

Prüfer: Prof. Dr. rer. nat. V. Claus

Betreuer: Prof. B.S. Kerner (DaimlerChrysler AG)  
Dipl. Inf. M. Aleksic (DaimlerChrysler AG)  
Dipl. Inf. F. Buchholz  
Dipl. Inf. S. Lewandowski

Beginn am: 21.10.98  
Beendet am: 1.6.98

CR-Nummer: H.4.2 J.2.6 J.2.8 I.2.3

Diplomarbeit-Nr. 1736

**Ausbau eines Stauverfolgungssystems zu einem  
fehlertoleranten System**

Heinrich Brunmeier

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Thematischer Überblick und Aufgabenstellung.....</b>	<b>7</b>
2.1	Überblick über Verkehrsflussmodelle .....	7
2.1.1	Mikroskopische Verkehrsmodelle .....	7
2.1.1.1	Fahrzeugfolgemodelle.....	8
2.1.1.2	Zellulärer Automat.....	8
2.1.2	Makroskopische Verkehrsflußmodelle .....	9
2.1.3	Mesoskopische Verkehrsflußmodelle .....	10
2.2	Automatische Staudynamikanalyse (ASDA) .....	10
2.2.1	Theoretischer Hintergrund .....	10
2.2.2	Eingangsgrößen .....	11
2.2.3	Ausgabegrößen .....	11
2.2.4	Arbeitsweise .....	12
2.2.5	Staukriterium in ASDA:.....	14
2.3	Aufgabenstellung.....	15
<b>3</b>	<b>Analyse von Fehlerquellen .....</b>	<b>17</b>
3.1	Detektoren, Funktionsweise und Fehlerquellen.....	17
3.2	Verkehrsbeeinflussungsanlage A5 Friedberg - Frankfurt.....	18
3.2.1	Konzeptionelle Ebene .....	18
3.2.2	Streckenebene.....	19
3.2.3	Systemebene .....	21
3.2.3.1	Beschreibung der Komponenten.....	21
3.2.3.2	Arbeitsweise .....	23
3.2.4	Ersatzwertbildung in den Archivdaten.....	23
3.3	System ASDA .....	24
3.3.1	Betriebsarten.....	24
3.3.2	Datenstruktur .....	26
<b>4</b>	<b>Fehlerklassifizierung .....</b>	<b>26</b>
4.1	Datenfehler.....	26
4.1.1	Fehler durch das Meßverfahren <i>Induktivschleife</i> .....	26
4.1.1.1	Schrägfahrt über die Schleifen (Spurwechsel).....	26

4.1.2	Detektorstörungen und Störungen des gesamten Meßquerschnitts .....	27
4.1.2.1	Störungen mit Statusinformation.....	27
4.1.2.2	Störungen ohne Statusinformation .....	27
4.1.3	Übertragungsstörungen .....	27
4.1.3.1	Übertragungsstörungen zwischen einzelner Streckenstationen zur Unterzentrale .....	27
4.1.3.2	Übertragungsstörungen zu allen Streckenstationen.....	27
4.1.4	Fehler durch (die bisherige) Ersatzwertbildung .....	28
4.1.4.1	Ersatzwertbildung bei Detektorstörungen.....	28
4.1.4.2	Ersatzwertbildung bei Querschnittsstörungen.....	28
4.1.5	Fehler durch Aggregation.....	29
4.2	spezielle Problemsituationen in der Stauverfolgung mittels System ASDA.	29
4.2.1	Nicht erfülltes Staukriterium im prognostizierten Staubereich.....	29
4.2.2	Flankenberechnung in Bereichen mit Zustandswechsel .....	30
4.2.3	Vorzeitiger Abbruch der Stauverfolgung.....	31
4.2.4	Nicht erfaßte Kleinststaus .....	32
<b>5</b>	<b>Lösungsansätze und Ergebnisse.....</b>	<b>35</b>
5.1	Umgang mit Verkehrsdatenfehlern .....	35
5.1.1	Verkehrszustandsabhängige Ersatzwertbildung für einzelne Detektoren eines Meßquerschnitts .....	35
5.1.2	Behandlung von Störungen ganzer Querschnitte .....	52
5.2	Umgang mit speziellen Problemen in der Stauverfolgung mittels System ASDA.....	52
5.2.1	Flexibler Umgang mit dem Staukriterium.....	52
5.2.1.1	Verfahren zur Zustandsdetektion mit maximalem Fluß zu einer gemessenen Geschwindigkeit.....	53
5.2.1.2	Modifikation von System ASDA um Mechanismen im Umgang mit dem Zwischenzustand „fast Stau“ .....	61
5.2.2	Zusammenfügen von Staubereichen .....	63
5.2.3	Berücksichtigung von Kleinststaus.....	64
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>69</b>
7.1	Telegrammdatei, Dateiaufbau .....	69
7.2	Telegrammdatei, Dateiinhalt.....	71
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>74</b>

---

**9 Erklärung .....76**

# 1 Einleitung

Zunehmendes Verkehrsaufkommen und die damit verbundene zunehmende Verkehrsdichte auf den Autobahnen, bewirken eine stetige Zunahme von Verkehrsstaus und –störungen. Um die Kapazitäten der Autobahnen möglichst gut nutzen zu können, werden mittlerweile neben baulichen Optimierungen der Verkehrswege, kollektive Verkehrsbeeinflussungssysteme eingesetzt. Diese Systeme versuchen den Verkehrsfluß aufrecht zu erhalten, indem sie zu einem anhand der gemessenen Verkehrsdaten, der Fahrbahnbeschaffenheit aufgrund von Wettereinflüssen und der Informationen über sonstige Einflüsse (z.B. Behinderungen durch Baustellen) über Leuchttafeln an den Fahrbahnrändern Warnhinweise, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Umleitungsempfehlungen anzeigen. Diese kollektive Form der Verkehrsbeeinflussung ist jedoch nur der erste Schritt zur Optimierung der Auslastung von Verkehrswegen.

In den nächsten Jahren werden in Fahrzeugen zunehmend Telematiksysteme eingesetzt. Darunter versteht man unter anderem dynamische Verkehrsinformations- und Zielführungssysteme. Individuelle Zielführungssysteme bieten den wesentlichen Vorteil, den schnellsten Weg zu bestimmen. Jedoch können sich die Reisezeiten auf den Streckenabschnitten des Verkehrsnetzes sehr schnell gravierend ändern. Deshalb kann die berechnete Reisezeit jeder Route drastisch von der berechneten Reisezeit abweichen. Um dies zu verhindern, müssen die Reisezeiten prognostiziert werden.

Ein Schritt in die Richtung der Prognose ist ein bei DaimlerChrysler entwickeltes System zur Analyse der Staudynamik auf Autobahnen (ASDA). Dieses System ist vor allem in der Lage mittels Verkehrsdaten Staubereiche auf Autobahnen zu verfolgen, Kurzzeitprognosen bezüglich des Verlaufs von Staubereichen zu bilden und Reisezeiten auf Strecken mit Staubereichen zu berechnen. Da das System erst prototypisch implementiert ist gibt es Fehlersituationen in der Stauverfolgung, die sowohl auf das benutzte Verfahren, als auf Meßfehler und Gerätefehler zurückzuführen sind.

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Erweiterung des Systems zur automatischen Staudynamikanalyse (ASDA), um den Aspekt der Fehlertoleranz bezüglich verschiedener Fehlersituationen.

Zunächst soll in Kapitel 2 ein Überblick über das thematische Umfeld der Diplomarbeit vermittelt werden. In Kapitel 3 und 4 wird die Problemstellung anhand

---

der Problemanalyse konkretisiert. Das Kapitel 5 bietet Lösungsansätze und Ergebnisse.

## 2 Thematischer Überblick und Aufgabenstellung

Damit sich der Leser ein Bild über das thematische Umfeld verschaffen kann, soll dieser Abschnitt einem Überblick über die Verkehrstheoretische Modelle dienen. Desweiteren wird das System ASDA in seinen für die Öffentlichkeit freigegebenen Teilen vorgestellt. Im letzten Teilabschnitt wird die Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit ausführlich beschrieben.

### 2.1 Überblick über Verkehrsflussmodelle

Es gibt verschiedene Ansätze um den Strassenverkehrsfluss zu beschreiben. Man unterscheidet prinzipiell zwischen *mikroskopischen*, *makroskopischen* und *mesoskopischen Verkehrsflussmodellen*.

#### 2.1.1 Mikroskopische Verkehrsmodelle

In mikroskopischen Verkehrsflussmodellen wird das Verhalten der einzelnen Fahrzeuge und die Wechselwirkungen der Fahrzeuge untereinander betrachtet. Dabei wird davon ausgegangen, daß das Verhalten eines Fahrzeugführers des Fahrzeuges von dem vorausfahrenden Fahrzeug abhängt.

Für die Beschleunigung  $a$ , die Geschwindigkeit  $v$  und die Position  $x$  eines Fahrzeuges zum Zeitpunkt  $t$  gelten die bekannten Bewegungsgesetze der Physik [Leut88] :

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (2.1)$$

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (2.2)$$

$$x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t v(t)dt \quad (2.3)$$

$$v(t) = v_0 + \int_{t_0}^t a(t)dt \quad (2.4)$$

$$x(t) = x_0 + v_0(t - t_0) + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t a(t) dt dt \quad (2.5)$$

mit  $v$  als Geschwindigkeit zum Zeitpunkt  $t$  und  $x$  als Position zum Zeitpunkt  $t$ .

### 2.1.1.1 Fahrzeugfolgemodelle

Durch *Fahrzeugfolgemodelle* soll das Beschleunigungsverhalten direkt folgender Fahrzeuge nachgebildet werden. Gazis, Herman und Rothery entwickelten 1961 [Mai90] ein nichtlineares Fahrzeugfolgmodell, bei dem die Beschleunigung durch folgende Formel festgelegt wird:

$$\frac{d^2 x_{n+1}(t + \Delta t)}{dt^2} = \frac{\kappa \left[ \frac{dx_{n+1}(t + \Delta t)}{dt} \right]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]} \left[ \frac{dx_n(t)}{dt} - \frac{dx_{n+1}(t)}{dt} \right] \quad (2.6)$$

Die Position des Fahrzeuges  $n$  sei  $x_n(t)$ , die des folgenden Fahrzeuges  $x_{n+1}(t)$ . Die Totzeit, mit der das folgende Fahrzeug  $n+1$  auf Veränderungen der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges  $n$  reagiert ist  $\Delta t$ , die Stärke seiner Reaktion ist durch die Konstante  $\kappa$  bestimmt. Diese Stärke kann durch den Parameter  $m$  von der Geschwindigkeit des Fahrzeuges  $n+1$  zum Zeitpunkt  $t + \Delta t$  und durch den Parameter  $l$  von dem Abstand zu dem vorherfahrenden Fahrzeug  $n$  abhängig gemacht werden.

### 2.1.1.2 Zellulärer Automat

Ein spezielles mikroskopisches Modell ist der *zelluläre Automat* [Bar98], in dem Fahrzeuge durch boolesche Variablen auf der, in Zellen gleicher Größe unterteilten, Fahrbahn dargestellt werden. Ein Fahrzeug kann sich jeweils nur in einer Zelle aufhalten. Somit erfolgt eine Diskretisierung der Bewegung, für die es drei Zustände gibt. Ein Fahrzeug beschleunigt, wenn genügend Zellen vor ihm frei sind, es bremst, wenn weniger Zellen, als für die momentane Geschwindigkeit benötigt werden, frei sind und bewegt sich gleichförmig weiter, wenn genau die benötigte Anzahl von Zellen frei sind. Zusätzlich gibt es *Trödelparameter*, die zügiges Anfahren verhindern und die Geschwindigkeit während der Fahrt willkürlich verändern. Durch diese Trödelparameter wird der maximale Fluß bei Stauausfahrt und der "Stau aus dem Nichts" angepaßt.

## 2.1.2 Makroskopische Verkehrsflußmodelle

In *makroskopischen Verkehrsflußmodellen* wird das kollektive Verhalten mehrerer Fahrzeuge auf einem Streckenabschnitt durch die drei Größen mittlere Dichte  $\rho(x,t)$ , mittlere Geschwindigkeit  $v(x,t)$  und mittleren Fluß  $q(x,t)$  beschrieben. Zwischen der Dichte, der Geschwindigkeit und dem Fluß besteht der aus der Hydrodynamik bekannte Zusammenhang  $q = v(\rho) \cdot \rho$ . Mit dieser Gleichung lautet die Kontinuitätsgleichung für den eindimensionalen kompressiblen Fluß für die gesuchte Funktion  $\rho$  [Kron95]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \cdot v)}{\partial x} = 0 \quad (2.7)$$

Die folgende Bewegungsgleichung [Kern94] entspricht der eindimensionalen Navier-Stokes-Gleichung aus der Strömungsmechanik:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + X \quad (2.8)$$

Die Terme der rechten Seite der Gleichung sind für die Beschleunigung verantwortlich. Diese Terme sind abhängig von der Wahrnehmung und den Aktionen der einzelnen Fahrer.  $(\mu v_x)_x$  in Gl. (2.8) kann als Antizipationsterm mit der Viskosität  $\mu$  ausgefaßt werden und der Term  $p_x$  als Druckterm, der bei Dichteänderungen Beschleunigung oder Abbremsen hervorruft. Es ist üblich als Kraftterm den Relaxationsansatz

$$X = \frac{\rho}{\tau} [V(\rho) - v] \quad (2.9)$$

zu verwenden.  $V(\rho)$  ist die bei Verkehrsdichte  $\rho$  maximale und gerade noch sichere Geschwindigkeit am Ort  $x$ .  $\tau$  ist die mittlere Relaxationszeit. Der Druckterm kann durch

$$p = c_0^2 \rho \quad (2.10)$$

beschrieben werden.  $c^2$  ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Störungen.

### 2.1.3 Mesoskopische Verkehrsflußmodelle

*Mesoskopische Verkehrsflußmodelle* sind eine Kombination von mikroskopischer und makroskopischer Betrachtungsweise. Dabei werden einzelne Fahrzeuge nach makroskopischen Gesetzmäßigkeiten bewegt. Die Bewegung der Einzelfahrzeuge erfolgt dabei nicht aufgrund von Interaktionen der Einzelfahrzeuge, sondern aufgrund der makroskopischen Kenngrößen der Streckenabschnitte [Nel95].

## 2.2 Automatische Staudynamikanalyse (ASDA)

Das System *Automatische Staudynamikanalyse* (im Folgenden System ASDA genannt) ist eine prototypische Implementierung eines Verfahrens zur Analyse der Staudynamik auf Autobahnen. Es erlaubt u.a. die Stauentwicklung auf einem Streckenabschnitt (z.B. einer Autobahn) zu beobachten und den Verlauf von Staus auf diesem Streckenabschnitt auch zwischen den Meßstellen zu berechnen.

Das Verfahren selbst ist von DaimlerChrysler patentiert und zur Zeit noch nicht für die Öffentlichkeit freigegeben. Aus diesem Grunde kann das System ASDA nicht in allen Einzelheiten vorgestellt werden. Insbesondere die das Verfahrens betreffenden funktionellen Teile werden nicht behandelt. Es ist jedoch möglich, wesentliche Eigenschaften des Systems und damit des Verfahrens aufzuzeigen. So kann dem Leser zum einen ein gewisser Überblick über das Verfahren vermittelt, und zum anderen die Diplomarbeit betreffende Problematik verständlich gemacht werden.

### 2.2.1 Theoretischer Hintergrund

Die zur Entwicklung der Stauverfolgung herangezogenen theoretischen Erkenntnisse basieren auf dem Verkehrsmodell nach Kerner/Konhäuser [Kern93]. Dieses Modell ist ein makroskopisches Modell mit verteilten Parametern. Es besteht aus der Kontinuitätsgleichung und einer Bewegungsgleichung. Die Bewegungsgleichung ist eine Navier-Stokes-Gleichung für gewöhnliche kompressible Flüssigkeiten mit eigenen Randbedingungen. Daraus entwickelten sie die Stautheorie [Kern94], in der sie u.a. charakteristische Parameter von Staus hypothetisch aufgestellt hatten und diese dann in [Kern96] von Kerner und Rehborn experimentell bestätigt wurden. Die charakteristischen Parameter sind

- 1) der Verkehrsfluß aus dem Stau und
- 2) die Geschwindigkeit der rechten Stauflanke (flußabwärtige Stauflanke),

die nur von allgemeinen Randbedingungen (Wetter, Fahrverhalten, Infrastruktur, ...) abhängen.

Allgemein kann aus den experimentellen Untersuchungen aus [Kern96] folgendes festgehalten werden :

- 1) Staus können sich über ein längeres Autobahnstück bewegen, ohne ihre charakteristischen Parameter und ihre Form wesentlich zu verändern.
- 2) Es gibt charakteristische Parameter des Staus, die nicht von den Anfangsbedingungen wie der Verteilung der Verkehrsdichte und der Verkehrsstärke abhängen, sondern nur von den allgemeinen Randbedingungen.
- 3) Der Verkehrsfluß im freien Verkehr war sowohl für den gesamten Querschnitt als auch pro Fahrspur um bis zu 50% größer, als der Verkehrsfluß aus dem Stau bei verschiedenen Staus.

### 2.2.2 Eingangsgrößen

Erste Grundvoraussetzung eines Einsatzes des Systems ASDA ist die Erfassung der Verkehrsdaten (z.B. mittels Induktivschleifendetektoren) auf einem Streckenabschnitt. Die erforderlichen Verkehrsdaten sind die mittlere Verkehrsstärke, die mittlere Geschwindigkeit und der Anteil der LKW pro Meßintervall. Es sind aber auch spurbezogene Mittelwerte geeignet. Nächste Voraussetzung ist die Kenntnis der Lage der Meßquerschnitte im Straßennetz, die Spuranzahl der Meßquerschnitte, die Lage und Erfassung von Zu- und Abfahrten und die Verkehrswerte der letzten Zeitzyklen.

### 2.2.3 Ausgabegrößen

Ausgabegrößen sind die pro Meßintervall berechneten Lagen von Staus (rechte und linke Stauflanke) auf dem beobachteten Streckenabschnitt zu jedem Zeitschritt. Somit liefert ASDA folgende Informationen

- 1) Die Bewegung von Staus zu jedem Zeitpunkt, auch wenn sich diese zwischen Erfassungsstellen befinden und nicht direkt von den Meßquerschnitten gemessen werden.
- 2) Die Reisezeitprognose kann entsprechend der Position und der Länge des Staus angepaßt werden.
- 3) Aus der Dynamik des Staus können Hinweise über die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Stauauflösung erkannt werden.

## 2.2.4 Arbeitsweise

Abbildung 2-1 zeigt zwei Detektoren an den Meßquerschnitten  $MQ_0$  und  $MQ_n$  und die Bewegung eines Staus über einen Streckenabschnitt der Länge  $L$ . Nach der Detektierung des Staus am Detektor  $MQ_n$  zum Zeitschritt  $t_0$  wird zu jedem

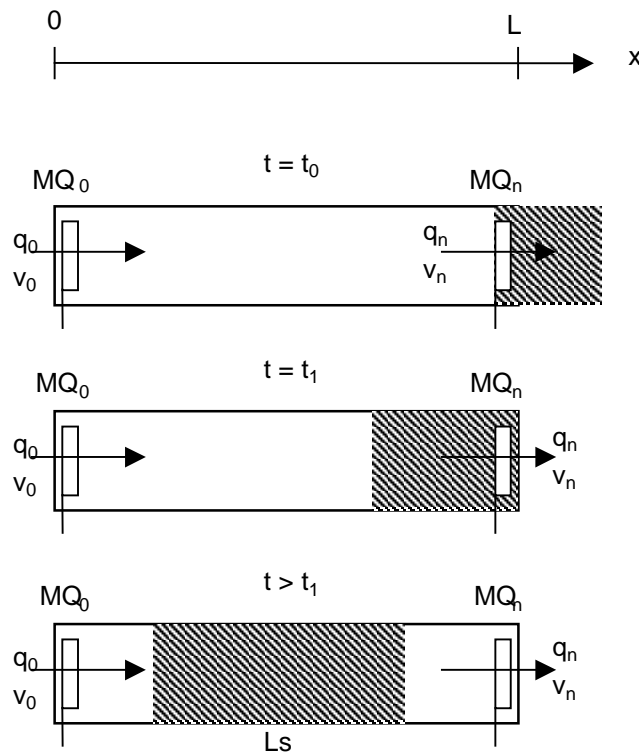


Abbildung 2-1 : Arbeitsweise des Verfahrens ASDA

Zeitschritt die Position der rechten Stauflanke  $x_r(t)$  und der linken Stauflanke  $x_l(t)$  und daraus seine Länge  $L_s$  eines Staus ermittelt, auch wenn er sich zwischen den Meßstellen befindet.

Zur Bestimmung des Zeitpunktes  $t_0$  an der Meßstelle  $MQ_n$ , also der Erkennung der ankommenden linken Staufront, die sich über diese Meßstelle bewegt, kann ein herkömmliches Verfahren zur Störungserkennung gewählt werden.

Abbildung 2-2 zeigt eine einfache Möglichkeit zur Stauererkennung. Es zeigt den Verlauf der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{v}_n(t)$  in Abhängigkeit der Zeit am Meßquerschnitt  $MQ_n$ . Man sieht einen massiven Einbruch der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt  $t_0$ , bei dem der Schwellenwert  $v_{An}$  unterschritten wird. Dieser Zeitpunkt entspricht der Ankunft eines Staubereichs am Meßquerschnitt  $MQ_n$ . Analog dazu wird zum Zeitpunkt  $t_1$  der Schwellenwert  $v_{En}$  überschritten, und der Staubereich verläßt den Meßquerschnitt  $MQ_n$ .

Die Ausgabe (vgl. 2.2.3 )kann in einem Diagramm, wie in Abbildung 2-3 dargestellt werden. Auf der senkrechten Achse sind die Positionen der Meßquerschnitte

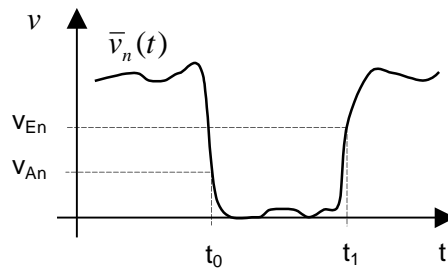


Abbildung 2-2 : Kriterien für Stauanfang und Stauende an einem Meßquerschnitt MQn

aufgetragen. Die Fahrtrichtung der Fahrzeuge ist senkrecht nach oben von MQ0 nach MQn und die typische Staubbewegung von oben nach unten. Auf der waagerechten Achse wird die Zeit aufgetragen. Die ausgefüllten Kreise sind in Höhe der Positionen der Meßquerschnitte angebracht und markieren den Zustand „Stau“ am entsprechenden Meßquerschnitt. Mit anderen Worten, im Zeitintervall wurden am Detektor Verkehrswerte gemessen, die das zuvor definierte Kriterium für den Verkehrszustand „Stau“ erfüllt haben. Die nicht ausgefüllten Kreise markieren die berechneten Positionen der Stauflanken zu einem diskreten Zeitpunkt.

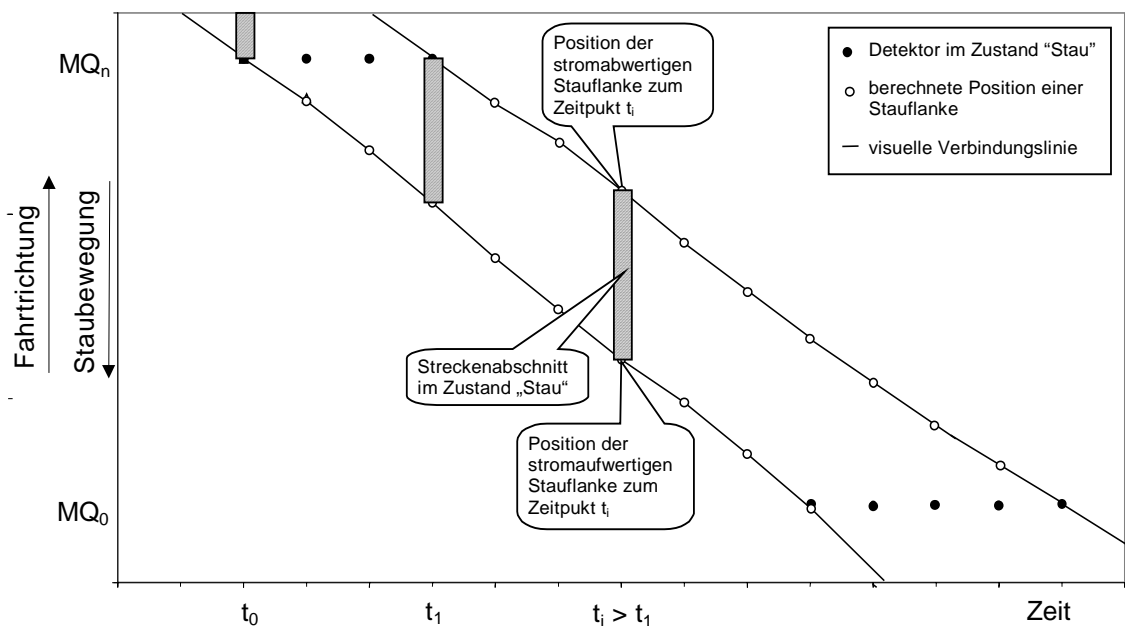


Abbildung 2-3 : graphische Darstellung der Ausgabe in einem Diagramm

Der Staubereich befindet sich senkrecht zwischen zwei Stauflanken. Die Staulänge läßt sich aus der Differenz der Flankenpositionen berechnen. Zur Verdeutlichung ist zu den oben erwähnten Zeitpunkten der Staubereich als senkrechter Balken gekennzeichnet. Die Verbindungslinien zwischen den Kreisen sind lediglich zur visuellen Vereinfachung eingetragen und sollen die Zuordnung der diskret berechneten Flankenpositionen einer Staufront für den Betrachter erleichtern.

Anmerkung:

Nachdem die graphische Ausgabe erläutert wurde, sei an dieser Stelle angemerkt, daß nachfolgende Diagramme leicht abweichend in der Darstellung sein können. Die Werte auf der senkrechten Streckenachse stellen alternativ nicht die Positionen der Meßquerschnitte dar, sondern beschreiben den Abstand eines beliebigen Streckenpunktes bezüglich einem Nullpunkt des Streckenabschnitts. Weiterhin sind die nicht ausgefüllten Kreise der besseren Übersicht wegen weggelassen.

### 2.2.5 Staukriterium in ASDA:

Im Folgenden sei noch auf das Staukriterium der benutzten Version des Systems ASDA eingegangen. Die Detektion eines Staus an einem Meßquerschnitt erfolgt anhand von festen Schwellwerten für die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{v}(x,t)$  und die Verkehrsstärke  $q(x,t)$ . Das Verkehrsaufkommen an einem Meßquerschnitt an der Stelle  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  wird dann als Stau interpretiert, wenn für die Meßwerte folgendes gilt:  $\bar{v}(x,t) < v_{stau}$  und  $q(x,t) < q_{stau}$ . Die im Abschnitt 2.2.4 angesprochenen Werte  $v_{En}$  und  $v_{An}$  als Schwellwerte für das Staukriterium sind im System ASDA zu einem gemeinsamen Wert  $v_{stau}$  zusammengeführt. Aus empirischen Auswertungen wurde der Schwellwert für  $v_{stau}$  auf 30 km/h festgelegt. Im Gegensatz zum Staukriterium im Abschnitt 2.2.4 wird im System ASDA zusätzlich zum Geschwindigkeitseinbruch an einem beginnenden Stau der Einbruch der Verkehrsstärke beobachtet. Für die Verkehrsstärke  $q_{stau}$  an einem dreispurigen Meßquerschnitt gilt der Schwellwert von 3000 Fz/h (50 Fz/min), also 1000Fz/h und Spur.

Abbildung 2-4 verdeutlicht die Benutzung des Staukriteriums im System ASDA.

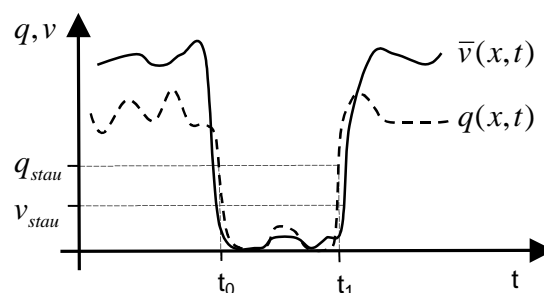


Abbildung 2-4 : Staukriterium des Systems ASDA an einem Meßquerschnitt

## 2.3 Aufgabenstellung

Die zum Zeitpunkt der Aufgabenstellung vorliegende Version des Systems *Automatische Staudynamikanalyse ASDA* war, wie bereits erwähnt, prototypisch implementiert. Die Version realisierte im wesentlichen das patentierte Verfahren zur Automatischen Analyse der Staudynamik mit den oben beschriebenen Ein- und Ausgabegrößen, wobei speziell die Eingabegrößen in jeder Hinsicht als korrekt angenommen wurden.

Betrachten wir jedoch einmal die Einsatzbereiche und Einsatzbedingungen unter denen das System ASDA eingesetzt werden kann.

Primäre Einsatzbereiche sind z.B. Anlagen zur Verkehrsbeobachtung und kollektiver oder individueller Verkehrsbeeinflussung. Diese bieten die nötige Infrastruktur zur Erfassung von Verkehrsdaten und haben zudem, den Bedarf ihre Algorithmen zur Bestimmung der Verkehrssituation, bzw. zur Bestimmung der Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen durch solch zusätzliche Verkehrsanalyseverfahren zu verbessern.

Die Einsatzbedingungen in solch realen Systemen stellen jedoch zusätzliche Anforderungen an die Implementierung des Systems *Automatische Staudynamikanalyse ASDA*. Zum einen bestehen solche Anlagen aus einer Vielzahl technologisch unterschiedlicher, lose gekoppelter Komponenten und zum anderen sind sie äußeren Einflüssen wie z.B. Witterung, Alter und Fahrverhalten ausgesetzt. In Anlagen dieser Art können verschiedenartige Fehlersituationen vorkommen, auf die zwar die Anlage vorbereitet ist, das System ASDA aber erst vorbereitet werden muß. Beispielsweise können Detektoren defekt sein und falsche oder keine Werte liefern. Diese Umstände erfordern einen flexiblen Umgang mit den bereitgestellten Verkehrsdaten. Denkbar sind Verfahren zur Plausibilitätsprüfung von Eingangswerten vor der eigentlichen Verarbeitung durch das System ASDA und Verfahren zur Behandlung von erkannten Fehlern.

Hinzu kommt, daß bei der Verfolgung von Staus gewisse Umstände auftreten, in denen das System ASDA auf Grenzfallsituationen trifft, die evtl. nur für kurze Zeitabschnitte zu ungenauen Ergebnissen führen. Diese Umstände sind sowohl auf verkehrliche, als auch auf meßtechnische Ursachen zurückzuführen.

Hält man nun den Titel der Diplomarbeit vor die Augen und faßt die eben beschriebenen Problembereiche zusammen, so teilt sich die Aufgabenstellung in zwei voneinander nahezu unabhängige Aufgaben. Verlangt ist der Ausbau des Staudynamikanalysesystems ASDA zu einem fehlertoleranten System, wobei die Fehlertoleranz folgende Bereiche abdecken soll :

1. Toleranz bezüglich fehlerhaften Eingabedaten, die in realen Umgebungen (z.B. in einer Verkehrsbeeinflussungsanlage) aufgrund von Fehlersituationen auftreten können
2. Toleranz bezüglich Grenzfallsituationen in der Stauverfolgung

Aufgaben :

- Entstehung der verwendeten Verkehrsdaten analysieren und darauf aufbauend Fehlerquellen für mögl. Datenfehler erkennen
- Auswirkungen dieser Datenfehler auf die Automatische Staudynamikanalyse ASDA analysieren
- Methoden zur Erkennung und Behandlung dieser Datenfehler entwickeln und realisieren
- Spezielle Problemsituationen in der Stauverfolgung analysieren
- Methoden zur Behandlung dieser Problemsituationen entwickeln und realisieren

### 3 Analyse von Fehlerquellen

In folgenden Kapiteln sollen die technischen Randbedingungen vorgestellt und mögliche Fehlerquellen analysiert werden. Die Messung der Daten und deren weitere Bearbeitung wird aufgezeigt.

#### 3.1 Detektoren, Funktionsweise und Fehlerquellen

Zur Verkehrsdatenerfassung werden in der Regel *Induktivschleifendetektoren* verwendet. Die Induktionsschleifen werden nach einfach und Doppelinduktionsschleifen unterschieden. Während die Einfachinduktivschleifen

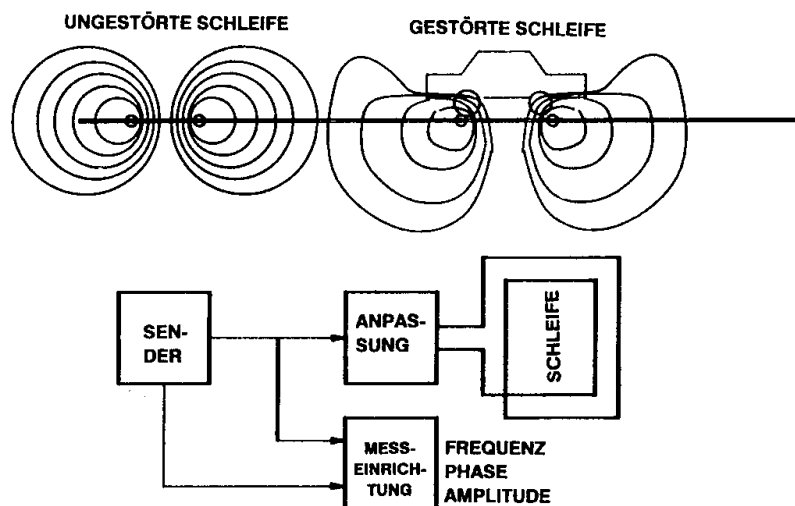


Abbildung 3-0 : Funktionsweise von Induktivschleifen

Geschwindigkeit und Anzahl der Fahrzeuge bestimmt, wird bei den Doppelinduktivschleifen zusätzlich noch nach Fahrzeugklassen unterschieden.

#### Arbeitsweise:

Die Induktivschleife ist eine in den Fahrbelag eingelassene stromdurchflossene Leiterschleife. Sie ist vor Witterungseinflüssen, Korrosion und mechanischen Beschädigungen weitestgehend geschützt. Die Auswerteschaltung des Induktivschleifendetektors erzeugt einen hochfrequenten Wechselstrom., der die Leiterschleife durchfließt und senkrecht zur Fahrbahnachse ein stationäres Magnetfeld aufbaut. In dieses Feld eingebrachte metallische Gegenstände

„verstimmen“ die Schleife durch Verringerung der Induktivität. Diese Verstimmung wird als Änderung des induktiven Widerstandes gemessen.

**Fehlerquelle:**

Das fahrgeometrische Verhalten bei seitlich versetztem Fahren oder schräger Durchfahrt, verändert die elektromagnetischen Einflüsse. Der Mittelwert der Meßunsicherheit für die Geschwindigkeit eines schräg fahrenden Fahrzeugs beträgt unter 1%, die maximale Meßunsicherheit wird mit unter 6% angegeben, bei einem Keilwinkel von  $10^\circ$  [Mark96].

Als weitere Detektorarten seien noch Infrarot-, Lichtschranken- und Radardetektoren erwähnt.

## 3.2 Verkehrsbeeinflussungsanlage A5 Friedberg - Frankfurt

### 3.2.1 Konzeptionelle Ebene

Die uns vorliegenden Verkehrsdaten stammen von der Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA) A5 Friedberg - Frankfurt. Es handelt sich um eine sogenannte *kollektive* Verkehrsbeeinflussungsanlage. Diese hat die Aufgabe, den Verkehrsfluß in Abhängigkeit des aktuellen Verkehrszustands zu regeln, indem sie den Verkehrsteilnehmern über die an der Fahrbahn angebrachten Anzeigesysteme Hinweise entsprechender Art anzeigt<sup>1</sup>.

Dazu werden mit Hilfe von an der Fahrbahn installierten Sensoren Verkehrsgrößen und Umfelddaten erhoben und in den Streckenstationen aggregiert. Die aggregierten Daten werden aus den Streckenstationen in eine sogenannte Unterzentrale übertragen und dort einer Analyse unterzogen, die zu Erkenntnissen über die Art des tatsächlich vorliegenden bzw. in absehbarer Zeit abschätzbaren Verkehrsablaufs (Kurzfrist/Mittelfristprognose) führen sollen.

Den Datenerfassungs-, Datenanalyse- und Prognosephasen folgt die Steuerungsphase. Hier wird die ermittelte tatsächliche und prognostizierte verkehrliche Situation dem Steuerungsalgorithmus übergeben, welcher anhand des verwendeten Steuerungsmodells Ausgabeinformationen für die Anzeigesysteme generiert. Das Steuerungsmodell legt den Ablauf fest, nach dem für eine verkehrliche Situation durch Steuerungsmaßnahmen auf das Verkehrsgeschehen eingewirkt wird.

---

<sup>1</sup> Als Gegenstück zur kollektiven Verkehrsbeeinflussung steht die *individuelle* Verkehrsbeeinflussung, bei der die Fahrer Hinweise über die im Fahrzeug angebrachten Anzeigesysteme erhalten. Dazu können die heutigen Telematiksysteme, wie z.B. Verkehrsinformations- und Zielführungssysteme, gezählt werden.

Die generierten Ausgabeinformationen werden über Anzeigesysteme an der Fahrbahn den Verkehrsteilnehmern zugeführt. Als Anzeigesysteme auf dem betrachteten Streckenabschnitt dienen Glasfasersichtgeräte, die einen Satz von Wechselverkehrszeichen (WVZ), bestehend aus Verkehrszeichen und Zusatzzeichen, anzeigen können.

Die Verkehrsbeeinflussungsanlage entspricht also einem Regelkreis im Sinne der

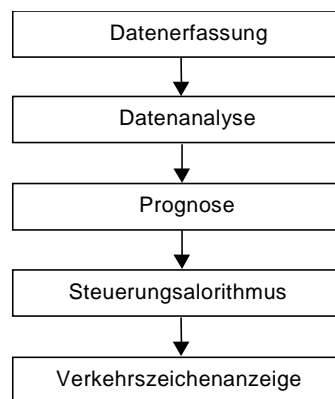


Abbildung 3-1: Systematische Komponenten der VBA

Regelungstechnik, dessen systematischen Komponenten wie in der Abbildung 3-1 schematisch dargestellt werden können.

Von der Entstehung der uns vorliegenden Archivdaten interessieren uns vor allem die Phasen *Datenerfassung* und die *Datenanalyse*. Wie man im Kapitel 3.2.4 sehen wird, ist die Phase Datenanalyse deswegen von Bedeutung, da darin in bestimmten Situationen (z.B. bei Gerätestörungen) Verkehrsdaten manipuliert werden.

### 3.2.2 Streckenebene

Im Weiteren wird für eine Meßeinrichtung, bestehend aus einem Induktivschleifenpaar, bzw. einer Doppelinduktivschleife, die Bezeichnung *Detektor* benutzt, da dies die gebräuchlichere Bezeichnung ist, und sich auf der beeinflussten Strecke nur diese Meßeinrichtungen befinden.

Abbildung 3-2 zeigt schematisch die Anordnung der Detektoren auf einem Ausschnitt der beeinflussten Strecke. Sie werden durch kleine Rechtecke repräsentiert. Umfelddaten werden nicht weiter betrachtet, weil sie vorerst für das System ASDA nicht von Bedeutung sind. Gruppen von Detektoren sind in Meßquerschnitten zusammengefaßt. Ein Meßquerschnitt, oder einfach Querschnitt, besitzt eine eindeutige Position entlang der Strecke und wird durch eine Querschnittsnummer eindeutig identifiziert. Ein Querschnitt der Hauptfahrbahn

enthält drei Detektoren und ggf. ein oder mehrere Detektoren an den Auf- und Ausfahrten (vgl. Q13). Da ein solcher Querschnitt auch regelnde Ausgabeinformationen über Wechselverkehrszeichen ausgibt, wird er als Regelquerschnitt bezeichnet. Ein Querschnitt der Nebenfahrbahn enthält einen oder mehrere Detektoren nur an den Auf- und Ausfahrten (vgl. Q14 off).

An dieser Stelle soll angemerkt werden, daß die betrachtete Verkehrsbeeinflussungsanlage vollständig detektiert ist, d.h. alle Hauptfahrbahnen, sowie Auf- und Ausfahrten mit Detektoren ausgerüstet sind.

Die Verkehrsbeeinflussungsanlage A5 zwischen dem Westkreuz Frankfurt und der Anschlußstelle Friedberg erstreckt sich über eine Gesamtlänge von 30 km. Der Streckenabschnitt zählt mit über 100 000 Kfz/Tag zu den meistbelasteten

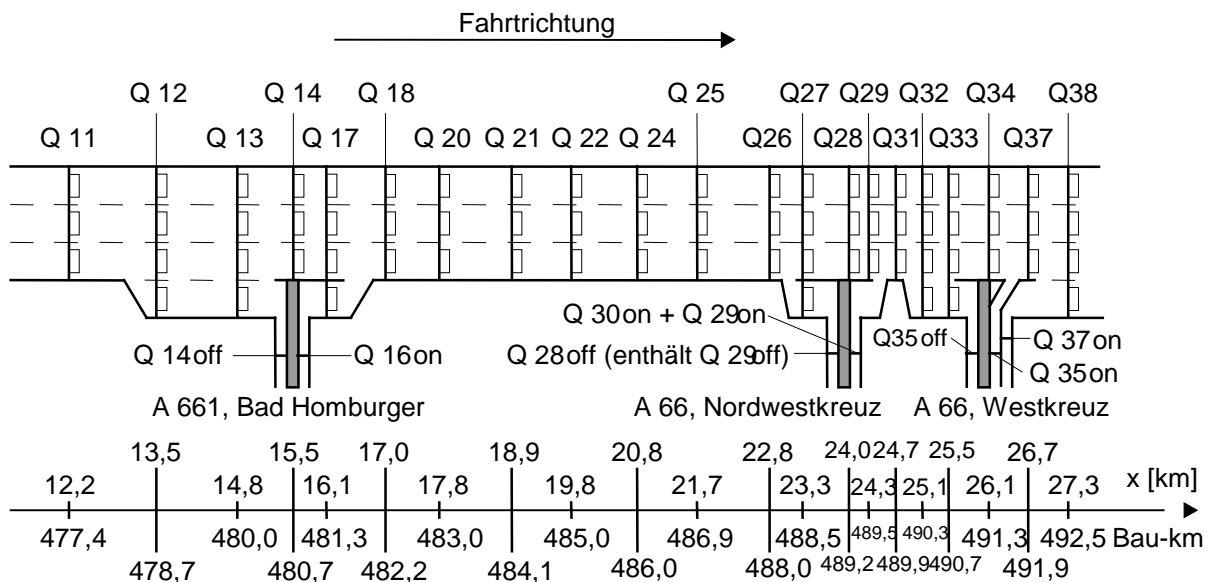


Abbildung 3-2 : Ein Ausschnitt der beeinflussten Strecke in Richtung Süd. Die Skizze verdeutlicht die Anordnung der Induktivschleifendetektoren zur Messung von Verkehrsdaten.

Streckenabschnitten des deutschen Autobahnnetzes. Die Streckenbeeinflussung erfolgt über 61 Anzeigequerschnitte mit insgesamt 303 Wechselverkehrszeichen. Die Datenerfassung erfolgt über 234 Doppelinduktivschleifen und 10 Umfelddatenstationen. 72 Streckenstationen steuern die Sensoren zur Datenerfassung und zur Datenausgabe und sorgen für die Datenübertragung von und zur Unterzentrale.

### 3.2.3 Systemebene

Die Sicht auf die Systemebene gibt detaillierten Aufschluß über den Fluß der Daten-

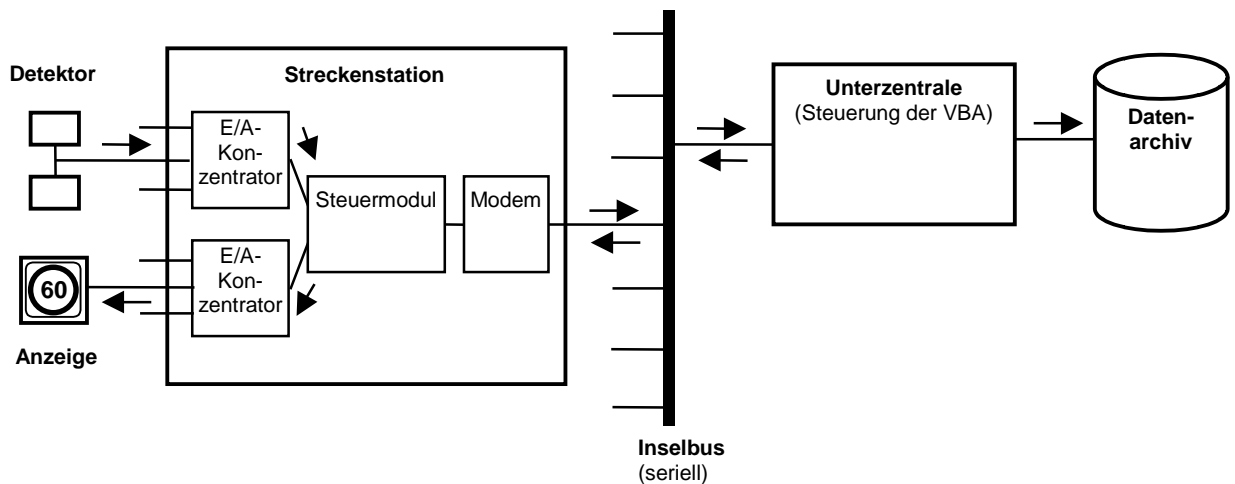


Abbildung 3-3 : Systemstruktur der VBA

und Steuerinformation zwischen den Systemkomponenten. Abbildung 3-3 zeigt schematisch die Systemstruktur der Verkehrsbeeinflussungsanlage.

#### 3.2.3.1 Beschreibung der Komponenten

##### Detektor

Der Detektor stellt eine eigenständige Meßeinrichtung dar. Handelt es sich um einen Induktivschleifendetektor, so ist er in der Lage, die Geschwindigkeit und den Typ eines erfaßten Fahrzeugs zu messen, und die Meßergebnisse über den E/A-Kanal an den E/A-Konzentrator der Streckenstation zu senden.

##### Streckenstation

Die Streckenstation ist eine Einrichtung an der Strecke zur Datenerfassung, lokalen Datenaggregation zum Schalten von Wechselverkehrszeichen und zur Kommunikation mit der Unterzentrale. Sie besteht aus folgende Einheiten :

##### E/A-Konzentrator

Der E/A-Konzentrator ist über E/A-Kanäle mit Ein-/Ausgabeeinheiten verbunden. Er empfängt Meßdaten von Detektoren, bereitet sie anwendungsbezogen auf und sendet Schaltbefehle an

Wechselverkehrszeichen. Innerhalb der Streckenstation kommuniziert er über den sogenannten Lokalbus mit dem Steuermodul.

### **Steuermodul**

Das Steuermodul wickelt den Datenaustausch zwischen den E/A-Konzentratoren, und via Modem zwischen der Unterzentrale ab. Es beantwortet Anforderungen der Unterzentrale (z.B. Datenübergabe) und leitet die von der Unterzentrale eingehende Parameter (z.B. Stellgrößen für Wechselverkehrszeichen) an die einzelnen E/A-Konzentratoren weiter. Das Steuermodul erledigt keine anwendungsbezogene Verarbeitung.

### **Modem**

Der Modem ist für die Kommunikation mit der Unterzentrale zuständig. Es wickelt den Zugriff auf den Inselbus ab und sorgt für die sichere Übertragung entsprechend dem zugrundeliegenden Bus- und Übertragungsprotokoll.

Die Aufgaben einer Streckenstation sind im wesentlichen die Erfassung und Aggregation von Verkehrs- und Umfelddaten von den angeschlossenen Detektoren, sowie der Schaltstellungen von Ausgabegeräten, die Generierung und Versendung sogenannter Telegramme mit den für den Steueralgorithmus notwendigen Informationen, der Empfang neuer Schaltbefehle für die angeschlossenen Ausgabegeräte und das Weiterleiten der neuen Schaltbefehle an die entsprechende Geräte.

### **Inselbus**

Als Inselbus wird das logische Medium bezeichnet, auf welcher die Unterzentrale mit Streckenstationen verbunden ist. Die hardware-seitige Realisierung erfolgt über eine Leitung des BAB-Streckenfernmeldekabels, an das Modems der Streckenstationen über zweiadrige Stichleitungen angeschlossen sind. Entsprechend dem Busprinzip fungiert die Unterzentrale als Master und die Streckenstationen als Slaves. Die Übertragung auf dem Bus erfolgt seriell mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von 1200 bit/s.

### **Unterzentrale**

Die Unterzentrale ist eine Einrichtung, in der das zentrale Steuersystem der Verkehrsbeeinflussungsanlage untergebracht ist. Sie steuert die Datenerfassung, die Datenübertragung, sowie die Datenausgabe. Sie führt die Datenanalyse und die Prognose durch und führt den Steueralgorithmus aus. Nach Bedarf werden Archivdaten angelegt. Sie kommuniziert mit der Verkehrsrechnerzentrale. Eine Verkehrsrechnerzentrale ist eine übergeordnete Rechnerzentrale, die den Verkehrsfluß mehrerer Autobahnabschnitte beobachtet und regelnd eingreift.

## **Datenarchiv**

Das Datenarchiv wird von der Unterzentrale generiert und enthält sämtliche Daten-, Status- und Schaltinformationen zurückliegender Schaltzyklen der Verkehrsbeeinflussungsanlage.

### **3.2.3.2 Arbeitsweise**

Im ersten Schritt werden die Telegramme der einzelnen Streckenstationen von der Unterzentrale für das beendete Meßintervall eingeholt. Danach findet die Auswertung der Störinformation statt. Waren Störungen im Meßintervall aufgetreten, dann wird versucht Ersatzwerte zu bilden. Im Anschluß daran wird der Steuerungsalgorithmus durchlaufen, um für die Anzeigen aktuelle Werte zu generieren. Es werden nun Steueranweisungen versendet und Archivdaten gespeichert.

#### **Archivdaten**

Von jeder Minute enthalten die Archivdaten folgende Informationen: (siehe auch Anhang, 7.1 und 7.2) :

- Telegrammversion
- Datum und Uhrzeit
- Betriebszustand (Simulation od. Lauf mit Ausgaben)
- Anzahl Meßquerschnitte
- Anzahl Anzeigen
- Anzahl Meßdetektoren
- Anzahl Wetterstationen
- Ausgabeinformation der Anzeigen
- Meßinformation der Umfeldstationen (Sicht, Niederschlagsmenge)
- Meßinformation für jeden Meßuerschnitt für Verkehrserfassung
- Dabei für jeden Detektor des Meßquerschnitts:
  - Anzahl PKW für jede Geschwindigkeitsklasse (15 Klassen)
  - Anzahl LKW für jede Geschwindigkeitklasse (12 Klassen)
  - gewichteter Mittelwert für Geschwindigkeit
  - Summe der PKW
  - Summe der LKW
  - Prognose der Geschwindigkeit
- Statusinformation über Detektorstörungen
- Statusinformation über Ersatzwertbildung

### **3.2.4 Ersatzwertbildung in den Archivdaten**

Um den Betrieb der VBA in Fehlersituationen aufrecht zu erhalten, und den Verkehrsablauf durch falsche oder fehlende Information auf den Anzeigen nicht zu verunsichern und zu gefährden, werden für gestörte Detektoren Ersatzwerte gebildet.

Der Ersatzwertalgorithmus ist sehr simpel und kann dem Flußdiagramm in der Abbildung 3-4 entnommen werden.

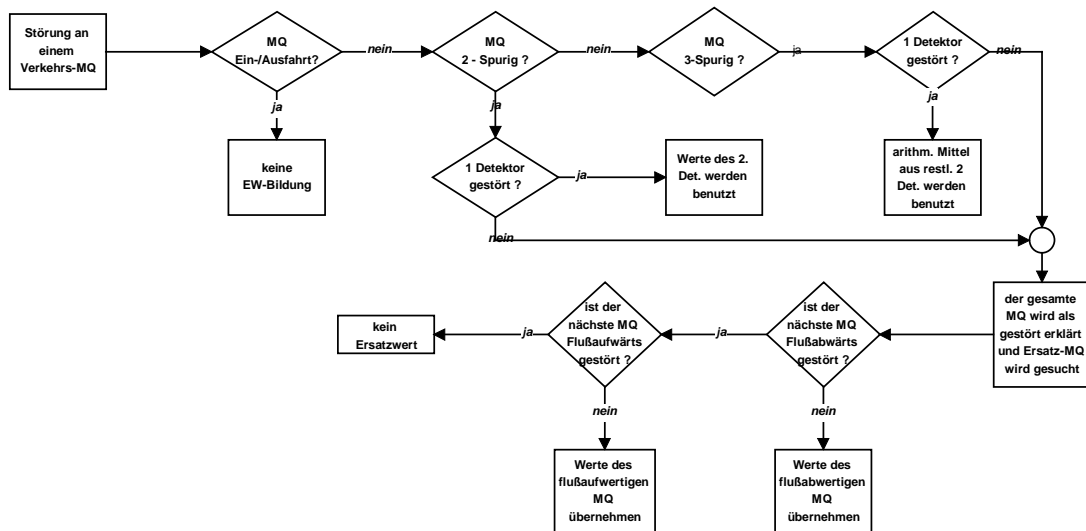


Abbildung 3-4 : Algorithmus zur Eratzwertbildung

Bei einer Störung eines Detektors einer Hauptfahrbahn wird der Mittelwert der anderen 2 genommen. Dies gilt sowohl für den Verkehrsfluß, als auch für die mittlere Geschwindigkeit an einem gestörten Detektor.

Bei Störung von zwei Detektoren eines Meßquerschnitts einer Hauptfahrbahn, gilt der gesamte Meßquerschnitt als gestört, und es wird der Inhalt des gesamten Meßquerschnitts durch Werte des flußabwertigen oder flußaufwertigen Meßquerschnitt ersetzt.

### 3.3 System ASDA

#### 3.3.1 Betriebsarten

Das System ASDA ist auf zwei Möglichkeiten realisiert. Es kann im Offline-Betrieb und im Online -Betrieb verwendet werden. Es werden in beiden Betriebsarten Strecken- und Verkehrsdaten eingelesen. Nach Empfang aller neuen Meßdaten eines Meßzyklus werden alle verfolgten Staubereiche in ihren Flankenpositionen aktualisiert.

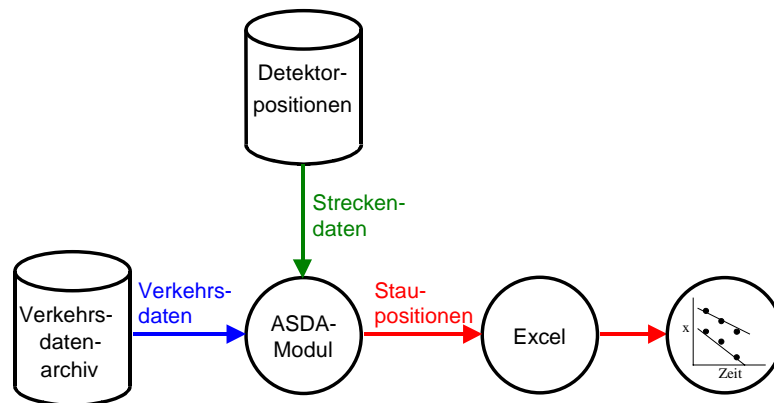


Abbildung 3-5: Systemaufbau von ASDA im Offline-Betrieb

Im Offline-Betrieb wird die Ausgabe in eine Textdatei geschrieben. Im Online-Betrieb erfolgt die Ausgabe über eine graphische Oberfläche direkt auf die digitale Karte des beobachteten Streckenbereichs.

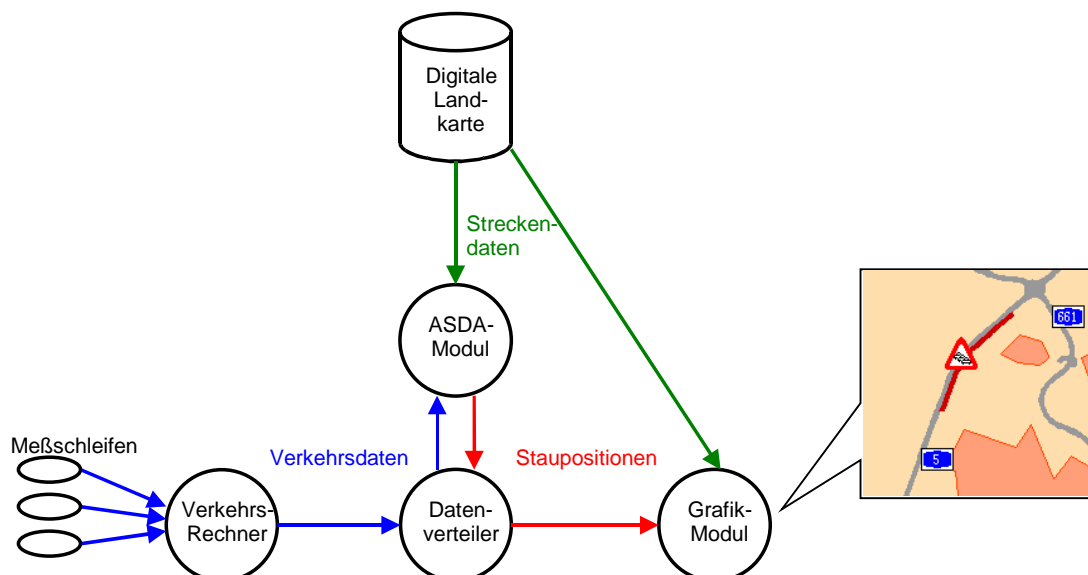


Abbildung 3-6: Systemaufbau von ASDA im Online-Betrieb

### 3.3.2 Datenstruktur

Meßquerschnitte werden durch Meßquerschnitt - Objekte repräsentiert. Sie können die Zustände „gestaut,, und „nicht gestaut“ annehmen. Außer den aktuellen Meßwerten, enthalten sie auch Meßwerte zurückliegender Zeitschritte.

Staubereiche werden durch Stauobjekte repräsentiert. Sie können erzeugt und gelöscht werden. Als Attribute enthalten sie Informationen über ihre Flankenpositionen auf der Strecke und Meßwerte, die sie in den zurückliegenden Zeitschritten bekommen haben.

Ein Aktualisierungs-Algorithmus wird nach Erhalt aller Meßdaten der Strecke dazu veranlaßt, die Flankenpositionen der Stauobjekte zu aktualisieren. Dazu sucht er für jedes Stauobjekt das entsprechende Datenquell - Objekt. Ein Datenquell-Objekt ist ein Objekt, das geeignet ist, dem Stauobjekt Informationen über den in den Staubereich einfließenden und aus dem Staubereich ausfließenden Verkehr mitzuteilen. Datenquell - Objekte können Meßquerschnitte oder umliegende Stauobjekte sein. Ist keine geeignete Quelle vorhanden, dann kann das Stauobjekt seine historischen Werte verwenden. Sind die Datenquellen ausgewählt, dann wird nach dem Verfahren ASDA die Flankenpositionen berechnet, und das nächste Stauobjekt aktualisiert.

## 4 Fehlerklassifizierung

### 4.1 Datenfehler

#### 4.1.1 Fehler durch das Meßverfahren *Induktivschleife*

##### 4.1.1.1 Schrägfahrt über die Schleifen (Spurwechsel)

Bei Schrägfahrten können Meßfehler in der Einzelgeschwindigkeit entstehen. Je nach Fahrzeugtyp können Fahrzeuge entweder gar nicht gezählt werden, oder sie werden unter Umständen doppelt gezählt.

## **4.1.2 Detektorstörungen und Störungen des gesamten Meßquerschnitts**

### **4.1.2.1 Störungen mit Statusinformation**

Bei Störungen mit Statusinformation liegen Meßwerte der gestörten Detektoren nicht oder nur teilweise vor. Sie werden nach dem oben beschriebenen Algorithmus ersetzt.

In [Stein97] wurde die hier vorgestellte Verkehrsbeeinflussungsanlage auf Störungen untersucht. Dabei wurden folgende Werte festgestellt:

- Januar 1996 102 Meldungen mit Dauer von 2 - 4 Minuten/Stunde
- Februar 1996 35 Meldungen mit Dauer von 2 - 3 Minuten/Stunde

### **4.1.2.2 Störungen ohne Statusinformation**

Die uns vorliegenden Verkehrsdaten enthielten Situationen, in denen Störungen anhand der Meßwerte erkennbar waren.

## **4.1.3 Übertragungsstörungen**

### **4.1.3.1 Übertragungsstörungen zwischen einzelner Streckenstationen zur Unterzentrale**

Übertragungsfehler konnten nicht entdeckt werden. Es fehle die Information, auf welcher Weise Übertragungsfehler in der Störinformation enthalten ist. Es ist wahrscheinlich, daß bei Übertragungsstörungen ebenfalls Ersatzwerte gebildet werden. Die Folgen einer Übertragungsstörung von einem Meßquerschnitt zur Unterzentrale entspricht im Grunde der Störung eines Meßquerschnitts.

### **4.1.3.2 Übertragungsstörungen zu allen Streckenstationen**

wie 4.1.3.1

In [Stein97] wurden folgende Werte festgestellt:

- Januar 1996 113 Meldungen mit durchschnittlich 2-3 Minuten Dauer, Februar 2 Meldungen

## 4.1.4 Fehler durch (die bisherige) Ersatzwertbildung

### 4.1.4.1 Ersatzwertbildung bei Detektorstörungen

Ist ein Detektor eines Meßquerschnitts im aktuell gemessenen Meßintervall gestört, so wird nach dem vorgestellten Ersetzungsalgorithmus die Ersatzwertbildung durchgeführt. Sie ist jedoch sehr ungenau. Abbildung 4-1 zeigt die unterschiedlich berechneten Stauverläufe mit Originalmeßwerte und mit Ersatzwerten. Im

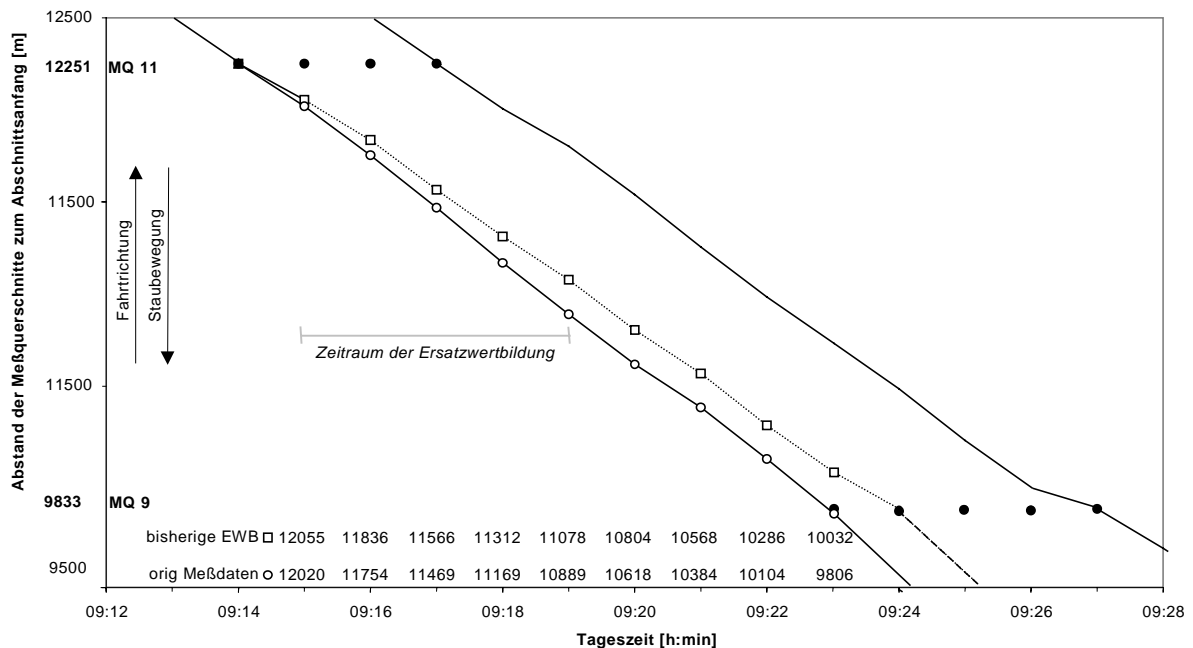


Abbildung 4-1 : Beeinträchtigung durch Ersatzwertbildung

markierten Zeitraum wurden am Meßquerschnitt MQ9 Ersatzwerte eingesetzt. Die durchgezogene Linie mit Punkten stellt die Berechnung der stromaufwertigen Stauflanke dar, die mit Originalmeßwerten berechnet wurde. Die gestrichelte Linie stellt den Verlauf der stromaufwertigen Stauflanke dar, die im Zeitraum der Ersatzwertbildung durch Ersatzwerte beeinträchtigt wurde. Man sieht, daß die Abweichung im Zeitraum der Ersatzwertbildung kontinuierlich zunimmt. Danach wird der Verlauf mit Originalmeßdaten berechnet. Der Verlust an Staulänge läßt sich aber nicht mehr aufholen.

### 4.1.4.2 Ersatzwertbildung bei Querschnittsstörungen

Ersatzwertbildung bei Querschnittsstörungen können zur Folge haben, daß Meßquerschnitte Meßwerte zugewiesen bekommen, die nicht ihrem Verkehrszustand entsprechen. Bei der Stauverfolgung kann es demnach passieren,

daß Meßquerschnitte plötzlich Stauzustände aufweisen, oder Meßquerschnitte, die sich im Stauzustand befinden plötzlich keinen Stauzustand melden. Der Stauverfolgungs-Algorithmus ist für solche Situationen nicht vorbereitet. Die Staupositionen werden auf jeden Fall verfälscht.

### 4.1.5 Fehler durch Aggregation

Da die Größen mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsfluß aus Geschwindigkeitsklassen. Gewonnen werden, entstehen hier Fehler.

GK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v-Bereich km/h	<20	<30	<40	<50	<60	<70	<80	<90	<100	<110	<120	<140	<160	<180	>180
gewichtet mit x km/h	10	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	130	150	170	190
max. rel. Fehler in %	52	20	17	12,5	10	8,3	7,1	6,3	5,5	5	4,5	8,3	7,1	6,3	>5,5

## 4.2 spezielle Problemsituationen in der Stauverfolgung mittels System ASDA

In diesem Unterkapitel werden spezielle Problemsituationen vorgestellt, die bei der Auswertung der Dynamik von Staubereichen durch das System ASDA am häufigsten auftraten.

### 4.2.1 Nicht erfülltes Staukriterium im prognostizierten Staubereich

Eine Fehlersituation in der Stauverfolgung mittels dem System ASDA ist, wenn das Staukriterium in einem in der Realität wohl vorhandenen Staubereich nicht erfüllt wird. Mit anderen Worten, es bewegt sich in der Realität ein Staubereich über einen

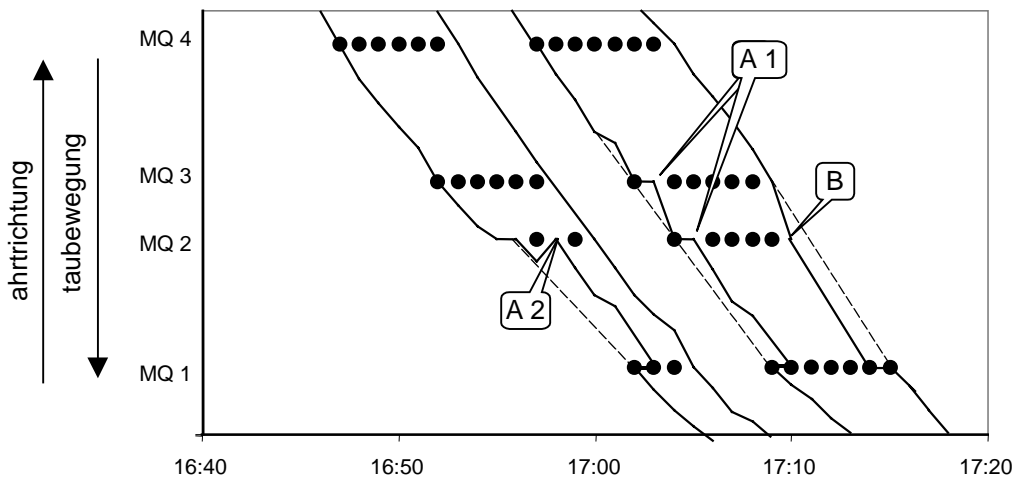


Abbildung 4-2 : Fehlersituationen in der Stauverfolgung

Detektor, jedoch wird in einem der Zeitintervalle an dem Detektor ein Meßergebnis erstellt, das vom System ASDA nicht als Stau interpretiert wird. Dieser Meßwert erfüllt nicht das Staukriterium. Solche Bereiche können durchaus in Staubereichen auftreten. Sie entstehen durch Fluktuationen innerhalb des Staus, die durch das Nachrückverhalten von Autofahrern entstehen.

Die Folgen bei der Berechnung der Stauflanken werden durch die Abbildung 4-2 verdeutlicht. Die Abbildung zeigt zwei hintereinander verlaufende Staubereiche. Markierung „A1“ weist auf die Folgesituation hin, in der das System eine im vorherigen Zeitschritt bereits berechnete Position der stromaufwertigen Stauflanke beibehält. Die zu der Berechnung des entsprechenden Zeitschritts verwendeten Daten am Meßquerschnitt MQ3 erfüllen nicht das Staukriterium. Der entsprechende Algorithmus entscheidet sich, die Position der stromaufwertigen Stauflanke am Meßquerschnitt so lange zu belassen, bis die Meßdaten wieder auf den Verkehrszustand „Stau“ deuten und die Verfolgung wieder aufgenommen werden kann. In der Folgesituation „A2“ ist die Sachlage ähnlich. Auch hier ist das Staukriterium innerhalb des realen Staubereichs nicht erfüllt. Jedoch wird die im vorherigen Zeitschritt bereits berechnete Position der stromaufwertigen Stauflanke bis an den Detektor zurücksetzt.

Ein nicht erfülltes Staukriteriums im Staubereich kann auch Auswirkungen auf die Berechnung der stromabwertigen Stauflanke haben. In der Folgesituation „B“ fehlt das Staukriterium am Meßquerschnitt MQ2. Der entsprechende Algorithmus entscheidet, die Position der stromabwertigen Stauflanke an den Meßquerschnitt MQ2 heranzuführen.

Die gezeigten Folgesituationen entstanden aufgrund eines nicht erfüllten Staukriteriums innerhalb des realen Staubereich. Beide Folgesituationen haben Auswirkungen auf die Berechnung des Verlaufs der stromaufwertigen Stauflanke. Die gestrichelte Linie in derselben Abbildung deutet den Verlauf des realen Staubereichs an.

#### 4.2.2 Flankenberechnung in Bereichen mit Zustandswechsel

Eine weitere Fehlersituation kann in der Stauverfolgung entstehen, wenn ein Zustandswechsel von Verkehrszustand „freier Verkehr“ nach „Stau“ oder „synchronisierter Verkehr“ nach „Stau“ unmittelbar vor dem Berechneten Erreichen der stromaufwertigen Stauflanke an einem Meßquerschnitt eintritt. Dieser Sachverhalt soll mit der Abbildung 4-3 verdeutlicht werden.



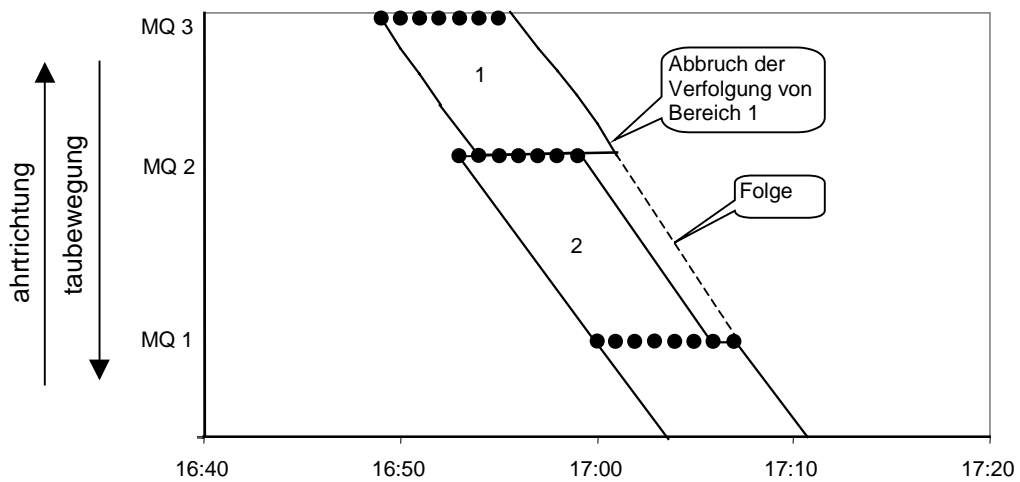


Abbildung 4-4 : Vorzeitiger Abbruch der Stauverfolgung

### 4.2.4 Nicht erfaßte Kleinststaus

Im Laufe der Arbeit mit System ASDA fielen Situationen auf, in denen die

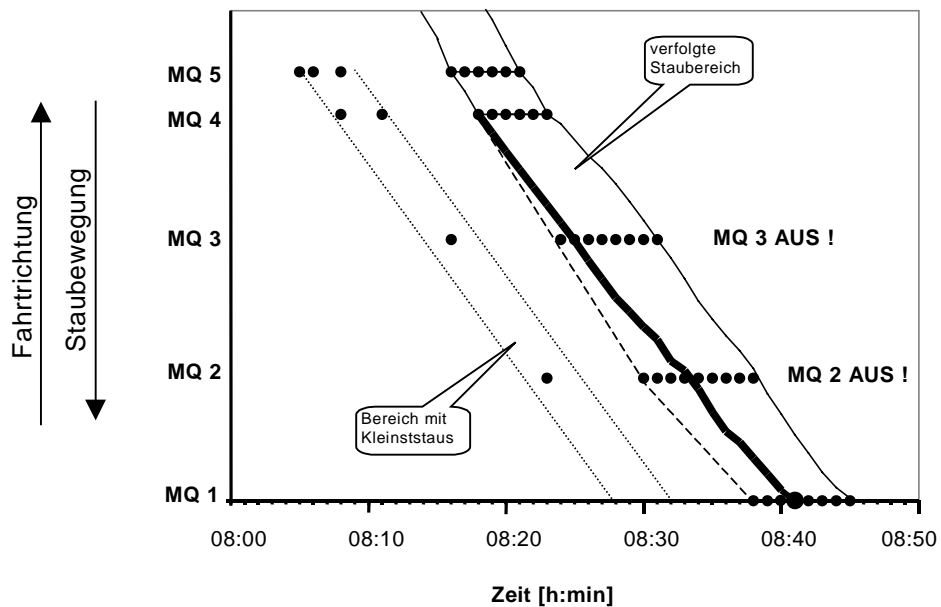
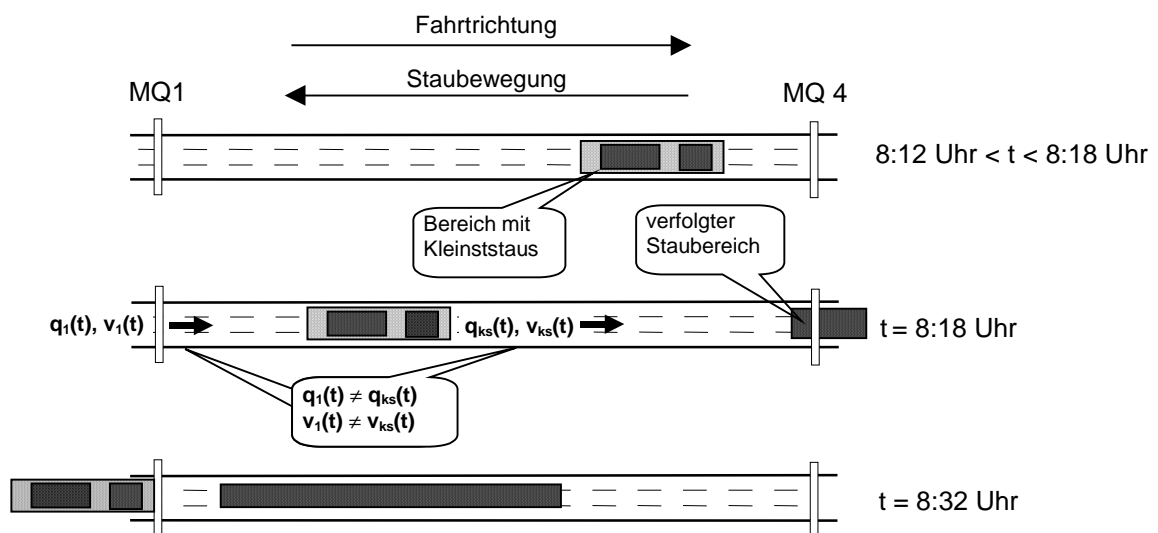


Abbildung 4-5 : Fehlerhafte Flankenberechnung durch nicht verfolgte Kleinststaus

Berechnung der Staufrenten massiv von den realen Staubewegungen abwich.

Abbildung 4-5 zeigt eine solche Situation auf. Für diesen Lauf wurden die Meßwerte der Meßquerschnitte MQ2 und MQ3 nicht zu Stauverfolgung benutzt<sup>2</sup>. Man war daran interessiert, die Genauigkeit des Systems bei der Stauverfolgung über einen längeren Streckenabschnitt zu testen. Man erkennt auf der Abbildung, daß die stromaufwertige Stauflanke (fette Linie) des verfolgten Staubereichs zeitlich viel später an den Detektoren MQ3, MQ2 und MQ1 ankommt, als diese den Verkehrszustand Stau melden. Der Verlauf der realen stromaufwertigen Stauflanke entspricht voraussichtlich eher der gestrichelten Linie, beginnend bei 8:18 Uhr an MQ4 und endend um 8:38 an MQ1. Man erkennt auch, daß bereits im Zeitabschnitt zwischen 8:05 Uhr und 8:32 Uhr mehrere Meßquerschnitte zwischen MQ1 und MQ5 Werte meldeten, die das Staukriterium erfüllten. Es fehlten jedoch zusätzliche Bedingungen, so daß die Verfolgung durch das System ASDA nicht durchgeführt wurde. Der besagte Bereich ist für ein besseres Erkennen durch die gepunkteten Linien umschlossen.

Es stellte sich heraus, daß es sich um Bereiche sehr kurzzeitiger Staus handelt, die



**Abbildung 4-6.:** Unterschied in den gemessenen und den tatsächlichen Verkehrsverhältnissen vor einem verfolgten Stau, aufgrund von nicht verfolgten Kleinststaus.

ebenfalls die Eigenschaft besitzen, sich stromaufwärts zu bewegen (siehe Abbildung 4-6). Bezüglich der Wegstrecke befinden sie sich im Zeitraum zwischen 8:12 Uhr und 8:18 Uhr zwischen den Meßquerschnitten MQ1 und MQ4. Ab 8:18 Uhr bis 8:32 liegen sie zwischen dem Meßquerschnitt MQ1 und der stromaufwertigen Stauflanke des verfolgten Staubereichs. Die Meßdaten von Meßquerschnitt MQ1 werden aber

<sup>2</sup>Unter System ASDA gibt es die Möglichkeit, Meßwerte von Meßquerschnitten nicht zur Stauverfolgung heranzuziehen. Damit simuliert man Streckenbereiche, in denen die Abstände zwischen Meßquerschnitten größer sind. Es wird lediglich ausgegeben, ob und wann sie von einem Staubereich überdeckt sind, d.h. ob und wann ihre Meßwerte das Staukriterium erfüllen.

im selben Zeitraum als Größen für den einfließenden Verkehrsstrom in den verfolgten Stau benutzt. Diese entsprechen jedoch nicht den realen Verkehrsverhältnissen unmittelbar vor dem verfolgten Staubereich. Die realen Verhältnisse vor dem verfolgten Staubereich werden vom ausfließenden Verkehr aus dem nicht verfolgten Stau bestimmt. Somit kommt es im Zeitraum zwischen 8:18 Uhr und 8:32 zu Fehlberechnungen durch das System ASDA. Ab 8:32 hat der Bereich mit Kleinststaus den Meßquerschnitt MQ1 verlassen und beeinträchtigt die Verfolgung nicht mehr. Die zu den vorherigen Zeitpunkten „zu kurz“ berechnete Staulänge des verfolgten Staubereichs kann jedoch nicht mehr korrigiert werden.

## 5 Lösungsansätze und Ergebnisse

Nachdem in Kapitel 3 die Fehlerquellen analysiert und Fehler klassifiziert wurden, können in diesem Kapitel Lösungsansätze vorgestellt werden, um die das System ASDA erweitert werden kann. Teilweise werden für ein Problem mehrere Ansätze vorgestellt.

Wie im Kapitel 3 erkannt wurde, sind folgende Fehler für die Erweiterung von Bedeutung :

1. Datenfehler
2. spezielle Fehlersituationen in der Stauverfolgung des Systems ASDA

Da der Fehlertyp „*Fehler durch das Meßverfahren*“ nicht ohne weiteres in den Bestehenden Verkehrsdaten korrigiert werden kann, konzentrieren sich die vorgestellten Lösungsansätze im Umgang mit Datenfehlern, im wesentlichen auf den Fehlertyp „*Detektorstörungen und Störungen des gesamten Meßquerschnitts*“ und „*Übertragungsstörungen*“. Detektorstörungen sind in den vorliegenden Verkehrsdaten durch die Information „*Detektor gestört*“ direkt markiert. Ein Übertragungsfehler macht sich dadurch bemerkbar, daß Datensätze aller Meßquerschnitte von einer oder von mehreren Minuten fehlen.

### 5.1 Umgang mit Verkehrsdatenfehlern

#### 5.1.1 Verkehrszustandsabhängige Ersatzwertbildung für einzelne Detektoren eines Meßquerschnitts

Der Ansatz zur verbesserten Ersatzwertbildung für einzelne Detektoren eines Meßquerschnitts basiert auf folgenden Vorüberlegungen:

1. Die Verkehrszustände auf Autobahnen lassen sich nach B. Kerner klassifizieren in „freier Verkehr“, „synchronisierten Verkehr“ und „Stau“
2. Die Verkehrszustände könnten charakteristische Merkmale besitzen, die für die Ersatzwertbildung nützlich wären
3. Aus der Kenntnis des aktuellen Verkehrszustands an einem Meßquerschnitt und aus der Störinformation zu einem oder mehreren Detektoren, lassen sich für den Fluß  $q_i$  und die Geschwindigkeit  $v_i$  der gestörten Detektoren plausible Ersatzwerte bilden

Den Vorüberlegungen folgten Untersuchungen der Verkehrsdaten. Dafür wurden diese in die drei Verkehrszustände eingeteilt und die Beziehungen zwischen den Verkehrsgrößen Verkehrsfluß und mittlere Geschwindigkeit der einzelnen Fahrspuren betrachtet. Zur Untersuchung wurden Meßquerschnitte von verschiedenen Stellen des Streckenabschnitts herangezogen. Allerdings beschränkte sie sich nur auf Detektoren der Hauptfahrbahnen und nicht etwa aus Aus- und Auffahrten.

Das Ergebnis ist eine weitere und feinere Unterteilung der einzelnen Verkehrszustände in Teilzustände. Im Folgenden sollen die Teilzustände vorgestellt werden. Die gezeigten Abbildungen sollen dem Betrachter nur die Vorstellung aus dem Text vermitteln. Sie sind den Meßdaten entnommen und stellen nicht alle im Text beschriebenen Situationen dar.

### Verkehrszustand „freier Verkehr“:

Die charakteristischen Merkmale des Verkehrszustands „freier Verkehr“ eine hohe mittlere Geschwindigkeit. Der Verkehrsfluß kann sowohl sehr klein sein, aber, im

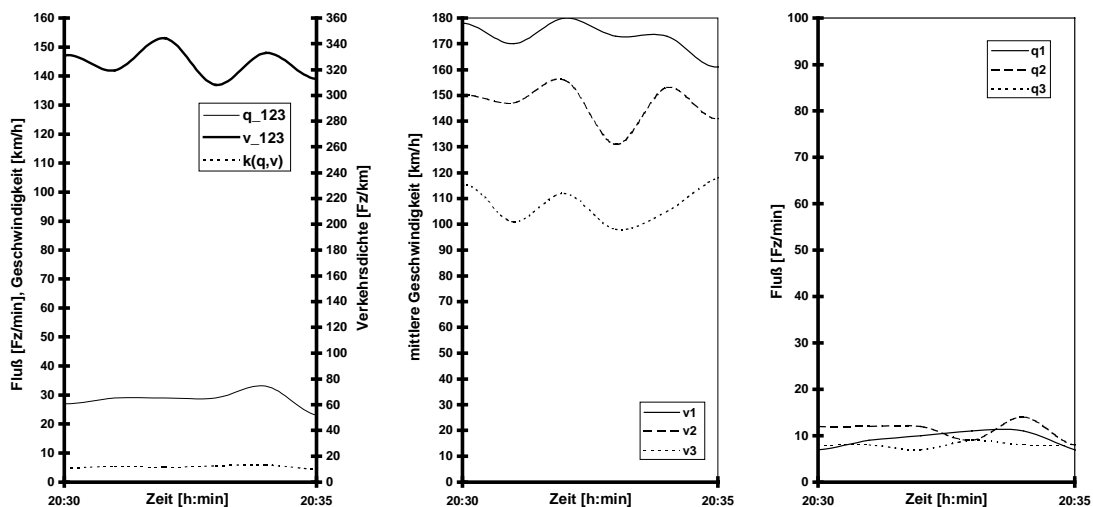


Abbildung 5-1 : „freier Verkehr“ Teilzustand 1

Fälle eines hohen Verkehrsaufkommens, auch sehr groß werden. Die Verkehrsdichte, als Quotient aus dem Verkehrsfluß und der mittleren Geschwindigkeit, ist aufgrund der hohen mittleren Geschwindigkeit stets relativ klein. Die Beziehung dieser drei Parametern kann für den Zustand "freier Verkehr" sehr gut durch die positive Steigung der Kurve eines Fundamentaldiagramms dargestellt werden.

**Teilzustand 1:**

Im Teilzustand 1 des freien Verkehrs herrschen sehr kleine Flüsse. Das Geschwindigkeitsniveau ist hoch. Die Verkehrsdichte ist sehr klein. Für die einzelnen Fahrbahnen gelten folgende Beziehungen:

- Die Differenzen zwischen den mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrspuren ist groß.
- Die Teilflüsse auf den einzelnen Fahrspuren sind etwa gleich klein.

**Teilzustand 2:**

Nimmt der Verkehrsfluß weiter zu, so nimmt die mittlere Geschwindigkeit etwas ab.

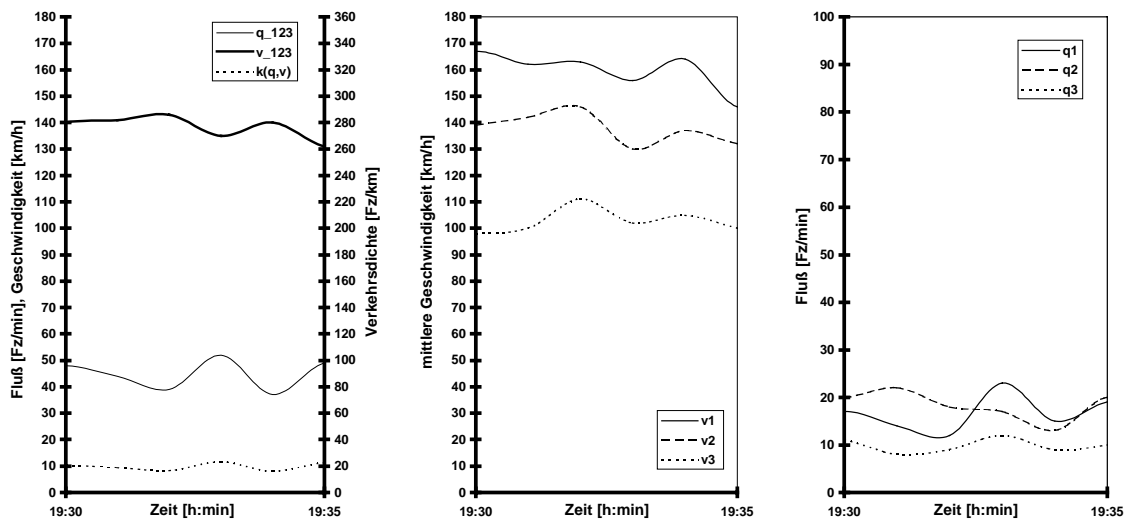


Abbildung 5-2 : „freier Verkehr“ Teilzustand 2

Die Verkehrsdichte nimmt entsprechend zu. Für die einzelnen Fahrbahnen gelten folgende Beziehungen:

- Die Differenzen zwischen den mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrspuren ist groß.
- Die Teilflüsse der rechten und der mittleren Fahrspur weisen ab einem Gesamtfluß von ca. 40 Fz/min eine stetige Differenz in ihren Beträgen auf. Der Teilfluß der linken Fahrspur bewegt sich in seinem Betrag um den der mittleren und der rechten (im Bild nicht erfaßt) Fahrspur.

**Teilzustand 3:**

Bei einer weiteren Zunahme des Gesamtflusses nimmt die mittlere Geschwindigkeit weiter ab und die Verkehrsdichte weiter zu. Für die einzelnen Fahrbahnen gelten folgende Beziehungen:

- c) Die Differenzen zwischen den mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrspuren ist weiterhin deutlich vorhanden.
- d) Die Teilflüsse der rechten und der mittleren Fahrspur weisen im Mittel eine größere stetige Differenz in ihren Beträgen auf. Der Teilfluß der linken Fahrspur bewegt sich ab einem Gesamtfluß von ca. 50 Fz/min in seinem Betrag nur um den der mittleren Fahrspur und sinkt nicht mehr unter den Betrag der rechten Fahrspur.

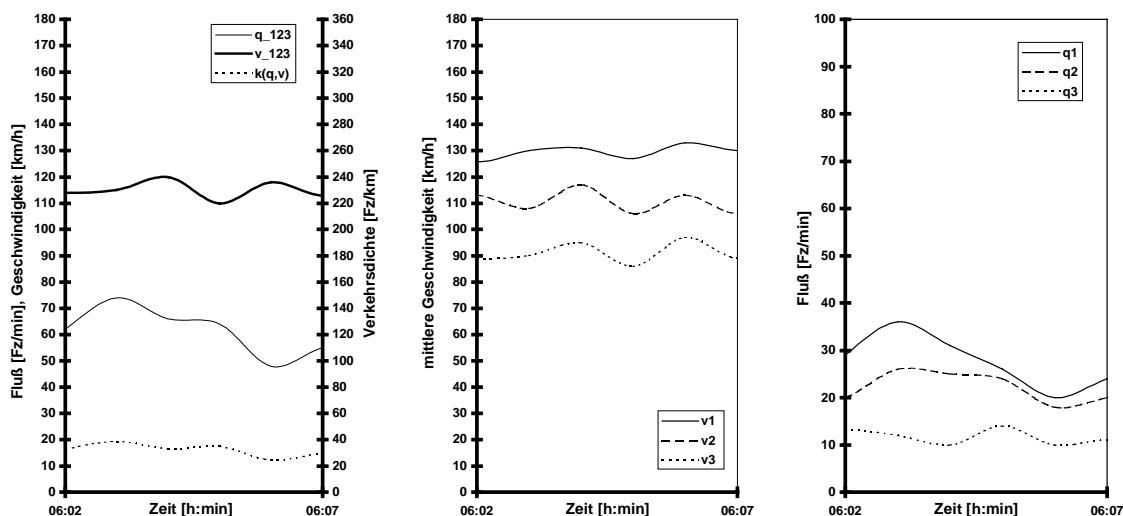


Abbildung 5-3 : „freier Verkehr“ Teilzustand 3

Aus der Diskussion der Teilzustände im Verkehrszustand "freier Verkehr" sind hinsichtlich der Ersatzwertbildung für Detektoren am gleichen Meßquerschnitt folgende charakteristische Beziehungen festzuhalten:

**Punkt 1 :** Die mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrspuren weisen in allen Teilzuständen stets eine Differenz auf, d.h. es gilt :  $\bar{v}_1 > \bar{v}_2 > \bar{v}_3$ .

**Punkt 2 :** Die Teilflüsse der einzelnen Fahrspuren weisen sich dadurch aus, daß die Teilflüsse der rechten und der mittleren Fahrspur ab einem Gesamtfluß von ca. 40 Fz/min betragsmäßig stets differieren, d.h. es gilt :  $q_2 > q_3$ .

**Punkt 3 :** Der Teilfluß der linken Fahrbahn oszilliert stets und sinkt erst ab einem Gesamtfluß von ca. 50 Fz/min in seinem Betrag nicht unter den Betrag der rechten Fahrspur, d.h. es gilt :  $q_1 \geq q_3$ .

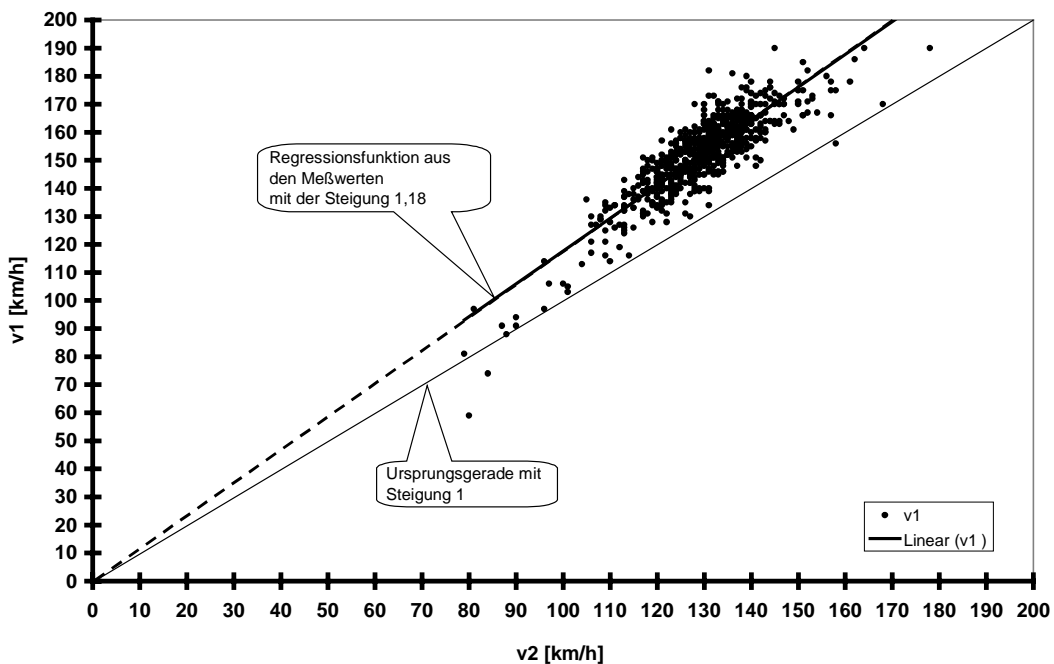
**Punkt 4 :** Der bestimmende Parameter über die Beziehung auf den einzelnen

Fahrspuren ist die Größe Gesamtverkehrsstärke.

### Ersatzwertbildung im Verkehrszustand "freier Verkehr":

#### Ersatzwertbildung für die mittleren Geschwindigkeiten: linke Fahrbahn

Die charakteristische Beziehung nach Punkt 1) gilt in jedem Teilzustand. Somit bildet die mittlere Geschwindigkeit der linken Fahrspur stets eine obere Schranke für die mittlere Fahrspur und diese wiederum bildet eine untere Schranke für die mittlere Geschwindigkeit der linken Fahrspur. Demnach wäre eine Möglichkeit zur Bestimmung von der mittleren Geschwindigkeit auf der linken Spur, diese der mittleren Geschwindigkeit der mittleren Fahrspur gleichzusetzen. Diese Lösung ist nicht befriedigend, da wir wissen, daß stets  $\bar{v}_1 > \bar{v}_2$  gilt. Der Ersatzwert für  $\bar{v}_1$  soll um einen bestimmten Wert größer als  $\bar{v}_2$  betragen. Dafür wurde aus den



**Abbildung 5-4 :** Verteilung der mittleren Geschwindigkeit auf der Spur 1 in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit auf Spur 2 im Zustand "freier Verkehr".

Verkehrsdaten der Verlauf von  $\bar{v}_1$  in Abhängigkeit von  $\bar{v}_2$  im Zustand "freier Verkehr" ermittelt.

Abbildung 5-4 zeigt die Verteilung der mittleren Geschwindigkeit auf der Fahrspur 1 in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit auf der Fahrspur 2 an einem Meßquerschnitt im Verkehrszustand "freier Verkehr". Man erkennt, daß die Datenpunkte stets (bis auf 3 Punkte) über der Ursprungsgeraden mit der Steigung 1

liegen, d.h., daß  $\bar{v}_1 > \bar{v}_2$  gilt. Die lineare Regressionsfunktion<sup>3</sup> aus den Meßwerten stellt eine Gerade mit der Steigung von  $m=1,18$  dar. Dies bedeutet also, daß die mittlere Geschwindigkeit der linken Fahrspur im Zustand "freier Verkehr" im Mittel 118% der mittleren Geschwindigkeit der mittleren Fahrbahn beträgt.

Für die Bildung eines Ersatzwertes für die mittlere Geschwindigkeit auf der linken Fahrbahn im Zustand "freier Verkehr" wird folgende Funktion benutzt :

$$\bar{v}_{1ers}(\bar{v}_2) = \bar{v}_2 \cdot 1,18 \quad [\text{km/h}] \quad (5.1)$$

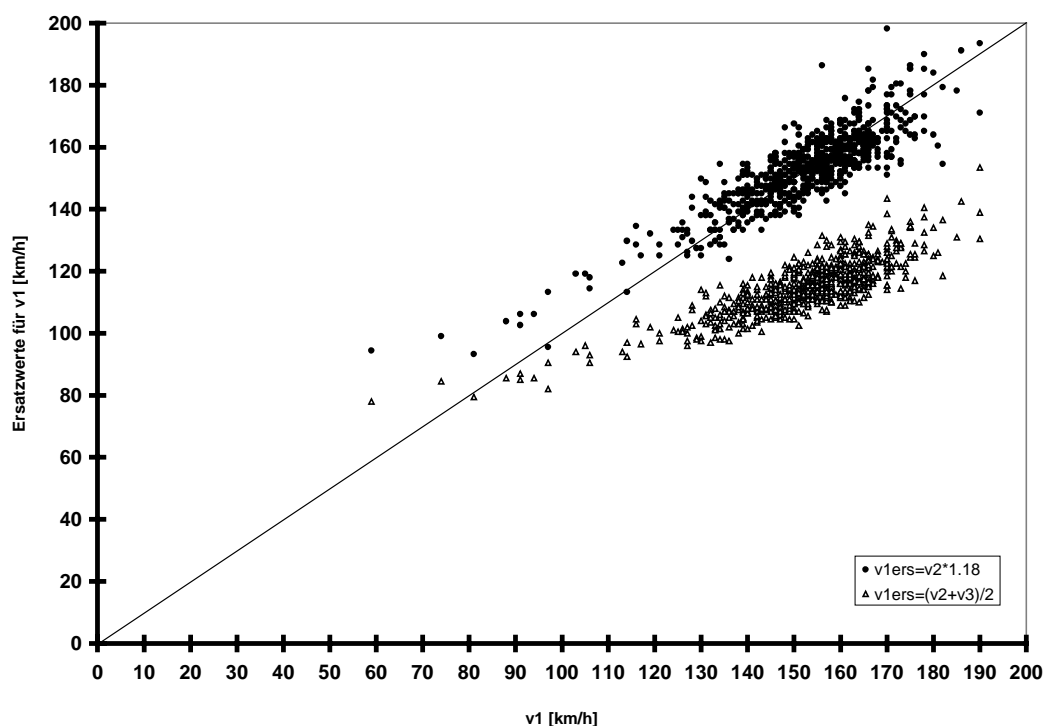


Abbildung 5-5 : Vergleich der Verfahren zur Ersatzwertbildung. Die ausgefüllten Kreise sind Ersatzwerte für  $v_1$ , berechnet nach oberer Formel. Die Dreiecke sind Ersatzwerte für  $v_1$ , berechnet als arithm. Mittel aus  $v_2$  und  $v_3$ .

Abbildung 5-5 zeigt das Ergebnis der Ersatzwertbildung für die mittlere Geschwindigkeit auf der Fahrspur 1. Die ausgefüllten Kreise sind Ersatzwerte für  $v_1$ , berechnet nach oberer Formel. Die Dreiecke sind Ersatzwerte für  $v_1$ , berechnet als arithm. Mittel aus  $v_2$  und  $v_3$ . Die Kreise liegen deutlich dichter an der Diagonalen, die die Originalmeßwerte für die mittlere Geschwindigkeit auf der Fahrspur 1 repräsentiert.

### mittlere Fahrbahn:

<sup>3</sup> lineare Regressionsmethode berechnet eine Gerade nach der Methode der kleinsten Quadrate, die durch Gleichung  $y=mx+b$  dargestellt wird. Darin ist  $m$  die Steigung und  $b$  der Aufpunkt.

Da aus der charakteristische Beziehung nach Punkt 1  $\bar{v}_1 > \bar{v}_2 > \bar{v}_3$  gilt, und der Fehler der mittleren Gesamtgeschwindigkeit, gemittelt über 10 Minuten, unter 7% liegt, wird für die Bildung des Ersatzwertes dieselbe Funktion benutzt, wie in den Archivdaten:

$$\bar{v}_{2ers}(\bar{v}_1, \bar{v}_3) = (\bar{v}_1 + \bar{v}_3) \div 2 \quad [\text{km/h}] \quad (5.2)$$

Der Vorteil der obigen Funktion ist, daß  $\bar{v}_1$  und  $\bar{v}_3$  als für dieses Meßintervall

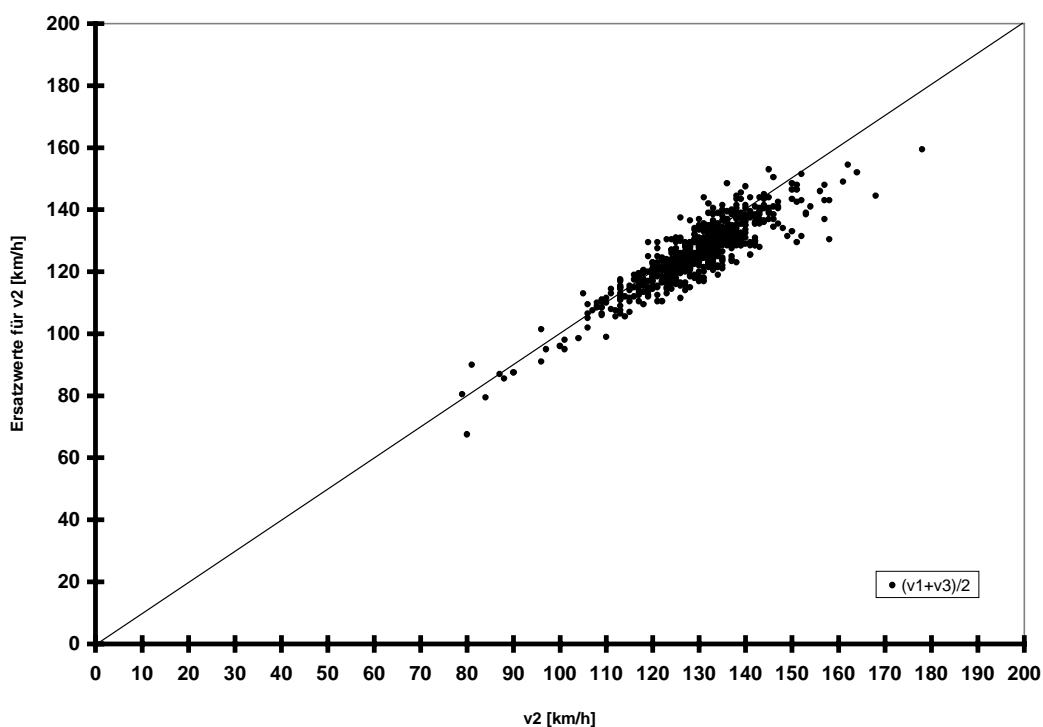


Abbildung 5-6 : Ergebnis der Ersatzwertbildung für die mittlere Geschwindigkeit auf der Fahrspur 2.

gültige Schranken für  $\bar{v}_2$  dienen, während bei einer Multiplikation mit einem Funktionswert eine der Schranken fehlt.

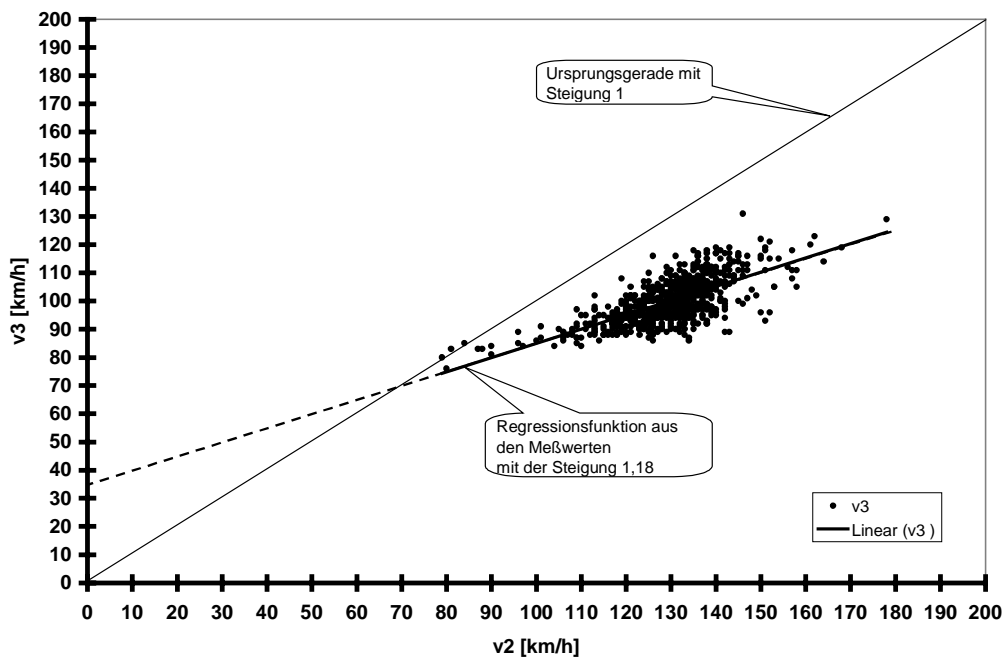
Abbildung 5-6 zeigt das Ergebnis der Ersatzwertbildung für die mittlere Geschwindigkeit auf der Fahrspur 2. Die ermittelte Ersatzwerte liegen dicht um die Diagonale, die die Originalmeßwerte für die mittlere Geschwindigkeit auf der Fahrspur 2 repräsentiert.

### rechte Fahrbahn:

Nach der charakteristischen Beziehung nach Punkt 1) bildet die mittlere Geschwindigkeit auf der mittleren Fahrspur eine obere Schranke für die mittlere Geschwindigkeit der rechten Fahrspur. Demnach wäre eine Möglichkeit zur

Bestimmung von der mittleren Geschwindigkeit auf der rechten Fahrspur, diese der mittleren Geschwindigkeit der mittleren Fahrspur gleichzusetzen. Diese Lösung ist nicht befriedigend, da wir wissen, daß stets  $\bar{v}_2 > \bar{v}_3$  im Zustand "freier Verkehr" gilt. Der Ersatzwert für  $\bar{v}_3$  soll um einen bestimmten Wert kleiner als  $\bar{v}_2$  betragen. Dafür wurde aus den Verkehrsdaten der Verlauf von  $\bar{v}_3$  in Abhängigkeit von  $\bar{v}_2$  im Zustand "freier Verkehr" ermittelt.

Abbildung 5-7 zeigt die Verteilung der mittleren Geschwindigkeit auf der Fahrspur 3 in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit auf der Fahrspur 2 an einem Meßquerschnitt im Verkehrszustand "freier Verkehr". Man erkennt, daß die



*Abbildung 5-7 : Verteilung der mittleren Geschwindigkeit auf der Spur 3 in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit auf Spur 2 im Zustand "freier Verkehr".*

Datenpunkte (bis auf 3), unter der Ursprungsgeraden mit der Steigung 1 liegen, d.h., daß  $\bar{v}_3 < \bar{v}_2$  gilt. Die lineare Regressionsfunktion aus den Meßwerten stellt eine ansteigende gerade Funktion dar. Ihre Steigung beträgt  $m=0,5$ , der Aufpunkt liegt bei  $b=35$  km/h. Die positive Steigung bedeutet, daß die mittlere Geschwindigkeit der rechten Fahrspur im Zustand "freier Verkehr" mit Zunahme der mittleren Geschwindigkeit der mittleren Fahrspur zunimmt, oder anders herum gesagt: nimmt die mittlere Geschwindigkeit auf der rechten Fahrspur zu, so müssen die Fahrzeuge auf der mittleren Überholspur ebenfalls schneller fahren, um überholen zu können.

Für die Bildung eines Ersatzwertes für die mittlere Geschwindigkeit auf der rechten Fahrspur im Zustand "freier Verkehr" wird folgende Funktion benutzt :

$$\bar{v}_{3ers}(\bar{v}_2) = \bar{v}_2 \cdot 0,5 + 35 \text{ km/h} \quad [\text{km/h}] \quad (5.3)$$

Abbildung 5-8 zeigt das Ergebnis der Ersatzwertbildung für die mittlere

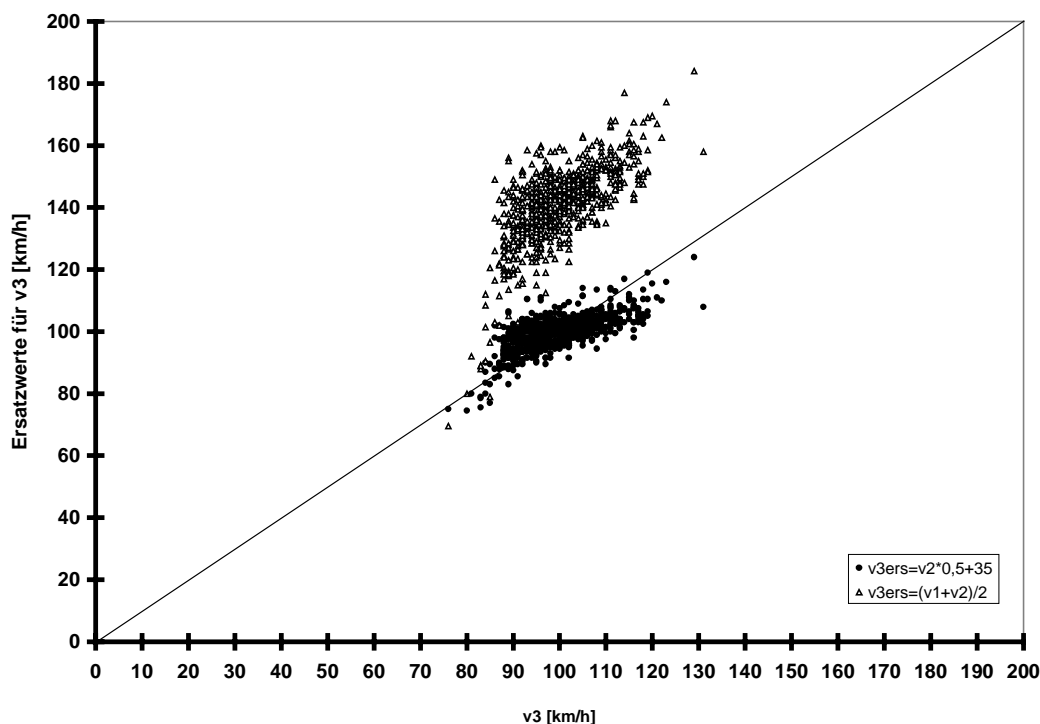


Abbildung 5-8 : Vergleich der Verfahren zur Ersatzwertbildung. Die ausgefüllten Kreise sind Ersatzwerte für  $v_3$ , berechnet nach oberer Formel. Die Dreiecke sind Ersatzwerte für  $v_3$ , berechnet als arithm. Mittel aus  $v_1$  und  $v_2$

Geschwindigkeit auf der Fahrspur 1. Die ausgefüllten Kreise sind Ersatzwerte für  $v_1$ , berechnet nach oberer Formel. Die Dreiecke sind Ersatzwerte für  $v_1$ , berechnet als arithm. Mittel aus  $v_2$  und  $v_3$ . Die Kreise liegen deutlich dichter an der Diagonalen, die die Originalmeßwerte für die mittlere Geschwindigkeit auf der Fahrspur 1 repräsentiert.

### Ersatzwertbildung für die Teilflüsse:

Nach Punkt 2 bildet der Verkehrsfluß der rechten Fahrbahn in den Teilzuständen 2 und 3 eine untere Schranke für den Verkehrsfluß auf der mittleren Fahrbahn. Nach Punkt 3 bildet der Verkehrsfluß der rechten Fahrbahn im Teilzustand 3 eine untere Schranke für den Verkehrsfluß auf der linken Fahrbahn. Da nach Punkt 4 die Einteilung des Zustands "freier Verkehr" in Teilzustände vom Gesamtverkehrsfluß am Meßquerschnitt abhängt, dieser aber beim Ausfall eines Detektors nicht vorliegt, ist die Bestimmung der unteren Schranken für die Flüsse an der linken und mittleren Fahrspur schwierig.

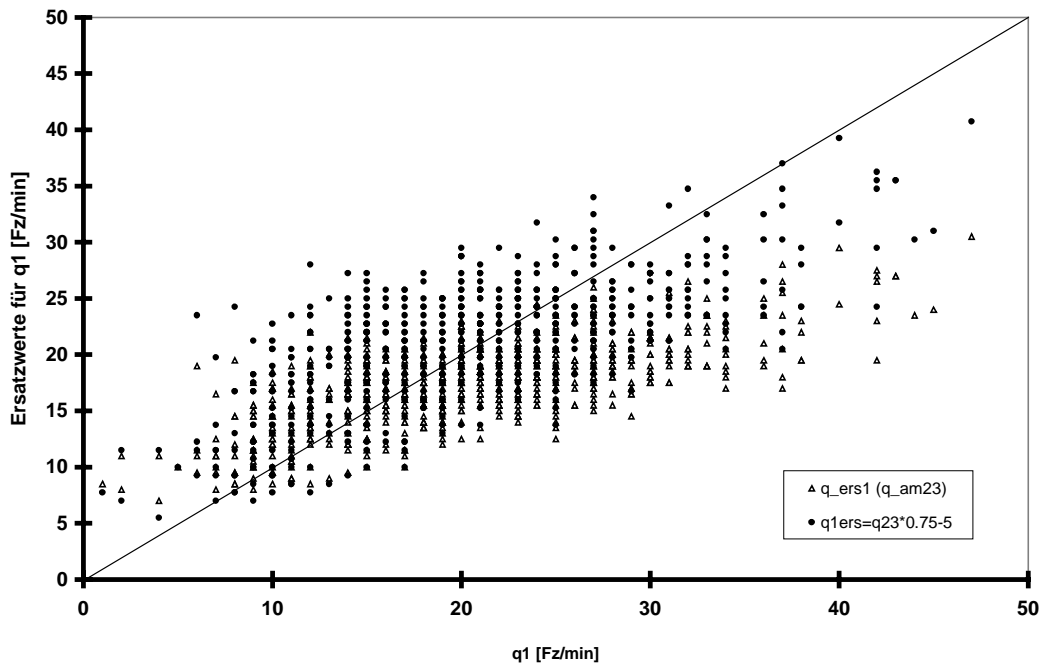


Abbildung 5-9 : Vergleich der Ersatzwerte für  $q_1$ .

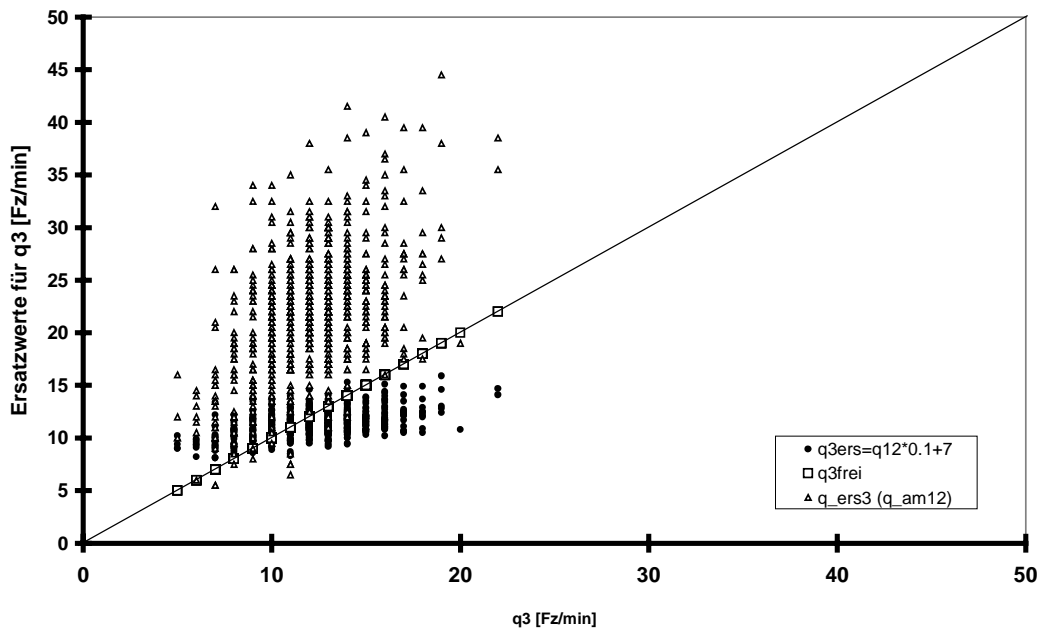


Abbildung 5-10 : Vergleich der Ersatzwerte für  $q_2$

Abbildung 5-11 zeigt das Ergebnis der Ersatzwertbildung für die rechte Fahrspur im

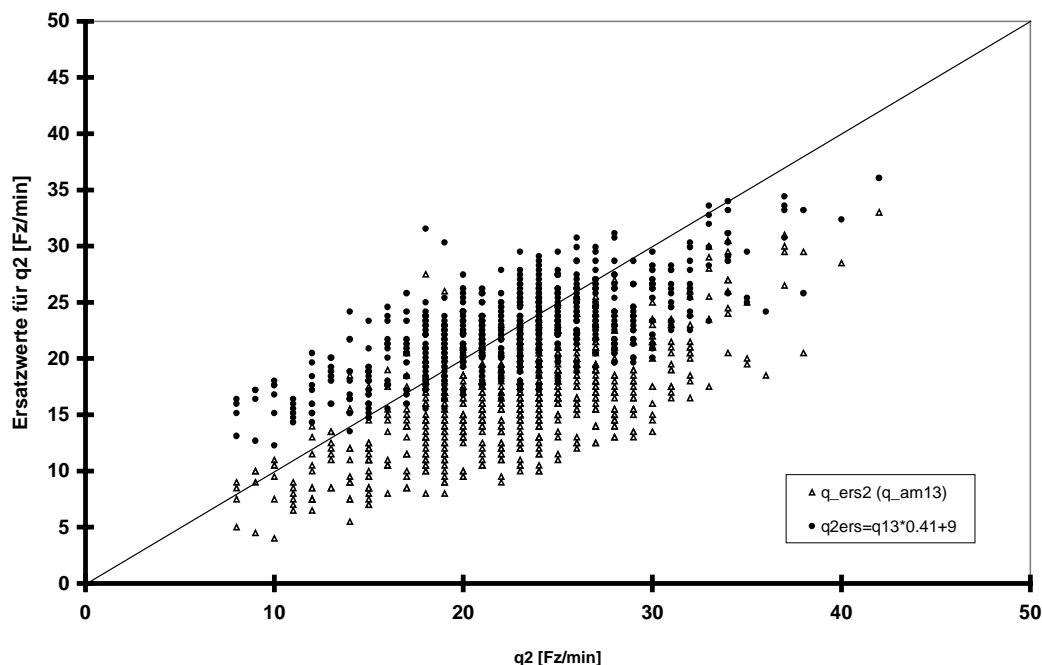


Abbildung 5-11 : Vergleich der Ersatzwerte für  $q_3$

Verkehrszustand "freier Verkehr".

### Ersatzwertbildung im Verkehrszustand „synchronisierter Verkehr“:

Die charakteristischen Merkmale des Verkehrszustands „synchronisierter Verkehr“ sind ein hoher Verkehrsfluß. An Zustandsübergängen zum Verkehrszustand „Stau“ und in Bereichen mit kurzzeitigen Staus („pinch regions“ [Kern98a]), kann dieser jedoch in den mittleren Bereich absinken. Die mittlere Geschwindigkeit bewegt sich in Bereichen von ca. 50 km/h bis 100 km/h und ist auf allen Fahrspuren nahezu gleich. An Zustandsübergängen zum Verkehrszustand „Stau“ und in Bereichen mit kurzzeitigen Staus kann sie jedoch tiefer absinken. Die Verkehrsdichte als Quotient aus dem Verkehrsfluß und der mittleren Geschwindigkeit ist stets größer, als im Zustand "freier Verkehr". Durch empirische Erhebungen hat sich herausgestellt, daß die Beziehung dieser drei Parametern im Zustand „synchronisierter Verkehr“ nicht durch eine Kurve in einem Fundamentaldiagramm dargestellt werden kann. Die Streuung der Meßwerte ist so groß, daß sie keiner Kurve zugeordnet werden kann. Sie nimmt in einem Fluß-Dichte-Diagramm deswegen eine Fläche möglicher Werte ein.

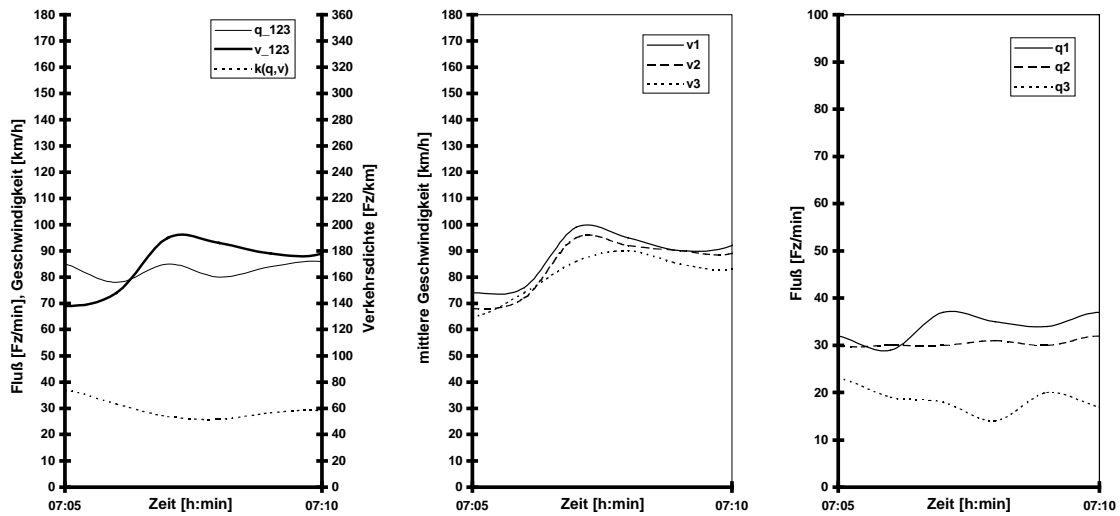
**Teilzustand 1:**

Abbildung 5-12 : synchronisierter Verkehr, Teilzustand 1

Im Teilzustand 1 des synchronisierten Verkehrs herrscht ein hoher Gesamtverkehrsfluß. Die mittlere Geschwindigkeit reicht von 50km/h bis 100km/h. Die Verkehrsdichte ist höher als im freien Verkehr. Für die einzelnen Fahrbahnen gelten folgende Beziehungen:

- e) Die Differenzen zwischen den mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrspuren sind vernachlässigbar klein.
- f) Die Verkehrsflüsse der linken und mittleren Fahrspur heben sich deutlich von der rechten Fahrspur ab. Der Verkehrsfluß auf der linken Fahrspur sinkt kaum mehr unter den Betrag der mittleren Fahrspur.

**Teilzustand 2:**

An Zustandsübergängen zum Verkehrszustand „Stau“, in Bereichen mit kurzzeitigen Staus und in stauähnlichen Bereichen nimmt die mittlere Geschwindigkeit ab. Erreicht sie Werte, bei denen ein homogener Fluß stark eingeschränkt wird, so sinkt der Gesamtverkehrsfluß ab. Die Verkehrsdichte nimmt entsprechend zu. Für die einzelnen Fahrbahnen gelten folgende Beziehungen:

- g) Die Differenzen zwischen den mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrspuren sind vernachlässigbar klein.
- h) Die Verkehrsflüsse der einzelnen Fahrspuren nähern sich stark an.

Aus der Diskussion der Teilzustände im Verkehrszustand "freier Verkehr" sind hinsichtlich der Ersatzwertbildung für Detektoren am gleichen Meßquerschnitt folgende charakteristische Beziehungen festzuhalten:

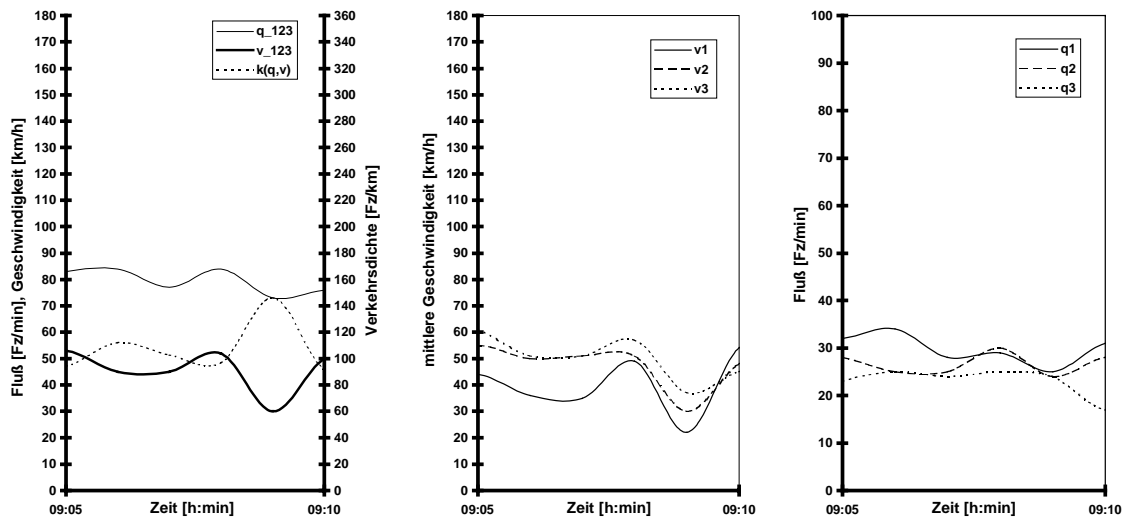


Abbildung 5-13 : „synchronisierter Verkehr“ Teilzustand 2

**Punkt 1 :** Die mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrspuren weisen in beiden Teilzuständen nahezu keine Differenz auf, d.h. es gilt :  
 $\bar{v}_1 \approx \bar{v}_2 \approx \bar{v}_3$ .

**Punkt 2 :** Die Teilflüsse der einzelnen Fahrspuren stehen stets in folgender Relation zueinander:  $q_1 \gg q_2 \gg q_3$ .

**Punkt 3 :** Der bestimmende Parameter über die Beziehung auf den einzelnen Fahrspuren ist die mittlere Geschwindigkeit.

### Ersatzwertbildung für die mittlere Geschwindigkeit :

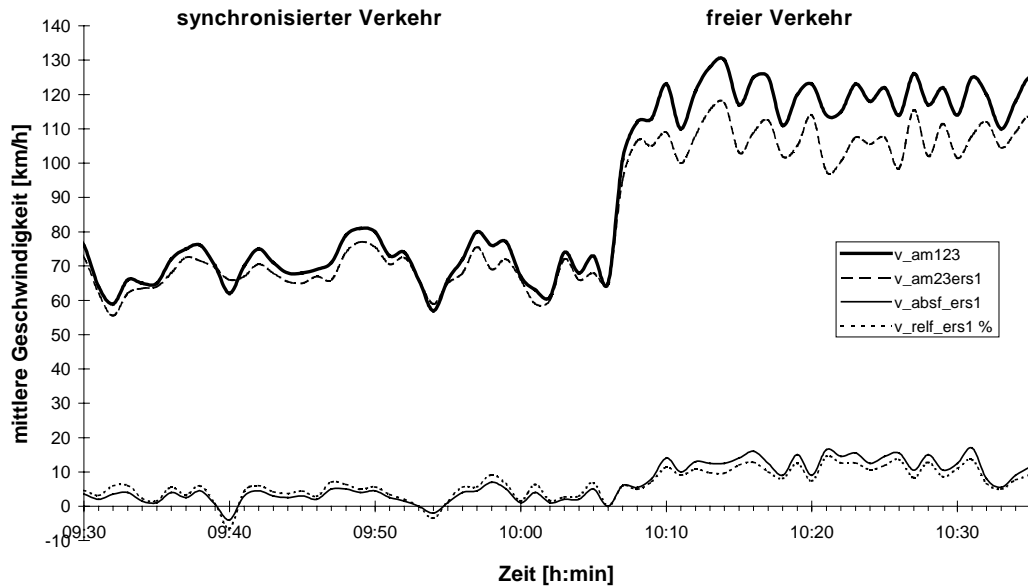
Die charakteristische Beziehung nach Punkt 1 gilt in jedem Teilzustand. Somit wird für die Ersatzwertbildung für die Geschwindigkeit eines gestörten Detektors das arithmetische Mittel aus den Meßdaten der vorhandenen zwei Detektoren gewählt. Die entsprechenden Funktionen lauten somit wie folgt:

$$\bar{v}_{1ers}(t) = (\bar{v}_2(t) + \bar{v}_3(t)) \div 2 \quad [\text{km/h}] \quad (5.4)$$

$$\bar{v}_{2ers}(t) = (\bar{v}_1(t) + \bar{v}_3(t)) \div 2 \quad [\text{km/h}] \quad (5.5)$$

$$\bar{v}_{3ers}(t) = (\bar{v}_1(t) + \bar{v}_2(t)) \div 2 \quad [\text{km/h}] \quad (5.6)$$

Die Legitimation des eben gewählten Ansatzes soll durch die Abbildung 5-14



**Abbildung 5-14** : Fehler durch die Ersatzwertbildung, unter Verwendung des Ersatzwertes  $\bar{v}_{1ers}$  nach (5.4)

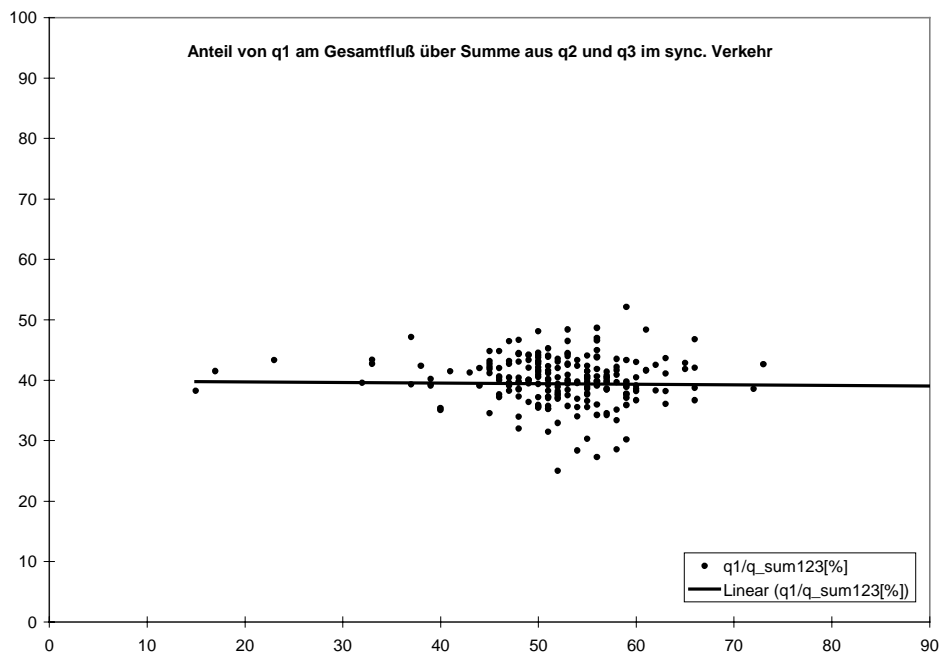
bestätigt werden. Es zeigt das Ergebnis der Ersatzwertbildung für die mittlere Geschwindigkeit der linken Fahrspur in den Verkehrszuständen synchronisierter Verkehr und freier Verkehr. Die fette durchgezogene Linie stellt den Verlauf der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit dar. Die langgestrichelte Linie stellt den Verlauf der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit, unter Verwendung des Ersatzwertes  $\bar{v}_{1ers}$  nach Funktion (5.4). Die dünne Linie und die kurzgestrichelte Linie stellen den Verlauf des resultierten absoluten, bzw. des relativen Fehlers dar. Man sieht, daß der Fehler der Querschnittsgeschwindigkeit unter Verwendung der o.g. Funktion im Bereich des synchronisierten Verkehrs deutlich geringer ist, als im freien Verkehr.

#### **Ersatzwertbildung für den Verkehrsfluß :**

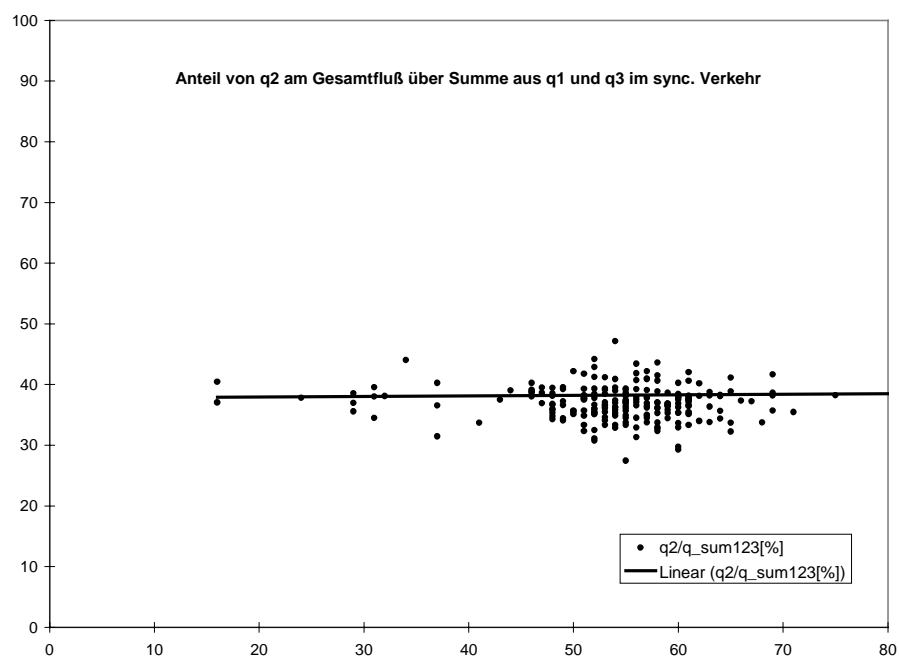
Nach Punkt 2 bildet der Verkehrsfluß der mittleren Fahrspur stets eine untere Schranke für den Verkehrsfluß auf der linken Fahrspur. Der Verkehrsfluß der rechten Fahrspur bildet eine untere Schranke für den Verkehrsfluß auf der mittleren Fahrspur. Da nach Punkt 4 die Einteilung des Zustands "freier Verkehr" in Teilzustände vom Gesamtverkehrsfluß am Meßquerschnitt abhängt, dieser aber beim Ausfall eines Detektors nicht vorliegt, ist die Bestimmung der unteren Schranken für die Flüsse an der linken und mittleren Fahrspur schwierig.

#### **Ersatzwertbildung für die Teilflüsse:**

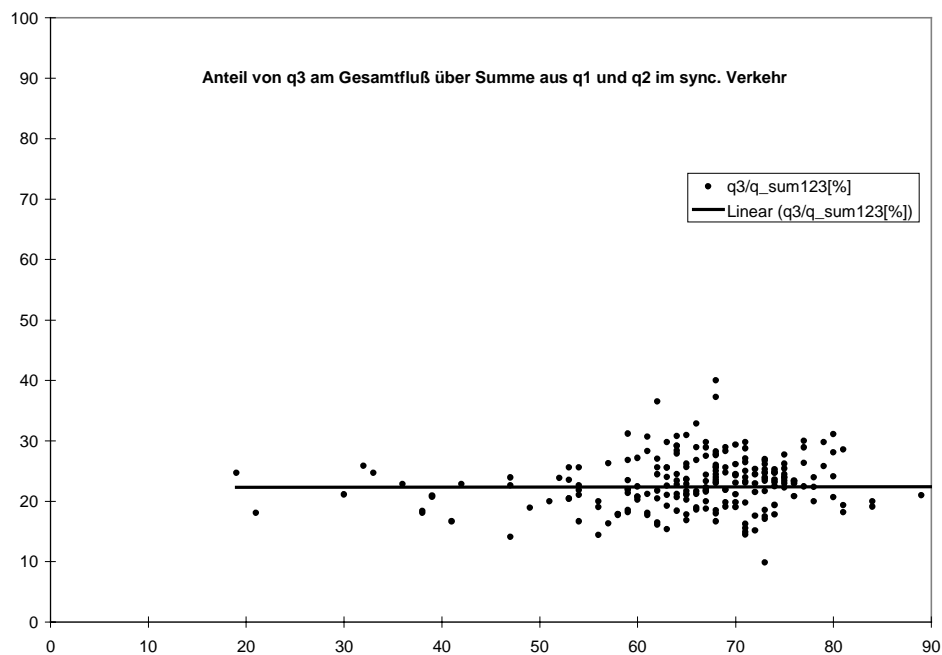
- i) Aus Auswertungen hat sich jedoch folgendes ergeben:  
Der Anteil des Verkehrsflusses auf der linken Fahrspur beträgt im Zustand „synchronisierter Verkehr“ im Mittel 40% des Gesamtflusses.



- j) Der Anteil des Verkehrsflusses auf der mittleren Fahrspur beträgt im Zustand „synchronisierter Verkehr“ im Mittel 38% des Gesamtflusses.



k) Der Anteil des Verkehrsflusses auf der rechten Fahrspur beträgt im Zustand



„synchronisierter Verkehr“ im Mittel 22% des Gesamtflusses.

$$\bar{q}_{1ers}(t) = (\bar{q}_2(t) + \bar{q}_3(t)) \cdot \frac{2}{3} \quad [\text{Fz/min}] \quad (5.7)$$

$$\bar{q}_{2ers}(t) = (\bar{q}_1(t) + \bar{q}_3(t)) \cdot \frac{19}{31} \quad [\text{Fz/min}] \quad (5.8)$$

$$\bar{q}_{3ers}(t) = (\bar{q}_1(t) + \bar{q}_2(t)) \cdot \frac{11}{39} \quad [\text{Fz/min}] \quad (5.9)$$

### Verkehrszustand „Stau“:

Die charakteristischen Merkmale des Verkehrszustands „Stau“ sind eine kleine bis keine mittlere Geschwindigkeit und entsprechend kleiner bis kein Verkehrsfluß. Die Verkehrsdichte, berechnet als Quotient aus dem Verkehrsfluß und der mittleren Geschwindigkeit, ist als Indikator nicht mehr sinnvoll. Sie schwankt aufgrund der im Verkehrszustand „Stau“ herrschenden kleinen Werte, und der damit großen relativen Unterschiede zwischen dem Verkehrsfluß und der mittleren Geschwindigkeit sehr stark. Die charakteristischen Beziehungen zwischen den einzelnen Fahrspuren sind wie folgt:

**Punkt 1 :** Die mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrspuren weisen nahezu keine Differenz auf, d.h. es gilt :  $\bar{v}_1 \approx \bar{v}_2 \approx \bar{v}_3$ .

**Punkt 2 :** Die Teilflüsse der einzelnen Fahrspuren weisen zwar Differenzen auf, sie lassen aber keine Regelmäßigkeit erkennen und sind sehr klein. Die Teilflüsse können durch folgende Relation beschrieben werden:

$$q_1 \approx q_2 \approx q_3$$

**Ersatzwertbildung für die mittlere Geschwindigkeit:**

$$\bar{v}_{1ers}(t) = (\bar{v}_2(t) + \bar{v}_3(t)) \div 2 \quad [\text{km/h}] \quad (5.10)$$

$$\bar{v}_{2ers}(t) = (\bar{v}_1(t) + \bar{v}_3(t)) \div 2 \quad [\text{km/h}] \quad (5.11)$$

$$\bar{v}_{3ers}(t) = (\bar{v}_1(t) + \bar{v}_2(t)) \div 2 \quad [\text{km/h}] \quad (5.12)$$

**Ersatzwertbildung für die mittlere Geschwindigkeit:**

$$\bar{q}_{1ers}(t) = (\bar{q}_2(t) + \bar{q}_3(t)) / 2 \quad [\text{Fz/min}] \quad (5.13)$$

$$\bar{q}_{2ers}(t) = (\bar{q}_1(t) + \bar{q}_3(t)) \cdot / 2 \quad [\text{Fz/min}] \quad (5.14)$$

$$\bar{q}_{3ers}(t) = (\bar{q}_1(t) + \bar{q}_2(t)) \cdot / 2 \quad [\text{Fz/min}] \quad (5.15)$$

Abbildung 5-15 zeigt die Verbesserung, das durch das neue Verfahren zur Ersatzwertbildung erreicht wurde.

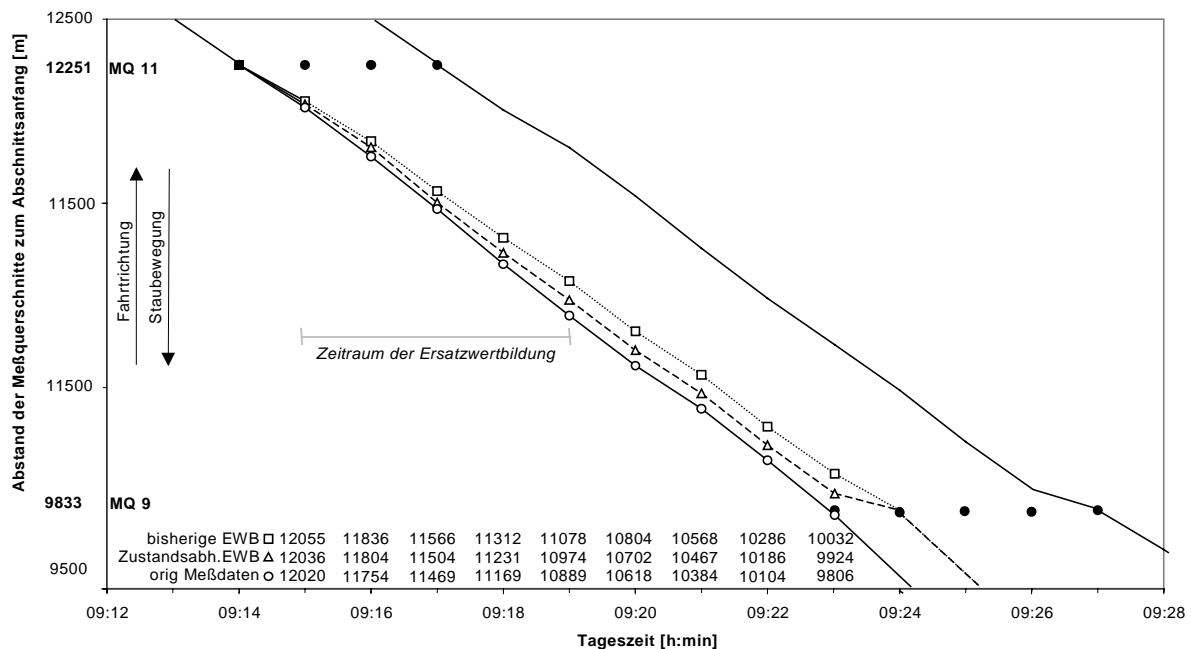


Abbildung 5-15 : Vergleich der Verfahren zur Ersatzwertbildung

### 5.1.2 Behandlung von Störungen ganzer Querschnitte

#### Ansatz :

- Es ist zu vermeiden, daß Meßquerschnitte außerhalb von Staubereichen als Ersatzwerte Werte von Nachbarquerschnitten erhalten, die von einem Stau überdeckt sind.
- Es ist zu vermeiden, daß Meßquerschnitte innerhalb von Staubereichen als Ersatzwerte Werte von Nachbarquerschnitten erhalten, die außerhalb von einem Stau liegen.

## 5.2 Umgang mit speziellen Problemen in der Stauverfolgung mittels System ASDA

Die in Abschnitten 4.2 behandelten speziellen Problemsituationen in der Stauverfolgung mittels System ASDA motiviert zu einer ganzen Reihe von Lösungsansätzen. Die Gesamtheit der Lösungsansätze führt zum gewünschten Erfolg.

*Anmerkung:* . Aufgrund der anfangs erwähnten Geheimhaltungspflicht wird versucht so viel wie nötig und so wenig wie möglich von der Realisierung von System ASDA zu erwähnen.

Es wird folgende Lösungsstrategie realisiert :

- Einführung eines Zwischenzustands „fast Stau“ für das Staukriterium
- Bereitstellung von Mechanismen im Umgang mit dem Zwischenzustand „fast Stau“
- Bereitstellung von Mechanismen zum Zusammenfügen von Staubereichen
- Bereitstellung von Mechanismen zur Berücksichtigung von Kleinststaus
- sonstige Erweiterungen
  - Verbesserung der Initialisierung von Stauobjekten bei deren Erzeugung

### 5.2.1 Flexibler Umgang mit dem Staukriterium

Zum einen besteht im System ASDA eine starre Abgrenzung zwischen den Zuständen „Stau“ und „nicht Stau“. In Abhängigkeit dieser Zustände an den Meßquerschnitten entscheidet der Algorithmus, der für die Aktualisierung der

Staupositionen zuständig ist, auf welche Weise die Position eines Stauobjekts berechnet wird. Ein Stauobjekt kann Meßdaten von Meßquerschnitten erhalten. Es kann Werte von anderen Stauobjekten erhalten. Und es kann eigene Werte benutzen, die aus zurückliegenden Zeitintervallen stammen.

Zum anderen hat sich bei Auswertungen von Situationen vom Typ 4.2.1 und 4.2.2 herausgestellt, daß die Meßwerte von Meßquerschnitten, die zur Aktualisierung eines Stauobjekts ausgewählt werden, gerade nicht mehr das Staukriterium erfüllen. Es sind Meßwerte, in deren Meßintervall der Anfang oder das Ende eines Staubereich sich gerade noch über den Meßquerschnitt bewegte. Es kommt auch vor, daß innerhalb eines Staubereichs durch Fluktuationen Meßwerte gerade noch das Staukriterium nicht erfüllen. Die Benutzung solcher Meßwerte nach dem bisherigen Aktualisierungs-Algorithmus haben die in 4.2.1 und 4.2.2 gezeigten Folgen. Die Modifikation des Aktualisierungs-Algorithmus beinhaltet die Einführung des Zwischenzustands „fast Stau“ in den Zustandsraum des Systems ASDA und der Bereitstellung von Mechanismen im Umgang mit diesem Zwischenzustand.

Das folgende Unterkapitel 5.2.1.1 beschäftigt sich mit der Herleitung eines Verfahrens zur Detektion von Zwischenzuständen an Meßquerschnitten und der Modifikation von ASDA um die Bereitstellung von Mechanismen im Umgang mit dem Zwischenzustand „fast Stau“

### **5.2.1.1 Verfahren zur Zustandsdetektion mit maximalem Fluß zu einer gemessenen Geschwindigkeit**

#### **Herleitung des Verfahrens zur Detektion des Verkehrszustands „Stau“**

Im folgenden wird ein Verfahren zur Detektion vom Verkehrszustand „Stau“ auf Schnellstraßen vorgestellt. Wie oben schon erwähnt wurde, bezeichnet der Zustand Stau einen Fahrbahnabschnitt, in dem Fahrzeuge vollkommen oder nahezu stillstehen. Zusätzlich bewegt sich der Staubereich Flußaufwärts. Lokale Meßeinrichtungen, wie z.B. Induktivschleifen, die die Anzahl der vorüberfahrenden Fahrzeuge zählen und deren Geschwindigkeit über einen zeitlichen Meßintervall aggregieren, geben den tatsächlichen Verkehrsablauf aus folgenden Gründen verzerrt wieder.

Bereiche völligen Stillstands sind zeitlich selten so lange, wie das Meßintervall der Meßeinrichtung, über den die Meßdaten aggregiert werden, da aufgrund von Fluktuationen Bereiche kleiner Geschwindigkeiten durch Bereiche völligen Stillstands flußaufwärts wandern.

Auch in Bereichen völligen Stillstands gibt es in der Realität Bewegungen durch Fahrzeuge, deren Fahrern auch kleine vor dem Fahrzeug entstandene Lücken wieder zu schließen versuchen.

Somit liefern Detektoren auch in Staubereichen gewisse Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten an. Bei der Klassifizierung der Verkehrszustände nach Kerner ([Kern96a], [Kern97b] und [Kern98a]) gibt es noch den Verkehrszustand „synchronisierter Verkehr“, der ebenfalls sehr niedrige Geschwindigkeiten annehmen kann, dessen charakteristisches Merkmal aber, im Verhältnis zur Geschwindigkeit, ein höherer Fluß ist. Die Abgrenzung des Verkehrszustands „Stau“ vom Verkehrszustand „synchronisiert“ und „frei“ an einem Meßquerschnitt, soll das nachfolgend beschriebene Verfahren leisten. Das Verfahren kann bei der Stauverfolgung zur Detektion von Staubereichen aus Meßdaten benutzt werden. Dabei sollen nur die aktuell erfaßten Meßdaten der Detektoren benutzt werden und nicht etwa zurückliegende.

Zunächst wird das Stauerkennungsverfahren für eine Fahrbahn definiert und danach auf eine Straße mit mehreren Fahrbahnen erweitert.

Ein Meßquerschnitt besteht zunächst aus nur einem Detektor. Dieser liefert in *Zeitintervallen* der Länge  $T$  die *Anzahl der vorübergefahrenen Fahrzeuge*  $N(x,t)$  und die *mittlere momentane Geschwindigkeit*  $\bar{v}(x,t)$  am Ort  $x$ .

Die *mittlere momentane Geschwindigkeit*  $\bar{v}(x,t)$  wird definiert als

$$\bar{v}(x,t) = N / \left( \sum_{i=1}^{N(x,t)} \frac{1}{v_i} \right) \quad [\text{km/h}] \quad (5.16)$$

Weiterhin wird die *Verkehrsstärke*  $q(x,t)$  definiert als

$$q(x,t) = \frac{N(x,t)}{T} \quad [\text{Fz/h}] \quad (5.17)$$

und bezeichnet, im Gegensatz von  $N(x,t)$ , die Anzahl der vorüberfahrenden Fahrzeuge normiert auf eine Stunde. Alternativ kann  $q(x,t)$  in Fahrzeugen pro Minute benutzt werden und das Meßintervall in Minuten. Dann müssen Umrechnungskonstanten zur Berechnung hinzugenommen werden.

#### Vereinbarung :

Die Angabe des Ortsparameters  $x$  in den Parameterlisten der Größen kann weggelassen werden, wenn die Größen sich auf einen bestimmten Meßquerschnitt beziehen.

Wenn von der mittleren Geschwindigkeit die Rede ist, dann ist die mittlere momentane Geschwindigkeit nach der oberen Definition gemeint.

Man faßt die mittlere Geschwindigkeit als die Geschwindigkeit der vorübergefahrenen Fahrzeuggruppe auf. Nun läßt sich der vom 1. Fahrzeug der Fahrzeuggruppe zurückgelegte Weg für ein Zeitintervall berechnen als das Produkt aus der mittleren Geschwindigkeit und des Zeitintervalls der Messung. Der vom 1. Fahrzeug der Fahrzeuggruppe zurückgelegte Weg, wird als der vom Detektor erfaßte Streckenabschnitt angenommen.

$$\bar{s}_{\text{erfaßt}} = s_{1.\text{Fahrzeug}} = \bar{v} \cdot T \quad [\text{km}] \quad (5.18)$$

Auf der Basis der Länge des erfaßten Streckenabschnitts, der mittleren Geschwindigkeit der Fahrzeuggruppe und der Länge des Meßintervalls, wird die maximale Anzahl der Fahrzeuge berechnet, die unter den gegebenen Bedingungen den Meßpunkt passieren könnten. Mit anderen Worten, es wird berechnet, wie viele Fahrzeuge samt den Netto-Zeitlücken zwischen den einzelnen Fahrzeugen der Fahrzeuggruppe, in den erfaßten Streckenabschnitt hineinpassen könnten. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der mittleren Fahrzeuglänge und der sogenannten minimalen Netto-Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen. Als Netto-Zeitlücke  $t_l$  bezeichnet man den zeitlichen Abstand eines Fahrzeugs zum nächsten vorausfahrenden Fahrzeug. Die minimale Netto-Zeitlücke  $t_{l\text{min}}$ , die von den Autofahrern aus Sicherheitsgründen längerfristig (und damit im Mittel) nicht unterschritten wird, beträgt ca. 1,5s. Diese Zeitlücke ist in der Reaktionszeit des Menschen begründet [Rek94, S.30ff] und läßt sich aus den Verkehrsdaten empirisch gut nachweisen. Sie ist von der Geschwindigkeit, mit der die Autofahrer fahren, nahezu<sup>4</sup> unabhängig. Die mittlere Netto-Zeitlücke  $\bar{t}_l$  bezeichnet den zeitlichen Abstand zwischen mehreren Fahrzeugen, gemittelt über alle Netto-Zeitlücken zwischen ihnen. Um die maximale Anzahl der Fahrzeuge im erfaßten Streckenabschnitt zu berechnen, wird die mittlere Netto-Zeitlücke durch die minimale Netto-Zeitlücke ersetzt. Die Netto-Zeitlücke läßt sich über die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs in eine Netto-Weglücke umrechnen, somit gilt :

$$\begin{aligned} \bar{s}_l &= \bar{v} \cdot \bar{t}_l && [\text{km}] \\ s_{l\text{min}} &= \bar{v} \cdot t_{l\text{min}} && [\text{km}] \end{aligned} \quad (5.19)$$

<sup>4</sup> Aus Quellen der Forschungsabteilung der DaimlerChrysler AG neigen Autofahrer die Netto-Zeitlücke in Bereichen sehr gleichmäßigen Verkehrs zu unterschreiten. Dies hat sich bei meinen Auswertungen bestätigt, indem in Geschwindigkeitsbereichen mit der mittleren Geschwindigkeit von 60 km/h bis 100 km/h der Verkehrsfluß über den maximalen Verkehrsfluß mit der Netto-Zeitlücke von 1.5s hinaus geht. Dieser Umstand ist auf synchronisierten Verkehrszustand zurückzuführen, in dem alle Fahrzeuge streckenweise mit nahezu derselben Geschwindigkeit gleichmäßig fahren.

Eine mittlere Fahrzeuglänge  $\bar{s}_f$  und eine mittlere Netto-Weglücke  $\bar{s}_l$  bilden eine Fahrzeugeinheit der Länge  $\bar{s}_e$  als folgende Summe :

$$\begin{aligned}\bar{s}_e &= \bar{s}_f + \bar{s}_l & [\text{km}] \\ s_{e \min} &= \bar{s}_f + s_{l \min} & [\text{km}]\end{aligned}\tag{5.20}$$

Somit berechnet sich die Anzahl der Fahrzeuge im Erfassungsbereich eines Meßpunktes mit

$$N_{erf} = \frac{s_{erf}}{\bar{s}_l} \quad [\text{Fz}]\tag{5.21}$$

und die maximale Anzahl der Fahrzeuge im Erfassungsbereich mit

$$N_{erf \max} = \frac{s_{erf}}{s_{l \min}} \quad [\text{Fz}]\tag{5.22}$$

Der dazugehörige Fluß  $q(x, t)$  berechnet sich mit :

$$q(x, t) = \frac{N_{erf}(x, t)}{T} = \frac{\bar{s}_{erf}}{\bar{s}_e \cdot T} = \frac{\bar{v} \cdot T}{\bar{s}_f + \bar{v} \cdot \bar{t}_l} \cdot \frac{1}{T} = \frac{1}{\bar{t}_l + \frac{\bar{s}_f}{\bar{v}}} \quad [\text{Fz/h}]\tag{5.23}$$

und der dazugehörige maximale Fluß  $q_{\max}(x, t)$  berechnet sich mit :

$$q_{\max}(x, t) = \frac{N_{erf \max}}{T} = \frac{\bar{s}_{erf}}{\bar{s}_e \cdot T} = \frac{\bar{v} \cdot T}{\bar{s}_f + \bar{v} \cdot \bar{t}_{l \min}} \cdot \frac{1}{T} = \frac{1}{\bar{t}_{l \min} + \frac{\bar{s}_f}{\bar{v}}} = q_{\max}(\bar{v})\tag{5.24}$$

[Fz/h]

Der eben berechnete maximale Verkehrsfluß kann nur dann von einer Fahrzeuggruppe erreicht werden, wenn der Verkehrszustand homogen ist, und alle Fahrzeuge mit der minimalen Netto-Zeitlücke fahren. Homogener Verkehrszustand ist dann gegeben, wenn alle Fahrzeuge mit nahezu derselben Geschwindigkeit, also ohne Störungen (z.B. abruptes Abbremsen und plötzliches Beschleunigen), sich fortbewegen.

Es wird vorausgesetzt, daß die Wunschgeschwindigkeit der Autofahrer auf einer Schnellstraße höher ist, als die Geschwindigkeit in Staubereichen. Für

Geschwindigkeiten weit unterhalb der Wunschgeschwindigkeiten läßt sich somit folgendes behaupten: je kleiner der Fluß zu einer gemessenen mittleren Geschwindigkeit ausfällt, desto größer ist der Einfluß von Störungen in der erfaßten Fahrzeuggruppe. Störungen in diesem Sinne sind Bremsvorgänge, die sich wellenartig entgegen der Fahrtrichtung (flußaufwärts) ausbreiten. Aufgrund der Verdichtung von Fahrzeugen in diesen Bremsbereichen nennt man sie auch Dichtewellen. Ist der Einfluß von Störungen sehr groß, d.h. der Fahrablauf der erfaßten Fahrzeuggruppe ist extrem inhomogen, dann fällt der Verkehrsfluß ebenfalls stark ab.

Die Differenz zwischen dem maximal möglichen Fluß und dem tatsächlich gemessenen Fluß zu einer mittleren Geschwindigkeit wird in diesem Verfahren zur Detektion benutzt.

### **Definition : Verkehrszustand „Stau“**

*Der Verkehrszustand an einem Meßquerschnitt ist dann als „Stau“ zu bezeichnen, wenn die mittlere Geschwindigkeit am Meßquerschnitt kleiner einer Grenzgeschwindigkeit für Stau ist, und die Verkehrsstärke die Grenzverkehrsstärke für extreme Inhomogenität des Verkehrs unterschreitet. Es gilt also :*

$$\bar{v}(x,t) \leq v_{Stau} \wedge q(x,t) \leq q_{Stau}(\bar{v}) \quad (5.25)$$

mit dem Staugrenzwert für den Fluß in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit:

$$q_{stau}(\bar{v}) = \frac{1}{t_{lstau} + \frac{s_f}{\bar{v}}} \quad [\text{Fz/h}] \quad (5.26)$$

### **Erweiterung des Modells auf Streckenabschnitte mit mehreren Fahrspuren :**

In makroskopischen Betrachtungen ist es üblich, einen mehrspurigen Streckenabschnitt zu einen Streckenabschnitt mit nur einem Fahrzeugstrom zusammenzufassen. Dabei wird die Geschwindigkeit über Fahrzeuge aller Spuren gemittelt und der Verkehrsfluß summiert. Somit kann das oben entwickelte Modell auch auf mehrspurige Streckenabschnitte angewendet werden. Entsprechend muß der maximale Fluß  $q_{\max}(v)$  und der Grenzwert für den Staufluß  $q_{Stau}(v)$  mit der Anzahl der Fahrbahnen multipliziert werden.

Liegen insgesamt  $I$  Spuren vor, so berechnet sich die *Verkehrsstärke*  $q(x,t)$  aus

$$q(x,t) = \frac{\sum_{i=1}^I N_i(x,t)}{T} = \sum_{i=1}^I q_i(x,t). \quad (5.27)$$

und die *mittlere lokale Geschwindigkeit*  $\bar{v}(x,t)$

$$\bar{v}(x,t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^I N_i(x,t)} \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{t_\alpha=t}^{t+T} v_\alpha(x,i) \quad (5.28)$$

Für die Grenzwerte gilt :

$$q_{stau}(\bar{v}) = \sum_{i=1}^{i=I} q_{istau}(\bar{v}) \quad [\text{Fz/h}] \quad (5.29)$$

### **Parameter:**

#### konstante Parameter :

mittl. Fahrzeuglänge PKW : 4,5m

mittl. Fahrzeuglänge LKW : 12m

mittl. Fahrzeuglänge : gewichtet nach Anzahl LKW und PKW aus den Meßdaten

#### zu validierende Parameter :

Die minimale Netto-Zeitlücke  $t_{lstau} = 1,5\text{s}$  hat sich nach Auswertung von Verkehrsdaten bewährt. Beinahe über das ganze Geschwindigkeitsspektrum der ausgewerteten Daten verschiedener Meßquerschnitte und verschiedener Tage, wurden keine Verkehrsstärken oberhalb von  $q_{\max}$  entdeckt.

Die Ausnahme bildeten vereinzelt Bereiche mit einer mittleren. Geschwindigkeit zwischen 60km/h und 100km/h. Diese Geschwindigkeiten entsprechen dem Zustand „synchronisierter Verkehr“, in dem einen sehr homogener und dichter Verkehrsstrom entstehen kann. Nach 4 neigen die Fahrer dazu, in solchen Situationen den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug klein zu halten.

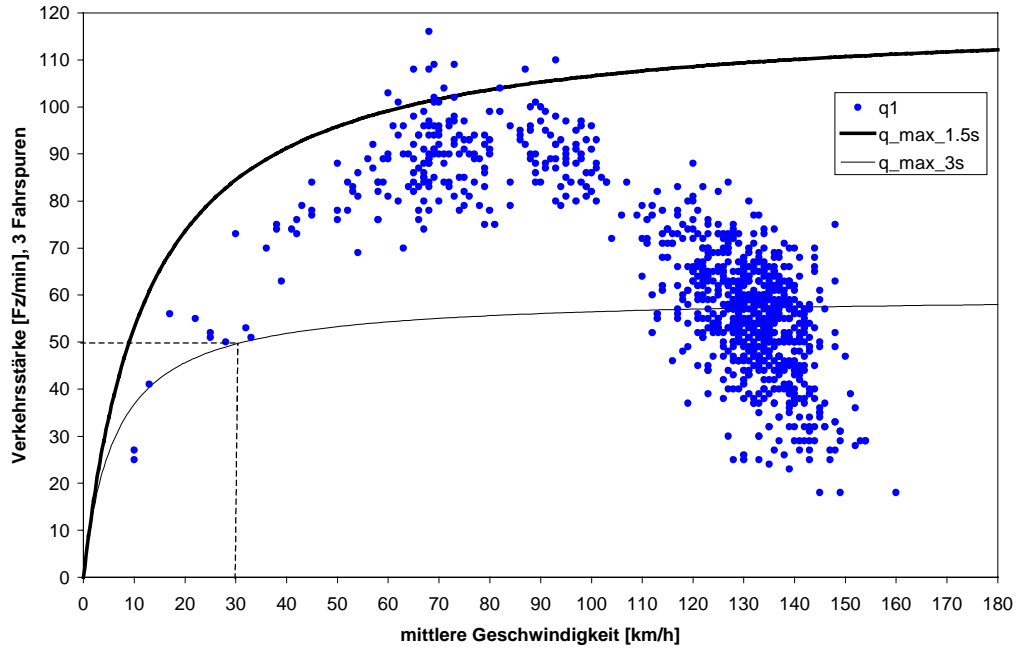


Abbildung 5-16: Maximaler Fluß in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit und der Netto-Zeitlücke nach Gl.(5.23)

Die Netto-Zeitlücke zur Abgrenzung des Zustands „Stau“ von den Restlichen Verkehrszuständen „synchronisiert“ und „frei“ wird zu  $t_{\text{stau}} = 3\text{s}$  gewählt. Dabei richtete sich der Wert nach den im System ASDA benutzten Schwellwerten  $v_{\text{stauASDA}} = 30\text{km/h}$  und  $q_{\text{stau}} = 50\text{Fz/min}$  bei einer dreispurigen Autobahn. Mit anderen Worten, bei der Wahl der Netto-Zeitlücke von 3s und der mittleren Geschwindigkeit  $v_{\text{stauASDA}} = 30\text{km/h}$ , liefert Gl. (5.23)  $q_{\text{stau}} = 50\text{Fz/min}$ .

Der Schwellwert für die mittlere Geschwindigkeit zur Detektion von Zustand „Stau“  $v_{\text{Stau}}$  ist noch zu validieren. Dieser kann jedoch größer sein, als der unter ASDA verwendete Schwellwert  $v_{\text{stauASDA}}$ .

Um die Funktionsfähigkeit des Detektionsverfahrens zu demonstrieren, wurde es in das System ASDA integriert. Abbildung 5-17 zeigt die Stauverfolgung mittels System ASDA und dem hergeleiteten Detektionsverfahren.  $v_{\text{stau}}$  beträgt dabei 35km/h und  $t_{\text{stau}}$  beträgt 3s

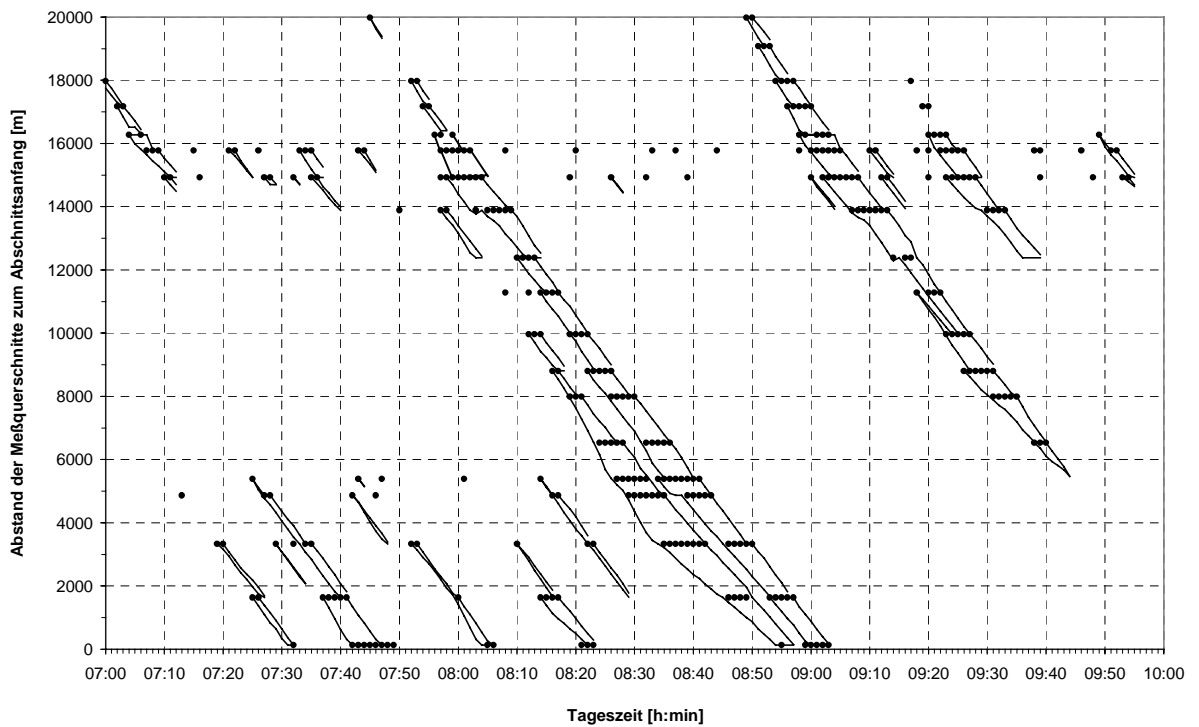


Abbildung 5-17 : Staverfolgung mit dem hergeleiteten Detektionsverfahren

Abbildung 5-18 präsentiert ein Beispiel, in dem simuliert wird, wie sich ein Staubereich über einen Detektor bewegt. Die Detektion wird nach Gl.(5.25) und Gl(5.26) angewendet wird. Darin wird an einem Meßquerschnitt in einem Meßintervall von 60s 9 Fahrzeuge gezählt. Die mittlere momentane Geschwindigkeit beträgt 16,9 km/h. Die berechnete Schwellwert  $q_{\text{stau}}$  ergibt sich aus

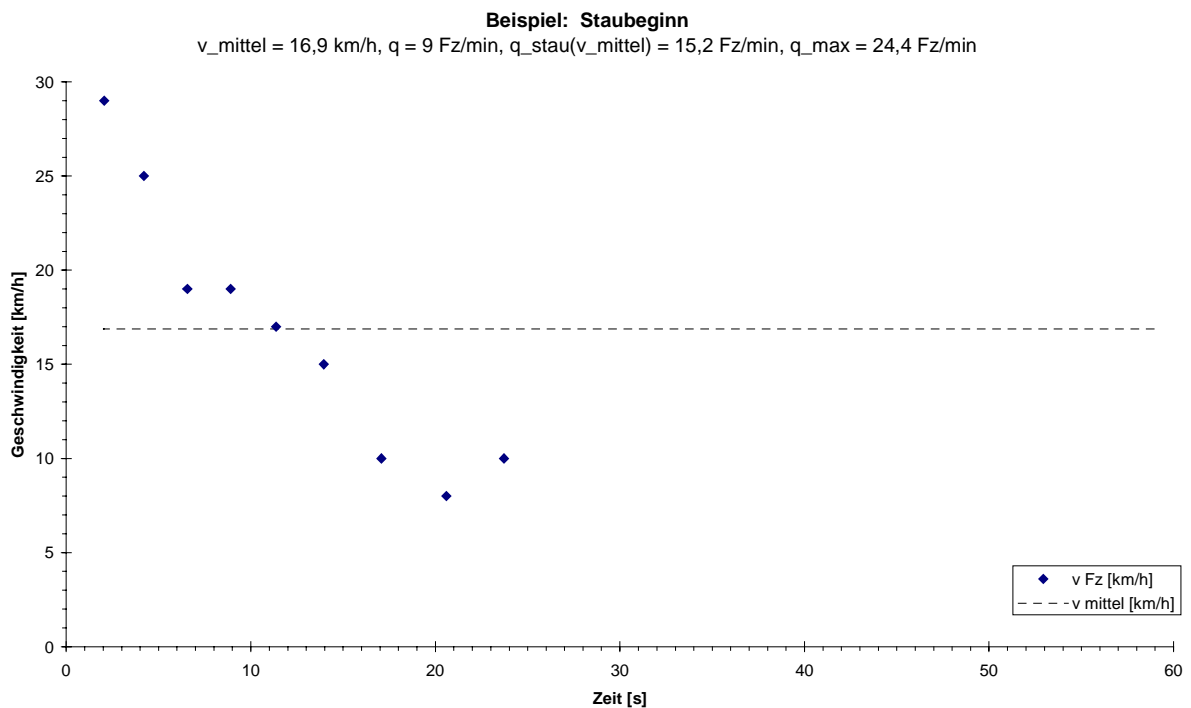


Abbildung 5-18 : Beispiel zur Detektion eines Staubereich durch das entwickelte Verfahren

Gl.(5.26) zu 15,2Fz/min. Da die gemessene Verkehrsstärke unter dem berechneten Schwellwert  $q_{\text{stau}}$  liegt, wird der Zustand Stau erkannt.

### **Vorteile des Verfahrens :**

Nach einer erfolgreichen Validierung der Netto-Zeitlücke für den Grenzwert des Staufflusses ist nur die Angabe eines Schwellwertes für  $v_{\text{stau}}$  notwendig. Der Dazugehörige Schwellwert für den Fluß wird zu jedem Meßwert neu berechnet. Somit entsteht eine Toleranz für den Stauffluß.

### **Probleme:**

Die vorliegenden Meßwerte weisen in den untersten Geschwindigkeitsbereichen große Unsicherheiten auf, die sich auf das Verfahren negativ auswirken (siehe 4.1.5).

### **Auswahl der Parameter für den Zustand „fast Stau“:**

Nachdem die Netto-Zeitlücke zur Berechnung des Grenzflusses im Zustand „Stau“ definiert wurde, ist es nun möglich den Zustand „fast Stau“ abzuleiten, der in der Erweiterung von System ASDA verwendet werden soll. Als Ansatz wird zur Detektion des Zustands „fast Stau“ die Netto-Zeitlücke  $t_{\text{fastStau}} = 2,5\text{s}$  gewählt. Als Schwellwert für die mittlere Geschwindigkeit  $v_{\text{fastStau}}$  wird der Wert 40km/h gewählt.

### **5.2.1.2 Modifikation von System ASDA um Mechanismen im Umgang mit dem Zwischenzustand „fast Stau“**

Im folgenden soll die Integration von Systemzustand „fast Stau“ in das System ASDA vorgestellt werden.

Die Erweiterung um den Zustand „fast Stau“ hat folgende Ziele:

- l) Ein Meßwert an einem Meßquerschnitt, der das Kriterium „fast Stau“ erfüllt, soll innerhalb eines bereits bestehenden Staubereichs toleriert werden. Dieser soll keinen Einfluß auf die Berechnung der Staugrenzen haben. Insbesondere soll eine Teilung des Staubereichs oder eine Kürzung der Staulänge vermieden werden.
- m) Wird ein Meßquerschnitt, der stromaufwärts unmittelbar vor einem verfolgten Staubereich liegt von dem bisherigen Aktualisierungs-Algorithmus ausgewählt, um dessen Meßwerte als Größen für den in den Staubereich einfließenden Verkehr zu benutzen, und erfüllen dessen

Meßwerte lediglich das Kriterium „fast Stau“, dann sollen dessen Meßwerte nicht zur Stauverfolgung im aktuellen Zeitschritt benutzt werden. Die Meßdaten stammen aus einem Zustandswechsel und sind für die Stauverfolgung zu unsicher. Dies hat zur Folge, daß die Geschwindigkeit der stromaufwertigen Stauflanke zu klein berechnet wird und somit die neue Position dieser Stauflanke nicht weit genug voranschreitet

### **1.Schritt : Erweiterung des Zustandsraums**

Bisher umfaßte der Zustandsraum von System ASDA die zwei Zustände „Stau“ und „nicht Stau“. Dieser wurde um den dritten Zustand „fast Stau“ erweitert. Die Einstellung der Parameter für den Zustand „fast Stau“ kann auf zwei Arten erfolgen. Es können, wie bisher, Schwellwerte für den Verkehrsfluß und für die mittlere Geschwindigkeit eingestellt werden. Es kann aber auch das in 5.2.1.1 ausgearbeitete Verfahren benutzt werden. Dann muß ein Wert für die gewünschte Netto-Zeitlücke bestimmt werden und ein Schwellwert für die maximale mittlere Geschwindigkeit im Zustand „fast Stau“. Die Einstellung zur Auswahl des Verfahrens und die Einstellung der dazugehörigen Parameter erfolgt in der Konfigurationsdatei des Systems ASDA.

### **2.Schritt : Erweiterung des vorhandenen Aktualisierungs-Algorithmus**

Der Aktualisierungs-Algorithmus sorgt für die Aktualisierung der Positionen aller Stauobjekte. Bei Eintreffen aller benötigten Meßwerte für den aktuellen Zeitschritt wird für jedes Stauobjekt eine Aktualisierung der Positionen veranlaßt. Dafür sucht der Aktualisierungs-Algorithmus für ein Stauobjekt zunächst die geeigneten Datenquellen. Datenquellen sind Objekte, die Informationen über die Größen „einfließender“ und „ausfließender Verkehr“ enthalten. Mit „einfließender Verkehr“ ist der Verkehrsstrom gemeint, der zu dem Stau fließt. Mit „ausfließender Verkehr“ ist der Verkehrsstrom gemeint, der weg vom Stau fließt. Im Normalfall dienen als Datenquellen Meßquerschnitt-Objekte. Es können aber auch umliegende Stauobjekte sein, wenn keine geeigneten Meßquerschnitte zur Verfügung stehen. Sind beide Datenquell-Typen ungeeignet, dann können die vom Stauobjekt selbst gespeicherten Verkehrsdaten der zurückliegenden Zeitschritte benutzt werden. Sind die geeigneten Datenquellen ausgesucht, dann wird die neue Position des Stauobjekts berechnet. Danach wird die Aktualisierung eines nächsten Stauobjekts aktualisiert.

Die Erweiterung des Aktualisierungs-Algorithmus um Mechanismen zum Umgang mit dem Zustand „fast Stau“ betrifft nur den Datenquell-Typ „Meßquerschnitt-Objekt“. Ein Meßquerschnitt-Objekt kann drei Zustände „Stau“, „fast Stau“ und „nicht Stau“ annehmen. Erwähnt sei noch, daß der Zustand „fast Stau“ kein Stauobjekt generiert, d.h. er wird lediglich bei der Aktualisierung eines bereits vorhandenen Stauobjekts berücksichtigt.

Folgende Situationen können auf der Suche nach den geeigneten Meßquerschnitten eintreten, die für das Handling des Zwischenzustand von Bedeutung sind:

- n) Ein Meßquerschnitt - Objekt innerhalb des Staubereichs befindet sich im Zustand „fast Stau“. Das Meßquerschnitt - Objekt wird dann als ein Objekt im Zustand „Stau“ behandelt.
- o) Ein Meßquerschnitt - Objekt, das als Datenquelle für den „einfließenden Verkehr“ ausgesucht wurde, befindet sich im Zustand „fast Stau“. Dann wird der Abstand zwischen dem Meßquerschnitt und der stromaufwertigen Stauflanke des Stauobjekts mit dem Parameter „max\_MQ\_Abstand<sup>5</sup>“ verglichen. Ist der Abstand kleiner oder gleich dem „max\_MQ\_Abstand“, dann werden die Daten von diesem Meßquerschnitt - Objekt nicht zur Aktualisierung des Stauobjekts benutzt. Für die Aktualisierung wird statt dessen ein Mittelwert aus zurückliegenden Zeitschritten verwendet. Ist der Abstand größer, als „max\_MQ\_Abstand“, dann werden die Daten von diesem Meßquerschnitt - Objekt zur Aktualisierung des Stauobjekts benutzt.

## 5.2.2 Zusammenfügen von Staubereichen

In diesem Unterkapitel soll der Lösungsansatz und dessen Realisierung für die Problemsituationen vom Typ 4.2.3 vorgestellt werden. Es handelt sich um Situationen, bei denen das System ASDA die Verfolgung eines Staubereichs an einem Meßquerschnitt vorzeitig abbricht, weil mindestens einen Zeitschritt zuvor die Verfolgung eines neuen Stauobjekts an diesem Meßquerschnitt begonnen hat.

Die Lösung ist ein Zusammenfügen solcher Bereiche. Die Gründe für diesen Lösungsschritt sind:

- p) An einem Meßquerschnitt kann die stromaufwertige Stauflanke eines verfolgten Staubereich früher ankommen, als es durch das System berechnet wurde. Somit repräsentieren das an einem Meßquerschnitt neu erzeugte Stauobjekt und das verfolgte Stauobjekt um ein und denselben realen Staubereich.
- q) An einem Meßquerschnitt kann ein Staubereich detektiert werden, der nicht zum stromabwertig nächsten und bereits verfolgten Stau gehört. Diese entstehen oft in Bereichen von Auf- und Ausfahrten. Der bereits verfolgte Staubereich trifft nun auf den neu entstandenen Staubereich. Sie verschmelzen zu einem gemeinsamen Staubereich.

---

<sup>5</sup> Die Konfigurationsdatei wurde um den Parameter max\_MQ\_Abstand erweitert. Mit diesem Parameter wird der Bereich zwischen einem Meßquerschnitt und der stromaufwertigen Stauflanke eines verfolgten Staus eingestellt, in dem Korrekturen aufgrund des am Meßquerschnitt herrschenden Zustands „fast Stau“ durchgeführt werden dürfen

Beide Situationen haben gemeinsam, daß es einen Zeitschritt gibt, in dem die stromabwertige Stauflanke des einen Stauobjekts und die stromaufwertige Stauflanke des anderen Stauobjekts dieselbe Position besitzen.

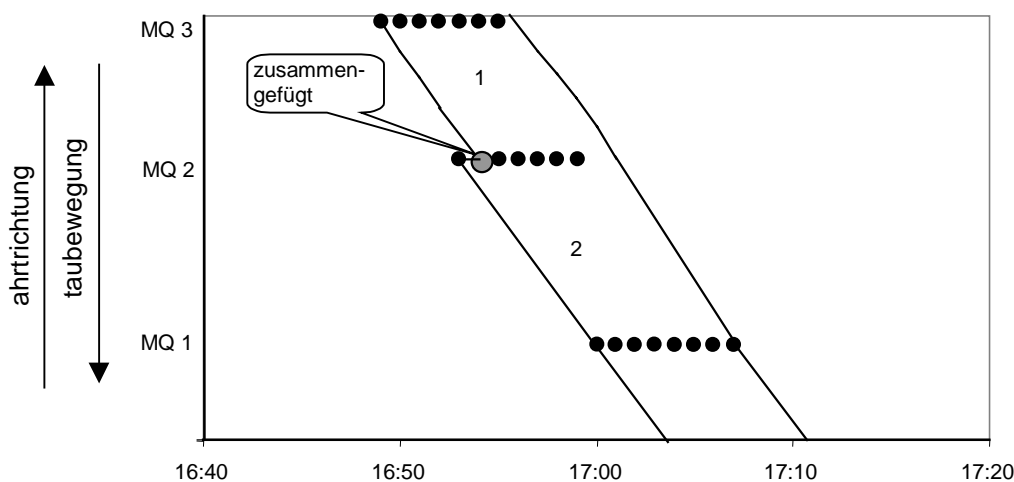


Abbildung 5-19 : Zusammenfügen von Staubereichen

### Realisierung

Nach der Aktualisierung der Position von jedem Stauobjekt wird die Position dessen stromaufwertigen Stauflanke mit der Position der stromabwertigen Stauflanke des nächsten stromaufwertigen Stauobjekts verglichen. Besitzen beide Flanken dieselbe Position, so wird dem stromaufwertigen Objekt die Position der stromabwertigen Stauflanke des gerade aktualisierten Stauobjekts zugeordnet. Das gerade aktualisierte Stauobjekt wird gelöscht. Sind die besagten Stauflanken jedoch nicht an derselben Stelle, so wird der Vorgang abgebrochen und die Aktualisierung des nächsten Staus wird veranlaßt.

### 5.2.3 Berücksichtigung von Kleinststaus

In diesem Unterkapitel soll der Lösungsansatz und dessen Realisierung für die Problemsituationen vom Typ 4.2.4 vorgestellt werden. Es handelt sich um Situationen, bei denen das System ASDA die Position der stromaufwertigen Stauflanke eines verfolgten Staubereichs falsch berechnet, weil sich zwischen dem Meßquerschnitt, der die Meßdaten für den „einfließenden Verkehr“ bereitstellt, und dem verfolgten Staubereich, Kleinststaus befinden, dessen Verfolgung System ASDA nicht aufgenommen hat.

Das zentrale Problem dieser Situation ist, daß das System die Stauverfolgung auf sehr kleine Staus nicht aufnahm. Somit hatte es keine Information über diese Bereiche an späteren Zeitzyklen. Es war so realisiert und konfiguriert, daß :

- r) das Fortschreiten der stromaufwertigen Stauflanke nicht von der ersten Minute an berücksichtigt wurde
- s) Staubereiche mit kurzen Staulängen nicht weiter verfolgt wurden

### Änderungen zu a):

Die Implementierung von System ASDA wurde dahingehend verändert, daß das Fortschreiten der stromaufwertigen Stauflanke von der ersten Minute an berücksichtigt wurde. Die bisherige Realisierung beruhte auf einem

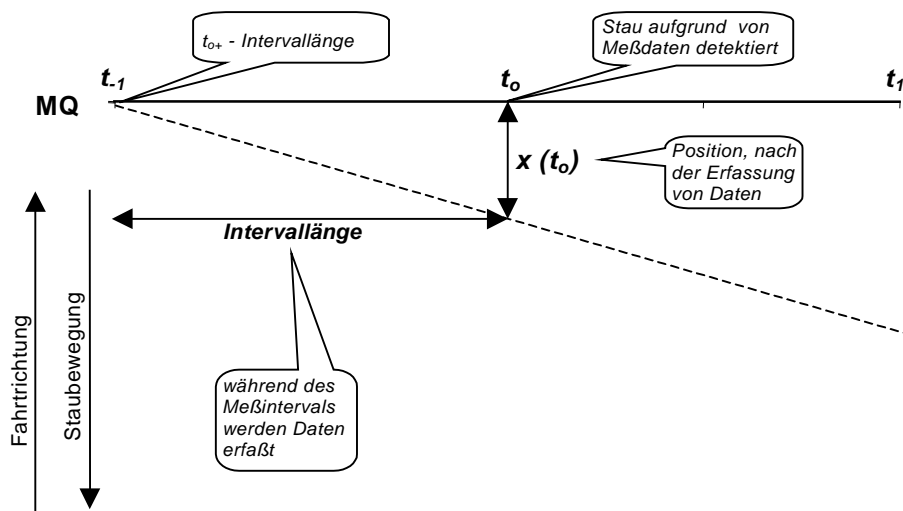


Abbildung 5-20 : Stauposition nach der erstmaligen Detektion an einem Meßquerschnitt

Interpretationsfehler des benutzten Stauverfolgungsverfahrens (siehe Unterkapitel 2.2.4, Abbildung 2-1). Darin wird erläutert, daß zum Zeitpunkt  $t_0$  an einem Detektor<sup>6</sup> der Verkehrszustand „Stau“ erkannt wird. Bei der Realisierung von ASDA wird jedoch nicht berücksichtigt, daß die Meßdaten zu diesem Zeitpunkt aus dem Zeitintervall  $[t_{0+} - Intervalllänge, t_0]$  stammen. Somit hat der Staubereich bereits in diesem Zeitintervall eine bestimmte Strecke stromaufwärts über den Detektor zurückgelegt. Abbildung 5-20 veranschaulicht die Problematik.

### Änderungen zu b)

Die Konfiguration in den Parametern wurde so eingestellt, daß das System ASDA die Verfolgung auch von kurzen Staubereichen aufnimmt.

<sup>6</sup> Bei der Vorstellung des Verfahrens entspricht ein Detektor einem Meßquerschnitt

Das Ergebnis kann in der Abbildung 5-21 betrachtet werden. Man sieht, daß der zuvor falsch berechnete Verlauf der stromaufwärtige Stauflanke am breiten Staubereich nun wesentlich plausibler verläuft.

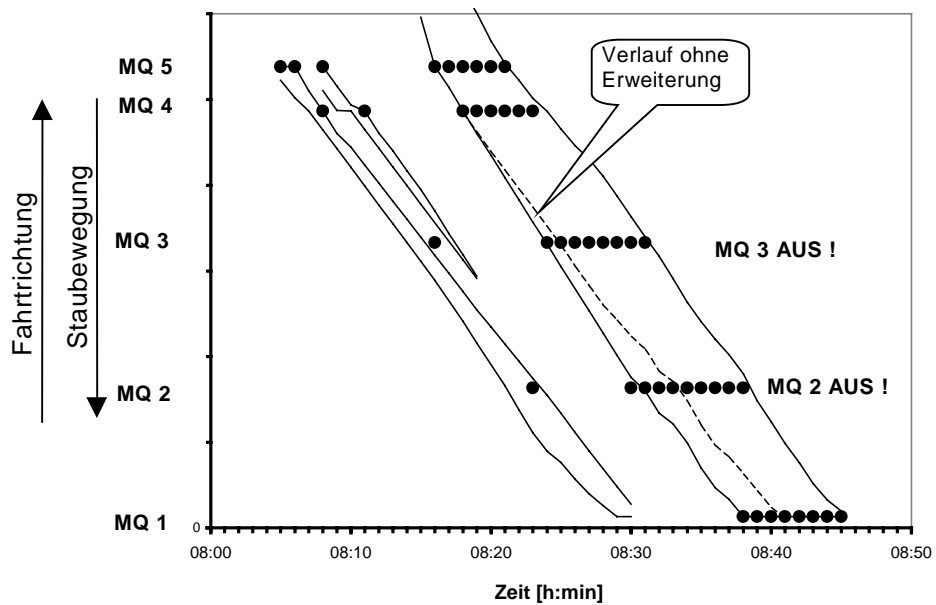


Abbildung 5-21 : Stauverfolgung mit Berücksichtigung von Kleinststaus

## 6 Zusammenfassung

### Anmerkung zum Thema der Diplomarbeit

Die Themenstellung der vorliegenden Arbeit wurde bewußt sehr breit angelegt, da der Arbeitsaufwand der einzelnen, evtl. noch während der Arbeit auftretenden Möglichkeiten und Grenzen nicht abzuschätzen war. Es ging in dieser Diplomarbeit auch darum, eben diese Möglichkeiten und Grenzen zu erkunden.

Innerhalb der praktischen Arbeit wurde herausgefunden, daß das Format der uns vorliegenden Verkehrsdaten von Fa. Heusch / Boesefeld bereits für die Auswertung durch den Steueralgorithmus der Verkehrsbeeinflussungsanlage vorbereitet war. Das heißt, daß die Daten zwar alle für die Steuerung der Anlage erforderlichen Daten enthielt, das Format aber anlagenspezifisch war.

Die Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS)<sup>7</sup> [TLS93] schreiben den Lieferanten u.a. vor, welche Daten von den Streckenstationen bereitgestellt werden müssen. Wie die Übertragung vonstatten gehen soll, läßt die weitere Bearbeitung der Daten zur Steuerung der Verkehrsbeeinflussungsanlagen frei. Somit steht dem Lieferanten bzw. dem Betreiber einer Anlage frei, wie die Gestaltung der Datenformate ab der Schnittstelle Inselbus/Modem der Unterzentrale vorgenommen wird.

Zusätzlich war ursprünglich angesetzt, das Stauverfolgungsverfahren *unter Einbeziehung verschiedenartiger Datenquellen* zu erweitern. Neben den Verkehrsdaten aus dem System von Heusch-Boesefeld aus dem Abschnitt A5 Kreuz Frankfurt / Bad Homburg, sollten Daten eines weiteren Verkehrsdatenerfassungssystems hinzugenommen werden, dessen Systemaufbau sich wesentlich von dem vorher genannten unterscheidet. Das System arbeitet mit Infrarotsensoren und einem anderen Übermittlungskonzept, sowie einer anderen Datenaufbereitung. Eine Möglichkeit wäre hier die Schnittstelle zur Eingabe von Daten am System ASDA an beide Datenformate zu erweitern. Leider war die entsprechende Gesellschaft im Nachhinein nicht bereit, die Daten in einem Rohformat, also mit allen für uns interessanten Nebeninformationen der Datentelegramme (z.B. Statusinformationen der Sensoren), bereitzustellen.

---

<sup>7</sup> Die Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) [TLS93] stellt Anforderungen von Seiten des Bundesministeriums für Verkehr an die Ausrüstung des Bundesfernstraßennetzes mit Verkehrs- und Umfelddatenerfassungseinrichtungen, sowie mit straßenseitigen Einrichtungen. Darin wird das Ziel verfolgt, Datenerfassung und -Übertragung im Bereich der Bundesfernstraßen einheitliche Funktionen und Schnittstellen festzulegen. Dadurch soll die Kommunikation von Systemen unterschiedlicher Herkunft, sowie eine leichte Erweiterbarkeit gewährleistet werden.

---

Vom Aspekt der „*Einbeziehung verschiedenartiger Datenquellen*“ wurde daraufhin aus Mangel an Möglichkeiten abgesehen.

Es ist jedoch denkbar an der Schnittstelle *Inselbus / Modem Steuerrechner* einer TLS-Konformer Anlage ein universelles Eingabemodul zu erstellen, das an die Spezifikation der Datenübertragung in den TLS angelehnt ist.

### **Anmerkung zur Durchführung der Diplomarbeit**

Der Inhalt der Archivdaten wurde in Kleinstarbeit auf deren Inhalt hin untersucht. Als Hilfsmittel dienten bestehende Quell-Codes zur Konvertierung der Rohdaten in das ASCII-Format, allerdings mit sehr knapper Kommentierung. Weiterhin standen als Hilfsmittel eine Datenbeschreibung älterer Archivdaten, die sich mehr auf die Größe der einzelnen Datenelemente im Binär-Code der Archivdaten konzentrierte, als auf deren Inhalt, die für einen Außenstehenden wichtig wären, zu Verfügung.

Der Algorithmus zur Ersatzwertbildung, der in den Archivdaten benutzt wurde, wurde in Form einer sehr knappen Beschreibung in der Literatur entdeckt. Die Verifikation und eigentliche Ausarbeitung wurde durch die Auswertung der Archivdaten durchgeführt.

Insgesamt forderte die Arbeit viel Zeit für die Datenauswertung. Dies erforderte Tätigkeiten, die sich mit dem Schreiben von Auslese-Routinen in C++ für das Auslesen der Archivdaten, sowie Makros in Visual Basic und die Anwendung Microsoft-Excel für deren Visualisierung und Auswertung beschäftigte.

## 7 Anhang

### 7.1 Telegrammdatei, Dateiaufbau

(Format: Dambach, A5 ab 1996)

Sequentielle Datei, in der für jede Minute Verkehrs-, Status- und Wetterdaten abgelegt sind. Eine Datei kann beliebig viele Minutendaten enthalten, die durch die Marken STX (02h) und ETX (03h) begrenzt sind. Aus Formatierungssicht besteht ein Minutendaten-Bereich aus drei Formatabschnitten: einem Kopfabschnitt, einem Verkehrsdatenabschnitt (bestehend aus einer Folge von Querschnittsdaten gleichen Aufbaus) und einem Wetterdatenabschnitt.

Variable/Bedeutung	Platzbedarf in Bytes	Interpretation	
Beginn eines Minutendaten-Bereichs			
STX, 02h	1	Ganzzahl	
Format für den Kopfabschnitt			
new_head_version	2	Ganzzahl*	
new_head_laenge	2	Ganzzahl*	
Datum	6	ASCII-Zeichenfolge	
Stunde	2	ASCII-Zeichenfolge	
Minute	2	ASCII-Zeichenfolge	
Sekunde	2	ASCII-Zeichenfolge	
betr_sued	1	Ganzzahl	
betr_nord	1	Ganzzahl	
status_sued	1	Ganzzahl	
status_nord	1	Ganzzahl	
qs_num / # Meßquerschnitte	2	Ganzzahl*	
anz_num / # Anzeigen	2	Ganzzahl*	
det_num / # Detektoren	2	Ganzzahl*	
wetter_num / # Wetterstationen	2	Ganzzahl*	
Es folgt das Format für den Verkehrsdatenabschnitt; es wird innerhalb des Minutenabschnitts qs_num oft benutzt			
MQ-Nummer	4	ASCII-Zeichenfolge	
Naz / #GF-Anzeigen	1	Ganzzahl	
Daten der GF-Anzeigen	Naz * 24 + 1		
Nq / # Detektoren d. Querschnitts	1	Ganzzahl	
# PKW pro GKlasse Spur1	15	Ganzzahl; jeweils 1 Byte	
:	:	:	
# PKW pro GKlasse Spur Nq	15	Ganzzahl; jeweils 1 Byte	
# LKW pro GKlasse, Spur1	12	Ganzzahl; jeweils 1 Byte	

:	:	:	
# LKW pro GKlasse, Spur Nq	12	Ganzzahl; jeweils 1 Byte	
VerkStaerke PKW Spur 1	1	Ganzzahl	
:	:	:	
VerkStaerke PKW Spur Nq	1	Ganzzahl	
VerkStaerke LKW Spur 1	1	Ganzzahl	
:	:	:	
VerkStaerke LKW Spur Nq	1	Ganzzahl	
Vga / gew. arith.Mittel V, Spur 1	1	Ganzzahl	
:	:	:	
Vga / gew. arith.Mitt V, Spur Nq	1	Ganzzahl	
Vneu; Spur 1	1	Ganzzahl	
:	:	:	
Vneu; Spur Nq	1	Ganzzahl	
Status Ersatzwert, Spur 1	1	Ganzzahl	
:	:	:	
Status Ersatzwert, Spur Nq	1	Ganzzahl	
Status Störung Detektor, Spur 1	1	Ganzzahl	
:	:	:	
Status Störung Detektor, Spur Nq	1	Ganzzahl	
Ende Format für den Verkehrsdatenabschnitt			
Es folgt das Format für Wetterdaten			
Wettedaten , Wetterstation 1 von wetter_num	15	gemischt	
:	:	:	
Wettedaten , Wetterstation wetter_num von wetter_num	15	gemischt	
Ende Minutendatenabschnitt			
ETX, 03h	1	Ganzzahl	

**Ganzzahl\*:** auf Intel-Rechnern ist die Reihenfolge der Bytes für die Interpretation als Ganzzahl zu vertauschen.

## 7.2 Telegrammdatei, Dateiinhalt

(Format: Dambach, A5 ab 1996)

### Beispiel für eine Minute

```
**** STX-Marke einlesen, d.h. Anfang Auslesen der Querschnittswerte einer Minute***/
STX 02h
```

```
**** Kopfinformationen betreffend den gesamten Abschnitt****/
```

```
new_head_version: 4
new_head_laenge: 18609
Datum: 170696
Stunde: 07
Minute: 00
Sekunde: 00
betr_sued: 1
betr_nord: 1
status_sued: 0
status_nord: 0
Anzahl Querschnitte im Datensatz (qs_num): 72
Anzahl Anzeigen im Datensatz (anz_num): 421
Anzahl Detektoren im Datensatz (det_num): 237
Anzahl Wetterstationen im Datensatz (wetter_num): 10
```

```
**** alle Querschnitte zur aktuellen Minute auslesen ****/
```

```
**** 1. Querschnitt ****/
```

```
MQ-Nummer: Q001
```

```
Anzahl GF-Anzeigen (Naz): 7 (überlesen Daten für GF-Anzeigen: 24*Naz Bytes)
```

```
Anzahl Detektoren pro MQ (Naq): 3
```

```
**** Nq * 15 PKW-GeschwKlassen ****/
```

GK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
v-Bereich	<20	<30	<40	<50	<60	<70	<80	<90	<100	<110	<120	<140	<160	<180	>180
PKW Det1	0	0	0	0	0	0	0	0	6	14	13	8	0	0	0
PKW Det2	0	0	0	0	0	0	0	0	14	12	3	0	0	0	0
PKW Det3	0	0	0	0	0	0	0	2	4	1	0	0	0	0	0

```
**** Nq * 12 LKW-GeschwKlassen ****/
```

GK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
v-Bereich	<20	<30	<40	<50	<60	<70	<80	<90	<100	<110	<120	<140
PKW Det1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PKW Det2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
PKW Det3	0	0	0	0	0	0	0	8	2	1	0	0

```
**** vom Rechner der Unterzentrale ausgewertete Verkehrswerte ****/
```

```
VerkStaerke PKW Detektor1 41
```

```
VerkStaerke PKW Detektor2 29
```

```
VerkStaerke PKW Detektor3 7
```

```
VerkStaerke LKW Detektor10
```

```
VerkStaerke LKW Detektor22
```

```
VerkStaerke LKW Detektor311
```

```
gewichteter Mittelwert der Geschw. (Vga1) Detektor1 110
```

```
gewichteter Mittelwert der Geschw. (Vga1) Detektor2 100
```

```
gewichteter Mittelwert der Geschw. (Vga1) Detektor3 89
```

```
Trend (V_neu1) Detektor1 124
```

```
Trend (V_neu2) Detektor2 107
```

```
Trend (V_neu3) Detektor3 95
```

```
**** Statusinformation über Ersatzwertbildung. Erzeugt durch Rechner der Unterzentrale****/
```

```
Statusinf. fuer evtl. Ersatzwert der Geschw. fuer Detektor1 0
```

```
Statusinf. fuer evtl. Ersatzwert der Geschw. fuer Detektor2 0
```

```
Statusinf. fuer evtl. Ersatzwert der Geschw. fuer Detektor3 0
```

```

/**** Statusinformation über Detektorstörungen****/
Statusinf fuer Stoerung fuer Detektor1      0
Statusinf fuer Stoerung fuer Detektor2      0
Statusinf fuer Stoerung fuer Detektor3      0

/****2. Meßquerschnitt ****/
MQ-Nummer: Q002
:
:
/****qs_num-ter Meßquerschnitt ****/
MQ-Nummer: Q100
:
/****qs_num-ter Meßquerschnitt ausgelesen ****/

/**** Auslesen der wetter_num Wetterstationen ****/

MQ-Nummer: Q019Sicht: 1600m;RIS:0;NA-IS:0;Niederschlag: 0mm/10h;
MQ-Nummer: Q023Sicht: 1600m;RIS:0;NA-IS:0;Niederschlag: 0mm/10h;
MQ-Nummer: Q036Störung!;Sicht: 500m;RIS:0;NA-IS:0;Niederschlag: 0mm/10h;
MQ-Nummer: Q076Sicht: 1600m;RIS:0;NA-IS:0;Niederschlag: 0mm/10h;
MQ-Nummer: Q086Sicht: 15601m;RIS:0;NA-IS:0;Niederschlag: 0mm/10h;
MQ-Nummer: Q089Sicht: 14219m;RIS:0;NA-IS:0;Niederschlag: 0mm/10h;
MQ-Nummer: Q093Sicht: 13525m;RIS:0;NA-IS:0;Niederschlag: 0mm/10h;
MQ-Nummer: Q096Sicht: 17313m;RIS:0;NA-IS:0;Niederschlag: 0mm/10h;
MQ-Nummer: Q097Sicht: 24062m;RIS:0;NA-IS:0;Niederschlag: 0mm/10h;
MQ-Nummer: Q100Störung!;Sicht: 500m;RIS:0;NA-IS:0;Niederschlag: 0mm/10h;

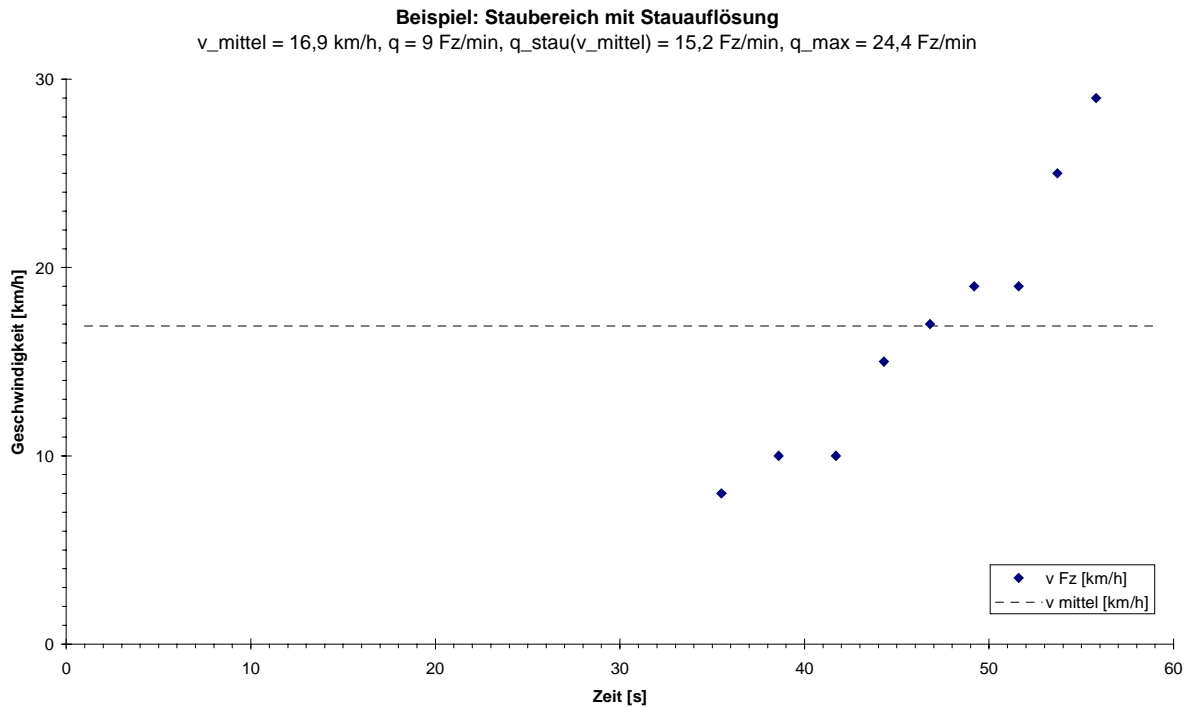
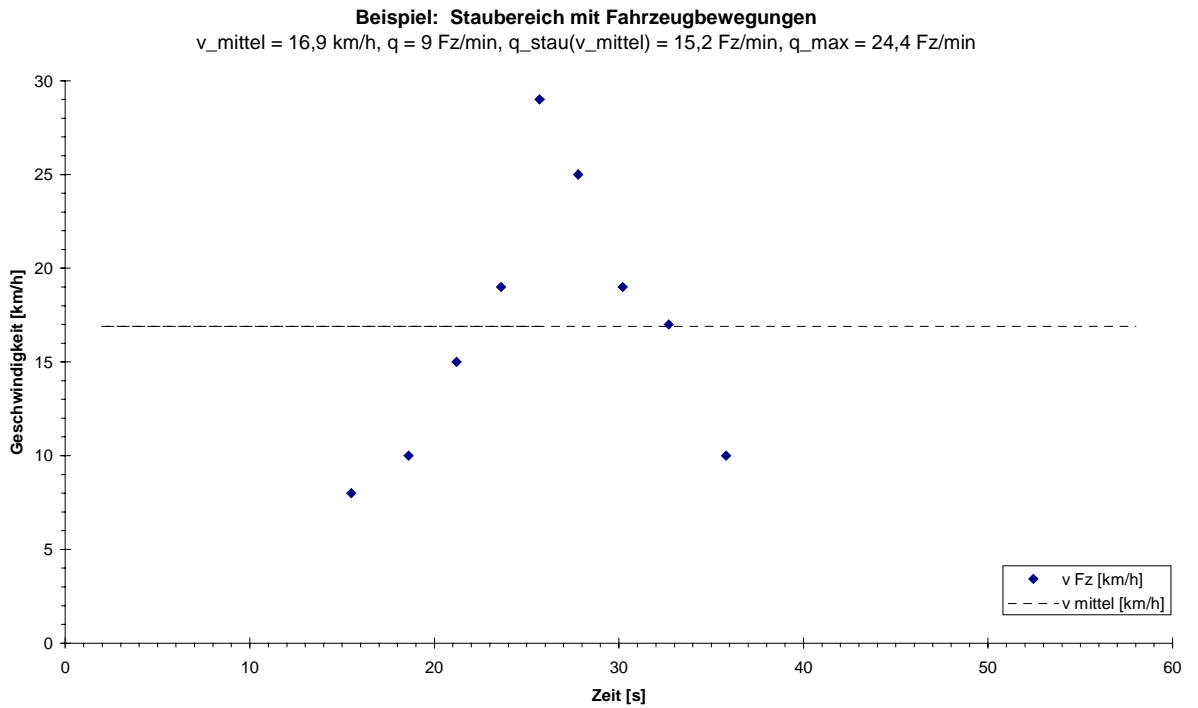
/**** Wetterstationen ausgelesen ****/

/**** ETX-Marke einlesen, d.h. Ende Auslesen der Querschnittswerte einer Minute****/
03h

[optional]

/**** STX-Marke einlesen, d.h. Anfang Daten der nächsten Minute****/
02h
```

## Beispieldiagramme zum hergeleiteten Detektionsverfahren



## 8 Literaturverzeichnis

- [Albr87] *Funktionskonzepte und Randbedingungen für Verkehrsleitzentralen unter dem Aspekt fortschreitender Automatisierung von Datenerfassung und Verkehrsbeeinflussung auf Außerortsstraßen* / Hanfried Albrecht , Klaus Everts , Michael Olberding ; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik / hrsg. vom Bundesminister für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg, 1987
- [Ale98] *Automatische Staudynamikanalyse (ASDA)*, Dokumentation des Software-Moduls, Aleksic Mario, 1998 (nicht veröffentlicht)
- [Bar98] *Metastabile Zustände in Zellularautomatenmodellen für den Straßenverkehr* / Robert Barlovitc, Diplomarbeit, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 1998
- [Brey97] *C++ - Eine Einführung*, Ulrich Breyman, Hanser Verlag, 1997
- [Dud93] *Fuzzy-Menge* / Duden Informatik, 2. Aufl., 1993
- [Hall94] *Störungserkennung auf Autobahnen* / Hall Fred, Straßenverkehrstechnik 2/94, S. 67 - 78
- [Helb97] *Verkehrsdynamik : neue physikalische Modellierungskonzepte* / Dirk Helbing, Springer, 1997
- [Herm98] *Local Cluster Effect in Different Traffic Flow Models* / Herrmann M., Kerner B.S.; Physica A 255 (1998)
- [Kern93] *Cluster effect in initially homogeneous traffic flow* / Kerner B. S., Konhäuser P.; Physical Review E, Vol. 48, 2335, 1994
- [Kern94] *Structures and parameters of clusters in traffic flow* / Kerner Boris S., Konhäuser P.; Physical Review E, Vol. 50, July 1994
- [Kern95] *Deterministic spontaneous appearance of Traffic Jams in Slightly Inhomogeneous Traffic Flow* / Kerner B. S., Konhäuser P., Schilke M.; Physical Review E, Vol. 51, June 1995, Part B
- [Kern96a] *Experimental Features and Characteristics of Traffic Jams* / Kerner Boris S., Rehborn Hubert, Physical Review E, Vol. 53, February 1996
- [Kern96b] *Experimental Properties of Complexity in Traffic Flow* / Kerner Boris S., Rehborn Hubert, Physical Review E, Vol. 53, May 1996
- [Kern97a] *Automatische Stauverfolgung auf Autobahnen* / Kerner B.S., Kirschfink H., Rehborn H.; Straßenverkehrstechnik 9/97, S. 430 - 438
- [Kern97b] *Traffic Flow : Experiment and Theory* / Kerner B.S.; Workshop on Traffic and Granular Flow '97, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Germany, October 1997
- [Kern97c] *Asymptotic Theory of Traffic Jams* / Kerner B. S., Klenov S. L., Konhäuser P.; Physical Review E, Vol. 56, October 1997
- [Kern97d] *Experimental Properties of Phase Transitions in Traffic Flow* / Kerner Boris S.,

- Rehborn Hubert, Physical Review Letters, Vol. 79, November 1997
- [Kern98a] *Experimental Features of Self-Organisation in Traffic Flow* / Kerner Boris S., Physical Review Letters, Vol. 81, Number 17, 3797-3800, October 1998
- [Kern98b] *Messungen des Verkehrsflusses: Charakteristische Eigenschaften von Staus auf Autobahnen* / Kerner B.S., Rehborn H.; Internationales Verkehrswesen (50) 5/98, S. 196 - 203
- [Kron95] *Meßwertgestützte Verkehrsflußsimulation zur Ermittlung streckenbezogener Verkehrsdaten.* / W. Kronjäger, P. Konfäuserich, Technischer Bericht F1-95-0021, Daimler Benz AG, Stuttgart 1995
- [Lang95] *Fuzzy Logic Toolbox for Use with MATHLAB®, User's Guide* / Lang Roger, Gulley Ned, The MathWorks Inc., 1995
- [Leut88] *Introduction to the theory of traffic flow* / Leutzbach W.; Springer Verlag 1988
- [May90] *Traffic flow Fundamentals* / Adolf D May; Prentice Hall, Inc. 1990
- [Mark96] *Geschwindigkeitsmessungen im Straßenverkehr* / Markovic A. M. u a.; Expert Verlag 1996
- [Nel95] *A Kinetic Model of Vehicular Traffic and its associated bimodal equilibrium solutions* / Paul Nelson, Transportation Theory and Statistical Physics. Seiten 383 - 409, 24(1-3), 1995
- [Scho92] *Die Geschwindigkeit im Straßenverkehr* / Schopf Michael; Habilitationsschrift, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität Wien, 1992
- [Stein97] *Auswirkungen verkehrlicher und gerätetechnischer Störungen auf den Betrieb von Verkehrsbeeinflussungsanlagen* / Bernhard Steinauer ..., Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik / hrsg. vom Bundesminister für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg; 1997
- [TLS93] *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) -Ausgabe 1993-* / hrsg. Bundesminister für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg, 1993
- [Visual] *Microsoft Visual Basic Online Documentation*
- [Wied91] *Genauigkeitsvergleich unterschiedlicher Sensoren zur Geschwindigkeitsmessung auf Bundesautobahnen sowie für die Fahrzeugerkennung* / R. Wiedemann ... ; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik / hrsg. vom Bundesminister für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg, 1991
- [Zack80] *Aussagekraft aktuell erfasster Daten in Steuerungsverfahren zur Verkehrsbeeinflussung . Kurzzeitprognose von Verkehrsströmen auf der Grundlage aktueller Querschnittsmessungen*, H. Zackor ; S. Herkt , Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik / hrsg. Bundesminister für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg , 1980

## 9 Erklärung

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Heinrich Brunmeier

Ein Musterexemplar liegt bei der die Arbeit entgegennehmenden Stelle zur Einsicht aus.

---