

Ein intelligentes Modell zur Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen und ein empirisches Verfahren zur Optimierung im praktischen Einsatz

Svetlana Vukanovic, Ronald Kates und Fritz Busch

Im Beitrag wird ein neues, lernfähiges Modell zur Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen dargelegt und die Implementierung und Erprobung des Modells als Softwareprogramm vorgestellt. Zielsetzungen der Steuerung sind die Harmonisierung des Verkehrsflusses und die rechtzeitige Warnung der Fahrer vor tatsächlichen Gefahren bei Vermeidung überflüssiger Schaltungen. Diese Eigenschaften sind Voraussetzung für Akzeptanz und Wirksamkeit. Zur Quantifizierung bzw. Erreichung dieser Zielsetzungen wird ein empirisches Gütekriterium definiert bzw. eine lernfähige flexible Systemarchitektur eingeführt, die unterschiedliche Erkennungsverfahren verknüpft. Die verwendete Systemarchitektur unterscheidet Harmonisierung und Warnstrategien, vermeidet unnötige Parameter durch neue Ausschaltbedingungen und erlaubt mehrere vorgelagerte Verfahren zur Verbesserung der Erkennungsqualität. Die Verknüpfung unterschiedlicher Erkennungsverfahren wird auf der Basis herkömmlicher, empirischer Daten mit Hilfe der Objektivfunktion optimiert. Das Modell wurde in einer Verkehrsrechnerzentrale bei München implementiert. Testergebnisse deuten auf eine deutliche Verbesserung der Qualität im Vergleich zur bisherigen Steuerung hin.

The article presents a novel, learning capable algorithm for dynamic regulation of motorway traffic. Implementation as a software application and testing are reported. The system is designed to harmonize traffic flow and to provide timely warnings to drivers of downstream hazards, while avoiding unnecessary restrictions. These characteristics are required for compliance and effectiveness. The system includes an empirically calculated objective function to quantify performance of the control logic. This logic is implemented by means of learning-capable and flexible system architecture, which combines and synthesizes the output of different detection algorithms. The architecture distinguishes between harmonization and warning strategies and reduces calibration parameters by stepwise relaxation of restrictive control. It also permits several pre-processing procedures such as traffic state classification to improve detection quality. Optimal fusion of different detection and classification algorithms is determined utilizing the objective function and requires only conventional, empirical detector data. The algorithm has been implemented in a traffic control center near Munich. Test results indicate a considerable improvement of quality compared to the existing control algorithm.

1. Kontext, Problemstellung

Durch die kollektive Streckenbeeinflussung mit automatisch gesteuerten dynamischen Geboten und Warnungen erhofft man sich eine Verbesserung der Verkehrssicherheit sowie eine effizientere Nutzung der potentiellen Kapazität einer Schnellstraße. Dazu verfolgen Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) in der Regel mehrere Strategien, wie

- Harmonisierung des Verkehrsflusses (etwa zur Prävention von „Stau aus dem Nichts“)

- Warnung vor erhöhten Gefahren im Verkehrsablauf
- Information und Gebote bei witterungsbedingten Gefahren.

Dieser Beitrag befasst sich im Wesentlichen mit den ersten beiden (verkehrsbedingten) Zielsetzungen bei Anlagen mit üblicher Erfassungs- und Anzeigetechnik. Die Wirksamkeit von SBA hängt stark von der Qualität der automatischen Störungs- und Situationserkennung und letztendlich auch von der Akzeptanz ihrer Schaltungen ab. Eine hohe Wirksamkeit erfordert daher sowohl die rechtzeitige Warnung der Fahrer vor tatsächlichen Gefahren als auch die Vermeidung von überflüssig strengen Schaltungen [1, 2] bzw. von übermäßig vielen „Fehlalarmen“. Nachfolgend wird daher insbesondere die Optimierung der Qualität der Störungs- und Situationserkennung in der Praxis bei herkömmlicher Datenerfassung (etwa auf der Basis von Induktionsschleifen) betrachtet. Zur unvoreingenommenen Erfas-

sung der Qualität der Störungserkennung im praktischen Einsatz eignet sich ein empirischer Ansatz auf der Basis eines objektiven Gütekriteriums [3].

Der Erfolg der Steuerungsstrategien, besonders derer mit Warnwirkung, erfordert die Erkennung (bzw. nach Möglichkeit Klassifizierung) einer breiten Palette von Verkehrssituationen mit hoher Qualität. Dazu wurden mehrere Verfahren entwickelt, die bestrebt sind, bestimmte Verkehrssituationen zu erkennen und eine der unterstellten Situation entsprechende Steuerung zu empfehlen [4–6]. Bei herkömmlicher Technik ist die Erkennung immer mit Unschärfe behaftet, die zudem vom Erkennungsverfahren abhängt. Eine Berücksichtigung der Konsequenzen der unterschiedlichen Zuverlässigkeit bzw. Unschärfe der jeweiligen Erkennungsverfahren für die gesamte Steuerung fehlte bisher jedoch nahezu vollständig – ein erster Ansatz in diese Richtung wurde in [7] erprobt. In der Regel liefern verschie-

Vortrag auf der HEUREKA '05 in Karlsruhe

Verfasseranschriften: Dipl.-Ing. S. Vukanovic, TRANSVER GmbH, Maximilianstr. 45, 80538 München, vukanovic@transver.de; Dr. R. Kates, REK Consulting, Palnkamer Str. 49, 83624 Otterfing, Ronald.Kates@t-online.de; Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Busch, Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Arcisstraße 21, 80333 München, fritz.busch@vt.bv.tum.de

dene Verfahren unterschiedliche Empfehlungen, die nicht alle gleichwertig in ihrer Qualität sind [8–10].

Die unterschiedlichen Schaltempfehlungen für die Geschwindigkeitsanzeigen („A-Schilder“) werden in heutigen Beeinflussungsanlagen i.d.R. durch einen sogenannten Quer- und Längsabgleich verknüpft (ODER-Verknüpfung) [6]. Dabei wird die restriktivste aller Empfehlungen übernommen. Erzeugt etwa ein schlecht kalibriertes Erkennungsverfahren viele übermäßig strenge Schaltungen, so müssen diese Schaltempfehlungen besonders häufig übernommen werden und beeinträchtigen damit die Akzeptanz. In der Praxis behelfen sich die Betreiber von SBA in solchen Fällen meistens dadurch, dass sie die „Einschaltparameter“ des Verfahrens so weit von den ursprünglichen Vorgaben verschieben, bis das Verfahren kaum oder gar nicht mehr anspricht.

Einzelne Verfahren oder kommerzielle Systeme innerhalb (MARZ [6], ESE, Fuzzy-Inform) und außerhalb (MONICA, MIDAS) Deutschlands tragen der Komplexität der Steuerungsaufgabe dadurch Rechnung, dass sie intern bestimmte Kennwerte – teils mit Hilfe intelligenter Ansätze (Bayes-Netze, Fuzzy) – verknüpfen. Was bisher jedoch fehlte, war eine intelligente Verknüpfung der einzelnen Verfahren auf übergeordneter Ebene, welche die Gesamtsteuerung der SBA systematisch nach einer Zielfunktion optimiert.

Eine solche Verknüpfung liefert zusammen mit einer empirischen datengestützten Optimierungsmethode die hier vorgestellte Systemarchitektur zur SBA-Steuerung. Es werden zunächst das Modell für das Gesamtsystem und für die Komponenten sowie ein Prototyp des Moduls zur Steuerung vorgestellt. Anschließend werden die Funktionalität zur Optimierung des Systems beschrieben und eine erste Pra-

xisanwendung mit Kalibrierung und Test vorgestellt und diskutiert.

2. Modell

2.1 Steuerung

2.1.1 Steuerungsebenen

Die Steuerung einer SBA stellt einen Eingriff in die Verkehrsflussdynamik dar mit dem Zweck, im Vergleich zu den „Kosten“ einen möglichst hohen „Nutzen“ zu erreichen. Hierbei werden globale, abschnittsbezogene (zwischen zwei Messquerschnitten) und rein lokale (an einem einzelnen Messquerschnitt) Steuerungsebenen unterschieden. Nach [1, 2, 8] bieten abschnittsbezogene Störungserkennungsverfahren einen erheblichen Mehrwert gegenüber lokalen Verfahren, die lediglich auf Daten einzelner Messquerschnitte zugreifen. Theoretisch sollte eine Betrachtung der globalen Ebene einen zusätzlichen Mehrwert bringen. Denn auf Grund der inneren Zusammenhänge im Prozess „Verkehrsfluss“ auf einer Autobahnstrecke – insbesondere auf Grund der möglichen Fortpflanzung von „Information“ in beide Richtungen über Detektorengrenzen hinweg – wirken sich lokale Eingriffe grundsätzlich global aus.

Wegen der Komplexität des Problems erscheint es jedoch als sinnvoll, die Steuerung logisch in abschnittsbezogene und globale Ebenen zu zerlegen, wobei die globale Steuerung eine Art übergeordnete Instanz bildet; dies ist allerdings nicht Gegenstand dieses Beitrags. Dementsprechend wird jeder Anzeigequerschnitt abschnittsbezogen mit Hilfe der Verkehrsdaten des lokalen und des nächsten stromabwärts liegenden Messquerschnitts gesteuert. Die Auswirkungen im betrachteten Abschnitt stellen die Basis für die Bewertung der Steuerung dar.

2.1.2 Systemarchitektur

Die im Bild 1 dargestellte funktionale Systemarchitektur besteht aus lokalen Steuerungsagenten, einem globalen Entscheidungsprozess und einer mitlaufenden Überwachung. In einer ersten Stufe kommt der „lokale Steuerungsagent“ in einem „intelligenten Modus“ zum Einsatz. Dieser besteht aus drei Modulen, die in der Abbildung in unterschiedlichen Farben dargestellt sind.

Das blaue Feld veranschaulicht die Basisprozesse der Datenaufbereitung und der Verkehrslageerkennung, sowie ihre Funktionalität innerhalb der lokalen Wissensbasis. Sie dienen dazu, eine robustere Steuerung zu erreichen. Die Erkennungsverfahren (orange Felder) berechnen auf unterschiedliche Weise Kennwerte, die nicht wie bisher allein zur Schaltempfehlung herangezogen werden, sondern die an das Alarm-Management (grün) weitergeleitet werden. Das Alarm-Management sorgt für eine intelligente Verknüpfung oder Fusion und kann die lokale Datenqualität und den Verkehrskontext berücksichtigen, um der unterschiedlichen Empfindlichkeit der einzelnen Störungserkennungsverfahren bei den in SBA häufigen Datenausfällen bzw. bei unterschiedlichen Kontexten Rechnung zu tragen. Der lokale Schaltwunsch wird noch in einem übergeordneten streckenbezogenen Schaltmanagement (analog zum Längsabgleich) weiterverarbeitet.

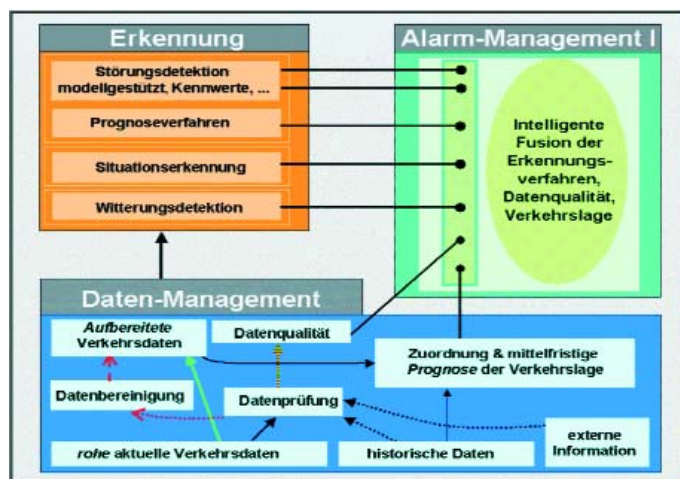
Die zur Optimierung verwendete Zielfunktion berücksichtigt den Nutzen jeder Schaltempfehlung im Hinblick auf die Verkehrssicherheit, aber auch die dadurch verursachten Zeitkosten. Auf diese Weise strebt das daraus resultierende System automatisch eine hohe Detektionsrate bei einer möglichst niedrigen Fehlalarmrate an.

2.1.3 Verfahren für die lokale verkehrliche Steuerung

Grundsätzlich unterscheiden wir in diesem Stadium zwei Arten von Zielsetzungen mit ihren jeweiligen Strategien und Erkennungsverfahren: Harmonisierung (Situationserkennung) und Warnung (Störungserkennung). Den beiden Strategien werden eigene Parametersätze zugeordnet (Bild 2). Diese Zerlegung des Problems in Zweige dient zur effizienten Optimierung, weil auf diese Weise die beiden Strategien weitgehend entkoppelt werden.

Kennwerte vorhandener Verfahren werden nach Möglichkeit als stetige Größen

Bild 1:
Lokaler Steuerungsagent



herangezogen. Um die Wirkung von „Trichterschaltungen“ zu berücksichtigen, werden nicht nur lokale Kennwerte, sondern auch die entsprechenden, um einen MQ versetzten Kennwerte herangezogen. Damit ist eine abschnittsbezogene Betrachtung möglich. Der gesamte Parametersatz für die Einschaltung einer Begrenzung ist Gegenstand der Optimierung.

2.2 Entscheidungsbasis für die Warnung

2.2.1 Störungsindikator

Bei der Anzeige einer Geschwindigkeitsbeschränkung einer SBA handelt es sich um eine bestimmte oder „diskrete“ Wahl aus mehreren Optionen. Ein bewährtes Modell hierfür ist das geordnete LOGIT-Modell¹ („discrete-choice logit model“). Dieses wird für die gegenwärtige Implementierung verwendet, um die Kennwerte zu verknüpfen. Zunächst ist für die Optimierung der Warnung ein Vektor X aus Kennwerten der Störungserkennung zu bilden. Man unterstellt eine stetige „latente“ Variable D_t , welche einen fusionierten Systemzustand zum Zeitpunkt t zum Ausdruck bringt. Das hier verwendete Modell für D_t lautet

$$D_t = Z_t + \varepsilon_t; \quad Z_t = \sum_{k=1}^K \beta_k X_{kt} \quad \text{Gl (1)}$$

Hierbei ist ε_t eine unbekannte Zufallsgröße, die den Fehler in der Schätzung des Zustandes zum Ausdruck bringt. Für ε_t wird eine logistische Verteilung

$$F(e) = \frac{1}{1 + \exp(-\varepsilon/\sigma)} \quad \text{Gl (2)}$$

angenommen. Die Größe Z_t lässt sich aus den für die Minute t bekannten Faktoren X bestimmen und wird im Folgenden als Störungsindikator bezeichnet. Die Linearität des Ansatzes Gl (2) stellt keine grundsätzliche Anforderung dar.

Die K Parameter β_k mit $k = 1, \dots, K$ lassen sich als „Gewichte“ für die entsprechenden Verfahren interpretieren. Ein großer Betrag von β_k bedeutet, dass der Kennwert $X(k)$ einen entsprechend wichtigen Einfluss auf die Steuerung ausübt (positiv oder negativ).

2.2.2 Zustandsklassifikation und Entscheidungspunkte für die Steuerung

Um die lokale Steuerungslogik zu bestimmen, werden Entscheidungspunkte mit Hilfe von Schwellenwerten α_m eingeführt, wobei $m = 0, 1, 2, \dots, M$ und $\alpha_m < \alpha_{m+1}$. Hierbei werden die Werte von m den Schalt-

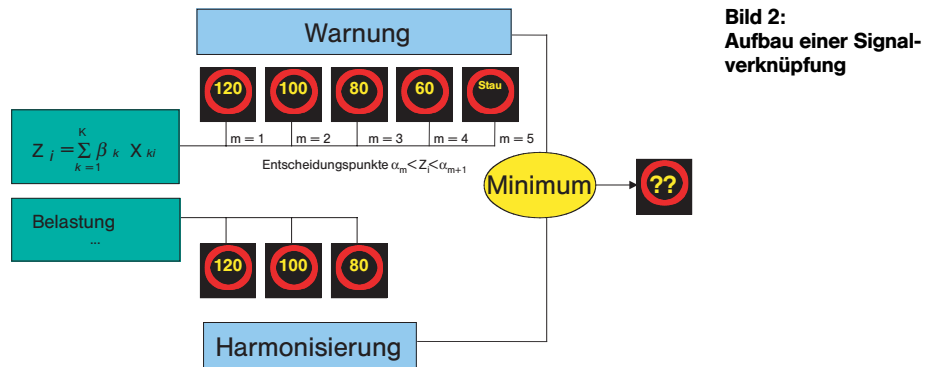


Bild 2: Aufbau einer Signalverknüpfung

wünschen gemäß der Tabelle 1 zugeordnet (hier $M = 5$): Auf diese Weise wird ein eindeutiger Schaltwunsch der Warnung erzeugt.

Tabelle 1: Entscheidungspunkte der Warnung

m	Bedingung	Schaltwunsch
0	$\exp(Z) < \alpha_1$	keine Begrenzung
1	$\alpha_1 < \exp(Z) < \alpha_2$	120 km/h
2	$\alpha_2 < \exp(Z) < \alpha_3$	100 km/h
3	$\alpha_3 < \exp(Z) < \alpha_4$	80 km/h
4	$\alpha_4 < \exp(Z) < \alpha_5$	60 km/h
5	$\alpha_5 < \exp(Z) < \alpha_6$	Stau

Darüber hinaus kann man die Einteilung nach diesen Bedingungen als Zustandsklassifikation interpretieren. Aus dem Modell mit Gl (2) gewinnt man dann die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der jeweilige Schaltwunsch einen „Treffer“ darstellt, sowie ein Maß für die Unschärfe der Klassifikation. Diese Größen spielen jedoch für die Steuerung keine direkte Rolle.

2.3 Entscheidungsbasis für die Harmonisierung

Für den als „Harmonisierung“ bezeichneten logischen Block wurde der MARZ-Algorithmus „Belastung“ [6] (Tabelle 2) in vereinfachter Form herangezogen. Dieser Algorithmus beruht im Wesentlichen auf der Verkehrsdynamik, die gemäß Erfahrungswerten aus einer Betrachtung des Fundamentaldiagramms hervorgeht. Hierbei werden Situationen erkannt, für die eine Anzeige 120, 100, 80 bzw. 60km/h empfohlen wird. Die Anzeige 60km/h dient jedoch im neuen Modell nicht zur Harmonisierung, sondern zur Warnung (siehe Bild 2) und wird nicht durch den Harmonisierungsblock erzeugt.

Tabelle 2: Modifizierte Parameter des Verfahrens „Belastung“ zur Situationserkennung; man beachte die „UND“-Verknüpfung zwischen Dichte (k) und Geschwindigkeit ($v_g Pkw(Q)$) bzw. die „ODER“-Verknüpfung zwischen dem Ergebnis dieser Verknüpfung und der Verkehrsstärke (Q_B)

Schaltwunsch	Q_B ODER	$v_g Pkw(Q)$ UND k
120	$> q120Ein$	-
100	$> q100Ein$	$< v100Ein$
80	$> q80Ein$	$< v80Ein$

Des Weiteren enthält das Verfahren „Belastung“ nach MARZ sowohl „Einschalt-“ als auch „Ausschaltparameter“, die jedoch mit der Ausschaltlogik des neuen Systems überflüssig werden. Der Parametersatz des so modifizierten Verfahrens wird in der Tabelle 2 mit der im MARZ üblichen Schreibweise dargestellt.

Weder für den Schaltwunsch 120 noch für 100 km/h sind Grenzen für Dichte und Geschwindigkeit in der empfohlenen „Erstversorgung“ vorhanden, so dass insgesamt 5 Parameter zu eichen wären. Im Rahmen der Anwendung ergibt sich bei bestimmten Strecken jedoch eine erhöhte Qualität, wenn man zwei weitere Parameter ($v100Ein$ und $k100Ein$) einbezieht, so dass sich 7 Parameter ergeben. Die Verwendung von 7 anstatt 5 Parametern ist im neuen System Gegenstand der Modellselektion im Rahmen der Optimierung und wird nicht vorgegeben.

2.4 Ausschaltkriterien

Was die Kriterien zur Ausschaltung einer Beschränkung anbetrifft, so ist es für ein „intelligentes“ System, das auf Grund von empirischen Daten kalibriert wird, von entscheidendem Vorteil, wenn die Anzahl der zu kalibrierenden Parameter nicht übermäßig groß ist.

Gemäß der bisherigen Steuerung galten Schaltwünsche solange, bis sie durch die Erfüllung von Ausschaltkriterien aufgehoben wurden. Im neuen System werden Schaltwünsche hingegen „sanft“ nach Ablauf eines vorgegebenen Zeitintervalls um eine Stufe zurückgenommen, wenn

¹ Die Bezeichnung als LOGIT - Modell bezieht sich hier auf die logistische Verteilung des Zufallsterms.

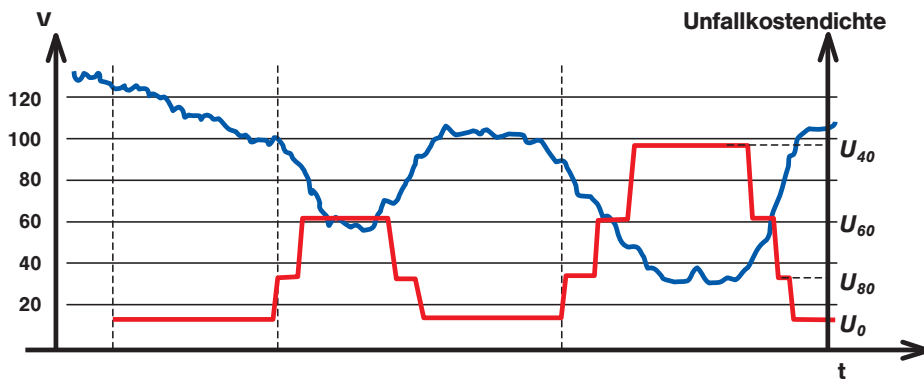


Bild 3: Schematische Abbildung der typischen Risiken im Verkehrsfluss (rote Kurve). Blaue Kurve bezeichnet den Geschwindigkeitsverlauf.

sie nicht durch erneute Erkennung aktiviert werden. Dadurch werden zum einen viele Parameter überflüssig, die sonst zu kalibrieren wären. Zum anderen werden dadurch übermäßig strenge Anzeigen vermieden, die bisher entstanden, wenn strenge Anzeigen nicht rechtzeitig zurückgenommen wurden.

3. Optimierung

3.1 Methodik der Optimierung mit einer Gesamtziel­funktion

Bei rechtzeitiger Erkennung und Warnung vor einer akuten Gefahr hat die Streckenbeeinflussung ein besonders hohes Potenzial, das Unfallrisiko zu senken. Dieser Nutzen steht einer möglichen Verlängerung der Reisezeit bzw. Verlust

der Akzeptanz gegenüber. Dementsprechend ist eine möglichst hohe Detektionsrate bei möglichst niedriger Fehlalarmrate ein Qualitätsmerkmal [1, 2]. Unter Detektionsrate versteht man hierbei den Anteil der „rechtzeitig detektierten“ Störungen eines vorgegebenen Niveaus, d. h., vor denen aus Fahrersicht rechtzeitig gewarnt wird. Unter Fehlalarmrate versteht man den Anteil der Schaltungen („Alar­me“) eines Niveaus, die keiner Störung entsprechen. Daraus ergibt sich eine zweidimensionale Darstellung der Qualität einer Warnung.

Für das neue System ist ein eindimensionales Qualitätsmaß erforderlich, das sich zudem sowohl auf Warnung als auch auf Harmonisierung bezieht. Die hier verwendete Zielfunktion schätzt auf der Basis der empirischen Daten und der aus dem Modell erhaltenen Schaltwünsche einen

Bild 4: Vereinfachtes Flussdiagramm der Prozedur zur Optimierung des Systems

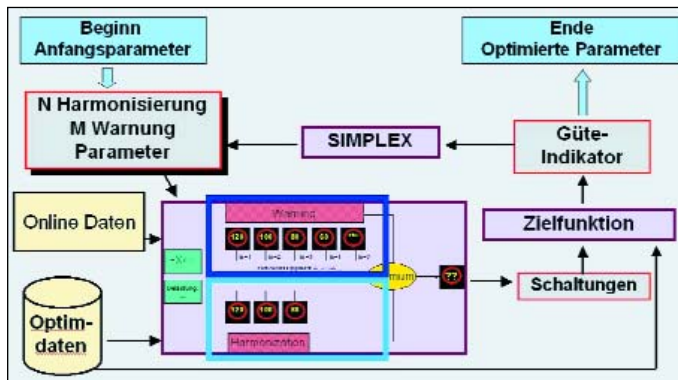
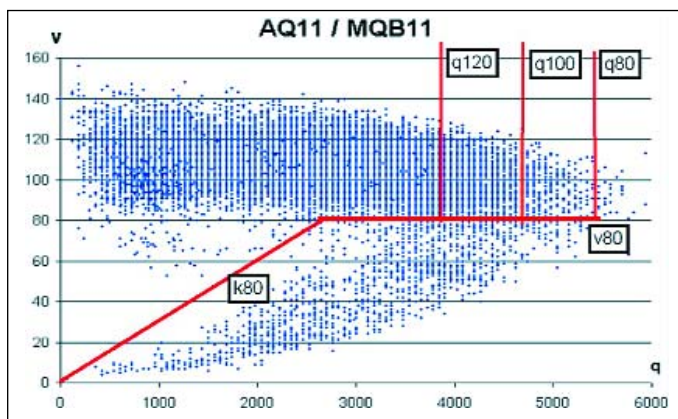


Bild 5: Unterteilung des Q-V-Raumes nach MARZ (bisher implementiert)



Qualitätsindex, der unter Veränderung der Parameter optimiert wird.

Für die Anwendung in deutschen SBA wird der Qualitätsindex [3] im Rahmen eines Kostenmodells der Gestalt

$$G = K_T/V + p K_A \quad \text{Gl (3)}$$

berechnet, wobei V die Verkehrsflussgeschwindigkeit, p die Unfallwahrscheinlichkeit pro Fahrzeug und Kilometer, K_T den Zeitwert und K_A den Unfallkostenbetrag darstellen.

Die Berücksichtigung des Zeitwertes sorgt für eine differenzierte Vermeidung von übermäßig strengen Schaltungen bzw. zu häufigen Fehlalarmen. Kosten werden relativ zu einer geeigneten Referenz berechnet. Beispielsweise ergeben sich Reisezeitverringerungen bei einer dynamischen Anzeige gegenüber einer statischen Beschilderung oder einer „Grundversorgung“ (ständige Beschränkung). Bei der Berechnung der Zeitkosten durch eine restriktive Anzeige wird so getan, als ob die Fahrer die Beschränkung akzeptieren, denn selbst wenn sie es nicht tun, zieht nach dieser Modellvorstellung die „Nichtakzeptanz“ indirekt vergleichbare Kosten nach sich.

Das spezifische Modell für den Nutzen einer Anzeige wurde in [3] vorgestellt. Zentral ist der Begriff einer Verkehrsstörung nach [2], bei der die Wahrscheinlichkeit erhöht ist, dass Fahrer zu einer unvorbereiteten scharfen Geschwindigkeitsreduktion gezwungen werden [12, 13]. Hierbei spielt die Ursache – ob Verkehrsunfall oder auch Stau aus dem Nichts – keine Rolle. Erfährt der Fahrer jedoch durch eine angemessenen strenge Anzeige eine Warnung, verringert sich das Unfallrisiko erheblich [11]. Diese Verringerung des Unfallrisikos lässt sich im Rahmen des Modells als „Nutzen“ quantifizieren und dem Zeitverlust nach Gl (3) gegenüberstellen. Im typischen Fall [14] breitet sich die Stauf­ront mit einer charakteristischen Geschwindigkeit stromaufwärts aus. Diese Erkenntnisse werden im Rahmen der Zielfunktion berücksichtigt.

Im normalen Verkehrsablauf auf einer Autobahn lässt sich eine durchschnittliche Unfallkostendichte U_0 aus historischen Unfall­erhebungen schätzen. Stromaufwärts einer Störung entsteht eine akut erhöhte Unfallkostendichte, da Fahrer durch ein starkes Geschwindigkeitsgefälle überrascht werden können. In der Vermeidung solcher Überraschungen durch eine Anzeige mit Warnwirkung entsteht daher ein erheblicher Nutzen N_w . Dieser hängt vom aktuellen „akuten“ Unfallrisiko U_m ab, das im Modell als Vielfaches von U_0 geschätzt wird. Trotz der Zeitkosten

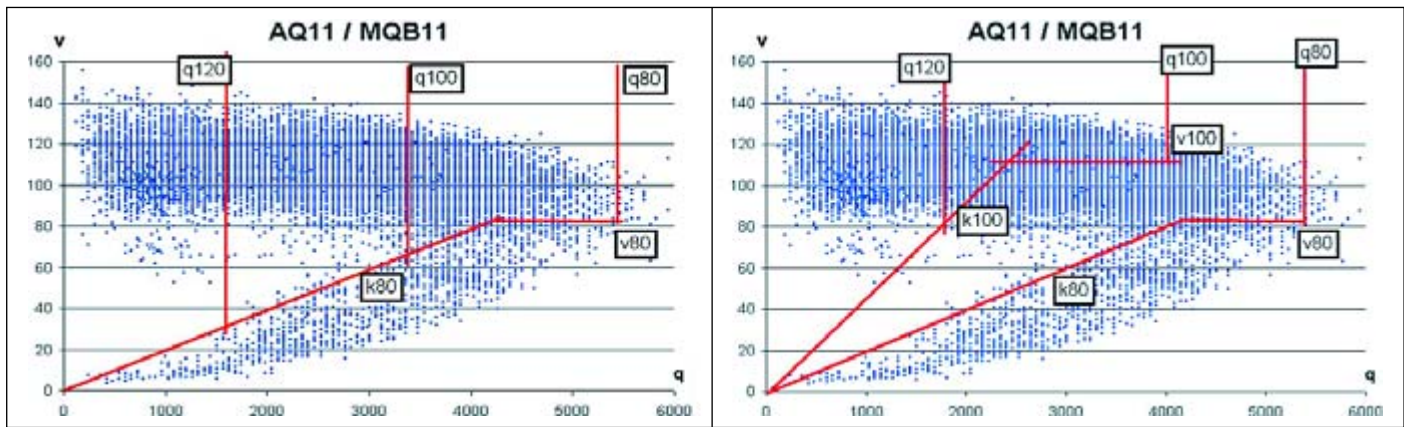


Bild 6: Unterteilung des Q-V-Raumes nach der Optimierung mit 5 bzw. 7 Parametern

überwiegt normalerweise daher der Nutzen einer restriktiven Schaltung, wenn es sich nicht um einen Fehlalarm handelt. Harmonisierungsprogramme haben dagegen ein mäßiges Potential zur Unfallverringerung in der Größenordnung U_0 , das mit Hilfe der Ergebnisse von [15] geschätzt wird, sowie ein Potential zur Stauvermeidung. Der dadurch gewonnene Nutzen ist N_H . Der gesamte Nutzen in der gegenwärtigen Ausführung setzt sich aus diesen beiden Beiträgen zusammen:

$$N_{\text{Gesamt}} = N_W + N_H \quad \text{Gl (4)}$$

Im Rahmen des Modells wäre es darüber hinaus möglich, auch Umwelt- oder Energiekosten zu berücksichtigen.

Das Nutzenpotential einer Warnung hängt von der Dringlichkeit der Verkehrssituation ab. Bei einer Verkehrsstörung ergibt sich wie bereits erklärt ein stark erhöhtes Risiko für Fahrzeuge, die ungewarnt in die Störung einfahren. Dieses erhöhte Risiko nimmt mit jedem weiteren Rückgang der Geschwindigkeit (blaue Kurve) auf 80, 60 oder 40 km (Bild 3) zu.

3.2 Technik zur Optimierung der Steuerungslogik

3.2.1 Parametersatz

Zusammenfassend ergibt sich aus dem Model für die lokale Steuerung ein Satz von Parametern, die im Rahmen des Optimierungsvorganges verändert werden. Für die Warnung sind diese wie folgt:

- Entscheidungspunkte: die M Parameter ($M = 5$) α_m mit $m = 1, \dots, M$
- Gewichte: die K Parameter β_k mit $k = 1, \dots, K$.

Für die Harmonisierung nach Belastung ergeben sich 5 bzw. 7 Parameter.

Die Parameter hängen wie bereits erklärt vom Anzeigequerschnitt ab und können im Rahmen dieser Formulierung auch als

vom Verkehrskontext abhängig angesehen werden.

3.2.2 Vorgehensweisen zur Optimierung

In der Praxis lässt sich die Optimierung nach verschiedenen Vorgehensweisen durchführen. Zum einen können die Parameter „offline“ mit Hilfe von empirischen Daten optimiert werden. Voraussetzung dabei ist eine ausreichende Menge von Verkehrsdaten mit ausreichender Qualität. Die Datenanforderungen legen es nahe, unter typischen Betriebsbedingungen höchstens einige Optimierungsvorgänge pro Jahr durchzuführen. Zum anderen kann das System auch zur Überwachung der Leistung der Anlage („Monitoring“) herangezogen werden. Hierbei können auch innerhalb einer relativ kurzen Zeit signifikante Strukturänderungen oder grobe Fehler erkannt werden.

3.2.3 Optimierungsprozess

Der Optimierungsprozess für eine „Offline“-Kalibrierung wird im Bild 4 dargestellt.

Aus den Erkennungsverfahren gehen unterschiedliche stetige und diskrete Kennwerte hervor. Diese werden zunächst auf eine für ein System zur Fusion typische, normierte Skalen transformiert. Die Modellparameter beziehen sich auf diese transformierten Kennwerte und werden entsprechend kodiert.

Der Optimierungsvorgang entspricht einer Suche im Parameterraum nach einem globalen Minimum (oder Maximum) der Zielfunktion. Da diese Funktion nicht-linear von den Parametern abhängt, sind entsprechend ausgerichtete Suchverfahren notwendig. In der Praxis hat die nicht-lineare Optimierung nicht den Anspruch, ein absolutes Minimum zu finden, sondern ein „gutes“ lokales Minimum. Konvergiert die Suche im Parameterraum bei

einem lokalen Minimum, so entsteht ein Parametersatz, der zum Test des Steuerungsmoduls herangezogen werden kann.

4. Test

4.1 Testfeld

Zur Erprobung des Systems diente eine 50 km lange Strecke der Bundesautobahn BAB A 8 Salzburg → München mit den dazugehörigen Anzeige- und Messquerschnitten. Diese Strecke enthält 3 Ein- bzw. Ausfahrten sowie einen wegen des starken Anstiegs problematischen Abschnitt („Irschenberg“). Der Abschnitt weist eine hohe Störungshäufigkeit auf und stellte ein Problem für die bisherige Steuerung dar. Für die Testphase wurden Daten von 30 Tagen verwendet. Davon wurden 20 Tage zur Optimierung und die restlich 10 Tage als Testmenge herangezogen.

4.2 Darstellung der Kalibrierung

Im Rahmen der Kalibrierung ist es vorteilhaft, den Optimierungsvorgang wie folgt zu zerlegen: zunächst werden die Parameter der Harmonisierung (ohne den Warnungszeitpunkt) unter Berücksichtigung des Nutzens der Harmonisierung N_H optimiert (siehe Gl (4)). Anschließend werden diese Parameter „eingefroren“ und die Parameter der Warnung unter Berücksichtigung des Gesamtnutzens N_{Gesamt} optimiert. In der Folge werden einige Beispiele veranschaulicht.

Die Bilder 5 und 6 stellen unterschiedliche Ergebnisse zur Harmonisierung als Unterteilung des Q-V-Raumes dar. Hierbei bedeuten die Punkte Systemzustände. Bei der bisherigen Steuerung nach MARZ (Bild 5) macht sich eine potentielle Instabilität bemerkbar, wenn sich der Systemzustand in der Nähe der Entscheidungs-

grenzen befindet, weil Übergänge $130 \geq 80$ bzw. $120 \geq 80$ möglich sind. Im Bild 6 werden die entsprechenden Unterteilungen nach Optimierungen mit 5

bzw. 7 Parametern exemplarisch dargestellt. Nach [15] wird erwartet, dass die Harmonisierung erst ab einer Verkehrsstärke

von ca. 1800 Fz/h für 3 Spuren eine Erhöhung der Verkehrssicherheit bringt. Diese Grenze spiegelt sich im objektiven Gütekriterium wieder und ergibt sich automatisch aus der Optimierung.

Das Bild 7 zeigt das Ergebnis mehrerer Optimierungsvorgänge am Anzeigequerschnitt AQ 10 (Irschenberg). Dafür werden Daten von MQ 10 und MQ 11 (stromabwärts) herangezogen (siehe Abschnitt 2). Ein negativer Wert des Koeffizienten eines Verfahrens, wie im Bild 7 für den Lkw-Kennwert der Fall, bedeutet, dass der entsprechende Kennwert das Gesamtergebnis für den Störungsindikator negativ beeinflusst. Sind mehrere Kennwerte miteinander korreliert, so können auch negative Koeffizienten zu einer erhöhten Gesamtqualität beitragen.

Das Bild 8 zeigt die Ergebnisse mehrerer Optimierungsvorgänge am Anzeigequerschnitt AQ 20. Die unterschiedliche Verkehrscharakteristik äußert sich bereits bei Optimierung mit einem Zustand in sehr unterschiedlichen β -Koeffizienten. Sie wurden den Datensätzen nach Unterteilung der Daten nach Verkehrskontext gegenübergestellt.

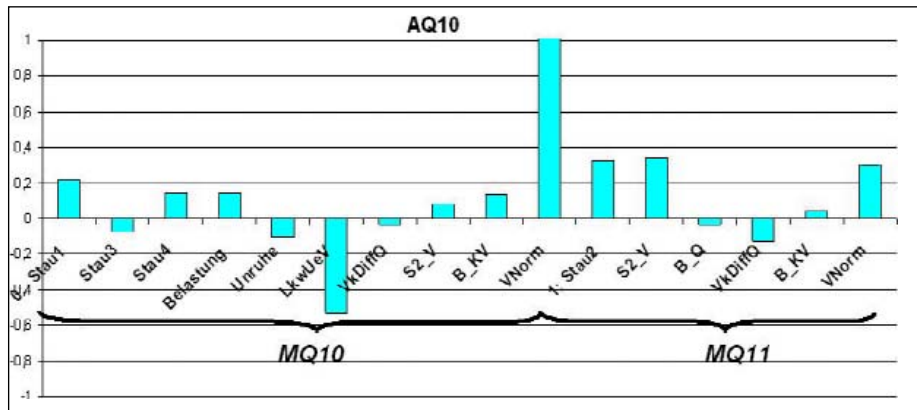


Bild 7: Gegenüberstellung der Parameter der Warnung (Koeffizienten β) am AQ 10; die Beschriftung der Balken bezieht sich auf den jeweiligen Kennwert

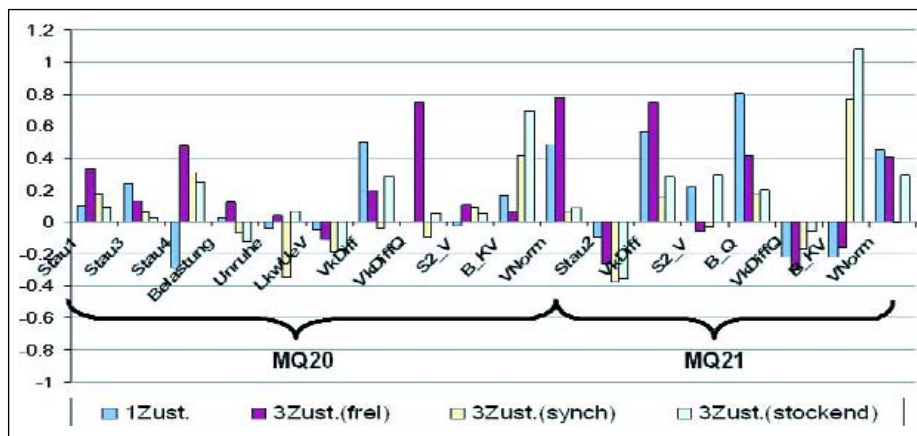


Bild 8: Zusammenfassung der Parameter der Warnung (Koeffizienten β) im Modell (Y-Achse) mit einem Zustand gegenüber einem Modell mit 3 Zuständen für AQ 20; die Unterteilung bezieht sich auf die Datenquellen MQ 20 bzw. MQ 21

4.3 Darstellung der resultierenden Steuerung

Im Folgenden werden Ergebnisse des Verfahrens mit Daten vom September 2001 für eine Strecke („Irschenberg“) der SBA A 8 zwischen Bad Aibling und München vorgestellt. Zur Veranschaulichung zeigt das Bild 9 exemplarisch den Verlauf der Geschwindigkeit am AQ 12 und am stromabwärts liegenden MQ für eine „milde“ Störung. Hierbei ist erkennbar, dass die neue Steuerung vielen Fahrern die „Überraschung“ um ca. 9:20 Uhr (Bsp. 1) erspart, durch die sie sonst ungewohnt hätten bremsen müssen.

Im Bild 11 wird die Qualität der Steuerung nach der Methode von [1] und [2] (Detektionsrate und Fehlalarmrate) dargestellt. Die Verbesserung gegenüber der Referenz ist erheblich: Die Änderung beträgt ca. + 72% bei der Detektionsrate, auf Kosten einer Zunahme um nur etwa + 6% bei der Fehlalarmrate.

Auch die Bewertung mit Hilfe eines aus der Zielfunktion gewonnenen Qualitätsindex zeigt eine deutliche Verbesserung, die allerdings für die einzelnen Anzeigequerschnitte unterschiedlich ausfällt.



Bild 9: Geschwindigkeitsverläufe und Schaltfolgen; die Anzeige „Stau“ wird als 40 km/h, „keine Beschränkung“ als 130 km/h dargestellt

5. Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag wird ein neues Modell und eine neue Architektur zur Steuerung

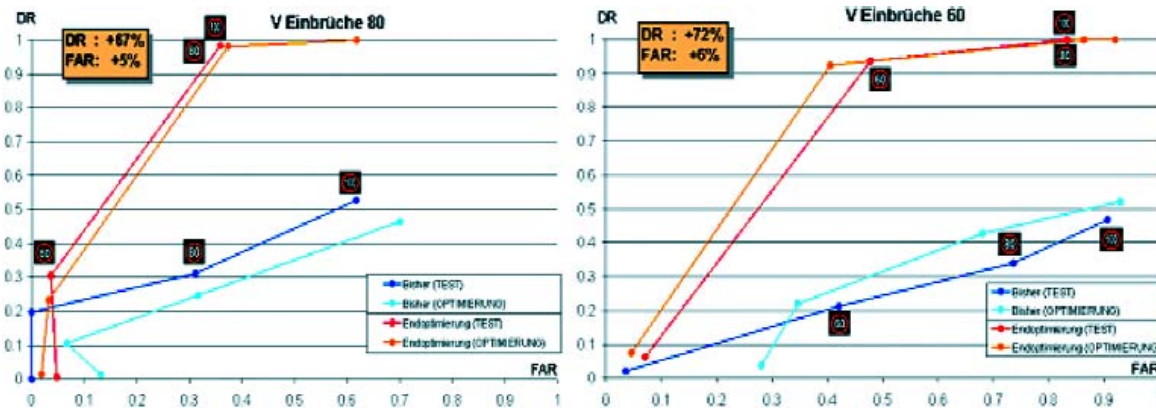


Bild 10: DR vs FAR bei V-Einbrüchen 60 und 80 km/h; die Bezeichnungen „OPTIMIERUNG“ bzw. „TEST“ in Klammern beziehen sich auf die jeweiligen Datenmengen, die Bezeichnungen „Bisher“ bzw. „Endoptimierung“ beziehen sich hingegen auf die bisherige bzw. die neue Steuerung

von SBA vorgestellt. Im Mittelpunkt steht die optimierte und intelligente Verknüpfung unterschiedlicher Erkennungsverfahren auf der Basis einer Gesamtziel-funktion. Die neue Architektur ist für die in der Praxis übliche technische Ausstattung einsetzbar. Testergebnisse deuten auf eine deutliche Verbesserung der Qualität im Hinblick auf erhöhte Erkennungs-raten bzw. verringerte Fehlalarmraten hin. Diese Verbesserung erfolgt bereits anhand der bisherigen Erkennungsverfahren und ist allein auf deren verbesserte Verknüpfung zurückzuführen.

Das System eignet sich auch für Erweiterungen und zukünftige Aufgaben wie etwa

- die Integration weiterer Erkennungsverfahren
- die Verwendung weiterer intelligenter bzw. nichtlinearer Ansätze für die Verknüpfung
- Ansätze zur Bestimmung und Optimierung der Robustheit.

Mit dem hier vorgestellten System können schließlich auch Monitor-Funktionen übernommen werden, um die Steuerung im laufenden Betrieb systematisch zu überprüfen und gegebenenfalls Probleme zeitig zu erkennen.

Das Modell wurde in der VRZ Freimann im Rahmen des Systems „INCA“ implementiert und läuft bereits in einer Testphase im offenen Regelkreis. Ergebnisse dieses Tests werden im Laufe der nächsten Zeit erwartet.

Literaturverzeichnis

1 Hoops, M.; Kates, R.; Keller, H. (2000): Bewertung von Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf in Theorie, Praxis und Simulation, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 797

2 Busch, F. (1986): Automatische Störungserkennung auf Schnellverkehrsstraßen – ein Vergleich, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)

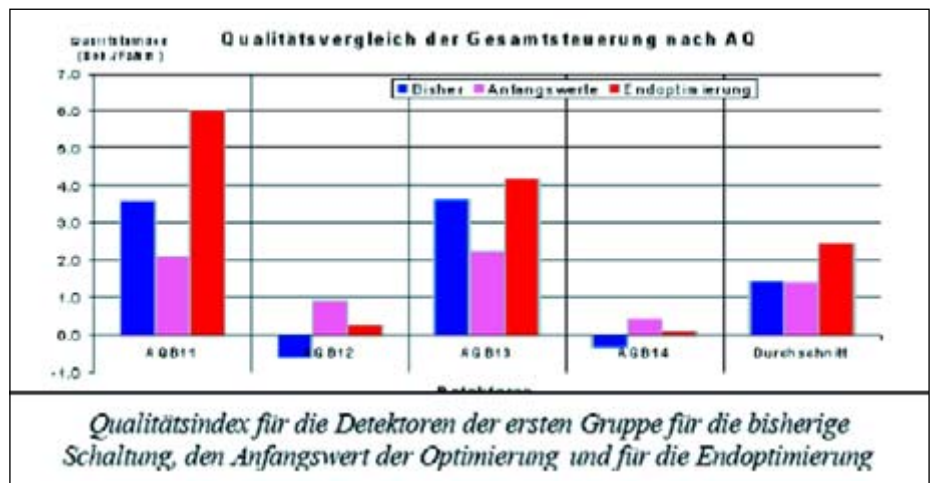


Bild 11: Gegenüberstellung der Qualität der neuen und bisherigen Steuerung hinsichtlich Detektionsraten (DR) und Fehlalarmraten (FAR) für die zur Optimierung verwendeten Daten und für Testdaten

3 Vukanovic, S.; Kates, R.; Denaes, S.; Keller, H. (2003): New methodologies for the evaluation and optimization of AID and traffic management systems, 10th ITS-World Congress, Madrid (Spain), 2003

4 Internal CORVETTE report (2002): Neues Verfahren zur verkehrlichen SBA-Steuerung (erste Entwicklungsstufe)

5 Busch, F.; Fellendorf, M. (1990): Automatic Incident Detection on Motorways, Traffic Engineering & Control, Vol. 31 No. 4 (221–227)

6 Bundesanstalt für Straßenwesen (1999): Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 99), Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Ausgabe 1999

7 Busch, F.; Cremer, M.; Ghio, A.; Henninger, T. (1994): A multi-model approach with fuzzy-reasoning for traffic state estimation and incident detection on motorways, ATT/IVHS conference, Paris, 1994

8 Sieber, M. (2003): Entwicklung einer neuen Methodik zur Bewertung von Algorithmen zur automatischen Störungserkennung auf Autobahnen unter Berücksichtigung der Verkehrszustände, Diplomarbeit, Technische Universität München

9 Evanco, W.M. (1996): A Data Fusion Framework for Meta-Evaluation of Intelligent Transportation System Effectiveness, Mitretek publication WN96W4

10 Barceló, J.; Ferrer, J.L.; Montero, L.; Perarnau, J. (2001): Assessment of Incident Management Strategies using AIMSUN, Proceedings of the 8th ITS World Congress, Sydney, 2001

11 Kates, R.; Keller, H.; Lerner, G. (1999): Measurement-based prediction of safety performance for a prototype traffic warning system, Proc. Traffic Safety on Two Continents, Malmö, Hrsg. Bundesanstalt für Straßenwesen

12 Parker, M.R. (1997): Effects of raising and lowering speed limits on selected roadway sections, Federal Highway Administration, FHWA-RD-92-084, Washington, D.C.

13 Groeger, J.A. (1998): Close, but no cigar: assessment of a headway warning device, Proceedings of Institute of Electrical Engineers, 230, 5, 1–4

14 Kerner B. S. (2002): Review of Empirical Research on Congested Traffic Flow, Transportation Research Record, 1802, 145–154

15 Steinhoff, C.; Kates, R.; Keller, H. (2001): Methods for analysing observed compliance rates to mandatory speed limits, 8th ITS World Congress, Sydney, 2001

16 Maycock, G. (1997): Speed, speed choice and accidents; in G.B. Grayson (ed.) Behavioural Research in Road Safety VII. Transport Research Laboratory, Crowthorne