können.

Üblicherweise werden zu diesem Zweck die Meßdaten in eine merkmalsbasierte Beschreibung überführt. Die Merkmale bzw. Merkmalsvektoren stellen dann Punkte in einem Merkmalsraum dar. Diese Darstellung gestattet es, ein Ähnlichkeitsmaß über den euklidischen Abstand im Merkmalsraum zu definieren und eine Klasseneinteilung durch räumliches Aufteilen des Merkmalsraumes in Gebiete vorzunehmen (Bild 3). Die Klassen stehen hier für die zu unterscheidenden Verkehrszustände: gestaut, stockend, dicht und frei.

Es sind nun noch geeignete Merkmale und eine geeignete Klasseneinteilung des Merkmalsraumes zu bestimmen (siehe Abschnitte 6.1 und 6.2).

6 Verfahren zur automatischen Erzeugung von Verkehrsmeldungen

Vorgestellt wird ein lokales Verfahren zur automatischen Erzeugung von Verkehrsmeldungen. Es bietet folgende Vorteile:

- Mehrere Verkehrszustände können schnell und stabil unterschieden werden. Entsprechend werden stabile und aktuelle Verkehrsmeldungen erzeugt.
- Es können auch zeitlich asynchrone Meßdaten sowie Daten von mobilen Sensoren (FCD) konsistent verarbeitet werden.
- Unterschiedliche physikalische Meßgrößen werden konsistent zu einer Aussage über den Verkehrszustand zusammengeführt.
- Die örtliche Auflösung und die zeitliche Reaktionszeit sind in weiten Grenzen parametrierbar, und das Verfahren ist an keine vorgegebene Streckeneinteilung gebunden.
- Im Verlauf einer Verkehrsmeldung darf sich der Verkehrszustand, den sie ausweist, ändern.
- Es wird eine stabile dynamische Erkennung und Verfolgung von Verkehrsdomänen erreicht.

Das Ergebnis sind qualitativ hochwertige Verkehrsmeldungen: sie sind aktuell, stabil, und enthalten genaue Längen- und Positionsangaben. Vergleichbare Verfahren, welche dies leisten, gibt es zur Zeit nicht.

6.1 Meßdatenvorverarbeitung und Merkmalsbildung

Aus den einzelnen Verkehrsmeßwerten ist die Verkehrslage nicht erkennbar. Dazu müssen die Größen und Änderungen der Verkehrsmeßwerte über ein bestimmtes Zeitintervall betrachtet werden.

Durch diese „Integration“ darf der so ermittelte Verlauf der Verkehrsmeßwerte jedoch nicht seine Aktualität verlieren.

Es ist ferner notwendig, Verkehrsmeßwerte von unterschiedlichen Sensoren zu verarbeiten, die ortsfest oder mobil sein können, synchrone, asynchrone oder ereignisinduzierte Meßwerte liefern, und deren Meßwerte auch lückenhaft und sehr verrauscht sein können.

Es ist außerdem wünschenswert, daß das Verfahren nicht an eine vorgegebene Streckeneinteilung gebunden ist, also streckenunabhängig arbeitet und auch Streckenkenntnisse über Spurzahl, Baustellen, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Topologie der Streckenabschnitte usw. nicht unbedingt erforderlich sind.

Ziel ist die Zusammenfassung von Verkehrsdaten verschiedenen physikalischen Inhalts zu resultierenden Merkmalsvektoren, welche die Verkehrslage eindeutig charakterisieren. Zusätzlich ist auch eine Unterscheidung zwischen den Zuständen „kein Verkehr“ und „Totalstau“, welche die gleichen Meßwerte ergeben, erforderlich.

Zunächst werden fehlerhafte Daten eliminiert. Konnte von einem Detektor mangels Verkehr kein sinnvoller Meßwert bestimmt werden, wird ein definierter Wert, der dies anzeigt, geliefert. Die Meßwerte fehlen aber auch dann, wenn eine Vollsperrung des Verkehrs vorliegt. In beiden Fällen ist der Fluß null. Für die Entscheidung, welche Situation wirklich vorliegt, dient ein Gedächtnis über den vorgängigen Verlauf der Geschwindigkeit und des Flusses. Da innerhalb eines Staus in kleinen Bereichen sehr kleine Fluß- und Geschwindigkeitswerte auftreten können, werden Werte unterhalb einer Mindestgröße nicht zur Dichteberechnung (Dichte = Fluß/Geschwindigkeit) herangezogen.

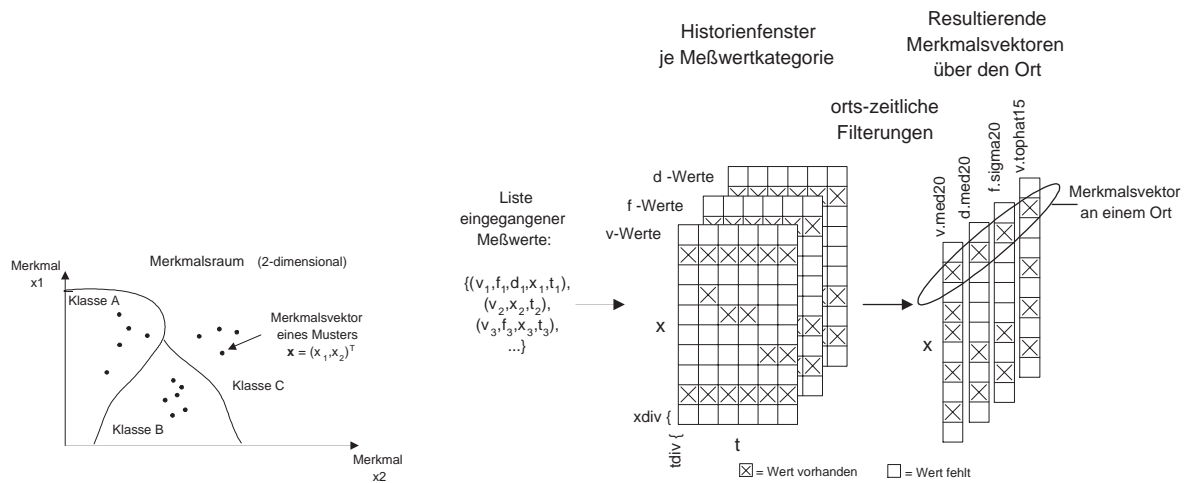


Bild 3: Skizze eines Merkmalsraumes

Bild 4: Schematische Darstellung der Verarbeitungskette: Eingehende Verkehrsmeßwerte: v =Geschwindigkeit, f =Fluß, d =Dichte, Eintrag in die Historienfenster über Ort x und Zeit t , Merkmalsvektoren je Ort nach den orts-zeitlichen Filterungen der Meßwerte

Alle Meßvektoren werden nun über gleitende „Historienfenster“ je Meßwertkategorie - Geschwindigkeit v , Verkehrsfluß f und Dichte d - von z.Bsp. 20 min weitergegeben. Die weiter zurückliegenden Werte werden gelöscht. Der Ort ist in diesen Historienfenstern in kleinen Intervallen von z.Bsp. 200m diskretisiert, die Zeit in Intervallen von z.Bsp. 1 Minute. Die Historienfenster werden im Takt der synchronen Detektordaten von z.Bsp. 1 min weitergeführt. So erhält man die Meßwerte als gleitende Zeitfunktionen unter - und das ist essentiell für die Einbeziehung von FCD-Daten - Erhaltung des Orts-Zeit-Bezugs (Bild 4 links und Mitte).

Da die Meßwerte stark statistischer Natur sind (Bild 2), wird eine örtliche und zeitliche Filterung der Geschwindigkeits- und Dichte-Werte durchgeführt, um die Schwankungen zu senken, ohne jedoch signifikante Zustandsübergänge zu unterdrücken. Die Analyse der Zeitfunktionen der Meßvektoren zeigt, daß dazu ein Medianfilter besser als ein Mittelungsfiler geeignet ist, weil es die Flankensteilheit besser erhält (Bild 5).

Als Merkmal für den stockenden Verkehr wird die Standardabweichung der Flußwerte aus dem Historienfenster und die dilatierte Tophat-Funktion der Geschwindigkeiten mit z.Bsp. 15 min Breite herangezogen (Bild 6), um Maße für die zeitliche Schwankung des Verkehrs zu erhalten. Je größer diese beiden Merkmale sind, desto eher liegt stockender Verkehr vor.

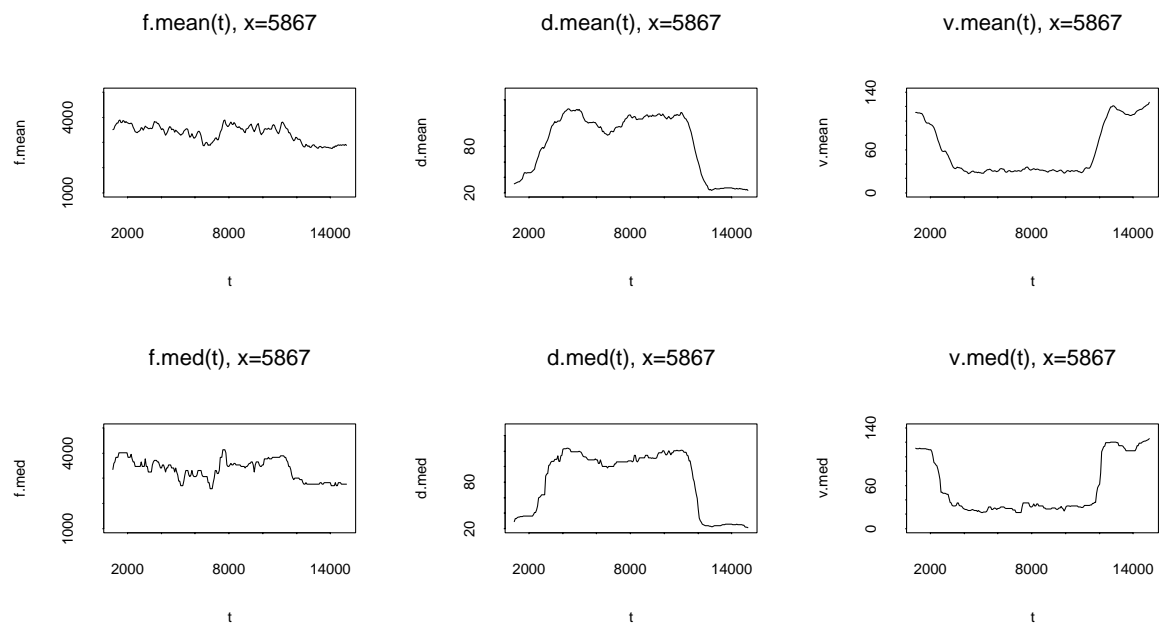


Bild 5: Gefilterte Zeitfunktionen aus Bild 2: oben Mittelwert, unten Median

Für die Tophat-Funktion, ein morphologisches Filter, gilt [Serra82]:

$$\text{Tophat}(v) = v - \text{Opening} \quad \text{mit} \quad \text{Opening}(v) = \text{Dilatation}(\text{Erosion}(v)).$$

Dilatation und Erosion sind ebenfalls morphologische Filter.

Die Filter müssen dabei auch mit Meßwertlücken, d.h. bei fehlenden Meßwerten an manchen Orts- und Zeitkoordinaten innerhalb der Historienfenster, funktionieren. Bei den morphologischen Rangfolgeoperationen, Median, Erosion und Dilatation, aus denen auch die Tophat-Filterung besteht, ist diese Notwendigkeit aber leicht zu berücksichtigen: nicht vorhandene Meßwerte werden weggelassen. Zur Berechnung der Standardabweichung der Flußwerte werden ebenfalls nur vorhandene Werte verwendet.

Nach dieser Verarbeitung (Bild 4 rechts) liegt für jeden Ort x der resultierende Merkmalsvektor vor: $(v.med20, d.med20, f.sigma20, v.tophat15)^T(x)$.

Dabei bedeuten:

- $v.med20$ = Geschwindigkeitsmeßwerte mediangefiltert mit Fensterbreite 20 min;
- $d.med20$ = Dichtewerte median-gefiltert, Fensterbreite 20 min;
- $f.sigma20$ = Standardabweichung der Flußwerte innerhalb 20 min;
- $v.tophat15$ = Geschwindigkeitswerte tophat-gefiltert mit Fensterbreite 15 min.

Die Diskretisierung des Ortes und der Zeit erlaubt es, im Gegensatz zu anderen Verfahren, fein aufgelöst ohne vordefinierte Strecken zu arbeiten, und der Orts-/Zeitbezug in den Historienfenstern ermöglicht die konsistente Einbindung von FCD-Daten. Darüber hinaus sind die verwendeten Filterungen geeignet, orts-/zeitliche Eigenschaften in den lückenhaften Daten zu extrahieren.

Diese Merkmalsbeschreibung ist die notwendige Voraussetzung für darauf aufsetzende höherwertige Verfahren zur orts- und zeitaufgelösten Zustandsklassifikation des Verkehrs.

6.2 Fuzzy-Klassifikation

Ausgehend von der lokalen Verkehrssituation, welche durch die Merkmalsvektoren beschrieben vorliegt, wird nun eine Klassifikation in die verschiedenen Verkehrszustandsklassen vorgenommen. Dazu ist jedoch eine Definition der Verkehrszustände notwendig.

Bereits der Versuch einer verbalen Beschreibung zeigt jedoch, daß diese subjektiv gefärbt und diffus ist und die Grenzen zwischen den Verkehrszuständen nicht eindeutig sind, sondern qualitativer Art über jeweilige Vergleiche mit den anderen Verkehrszuständen vorgenommen werden. Z.Bsp. ist die erreichbare Geschwindigkeit bei stockendem Verkehr niedrig, kann aber höhere Werte erreichen als bei einem Stau.

Diesem Problem, daß die Definition der Verkehrszustände nur „unscharf“ möglich ist, wird durch eine Fuzzy-Klassifikation Rechnung getragen. Dazu wird die Klasseneinteilung des Merkmalsraumes nicht über direkte Trennfunktionen vorgenommen, sondern ein Ansatz gewählt, der Diskriminanzfunktionen für jede Klasse verwendet [Duda72]. Ein Muster wird danach derjenigen Klasse zugeordnet, deren Diskriminanzfunktion für die Merkmale dieses Musters größer ist als die übrigen Diskriminanzfunktionen.

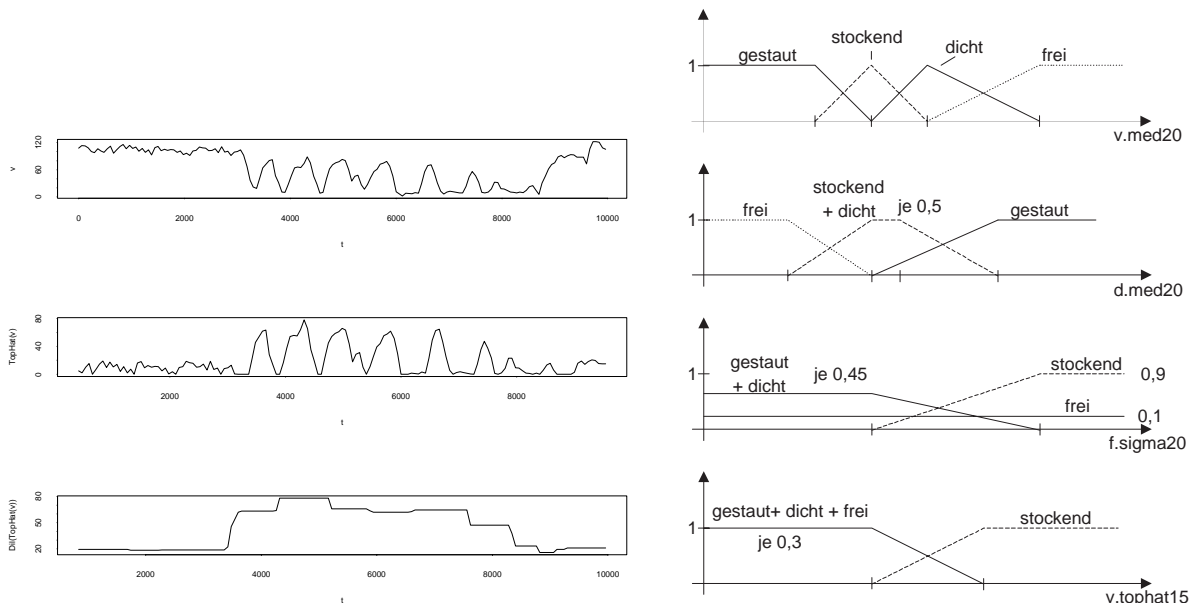


Bild 6: Dilatierte Tophat-Funktion der Breite 15 Minuten angewendet auf die Geschwindigkeitsmeßwerte bei stockendem Verkehrszustand; von oben: v , $Tophat(v)$, $Dilation(Tophat(v))$

Bild 7: Beispiel einer Fuzzy-Einteilung eines Merkmals

Als Diskriminanzfunktionen werden nun Fuzzy-Funktionen gewählt, welche eine Fuzzy-Einteilung der Merkmalsachsen bewirken (siehe Bild 7). Die Teilfunktionen zeigen an, wie „sicher“ bzw. mit welcher „Wahrscheinlichkeit“ ein bestimmter Zustand bei Vorliegen eines herrscht. Dabei sind die Grenzen unscharf und dürfen/sollen ineinander übergehen. Dies dient der Stabilität der Klassifikation,

da dadurch eine kontinuierliche Beschreibung gradueller Unterschiede erst möglich ist. Harte Schwellen an ein Merkmal, beispielsweise der Geschwindigkeit, anzulegen ist also völlig unpassend für dieses Problem. Die Information über den graduellen Verlauf der Zustände über Ort und Zeit ging dabei verloren.

Diese Wahrscheinlichkeitsbeschreibung bietet aber noch einen weiteren wichtigen Vorteil: Klassifikationsergebnisse für unterschiedliche physikalische Merkmalsgrößen lassen sich nun konsistent durch z.Bsp. eine Summation mit anschließender Normierung zusammenfassen (Bild 8). Die verschiedenen Merkmale tragen also alle zur Gesamtbewertung bei. Dazu müssen nicht immer alle Merkmale an einem Ort vorhanden sein. Das Verfahren wertet nur die Merkmale aus, für die auch geeignete Meßwerte zur Berechnung zur Verfügung stehen (SES: keine regelmäßigen Meßwerte; FCD: keine Flußwerte). Es wurde zuvor in Simulationen geprüft, daß jedes Merkmal für sich alleine genommen auch stabile und sinnvolle Aussagen generiert. An dieser Stelle können übrigens auch Ergebnisse anderer Verfahren, z.Bsp. den zuvor beschriebenen streckenbasierten Bilanzverfahren, an weiteren Orten zwischen den Meßstellen einfließen.

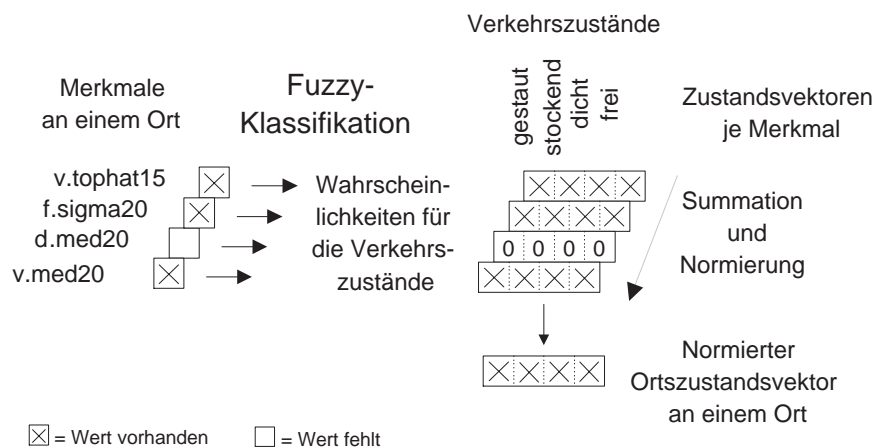


Bild 8: Bestimmung des normierten Ortszustandsvektors an einem Ort x aus den Zustandsvektoren je Merkmal, die sich aus den Merkmalen durch Fuzzy-Klassifikation ergeben.

In Bild 8 ist die Klassifikation der Merkmale noch einmal zusammenfassend skizziert. Resultat ist eine Zustandsbeschreibung in Form eines Ortszustandsvektors an den Orten, an denen Merkmale aus vorhandenen Meßwerten gebildet werden konnten. Die Komponenten dieser Vektoren geben die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen der betreffenden Verkehrszustände am jeweiligen Ort an.

Wichtig ist, daß hier noch keine „harte Entscheidung“ für einen einzigen Zustand getroffen wird. Es ist also noch die komplette Information, besonders bei graduellen Zustandsübergängen, in den Ortszustandsvektoren enthalten. Dies ist wichtig für die nachfolgende Weiterverarbeitung.

6.3 Extrapolation der Ortszustandsvektoren

Nun liegen an einigen Orten des Rasters punktuell Zustandsvektoren vor mit vier Komponenten, je eine für die vier zu unterscheidenden Zustände. Um nun die dazwischen liegenden Lücken in der Zustandsbeschreibung einer Straße zu überbrücken, werden die punktuellen Einzelaussagen durch eine Gaußfilterung über die Ortskoordinate des Rasters extrapoliert. Dabei wird über jede Komponente der Zustandsvektoren separat gefiltert. Dadurch werden die punktuell vorliegenden sicheren Aussagen auf ihre Nachbarschaft ausgedehnt, aber zunehmend abgeschwächt. Die Orte des Rasters, an denen Aussagen über den Verkehrszustand vorliegen, dienen also als Stützstellen für die komponentenweise Gaußfilterung (siehe Bild 9). Über die Parameter dieser Gaußfilterung kann man steuern, wie fein aufgelöst die Meldungsgenerierung arbeiten soll.

Um die Stabilität der Erkennung der differenzierten Verkehrszustände noch weitgehend zu sichern, wird zusätzlich an jedem Ort eine komponentenweise autoregressive Mittelung der Zustandsvektoren mit den Werten des vorhergehenden Aktualisierungslaufes durchgeführt [Papoulis91]. Diese gleitende zeitliche Glättung auf der Basis der kontinuierlichen Zustandsbeschreibung an jedem Ort ist wesentlich wirksamer als eine künstlich über die Zeit erzwungene Stabilität in nachfolgenden Verarbeitungsschritten.

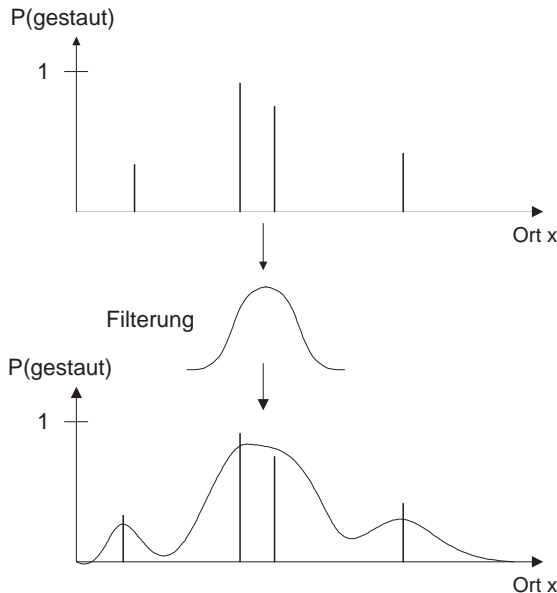


Bild 9: Zustandsextrapolation der Komponenten der lokal vorhandenen Ortszustandsvektoren über den Ort x mit z.Bsp. einem lokalen Gaußfilter; Hier ist lediglich die Extrapolation einer Vektor-Komponente skizziert. Entsprechend ist mit den anderen Komponenten zu verfahren.

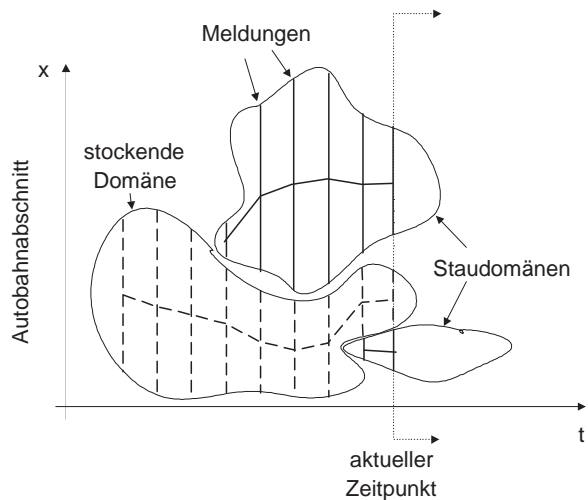


Bild 10: Skizze zur Visualisierung der Ergebnisse: Die zeitliche Zuordnungen der durch die Meldungen ausgewiesenen Verkehrsdomänen zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten sind durch die horizontal verlaufenden Verbindungslinien dargestellt. Meldungen werden hier als senkrechte Linien dargestellt. Siehe hierzu auch Bild 11.

6.4 Dynamische Domänensegmentation

Nun stellt sich ein dynamisches Domänensegmentationsproblem, da das Verfahren die tatsächliche orts- und zeitaufgelöste Dynamik des Verkehrsgeschehens uneingeschränkt von einer vorgegebenen Streckeneinteilung erfassen soll. Dies wird durch ein Domänenwachstumsverfahren, das ausgehend von einem Ort sukzessive Orte mit ähnlichen Verkehrszuständen zu einer Domänenstrecke zusammenfaßt, erreicht.

Auf der über den Ort kontinuierlich veränderlichen Zustandsbeschreibung werden um gestaute Orte herum die Orte zusammengefaßt, deren Zustand ähnlich gestaut ist. Danach wird dies für die verbleibenden Orte und Verkehrszustände entsprechend vorgenommen. Die Zustandsvektoren der so ermittelten Domänen werden aus den Zustandsvektoren der einzelnen Orte der Domäne durch Summation gebildet. Es liegt dann eine Einteilung der betrachteten Straße in Verkehrsdomänen, die an keine Anschlußstellen gebunden sind, vor. Im nachfolgenden Meldungsmanagement können diese Domänen dynamisch verfolgt werden. Sie sind gekennzeichnet durch einen Anfangs- und Endpunkt sowie einen Domänenzustandsvektor.

Bis dahin ist die Verarbeitung der Ortszustandsbeschreibungen durch die Filterung und die Domänenbildung kontinuierlich, d.h., es werden keine diskreten bzw. harten Entscheidungen getroffen. Dadurch ist das Verfahren so stabil. Es ist also noch die komplette Information, wichtig besonders bei

graduellen Zustandsübergängen, in den Zustandsvektoren enthalten. Erst auf dieser Basis kann das nachfolgende Meldungsmanagement über ein kontinuierliches Ähnlichkeitsmaß, das die Orts- und die Zustandsbeschreibung der Domänen berücksichtigt, stabil aufsetzen.

6.5 Domänenverfolgung und Meldungsmanagement

Die ermittelten aktuellen Domänen werden mit den im vorausgegangenen Aktualisierungslauf festgestellten Domänen, die jeweils in einer Meldeliste gespeichert worden sind, verglichen. Dabei werden die neu gefundenen Domänen den bereits vorhandenen Domänen über ein Ähnlichkeitsmaß zugeordnet. Basis des Ähnlichkeitsmaßes sind die kontinuierlichen Domänenzustandsvektoren sowie Lage und Länge der Strecken, die von den Domänen eingenommen werden. Es läßt auch einen zeitlich graduellen Übergang des Verkehrszustandes im Lebenslauf einer Meldung zu.

Nach diesen Zuordnungen zwischen Domänen und Meldungen wird jeweils geprüft, welche bisherigen Meldungen in der Meldungsliste bestehen bleiben, ob es Änderungsmeldungen gibt, weil sich die Lage und/oder die Länge der bisherigen Domänen durch die Zuordnung neu gefundener Domänen verändert haben, und welche nicht zuordenbaren Domänen neu gemeldet werden müssen. Für neue Domänen wird gegebenenfalls eine Neumeldung erzeugt, für zu bestehenden Meldungen zugeordnete Domänen werden die Meldungsattribute aktualisiert und gegebenenfalls Änderungsmeldungen erzeugt, und Meldungen, die keiner Domäne oder nur einer Domäne mit dem Verkehrszustand „frei“ zugeordnet werden konnten, werden gelöscht. Dabei kann über Parameter gesteuert werden, wann Neu- und Änderungsmeldungen als signifikant betrachtet und tatsächlich ausgeführt werden. Damit kann die Meldungszahl reduziert werden, ohne die interne Information für die Domänenbildung und -verfolgung des Verfahrens zu beschneiden. Erst jetzt wird für die Meldungsausgabe endgültig der Verkehrszustand festgesetzt, also der Verkehrszustand, welcher der maximalen Komponente des Domänenzustandsvektors entspricht.

Das Resultat des Verfahrens ist eine mit jedem Aktualisierungsschritt dynamische Verfolgung der Domänen mit ähnlichen Verkehrszuständen und eine ständig aktualisierte Meldungsliste (Bild 10).

6.6 Visualisierung

Zur optischen Überwachung des Verfahrens während des Betriebs sowie für die bildhafte Darstellung der Verkehrszustände auf Straßenabschnitten werden die Meldungsergebnisse des Verfahrens visualisiert und mit den ermittelten Verkehrsmeßwerten verglichen. Dazu werden die Verkehrsmeßwerte in dem betrachteten Straßenabschnitt durch unterschiedliche Grauwerte über der Zeit dargestellt. In diesem Koordinatensystem werden auch die Meldungen der Verkehrszustände bzw. die Domänen dargestellt. Mit der über das Bild wandernden Zeitachse kann man die Verkehrslage und ihre Dynamik und aus der Kongruenz zwischen Messung und Meldung die Güte der Verfahrensergebnisse erkennen (Bild 10 und Bild 11).

Über den gesamten Ort wird der Algorithmus wiederholt über die Zeit ausgeführt. In den Bildern wandert der Aktualisierungsabschnitt also von links nach rechts. Dazu werden die gespeicherten Werte links des aktuellen Auswertzeitpunkts betrachtet. Die Ortsbereiche von gefundenen Domänen werden durch senkrechte Linien dargestellt. Sind für diese Domänen Meldungen aktiviert, so wird dies durch einen weißen Fleck im Domänenschwerpunkt gekennzeichnet. Ebenfalls wird dann eine Verbindungslinie zwischen den Domänenschwerpunkten gezeichnet, welche die zeitliche Zuordnung durch das Verfahren zur dynamischen Verfolgung der Domänen visualisieren. Ebenfalls zu sehen sind kleine Rauten, welche die lokalen Verkehrszustände an den Orten anzeigen, an denen direkt Verkehrsmeßwerte vorliegen.

Im Hintergrund sind grau die Verkehrsmeßwerte angezeigt. In den Bildern sind z.Bsp. die Geschwindigkeitswerte zu sehen, wobei dunkle Grauwerte niedrige Geschwindigkeiten wiedergeben, und ent-

sprechend helle Grauwerte für hohe Geschwindigkeiten stehen. Man sieht sofort, wie die erzeugten Meldungen im Verhältnis zu den Verkehrsmeßwerten in Ort und Zeit liegen.

In der Verkehrssituation, welche in Bild 11 links dargestellt ist, wird die Domäne links unten beispielsweise als dicht gemeldet. Diese Meldung ändert sich kurz danach in gestaut (unterste quer verlaufende Linie). Diese Domänen können bis zum Ende des betrachteten Zeitabschnitts über einen längeren Bereich in x und t stabil verfolgt werden. Oberhalb, bei größeren x-Werten, wird etwas später eine Domäne stockenden Verkehrs erkannt (mittlere Linie), die sich ebenfalls sehr stabil über die Zeit verfolgen läßt. Noch darüber wird etwas später eine kleinere Domäne dichten Verkehrs erkannt. In Bild 11 rechts ist ein Überlaststau als ein weiteres Beispiel gezeigt.

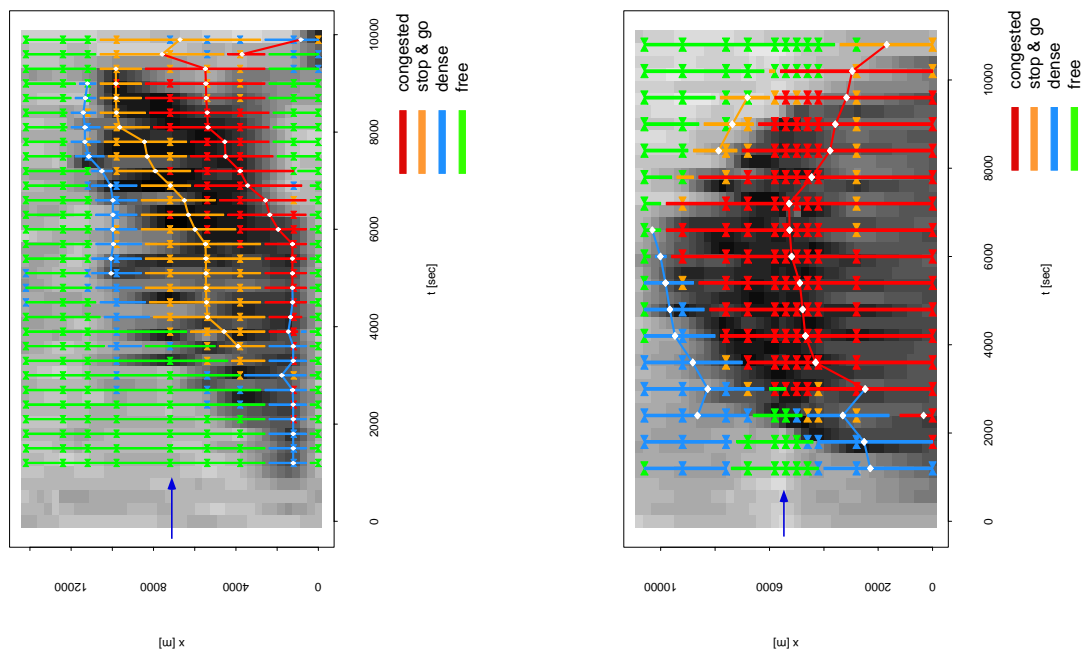


Bild 11: Erzeugte Verkehrsmeldungen am Beispiel zweier Stauereignisse bei gleichzeitiger Darstellung der Geschwindigkeitsmeßwerte im Hintergrund

Diese Darstellungsart gibt einen optischen Eindruck über die Verkehrsdynamik und einen Überblick über die gesamte Verkehrslage des Straßenverkehrsnetzes.

7 Ergebnisse aus dem laufenden Betrieb

Ein quantitativer Vergleich mit anderen Verfahren kann hier nicht gezogen werden, da kein anderes Verfahren die in Abschnitt 6 genannten Eigenschaften aufweist. Es können an dieser Stelle neben den zuvor gezeigten Visualisierungen daher lediglich einzelne Erfahrungswerte angegeben werden.

Das Verfahren wird bei der DDG seit einiger Zeit eingesetzt. Es werden damit Reaktionszeiten von etwa 10 Minuten ab dem Zeitpunkt erreicht, ab dem ein Stauereignis von einem Detektor „gesehen“ wird. Tatsächlich kündigt sich ein Überlaststau aber meist bereits vorher durch dichten und stockenden Verkehr an. Das Verfahren ist durch seine kontinuierliche Arbeitsweise daher in der Lage, viel früher vor einem Stau zu warnen.

Erste Erfahrungen mit Daten von Floating-Cars liegen auch bereits vor. So konnten einzelne Stauereignisse durch das Verfahren aufgrund von FCD-Fahrzeugen bereits früher erkannt werden als durch die anderen Detektorsysteme.

Das Verfahren ist damit sehr gut in der Lage, die Verkehrszustände gestaut, stockend, dicht und frei schnell und stabil zu unterscheiden.

8 Anwendungsmöglichkeiten

Neben der reinen Information der Verkehrsteilnehmer über unterschiedliche Kanäle werden die Verkehrsmeldungen des Verfahrens auch bereits für meldungsbasierte dynamische Routenempfehlungen verwendet. Dazu werden für ausgewiesene Domänen je nach Verkehrszustand festgelegte Geschwindigkeiten angenommen, auf deren Basis zusammen mit der Streckeninformation der Domänen die Reisezeit berechnet wird. Auf dieser Basis können für das Straßenverkehrsnetz optimale Routenempfehlungen berechnet werden. Künftig werden zur Steigerung der Genauigkeit dieser Routenberechnungen mittlere Domänengeschwindigkeiten an die Verkehrsmeldungen angefügt werden.

Ebenfalls läßt sich an der Zu- oder Abnahme der Ausdehnung einer Verkehrsdomäne eine einfache Verlaufstendenz eines Ereignisses ablesen.

9 Ausblick

Die Fortentwicklung des Verfahrens wird sich in verschiedenen Bereichen abspielen:

Auf der Erfassungsseite werden Floating-Cars zunehmende Bedeutung erlangen. Dadurch wird das Verfahren allein aufgrund einer dichteren Erfassung von Meßwerten an Qualität und Aktualität gewinnen.

Eine weitere Qualitätssteigerung wird durch den Ausbau des Verfahrens mit Ansätzen erreicht werden, welche Gleichungen auf Basis von Verkehrsmodellen berücksichtigen. Diese liefern dann weitere Stützstellen in Ort und Zeit zur Bewertung und wirken sich ähnlich wie eine dichtere Erfassung durch weitere Detektoren aus.

Auf der Anwendungsseite wird über die Floating-Cars und ggf. punktuelle SES-Detektoren zunehmend auch der Ballungsraum für verkehrstelematische Dienste erschlossen werden.

Literatur

- [Steinauer97] Steinauer, B.; Krux, W.; Offermann, F.: „Fuzzy-Logik kontra Schwellwertanalyse bei der Störfallergennung“, Straßenverkehrstechnik 7 (1997), S. 323-330
- [Krause96] Krause, B.; Pozybill, M.: „Fuzzy-Logik in der Verkehrstechnik“, Straßenverkehrstechnik 8 (1996), S. 356-362
- [Serra82] Serra, J., Image Analysis and Mathematical Morphology, 1982, Academic Press
- [Duda72] Duda, R.O., Hart, P.E., Pattern Classification and Scene Analysis, 1972, New York, Wiley & Sons
- [Papoulis91] Papoulis, A., Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, McGraw-Hill Series in Systems Science, McGraw-Hill 1991