

Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Verkehrstelematik
Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung

Diplomarbeit
zum Thema

Untersuchung zum Einsatzbereich von Steuerverfahren für Streckenbeeinflussungsanlagen

eingereicht von
Jan Grimm

Betreuer:
Dr.-Ing. Klaus-Peter Döge (Technische Universität Dresden)
Dr. rer. nat. Peter Wagner (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Berlin)

Dresden, den 2. Oktober 2009

Jan Grimm

Bibliografischer Nachweis

Grimm, Jan: *Untersuchung zum Einsatzbereich von Steuerverfahren für Streckenbeeinflussungsanlagen*

Diplomarbeit, 2009, 159 Seiten

26 Literaturangaben, 8 Abbildungen, 25 Tabellen, 5 Anlagen, 1 CD

Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

Institut für Verkehrstelematik

Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung

Autorenreferat

Für die Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen, welche zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeit auf Autobahnen und Schnellstraßen eingesetzt werden, existieren verschiedene Verfahren unterschiedlicher Komplexität. Einige dieser Verfahren haben sich bewährt, andere konnten sich nicht durchsetzen und wieder andere könnten in Zukunft eingesetzt werden. In dieser Arbeit wurden gegenwärtige Einsatzbereiche für diese Verfahren sowie Gründe für Entwicklungen bezüglich der Einsatzbereiche untersucht. Hierzu wurden Expertenbefragungen bei mehreren Autobahnleitstellen in Deutschland durchgeführt. Darüber hinaus wurde untersucht, welche Maßnahmen des Qualitätsmanagements in der Praxis umgesetzt werden und welche Bewertungsverfahren aus früheren Forschungsprojekten bekannt sind. Auf dieser Grundlage wurde ein Konzept zur automatischen Qualitätsbewertung erarbeitet. Schließlich wurden verschiedene Steuerverfahren für Streckenbeeinflussungsanlagen im Rahmen einer mikroskopischen Verkehrssimulation gegenübergestellt.

Thesen der Diplomarbeit

1. Der Prozess der Streckenbeeinflussung lässt sich in die Arbeitsschritte der Datenerfassung und -analyse, der Situationsbewertung, der Maßnahmenauswahl, der Maßnahmenbewertung sowie der Informationsverbreitung unterteilen.
2. Auf der Grundlage dieser Arbeitsschritte kann eine Klassifikation der Verfahren zur Streckenbeeinflussung als Datenanalyse-, Situationsbewertungs-, Maßnahmenauswahl- oder Maßnahmenbewertungsverfahren erfolgen.
3. In Deutschland sind heute vor allem die im Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ) beschriebenen Verfahren im Einsatz.
4. Komplexe Verfahren, welche sich fortgeschrittener theoretischer Konzepte wie Filterschätzverfahren, Verkehrsmodellen oder Fuzzy-Logik bedienen, konnten sich gegen einfachere Schwellenwertverfahren nicht durchsetzen.
5. Qualitätsbetrachtungen für die Streckenbeeinflussung werden in der Praxis als wünschenswert erachtet, jedoch oftmals nur unregelmäßig und selten umgesetzt.
6. Aus früheren Forschungsprojekten sind Methoden zur Qualitätsbewertung bekannt, welche sich teilweise für den Einsatz in einem automatischen Qualitätsbewertungssystem eignen.
7. Die Automatisierung der Qualitätsbewertung ist sinnvoll, da diese so objektiv, regelmäßig, reproduzierbar und mit vergleichsweise geringem Aufwand betrieben werden kann. Eine automatische Information des Leitstellenpersonals über Qualitätsmängel ermöglicht eine schnelle und zielgerichtete Ergreifung von Verbesserungsmaßnahmen.
8. Die für die Qualitätsbewertung zu erhebenden Daten sollten für unterschiedliche Verkehrskontexte, Anzeigezustände oder andere Randbedingungen separat ausgewertet werden. Dies erfordert die Abgrenzung mehrerer Kontextklassen.
9. Um trotz separater Auswertung nach Kontextklassen einen ausreichend hohen Umfang an Messwerten für eine statistisch gesicherte Qualitätsbewertung zu erhalten, ist die Verwendung des Ansatzes unterbrochener Zeit- bzw. Datenreihen geeignet.
10. Für die automatische Qualitätsbewertung erscheint die Verwendung von Qualitätsindizes für mehrere Merkmale geeignet, wobei Qualitätsmängel auf der Basis von Schwellenwerten für diese Indizes erkannt werden können.
11. Der Ersatz des etablierten präventiven Steuerverfahrens „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“ durch das Verfahren „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ lässt keine ausreichend hohen Nutzenpotenziale erwarten, um den hiermit verbundenen Aufwand zu rechtfertigen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	9
2	Grundlagen	10
2.1	Begriffe und Festlegungen	10
2.1.1	Beschreibung von Verkehrsprozessen	10
2.1.2	Verkehrsmodelle	11
2.1.3	Verkehrs- und Streckenbeeinflussung	11
2.2	Arbeitsschritte der Streckenbeeinflussung	12
2.3	Klassifikation der Verfahren	15
3	Verfahren zur Streckenbeeinflussung	16
3.1	Verfahren zur Verkehrsdatenanalyse	16
3.2	Verfahren zur Umfelddatenanalyse	20
3.3	Situationsbewertungsverfahren	20
3.3.1	Detektionsverfahren für verkehrsbedingte Situationen	20
3.3.2	Detektionsverfahren für Umfeldbedingungen	25
3.3.3	Prognoseverfahren	25
3.4	Steuerverfahren	28
3.4.1	Verfahren zur Störfallwarnung	28
3.4.2	Verfahren zur Warnung vor Umfeldbedingungen	30
3.4.3	Verfahren für die präventive Steuerung	31
3.5	Maßnahmenbewertungsverfahren	33
3.6	Ergebnisse der Expertenbefragung	34
4	Werkzeuge der Qualitätsbewertung	36
4.1	Begriffe	36
4.2	Prozesse der Streckenbeeinflussung	37
4.3	Anforderungen an die Streckenbeeinflussung	38
4.3.1	Sicherheitsanforderungen	38
4.3.2	Anforderungen an die Leistungsfähigkeit	45
4.3.3	Anforderungen an die Datenqualität	49
4.3.4	Anforderungen bezüglich der Akzeptanz	49
4.3.5	Verknüpfung mehrerer Anforderungen	51
4.3.6	Automatische Parameteroptimierung	51
4.4	Zusammenfassung	52
5	Vorschläge zum Qualitätsmanagement	54
5.1	Komponenten und Arbeitsschritte	54
5.2	Erfassung der Bewertungsgrößen	55
5.3	Bewertung der Datenqualität	57
5.4	Bewertung der Sicherheit	58
5.5	Bewertung der Leistungsfähigkeit	59
5.6	Bewertung der Akzeptanz	59

5.7	Zusammenfassende Qualitätsbewertung	60
5.8	Anwendungsmöglichkeiten	60
6	Simulation	62
6.1	Vorbereitung	62
6.1.1	Auswahl der Simulationssoftware	62
6.1.2	Auswahl der Verfahren	63
6.1.3	Auswahl des Streckenabschnittes	64
6.1.4	Auswahl der Verkehrsdaten	64
6.1.5	Festlegung der Mess- und Anzeigequerschnitte	65
6.2	Die Simulationsumgebung	65
6.2.1	Aufbau und Funktionsweise	65
6.2.2	Interaktion mit SUMO	66
6.2.3	Funktionskomplex „Verkehrsdatenanalyse“	66
6.2.4	Funktionskomplex „Situationsbewertung und Maßnahmenauswahl“	67
6.2.5	Funktionskomplex „Szenarien“	67
6.2.6	Funktionskomplex „Auswertung“	68
6.2.7	Vorbereitung des Verkehrsnetzes und der Verkehrsnachfrage	68
6.2.8	Test der Simulationsumgebung	69
6.2.9	Verbesserungspotenziale der Software SUMO	70
6.3	Durchführung der Simulation	71
6.4	Ergebnisse	72
7	Zusammenfassung und Ausblick	75
Anhang		78
A	Detailbeschreibungen zu Verkehrsanalyseverfahren	79
A.1	Plausibilitätsprüfung und Ersatzwertbestimmung nach MARZ	79
A.2	Datenvervollständigung nach MARZ	80
A.3	Glättung und Trendprognose nach MARZ	81
A.4	Kalman-Filter-Verfahren	82
A.5	Traffic Forecast	84
B	Detailbeschreibungen zu Situationsbewertungsverfahren	85
B.1	Detektionsverfahren für verkehrsbedingte Situationen	85
B.1.1	Verkehrsstufen nach MARZ	85
B.1.2	Fuzzyfizierte Verkehrslage	86
B.1.3	VKdiff-Verfahren	87
B.1.4	VKdiffKfz-Verfahren	88
B.1.5	Erweiterte Situationserkennung (ESE)	89
B.2	Detektionsverfahren für Umfeldbedingungen	91
B.2.1	Niederschlagsstufen nach MARZ	91
B.2.2	Sichtweitestufen nach MARZ	92

B.3	Prognoseverfahren	93
B.3.1	Unruhe im Verkehr nach MARZ	93
B.3.2	Zuverlässigkeit des Verkehrs (Ferrari-Verfahren), Literaturvariante	94
B.3.3	Zuverlässigkeit des Verkehrs (Ferrari-Verfahren), Variante nach Heusch/Boesefeldt	99
C	Detailbeschreibungen zu Steuerungsverfahren	101
C.1	Verfahren zur Störfallwarnung	101
C.1.1	Stauwarnung nach MARZ	101
C.1.2	Stauwarnung mit INCA	102
C.2	Verfahren für die präventive Steuerung	103
C.2.1	Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ	103
C.2.2	Lkw-Überholverbot wegen Verkehrsbehinderung nach MARZ	104
C.2.3	Harmonisierung der Geschwindigkeit mit INCA	105
D	Befragungsprotokolle	106
D.1	Autobahndirektion Südbayern	106
D.2	Autobahndirektion Südbayern, Nachfrage	119
D.3	Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen (Straßen.NRW)	120
D.4	Autobahnamt Thüringen	131
D.5	Autobahndirektion Nordbayern	139
D.6	Autobahnamt Sachsen (Kurzanfrage)	145
D.7	Autobahn niederlassung Hamm (Straßen.NRW, Nachfrage)	145
E	Simulationsergebnisse	146
E.1	Versuche mit Szenario „doppelte Verkehrsstärke“	146
E.2	Versuche mit Szenario „vorübergehende Störungen“	147
E.3	Versuche mit beiden Szenarien	150
	Abbildungsverzeichnis	153
	Tabellenverzeichnis	154
	Abkürzungsverzeichnis	155
	Symbolverzeichnis	156
	Literatur	157

1 Einführung

Aufgrund eines allgemein wachsenden Verkehrsaufkommens im Bereich des motorisierten Individualverkehrs (MIV) erhöht sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Verkehrsstörungen. Gerade auf Autobahnen und Schnellstraßen bewirken Verkehrsstörungen eine deutliche Herabsetzung der Leistungsfähigkeit. Daneben haben Verkehrsstörungen negative Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit, da sie durch einen deutlichen Abfall des Geschwindigkeitsniveaus gekennzeichnet sind. Der steigenden Verkehrsnachfrage kann vor allem aus ökonomischen und ökologischen Gründen nicht in entsprechendem Maße mit einer Erhöhung der Verkehrswegekapaazität durch bauliche Maßnahmen begegnet werden.

Zur Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit eines Streckenabschnittes bei hohem Verkehrsaufkommen sowie zur Minderung der gefährlichen Wirkung von Verkehrsstörungen und bestimmter Umfeldbedingungen werden daher heute auf hochbelasteten Streckenabschnitten in mehreren Ländern Europas Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) eingesetzt. Hierbei soll durch dynamische, abschnittsbezogene Angabe von Ge- und Verboten sowie Warnungen Einfluss auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer genommen werden. Für die automatische Steuerung dieser Anlagen existieren verschiedene Verfahren, von denen einige sich in der Praxis bewährt haben und in einschlägigen Regelwerken verankert sind, andere sich noch in der Entwicklung befinden und wiederum andere sich nicht durchgesetzt haben.

Vielfach gestaltet sich die Wahl geeigneter Verfahrensparameter als schwierig, wobei ein Kompromiss zwischen verschiedenen, oft entgegengesetzten Zielen eingegangen werden muss. Aufgrund dieses hohen Aufwandes wird eine Parameterüberprüfung und -anpassung meist nur selten vorgenommen. Dieser und weitere Faktoren können dazu führen, dass den Verkehrsteilnehmern nicht situationsgerechte Informationen vermittelt werden. Unnötig restriktive Anzeigezustände wirken sich z. B. negativ auf die Akzeptanz einer SBA durch die Verkehrsteilnehmer aus und können vermeidbare Reisezeitverluste verursachen. Die derzeitige Vorgehensweise bei der Streckenbeeinflussung bietet somit Verbesserungspotenziale.

In dieser Arbeit wurde zunächst untersucht, welche Verfahren zur Streckenbeeinflussung in der Vergangenheit eingesetzt wurden, welche gegenwärtig eingesetzt werden und welche in Zukunft eingesetzt werden könnten. Dabei wurde versucht, Gründe für Entwicklungen bezüglich der Einsatzbereiche dieser Verfahren zu ermitteln. Die Untersuchung erfolgte auf der Basis einer Literaturrecherche und von Expertenbefragungen bei mehreren Autobahnleitstellen in Deutschland. In Abschnitt 2 wird einführend auf Grundlagen, Begriffe und Festlegungen zur Modellierung von Verkehrsprozessen und zur Streckenbeeinflussung eingegangen. In Abschnitt 3 werden relevante Verfahren zur Streckenbeeinflussung vorgestellt und die Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst.

Ebenfalls im Rahmen der Untersuchung wurde ermittelt, welche Methoden zur Qualitätsbewertung einer SBA-Steuerung existieren. Eine Auswahl dieser Methoden wird in Abschnitt 4 vorgestellt. Auf dieser Grundlage wurden Empfehlungen für ein Qualitätsmanagement für die Streckenbeeinflussung erarbeitet, welche in Abschnitt 5 dargelegt werden.

Schließlich wurden ausgewählte Verfahren zur Streckenbeeinflussung in einer mikroskopischen Simulation gegenübergestellt. Eine Beschreibung der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung dieser Simulation wird in Abschnitt 6 gegeben.

2 Grundlagen

In diesem Abschnitt sind Begriffsdefinitionen, Festlegungen, Abgrenzungen und Klassifikationskriterien zusammengefasst, die in dieser Arbeit verwendet werden.

2.1 Begriffe und Festlegungen

Durch die hier eingeführten Begriffe soll eine Vereinheitlichung der in der Literatur verwendeten Bezeichnungen erreicht werden. Darüber hinaus werden begriffliche Abgrenzungen genutzt, um den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit festzulegen.

2.1.1 Beschreibung von Verkehrsprozessen

Verkehrsprozesse können durch *Verkehrskenngrößen* beschrieben werden. Eine bestimmte Menge solcher Verkehrskenngrößen wird zusammenfassend als *Verkehrsdaten* bezeichnet.

Es wird zwischen *lokalen* und *streckenbezogenen* Verkehrskenngrößen unterschieden. Erstere beziehen sich auf einen bestimmten Messquerschnitt (MQ), letztere auf einen bestimmten Streckenabschnitt, der meist durch zwei MQ begrenzt wird.

Ferner erfolgt eine Abgrenzung zwischen *individuellen* und *kollektiven* Verkehrskenngrößen. Erstere beziehen sich auf einzelne Verkehrsteilnehmer, während letztere einen Verkehrsprozess in zeitlich oder längs der Strecke aggregierter Form beschreiben. Sofern nicht anders angegeben, ist eine kollektive Verkehrskenngröße gemeint.

Kollektive Verkehrskenngrößen können einzeln für jeden Fahrstreifen vorliegen oder für eine gesamte Richtungsfahrbahn aggregiert sein. Darüber hinaus können sich Verkehrskenngrößen auf Personenkraftwagen (Pkw), Lastkraftwagen (Lkw) oder Kraftfahrzeuge (Kfz) aller Art beziehen. Aus Verkehrskenngrößen für Pkw und Lkw können entsprechende Bemessungsverkehrskenngrößen gebildet werden, indem die Anzahl der Lkw in Pkw-Einheiten (PkwE) umgerechnet wird. Sofern nicht anders angegeben, bezieht sich eine Verkehrskenngröße auf Kfz aller Art.

Die o. g. Merkmale werden durch folgende Festlegungen kenntlich gemacht:

- lokale Kenngrößen: Index „lok“ (nur bei Bedarf)
- individuelle Kenngrößen: Index „ind“
- streckenbezogene bzw. kollektive Kenngrößen: ohne Index „lok“ bzw. „ind“
- fahrstreifenbezogene Kenngrößen: Kleinbuchstaben
- richtungsquerschnittsbezogene Kenngrößen: Großbuchstaben
- Kenngrößen bezogen auf Kfz aller Art: Index „Kfz“ (nur bei Bedarf)
- Kenngrößen bezogen auf Pkw: Index „Pkw“
- Kenngrößen bezogen auf Lkw: Index „Lkw“
- Bemessungsverkehrskenngrößen: Index „B“

Die Bezeichnungen für Verkehrskenngrößen können dem Symbolverzeichnis entnommen werden.

2.1.2 Verkehrsmodelle

Im Rahmen der Verkehrssteuerung können Verkehrsmodelle für die Datenvervollständigung und für die zeitliche oder räumliche Prognose von Verkehrskenngrößen sowie zur Wirkungsabschätzung bestimmter Maßnahmen von Bedeutung sein. Es wird zwischen *deterministischen* oder *stochastischen* Modellen sowie zwischen *mikroskopischen* und *makroskopischen* Modellen unterschieden. In mikroskopischen Modellen wird das Verhalten einzelner Verkehrsteilnehmer nachgebildet, während bei makroskopischen Verkehrsmodellen der Verkehrsfluss über kollektive Zustandsgrößen beschrieben wird.

2.1.3 Verkehrs- und Streckenbeeinflussung

Eine *Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA)* ist eine Einrichtung zur Beeinflussung des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern des MIV durch Anzeige von Anordnungen, Empfehlungen oder Informationen mittels Wechselverkehrszeichen (WVZ). Im Rahmen dieser Arbeit werden nur VBA auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Schnellstraßen¹ betrachtet.

Eine VBA kann eine *Netzbeeinflussungsanlage*, eine *Knotenpunktbeeinflussungsanlage*, eine *punktueller Beeinflussungsanlage* oder eine *Streckenbeeinflussungsanlage (SBA)* sein², wobei diese Arbeit sich auf Betrachtungen zu SBA beschränkt.

SBA sind Systeme, mit denen eine Beeinflussung des Verkehrsverhaltens auf einem oder mehreren aufeinanderfolgenden Streckenabschnitten mit Hilfe von WVZ angestrebt wird³.

Ziele und Einsatzgebiete von Streckenbeeinflussungsanlagen

Der Einsatz von SBA erfolgt vornehmlich zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit von Streckenabschnitten bei hoher Verkehrsbelastung. Wesentliche Aufgaben von SBA sind:

- Erhalt eines stabilen Verkehrsflusses nahe der Kapazitätsgrenze
- Stauwarnung
- Warnung vor Unfällen
- Warnung vor gefährlichen Witterungsbedingungen
- ergänzende Absicherung von Baustellen

Darüber hinaus können SBA auch zur Gewährung einer Einfahrhilfe in Einfädelungsbereich nach Autobahnknotenpunkten⁴ oder zur Warnung vor langsam fahrenden Fahrzeugen wie Lkw an Steigungen genutzt werden. Beide Einsatzgebiete werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da sie heute nicht mehr bzw. nur in einem Fall in SBA in Deutschland vorzufinden sind⁵.

¹ Autobahnähnliche Schnellstraßen seien hier definiert als anbaufreie Straßen mit baulich getrennten Richtungsfahrbahnen und ausschließlich planfreien Knotenpunkten. ² nach [16] ³ nach [2] ⁴ z. B. frühe SBA BAB A 8 (Inbetriebnahme 1983) im Raum Stuttgart, beschrieben in [4] ⁵ nach Erkenntnissen aus der Literaturrecherche und den Befragungen

Maßnahmen der Streckenbeeinflussung

Allgemein können mit SBA den Verkehrsteilnehmern situationsabhängig Ge- und Verbote, Warnungen sowie Hinweise mitgeteilt werden. Diese werden in Form festgelegter Schaltbilder an Anzeigequerschnitten (AQ), die jeweils ein oder mehrere WVZ enthalten, als Verkehrszeichensymbole gemäß der Straßenverkehrsordnung dargestellt. Da die Menge der darstellbaren Verkehrszeichensymbole von Anlage zu Anlage unterschiedlich sein kann, wird an dieser Stelle auf eine Auflistung der Symbole verzichtet. Allgemein kann jedoch festgestellt werden, dass die Beeinflussung des Verkehrsteilnehmers mittels folgender Eingriffe geschehen kann:

- Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit
- Lkw-Überholverbote
- Fahrstreifensperrungen
- Warnung vor verschiedenen Gefahren

Zur Streckenbeeinflussung werden auch die dynamische Seitenstreifenfreigabe sowie der Richtungswechselbetrieb gezählt. Zuflussdosierungsanlagen haben mit SBA das Ziel der Aufrechterhaltung eines stabilen Verkehrsflusses nahe der Kapazitätsgrenze gemeinsam. Solche Anlagen werden jedoch in dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

Eine gezielte Auswahl der Eingriffsmöglichkeiten, die meist in einem Schaltprogramm zusammengefasst ist und der Erfüllung einer bestimmten Aufgabe wie z. B. der Warnung dient, wird als *Maßnahme* bezeichnet.

2.2 Arbeitsschritte der Streckenbeeinflussung

In diesem Abschnitt wird eine Unterteilung des Gesamtprozesses der Streckenbeeinflussung in einzelne Arbeitsschritte vorgestellt. Jeder dieser Arbeitsschritte kann als Teilprozess angesehen werden, der jeweils definierte Eingangs- und Ausgangsgrößen besitzt. Die Unterteilung dient zum einen als Grundlage für die Klassifikation der Verfahren und erleichtert zum anderen eine Abgrenzung des Gegenstandes dieser Arbeit. Darüber hinaus ist sie eine Grundlage für die Betrachtungen zum Qualitätsmanagement.

Die verkehrsabhängige Streckenbeeinflussung kann als Regelkreis angesehen werden. Die Stellgröße ist hierbei das Verhalten der Verkehrsteilnehmer, das durch i. d. R. lokale oder quasilokale Messung verschiedener Verkehrskenngrößen beobachtbar ist. Die Messung und Verwendung streckenbezogener Verkehrskenngrößen, z. B. mittels Floating Car Data oder Daten aus der satellitengestützten Ortung, ist zwar inzwischen praktisch möglich⁶, gehört in SBA derzeit jedoch nicht zum Stand der Technik und wird daher nicht näher betrachtet.

Eine gewisse Beeinflussbarkeit der Verkehrsteilnehmer besteht durch die im vorangegangenen Abschnitt genannten Eingriffsmöglichkeiten. Die Regelung als Abbildung einer beobachteten Verkehrssituation auf eine geeignete Maßnahme erfolgt in mehreren Stufen, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

Im Rahmen der *Verkehrs- und Umfelddatenerfassung* werden an Sensoren gemessene physikalische Größen in Verkehrs- bzw. Umfeldkenngrößen umgewandelt. In den Technischen Lieferbedingungen

⁶ Möglichkeiten zur Fusion solcher Daten mit durch lokale oder quasilokale Messung gewonnenen Daten wurden z. B. in [24] erarbeitet.

für Streckenstationen (TLS, [17]) sind Vorgaben enthalten, welche Verkehrskenngrößen mindestens je Fahrstreifen an einem MQ zur Verfügung stehen müssen.

Im Rahmen der *Verkehrsdatenanalyse* und der *Umfelddatenanalyse* werden die erfassten Kenngrößen in folgenden Schritten weiterverarbeitet:

- Plausibilitätsprüfung
- Ersatzwertbildung
- Datenergänzung (Berechnung oder Schätzung weiterer Kenngrößen)
- Aggregation
- Glättung
- Trendprognose

Das auf diese Weise gewonnene Gesamtbild der Verkehrslage und der Umfeldbedingungen ist heterogen und kann Widersprüche enthalten. Dies gilt insbesondere dann, wenn verschiedenartige Messeinrichtungen wie Induktionsschleifen und Radarsensoren in einer Anlage verwendet werden oder mehrere Datenanalyseverfahren eingesetzt werden. Daher werden die Verkehrsdaten im Zuge der *Situationsbewertung* auf wenige Entscheidungsgrößen zusammengefasst. Hierfür bestehen folgende grundsätzliche Möglichkeiten:

- Auswahl bestimmter Kenngrößen
- Fusion von Verkehrsdaten
- Klassifikation einer Situation in Stufen (z. B. Verkehrsstufen oder Nässestufen)
- Gewinnung von Indikatoren für ein bestimmtes Ereignis (z. B. Störfallindikator)

Anhand der so gewonnenen Entscheidungsgrößen werden im Rahmen einer *Maßnahmenauswahl* verschiedene Schaltwünsche abgeleitet. Die hierbei jeweils zugrunde liegenden Algorithmen stellen die zentralen Komponenten der verwendeten Steuerverfahren dar, da sie die Abbildung beobachteter Situationen auf Maßnahmen realisieren.

Im Zuge der *Maßnahmenbewertung* werden Schaltwünsche mehrerer Steuerverfahren derart miteinander verknüpft, dass verträgliche Anzeigehalte zusammengeführt und zwischen unverträglichen Anzeigehalten nach bestimmten Kriterien eine Auswahl getroffen wird. Hieraus ergibt sich ein Schaltbild, das nach einer Verträglichkeitsprüfung, bestehend aus einem Quer- und einem Längsabgleich, zur Anzeige gebracht werden kann.

Die Arbeitsschritte der Streckenbeeinflussung sind in Abbildung 1 auf der nächsten Seite dargestellt. Die Bearbeitung der Arbeitsschritte erfolgt grundsätzlich automatisch, wobei die Möglichkeit des Eingriffs durch einen Bediener besteht. Unter besonderen Umständen, insbesondere im Probetrieb, kann ein bestimmtes Verfahren im halbautomatischen Betrieb eingesetzt sein. In diesem Falle wird eine automatisch generierte Schaltung erst nach Bestätigung durch einen Bediener umgesetzt. In beiden Fällen kann davon gesprochen werden, dass das Verfahren im *geschlossenen Regelkreis* eingesetzt wird. Wird hingegen ein Schaltwunsch zwar generiert, jedoch nicht zur Anzeige gebracht, wird das Verfahren im *offenen Regelkreis* betrieben.

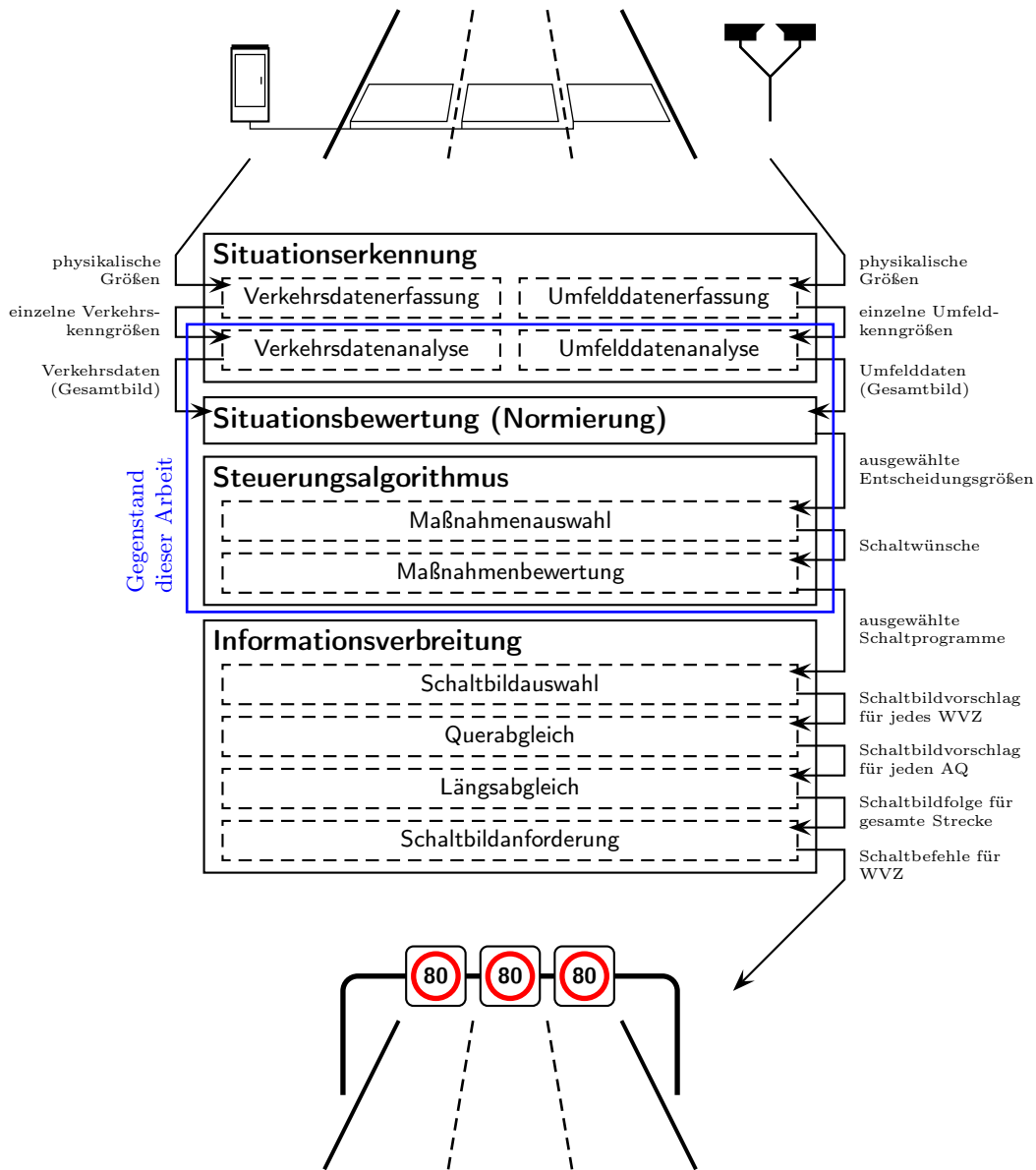


Abbildung 1: Arbeitsschritte bei der Streckenbeeinflussung

Abbildung 1 kann entnommen werden, dass sowohl die Verkehrsdatenerfassung als auch die Informationsverbreitung in dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden. Für diese Schritte sind in einschlägigen Richtlinien⁷ Vorgaben oder Empfehlungen gegeben. Sie werden als Schritte der Vor- bzw. Nachbereitung bei der Streckenbeeinflussung gesehen, also nicht als Teil der Streckenbeeinflussung. Betrachtet wird lediglich die Verfahrenskette der Abbildung gemessener Verkehrskenngrößen auf umzusetzende Maßnahmen.

Darüber hinaus wird in dieser Arbeit der Umstand ausgeblendet, dass die Arbeitsschritte in einem verteilten System mit hierarchischem Aufbau umgesetzt werden, das aus einer Verkehrsrechnerzen-

⁷ vor allem [17] bzw. [19] und [18]

trale sowie mehreren Unterzentralen und Streckenstationen zusammengesetzt ist. Somit wird auch nicht auf Kommunikationsprozesse eingegangen, die aufgrund dieser Systemarchitektur notwendig sind.

2.3 Klassifikation der Verfahren

Verfahren zur Streckenbeeinflussung können gemäß ihrer Zuordnung zu einem der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Arbeitsschritte als *Analyseverfahren* zur Verkehrs- und Umfelddatenanalyse, als *Situationsbewertungsverfahren*, als *Steuerverfahren* zur Maßnahmenauswahl oder als *Maßnahmenbewertungsverfahren* klassifiziert werden.

Sie können außerdem nach folgenden Kriterien charakterisiert werden⁸:

- zeitliche Lage der Situation: Detektions- oder Prognoseverfahren
- Art der Situationsbeschreibung: Kennwertverfahren oder modellgestütztes Verfahren
- Gültigkeitsbereich der Indikatoren bzw. Kenngrößen: lokales oder abschnittsbezogenes Verfahren
- Art des Algorithmus: z. B. Schwellenwertverfahren oder Fuzzy-basiertes Verfahren
- Art der Maßnahme:
 - Verfahren zur Störfallwarnung
 - Verfahren zur Warnung vor Umfeldbedingungen
 - Verfahren für die präventive Steuerung

Mit *Detektionsverfahren* können bereits eingetretene Situationen erkannt werden, die ein Gefahrenpotenzial für Verkehrsteilnehmer aufweisen. Dies können sowohl Verkehrsstörungen als auch Umfeldbedingungen wie Nebel oder Nässe sein. *Prognoseverfahren* dienen hingegen der Vorhersage einer noch nicht eingetretenen Verkehrsstörung zum Zwecke der Einleitung präventiver Maßnahmen.

Bei einem *Kennwertverfahren* wird ein Indikator gebildet, dessen Wert eine bestimmte Zustandsklasse charakterisiert. Der Indikator kann z. B. eine binäre Entscheidung darüber liefern, ob eine bestimmte Situation eingetreten ist oder nicht. Alternativ kann er ein Wahrscheinlichkeitsmaß dafür sein, dass eine bestimmte Situation eingetreten ist oder in naher Zukunft eintritt. *Modellgestützte Verfahren* bedienen sich eines Verkehrsmodells, um weitere Größen zur Beschreibung von Verkehrsprozessen zu gewinnen.

Ein *lokales Verfahren* liefert ausschließlich auf einen MQ bezogene Größen, ein *abschnittsbezogenes Verfahren* auch streckenbezogene Größen.

Die hier vorgestellten Klassifikationsmöglichkeiten werden zur Charakterisierung der in den Abschnitten 3.1 bis 3.5 vorgestellten Verfahren zur Streckenbeeinflussung herangezogen. Den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden Steuerverfahren, jedoch ist auch die Untersuchung der Analyse-, Situationsbewertungs- und Maßnahmenbewertungsverfahren notwendig, da sie in enger Verbindung zu den Steuerverfahren stehen. Sowohl für die Qualitätsbewertung einer SBA-Steuerung als auch für die Simulation ist eine Betrachtung der gesamten Verfahrenskette bei der Abbildung gemessener Verkehrskenngrößen auf anzuzeigende Schaltbilder erforderlich.

⁸ z. T. nach [2]

3 Verfahren zur Streckenbeeinflussung

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Verfahren zur Streckenbeeinflussung vorgestellt. Dies können sowohl derzeit im Regel- oder Probebetrieb eingesetzte als auch nicht mehr genutzte Verfahren sein. Die Auswahl der Verfahren wurde nach folgenden Kriterien getroffen⁹:

- Ist eine Dokumentation der Funktionsweise des Verfahrens in der Literatur zugänglich?
- Wurde oder wird das Verfahren in SBA eingesetzt?
- Wurde das Verfahren in einem Forschungsprojekt untersucht?
- Greift das Verfahren auf fortgeschrittene theoretische Konzepte wie z. B. Fuzzy-Logik zurück?

Auf der Grundlage von Literaturquellen und Expertenbefragungen bei mehreren Autobahnleitstellen in Deutschland werden nachfolgend einzelne Verfahren in ihrer Funktionsweise beschrieben. Dabei wird gegebenenfalls auch auf Probleme und Erfahrungen im praktischen Einsatz eingegangen. Abschließend werden die Erkenntnisse aus den Expertenbefragungen zusammengefasst.

3.1 Verfahren zur Verkehrsdatenanalyse

Zur Vervollständigung und Aufbereitung von Verkehrsdaten werden im Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ, [16]) Verfahren beschrieben, die eine notwendige Grundlage für mehrere Situationsbewertungs- und Steuerverfahren bilden. Darüber hinaus existieren weitere Verfahren, die ergänzend eingesetzt werden können, um das Gesamtbild über die Verkehrslage zeitlich oder räumlich zu erweitern.

Verkehrsdatenanalyse nach MARZ

Das MARZ enthält Vorgaben für die Durchführung folgender Schritte der Verkehrsdatenanalyse:

1. Plausibilitätsprüfung und Ersatzwertbestimmung (vgl. Anhang A.1)
2. Ergänzende Berechnung lokaler Verkehrskenngrößen und Aggregation (vgl. Anhang A.2)
3. Glättung und Trendprognose (vgl. Anhang A.3)

Sämtliche der hierbei verwendeten Verfahren haben lokalen Bezug. Sie sind als modellgestützte Verfahren zu klassifizieren, da sie jeweils auf der Annahme einer funktionalen Beziehung beruhen, welche als Modellgleichung gesehen werden kann. Die Verfahren sind Voraussetzung für den Einsatz der Situationsbewertungs- und Steuerverfahren nach MARZ sowie der Steuerverfahren in INCA. Es wird daher angenommen, dass die Verkehrsdatenanalyse in der hier vorgestellten Form in Deutschland Grundbestandteil einer SBA ist¹⁰. Die Beschreibung erfolgt gemäß dem MARZ¹¹.

Plausibilitätsprüfungen stellen den ersten Schritt der Verkehrsdatenanalyse dar. Hierbei wird geprüft, ob gemessene Verkehrskenngrößen innerhalb parametrierbarer Wertebereiche liegen. Ist dies nicht der Fall, werden sie als implausibel gekennzeichnet.

Für implausible oder z. B. durch Ausfall der Mess- oder Kommunikationstechnik nicht verfügbare Werte kann unter bestimmten Bedingungen ein Ersatzwertverfahren angewendet werden. Ist ein Detektor

⁹ Es müssen nicht gleichzeitig alle Kriterien erfüllt sein. ¹⁰ Diese Annahme wird durch die Expertenbefragungen gestützt. ¹¹ [16], Abschnitte 2.3.1.2.3, 2.3.1.2.4 sowie 2.3.2.1.1 bis 2.3.2.1.3, Seiten 22 bis 27

für einen einzelnen Fahrstreifen gestört, kann der letzte plausible Wert und der Wert am Nachbarfahrstreifen zur Berechnung eines Ersatzwertes herangezogen werden. Ist ein gesamter MQ gestört, können ersatzweise Werte aus einer zugeordneten Nachbarzählstelle verwendet werden. Falls Randbedingungen wie eine maximale Ausfalldauer oder ein maximaler Abstand des benachbarten MQ nicht erfüllt sind, wird kein Ersatzwert gebildet.

Ergänzend zu den gemessenen Verkehrskenngrößen werden anhand teilweise parametrierbarer Berechnungsvorschriften weitere Kenngrößen bestimmt. Hierzu gehören die lokale Verkehrsdichte, die Bemessungsverkehrsstärke und die Standardabweichung der Geschwindigkeit. Aus den fahrstreifenbezogenen Größen werden außerdem jeweils für einen Richtungsquerschnitt aggregierte Größen ermittelt.

Alle gemessenen oder berechneten Verkehrsdaten werden nach Gleichung 1 exponentiell geglättet, um zufällige Schwankungen auszugleichen. Für einige Verkehrskenngrößen werden geglättete Werte zudem nach Gleichungen 2 und 3 additiv mit einem Trend überlagert.

$$W_{gl}(t) = \alpha W_{mess}(t) + (1 - \alpha)W_{gl}(t - 1) \quad (1)$$

$$\Delta W_{gl}(t) = \beta(W_{mess}(t) - W_{gl}(t - 1)) + (1 - \beta)\Delta W_{gl}(t - 1) \quad (2)$$

$$W_P(t) = W_{gl}(t) + \Delta W_{gl}(t) \quad (3)$$

Hierbei sind:

- $W_{gl}(t)$ der geglättete Wert einer beliebigen Größe W zum Zeitschritt t
- $W_{mess}(t)$ der gemessene Wert der Größe W zum Zeitschritt t
- $\Delta W_{gl}(t)$ die prognostizierte Entwicklung der geglätteten Größe W zwischen den Zeitschritten t und $t + 1$
- $W_P(t)$ der Trendprognosewert der Größe W zum Zeitschritt t
- α, β parametrierbare Glättungsfaktoren

In Anhang A.1 bis A.3 sind Ein- und Ausgangsgrößen sowie Parameter der Datenanalyseverfahren nach MARZ aufgeführt. Berechnungsvorschriften können dem MARZ entnommen werden.

Nach Erkenntnissen aus den Expertenbefragungen sind die Parameter der Glättung und Trendprognose (α bzw. β) von großer Bedeutung für die Qualität der Steuerung. Hierbei muss zwischen dem Ziel der Aktualität des gemessenen Verkehrszustands als Grundlage der Steuerung und dem Ziel einer stabilen Steuerung, also einer Steuerung ohne zu häufigen Wechsel des Anzeigezustands, ein Kompromiss gefunden werden.

Auch die Parameter zur Bestimmung der Bemessungsverkehrsstärke wurden als bedeutsam für die Qualität einer SBA-Steuerung bewertet. Die für einen Richtungsquerschnitt aggregierte Bemessungsverkehrsstärke und die auf ihrer Grundlage berechnete lokale Verkehrsdichte sind Eingangsgrößen mehrerer Situationsbewertungs- und Steuerverfahren.

Kalman-Filter-Verfahren

Das Kalman-Filter-Verfahren ist ein abschnittsbezogenes, modellgestütztes Verfahren¹² zur Verkehrsdatenergänzung und zur Störfallerkennung. Auf Basis gemessener lokaler Verkehrskenngrößen werden weitere, auf Teilsegmente des Abschnittes zwischen zwei MQ bezogene Größen geschätzt. Zusätzlich kann für jedes dieser Teilsegmente ein Störfallindikator bestimmt werden. Das Verfahren deckt überwiegend den Arbeitsschritt der Verkehrsdatenanalyse, aber auch den der Situationsbewertung ab.

Das Kalman-Filter-Verfahren war als Komponente der Erweiterten Situationserkennung (ESE, siehe Abschnitt 3.3.1 auf Seite 23) in den SBA der Autobahnen A 9 und A 92 im Großraum München implementiert. Es wurde dort bis 1996 getestet und anschließend im Probetrieb eingesetzt. Das Verfahren wurde außerdem als eigenständiges Verfahren in den SBA der Autobahnen A 3 bei Köln und A 57 bei Krefeld¹³ genutzt. Inzwischen ist das Verfahren in allen genannten SBA nicht mehr in Verwendung. Seit 2002 wird es jedoch in einer modifizierten Form in der Schweiz (Raum Basel) eingesetzt¹⁴.

Die folgende Beschreibung basiert im Wesentlichen auf [8] (Abschnitt 3.3.1.3, Seiten 33ff). Eine detailliertere Beschreibung kann Anhang A.4 entnommen werden. Auf die in [3] beschriebene modifizierte Form des Kalman-Filter-Verfahrens wird hier nicht näher eingegangen, da weitere Informationen zu Art und Umfang der Modifikationen nicht verfügbar waren.

Die Grundlage des Verfahrens bildet ein weg- und zeitdiskretes stochastisches Zustandsmodell unter Verwendung eines erweiterten Kalman-Filters. Der Streckenabschnitt zwischen zwei MQ wird hierbei in Teilsegmente gegliedert, für die jeweils ein Zustand bestimmt wird. Das erweiterte Kalman-Filter hat die Aufgabe, die Zustandsschätzung für die Teilsegmente hinsichtlich der Schätzfehler zu optimieren.

Auf der Grundlage von an zwei aufeinanderfolgenden MQ erhobenen Verkehrsdaten werden für jedes Teilsegment des dazwischen liegenden Streckenabschnittes die Verkehrsdichte, die Verkehrsstärke und die mittlere Fahrgeschwindigkeit geschätzt¹⁵. Neben diesen Verkehrskenngrößen kann auch ein fiktiver Zufluss geschätzt werden, der als Störfallindikator dient. Mit diesem Störfallindikator kann erkannt werden, ob in einem bestimmten Segment die Ursache einer Störung liegt. Die Erkennung einwandernder Staus oder zähflüssigen Verkehrs ist jedoch nicht über diese Größe, sondern nur über die geschätzten Verkehrsdaten möglich.

Die Schätzung der Verkehrskenngrößen und des Störfallindikators für jedes Segment geschieht in einem mehrstufigen Prozess. Dieser besteht aus einer modellgestützten A-Priori-Zustandsschätzung ohne Einbeziehung der Messungen und einer anschließenden A-Posteriori-Schätzung, die sowohl die A-Priori-Schätzung als auch die Messungen nutzt. Das Ergebnis der A-Posteriori-Schätzung ist die nutzbare Ausgangsgröße des Verfahrens.

Es ist nicht zwingend erforderlich, den Störfallindikator einzubeziehen. Im Anwendungsfall auf der A 3 bei Köln wurde hierauf verzichtet. Es kann auch anhand der geschätzten Verkehrskenngrößen der einzelnen Segmente auf eine Störung geschlossen werden.

Ein Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass der Abstand zwischen zwei MQ bei günstigen Bedin-

¹² Klassifizierung z. B. nach [8] ¹³ In der Literatur ist hier fälschlicherweise die Autobahn A 44 angegeben, die Korrektur erfolgte gemäß Angaben vom Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen (vgl. Anhang D.3). ¹⁴ vgl. [3], Abschnitt 4.7.3.1, Seite 33 ¹⁵ Die Art und Weise, in der die Verkehrsstärke auf ein Teilsegment abgebildet wird, ist in Anhang A.4 erläutert.

gungen bis zu 10 km betragen kann, wobei ein Abstand von 3 km empfohlen wird¹⁶. In [8] und [3] wird jedoch darauf hingewiesen, dass das Verfahren empfindlich gegenüber Messungenauigkeiten oder Messwertausfällen ist. Es wurde festgestellt, dass eine schlechte Qualität der Verkehrsdaten sich negativ auf die korrekte Erkennung von Verkehrsstörungen auswirkt¹⁷.

Bei den Expertenbefragungen konnten keine Gründe für die Abschaltung der Verfahren in den Einsatzbereichen in Deutschland in Erfahrung gebracht werden, da der Zeitraum, in dem das Verfahren eingesetzt wurde, zu lange zurückliegt und die Befragten zu jener Zeit noch nicht bei der jeweiligen Autobahnleitstelle beschäftigt waren.

Traffic Forecast

Das Verfahren „Traffic Forecast“ ist ein abschnittsbezogenes Kennwertverfahren¹⁸ zur kurzfristigen Prognose festgelegter Zielgrößen auf der Grundlage lokaler Verkehrskenngrößen mehrerer MQ in Verbindung mit Umfelddaten. Das Verfahren besitzt die Fähigkeit, durch empirische Anpassung Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen zu erlernen.

Traffic Forecast ist im Zusammenhang mit SBA für den Einsatz in Bereichen vor Engpässen im Verkehrsnetz geeignet und wurde auf der Autobahn A 3 bei Köln eingesetzt. Inzwischen ist das Verfahren dort nicht mehr im Einsatz. Weitere Einsatzgebiete für SBA sind nicht bekannt, jedoch wird das Verfahren zur Prognose von Reisezeiten für die Netzbeeinflussung in Hessen eingesetzt. Dieser Einsatzbereich wird hier jedoch nicht näher betrachtet.

Die folgende Beschreibung basiert auf [8] (Abschnitt 3.2.2, Seite 32) und [3] (Abschnitt 4.15, Seiten 47ff). Eine detailliertere Beschreibung befindet sich in Anhang A.5.

Die Abbildung der Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen, welche hier auch als Zielgrößen bezeichnet werden, erfolgt nach Erlernen der Zusammenhänge durch empirische Anpassung. Diese Vorgehensweise ähnelt der des Trainings künstlicher neuronaler Netze, mit welchen ebenfalls komplexe, nichtlineare Zusammenhänge nach Erlernen reproduziert werden können¹⁹. In der Literatur wird jedoch nicht angegeben, dass sich dieses Verfahren des Konzeptes künstlicher neuronaler Netze bedient. Über den Algorithmus sind nur grundsätzliche Eigenschaften bekannt (vgl. Anhang A.5). Als wichtige Zielgröße für die Streckenbeeinflussung gilt die prognostizierte Geschwindigkeit am stromabwärtigen MQ, welche zur Auswahl einer Stufe für die Anzeigeschwindigkeit herangezogen werden kann.

In den in [8] veröffentlichten Untersuchungen wurde ein Mehrwert des Verfahrens gegenüber einer einfachen Fortpflanzung von Geschwindigkeitseinbrüchen gesehen, welche auf der Annahme beruht, dass sich diese mit einer bestimmten Geschwindigkeit stromaufwärts bewegen²⁰. Die Qualität der Prognose wurde zumindest für restriktive Anzeigeschwindigkeiten als gut eingeschätzt. In [3] werden jedoch als Nachteil des Verfahrens u. a. ein hoher Aufwand für die Implementierung und Pflege angegeben.

Warum dieses Verfahren abgeschaltet wurde, konnte im Rahmen der Expertenbefragung beim Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen nicht in Erfahrung gebracht werden, da während des Einsatzzeitraumes der Befragte dort noch nicht beschäftigt war.

¹⁶ nach [2] ¹⁷ vgl. [8], Abschnitt 6.2.2, Seite 63f ¹⁸ Klassifizierung z. B. nach [8] ¹⁹ nach [8] ²⁰ siehe [8], Abschnitt 6.1.2.2, Seiten 58f

3.2 Verfahren zur Umfelddatenanalyse

Umfelddaten werden ebenso wie Verkehrsdaten geglättet, auf bestimmte Zeitintervalle aggregiert und auf Plausibilität geprüft. Eine Trendprognose oder Ersatzwertbestimmung erfolgt bei Vorgehensweise nach MARZ nicht. Genauere Aspekte der Umfelddatenanalyse werden in dieser Arbeit nicht behandelt. Es wird jedoch auf Verfahren zur Situationsbewertung und Steuerung auf der Grundlage von Umfelddaten eingegangen (vgl. Abschnitt 3.3.2 bzw. 3.4.2), da diese Aspekte eine wesentliche Auswirkung auf die Qualität der Streckenbeeinflussung insbesondere im Hinblick auf Fehlalarme und Nichtdetektionen haben können.

3.3 Situationsbewertungsverfahren

Für die Situationsbewertung stehen die im MARZ beschriebenen Verfahren, auf Fuzzy-Logik basierende Verfahren und auf Verkehrsmodellen basierende Verfahren zur Verfügung. Dem Verfahren „Erweiterte Situationserkennung“ (ESE) kommt eine besondere Bedeutung zu, da hier mehrere Datenanalyse- und Situationsbewertungsverfahren miteinander verknüpft werden.

3.3.1 Detektionsverfahren für verkehrsbedingte Situationen

Die hier vorgestellten Detektionsverfahren liefern entweder eine Klassifikation der Verkehrslage oder Störfallindikatoren, die zur unmittelbaren Ableitung eines Schaltwunsches in einem Steuerungsverfahren genutzt werden können.

Verkehrsstufenbestimmung nach MARZ

Die Verkehrsstufenbestimmung nach MARZ kann als lokales Kennwertverfahren zur Situationsbewertung angesehen werden, da der Wert eines Indikators auf der Grundlage ausschließlich lokaler Verkehrskenngrößen bestimmt wird. Die Verkehrsstufenbestimmung ist eine Grundlage der Verfahren zur Stauwarnung sowohl nach MARZ als auch in INCA. Hier ist die Verkehrsstufe jeweils eines von mehreren Kriterien zur Erkennung einer Verkehrsstörung. Die Beschreibung des Verfahrens erfolgt nach dem MARZ²¹. Eine genauere Beschreibung kann Anhang B.1.1 entnommen werden.

Es wird unabhängig voneinander geprüft, ob die folgenden Verkehrsstufen vorliegen:

Z1: freier Verkehr

Z2: dichter Verkehr

Z3: zähfließender Verkehr

Z4: Stau

Diese Prüfung erfolgt auf der Grundlage von Schwellenwerten für die Trendprognose der Kfz-Fahrtgeschwindigkeit und der Verkehrsdichte. Sind beide Bedingungen für eine Stufe erfüllt, wird diese als gegeben angesehen. Diese Prüfung erfolgt zunächst unabhängig für jede Stufe. Die Stufe Z4 wird auch erreicht, wenn nur eines der Kriterien erfüllt ist und zusätzlich im letzten Betrachtungsintervall die Stufe Z3 oder Z4 vorlag. Ansonsten wird gemäß weiterer Bedingungen das Vorliegen der Stufen Z2

²¹ [16], Abschnitt 2.3.2.1.4, Seiten 27f

oder Z3 angenommen. Von den Stufen, die als gültig erkannt wurden, wird schließlich die ausgewählt, die den Zustand mit der geringsten Verkehrsqualität widerspiegelt.

Das Verfahren wurde weder in der Literatur noch bei den Expertenbefragungen als Ursache für Probleme in der Steuerung von SBA genannt.

Fuzzy Control

Das in [2] als „Fuzzy Control“ bezeichnete Verfahren ist ein abschnittsbezogenes Kennwertverfahren zur Klassifikation des Verkehrszustandes in einem Streckenabschnitt zwischen zwei MQ mittels Fuzzy-Logik. Das Verfahren war in der SBA der Bundesstraße 27 im Raum Stuttgart im Einsatz. Es ist jedoch nicht bekannt, ob das Verfahren dort im Regel- oder Probetrieb eingesetzt wurde. Im Rahmen der in [8] vorgestellten Untersuchungen wurde das Verfahren außerdem an die SBA der Autobahn A 9 im Großraum München angepasst und für diese Anlage im offenen Regelkreis überprüft. Weitere Einsatzbereiche für das Verfahren wurden nicht gefunden. Die Tatsache, dass das Verfahren in [3] nicht berücksichtigt wurde, deutet darauf hin, dass es heute nur eine geringe oder keine praktische Bedeutung hat. Die Beschreibung des Verfahrens erfolgt nach [2] (Abschnitt 3.1.3.6, Seite 19) und [8] (Abschnitt 3.3.4, Seite 36f).

Eingangsgrößen des Verfahrens sind Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitswerte zweier aufeinanderfolgender MQ. Aus den Größen für den Einfahrquerschnitt werden unter Berücksichtigung eines der Reisezeit entsprechenden Zeitversatzes entsprechende Größen am Ausfahrquerschnitt geschätzt. Diese Schätzung wird mit Messwerten des Ausfahrquerschnittes verglichen. Liegt die gemessene Verkehrsstärke deutlich unterhalb der Schätzung, wird auf das Vorliegen einer Verkehrsstörung geschlossen. Bei einer ausreichend hohen Lkw-Verkehrsstärke wird der Vergleich der Messung und der Schätzung bevorzugt für Lkw durchgeführt, da hier weniger starke Abweichungen zur durchschnittlichen Reisezeit gegeben sind. Ausgangsgröße des Verfahrens ist eine sechstufige Klassifikation der Verkehrslage.

In [8] werden Berichte erwähnt, nach denen eine Störung mit dem Verfahren „Fuzzy Control“ schneller erkannt werden kann als mit VKdiff. Dies wurde dadurch erklärt, dass die Erkennungszeit nicht von der Fortbewegungsgeschwindigkeit der Staufront, sondern von der Geschwindigkeit der Fahrzeuge im Streckenabschnitt abhängt. Darüber hinaus wurde in [8] (Abschnitt 6.2.3, Seiten 64ff) eine hohe Qualität der Detektion festgestellt, welche anhand der Detektions- und Fehlalarmrate bewertet wurde. Es konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden, warum das Verfahren an Bedeutung verloren hat.

Fuzzyfizierte Verkehrslage

Das Verfahren „Fuzzyfizierte Verkehrslage“ ist ein streckenbezogenes Kennwertverfahren vor allem zur Situationsbewertung, aber auch zur Datenergänzung. Im Gegensatz zur Verkehrsstufenbestimmung nach MARZ wird hier nicht nur MQ, sondern auch Streckenabschnitten jeweils eine Verkehrsstufe zugewiesen. Einsatzfälle für dieses Verfahren konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht gefunden werden. Die Beschreibung des Verfahrens basiert auf [3] (Abschnitt 4.8, Seiten 34ff). Eine Detailbeschreibung befindet sich in Anhang B.1.2.

Es werden drei linguistische Variablen für die Kfz-Fahrgeschwindigkeit $V_{Kfz,lok}$ und vier für die lokale Bemessungsverkehrsdichte $K_{B,lok}$ eingeführt, deren Werte mit trapezförmigen Zugehörigkeitsfunktio-

nen bestimmt werden. Hieraus wird die Kfz-Verkehrsstärke Q_{Kfz} als ebenfalls linguistische Variable bestimmt. Diese drei Größen werden durch Fuzzy-Logik in Zugehörigkeitswerte für jeweils folgende Verkehrsstufen überführt:

- gestaut
- zähfließend
- dicht
- frei

Die Zugehörigkeitswerte beziehen sich zunächst auf einzelne MQ. Sie werden zur Bestimmung entsprechender Zugehörigkeitswerte herangezogen, die sich auf jeweils zwischen zwei MQ liegende Streckenabschnitte beziehen.

Zu praktischen Erfahrungen mit diesem Verfahren oder zu Untersuchungen, die sich auf dieses Verfahren beziehen, wurden keine Informationen gefunden.

VKdiff-Verfahren

Das VKdiff-Verfahren ist ein abschnittsbezogenes Kennwertverfahren zur Detektion von Verkehrsstörungen. Die Ausgangsgröße wird in den Stauwarnverfahren nach MARZ und in INCA sowie im Verfahren Fuzzy-AID als eines von mehreren Entscheidungskriterien verwendet. Das Verfahren ist in mehreren SBA in Deutschland implementiert²², wird jedoch nach Erkenntnissen aus den Expertenbefragungen nicht genutzt. Die Beschreibung des Verfahrens erfolgt gemäß dem MARZ²³. Eine detailliertere Beschreibung befindet sich in Anhang B.1.3.

Aus Trendprognosewerten für die mittlere Kfz-Fahrgeschwindigkeit und die Verkehrsdichte von zwei benachbarten MQ wird ein streckenbezogener Störfallindikator gebildet (siehe Gleichung 15 in Anhang B.1.3), mit dem eine Störung detektiert wird, wenn deutlich mehr Fahrzeuge in den betrachteten Abschnitt einfahren als diesen verlassen. In [1] (Abschnitt 4.2.3, Seite 13) wird das Vorhalten eines lokalen Verfahrens als Rückfallebene für dieses streckenbezogene Verfahren als notwendig erachtet. Bei Verwendung von VKdiff als Komponente der Stauwarnung nach MARZ oder in INCA ist dies berücksichtigt.

Die Tatsache, dass sich das Verfahren in der Praxis nicht bewährt hat, hat folgenden Hintergrund:

- In den Expertenbefragungen und in der Literatur (z. B. [13]) wurde eine zu hohe Empfindlichkeit des Verfahrens genannt. Lediglich in einem Einsatzfall in Sachsen wurde eine zu träge Reaktion des Verfahrens bemängelt (vgl. Anhang D.6). Die Parametrierung des Verfahrens in einer Weise, dass diese Probleme nicht bestehen, gelingt nicht. Die hohe Empfindlichkeit führt zu einer hohen Fehlalarmrate.
- Das Verfahren spricht nach [8] (Abschnitt 3.3.1.1, Seiten 32f) auch auf Fahrzeugpulks an, die nach Auflösung eines Staus den Streckenabschnitt erreichen.
- Ebenfalls in [8] wird das Problem der fehlenden Berücksichtigung der variablen Abstände zwischen den MQ angesprochen. Eine Verbesserung diesbezüglich bietet das nachfolgend beschriebene VKdiffKfz-Verfahren, welches sich jedoch ebenfalls nicht bewährt hat.

²² z. B. in Nordrhein-Westfalen und Nordbayern ²³ [16], Abschnitt 2.3.2.1.5, Seite 29

- Bei der in [8] (Abschnitt 6.2.4, Seiten 66ff) vorgestellten Untersuchung wurde das VKdiff-Verfahren im Vergleich mit anderen Verfahren wie „Fuzzy Control“, „Traffic Forecast“ und dem Kalman-Filter-Verfahren hinsichtlich der Detektionsgüte, welche die Detektions- und die Fehlalarmrate berücksichtigt, schlechter bewertet.

VKdiffKfz-Verfahren

Das VKdiffKfz-Verfahren wurde im Bund-Länder-Arbeitskreis Verkehrsrechnerzentralen (AK VRZ) als Weiterentwicklung des VKdiff-Verfahrens erarbeitet und ist ebenfalls ein abschnittsbezogenes Kennwertverfahren. Eine wesentliche Verbesserung gegenüber VKdiff besteht in der Einbeziehung einer mittleren Reisezeit für die Durchfahrt durch den betrachteten Streckenabschnitt. Es konnten keine Einsatzfälle für dieses Verfahren gefunden werden. Die Beschreibung erfolgt nach [3] (Abschnitt 4.4, Seiten 26ff). Eine Detailbeschreibung befindet sich in Anhang B.1.4.

Die Funktionsweise des Verfahrens entspricht der des VKdiff-Verfahrens. Es wird lediglich eine andere Berechnungsvorschrift für den Störfallindikator verwendet, die den zusätzlichen Parameter der Reisezeit enthält (vgl. Gleichung 16 in Anhang B.1.4). Durch diesen Parameter wird die unterschiedliche Entfernung zwischen zwei Messstellen indirekt einbezogen. Das Fehlen dieses Einflusses war einer der Kritikpunkte für das VKdiff-Verfahren.

Nach Angaben in [3] und Erkenntnissen aus den Expertenbefragungen²⁴ lässt sich das Verfahren ebenso wie das VKdiff-Verfahren nicht in einer Weise parametrieren, dass es mit angemessener Empfindlichkeit auf das Verkehrsgeschehen reagiert. Somit weist das Verfahren eine hohe Fehlalarmrate auf.

Erweiterte Situationserkennung (ESE)

Das Verfahren „Erweiterte Situationserkennung“ (ESE) ist ein abschnittsbezogenes Kennwertverfahren²⁵ u. a. zur Klassifikation des Verkehrszustands. Da es auch Komponenten zur Schätzung von Verkehrskenngrößen und zur Bestimmung von Störfallindikatoren enthält, deckt es neben dem Arbeitsschritt der Situationsbewertung auch den der Datenanalyse ab. Das Verfahren wurde im Rahmen des Projektes „Munich COMFORT“ entwickelt und auf den SBA der Autobahnen A 9 und A 92 im Großraum München im Probetrieb eingesetzt. Inzwischen ist das Verfahren dort nicht mehr im Einsatz. Weitere Einsatzfälle sind nicht bekannt. Die folgende Beschreibung basiert auf [2] (Anhang III.S1, Seiten 65ff) und [22]. Eine Detailbeschreibung einschließlich einer grafischen Darstellung der Informationsflüsse zwischen den Verfahrenskomponenten befindet sich in Anhang B.1.5.

Im Rahmen der ESE werden die Wahrscheinlichkeitsindikatoren für das Vorhandensein folgender Verkehrssituationen in einem mehrstufigen Prozess bestimmt:

- verkehrstechnischer Engpass
- baulicher Engpass
- bereichsweise Verdichtung
- einwandernder Stau
- zugestauter Abschnitt
- stockender Verkehr

²⁴ siehe Befragung Autobahnamt Thüringen, Anhang D.4 ²⁵ Klassifikation nach [8]

Lokal vorverarbeitete, d. h. auf Plausibilität geprüfte, geglättete und z. T. als Trendprognose gegebene Verkehrskenngrößen werden im ersten Schritt der ESE zur Bestimmung weiterer lokaler Verkehrskenngrößen herangezogen. Hierfür werden mehrere Verfahren unterschiedlicher Komplexität parallel eingesetzt. Darauf aufbauend wird mit dem Verfahren „Fuzzy-AID“ (siehe unten) eine Störungswahrscheinlichkeit ermittelt. Daneben werden mit dem Kalman-Filter-Verfahren (siehe Abschnitt 3.1) streckenbezogene Verkehrskenngrößen für Teilsegmente des Abschnittes zwischen zwei MQ sowie ein weiterer Störfallindikator bestimmt. Schließlich erfolgt eine Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen der o. g. Verkehrssituationen mittels eines weiteren, auf Fuzzy-Logik basierenden Verfahrens.

Angaben zu praktischen Erfahrungen wurden in der Literatur nur zu den Komponenten „Fuzzy-AID“ und „Kalman-Filter-Verfahren“ gefunden. Auf diese wird in den entsprechenden Abschnitten eingegangen. Während der Expertenbefragung bei der Autobahndirektion Südbayern konnten keine weiteren Informationen zur ESE gewonnen werden, da der Befragte seine Tätigkeit dort erst nach der Außerbetriebnahme aufgenommen hat. Es wurde jedoch die Vermutung geäußert, dass das Verfahren aufgrund eines vergleichsweise hohen Pflegeaufwandes nicht mehr genutzt wird.

Fuzzy-AID

Das Verfahren „Fuzzy-AID“ kann je nach Wahl der Eingangsgrößen ein lokales oder streckenbezogenes Kennwertverfahren sein. Es dient dazu, verschiedene Verkehrskenngrößen und Indikatoren zu einem einzigen Kennwert zu verknüpfen, welcher eine Aussage über die Störfallwahrscheinlichkeit zulässt. Das Verfahren wurde als Komponente der ESE in den SBA der Autobahnen A 9 und A 92 im Großraum München eingesetzt. Inzwischen wird es dort ebenso wie die ESE nicht mehr genutzt. Weitere Einsatzfälle in Deutschland sind nicht bekannt, jedoch wird Fuzzy-AID in der Schweiz (Raum Basel) sowie in Hongkong und Dubai genutzt²⁶. Die Beschreibung erfolgt nach [3] (Abschnitt 5.3, Seiten 102f) und [8] (Abschnitt 3.3.2.1, Seite 35).

Als Eingangsgrößen können je nach Anwendungsfall verschiedene Verkehrskenngrößen und Indikatoren gewählt werden. Für die Implementierung als Teil der ESE wurden folgende Eingangsgrößen verwendet:

- VK_{diff}
- Indikator aus lokaler Stoßwellendetektion
- Indikator aus Pulkerkennung
- Trendprognose der Verkehrsstärke an zwei benachbarten MQ
- Trendfaktor

Durch die Verwendung der Kenngröße VK_{diff} kann das Verfahren in diesem Anwendungsfall als streckenbezogen klassifiziert werden. In Hongkong und Dubai werden u. a. auch Alarmmeldungen aus der Videodetektion genutzt.

Die Eingangsgrößen werden mittels Fuzzy-Logik in den drei Phasen Pulkerkennung, Störfallvoruntersuchung und Störfallerkennung zu einer Störfallwahrscheinlichkeit verknüpft. Eine genauere Beschreibung des hierfür eingesetzten Algorithmus ist in der Literatur nicht verfügbar.

In [8] wird ein Optimierungspotenzial für das Verfahren durch Verknüpfung mit einem verkehrsmo-

²⁶ vgl. [3], Abschnitt 5.3.3.1, Seiten 102f

dellgestützten oder einem Prognoseverfahren gesehen. Weiterhin wird vorgeschlagen, interne Kennwerte dieses Verfahrens mit denen des Kalman-Filter-Verfahrens in einer Gesamtlogik zu verknüpfen.

Während der Expertenbefragung bei der Autobahndirektion Südbayern konnten keine weiteren Informationen zu diesem Verfahren gewonnen werden, da der Befragte seine Tätigkeit dort erst nach der Außerbetriebnahme aufgenommen hat.

3.3.2 Detektionsverfahren für Umfeldbedingungen

Im MARZ²⁷ ist jeweils ein Verfahren zur vierstufigen Klassifikation des Niederschlags (vgl. Anhang B.2.1), zur sechsstufigen Klassifikation der Sichtweite (vgl. Anhang B.2.2) sowie zur vierstufigen Klassifikation der Helligkeit vorgesehen. Die Niederschlags- und Sichtweitestufen werden zur Ableitung entsprechender Maßnahmen der SBA-Steuerung herangezogen, während die Helligkeitsstufen als Grundlage für die automatische Dimmung der WVZ dienen.

Neben den Verfahren nach MARZ existieren weitere Verfahren, z. B. Fuzzy-Verfahren, zur Klassifikation der Umfeldbedingungen. Diese werden jedoch mangels Erkenntnissen aus der Literatur nicht betrachtet. Darüber hinaus wurden Verfahren zur automatischen Klassifikation der Glättesituation entwickelt und in verschiedenen SBA im Probebetrieb eingesetzt, jedoch waren die Ergebnisse nicht zufrieden stellend, da die Zahl der Nichtdetektionen und die Fehlalarmrate für den praktischen Einsatz jeweils als zu hoch eingeschätzt wurden²⁸. Eine Glättewarnung wird bei Bedarf auf Zuruf der Polizei, der Autobahnmeistereien oder anderer Stellen per Handschaltung ausgelöst. Verfahren zur zuverlässigen Automatisierung der Glättemeldung sind derzeit noch Gegenstand der Forschung²⁹ und werden hier ebenfalls nicht näher betrachtet.

3.3.3 Prognoseverfahren

Die nachfolgend vorgestellten Verfahren liefern Indikatoren, mit denen die Gefahr des Eintretens einer Verkehrsstörung eingeschätzt werden kann. Diese Indikatoren sind Eingangsgrößen für Steuerverfahren, die der Prävention dieser Verkehrsstörungen bzw. der Minderung ihrer Folgen dienen.

Unruhe im Verkehr nach MARZ

Das Verfahren „Unruhe im Verkehr“ ist ein lokales Kennwertverfahren. Es zählt zu den Prognoseverfahren, da bei Vorliegen bestimmter Werte der Eingangsgrößen angenommen wird, dass sich die Verkehrsdichte einem kritischen Wert nähert, welcher eine Grenze für die Stabilität des Verkehrsflusses darstellt. Das Verfahren wird in vielen SBA in Deutschland eingesetzt³⁰ und liefert eine ergänzende Bewertungsgröße für das Steuerverfahren „Harmonisierung der Geschwindigkeit“ nach MARZ. Die Beschreibung erfolgt gemäß dem MARZ³¹. Eine Detailbeschreibung befindet sich in Anhang B.3.1.

²⁷ [16], Abschnitt 2.3.2.2, Seiten 29f ²⁸ nach Untersuchungen in [7] ²⁹ Im Rahmen eines Forschungsprojektes der Technischen Universität München werden in einem Testfeld verschiedene Sensoren u. a. für die Erfassung von Straßenglätte getestet (vgl. [25]) ³⁰ Im Rahmen der Expertenbefragungen wurde nur für eine SBA angegeben, dass das Verfahren „Unruhe im Verkehr“ nicht genutzt werde. Hierbei handelt es sich um eine SBA in Thüringen, bei der ein Verfahren zur Warnung vor langsam fahrenden Fahrzeugen im Einsatz ist (vgl. Anhang D.6). ³¹ [16], Abschnitt 2.3.2.1.5, Seiten 28f

Der Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen und der Gefahr einer Verkehrsstörung erfolgt auf der Grundlage eines dynamischen, stochastischen Verkehrsmodells, auf das an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll. Für das Modell gilt die Aussage, dass bei Annäherung der Verkehrsdichte an einen kritischen Wert der Erwartungswert der Geschwindigkeitsschwankungen zunimmt. Somit wird angenommen, dass bei Überschreiten eines Grenzwertes für die Standardabweichung der Fahrgeschwindigkeiten bei hoher Verkehrsstärke die Gefahr eines Verkehrszusammenbruchs besteht. Ob Unruhe im Verkehr vorliegt, wird also auf der Grundlage von Ein- und Ausschaltgrenzwerten ermittelt. Der binäre Unruheindikator wird im Steuerverfahren „Harmonisierung der Geschwindigkeit“ nach MARZ als eine von mehreren Eingangsgrößen genutzt.

In [9] und [3] wird angegeben, dass ein Schaltwunsch aufgrund von Unruhe im Verkehr nur selten zur Anzeige gebracht wird. Bei einer Untersuchung der SBA auf der Autobahn A 8 zwischen München und Salzburg wurde z. B. festgestellt, dass nur ca. 4 % aller Schaltungen durch „Unruhe im Verkehr“ ausgelöst wurden³².

In einer Untersuchung des Verfahrens für eine SBA im Raum Köln wurde festgestellt, dass das Verfahren insbesondere im Vergleich zu „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ relativ wenige Verkehrsstörungen im Vorhinein erkennt und dass der Anteil der fehlerhaften Störungsprognosen hoch ist³³.

Während der Expertenbefragungen wurde bestätigt, dass das Verfahren „Unruhe im Verkehr“ selten zu einer Schaltung führt, jedoch wurde es übereinstimmend als sinnvolle Ergänzung zu den übrigen Verfahren des MARZ charakterisiert. Eine Schaltung aufgrund von Unruhe im Verkehr wird häufiger im Einfädungsbereich nach Autobahnknotenpunkten umgesetzt³⁴.

Zuverlässigkeit des Verkehrs (Ferrari-Verfahren)

Das Verfahren „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ ist ein lokales Kennwertverfahren³⁵, mit dem eine qualitative Aussage über den Verkehrszustand innerhalb eines festgelegten Prognosehorizontes getroffen werden kann. Untersucht wird die zeitliche Entwicklung mehrerer Verkehrskenngrößen, die auf der Grundlage eines mikroskopischen stochastischen Verkehrsmodells sowie gemessener individueller Verkehrskenngrößen bestimmt werden. Abweichend zu [2] und [3] wird das Verfahren gemeinsam mit Situationsbewertungsverfahren vorgestellt, da die Ausgangsgrößen Störfallindikatoren sind. Es ist jedoch gleichermaßen ein Verfahren zur Verkehrsdatenanalyse, da mehrere Verkehrskenngrößen bestimmt werden. Das Verfahren wurde auf einem Streckenabschnitt der Autobahn A 1 im Großraum Dortmund eingesetzt. Es ist dort noch immer implementiert, jedoch konnte nicht ermittelt werden, ob es derzeit im Regelbetrieb eingesetzt wird.

Die Implementierung des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ in der SBA im Großraum Dortmund, welche durch das Unternehmen Heusch/Boesefeldt realisiert wurde, weicht teilweise von der ursprünglichen, durch Ferrari in [14] und [15] vorgeschlagenen Vorgehensweise ab. Im Folgenden wird die ursprüngliche Vorgehensweise nach Ferrari als *Literaturvariante* und der tatsächlich implementierte Algorithmus als *Variante nach Heusch/Boesefeldt* des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ bezeichnet. Die Literaturvariante wird in Anhang B.3.2 genauer beschrieben, während in Anhang B.3.3 auf die Unterschiede der Variante nach Heusch/Boesefeldt eingegangen wird. Nachfolgend werden überwiegend allgemeine Gesichtspunkte des Verfahrens angesprochen.

Ausgangspunkt dieses Verfahrens ist die Feststellung, dass der Verkehrsablauf durch stochastische Prozesse modelliert werden sollte, da das Verhalten der Verkehrsteilnehmer durch deterministische

³² vgl. [9], Abschnitt 4.3.4, Seiten 36f ³³ vgl. [8], Abschnitt 6.1.1, Seiten 57f ³⁴ vgl. Anhang D.1 ³⁵ Klassifikation z. B. nach [9]

Zusammenhänge nicht vollständig erklärt werden kann. Es wird davon ausgegangen, dass eine Verkehrsstörung eintritt, wenn eine kritische Verkehrsdichte erreicht wird, welche die Stabilitätsgrenze des Verkehrsflusses darstellt. Es konnte gezeigt werden, dass sich die kritische Verkehrsdichte erhöht, wenn die Geschwindigkeitsschwankungen abnehmen, also dass durch eine Harmonisierung der Geschwindigkeit die Stabilität des Verkehrsflusses nahe der Kapazitätsgrenze aufrecht erhalten werden kann³⁶.

Nach Untersuchungen von Ferrari (vgl. [14]) treten Geschwindigkeitseinbrüche, die eine Verkehrsstörung kennzeichnen, zuerst auf dem linken und erst später auf dem bzw. den übrigen Fahrstreifen auf. Aus diesem Grunde empfiehlt Ferrari die Betrachtung des Verkehrsflusses nur für den linken Fahrstreifen. Da im Einsatzfall bei Dortmund jedoch Detektoren auf jedem Fahrstreifen eines MQ vorhanden waren, ist hier eine Betrachtung des Verkehrs auf allen Fahrstreifen vorgesehen.

Auf der Grundlage eines Modells für das Geschwindigkeitsverhalten einzelner Verkehrsteilnehmer (vgl. Anhang B.3.2) wird ein Kennwert gebildet, der eine Aussage über die Zuverlässigkeit des Verkehrs innerhalb eines bestimmten Prognosehorizontes zulässt. Unter der Zuverlässigkeit des Verkehrs wird hierbei die bedingte Wahrscheinlichkeit verstanden, dass innerhalb des Prognosehorizontes eine Verkehrsstörung nicht eintritt unter der Bedingung, dass noch keine Störung eingetreten ist.

Für jedes Fahrzeug, das einen MQ passiert, werden Messwerte erhoben und zur Schätzung der mittleren Verkehrsdichte k , der Verkehrsstärke q sowie eines Wertes σ^2 zur Quantifizierung der Geschwindigkeitsschwankungen herangezogen. Die Bestimmung dieser Werte erfolgt stets für eine feste Menge an Fahrzeugen, also nicht für ein Zeitintervall fester Länge.

Für jede Menge betrachteter Einzelfahrzeuge wird σ^2 in Abhängigkeit von $\ln k$ als Punkt in einem entsprechenden Koordinatensystem abgetragen. Mit diesem Wertepaar sowie einer bestimmten Anzahl an zuvor erhobenen Wertepaaren wird die Steigung m einer Regressionsgeraden bestimmt, die durch einen festgelegten, durch Ferrari empirisch bestimmten Zwangspunkt führt. Auf dieser Grundlage wird schließlich der Zuverlässigkeitskennwert Φ gebildet.

Ein hoher Wert für m deutet auf einen unruhigen Verkehrsfluss mit häufigen Abbrems- und Beschleunigungsvorgängen hin, die teilweise durch Fahrstreifenwechsel verursacht werden. Φ kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 1 bedeutet, dass eine Verkehrsstörung innerhalb eines bestimmten Prognosehorizontes sicher nicht auftritt, während 0 für das sichere Eintreten einer Verkehrsstörung innerhalb des Prognosehorizontes steht. Die Bestimmung von Φ ist nur sinnvoll, wenn noch keine Störung eingetreten ist.

Erreicht Φ einen Wert in einem Bereich zwischen 0,95 und 0,9, kann durch geeignete Maßnahmen das Auftreten einer Störung verhindert werden. Als Maßnahmen kommen nach Ferrari die Zuflussdosierung sowie die Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in Betracht. Es ist zwischen zwei Situationen zu unterscheiden³⁷:

- Φ kritisch, m hoch: Unzuverlässiger Verkehr durch unruhigen Verkehrsfluss
Maßnahme: Geschwindigkeitsbegrenzung zur Verminderung der Geschwindigkeitsunterschiede und Fahrstreifenwechsel mit dem Ziel, dass m sinkt
- Φ kritisch, m niedrig: Unzuverlässiger Verkehr durch hohe Verkehrsstärke (Überlastung)
Maßnahme: Geschwindigkeitsbegrenzung mit dem Ziel, dass m nicht steigt sowie Zuflussdosierung, damit q sinkt

³⁶ nach Untersuchungen von Klijnhout (1984), zitiert in [14] ³⁷ nach [14]

Die Geschwindigkeitsbegrenzung ist also unabhängig von m empfohlen, wenn Φ einen kritischen Wertebereich erreicht. In [15] wird vorgeschlagen, kurz vor Erreichen des kritischen Bereichs ($\Phi \gtrsim 0,95$) eine Anzeigegeschwindigkeit von 100 km/h und innerhalb des Bereichs ($0,90 < \Phi < 0,95$) eine Anzeigegeschwindigkeit von 80 km/h als Schaltwunsch anzugeben. Die hier dargelegten Schaltwünsche sind lediglich Anwendungsempfehlungen; die Maßnahmenauswahl ist nicht Gegenstand dieses Verfahrens. Jedoch muss ein Steuerverfahren auf der Grundlage der Ausgangsgrößen dieses Verfahrens vorgesehen sein, damit eine Umsetzung präventiver Maßnahmen erfolgen kann.

Die Implementierung des Verfahrens in der SBA im Großraum Dortmund verzichtet auf eine Nutzung der Zuflussdosierung als Steuerungsmaßnahme. Zusätzlich zu einer Geschwindigkeitsbegrenzung in den Stufen 100 km/h, 80 km/h und 60 km/h ist jedoch die Verhängung eines Lkw-Überholverbotes vorgesehen.

Im Rahmen der in [8] veröffentlichten Untersuchungen wurde das Verfahren „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ bezüglich der Qualität der Prognose von Verkehrsstörungen besser bewertet als „Unruhe im Verkehr“, jedoch schlechter als „Traffic Forecast“. Insgesamt wurde die Prognosequalität als relativ schlecht eingestuft, wobei jedoch die Wirksamkeit im Hinblick auf die Störungsvermeidung anhand eines Vergleichs zwischen dem Betrieb im offenen mit dem im geschlossenen Regelkreis nachgewiesen werden konnte³⁸.

Im Rahmen der Expertenbefragung beim Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen konnten keine Erkenntnisse zu diesem Verfahren gewonnen werden, da die SBA in der Region Westfalen-Lippe nicht vom Hauptsitz in Gelsenkirchen, sondern durch die Autobahnniederlassung Hamm verwaltet werden. Auf Nachfrage bei der Autobahnniederlassung Hamm (vgl. Anhang D.7) konnten umfassende Informationen zur Implementierung des Verfahrens gewonnen werden, jedoch nicht zu praktischen Erfahrungen mit dem Verfahren.

3.4 Steuerverfahren

In diesem Abschnitt werden Verfahren vorgestellt, mit denen auf der Grundlage der Datenanalyse und Situationsbewertung die Ableitung von Maßnahmen durch Festlegung von Schaltwünschen geschehen kann.

3.4.1 Verfahren zur Störfallwarnung

Die hier vorgestellten Verfahren haben das Ziel, einen Verkehrsteilnehmer rechtzeitig vor einer Verkehrsstörung zu warnen. Um die gefährdende Wirkung einer Verkehrsstörung abzuschwächen, wird neben der Anzeige einer Warnung vor allem die zulässige Höchstgeschwindigkeit in Stufen herabgesetzt. Diese Maßnahme wird als *Stautrichter* bezeichnet. Ein allgemeiner Nachteil der Verfahren zur Störfallwarnung besteht darin, dass sie auf eine Verkehrssituation reagieren, diese jedoch nicht im Vorfeld vermeiden helfen. Daher werden beide nachfolgend beschriebenen Verfahren gemeinsam mit Prognoseverfahren betrieben.

³⁸ vgl. [8], Abschnitt 6.1.3, Seiten 59ff

Stauwarnung nach MARZ

Das Detektionsverfahren „Stauwarnung nach MARZ“ ist ein abschnittsbezogenes Schwellenwertverfahren³⁹ zur abschließenden Situationsbewertung und zur Entscheidung, ob ein Stautrichter als Maßnahme vorzuschlagen ist. Das Verfahren ist Bestandteil nahezu aller SBA in Deutschland. Die Beschreibung erfolgt gemäß dem MARZ⁴⁰. Eine Detailbeschreibung des Verfahrens befindet sich in Anhang C.1.1.

Anhand folgender Kriterien wird geprüft, ob ein Stau vorliegt:

Kriterium 1: Belegung

Kriterium 2: Prognosegeschwindigkeit

Kriterium 3: abschnittsbezogene Störfallerkennung (VKdiff)

Kriterium 4: Verkehrsstufe

Kriterium 1 ist erfüllt, wenn auf mindestens einem Fahrstreifen ein Einschaltgrenzwert für den Belegungsgrad überschritten wird. Es ist nicht mehr erfüllt, wenn ein entsprechender Ausschaltgrenzwert auf allen Fahrstreifen unterschritten wird.

Kriterium 2 ist erfüllt, wenn die geglättete Fahrgeschwindigkeit auf einer Richtungsfahrbahn einen Schwellenwert unterschreitet und als Nebenbedingung die Verkehrsstärke über und die Pkw-Lkw-Geschwindigkeitsdifferenz unter entsprechenden Grenzwerten liegen. Im Falle, dass die Pkw- oder die Lkw-Verkehrsstärke den Wert 0 annimmt, wird die Nebenbedingung der Pkw-Lkw-Geschwindigkeitsdifferenz nicht berücksichtigt. Das Kriterium gilt als nicht mehr erfüllt, wenn die Geschwindigkeit einen Ausschaltgrenzwert überschreitet.

Kriterium 3 ist erfüllt, wenn der Störfallindikator VK_{diff} (vgl. Abschnitt 3.3.1) und die Verkehrsstärke auf einer Richtungsfahrbahn einen entsprechenden Grenzwert überschreiten. Unterschreitet VK_{diff} oder die Verkehrsstärke einen Ausschaltgrenzwert, ist das Kriterium nicht erfüllt.

Kriterium 4 ist erfüllt, wenn bei der Verkehrsstufenbestimmung nach MARZ (vgl. Abschnitt 3.3.1) dem betrachteten MQ die Stufe Z4 (Stau) zugewiesen wurde.

Insgesamt wird eine Störung erkannt und ein Stautrichter als Schaltwunsch angegeben, wenn eines der vier Kriterien erfüllt ist. Kriterium 1, 2 und 4 beziehen sich ausschließlich auf lokale Verkehrskenngrößen. Lediglich Kriterium 3 berücksichtigt einen streckenbezogenen Kennwert.

Nach Erkenntnissen aus der Literaturrecherche und den Expertenbefragungen hat sich das Verfahren „Stauwarnung nach MARZ“ in der Praxis bewährt und wird in den meisten SBA in Deutschland eingesetzt. Hierbei wird jedoch das Kriterium 3 (abschnittsbezogene Störfallerkennung mit VK_{diff}) nicht berücksichtigt, da dieses eine hohe Fehlalarmrate aufweist (vgl. hierzu Abschnitt 3.3.1), welche aufgrund der Oder-Verknüpfung der Staukriterien unmittelbare Auswirkungen auf die ausgewählte Maßnahme hat. Der Verzicht auf Kriterium 3 führt nach [13] zwar zu einer verminderten Anzahl an Fehlalarmen, jedoch verfügt das Verfahren „Stauwarnung nach MARZ“ dadurch über keinen streckenbezogenen Störungsindikator mehr. Störungen können erst detektiert werden, wenn sie im Bereich eines MQ liegen, was eine verzögerte Detektion und somit eine nicht mehr rechtzeitige Warnung der Verkehrsteilnehmer zur Folge haben kann.

In [13] wurde eine etwas niedrigere Detektionsrate und eine etwas höhere Fehlalarmrate als beim

³⁹ Wird der Störfallindikator VK_{diff} nicht einbezogen, hat das Verfahren nur noch lokalen Bezug. ⁴⁰ [16], Abschnitt 2.3.5.1, Seiten 33f

Stauwarnverfahren in INCA festgestellt, jedoch wurden diese Qualitätsbewertungskriterien in den Expertenbefragungen auch für die Stauwarnung nach MARZ als gut eingestuft.

Stauwarnung mit INCA

Die Stauwarnung in INCA ist wie das Verfahren „Stauwarnung nach MARZ“ ein abschnittsbezogenes Schwellenwertverfahren zur abschließenden Situationsbewertung und zur Auswahl einer Maßnahme zur Stauwarnung. Das Verfahren ist Bestandteil der durch das Unternehmen TRANSVER bereitgestellten Software INCA und wird derzeit auf einem Abschnitt der Autobahn A9 im Großraum München im Regelbetrieb verwendet. Darüber hinaus wird es auf weiteren Streckenabschnitten in den Zuständigkeitsbereichen der Autobahndirektionen Nord- und Südbayern im Probetrieb eingesetzt. Die Beschreibung erfolgt nach [13]. Eine Detailbeschreibung des Verfahrens befindet sich in Anhang C.1.2.

Ähnlich wie im Verfahren „Stauwarnung nach MARZ“ werden mehrere Kriterien für das Vorhandensein einer Verkehrsstörung bewertet. Neben den im MARZ vorgegebenen Kriterien (einschließlich VKdiff) werden weitere abschnittsbezogene Kennwerte einbezogen. Um die Gefahr von Fehlalarmen insbesondere durch nicht verlässliche abschnittsbezogene Kennwerte zu begrenzen, werden die Kriterien mittels eines Logit-Modells, welches im Anhang näher beschrieben wird, zu einem Störfallindikator zusammengefasst.

Auf der Grundlage von Einschaltgrenzwerten für den Störfallindikator wird bei Bedarf eines von vier Stauwarnprogrammen als Schaltwunsch ausgegeben. Ausschaltgrenzwerte wurden durch Verfallszeiten ersetzt. Wird eine Warnstufe, die mit einem Stauwarnprogramm verbunden ist, nach einer bestimmten Zeit nicht wiederholt, wird in eine weniger restriktive Stufe gewechselt. Die Parameter des Verfahrens werden mit Hilfe der ebenfalls durch TRANSVER angebotenen Software TRANSAID optimiert (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Nach Untersuchungen, deren Ergebnisse in [13] veröffentlicht wurden, hat die Stauwarnung nach INCA eine etwas höhere Detektionsrate und eine etwas niedrigere Fehlalarmrate als das Stauwarnverfahren nach MARZ. Zudem bezieht es auch abschnittsbezogene Kennwerte ein. Der Einsatz dieses Verfahrens anstelle des Verfahrens nach MARZ ist für einige SBA in Bayern geplant und wird außerdem langfristig seitens des Autobahnamtes Thüringen in Erwägung gezogen.

3.4.2 Verfahren zur Warnung vor Umfeldbedingungen

Maßnahmen zur Warnung vor gefährlichen Umfeldbedingungen bestehen vor allem in einer Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und einer Warnung der Verkehrsteilnehmer. Unter besonderen Umständen können auch Lkw-Überholverbote umgesetzt werden.

Es sind drei grundsätzliche Möglichkeiten bekannt, Umfelddaten in SBA zu berücksichtigen⁴¹:

- Senkung der Verkehrsstärke-Schwellenwerte für die Harmonisierung der Geschwindigkeit
- Schaltung auf der Grundlage der stufigen Klassifikation der Umfeldbedingung
- Handschaltung

⁴¹ nach [7], Abschnitt 2.1.2.4, Seite 14

Im MARZ ist die Verwendung der stufigen Klassifikation vorgesehen. Jeder Stufe ist hierbei ein Schaltwunsch zugeordnet. Dieser umfasst eine parametrierbare Anzeigegeschwindigkeit und eine Warnung.

Bei der Nässewarnung kann die Anzeigegeschwindigkeit zusätzlich von der Trendprognose der Pkw-Fahrgeschwindigkeiten abhängig gemacht werden. In Abhängigkeit von den Trendprognosewerten der Bemessungs- und Lkw-Verkehrsstärke kann ein Lkw-Überholverbot wegen Nässe verhängt werden. Die Glättewarnung wird ausschließlich durch Handschaltung ausgelöst (vgl. Abschnitt 3.3.2).

Der Sicherheitsnutzen durch die Warnung vor Niederschlag oder Nebel war in einigen Fällen ausschlaggebend für die Errichtung einer SBA. So wurden z. B. die SBA auf den Autobahnen A 4 zwischen Köln und Aachen sowie der A 45 im Sauerland zunächst als Nebelwarnanlagen ohne verkehrsabhängige Steuerung eingerichtet. Auch in Anlagen mit verkehrsabhängiger Steuerung kann dieser Sicherheitsnutzen bedeutsam sein. Heute sind nach Erkenntnissen aus der Literaturrecherche und den Expertenbefragungen in vielen SBA in Deutschland Verfahren zur Niederschlags- und Nebelwarnung im Einsatz. Im Einzugsgebiet der Autobahndirektion Nordbayern wurden diese Verfahren jedoch aufgrund mangelhafter Umfelddatenerfassung in einigen SBA deaktiviert. Auch bei der Befragung des Landesbetriebes Straßenbau Nordrhein-Westfalen wurden Mängel bei der Steuerung in Abhängigkeit von Umfelddaten angegeben, die durch teilweise große Messstellenabstände erklärt wurden.

3.4.3 Verfahren für die präventive Steuerung

Das Ziel einer präventiven Steuerung ist die Umsetzung einer Maßnahme, bevor eine Verkehrsstörung eintritt. Hierdurch soll diese, soweit möglich, vermieden werden, indem die Leistungsfähigkeit eines Straßenabschnittes auch bei hohem Verkehrsaufkommen erhalten wird. Kann eine Störung nicht vermieden werden, so sollen zumindest die Auswirkungen und Ausdehnung der Störung begrenzt werden. Ein allgemeines Problem präventiver Steuerungen besteht in der Tatsache, dass insbesondere bei Erfolg der Maßnahmen der Grund der Schaltung für den Verkehrsteilnehmer nicht erkennbar wird⁴². Dies kann zu einer Abnahme der Akzeptanz sowohl des Harmonisierungsprogrammes als auch der SBA allgemein führen. Um dies zu vermeiden, wird meist auf restriktive Maßnahmen, vor allem auf Geschwindigkeitsbeschränkungen von unter 100 km/h, verzichtet.

Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ

Das Verfahren „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“ ist ein lokales Schwellenwertverfahren. Es kann zu den Prognoseverfahren gezählt werden, da die Annahme zugrunde gelegt wird, dass eine steigende Verkehrsstärke mit einer wachsenden Wahrscheinlichkeit zu instabilen oder metastabilen Verkehrszuständen führen kann⁴³. Nach Erkenntnissen aus der Literatur und den Expertenbefragungen ist das Verfahren Bestandteil nahezu aller SBA in Deutschland. Die Beschreibung erfolgt gemäß dem MARZ⁴⁴. Eine Detailbeschreibung befindet sich in Anhang C.2.1.

⁴² vgl. Untersuchungen nach [9] ⁴³ nach [9], Abschnitt 2.2.2.3, Seiten 20f ⁴⁴ [16], Abschnitt 2.3.5.1, Seite 33

Auf der Grundlage von Schwellenwerten für die Trendprognose der Bemessungsverkehrsstärke, der Pkw-Fahrgeschwindigkeit und der lokalen Verkehrsdichte wird einer von folgenden Anzeigegeschwindigkeiten als Schaltwunsch ausgewählt:

- keine Beschränkung
- 120 km/h
- 100 km/h
- 80 km/h
- 60 km/h

Eine restriktivere Geschwindigkeitsstufe wird erreicht, wenn ein entsprechender Schwellenwert für die Bemessungsverkehrsstärke überschritten wurde oder Schwellenwerte für die Pkw-Geschwindigkeit und die Verkehrsdichte unter- bzw. überschritten wurden. Erreichen alle Eingangsgrößen entsprechende Ausschaltgrenzwerte, wird eine weniger restriktive Geschwindigkeitsstufe erreicht. Sind einem AQ mehrere MQ zugeordnet, so gilt die jeweils restriktivste Geschwindigkeitsstufe.

Die Eingangsgrößen können durch den binären Unruheindikator des Verfahrens „Unruhe im Verkehr“ (vgl. Abschnitt 3.3.3) ergänzt werden, der ein weiteres Kriterium für die Aktivierung der Geschwindigkeitsstufe 120 km/h liefert.

Das Verfahren hat sich in der Praxis bewährt. Die durch dieses Verfahren erzeugten Schaltwünsche werden, besonders wenn es sich um verhältnismäßig milde Geschwindigkeitsbegrenzungen von 100 oder 120 km/h handelt, häufig umgesetzt. Inzwischen wird jedoch die niedrigste Geschwindigkeitsstufe (60 km/h) i. d. R. nicht mehr genutzt, da in dieser Stufe höhere Geschwindigkeitsschwankungen aufgrund mangelnder Akzeptanz durch einzelne Verkehrsteilnehmer auftreten können, welche dem Ziel der Geschwindigkeitsharmonisierung entgegenwirken. Außerdem wird in einigen Anlagen in Bayern als höchste Geschwindigkeitsstufe 130 km/h gesetzt, da die ursprüngliche Anzeigegeschwindigkeit von 120 km/h als zu restriktiv gesehen wurde.

Im Rahmen einer Wirksamkeitsuntersuchung für die Geschwindigkeitsharmonisierung nach MARZ⁴⁵ wird das Problem angesprochen, dass das Verfahren mitunter lediglich auf das Verkehrsgeschehen reagiert, aber keine präventiven Schaltungen herbeiführt. Im Rahmen der Expertenbefragungen wurde jedoch deutlich, dass dieses Verhalten durch die Wahl der Schwellenwerte beeinflusst werden kann.

Lkw-Überholverbot zur Harmonisierung nach MARZ

Das Verfahren „Lkw-Überholverbot zur Harmonisierung nach MARZ“ ist ein lokales Schwellenwertverfahren zur Ergänzung des Verfahrens „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“. Das Verfahren ist Bestandteil der meisten SBA in Deutschland. Die Beschreibung erfolgt gemäß dem MARZ⁴⁶. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens befindet sich in Anhang C.2.2.

Auf der Grundlage von Schwellenwerten für den Lkw-Anteil und die Verkehrsstärke auf einer Richtungsfahrbahn wird darüber entschieden, ob ein Überholverbot für Lkw über 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht zu verhängen ist. Wurden die Schwellenwerte für beide Eingangsgrößen überschritten, wird das Lkw-Überholverbot als Schaltwunsch angegeben. Wird für mindestens eine der Eingangsgrößen der entsprechende Ausschaltgrenzwert unterschritten, wird der Schaltwunsch zurückgenommen.

⁴⁵ aus [9], Abschnitt 6.2.3, Seiten 49f ⁴⁶ [16], Abschnitt 2.3.5.1, Seite 37

Harmonisierung der Geschwindigkeit mit INCA

Das Verfahren „Harmonisierung der Geschwindigkeit mit INCA“ ist ebenso wie das entsprechende Verfahren nach MARZ ein lokales Schwellenwertverfahren, das zu den Prognoseverfahren gezählt werden kann. Das Verfahren ist Teil der Software INCA und wird derzeit auf einem Abschnitt der Autobahn A 9 im Großraum München im Regelbetrieb genutzt. Desweiteren wird es in einigen SBA in den Zuständigkeitsbereichen der Autobahndirektionen Nord- und Südbayern im Probetrieb eingesetzt. Die Beschreibung erfolgt nach [13]. Eine genauere Beschreibung kann Anhang C.2.3 entnommen werden.

Das Verfahren entspricht weitgehend dem Verfahren zur Geschwindigkeitsharmonisierung nach MARZ. Es wurden jedoch folgende Änderungen vorgenommen:

- Verzicht auf Harmonisierungsprogramm mit 60 km/h
- Verzicht auf Ausschaltgrenzwerte, Rückkehr in weniger restriktive Stufe nach Verfallszeit
- auch zwischen Stufen 100 km/h und 80 km/h Einschaltgrenzwerte für die Geschwindigkeit und die Dichte (nach MARZ nur für die Verkehrsstärke)
- Optimierung der Einschaltgrenzwerte mit der Software TRANSAID (vgl. Abschnitt 4.3.2)

Nach [13] hat die Software INCA im Vergleich mit den entsprechenden Verfahren nach MARZ Vorteile bezüglich der Effizienz und Zuverlässigkeit nicht nur in der Stauwarnung, sondern auch in der Harmonisierung der Geschwindigkeit. Jedoch sind derzeit Verfahren zur Warnung vor Umfeldbedingungen und zur Verhängung von Lkw-Überholverböten noch nicht Bestandteil der Software. Seitens der Autobahndirektion Südbayern wurde angegeben, dass die Qualität der Harmonisierung nach MARZ ebenfalls als gut zu bewerten sei.

3.5 Maßnahmenbewertungsverfahren

Im Rahmen der Maßnahmenbewertung wird eine Entscheidung darüber getroffen, welche der von unterschiedlichen Verfahren angeforderten Schaltwünsche umgesetzt werden. Dabei werden verträgliche Anzeigehalte zusammengefasst und zwischen unverträglichen Inhalten wird eine Auswahl getroffen.

Im MARZ ist festgelegt, dass die Priorisierung auf der Ebene einzelner WVZ gemäß den Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen [18] zu erfolgen hat. Die Prioritäten zwischen einzelnen Zeichen können hierbei parametrisiert werden. Es wird i. d. R. einem restriktiveren Schaltwunsch eine höhere Priorität eingeräumt.

In der Software INCA werden der Schaltwunsch der Stauwarnung gegenüber dem der Harmonisierung priorisiert. Der resultierende Schaltwunsch wird an die Unterzentrale weitergeleitet, so dass dieser einer Bewertung gegenüber Schaltwünschen anderer Verfahren in der oben beschriebenen Weise unterzogen werden kann⁴⁷.

⁴⁷ nach [13]

3.6 Ergebnisse der Expertenbefragung

Eine wichtige Grundlage für diese Arbeit stellen neben einer Literaturrecherche die Expertenbefragungen bei mehreren Autobahnleitstellen in Deutschland dar. Ziel dieser Befragungen war es, aktuelle Informationen bezüglich der Einsatzbereiche von Verfahren zur Streckenbeeinflussung sowie bezüglich praktischer Erfahrungen mit solchen Verfahren zu gewinnen. Ferner sollte ermittelt werden, welche Rolle das Qualitätsmanagement bei der Streckenbeeinflussung spielt und welche Maßnahmen derzeit umgesetzt werden. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den Befragungen zusammengefasst. Ausführlichere Befragungsprotokolle können Anhang D entnommen werden. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Befragungen.

Tabelle 1: Übersicht zu den Expertenbefragungen

Leitstelle	Datum	Art der Befragung	Protokoll
Autobahndirektion Südbayern	08.06.09	telefonisch	Anhang D.1
Autobahndirektion Südbayern (Nachfrage)	10.06.09	per E-Mail	Anhang D.2
Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen (Straßen.NRW)	10.07.09	persönliches Gespräch	Anhang D.3
Autobahnamt Thüringen	15.07.09	telefonisch	Anhang D.4
Autobahndirektion Nordbayern	27.07.09	persönliches Gespräch	Anhang D.5
Autobahnamt Sachsen (Kurzanfrage)	k. A.	telefonisch	Anhang D.6
Autobahniederlassung Hamm (Straßen.NRW, Nachfrage)	k. A.	telefonisch	Anhang D.7

Als Verfahren zur Streckenbeeinflussung werden derzeit vor allem die Verfahren nach MARZ eingesetzt, wobei jedoch auf die Einbeziehung des abschnittsbezogenen Kennwertverfahrens VKdiff verzichtet wird. Die Qualität der Steuerung für diese Schwellenwertverfahren mit relativ geringer Komplexität wird als gut eingeschätzt, wobei jedoch die Parametrierung ebenso ein Verbesserungspotenzial bietet wie das Fehlen eines streckenbezogenen Störfallindikators. Die meisten der wesentlich komplexeren Datenanalyse- und Situationsbewertungsverfahren, die in den 1990er Jahren entwickelt und zumindest im Probetrieb eingesetzt wurden, haben sich nicht bewährt. Vor allem in Bayern werden jedoch die Steuer- und Optimierungsverfahren der Softwareprodukte INCA und TRANSAID⁴⁸ als Alternative bzw. Ergänzung zu den Verfahren nach MARZ gesehen, da sie deren Verbesserungspotenziale erschließen.

Es wurde mehrfach die Ansicht geäußert, dass geringfügige Modifikationen der etablierten Steuerungsverfahren eine höhere Wirksamkeit erwarten lassen als die Nutzung komplexer Verfahren, welche eines hohen Aufwands für die Implementierung und Pflege bedürfen und unter Umständen eine Schulung des

⁴⁸ Diese Softwareprodukte werden durch das Unternehmen TRANSVER angeboten.

Leitstellenpersonals erforderlich machen. Demgegenüber steht ein möglicherweise nur geringer Nutzenzuwachs, da die etablierten Verfahren bereits als gut eingestuft werden. Als Beispiele für geringfügige, aber möglicherweise wirksame Modifikationen wurde die Verwendung eines 15-Sekunden- anstelle eines Ein-Minuten-Intervalles zur Aktualisierung der Anzeigezustände sowie eine Verwendung von geglätteten anstelle von Trendprognosewerten genannt.

Die Parametrierung der Verfahren nach MARZ erfolgt meist ohne Optimierung oder Wirkungsabschätzung, wobei jedoch insbesondere bei älteren Anlagen als gut anerkannte Erfahrungswerte vorliegen. Die Parameter werden in unregelmäßigen Abständen und oft nur bei Vorliegen von Beschwerden oder ähnlichen Meldungen überprüft und angepasst. In Bayern wird jedoch inzwischen insbesondere bei neuen Anlagen die Software TRANSAID zur Optimierung der Parameter nach Kosten- und Nutzenkomponenten eingesetzt. Dabei werden nicht nur die Parameter der Verfahren in INCA, sondern auch die der Verfahren nach MARZ optimiert.

Das Qualitätsmanagement für die SBA-Steuerung wird als wichtig und wünschenswert erachtet. Der Zeit-, Kosten- und Personalaufwand, der hierfür zur Verfügung steht, ist jedoch gering. Dieser Umstand wird dadurch verstärkt, dass mitunter Großprojekte wie die Einführung einer neuen Verkehrsrechnerzentrale oder die Einrichtung von Netzbeeinflussungs- und Zuflussdosierungsanlagen von den Autobahnleitstellen betreut werden. Entgegen dieser Umstände wird derzeit durch die Autobahndirektion Nordbayern angestrebt, ein Qualitätsmanagementsystem aufzubauen, welches nicht nur technische, sondern auch organisatorische Aspekte der Streckenbeeinflussung wie z. B. das Störungsmanagement oder die Weiterleitung von Aufgaben an zuständige und geeignete Mitarbeiter umfasst.

4 Werkzeuge der Qualitätsbewertung

In diesem Abschnitt wird dargelegt, in welcher Weise derzeit Qualitätsbewertungen für SBA durchgeführt werden und welche Ansätze in der Literatur dokumentiert sind. Dabei wird auch darauf eingegangen, welche Größen zur Durchführung der Bewertungen zu erheben sind. Außerdem erfolgt eine erste Abschätzung, inwiefern die vorgestellten Methoden sich für die Einbindung in ein automatisches Qualitätsbewertungssystem eignen.

Nach Erkenntnissen aus den Expertenbefragungen wird ein Qualitätsmanagement für SBA als wünschenswert erachtet, jedoch sind bislang kaum Ansätze für eine umfassende, regelmäßige Qualitätsbewertung bekannt. Untersuchungen zur Qualität einer SBA-Steuerung wurden vor allem im Rahmen von Forschungsprojekten mit oft mehrjährigen Untersuchungszeiträumen durchgeführt. Diese Projekte haben erheblich zur Gewinnung von Erkenntnissen über Nutzen- und Verbesserungspotenziale von SBA und einzelnen Verfahren zur Streckenbeeinflussung beigetragen. Außerdem wurden hierbei oft Qualitätsbewertungsverfahren neu entwickelt. Jedoch erlauben die derart langen Untersuchungszeiträume keine rechtzeitige Maßnahmenumsetzung im Sinne eines präventiven Qualitätsmanagements.

Mit der Software TRANSAID steht heute ein Werkzeug zur Qualitätsbewertung zur Verfügung, welches in der Praxis bereits erfolgreich eingesetzt wird. Ein Teil dieser Software ist ein Verfahren, in dem mit Hilfe einer Zielfunktion auf der Grundlage von Kosten- und Nutzenkomponenten eine Parameteroptimierung vorgenommen werden kann. Dieses Verfahren wird nachfolgend als *Zielfunktionsverfahren* bezeichnet.

Zunächst wird die Bedeutung der Begriffe Qualität, Qualitätsmanagement und Qualitätsbewertung im Zusammenhang mit der Streckenbeeinflussung hergeleitet. Anschließend werden als wichtig erachtete Qualitätsanforderungen für die Streckenbeeinflussung genannt und die jeweils für diese Anforderungen in der Literatur dokumentierten Möglichkeiten zur Qualitätsbewertung vorgestellt.

4.1 Begriffe

Unter *Qualität* ist das Ausmaß an Übereinstimmung von explizit formulierten *Qualitätsanforderungen* und nicht formulierten *Erwartungen* an ein Produkt, einen Prozess oder eine Dienstleistung zu verstehen⁴⁹. In einer objektiven und reproduzierbaren Bewertung der Qualität können nur explizit formulierte Qualitätsanforderungen berücksichtigt werden. Es ist daher notwendig, diese festzulegen.

Der Begriff *Qualitätsmanagement* bezeichnet die Gesamtheit aller auf Qualität bezogenen Aktivitäten und Zielsetzungen⁵⁰. Die *Qualitätssicherung* als Teil des Qualitätsmanagements umfasst sämtliche geplanten und systematisch durchzuführenden Maßnahmen, die nötig sind, um ein ausreichendes Maß an Vertrauen dafür zu schaffen, dass der Gegenstand der Qualitätsbetrachtungen festgelegte Qualitätsanforderungen erfüllen wird. Im hier betrachteten Fall ist der Gegenstand der Qualitätsbetrachtungen der Prozess der Streckenbeeinflussung einschließlich der Arbeitsschritte der Verkehrs- und Umfelddatenanalyse, der Situationsbewertung, der Maßnahmenauswahl und der Maßnahmenbewertung. Die

⁴⁹ gemäß DIN 55350/ ISO 8402, zitiert in [20] (Abschnitt A 1, Seite 1). Dort werden Qualitätsanforderungen und Erwartungen als festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse bezeichnet. ⁵⁰ Diese und andere in diesem Abschnitt vorgestellte Begriffsdefinitionen entsprechen denen in [20], Abschnitte A 2.1 bis A 2.4, Seiten 1-10.

Datenerfassung und die Informationsverbreitung werden, wie schon im vorangegangenen Abschnitt, nicht behandelt.

Ein wichtiges Ziel des Qualitätsmanagements sollte in der Prävention und Folgenminderung von Fehlern bestehen. Dies ist gerade auch für SBA bedeutsam, da sie sicherheitskritische Funktionalitäten aufweisen. Hierfür ist eine möglichst schnelle Erkennung von Qualitätsmängeln notwendig, was eine regelmäßige und systematische *Qualitätsbewertung* erfordert. Unter Qualitätsbewertung wird in diesem Zusammenhang die Messung und Interpretation bestimmter Größen verstanden, mit denen Qualitätsmängel erkannt werden können.

Zur Umsetzung eines objektiven, regelmäßig und reproduzierbar arbeitenden und mit vertretbarem Personal- und Kostenaufwand realisierbaren Qualitätssicherungssystems wird vorgeschlagen, für die Qualitätsbewertung vor allem automatisch erfassbare und verarbeitbare Größen heranzuziehen.

4.2 Prozesse der Streckenbeeinflussung

Eine wichtige Voraussetzung für die ursachengerechte Erfassung und zielgerichtete Maßnahmenableitung zur Qualitätsverbesserung ist die Unterteilung der Abläufe eines zu untersuchenden Gesamtprozesses in kleinere Teilprozesse, welche jeweils durch eine definierte *Prozesseingabe, -aktivität und -ausgabe* gekennzeichnet sind⁵¹. Im Falle der Streckenbeeinflussung wird es als sinnvoll erachtet, bei dieser Prozesseinteilung technische und organisatorische Arbeitsabläufe getrennt voneinander zu untersuchen.

Die Arbeitsabläufe der Streckenbeeinflussung aus technischer Sicht lassen sich in die in Abschnitt 2.2 definierten Arbeitsschritte der Streckenbeeinflussung gliedern. Abbildung 1 auf Seite 14 zeigt die Abgrenzung dieser Teilprozesse sowie die Eingabe, Aktivität und Ausgabe jeden Prozesses.

Aus organisatorischer Sicht lassen sich darüber hinaus z. B. folgende Teilprozesse abgrenzen:

- Operative Prozesse:
 - Störungsmanagement
 - Ereignismanagement
 - Beschwerdemanagement
 - Parameterüberwachung
 - Wartung und Instandhaltung
 - Anlagenüberwachung
 - Bauüberwachung und Anlagenabnahme
 - operatives Qualitätsmanagement
- Strategische Prozesse:
 - Strategische Ausrichtung der Leitstelle
 - Bauplanung
 - Wartungs- und Instandhaltungsplanung
 - strategisches Qualitätsmanagement

⁵¹ nach [21], Seiten 41ff

Diese Teilprozesse lassen sich wiederum in untergeordnete Teilprozesse untergliedern. Dies wird jedoch unterlassen, da die in diesem Abschnitt vorgestellten Qualitätsbewertungsverfahren sich auf die technischen Aspekte der Streckenbeeinflussung beziehen.

4.3 Anforderungen an die Streckenbeeinflussung

Obwohl sich Qualitätszielsetzungen für einzelne SBA unterscheiden können, sind die Verkehrssicherheit und die Leistungsfähigkeit stets von Bedeutung. Darüber hinaus bestehen Anforderungen bezüglich weiterer Aspekte, die diese Kernziele indirekt bedingen. Dies sind vor allem die Datenqualität und die Akzeptanz einer Anlage. Zwischen diesen Anforderungen bestehen Zielkonflikte, so dass bei der Optimierung einer SBA-Steuerung z. B. ein Kompromiss zwischen Sicherheit und Leistungsfähigkeit oder zwischen Sicherheit und Akzeptanz eingegangen werden muss. Ebenfalls von großer Bedeutung ist das Qualitätsziel der Kosteneffizienz, welches jedoch in den nachfolgenden Betrachtungen nicht explizit erwähnt wird. Es wird angenommen, dass eine Erfüllung von Qualitätszielen stets unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses angestrebt wird.

In diesem Abschnitt werden als wichtig erachtete Qualitätsanforderungen für die Aspekte der Verkehrssicherheit, der Leistungsfähigkeit, der Datenqualität und der Akzeptanz formuliert. Für jede Anforderung wird dargelegt, welche Methoden zur Qualitätsbewertung bekannt sind und wie ihre Ergebnisse angewendet werden können. Darüber hinaus wird eine erste Einschätzung vorgenommen, ob eine automatische, regelmäßige Überprüfung der Qualitätsanforderungen erfolgen kann.

4.3.1 Sicherheitsanforderungen

Anforderungen bezüglich der Sicherheit können vor allem bezüglich folgender Punkte gestellt werden:

- Unfallhäufigkeit und -schwere
- allgemeine Unfallgefahr
- Verkehrssicherheitsnutzen bei Stauwarnung (Zielfunktionsverfahren)
- rechtzeitige Erkennung bei Detektionsverfahren
- rechtzeitige Vorhersage bei Prognoseverfahren
- sichere Anzeigegeschwindigkeit
- Harmonisierungswirkung (Sicherheit)
- Verkehrssicherheitsnutzen bei Harmonisierung (Zielfunktionsverfahren)
- Ausfallsicherheit
- sicheres Ausfallverhalten

Daneben kann eine mangelhafte Akzeptanz eine sicherheitskritische Wirkung haben. Zum einen kann die Warnwirkung einer Schaltung in diesem Falle abgeschwächt sein. Zum anderen können hierdurch die Fahrgeschwindigkeiten einzelner Verkehrsteilnehmer, aber auch die kollektive Durchschnittsgeschwindigkeit gefährlich hoch sein. Die Akzeptanz wird jedoch getrennt von der Sicherheit untersucht, da sie sich auch auf die Leistungsfähigkeit auswirken kann.

Weitere Sicherheitsaspekte wie z. B. die Verhinderung unverträglicher Schaltzustände sind Bestandteil der Informationsverbreitung und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt. Dies soll jedoch nicht implizieren, dass diese Aspekte im Qualitätsmanagement nicht berücksichtigt werden müssen.

Unfallhäufigkeit und -schwere

Anforderung: *Treten Verkehrsunfälle im Wirkungsbereich einer SBA auf, sollten diese nicht auf die Arbeitsweise der SBA-Steuerung zurückzuführen sein. Auch die Unfallschwere darf nicht negativ durch die Arbeitsweise einer SBA-Steuerung beeinflusst werden.*

Unfälle können sowohl im Einzelfall analysiert als auch makroskopisch für einen größeren Zeitraum, z. B. für einige Jahre, betrachtet werden. Letzteres ist insbesondere für eine langfristige Kosten-Nutzen-Bewertung erforderlich. Der lange Betrachtungszeitraum ist notwendig, da Unfälle seltene Ereignisse sind und sonst eine nicht ausreichend hohe Zahl an Ereignissen für eine statistisch gesicherte Analyse vorliegen. Die Auflösung nach zeitlich begrenzt auftretenden Situationen oder Randbedingungen (z. B. bestimmten, selten auftretenden Schaltzuständen) ist schwierig. Des Weiteren besteht das Problem, dass bei zeitlich weit auseinander liegenden Ereignissen mehrere Randbedingungen abweichen können (z. B. Verkehrsaufkommen, Ausbau- und Fahrbahnzustand, Umfeldbedingungen, Menge der implementierten Steuerverfahren). Aus diesen Gründen erscheint eine Automatisierung der Unfallauswertung unzweckmäßig. Eine Unfallanalyse sollte sowohl im Einzelfall als auch bei makroskopischer Betrachtung manuell erfolgen. Hierbei könnten die Unfallprotokolle der Polizei, die zum Unfallzeitpunkt gemessenen Verkehrs- und Umfeldbedingungen und Schaltzustände der WVZ sowie ggf. vorhandene Videosequenzen von Verkehrskameras herangezogen werden. Es sollte angestrebt werden, den Unfallzeitpunkt möglichst genau zu bestimmen, um Messgrößen und Anzeigezustände dem Unfallereignis korrekt zuzuordnen zu können.

Die Unfallrate als Anzahl der Unfälle bezogen auf eine bestimmte Fahrleistung und Untersuchungszeit wird zur Bewertung der Unfallhäufigkeit herangezogen. Die Unfallschwere kann mittels der Unfallkostenrate sowie der Getöteten- und Schwerverletztenrate gemessen werden.

Zur makroskopischen Unfallanalyse sind aus mehreren Untersuchungen⁵² statistische Verfahren bekannt, die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht näher betrachtet werden, da sie sich nicht für eine Einbindung in ein automatisches System zur regelmäßigen Qualitätsbewertung eignen.

Allgemeine Unfallgefahr

Anforderung: *Die Unfallgefahr sollte durch den Einsatz von SBA sinken oder während des Betriebs einer SBA nicht oberhalb eines als kritisch erachteten Niveaus liegen. Auf keinen Fall sollten sie steigen.*

Zur Bewertung der Unfallgefahr kann ein Versagensmodell gemäß Abbildung 2 herangezogen werden⁵³. Ein Unfall wird als Versagen des dargestellten Systems gesehen; die Wahrscheinlichkeit des Systemversagens ist somit ein Maß für die Unfallgefahr.

⁵² z. B. in [6] oder [10] ⁵³ nach [9], Abbildung entspricht Abbildung 3.1 auf Seite 28. Das Modell wurde nur zur Begründung der Auswahl der Qualitätskenngrößen, nicht zur tatsächlichen Berechnung einer Unfallwahrscheinlichkeit genutzt.

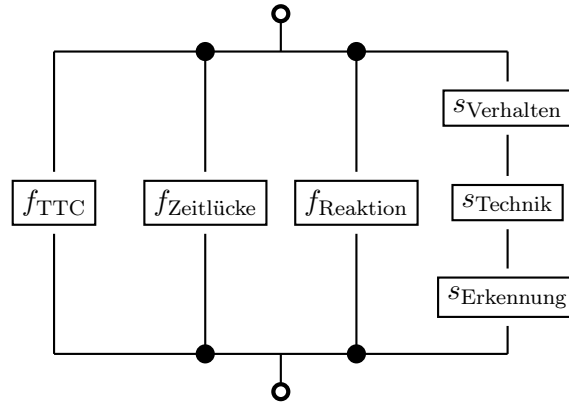


Abbildung 2: Versagensmodell für die Unfallwahrscheinlichkeit

Im dargestellten Modell müssen zunächst die einzelnen *Versagenswahrscheinlichkeiten* bezogen auf das Verkehrsverhalten (f_{TTC} , $f_{Zeitlücke}$ und $f_{Reaktion}$) und bezogen auf die Streckenbeeinflussung ($s_{Erkennung}$, $s_{Technik}$ und $s_{Verhalten}$) bestimmt werden. Anschließend kann hieraus eine Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems bestimmt werden. Durch Präzisierung der in [9] genannten Einflussgrößen für die einzelnen Versagenswahrscheinlichkeiten und durch Ableitung von Vorschlägen für die Herstellung eines Zusammenhangs zwischen der Einflussgröße und der Versagenswahrscheinlichkeit kann ein automatisch nutzbares System zur Berechnung der Unfallgefahr entwickelt werden. Als geeignet erachtete Einflussgrößen zur Schätzung der Versagenswahrscheinlichkeiten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die Netto-Zeitlücke $t_{L,Netto}$ und die TTC t_C können durch fortlaufende Analyse mikroskopischer Verkehrskenngrößen in folgender Weise ermittelt werden⁵⁴:

$$t_{L,Brutto} = t_{Fz2} - t_{Fz1} \quad (4)$$

$$t_{L,Netto} = t_{L,Brutto} - t_B \quad (5)$$

$$t_C = t_{L,Netto} \cdot \frac{v_{Fz2}}{v_{Fz2} - v_{Fz1}} \quad (6)$$

Hierbei sind:

- $t_{L,Brutto}$ die Brutto-Zeitlücke,
- t_{Fzx} die Ankunftszeit des x ten Fahrzeugs,
- t_B die Belegungszeit des Detektors und
- v_{Fzx} die individuelle Fahrgeschwindigkeit des x ten Fahrzeugs

Ist $v_{Fz2} - v_{Fz1} \leq 0$, nähern sich die Fahrzeuge nicht. Für t_C kann dann ein Wert deutlich über dem kritischen Intervall gesetzt werden. Als kritische Wertebereiche wurden z. B. in [9] festgelegt:

- $t_{L,Netto} < 0,3 \text{ s}$
- $t_C < 10 \text{ s}$

⁵⁴ nach [9], Abschnitt 3.3.3.1, Seiten 29f

Tabelle 2: Größen zur Schätzung der Versagenswahrscheinlichkeiten im Versagensmodell

Versagenswahrscheinlichkeit		Einflussgröße	Zusammenhang
f_{TTC}	Wahrscheinlichkeit einer kritischen Time to Collision (TTC) ⁵⁵	Geschwindigkeiten zweier aufeinander folgender Fahrzeuge	$f_{TTC} \approx$ Häufigkeit kritischer Werte
$f_{Zeitlücke}$	Wahrscheinlichkeit einer kritischen Zeitlücke	Netto-Zeitlücke	$f_{Zeitlücke} \approx$ Häufigkeit kritischer Werte
$f_{Reaktion}$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Verkehrsteilnehmer nicht rechtzeitig reagiert	Parameter (ggf. situationsabhängig)	durch verkehrspsychologische Untersuchungen zu gewinnen
$s_{Erkennung}$	Wahrscheinlichkeit, dass eine Gefährdung nicht erkannt wird	Detektionsraten für alle erkennbaren Situationen, ggf. Parameter für nicht erkennbare Situationen	gewichtete Verknüpfung der Nichtdetektionsraten $(1 - \text{Detektionsrate})$ zzgl. systematischer Abweichung (Parameter)
$s_{Technik}$	Ausfallwahrscheinlichkeit der SBA	Ausfallraten wesentlicher Komponenten (z. B. WVZ, Kommunikation)	gewichtete Verknüpfung der Ausfallraten
$s_{Verhalten}$	Befolgungswahrscheinlichkeit	Befolgungsgrad für aktuellen Schaltzustand	direkte Verwendung

Das Reaktionsvermögen der Verkehrsteilnehmer kann als fixer Parameter oder auch in Abhängigkeit von der Tageszeit, vom vermuteten Fahrerkollektiv, vom Lkw-Anteil oder von anderen Faktoren festgelegt werden. Die Detektionsrate (vgl. Abschnitt 4.3.1), die Ausfallrate (vgl. Abschnitt 4.3.1) und der Befolgungsgrad (vgl. Abschnitt 4.3.4) lassen sich im Rahmen anderer Qualitätsbewertungsverfahren bestimmen.

Der Parameter, durch den der Einfluss nicht detektierbarer Gefährdungen auf $s_{Erkennung}$ hergestellt wird, ist bei einer vergleichenden Bewertung verzichtbar. Jedoch wird dann die Unfallwahrscheinlichkeit systematisch unterschätzt.

Es wird vermutet, dass der auf die o.g. Weise gebildete Kennwert der Unfallwahrscheinlichkeit für eine Steuerung der SBA zu träge reagiert, da für eine ausreichende statistische Aussagekraft längere Zeitintervalle betrachtet werden müssten. Für eine nachträgliche oder laufende Bewertung der Qualität der SBA-Steuerung kann diese Trägheit jedoch toleriert werden.

Verkehrssicherheitsnutzen bei Stauwarnung (Zielfunktionsverfahren)

Anforderung: Der Nutzen, der sich aus der Erhöhung der Verkehrssicherheit bei der Stauwarnung ergibt, sollte so hoch wie möglich sein.

Die Erhöhung Δp_{Unfall} der Unfallwahrscheinlichkeit im Falle einer Verkehrsstörung gegenüber einem nicht gestörten Verkehrsablauf wird im Zielfunktionsverfahren (vgl. Abschnitt 4.3.6) jeweils auf der

Grundlage des aktuell gegebenen Geschwindigkeitsabfalls $\Delta v_{\text{mit SBA}}$ und einer Schätzung des Geschwindigkeitsabfalls $\Delta v_{\text{ohne SBA}}$ für den Fall, dass keine Störfallwarnung aktiv ist, bestimmt und verglichen⁵⁶:

$$\Delta p_{\text{Unfall}} = \left(\frac{\Delta v_{\text{ohne SBA}}}{v_{\text{norm}}} \right)^4 - \left(\frac{\Delta v_{\text{mit SBA}}}{v_{\text{norm}}} \right)^4 \quad (7)$$

Bei der Wahl von $\Delta v_{\text{ohne SBA}}$ und der Normierungsgeschwindigkeit⁵⁷ v_{norm} werden historische Geschwindigkeitswerte bei Verkehrsstörungen und Unfallstatistiken zugrunde gelegt. Die Erhöhung der Unfallwahrscheinlichkeit wird mit einer mittleren Unfallkostenrate multipliziert und so in einen monetären Nutzenindikator für die Stauwarnung überführt. Das Verfahren wurde für die Nutzung in einem System zur automatischen, regelmäßigen Qualitätssicherung und Parameteroptimierung entwickelt, auch wenn Unfallstatistiken und Geschwindigkeitsdaten für längere Zeiträume zur Parametrierung benötigt werden.

Rechtzeitige Erkennung bei Detektionsverfahren

Anforderung: *Eine detektierbare Verkehrsstörung bzw. eine detektierbare, gefährliche Umfeldbedingung muss nach dem Eintreten so schnell wie möglich erkannt werden.*

Eine Warnung vor einer Verkehrsstörung ist wertvoll, wenn sie den Kraftfahrer zeitlich vor Erreichen eines Geschwindigkeitsabfalls erreicht. Nach [9] ist dies der Fall, wenn bei einem Abstand der MQ von 1 km die Warnung ca. 10 min vorher erfolgt⁵⁸. Ein Maß zur Bewertung dieses Aspektes ist die *Detektionsrate (DR)*, die für Verkehrsstörungen wie folgt bestimmt werden kann⁵⁹:

$$DR = \frac{\text{Anzahl erkannter Verkehrsstörungen}}{\text{Anzahl Geschwindigkeitseinbrüche}} \quad (8)$$

Die Anzahl der Geschwindigkeitseinbrüche kann durch nachträgliche Auswertung von Geschwindigkeitszeitreihen erfolgen. Es ist ein Geschwindigkeitsniveau festzulegen, das der Zählung der Geschwindigkeitseinbrüche zugrunde gelegt wird. Außerdem ist festzulegen, in welchem Zeitraum nach dem Geschwindigkeitseinbruch die Detektion erfolgen muss. Ergänzend kann das Vorhandensein von Baustellen durch vorherige manuelle Eingabe oder das Vorhandensein von Unfällen durch nachträgliche manuelle Eingabe zur Verifikation einer Störung herangezogen werden⁶⁰.

Alternativ kann das übereinstimmende Erkennen einer Gefährdung durch mehrere unabhängige Verfahren oder Einrichtungen als Kriterium zur Verifikation der Gefährdung angesehen werden. Das Vorhalten einer solchen Redundanz kann jedoch mit einem erheblichen Aufwand verbunden sein.

Rechtzeitige Vorhersage bei Prognoseverfahren

Anforderung: *Eine durch Prognoseverfahren vorhersehbare, d. h. nicht durch Unfälle oder ähnliche unvorhersehbare Einflüsse hervorgerufene Verkehrsstörung muss in einem bestimmten Zeithorizont vor dem Eintreten erkannt werden.*

Als Bewertungskriterium kann die *Prognosequote (PR)*⁶¹ verwendet werden, die in gleicher Weise wie

⁵⁶ nach [12] ⁵⁷ Die Bedeutung dieses Parameters wird in [12] erläutert. ⁵⁸ [9], Abschnitt 2.2.1, Seite 19 ⁵⁹ vgl. z. B. [8] ⁶⁰ Dies wurde bei den Untersuchungen in [8] getan. ⁶¹ nach [8], dort Erkennungsquote genannt, hier jedoch zur Vermeidung der Verwechslung mit der DR abweichend bezeichnet

die DR bestimmt wird, wobei jedoch nicht nach, sondern vor Auftreten eines Geschwindigkeitsabfalls das Vorhandensein einer Störungsmeldung untersucht wird.

Ist der zu bewertende Störfallindikator nicht binär oder stufig, so muss stattdessen der hiermit verknüpfte Schaltwunsch im Sinne einer Warnstufe berücksichtigt werden. Sind mehrere Warnstufen vorhanden, muss die Bewertung einzeln für jede Stufe außer der, welche keine Warnung darstellt, durchgeführt werden. Es ist wie für die DR ein Geschwindigkeitsniveau für die Zählung der Geschwindigkeitseinbrüche vorzugeben. Außerdem muss ein Zeitraum vorgegeben werden, bis zu dem vor Eintreten eines Geschwindigkeitsabfalls eine Vorhersage erfolgt sein muss.

Sichere Anzeigegeschwindigkeit

Anforderung: *Die Anzeigegeschwindigkeit darf nicht höher sein als die maximale sichere Fahrgeschwindigkeit.*

Obwohl die Geschwindigkeitswahl innerhalb des zulässigen Bereichs in der Verantwortung des Kraftfahrzeugführers liegt und dieser verpflichtet ist, seine Geschwindigkeit bei Bedarf den Verkehrs- und Umfeldbedingungen anzupassen, hat eine zu hohe Anzeigegeschwindigkeit eine psychologische Wirkung, die sicherheitskritisch sein kann.

Die Anzeigegeschwindigkeit sollte, soweit technisch möglich, daraufhin überprüft werden, ob sie in sicherer Weise gefahren werden kann. Da jedoch in heutigen SBA z. B. nicht alle Witterungs- und Umfeldbedingungen automatisch erkannt werden können (Seitenwind, Gegenlicht durch Sonnenschein oder entgegenkommende Fahrzeuge etc.), kann eine solche Prüfung nur teilweise erfolgen. Insbesondere in Bezug auf die Verkehrssituation erscheint sie jedoch möglich. So könnte z. B. überprüft werden, ob eine Anzeigegeschwindigkeit deutlich über der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit an einem stromabwärts befindlichen MQ liegt. Zeiträume, in denen dieser Fall eintritt, können aufsummiert und diese Summe als Qualitätsindikator genutzt werden.

Derzeit wird die Sicherheit der Anzeigegeschwindigkeit vor allem dadurch gewährleistet, dass restriktivere Anordnungen im Wesentlichen priorisiert werden (vgl. Abschnitt 3.5). Ein Anwendungsbeispiel für die Prüfungen der oben vorgestellten Art ist jedoch nicht bekannt.

Harmonisierungswirkung (Sicherheit)

Anforderung: *Eine SBA sollte zur Harmonisierung des Verkehrsflusses beitragen. Auf keinen Fall sollte sie einer Harmonisierung des Verkehrsflusses entgegenwirken.*

Die Harmonisierung bezieht sich hier nicht nur auf die Geschwindigkeit, sondern auch auf die Fahrstreifenausnutzung und die Anzahl der Fahrstreifenwechsel. Nach [9] können zwei Maße zur Bewertung der Harmonisierungswirkung in Bezug auf die Geschwindigkeit genutzt werden:

- Standardabweichung der Fahrgeschwindigkeiten
- Schwankungscharakteristik als Ergebnis einer Spektralanalyse der Geschwindigkeiten längs eines Fahrstreifens

Die erste Kenngröße kann automatisch lokal erfasst und in einer regelmäßigen Qualitätssicherung genutzt werden. Die der Spektralanalyse zugrunde liegenden Geschwindigkeitszeitreihen längs eines Fahrstreifens müssten jedoch durch Mitschwimmfahrten bestimmt werden, was einen höheren Aufwand nach sich zieht.

Beide Methoden zur Bestimmung der Harmonisierungswirkung wurden im Rahmen der Untersuchungen in [9] entwickelt und angewendet. Die Analyse der Standardabweichung der Fahrgeschwindigkeiten wurde dabei so durchgeführt, dass störende Einflüsse z. B. durch Schwankungen des Geschwindigkeitsniveaus im Beobachtungszeitraum oder eine unterschiedliche räumliche Lage begrenzt wurden. Dazu wurde ein Auswertungsintervall von 30 s verwendet und die Standardabweichung getrennt nach bestimmten Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsklassen sowie nach Schaltzustand, MQ und Fahrstreifen ausgewertet. Auf die Methode der Spektralanalyse wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, da sie als zu aufwendig für die regelmäßige Nutzung zur Qualitätssicherung eingeschätzt wird.

Verkehrssicherheitsnutzen bei der Harmonisierung (Zielfunktionsverfahren)

Anforderung: *Der Nutzen, der aus dem Sicherheitsgewinn durch Harmonisierungsprogramme entsteht, sollte so hoch wie möglich sein.*

Als Teil des Zielfunktionsverfahrens wird ein Indikator für den Verkehrssicherheitsnutzen eines Harmonisierungsprogrammes bestimmt⁶², indem die Änderung der Unfallwahrscheinlichkeit mit einem Kostenfaktor monetär bewertet wird. Die Unfallwahrscheinlichkeit wird über die Unfallrate für Verkehrssituationen mit hoher Verkehrsbelastung bestimmt. Der mittlere Rückgang der Unfallwahrscheinlichkeit wird durch einen Faktor für den allgemeinen Rückgang der Unfallzahlen bei hohen Verkehrsstärken durch Harmonisierungsprogramme einbezogen, der auf der Grundlage der Ergebnisse eines Forschungsprojektes gesetzt werden kann.

Der so modellierte Rückgang der Unfallwahrscheinlichkeit wird nur dann als Nutzen gewertet, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

- Die Verkehrsstärke hat einen bestimmten, parametrierbaren Schwellenwert überschritten.
- Die Geschwindigkeitsbeschränkung wird akzeptiert. Akzeptanz und die damit verbundene Wirksamkeit der Schaltung werden nur unterstellt, wenn die Differenz der Anzeigegeschwindigkeit zur mittleren Fahrgeschwindigkeit einen parametrierbaren Grenzwert nicht überschreitet.
- Die Harmonisierungswirkung muss nachweisbar sein. Dies wird als erfüllt angesehen, wenn die Standardabweichung der Fahrgeschwindigkeiten einen parametrierbaren Prozentsatz der mittleren Fahrgeschwindigkeit nicht überschreitet.

Durch Multiplikation des Rückgangs der Unfallwahrscheinlichkeit mit einem Unfallkostensatz wird ein monetärer Indikator für den Sicherheitsnutzen eines Harmonisierungsprogrammes bestimmt. Das Verfahren wurde für den Einsatz in einem System zur automatischen Qualitätssicherung und Parameteroptimierung konzipiert, auch wenn historische Unfallstatistiken für längere Zeiträume benötigt werden.

Ausfallsicherheit

Anforderung: *Die Häufigkeit von Ausfällen der Komponenten einer SBA sollte so gering wie möglich gehalten werden.*

Die Forderung nach Ausfallsicherheit betrifft die Messtechnik, die Kommunikationssysteme, die Hardware der Streckenstationen, Verkehrsrechner- und Unterzentralen sowie die Anzeigeeinrichtungen. Eine

⁶² nach [12]

Bewertung der Ausfallsicherheit kann anhand der Ausfallraten der einzelnen Systemkomponenten erfolgen. Diese können grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten ermittelt werden:

- Ausfallhäufigkeit bezogen auf die Zeit
- Herstellerangaben

Erstere Vorgehensweise ist für Komponenten sinnvoll, für die mit gelegentlich auftretenden Ausfällen gerechnet wird (z. B. Induktionsschleifen). Letztere Vorgehensweise ist für Komponenten sinnvoll, die eine hohe Ausfallsicherheit besitzen müssen und für die festgelegte Mindestanforderungen bezüglich der Ausfallrate bestehen.

Sicheres Ausfallverhalten

Anforderung: *Fällt eine Komponente einer SBA aus, darf sich dies nicht über ein unvermeidbares Maß hinaus negativ auf die Verkehrssicherheit auswirken.*

Die Forderung nach sicherem Ausfallverhalten sollte durch Zwangsbedingungen und Rückfallebenen in der Steuerung berücksichtigt sein. Maßnahmen diesbezüglich sind in mehreren Regelwerken (z. B. [16] und [18]) verankert. Dieser Aspekt ist daher nicht Gegenstand der weiteren Betrachtungen, obwohl er im Rahmen des Qualitätsmanagements zu berücksichtigen ist.

4.3.2 Anforderungen an die Leistungsfähigkeit

Folgende Punkte sind für die Bewertung der Leistungsfähigkeit maßgebend:

- Vermeidung unnötiger Restriktionen und Warnungen
- Stabilisierung des Verkehrsflusses (Störungsvermeidung)
- Reisezeitverbesserung
- monetäre Bewertung der Reisezeit (Zielfunktionsverfahren)
- Harmonisierungswirkung (Leistungsfähigkeit)

Eine mangelhafte Akzeptanz kann sich ebenfalls negativ auf die Leistungsfähigkeit auswirken, da hierdurch die erwartete positive Wirkung in Bezug auf die Stabilität und Harmonisierung des Verkehrsflusses ausbleibt und sich möglicherweise sogar Verschlechterungen der Situation einstellen. Die Akzeptanz wird jedoch gesondert betrachtet, da sie sich auch auf die Sicherheit auswirkt.

Einige der genannten Aspekte bedingen sich gegenseitig. Daher kann die Betrachtung einer Auswahl dieser Größen als hinreichend angesehen werden. Zunächst werden jedoch alle genannten Qualitätsanforderungen vorgestellt.

Vermeidung unnötiger Restriktionen und Warnungen

Anforderung: *Die Schaltzustände einer SBA sollen nur so restriktiv sein, wie es die aktuell vorliegenden Verkehrs- und Umfeldbedingungen erfordern. Restriktionen und Warnungen sind zeitnah nach Verbesserung der Situation zurückzunehmen.*

Ein Maß für die Verletzung dieser Anforderung ist sowohl für Detektions- als auch für Prognoseverfahren die *Fehlalarmrate (FAR)*. Die FAR wird z. B. in [8] wie folgt bestimmt:

$$\text{FAR} = \frac{\text{Anzahl Alarmer} - \text{Anzahl verifizierter Alarmer}}{\text{Anzahl Alarmer}} \quad (9)$$

Unter einem Alarm wird in diesem Zusammenhang eine detektierte oder prognostizierte Verkehrsstörung oder gefährliche Umfeldbedingung verstanden. Neben diesem ereignisbezogenen Maß kann auch eine zeitbezogene Fehlalarmwahrscheinlichkeit als Anzahl der Fehlalarme bezogen auf einen bestimmten Zeitraum genutzt werden⁶³.

In [8] wird vorgeschlagen, einen Fehlalarm für eine Verkehrsstörung dann anzunehmen, wenn von einem Verfahren zur Streckenbeeinflussung ein Alarm vorliegt, aber weder ein signifikanter Geschwindigkeitsabfall in den gemessenen Verkehrskenngrößen zu verzeichnen ist noch Baustellen oder Unfälle auf dem entsprechenden Abschnitt zum Zeitpunkt der Störung registriert wurden. Problematisch an dieser Vorgehensweise ist nach [9], dass so bei zielgemäßer Verhinderung einer Verkehrsstörung dies als Fehlalarm gewertet wird (vgl. auch Abschnitt 3.4.3). Daher muss ein Nachweis erbracht werden können, dass eine Störung verhindert wurde, so dass der entsprechende Alarm daraufhin als verifiziert gekennzeichnet werden kann. Geschieht dies nicht, wird die FAR für Prognoseverfahren besonders im Vergleich zu Detektionsverfahren systematisch überschätzt. Für eine isolierte Bewertung des Verhaltens eines Prognoseverfahrens über der Zeit kann dieser Umstand jedoch vernachlässigt werden.

Bei der Bestimmung der FAR ist ein bestimmtes Geschwindigkeitsniveau festzulegen. Wird bei Detektion oder Prognose dieses Niveau nicht unterschritten, liegt ein Fehlalarm vor. Dieser Fehlalarm ist jedoch nur dann als Fehlverhalten der SBA zu werten, wenn dieses Geschwindigkeitsniveau mit den Schwellenwerten des betrachteten Steuerverfahrens übereinstimmt⁶⁴.

Stabilisierung des Verkehrsflusses (Störungsvermeidung)

Anforderung: *Der Schaltwunsch eines Prognoseverfahrens soll zur Aufrechterhaltung eines stabilen Verkehrsflusses bei Verkehrsbelastungen nahe der Kapazitätsgrenze führen.*

Die Stabilisierungswirkung kann durch Auswertung von Fundamentaldiagrammen bewertet werden, in dem die Verkehrsstärken an der Stabilitätsgrenze und die zugehörigen Fahrgeschwindigkeiten untersucht werden. Daraufhin kann ermittelt werden, wie oft innerhalb eines kritischen Verkehrsstärkeintervalls ein Geschwindigkeitsabfall auftrat, der eine Verkehrsstörung kennzeichnet.

Bei den Untersuchungen in [10] wurde ein signifikanter Verkehrszusammenbruch als Abfall der Geschwindigkeit in einem festgelegten Zeitraum von 5 min um einen Mindestwert von 15 km/h angesehen. Die Geschwindigkeit wurde als gleitender Mittelwert über fünf Minutenwerte minütlich ausgewertet. Für mehrere Verkehrsstärkeklassen wurde aus der Zusammenbruchshäufigkeit eine Zusammenbruchswahrscheinlichkeit abgeleitet, die als Qualitätsmaß genutzt werden könnte.

⁶³ Beide Maße werden in [8] unter abweichenden Bezeichnungen vorgestellt. ⁶⁴ nach [8]

Die hier beschriebene Vorgehensweise erscheint für den Einsatz in einem automatischen System zur Qualitätssicherung grundsätzlich geeignet, da auf ohnehin verfügbare Eingangsgrößen zurückgegriffen wird. Jedoch erscheint eine große Menge an Stichproben für die Ableitung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit von der entsprechenden Häufigkeit notwendig zu sein, damit diese aussagekräftig ist.

Reisezeitverbesserung

Anforderung: *Unter der Bedingung, dass die Verkehrssicherheit nicht gefährdet wird, sollte durch eine SBA-Steuerung die Reisezeit der Verkehrsteilnehmer für die Fahrt durch den beeinflussten Streckenabschnitt verkürzt werden. Zumindest sollte sie nicht erhöht werden, es sei denn, dies ist aus Sicherheitsgründen nicht zu vermeiden.*

Zur makroskopischen Bestimmung der Reisezeit existieren mehrere Verfahren, die insbesondere in Zusammenhang mit der Netzbeeinflussung bereits eingesetzt werden. Darüber hinaus können Reisezeiten auch stichprobenartig im Rahmen von Mitschwimmfahrten bestimmt werden. Ersatzweise kann eine Aussage über die Reisezeit anhand der mittleren Fahrgeschwindigkeit getroffen werden.

Die Reisezeit wird in einigen Untersuchungen relativ, d. h. als Reisezeitgewinn oder -verlust gegenüber einem Referenzfall analysiert. In [10] wird vorgeschlagen, Reisezeitgewinne in Abhängigkeit von einer Verkehrsstärkeklasse zu untersuchen und auch Reisezeitgewinne durch Stauvermeidung einzubeziehen.

Die makroskopische Bestimmung der Reisezeit kann aufwändig sein, wenn hierfür eigens Verfahren implementiert werden müssen. Werden solche Verfahren für die Netzbeeinflussung bereits genutzt, ist der Aufwand hingegen gering. Der Aufwand der Reisezeitbestimmung durch Mitschwimmfahrten ist in jedem Falle als hoch einzustufen. Um einen hinreichend großen Stichprobenumfang an Reisezeitmessungen zu gewinnen, ist eine hohe Zahl solcher Fahrten jeweils für verschiedene Verkehrs- und Umfeldbedingungen sowie Zeiträume nötig. Stehen Reisezeiten aus der Netzbeeinflussung nicht zur Verfügung, ist ihre ersatzweise Bestimmung als Kehrwert der lokal gemessenen Fahrgeschwindigkeiten eine wenig aufwendige Alternative. Der Vorteil besteht darin, dass die Reisezeitbestimmung auf der Grundlage ohnehin vorhandener Messwerte erfolgen kann. Die so bestimmte Reisezeit ist auf einen bestimmten Streckenabschnitt normiert.

Monetäre Bewertung der Reisezeit (Zielfunktionsverfahren)

Anforderung: *Eine SBA-Steuerung sollte zu einer Verkürzung der durchschnittlichen Reisezeit für die Durchfahrt durch den beeinflussten Streckenabschnitt führen. Gleichzeitig sollte die Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit durch Geschwindigkeitsbeschränkungen so gering wie möglich gehalten werden.*

Als Bestandteil des Zielfunktionsverfahrens (vgl. Abschnitt 4.3.6) erfolgt die Bewertung der Reisezeit durch zwei Komponenten:

- Reisezeitnutzen durch Harmonisierung
- Reisezeitkosten durch Geschwindigkeitsbegrenzung

Für beide Komponenten wird jeweils ein monetärer Nutzen- bzw. Kostenindex bestimmt. Die Vorge-

hensweise hierbei wird nachfolgend auf der Grundlage von [12] beschrieben.

Reisezeitnutzen durch Harmonisierung: Der Einfluss einzelner Harmonisierungsschaltungen auf die mittlere Geschwindigkeit (als Einflussgröße der Reisezeit) wird über den Rückgang einer Zusammenbruchswahrscheinlichkeit ermittelt. Es wird die Differenzkurve der Verteilungsfunktionen der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke für den Fall mit und ohne Geschwindigkeitsdifferenz bestimmt, welche im Rahmen eines Forschungsprojektes zu ermitteln ist. Es werden nur Harmonisierungsschaltungen mit einem Nutzen bewertet, für die die Kriterien erfüllt sind, die auch für die Bestimmung des Sicherheitsnutzens von Harmonisierungsprogrammen (vgl. Abschnitt 4.3.1) gelten. Auf der Grundlage der Zusammenbruchswahrscheinlichkeitsverteilung wird ein Geschwindigkeitsvorteil für einen Verkehrsstrom mit Harmonisierungsschaltung gegenüber einem ohne diese Maßnahme ermittelt. Dieser wird mit einem Zeitkostenfaktor monetär bewertet.

Reisezeitkosten durch Geschwindigkeitsbegrenzung: Die Reisezeitkosten werden als Differenz der durchschnittlichen induzierten Reisezeit durch die SBA und der angenommenen Reisezeit für den Fall ohne SBA betrachtet. Die induzierte Reisezeit wird hierbei in Abhängigkeit von der Anzeigegeschwindigkeit gewählt, wobei eine Toleranzschwelle einbezogen wird. Die angenommene Reisezeit für den Fall ohne SBA wird als Maximum der beobachteten mittleren Reisezeit und der erwarteten mittleren Reisezeit bestimmt, wobei im ersten Fall die Fahrgeschwindigkeiten sowohl am Anfang als auch am Ende des Betrachtungsabschnittes einfließen und im letzten Fall eine Schätzung der Wunschgeschwindigkeit ausschließlich auf der Grundlage der Fahrgeschwindigkeiten am Anfang des Abschnittes erfolgt. Reisezeitverluste fließen in eine monetäre Bewertung ein, wenn sie positiv sind, d. h. wenn die durch die SBA induzierte Reisezeit höher ist als die angenommene Reisezeit ohne SBA, und wenn im stromabwärtigen Abschnitt kein Stau vorliegt.

Harmonisierungswirkung (Leistungsfähigkeit)

Anforderung: *Durch eine SBA sollte eine bessere Harmonisierung des Verkehrs gefördert werden.*

Die Harmonisierungswirkung umfasst folgende Aspekte:

- Verteilung des Verkehrsaufkommens auf die Fahrstreifen
- Anzahl der Fahrstreifenwechsel
- Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Fahrstreifen
- Geschwindigkeitsunterschiede längs eines Fahrstreifens
- zeitliche Änderung der Verkehrskenngrößen

Mit Ausnahme der Anzahl der Fahrstreifenwechsel können diese Harmonisierungskriterien mit den Verkehrsdaten der lokalen MQ automatisch bestimmt werden. Auf Fahrstreifenwechsel könnte mit Korrelationsanalyse der Verstimmungskurven jedes Fahrstreifens an zwei benachbarten MQ geschlossen werden, jedoch stellt diese Methode hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Messung und kann daher als aufwendig und fehleranfällig (z. B. Fahrzeuge gleicher Bauart) angesehen werden.

4.3.3 Anforderungen an die Datenqualität

Anforderung: *Die Qualität gemessener, berechneter und prognostizierter Verkehrskenngrößen muss auf einem ausreichend hohen Niveau gehalten werden.*

Folgende Qualitätsanforderungen werden im Allgemeinen an die Qualität von Verkehrs- und Umfeld-daten gestellt:

- Verfügbarkeit
- Plausibilität
- Genauigkeit
- Freiheit von systematischen Fehlern
- geringes Ausmaß zufälliger Fehler

Gleichzeitig wird gefordert, dass Datenverarbeitungs- und Kommunikationssysteme sowie Verfahren zur Streckenbeeinflussung fehlertolerant sind.

Die Verfügbarkeit und Genauigkeit sowie der Aspekt der systematischen und zufälligen Messfehler wird bereits während der Datenerfassung und bei der Datenübertragung sichergestellt. Hierauf wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Ein Verbesserungspotenzial wird in der Plausibilitätsbewertung und Ersatzwertbestimmung gesehen, die zum einen ausgeweitet und zum anderen auch für die automatische Bewertung der Datenqualität herangezogen werden könnte. Bereits in [8] wurde vorgeschlagen, dem Leitstellenpersonal Informationen zur Datenqualität und -vollständigkeit in Form von Indizes für die einem Schaltwunsch zugrunde liegende Datengüte anzuzeigen. Diese Informationen könnten zur Planung der Instandhaltung und Kalibrierung von Detektoren genutzt werden. Darüber hinaus ist eine Bewertung und Optimierung der Glättungs- und Trendprognoseparameter denkbar.

4.3.4 Anforderungen bezüglich der Akzeptanz

Anforderung: *Eine SBA muss so betrieben werden, dass die ausgegebenen Warnungen, Hinweise sowie Ge- und Verbote wahrgenommen, inhaltlich verstanden und von möglichst vielen Verkehrsteilnehmern umgesetzt und akzeptiert werden.*

Dass die Anzeigen der WVZ einer SBA wahrgenommen und verstanden werden, kann als weitgehend gegeben angesehen werden. Dieser Aspekt ist Bestandteil der Informationsverbreitung und wird hier nicht näher betrachtet.

Die verbleibenden Aspekte aus der oben stehenden Anforderung sind der *Befolgungsgrad* und die *echte Akzeptanz*.

Befolgungsgrad

Auf die Akzeptanz wird in mehreren Untersuchungen über den Befolgungsgrad geschlossen. Der Befolgungsgrad ist ein Maß für die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf angezeigte Schaltbilder und bezieht sowohl die Häufigkeit als auch das Ausmaß von Abweichungen von vorgesehenem zu tatsächlichem

Verhalten ein⁶⁵. Der Befolgungsgrad kann nur für Ge- und Verbote, nicht jedoch für Hinweise und Warnungen bestimmt werden, da diese keine unmittelbar messbare Reaktion der Verkehrsteilnehmer, sondern allenfalls eine nicht messbare erhöhte Aufmerksamkeit bewirken sollen.

In [7] werden zur Bestimmung des Befolgungsgrades (dort als Akzeptanz bezeichnet) drei Methoden vorgestellt:

- Anteil der Fahrzeuge, die die Anzeigegeschwindigkeit zuzüglich eines Toleranzbetrages überschreiten
- Verhältnis der Anzeigegeschwindigkeit zur Geschwindigkeit, die von 85 % der Verkehrsteilnehmer eingehalten wird
- Befolgungsindex mit folgenden gewichteten Überschreitungsklassen:
 - Einhaltung ($v_{\text{ind}} \leq v_{\text{Anz}}$): sehr gut
 - Überschreitung um maximal 10 km/h: gut oder besser
 - Überschreitung um maximal 20 km/h: mangelhaft oder besser
 - Überschreitung um mehr als 20 km/h: ungenügend

Die Überschreitungsklassen nach [7] werden nach folgender Vorschrift zum Befolgungsindex I_{Bef} zusammengefasst:

$$I_{\text{Bef}} = \left(\frac{\alpha}{100} h_{\text{rel}}(\Delta v = 0) + \frac{\beta}{100} h_{\text{rel}}(0 < \Delta v \leq 10) \right. \\ \left. + \frac{\gamma}{100} h_{\text{rel}}(10 < \Delta v \leq 20) + \frac{\delta}{100} h_{\text{rel}}(\Delta v > 20) \right) \quad (10)$$

Hierbei sind:

- α , β , γ und δ Gewichte,
- $h_{\text{rel}}(\dots)$ die relative Häufigkeit eines Ereignisses in % und
- $\Delta v = v_{\text{ind}} - v_{\text{Anz}}$

Die Gewichte haben jeweils Werte zwischen 0 und 1. Die Summe der Gewichte ist 1. In allen Fällen kann der Befolgungsgrad leicht anhand ohnehin im Rahmen der SBA-Steuerung gemessener Geschwindigkeitswerte bestimmt werden.

Echte Akzeptanz

Die echte Akzeptanz ist im Gegensatz zum Befolgungsgrad ein Maß für die Bereitschaft von Verkehrsteilnehmern, auf Schaltbilder von SBA, insbesondere auf Restriktionen, zu reagieren. Grundsätzlich ist die Akzeptanz somit ein subjektives Maß, das z. B. durch Befragung von Verkehrsteilnehmern abgeschätzt werden kann. Dies ist jedoch nur im Rahmen einer gesonderten Untersuchung möglich und kommt für eine automatische und regelmäßige Qualitätsbewertung nicht in Betracht.

In [9] werden Möglichkeiten vorgestellt, die echte Akzeptanz aus dem Befolgungsgrad durch Eliminieren störender Einflüsse wie dem des Verkehrskontexts abzuleiten. Diese Vorgehensweise wird als vorteilhaft

⁶⁵ entsprechend der Sichtweise in [7]

gegenüber der einfachen Verwendung des Befolungsgrades gesehen, jedoch muss sichergestellt werden, dass trotz der nach verschiedenen Kontexten differenzierten Auswertung gleichermaßen ein ausreichend hoher Datenumfang für eine statistisch gesicherte Analyse als auch eine ausreichend schnelle Erkennung von Qualitätsmängeln möglich ist.

4.3.5 Verknüpfung mehrerer Anforderungen

Wie eingangs erwähnt, stehen einige der beschriebenen Qualitätsanforderungen in einem Zielkonflikt mit anderen Qualitätsanforderungen, so dass eine isolierte Optimierung einzelner Aspekte sich negativ auf andere auswirken kann. Um einen optimalen Kompromiss zwischen konfliktären Zielen finden zu können, ist eine zusammengefasste Optimierung notwendig. Dies gilt vor allem für folgende Zielkonflikte:

- schnelle bzw. frühe Reaktion (DR, PR) \leftrightarrow Reaktion nach gesicherten Erkenntnissen (FAR)
- Sicherheit \leftrightarrow Leistungsfähigkeit
- Sicherheit \leftrightarrow Akzeptanz

Die Zusammenfassung der DR und FAR eines Detektionsverfahrens wird als *Erkennungsgüte*, die Zusammenfassung der PR und FAR eines Prognoseverfahrens entsprechend als *Prognosegüte*⁶⁶ bezeichnet. Mit dem Zielfunktionsverfahren (vgl. Abschnitt 4.3.6) wird eine gemeinsame Betrachtung der Sicherheit und Leistungsfähigkeit vorgenommen. Für die Gegenüberstellung der Sicherheit und der Akzeptanz sind bislang keine automatisch und regelmäßig nutzbaren Algorithmen bekannt. In beiden Fällen können jedoch aus Sicherheitsgründen unvermeidbare Einbußen der Leistungsfähigkeit oder Akzeptanz aus der jeweiligen Bewertung ausgeschlossen werden. Dies wird z. B. ebenfalls im Zielfunktionsverfahren umgesetzt, wo Reisezeitkosten nicht gewertet werden, wenn sie durch eine Stauwarnung gerechtfertigt sind.

Zur Bestimmung der Erkennungs- bzw. Prognosegüte wird in [8] vorgeschlagen, die FAR eines Verfahrens zur Streckenbeeinflussung gleichzeitig mit der DR bzw. der PR auszuwerten. Dies geschieht, indem für jede Ausgabestufe, d. h. für jede Geschwindigkeits- oder Warnstufe, jeweils die FAR entlang der Abszisse und die DR bzw. PR entlang der Ordinate eines Koordinatensystems abgetragen wird. Für beide Achsen des Koordinatensystems gilt ein Wertebereich von jeweils 0 bis 100 %. Das Optimum liegt bei einer FAR von 0 und einer DR bzw. PR von 100 %.

4.3.6 Automatische Parameteroptimierung

Zur Parameteroptimierung kann das Zielfunktionsverfahren angewendet werden. Die Beschreibung erfolgt nach [12]. Es werden die folgenden monetär angegebenen Nutzen- bzw. Kostenkomponenten gegenübergestellt:

- Verkehrssicherheitsnutzen der Stauwarnung (vgl. Abschnitt 4.3.1)
- Verkehrssicherheitsnutzen der Harmonisierung (vgl. Abschnitt 4.3.1)
- Reisezeitnutzen der Harmonisierung (vgl. Abschnitt 4.3.2)
- Reisezeitkosten der Geschwindigkeitsbeschränkung (vgl. Abschnitt 4.3.2)

⁶⁶ Diese Begriffe werden z. B. in [8] verwendet.

Für mehrere Parametersätze wird die Zielfunktion als die Summe aller Kosten- und Nutzenkomponenten ermittelt. Als optimaler Parametersatz aus der Menge der untersuchten Parametersätze gilt der, für den die Zielfunktion ein Minimum erreicht.

Das Verfahren kann erweitert werden, indem weitere Kosten- und Nutzenkomponenten monetär bewertet und in die Zielfunktion einbezogen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass sich Teile einer Nutzenkomponenten nicht mit denen anderer Nutzenkomponenten überschneiden, da diese sonst mehrfach gewertet würden.

4.4 Zusammenfassung

Aus der Literatur und den Expertenbefragungen geht hervor, dass eine Bewertung der Wirksamkeit, der Wirtschaftlichkeit, der Akzeptanz oder anderer Qualitätsaspekte einer SBA heute in unregelmäßigen Abständen und oft unter Beschränkung auf ausgewählte Aspekte im Rahmen eines Forschungsprojektes stattfindet. Zur Qualitätsbewertung im Rahmen von Forschungsprojekten wurden geeignete Verfahren entwickelt, die jedoch meist nur im Rahmen des einzelnen Projektes genutzt wurden. Einige dieser Verfahren erscheinen für den Einsatz in einem automatischen System zur Qualitätsbewertung geeignet, andere Verfahren bedürfen jedoch eines langen Untersuchungszeitraumes oder einer aufwendigen Messwerterhebung und werden daher nicht als geeignet für die Einbindung in ein solches System eingestuft. In Tabelle 3 sind Merkmale zur Qualitätsbewertung zusammengefasst, für die angenommen wird, dass sie grundsätzlich im Rahmen einer automatisierten Qualitätsbewertung untersucht werden können. Die im Zielfunktionsverfahren einbezogenen Qualitätsmerkmale werden dabei nicht einbezogen, da sie sich teilweise mit anderen Merkmalen überdecken und außerdem nicht in den im folgenden Abschnitt vorgestellten Vorschlägen für das Qualitätsmanagement berücksichtigt werden.

Tabelle 3: Qualitätsbewertungsmerkmale

Merkmal	benötigte Messgrößen	verfügbar durch SBA-Detektoren?	Bestimmung automatisierbar?
allgemeine Unfallgefahr	Brutto-Zeitlücke	ja	ja
	Belegdauer Detektor	ja	ja
	indiv. Geschwindigkeit	ja	ja
	Detektionsrate	siehe unten	ja
	Rate kritischer Ausfall	nein	nein (Parameter)
	Befolungsgrad	siehe unten	ja
Detektions-/ Prognose rate	Anzeigezustand	ja	ja
	zeitl. Verlauf Geschwindigkeit	ja	ja
Sicherheit der Fahrgeschwindigkeit	Anzeige geschwindigkeit	ja	ja
	Geschwindigkeitsniveau stromabwärts	ja	ja
Harmonisierungs- wirkung	Standardabweichung Fahrgeschwindigkeiten	ja	ja
Fehlalarmrate	Anzeigezustand	ja	ja
	zeitl. Verlauf der Geschwindigkeit	ja	ja
	Kriterium für verhinderte Störung	nein	ja (aufwendig)
Stabilisierungswirkung	Geschwindigkeit	ja	ja
	Verkehrsstärke	ja	ja
Reisezeit	Geschwindigkeit	ja	ja
	Verkehrsdichte	ja	ja
Befolungsgrad	Anzeigezustand	ja	ja
	Geschwindigkeit	ja	ja

5 Vorschläge zum Qualitätsmanagement

Auf der Grundlage einer Auswahl der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Methoden zur Qualitätsbewertung wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept für die automatische und regelmäßige Qualitätsbewertung von SBA entwickelt, welche eines von mehreren Bestandteilen eines Qualitätsmanagementsystems darstellen könnte. Mit diesem Konzept soll eine Grundlage für die praktische Entwicklung eines Systems geschaffen werden, das sowohl Bediener als auch Führungskräfte in einer Leitstelle in angemessener Weise und zeitnah über Qualitätsdefizite informiert, so dass im Sinne eines präventiven Qualitätsmanagements frühzeitig Verbesserungsmaßnahmen ergriffen werden können.

5.1 Komponenten und Arbeitsschritte

Bislang wurden Qualitätsbetrachtungen überwiegend entweder im Rahmen von langfristig angelegten Forschungsprojekten oder als Reaktion auf bestehende Probleme durchgeführt. Der hier vorgeschlagene Ansatz einer regelmäßigen Qualitätsbewertung sollte diese Vorgehensweise nicht ablösen, sondern eine Ergänzung darstellen.

Abbildung 3 zeigt schematisch, wie eine regelmäßige Qualitätsbewertung in ein Qualitätsmanagementkonzept eingebunden werden kann, wobei hier die technischen, nicht aber die organisatorischen Aspekte des Qualitätsmanagements berücksichtigt sind. Die organisatorischen Aspekte des Qualitätsmanagements werden an dieser Stelle nicht näher betrachtet.

Die *strategische Qualitätsbewertung* entspricht der in der Vergangenheit häufig gewählten Vorgehensweise zur Bewertung bestimmter Qualitätsmerkmale in einem langfristigen Kontext, wobei oftmals spezielle Aspekte im Mittelpunkt stehen. Ein Beispiel hierfür ist die Bewertung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses eines bestimmten Steuerverfahrens.

Die *reaktive Qualitätsbewertung* wird vorgenommen, wenn Qualitätsmängel auffällig werden oder untersucht werden muss, ob ein bestimmtes Ereignis auf Qualitätsmängel zurückzuführen ist. Diese Vorgehensweise ist auch ergänzend zu einer regelmäßigen Qualitätsbewertung zweckmäßig, wenn selten auftretende, nur manuell analysierbare Ereignisse wie Unfälle zu untersuchen sind.

Die *operative Qualitätsbewertung* wird derzeit nur in geringem Maße durchgeführt. Ein Anwendungsbeispiel ist das oben beschriebene Zielfunktionsverfahren, mit dem die Parameter der Verfahren zur Streckenbeeinflussung gleichzeitig bewertet und optimiert werden können.

Die nachfolgenden Ausführungen zielen darauf ab, einige Schritte der Qualitätsbewertung von der herkömmlichen strategischen in die operative Qualitätsbewertung zu übernehmen, so dass die entsprechenden Qualitätsmerkmale einer regelmäßigen Überprüfung unterzogen werden können. Dadurch soll die Reaktionszeit bei Auftreten von Qualitätsmängeln verringert und die Entscheidungsgrundlage für das Management einer Leitstelle verbessert werden.



Abbildung 3: Komponenten des Qualitätsmanagements aus technischer Sicht

5.2 Erfassung der Bewertungsgrößen

Zur regelmäßigen Qualitätsbewertung müssen regelmäßig aktuelle Bewertungsgrößen erfasst und ältere aus der Menge der betrachteten Größen entfernt werden. Die Auswertung der Qualitätsmerkmale könnte somit blockweise erfolgen. Um eine ausreichende statistische Sicherheit der Bewertung zu erreichen, ist es notwendig, relativ lange Zeit- bzw. Datenreihen zu untersuchen, so dass eine Qualitätsbewertung nur in relativ großen Zeitabständen stattfinden kann. Alternativ können gleitende Zeit- bzw. Datenreihen mit gleich bleibender Länge zugrunde gelegt werden, wobei jeweils bei Erfassung eines neuen Wertes der älteste gelöscht wird. Nachfolgend wird ausschließlich letztere Alternative zugrunde gelegt, da die Vermutung naheliegt, dass dies eine häufigere Durchführung der Bewertung zulässt.

Die erfassten Größen sollten, soweit sinnvoll, jeweils nach folgenden *Kontextklassen* getrennt ausgewertet werden:

- Anzeigezustand
- Verfahren zur Streckenbeeinflussung, auf die der Anzeigezustand zurückzuführen ist
- Geschwindigkeitsklasse
- Verkehrsstärke- oder Verkehrsdichteklasse
- Umfeldbedingungen
- Wochentag
- Tageszeit
- MQ und Fahrstreifen

Da einige Kombinationen der einzelnen Kontextklassen selten auftreten, kann eine Zusammenfassung im Einzelfall sinnvoll sein.

Wird für die Kontextklassen eine feine Einteilung zugrunde gelegt, ist zu erwarten, dass oft nur eine geringe Menge an Messwerten erhoben werden kann, bevor ein Wechsel der Kontextklasse erfolgt. Um dennoch eine ausreichend große Bewertungsgrundlage zu erhalten, wird vorgeschlagen, unterbrochene Zeit- bzw. Datenreihen zu verwenden. Dies bedeutet, dass Reihen für jede Kontextklasse separat geführt werden, wobei stets nur die der jeweils aktuell gültigen Kontextklasse zugeordnete Reihe fortgeschrieben wird. Alle übrigen Reihen werden nicht verändert; es werden dort also weder Messwerte entfernt noch hinzugefügt. Somit kann eine Reihe Unterbrechungen aufweisen, die darauf zurückzuführen sind, dass im entsprechenden Zeitraum der Unterbrechung keine Messwerte hinzugefügt werden. Trotz der Unterbrechungen wird so je Kontextklasse eine konstante Menge an Messwerten analysiert, sofern eine Anlaufphase der Qualitätsbewertung abgeschlossen ist, während der die Länge der Reihen unterhalb der vorgesehenen Länge liegen können.

Ziel dieses Ansatzes ist, festzustellen, wie sich die Qualität der Steuerung unter vergleichbaren Randbedingungen entwickelt. Zur Vorbereitung der Qualitätsbewertung sollte zu jedem Bewertungszeitschritt wie folgt vorgegangen werden:

- Bestimmung der aktuellen Kontextklasse
- Löschen des ältesten Wertes für die Bewertungsgröße in der Zeit- bzw. Datenreihe, die der aktuellen Kontextklasse zugeordnet ist
- Anfügen des aktuellen Wertes an die gleiche Reihe
- Neubestimmung aggregierter Bewertungsgrößen (z. B. Mittelwerte)
- Verwendung der aggregierten Bewertungsgrößen zur Bestimmung von Qualitätsindizes

Unter einem *Qualitätsindex* wird hierbei ein einheitlicher Kennwert verstanden, der die Bewertung eines bestimmten Qualitätsmerkmals zulässt. Dies kann eine Variable mit diskretem oder kontinuierlichem Wertebereich, aber auch eine boolesche Variable sein. Nachfolgend wird eine Auswahl solcher Indizes vorgestellt, wobei in einigen Fällen Vorschläge zu ihrer Bestimmung gegeben werden. Qualitätsindizes sollten separat für jede Kontextklasse bestimmt werden. Aus praktischen Gründen kann jedoch eine Zusammenfassung der Indizes für ein Qualitätsmerkmal z. B. durch gewichtete Verknüpfung sinnvoll sein.

5.3 Bewertung der Datenqualität

Der Datenqualität ist eine hohe Bedeutung beizumessen, da sie sich sowohl auf die Wirkungsweise der Verfahren zur Streckenbeeinflussung als auch auf die der Qualitätsbewertung auswirken. Neben der Qualitätsbewertung für die Datenerfassung, welche hier nicht behandelt wird, ist die Betrachtung folgender Bewertungsgrößen interessant:

- Plausibilitätsindizes für jede auf Plausibilität geprüfte Größe
- Trägheitsindizes für geglättete Größen
- Fehlerindizes für Trendprognosewerte

Plausibilitätsindizes können über die relative Häufigkeit implausibler Messwerte bestimmt werden. So kann auf einen defekten oder mangelhaft kalibrierten Detektor geschlossen und eine Warnung oder ein Hinweis an das Leitstellen- und Wartungspersonal ausgegeben werden.

Trägheitsindizes haben die Aufgabe, zu träge oder zu unruhige Werte geglätteter Größen zu erkennen. Zu träge Glättung liegt vor, wenn Störungen mit einer hohen Zeitverschiebung oder gar nicht erkannt werden. Im Gegensatz zur Detektionsrate kann eine nicht erkannte Störung hier jedoch nur gewertet werden, wenn die Nichterkennung wenigstens teilweise auf eine starke Glättung zurückzuführen ist. Zu unruhige Werte können dann angenommen werden, wenn sich der Anzeigezustand zu häufig ändert. Eine grundsätzliche Möglichkeit zur Bestimmung eines Trägheitsindex könnte bestehen, indem eine Glättung nicht nur unter Verwendung des derzeit gewählten, sondern auch unter Verwendung mehrerer alternativer Glättungsparameter durchgeführt wird. Die Glättungswerte, die mit den alternativen Parametern bestimmt werden, sind den genutzten Verfahren zur Streckenbeeinflussung als Eingangsgrößen zu übergeben, wobei jedoch die ermittelten Ausgangsgrößen nicht schaltungswirksam werden dürfen. Liegt mindestens ein alternativer Glättungsparameter oberhalb und ein weiterer unterhalb des aktuell gewählten Parameterwertes, kann entschieden werden, ob durch eine Erhöhung oder Verringerung des Wertes ein besseres Verhalten bezüglich der Nichtdetektionen oder bezüglich eines zu häufigen Wechsels des Anzeigezustandes zu erwarten ist. Obwohl auf diese Weise auch eine automatische Anpassung der Glättungsparameter denkbar ist, müsste zunächst untersucht werden, ob und unter welchen Bedingungen das Konvergenzverhalten gegen den unbekanntesten, optimalen Parameterwert instabil wird. Es wird daher zunächst empfohlen, im Falle einer als zu träge oder zu unruhig erkannten Glättung einen Hinweis an das Leitstellenpersonal auszugeben, so dass eine manuelle Parameteranpassung erfolgen kann.

Fehlerindizes können aus der Abweichung eines Trendprognosewertes von dem zum nachfolgenden Zeitschritt gemessenen Wert bestimmt werden. Starke Abweichungen können dem Leitstellenpersonal mitgeteilt werden, so dass die Wahl der Parameter überprüft werden kann. Ist die Abweichung systematisch, könnte sie durch eine einstellbare additive Korrektur der Trendprognose berücksichtigt werden.

5.4 Bewertung der Sicherheit

Die Bewertung der Sicherheit kann über folgende Qualitätsindizes erfolgen:

- Index der Unfallgefahr
- Harmonisierungsindex
- Detektionsrate
- Prognoserate

Der *Index der Unfallgefahr* könnte in der in Abschnitt 4.3.1 auf Seite 39 beschriebenen Weise als Wahrscheinlichkeit des Versagens eines aus Verkehrsteilnehmern und Infrastruktur bestehenden Systems gebildet werden. Bei Erkennen einer hohen Unfallgefahr sollte eine Warnmeldung an den Bediener ausgegeben werden.

Der *Harmonisierungsindex* könnte auf der Grundlage der Standardabweichung der Fahrgeschwindigkeiten nach der im gleichen Abschnitt auf Seite 4.3.1 erläuterten Weise bestimmt werden, wobei dies jedoch nur für Kontextklassen mit hoher Verkehrsstärke sinnvoll erscheint.

Zur laufenden Bestimmung der DR bzw. PR ohne Zeitversatz könnten grundsätzlich von der SBA-Steuerung unabhängige Verfahren oder Redundanzen in den vorhandenen Verfahren genutzt werden. Bei der Stauwarnung nach MARZ und in INCA liegt ein redundantes System vor, da mehrere Kriterien für die Störungserkennung unabhängig voneinander eingesetzt werden. Eine fehlerhafte Nichtdetektion aufgrund eines der Staukriterien, welche als Subverfahren zu sehen sind, könnte angenommen werden, wenn die übrigen Subverfahren eine Störung erkannt haben. Diese Möglichkeit zur Bestimmung der DR erscheint jedoch wenig zielführend. Nichtdetektionen für einzelne Staukriterien sind nicht zu vermeiden, da sich diese gegenseitig ergänzen, also jeweils andere Merkmale zur Erkennung eines Staus erfassen. Die Bestimmung einer Detektionsrate durch ein unabhängiges Verfahren ist eher geeignet, jedoch auch mit einem hohen Aufwand verbunden. Die Bestimmung einer Prognoserate ist mit einem ebenfalls hohen Aufwand verbunden, da hier zwei voneinander unabhängige Prognoseverfahren eingesetzt werden müssten.

Eine zeitversetzte Bestimmung der DR bzw. PR in der in Abschnitt 4.3.1 ab Seite 4.3.1 beschriebenen Art erscheint ebenfalls geeignet, wobei ein geringerer Aufwand zu erwarten ist, da das Vorhalten eines unabhängigen Systems entfällt und auf ohnehin vorhandene Messgrößen zurückgegriffen wird. Eine Nichtdetektion kann angenommen werden, wenn ein Geschwindigkeitsabfall auftritt, eine Warnung jedoch nicht oder mit einer zu hohen Verzögerung erfolgt. Als Randbedingung sollte vorgegeben werden, dass eine bestimmte Verkehrsstärke oder -dichte überschritten sein muss. So könnte auf die Berücksichtigung mehrerer Verkehrskontextklassen verzichtet werden. Eine zu spät erfolgte Prognose könnte analog bestimmt werden, wobei die Prognose jedoch zu einer definierten Zeit vor Eintreten des Geschwindigkeitsabfalls erfolgt sein muss. Der zugrunde gelegte Zeitversatz sollte groß genug sein, dass der Zeitpunkt des beginnenden Geschwindigkeitsabfalls sowie der Zeitpunkt der Detektion oder Prognose in der betrachteten Zeitreihe liegen, aber gleichzeitig gering genug sein, dass eine schnelle Erkennung eines Qualitätsmangels möglich ist. Die Zeitreihe der Geschwindigkeiten darf bei einem Wechsel der Kontextklasse nicht in der zuvor beschriebenen Weise unterbrochen werden. Jedoch kann dies für die Datenreihe der erfassten Störungsereignisse erfolgen, welche auf das Vorhandensein einer zugehörigen Warnung oder Prognose zu untersuchen sind.

5.5 Bewertung der Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit kann auf der Grundlage folgender Indizes bewertet werden:

- Stabilisierungsindex
- Reisezeitindex
- Fehlalarmrate

Der *Stabilisierungsindex* kann in der in Abschnitt 4.3.2 auf Seite 46 beschriebenen Art bestimmt werden. Dabei ist es ausreichend, eine Bewertung für hohe Verkehrsstärken durchzuführen. Trotz der großen benötigten Menge an Verkehrsdaten wird es als möglich erachtet, unter Verwendung unterbrochener Zeitreihen eine automatische Bewertung der Stabilisierungswirkung vorzunehmen.

Zur Bestimmung des *Reisezeitindex* wird allgemein vorgeschlagen, gemäß der Feststellungen in Abschnitt 4.3.2 auf Seite 47 den Kehrwert lokal gemessener Fahrgeschwindigkeiten zu nutzen. Für Teile eines Straßennetzes, die gleichzeitig mit einer Netzbeeinflussungsanlage ausgestattet sind, sollte ein Weg geschaffen werden, die für die Netzbeeinflussung gewonnene Reisezeit als Eingangsgröße für die Qualitätsbewertung von SBA nutzbar zu machen. Der Reisezeitindex sollte die Differenz der Reisezeit zu einer Referenzzeit sein, wobei vorgeschlagen wird, diese unabhängig vom Anzeigezustand, jedoch abhängig vom Verkehrskontext zu setzen. Die Reisezeit sollte nur bewertet werden, wenn keine Verkehrsstörung vorliegt, da sie sonst sehr hohe Werte annehmen kann, welche relativ starken Schwankungen ausgesetzt sind (vgl. Abschnitt 6.4).

Die FAR kann in der in Abschnitt 4.3.2 auf Seite 46 angegebenen Weise bestimmt werden. Im Rahmen einer weiteren Untersuchung sollte festgestellt werden, ob der Stabilisierungsindex als Kriterium zur Erkennung veränderter Verkehrsstörungen im Zusammenhang mit der FAR bei Prognoseverfahren genutzt werden kann.

5.6 Bewertung der Akzeptanz

Es wird vorgeschlagen, die Akzeptanz über den Befolgungsgrad zu bewerten, da dieser im Vergleich mit der echten Akzeptanz mit einfacheren und praktisch bewährten Methoden bestimmt werden kann. Darüber hinaus wird es im hier vorliegenden Kontext als weniger wichtig erachtet, zu unterscheiden, ob ein Verkehrsteilnehmer eine Anordnung nur befolgt, weil z. B. der Verkehrskontext eine Geschwindigkeitsüberschreitung nicht zulässt oder weil er grundsätzlich bereit ist, sich an Anordnungen von SBA zu halten. Dennoch muss bei der Bestimmung eines Befolgungsgrades sichergestellt werden, dass die Bewertung differenziert nach Kontextklassen stattfindet. Eine Zusammenfassung dieses differenzierten Bildes kann erfolgen, indem Befolgungsgrade für verschiedene Randbedingungen durch ein Gewichtungsverfahren miteinander verknüpft werden. Hierbei wird vorgeschlagen, dass eine Unterschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit während einer Verkehrsstörung sich nicht auf den Befolgungsgrad auswirken soll, da hier so eine besonders hohe Qualität bezüglich der Befolgung detektiert wird, der jedoch kein Nutzen entgegensteht.

Es wird vorgeschlagen, den Befolgungsindex nach Gleichung 10 zu bestimmen. In der Möglichkeit der Wichtung unterschiedlicher Überschreitungsklassen wird ein grundsätzlicher Vorteil dieser Vorgehensweise gesehen.

5.7 Zusammenfassende Qualitätsbewertung

Im Rahmen einer zusammenfassenden Bewertung sollte die Erkennungsgüte bzw. die Prognosegüte einzeln für jedes Verfahren zur Streckenbeeinflussung bestimmt werden, um diese vergleichend bewerten und einen Qualitätsmangel durch zielgerichtete Maßnahmen beheben zu können. Dabei wird vorgeschlagen, aus der Lage eines Punktes in der DR-FAR bzw. der PR-FAR-Ebene einen Qualitätsindex für die Erkennungsgüte I_{EG} bzw. die Prognosegüte I_{PG} zu gewinnen. Nachfolgend wird eine Möglichkeit vorgestellt, den Index für die Erkennungsgüte zu bestimmen, wobei die Vorgehensweise für die Prognosegüte analog ist.

Aus der DR und FAR für jede vorhandene Warnstufe $n = 1 \dots n_{\max}$ wird zunächst ein gewichteter Abstand vom Optimum (DR= 100 %, FAR= 0 %) ⁶⁷ bestimmt, der als Qualitätsindex $I_{EG,n}$ der Warnstufe n bezeichnet wird ⁶⁸:

$$I_{EG,n} = (100 - DR_n) + w_{FAR,n} \cdot FAR_n \quad (11)$$

Mit dem Gewicht $w_{FAR,n}$ kann festgelegt werden, in welchem Maße die FAR stärker oder schwächer in die Bewertung einfließt als die DR. Es wird empfohlen, die DR stärker zu gewichten als die FAR ($w_{FAR,n} < 1$), da diese für die Sicherheit der SBA von stärkerer Bedeutung ist.

Können durch ein Verfahren mehrere Warnstufen angegeben werden, sollten die zugehörigen Indizes durch gewichtete Mittelung zu einem Gesamtindex I_{EG} verknüpft werden:

$$I_{EG} = \sum_{n=1}^{n_{\max}} w_n \cdot I_{EG,n} \quad (12)$$

Es wird empfohlen, mit den Gewichten w_n ($n = 1 \dots n_{\max}$) solche Verfahren stärker in die Gesamtbewertung einfließen zu lassen, deren Schaltwunsch häufiger umgesetzt wird, da dies den Grad der Auswirkung eines Qualitätsmangels widerspiegelt.

5.8 Anwendungsmöglichkeiten

Zur praktischen Umsetzung der automatischen Qualitätsbewertung ist ein System geeignet, dass folgende Arbeitsschritte umsetzt:

- Erhebung und Vorverarbeitung der Eingangsgrößen
- Bestimmung der Qualitätsindizes für einzelne Qualitätsanforderungen
- Bestimmung der Qualitätsindizes für die zusammenfassende Bewertung mehrerer Qualitätsanforderungen
- Generierung einer Warnung oder eines Hinweises für das Bedienpersonal, wenn Qualitätsmängel erkannt werden
- Aggregation der Qualitätsindizes zur regelmäßigen Weitergabe an Führungskräfte der Leitstelle

⁶⁷ korrigiert nach Abgabe der Arbeit ⁶⁸ Gleichung 11 korrigiert nach Abgabe der Arbeit

Die Erkennung eines Qualitätsmangels sollte über Schwellenwerte für die einzelnen Qualitätsindizes erfolgen, die im Sinne einer politischen Entscheidung durch die Führungskräfte einer Leitstelle festzulegen sind. Eine Abstufung des Ausmaßes eines Qualitätsmangels kann über den Einsatz mehrerer Schwellenwerte für einen Index erfolgen. Jedoch wird empfohlen, die Anzahl der Parameter so gering wie möglich zu halten. Langfristig erscheint es sinnvoll, Richtlinien zu entwerfen, welche eine Hilfestellung für die Wahl der Schwellenwerte geben.

Wird ein Qualitätsmangel erkannt, bei dem die zeitnahe Einleitung einer Maßnahme angebracht ist, sollte eine Warnmeldung für den Bediener eines Leitstellenarbeitsplatzes erzeugt werden. Es wird empfohlen, derartige Warnungen in ein bestehendes System für das Ereignismanagement einzubinden. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass eine definierte Zuständigkeit für die Bearbeitung der Warnmeldung besteht, und es können automatisch jeweils geeignete Maßnahmen vorgeschlagen werden. Bei Qualitätsmängeln, die kein umgehendes Handeln erfordern, wird ein Hinweis an das Bedienpersonal als ausreichend erachtet. Es wird empfohlen, diese Hinweise zentral zu erfassen, so dass sie allen Bedienern zugänglich sind.

Um Führungskräfte über allgemeine Qualitätsdefizite zu informieren und eine Entscheidungshilfe zu gewähren, welche Priorität für bestimmte Verbesserungsmaßnahmen zu setzen ist, wird es als sinnvoll erachtet, Qualitätsindizes zu aggregieren und so aufzubereiten, dass eine schnelle Übersicht über grundsätzliche und bedeutsame Qualitätsdefizite möglich ist. Hierfür könnte die automatische Erstellung eines Wochen- oder Monatsberichts, welcher eine grafische Darstellung von räumlich und zeitlich aggregierten Werten ausgewählter Indizes enthält, zielführend sein.

Bei allen Erwägungen zu einem automatisierten Qualitätsbewertungssystem muss angestrebt werden, den Aufwand sowohl für die Einführung als auch für die Nutzung und Pflege so gering wie möglich zu gestalten, da die begrenzten Personalkapazitäten bei den Leitstellen die Einführung komplexer und aufwendiger Verfahren erschweren.

6 Simulation

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine mikroskopische Simulation des Verkehrsablaufs zur gegenüberstellenden Bewertung mehrerer Verfahren zur Streckenbeeinflussung durchgeführt. Hierzu wurde eine Simulationsumgebung entwickelt und implementiert, welche in Verbindung mit einer zur Verfügung stehenden Simulationssoftware genutzt wurde und Funktionen zur Umsetzung von Verkehrssteuerungsmaßnahmen sowie zur Auswertung der Simulation enthält. Zunächst werden die Schritte der Simulationsvorbereitung vorgestellt. Hierzu gehört auch eine Beschreibung des Aufbaus und der wichtigsten Funktionalitäten der Simulationsumgebung. Anschließend werden Randbedingungen für die Simulationsdurchführung dargelegt. Schließlich werden die Ergebnisse der Simulation zusammengefasst.

6.1 Vorbereitung

Zur Vorbereitung der Simulation wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Auswahl der Simulationssoftware
- Auswahl der Verfahren zur Streckenbeeinflussung
- Auswahl eines Streckenabschnittes für die Simulation
- Implementierung einer Simulationsumgebung einschließlich der Steuerverfahren
- Vorbereitung des Verkehrsnetzes und der Verkehrsnachfrage
- Test der Simulationsumgebung

6.1.1 Auswahl der Simulationssoftware

Zur Durchführung der Simulation standen folgende Softwarelösungen zur Verfügung:

- VISSIM (ein Produkt der PTV Aktiengesellschaft)
- SUMO (Simulation of Urban Mobility, ein Open-Source-Projekt⁶⁹)

Beide Anwendungen zeichnen sich dadurch aus, dass sowohl das Verkehrsgeschehen auf innerstädtischen Straßennetzen, als auch das auf Autobahnen simuliert werden kann. In beiden Fällen wird eine ausreichende Realitätstreue der Verkehrssimulation unterstellt.

Die Entscheidung wurde zugunsten von SUMO getroffen, da hier zum einen die Funktionsweise der Software einschließlich der zugrunde liegenden Verkehrsmodelle transparent sind. Darüber hinaus bestand die Möglichkeit der Zusammenarbeit mit Entwicklern der Software SUMO, so dass Informationen zur Funktionsweise und Verwendung leichter zugänglich waren und bei Bedarf eine Anpassung der Software leichter vorgenommen werden konnte. Darüber hinaus wurde die Möglichkeit gesehen, dass die Anwendung der Software im Rahmen dieser Arbeit Weiterentwicklungspotenziale insbesondere in Bezug auf den Anwendungsfall einer Simulation des Verkehrs auf einer Autobahn aufzeigen könnte.

⁶⁹ Umfassende Informationen zu SUMO enthalten die Webseiten des Projektes (<http://sumo.sourceforge.net/>)

Folgende Anwendungen, die Bestandteil des SUMO-Projektes sind, wurden im Rahmen dieser Arbeit verwendet:

- `netconvert.exe` zur Vorbereitung des Verkehrsnetzes
- `dfrouter.exe` zur Generierung einer Verkehrsnachfrage auf Basis von Detektormesswerten
- `sumo.exe` als Simulationssoftware ohne grafische Nutzeroberfläche
- `guisim.exe` als Simulationssoftware mit grafischer Nutzeroberfläche

6.1.2 Auswahl der Verfahren

Die in der Simulation berücksichtigten Verfahren zur Streckenbeeinflussung wurden nach den Gesichtspunkten des Aufwands für die Implementierung und Parametrierung sowie des zu erwartenden Nutzens der Simulationsergebnisse ausgewählt. Folgende Verfahren wurden in der Simulation gegenübergestellt:

- Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ
- Zuverlässigkeit des Verkehrs (Literaturvariante)
- Zuverlässigkeit des Verkehrs (Variante nach Heusch/Boesefeldt)

Es wurden Prognoseverfahren ausgewählt, da für diese Verfahrensklasse ein Potenzial zur Verbesserung und Weiterentwicklung gesehen wird. Das etablierte Steuerverfahren „Harmonisierung der Geschwindigkeit“ sollte einem anderen Prognoseverfahren gegenübergestellt werden, das ebenfalls Schaltprogramme mit mehreren Geschwindigkeitsstufen generieren kann. Dies trifft auf beide Varianten des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ zu. In der Simulation soll die Frage beantwortet werden, ob durch einen Ersatz des etablierten Verfahrens wesentliche Verbesserungen erzielt werden können. Die Festlegung, anhand welcher Kriterien dies beurteilt wird, wird in Abschnitt 6.3 erläutert.

Die genannten Verfahren zur präventiven Steuerung werden stets in Verbindung mit folgenden weiteren Verfahren genutzt:

- Stauwarnung nach MARZ (ohne Kriterium VKdiff)
- Unruhe im Verkehr nach MARZ

Da ein Stauwarnverfahren eine bezüglich der Sicherheit wichtige Komponente einer SBA darstellt, ist zu erwarten, dass die Realitätstreue der Simulation geringer ist, wenn auf ein solches verzichtet wird. Das Verfahren „Unruhe im Verkehr“ wird als sinnvolle Ergänzung gesehen, da das Verfahren „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ nicht über die Geschwindigkeitsstufe 120 km/h verfügt.

Zusätzlich zur Simulation des Verkehrs unter Verwendung dieser Verfahrenskombinationen wird der Fall untersucht, dass die SBA nicht aktiv ist. Dies bedeutet auch, dass in diesem Falle das Stauwarnprogramm und „Unruhe im Verkehr“ nicht genutzt werden.

In der Literatur konnten keine Hinweise darauf gefunden werden, dass eine vergleichende Analyse dieser Steuerverfahren für den gleichen Streckenabschnitt und für eine gleiche zugrunde liegende Verkehrsnachfrage durchgeführt wurde. Auch aus diesem Grunde erscheint eine Gegenüberstellung dieser Verfahren interessant.

6.1.3 Auswahl des Streckenabschnittes

Als Streckenabschnitt für die Simulation wurde der Abschnitt der Autobahn A 92 zwischen der Anschlussstelle Erding und dem Autobahndreieck München-Feldmoching ausgewählt. Dieser Abschnitt liegt im Norden des Großraums München. Es wird nur der Verkehr in Richtung des Autobahndreiecks Feldmoching simuliert. Der Abschnitt ist etwa 30 km lang und enthält sowohl Teilabschnitte mit zwei- als auch mit dreistreifigen Richtungsquerschnitten. Innerhalb des Abschnittes liegen sieben Anschlussstellen sowie das Autobahnkreuz Neufahrn. Der Streckenabschnitt wurde aus folgenden Gründen ausgewählt:

- Eine SUMO-kompatible Netzbeschreibung, die auf einer aktuellen digitalen Karte basiert, ist vorhanden.
- Verkehrsdaten zur Nachbildung der Verkehrsnachfrage sind in ausreichendem Umfang vorhanden.
- Der Streckenabschnitt hat eine ausreichende Länge.
- Der Streckenabschnitt verfügt über eine SBA, jedoch nicht über Zuflussdosierungsanlagen oder eine dynamische Seitenstreifenfreigabe.
- Der Streckenabschnitt verfügt über mehrere Eigenschaften, die eine Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse auf andere Autobahnabschnitte begünstigen:
 - sowohl zwei- als auch dreistreifige Richtungsquerschnitte
 - teilweise starke abgehende und zufließende Verkehrsströme (insbesondere am Autobahnkreuz Neufahrn)
 - sowohl Abschnitte mit eher radialem als auch solche mit eher tangenialem Charakter (östlich bzw. westlich des Autobahnkreuzes Neufahrn)
 - vermutlich sowohl Pendlerverkehr als auch Fernverkehr

6.1.4 Auswahl der Verkehrsdaten

Durch das Projekt DELFI⁷⁰, an welchem sowohl das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt als auch die Autobahndirektion Südbayern beteiligt sind, standen Verkehrsdaten zur Verfügung, die zur Nachbildung einer Verkehrsnachfrage für SUMO verwendet werden konnten. Aus den verfügbaren Verkehrsdaten wurden solche für einen Zeitraum ausgewählt, in dem

- die Verkehrsbelastung relativ hoch ist,
- keine Lücken in den Verkehrsdaten auftreten, bei denen mehr als 15 aufeinanderfolgende Minutenwerte fehlen und
- zwischen zwei Datenlücken stets wenigstens zwei Minutenwerte vorhanden sind.

Es wurden Verkehrsdaten für Montag, den 4. August 2008 zwischen 5:00 Uhr und 10:00 Uhr verwendet, da innerhalb dieses Zeitraumes eine ausgeprägte Frühspitze in den Verkehrsdaten zu erkennen war und die genannten Bedingungen bezüglich der Datenlücken erfüllt sind. Verbleibende kleinere Datenlücken werden mittels eines zu diesem Zweck entwickelten Algorithmus durch Einsetzen plausibler Werte geschlossen (vgl. Abschnitt 6.2.7 auf Seite 68).

⁷⁰ Durchgängige Elektronische Fahrplaninformation

6.1.5 Festlegung der Mess- und Anzeigequerschnitte

Die Lage der MQ im realen Verkehrsnetz war bekannt, da die Daten dieser Detektoren zur Generierung der Verkehrsnachfrage genutzt wurden. Es wurde jedoch angestrebt, hiervon unabhängige Detektorstandorte festzulegen. Dies geschah aus dem Grunde, dass der betrachtete Streckenabschnitt über eine relativ hohe Dichte an MQ verfügt, welche jedoch nach Erkenntnissen aus den Expertenbefragungen nur in einigen Fällen vorzufinden ist. Die Lage der AQ wurde auf der Grundlage von Luftbildern [26] festgelegt, wobei jedoch eine Verwechslung mit Schilderbrücken für die statische oder dynamische Wegweisung nicht auszuschließen ist. Die vermuteten Standorte der AQ haben jedoch Abstände zwischen ca. 1.300 und 2.300 m, so dass sie als realistisch eingeschätzt werden.

Die Standorte der MQ wurden so gewählt, dass sie folgende Bedingungen erfüllen:

- Die MQ haben Abstände von ca. 1.400 m zueinander. Bei Notwendigkeit wurde ein geringerer Abstand gewählt, jedoch 1.000 m nicht unterschritten.
- Die MQ liegen stromabwärts des zugehörigen AQ mit einem Abstand von mindestens 250 m.
- Zwischen zwei AQ liegt mindestens ein MQ.
- Die MQ liegen nicht in unmittelbarer Nähe zu einer Anschlussstelle.

Einem AQ werden stets alle MQ zugeordnet, die stromabwärts des AQ, aber noch vor dem nachfolgenden AQ liegen.

6.2 Die Simulationsumgebung

Als *Simulationsumgebung* werden zusammenfassend sämtliche Softwarekomponenten bezeichnet, die während der Simulationsdurchführung benötigt werden, jedoch nicht Teil der Simulationssoftware SUMO sind. Alle Komponenten der Simulationsumgebung wurden in der Skriptsprache Python implementiert. Die Ausführung erfolgte objektorientiert, wobei eine grundsätzliche Abgrenzung von Parameterklassen, Inhaltsklassen, Methodenklassen und Analyseklassen gewahrt wurde. Hierdurch soll ein hohes Maß an Erweiterbarkeit und Änderbarkeit erreicht werden.

6.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Die Simulationsumgebung umfasst vier Funktionskomplexe, die in ein übergeordnetes Rahmensystem eingebettet sind. Im Rahmensystem wird der Simulationslauf gesteuert, die Methoden der einzelnen Funktionskomplexe aufgerufen und Datenobjekte zwischen den Funktionskomplexen ausgetauscht.

Während der Simulation werden zu jedem Zeitschritt an den MQ Verkehrskenngrößen abgefragt und aggregiert. Diese werden zur Berechnung weiterer Verkehrskenngrößen herangezogen, wobei grundsätzlich die Vorgehensweise nach MARZ gewählt wurde. Diese Arbeitsschritte gehören dem Funktionskomplex „Verkehrsdatenanalyse“ an (vgl. Abschnitt 6.2.3).

In festgelegten Zeitabständen werden auf der Grundlage der Verkehrsdaten die für die Steuerverfahren benötigten Kennwerte bestimmt. Auf dieser Grundlage erfolgt anschließend die Maßnahmenauswahl. Zu jedem Zeitschritt der Simulation erfolgt eine Übertragung der ausgewählten Maßnahmen an alle Fahrzeuge, die sich in einem definierten Sichtbereich vor einem AQ befinden. Diese Aufgaben

stellen den Kern des Funktionskomplexes „Situationsbewertung und Maßnahmenauswahl“ dar (vgl. Abschnitt 6.2.4).

Um das Auftreten von Verkehrsstörungen künstlich herbeiführen zu können, wurden Szenarien implementiert, mit denen innerhalb eines definierten Zeitraums zu jedem Zeitschritt und an bestimmten Eingriffsquerschnitten Fahrzeuge verlangsamt, angehalten oder zu einem anderen Ziel gelenkt werden können. Diese Funktionalität ist dem Komplex „Szenarien“ zugeordnet (vgl. Abschnitt 6.2.5).

Für die Auswertung werden während der Simulation Verkehrskenngrößen, Entscheidungsgrößen und Anzeigezustände festgehalten. Gleichzeitig wird durch SUMO eine XML⁷¹-Datei erzeugt, die insbesondere Informationen zu Reisezeiten enthält. Am Ende der Simulation werden auch diese Informationen ausgewertet. Diese Simulationsergebnisse werden in Textdateien geschrieben, welche eine grafische Darstellung einzelner Zusammenhänge mittels der Software Gnuplot ermöglichen. Diese Arbeitsschritte sind Teil des Funktionskomplexes „Auswertung“ (vgl. Abschnitt 6.2.6).

6.2.2 Interaktion mit SUMO

Zur Kommunikation mit externen Anwendungen ist in SUMO eine TCP/IP⁷²-Schnittstelle implementiert. Diese Schnittstelle trägt die Bezeichnung Traffic Control Interface (TraCI), da sie insbesondere die Verwendung in SUMO nicht implementierter Steueralgorithmen ermöglicht. Diese Schnittstelle wurde zur Realisierung einer Kommunikation zwischen SUMO und der Simulationsumgebung genutzt.

6.2.3 Funktionskomplex „Verkehrsdatenanalyse“

Der Funktionskomplex „Verkehrsdatenanalyse“ erfüllt im Wesentlichen folgende Aufgaben:

- Erfassung der Fahrgeschwindigkeit und des Fahrzeugtyps aller Fahrzeuge, die einen MQ passieren
- Zählung der Fahrzeuge getrennt nach Pkw/ Lkw
- Kurzzeitspeicherung der Geschwindigkeiten getrennt nach Pkw/ Lkw
- Kurzzeitspeicherung der Fahrzeugidentifikationsnummern (Vermeidung von Mehrfachzählungen)
- Bildung der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke und mittleren Geschwindigkeit für Pkw und Lkw
- Bestimmung weiterer lokaler Verkehrskenngrößen nach MARZ
- Glättung und Trendprognose nach MARZ
- Bestimmung von k bzw. $\ln k$, σ^2 und q für beide Varianten des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“

Die Funktionen zur Durchführung dieser Aktivitäten sind Methoden der Klasse `LCSMeasurementOperator`. Die Messergebnisse werden als Eigenschaften der Klasse `LCSMeasurementContent` festgehalten. Parameter für die Verkehrsdatenanalyse sind in den Eigenschaften der Klasse `LCSMeasurementParams` definiert.

⁷¹ Extended Markup Language ⁷² Transmission Control Protocol/ Internet Protocol

6.2.4 Funktionskomplex „Situationsbewertung und Maßnahmenauswahl“

Im Rahmen des Funktionskomplexes „Situationsbewertung und Maßnahmenauswahl“ werden vor allem folgende Arbeitsschritte umgesetzt:

- Bestimmung von Kennwerten für alle aktivierten Situationsbewertungsverfahren
 - Unruheindikator nach MARZ
 - Kennwerte Φ und m für beide Varianten des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“
 - Verkehrsstufe nach MARZ
 - VKdiff nach MARZ⁷³
- Bestimmung von Schaltvorschlägen für alle aktivierten Steuerverfahren
- Maßnahmenbewertung
- Längsabweichung
- Übermittlung der Maßnahmen an die Verkehrsteilnehmer

Die im Rahmen der Situationsbewertung bestimmten Kennwerte beziehen sich ebenso wie die Messwerte auf MQ. Schaltvorschläge und Anzeigezustände sind AQ zugeordnet. Die Übertragung der Schaltzustände erfolgt an jedes Fahrzeug, das sich in einem festgelegten Bereich im Vorfeld eines AQ befindet, welcher als Sichtbereich interpretiert werden kann und jeweils eine Länge von ca. 100 m hat. Bei der Übermittlung einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit wird diese mit einem vom Fahrzeugtyp und der Anzeigegeschwindigkeit abhängigen Toleranzfaktor multipliziert. Auf diese Weise wird ein je nach Fahrzeugtyp und Fahrer unterschiedliches Akzeptanzverhalten modelliert.

Die Funktionen für die Situationsbewertung und Maßnahmenauswahl sind in den Methoden der Klasse `LCSCControlOperator` verankert. Kennwerte und Anzeigezustände werden in Eigenschaften der Klasse `LCSCControlContent` abgelegt; Parameter der Situationsbewertungs- und Steuerverfahren sind in denen der Klasse `LCSCControlParams` enthalten. Letztere Klasse verfügt darüber hinaus auch über boolesche Parameter zur Aktivierung bzw. Deaktivierung einzelner Situationsbewertungs- und Steuerverfahren.

6.2.5 Funktionskomplex „Szenarien“

Der Funktionskomplex „Szenarien“ umfasst die Beeinflussung von Verkehrsteilnehmern an festgelegten *Einflussquerschnitten* und zu festen Zeitpunkten. Es wurden folgende Eingriffsmöglichkeiten implementiert:

- Umleitung eines Verkehrsstromes
- Verlangsamung oder Anhalten des Verkehrsflusses

Die Umleitung wird durch Zuweisung eines neuen Fahrtzieles zu allen den Einflussquerschnitt passierenden Fahrzeugen erreicht. So kann z. B. die Sperrung eines Autobahnabschnittes simuliert werden, indem alle Fahrzeuge auf eine Ausfahrt umgeleitet werden.

⁷³ VKdiff wurde in der Simulation nicht berücksichtigt.

Die Verlangsamung eines Verkehrsstromes wird durch Zuweisung einer niedrigen Höchstgeschwindigkeit zu einzelnen Fahrzeugen erreicht. Wird den Fahrzeugen die Höchstgeschwindigkeit 0 zugewiesen, werden sie angehalten. Es kann festgelegt werden, zu welchen Zeitpunkten eine solche Störung des Verkehrsablaufes einsetzt, wie lange sie allgemein dauert und wie lange jedes einzelne Fahrzeug die geringe Geschwindigkeit zu halten hat.

Für die Simulation wurde lediglich das zuletzt genannte Szenario genutzt. Die oben beschriebenen Funktionalitäten sind Methoden der Klasse `LCSScenarioOperator`. Eine zugehörige Inhalts- oder Parameterklasse existiert nicht.

6.2.6 Funktionskomplex „Auswertung“

Im Rahmen der Auswertung werden Simulationsergebnisse in einer Weise zusammengefasst, dass sie mit der Visualisierungssoftware Gnuplot grafisch dargestellt werden können. Hierbei werden Daten aus folgenden Quellen genutzt:

- Messwerte aus dem Objekt der Klasse `LCSMeasurementContent`
- Kennwerte, Schaltwünsche und Schaltzustände aus dem Objekt der Klasse `LCSControlContent`
- Kantenbezogene Kenngrößen (vor allem Reisezeiten) aus einer XML-Ausgabedatei der Simulation

Die Daten aus den ersten beiden Quellen werden während der Simulation gesammelt, während die aus der letzten Quelle erst am Ende der Simulation ausgewertet werden kann. Für einige Größen erfolgt eine zusätzliche Mittelung der Werte für jede Stunde des Simulationszeitraumes. Die Auswertungsfunktionalität ist in der Klasse `LCSView` verankert.

Zur Erleichterung der Erzeugung einer grafischen Aufbereitung der Ergebnisse wird automatisch ein Befehlskript für Gnuplot erstellt. Mit diesem kann eine ausgewählte Menge grafischer Darstellungen als Abbildungen im PNG⁷⁴-Format erzeugt werden.

Das Skript `calcAverages.py`, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, aber nicht Teil der Simulationsumgebung ist, kann im Anschluss an die Simulation aufgerufen werden. Es ermöglicht eine Mittelwertbildung für ausgewählte Bewertungsgrößen über den gesamten Zeitraum der Simulation.

6.2.7 Vorbereitung des Verkehrsnetzes und der Verkehrsnachfrage

Zur Erstellung eines Verkehrsnetzes für SUMO standen XML-Dateien zur Verfügung, welche jeweils eine Beschreibung der Kanten und Knoten sowie fahstreifenweise Verbindungsdefinitionen zwischen benachbarten Kanten enthalten. Diese wurden mit Hilfe der Anwendung `netconvert.exe` in eine XML-Datei zur Beschreibung des Netzes überführt, welche der Simulation zugrunde liegt.

Zur Vor- und Nachbereitung der Verkehrsnachfragegenerierung wurden im Rahmen dieser Arbeit die Python-Skripte `plotSourceData.py`, `patchSourceData.py` und `patchRoutesEmitters.py` entwickelt.

Die für die Generierung der Verkehrsnachfrage benötigten Verkehrsdaten, welche als Minutenwerte zur Verfügung standen, wurden zunächst konvertiert und mittels des Skriptes `plotSourceData.py` aus-

⁷⁴ Portable Network Graphics

gewertet. Die Auswertung umfasste nicht nur eine grafische Aufbereitung der Detektordaten, die für die Auswahl der Datengrundlage für die Simulation herangezogen wurde, sondern auch eine Bestimmung stündlicher Mittelwerte des Lkw-Anteils. Mithilfe des Skriptes `patchSourceData.py` wurden die Verkehrsdaten für die Erstellung der Verkehrsnachfrage vorbereitet. Hierzu gehört eine Filterung der Daten zur Beschränkung auf den gewählten Bezugszeitraum sowie eine Erkennung von Lücken in den Verkehrsdaten, welche, sofern nicht mehr als 15 aufeinanderfolgende Minutenwerte fehlen und die Datenlücken nicht zu dicht aufeinanderfolgen, durch synthetische Daten geschlossen werden, welche vom Mittelwert und der Entwicklung der die Datenlücke umgebenden Minutenwerte abhängen. In den ausgewählten Verkehrsdaten wurden keine Datenlücken erkannt, die nicht geschlossen werden konnten. Eine weitere Funktion des Skriptes `patchSourceData.py` besteht darin, die Verkehrsstärkewerte in den Detektordaten um einen parametrierbaren Faktor zu erhöhen oder zu senken. Auf diese Weise wurden Verkehrsdaten sowohl mit einfacher als auch mit doppelter Verkehrsstärke generiert, welche in den folgenden Schritten der Vorbereitung getrennt voneinander verarbeitet wurden und die Grundlage für verschiedene Simulationsszenarien bildeten.

Die aufbereiteten Verkehrsdaten wurden durch die SUMO-Anwendung `dfconfig.exe` in eine Verkehrsnachfrage überführt. Diese Anwendung erzeugt zum einen eine Definition zulässiger Fahrtrouten im simulierten Netz und zum anderen Emitterdefinitionen. Emitter sind an den Einfahrten in das betrachtete Netz positionierte Objekte, welche während der Simulationszeit zu festgelegten Zeitpunkten Fahrzeuge ausstoßen, denen jeweils eine bestimmte Fahrtroute zugewiesen ist. Die Anzahl der ausgestoßenen Fahrzeuge hängt von der Verkehrsstärke der zugrunde liegenden Verkehrsdaten ab. Sowohl die Routen- als auch die Emitterdefinitionen sind im XML-Format gegeben.

In einem weiteren Schritt wurden mithilfe des Skriptes `patchRoutesEmitters.py` die Routen- und Emitterdefinitionen so modifiziert, dass die ausgestoßenen Fahrzeuge mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit einem bestimmten Fahrzeugtyp angehören. Für jeden Fahrzeugtyp wurde eine Wahrscheinlichkeit dafür angegeben, dass ein ausgestoßenes Fahrzeug von diesem Typ ist. Diese Wahrscheinlichkeit hängt von einem festen Parameter und dem zuvor durch `plotSourceData.py` ermittelten Lkw-Anteil ab. Da der Lkw-Anteil als stundenweise berechneter Mittelwert vorliegt, wird für jede Stunde des Simulationszeitraumes je ein Emitter definiert, welcher innerhalb der entsprechenden Stunde Fahrzeuge ausstößt und während der übrigen Simulationszeit passiv bleibt. Auf diese Weise kann einem während der Simulationszeit veränderlichen Lkw-Anteil durch eine Anpassung der Fahrzeugzusammensetzung begegnet werden. Die so erzeugten Routen- und Emitterdaten bilden neben der Netzdefinition die Grundlage der Simulation.

6.2.8 Test der Simulationsumgebung

Im Rahmen einer Testphase wurde die Simulationsumgebung, das Netz und die Verkehrsabläufe untersucht. Hierzu wurde im Gegensatz zur späteren Simulation die SUMO-Anwendung `guisim.exe` verwendet, da diese über eine grafische Nuter Oberfläche verfügt, wodurch die Erkennung von Problemen erleichtert wird.

Während der Testphase wurde die Simulationsumgebung und das Netz angepasst sowie die Verfahren zur Streckenbeeinflussung parametrierbar. Die Parametrierung der Verfahren nach MARZ wurde auf der Grundlage der entsprechenden Vorgaben für die Erstversorgung durchgeführt, von denen nur bei Bedarf abgewichen wurde. Die Wahl der Schwellenwerte für beide Varianten des Ferrari-Verfahrens erfolgte in Anlehnung an grundsätzliche Empfehlungen aus [15] und [23]. Eine weitergehende Optimierung der

Parameter konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden.

Bei der Überprüfung der Literaturvariante des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ wurde erkannt, dass eine Schätzung der Varianz σ^2 anhand zuvor bestimmter Werte der Abweichungen der individuellen Geschwindigkeiten vom Geschwindigkeitsniveau sowie anhand des von der Verkehrsdichte abhängigen Parameters λ zu großen Schwankungen und extrem hohen Werten der Steigung m der Regressionsgeraden führt. Somit erreicht der Zuverlässigkeitskennwert Φ häufig Werte, die weit unter 0 liegen. Dieses Verhalten tritt in weniger starkem Maße auf, wenn die unmittelbar gemessene Varianz der Fahrgeschwindigkeiten σ_v^2 anstelle der auf der Basis der Modells geschätzten Varianz der Geschwindigkeitsabweichungen verwendet wird. Darüber hinaus wurde eine Glättung der Verkehrsdichte und -stärke für sinnvoll erachtet und in die Implementierung des Verfahrens eingebettet. Beide Verbesserungsmaßnahmen waren für die Variante des Verfahrens nach Heusch/Boesefeldt nicht erforderlich.

6.2.9 Verbesserungspotenziale der Software SUMO

In den Tests wurde deutlich, dass SUMO Verbesserungspotenziale bezüglich der Fahrstreifenwahl im Umfeld von Knotenpunkten auf Autobahnen aufweist. Bei dichtem Verkehr zeigte sich vor allem das Problem, dass das Einordnen im Vorfeld eines Knotenpunktes allgemein relativ spät erfolgt. An einer bestimmten Stelle vor der Verzweigung versuchen Fahrzeuge, den gewünschten Fahrstreifen zu erreichen. Dies führt zu einer starken Verlangsamung bis hin zum Halt mehrerer Fahrzeuge. Fahrzeuge, die sich auf dem linken Fahrstreifen befinden und nach rechts wechseln möchten und solche, die in die entgegengesetzte Richtung wechseln möchten, behindern sich gegenseitig, so dass es zu einer Blockade kommt. Ist der Zufluss für diesen Störungsbereich hinreichend groß, löst sich die Störung nicht auf. Das Problem tritt auch auf, wenn in den zugrunde liegenden Verkehrsdaten keine Verkehrsstörung erkennbar ist. Das Problem wurde durch eine innerhalb der Simulationsumgebung implementierten Funktion behoben. In dieser wird an zwei AQ im Vorfeld der Verzweigung, an der die Störungen festgestellt wurden, Fahrtziele der passierenden Fahrzeuge abgefragt. Wird zum Erreichen des Fahrtzieles dieser Fahrzeuge ein Fahrstreifenwechsel notwendig, wird dieser bereits an den AQ über die TraCI-Schnittstelle angefordert, so dass die Mehrheit der Fahrstreifenwechsel frühzeitiger und verteilt über einen längeren Streckenabschnitt stattfindet. Mit dieser Hilfsfunktion konnte erreicht werden, dass dieses Problem in geringerem Maße besteht. Es wird vorgeschlagen, diese Funktionalität zumindest für die Simulation des Verkehrs auf Autobahnen in SUMO zu übernehmen.

Ein weiteres Verbesserungspotenzial besteht durch die Tatsache, dass in SUMO Geschwindigkeitsbeschränkungen nicht überschritten werden. Zwar könnte die für eine Kante gültige zulässige Höchstgeschwindigkeit mit einer Toleranz beaufschlagt werden, jedoch gilt diese für alle Fahrzeuge ohne Berücksichtigung ihres Typs, sofern eine dem Fahrzeug zugewiesene Höchstgeschwindigkeit nicht überschritten wird. Um einen in der Realität auftretenden unterschiedlichen Befolgungsgrad für verschiedene Fahrzeugtypen und Fahrergruppen zu simulieren, ist es erforderlich, nicht die zulässige Höchstgeschwindigkeit der Kante, sondern die einzelner Fahrzeuge anzupassen. Dies führt insbesondere bei einer hohen Anzahl von Fahrzeugen im Netz zu einer sehr niedrigen Simulationsgeschwindigkeit. Es wird daher vorgeschlagen, bei der Definition von Fahrzeugtypen die Vorgabe eines Toleranzparameters vorzusehen. Dieser sollte zur Bestimmung einer Wahlgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit der Kante herangezogen werden, was innerhalb der Software SUMO erfolgen kann, so dass die häufige Nutzung der TraCI-Schnittstelle vermieden wird.

6.3 Durchführung der Simulation

Die Simulation wurde jeweils für einen fünfstündigen Zeitraum an einem Montagmorgen auf einem ca. 30 km langen Autobahnabschnitt durchgeführt. Die Auswertung erfolgte an festgelegten *Untersuchungsfeldern* (UF), die jeweils aus einer oder mehreren aufeinander folgenden Kanten des Verkehrsnetzes, einem AQ und den zugeordneten MQ besteht. Eine Kante ist in diesem Zusammenhang ein Objekt des in SUMO verwendeten Verkehrsnetzes und i. d. R. kürzer als der Streckenabschnitt zwischen zwei Knotenpunkten des realen Verkehrsnetzes. Folgende Größen wurden je UF und Simulationslauf zur Bewertung der Ergebnisse herangezogen:

- Anteil der Stauzeiten an der Gesamtdauer eines Simulationslaufes
- Mittelwert der Verkehrsstufe (nach MARZ) über die Dauer der Simulation
- Mittelwert der Reisezeit über die Dauer der Simulation
- Mittelwert der normierten Reisezeit über die Dauer der Simulation

Als Stauzeit gilt die Zeit, in der für einen AQ durch das Verfahren „Stauwarnung nach MARZ“ ein Stau festgestellt wurde, wobei das Kriterium VKdiff nicht genutzt wird. Ein Stau wird also festgestellt, wenn die Belegung oberhalb und die Geschwindigkeit unterhalb bestimmter Grenzwerte liegen und außerdem die Verkehrsstufe Z4 (Stau) vorliegt. Die Bestimmung der Stauzeitanteile erfolgt durch Bildung des arithmetischen Mittels der Zahlenwerte 0 für Zeiträume, in denen kein Stau vorliegt bzw. 1 für Stauzeiten über die gesamte Dauer der Simulation.

Die Mittelwertbildung der jeweils für MQ bestimmten Verkehrsstufen erfolgt, indem der Verkehrsstufe Z1 der Zahlenwert 1 und analog den übrigen Verkehrsstufen die Zahlenwerte 2, 3 und 4 zugeordnet werden. Aus diesen Zahlenwerten wird über die Dauer der Simulation das arithmetische Mittel gebildet. Es ist zu beachten, dass bei Auftreten der Verkehrsstufe Z4 zwar Stau gemäß der Stauwarnung nach MARZ vorliegt, jedoch umgekehrt die Feststellung eines Staus durch das Stauwarnverfahren nicht impliziert, dass die Verkehrsstufe Z4 vorliegt.

Die Reisezeit ist die Zeit, die ein Fahrzeug zur vollständigen Durchquerung der dem UF zugeordneten Kante benötigt. Sie wird zunächst für jede Kante des UF einzeln erhoben und einer arithmetischen Mittelung über die gesamte Dauer der Simulation unterzogen. Anschließend werden die Reisezeiten aller Kanten des UF addiert. Dies entspricht der mittleren Reisezeit für die Durchfahrt durch das gesamte UF.

Die normierte Reisezeit ist die Reisezeit für die Durchfahrt eines Streckenabschnittes mit einer Länge von 1 km. Sie wird als der Quotient aus der Reisezeit für die Durchfahrt einer Kante und der Länge der Kante berechnet. Auch die normierte Reisezeit wird zunächst für jede Kante des UF bestimmt und jeweils durch Bilden des arithmetischen Mittels über die Dauer der Simulation aggregiert. Aus den mittleren normierten Reisezeiten wird schließlich ein bezüglich der Kantenlänge gewichteter Mittelwert gebildet, welcher die mittlere normierte Reisezeit über die Dauer der Simulation und gültig für die Länge des UF darstellt.

Jede der in Abschnitt 6.1.2 genannten Verfahrenskombinationen einschließlich des Falles der nicht aktiven SBA wurde unter Verwendung folgender drei Szenarien in jeweils einem Simulationslauf untersucht:

- „doppelte Verkehrsstärke“
- „vorübergehende Verkehrsstörungen“
- beide o. g. Szenarien

Im Szenario „doppelte Verkehrsstärke“ wurden die Verkehrsdaten, die der Nachbildung der Verkehrsnachfrage zugrunde liegen, so manipuliert, dass die Verkehrsstärke der Detektoren auf der Hauptfahrbahn jeweils verdoppelt und die der Zu- und Abfahrten unverändert übernommen wurden. Durch die sehr hohe Verkehrsbelastung bilden sich während der Simulation Verkehrsstörungen. Es werden Bewertungsgrößen an drei UF erhoben (vgl. Tabelle 4 in Anhang E).

Im Szenario „vorübergehende Verkehrsstörungen“ wird eine unveränderte Verkehrsstärke zugrunde gelegt, jedoch werden an zwei verschiedenen Einflussquerschnitten in bestimmten Zeitabständen vorübergehend sämtliche Fahrzeuge stark verlangsamt, so dass eine Verkehrsstörung entsteht. Neben den drei bereits für das Szenario „doppelte Verkehrsstärke“ verwendeten UF werden zwei weitere definiert, welche unmittelbar stromaufwärts der Einflussquerschnitte liegen, an denen die Störungen induziert werden (vgl. Tabelle 9 in Anhang E).

Es soll festgestellt werden, ob die Wahl des Prognoseverfahrens zu einer Verbesserung der Verkehrssituation unter gleichen Bedingungen, also zu einer Verringerung der Stauzeitanteile, der mittleren Verkehrsstufe sowie der Reisezeiten führt. Gleichzeitig soll festgestellt werden, wie groß die Verbesserung im Vergleich zum Fall mit nicht aktiver SBA ist.

Für die Simulation wurde die Anwendung `sumo.exe` verwendet, welche nicht über eine grafische Nutzeroberfläche verfügt.

6.4 Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse werden zunächst einzeln für die drei zuvor beschriebenen Szenarien vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse. Zahlenwerte der Bewertungsgrößen können Anhang E entnommen werden. In den Abbildungen werden, sofern nicht anders angegeben, über alle UF aggregierte Ergebnisse dargestellt. Zur Bezeichnung der verwendeten Steuerverfahren werden in den grafischen Darstellungen und im Anhang folgenden Schlüssel verwendet:

OHNE: SBA inaktiv

HARM: Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ

FERR: Zuverlässigkeit des Verkehrs (Literaturvariante)

FERRHB: Zuverlässigkeit des Verkehrs (Variante nach Heusch/Boesefeldt)

Im Szenario „doppelte Verkehrsstärke“ (siehe Abbildung 4) konnte keines der verwendeten Steuerverfahren eine Verbesserung bezüglich der Stauzeiten herbeiführen. Auch bezüglich der mittleren Verkehrsstufe konnten nur sehr geringe Verbesserungen festgestellt werden. Eine deutliche Verbesserung stellte sich bezüglich der Reisezeiten bei Verwendung der Verfahren „Harmonisierung der Geschwindigkeit“

und der Variante nach Heusch/Boesefeldt des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ ein. Durch die Literaturvariante des letzteren Verfahrens konnte die Reisezeit in wesentlich geringerem Maße verbessert werden.

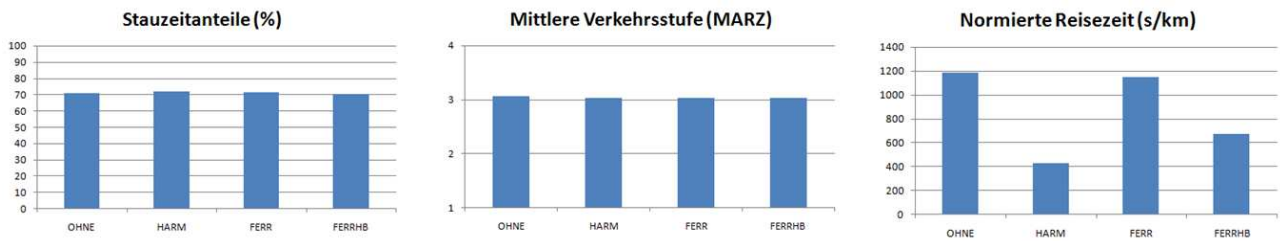


Abbildung 4: Simulationsergebnisse Szenario „doppelte Verkehrsstärke“

Die Ergebnisse des Szenarios „vorübergehende Störungen“ liefern hiervon abweichende Erkenntnisse. An den UF 4 und 5, welche unmittelbar stromabwärts der Störungsstellen liegen, wurde eine deutliche Abnahme der Stauzeitanteile bei Verwendung der Steuerverfahren im Vergleich zum Versuch mit inaktiver SBA-Steuerung erkennbar, welche das Nutzenpotenzial der präventiven Steuerverfahren in diesem Szenario aufzeigt. Hierbei konnten bei beiden Varianten des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ Verbesserungen in etwas höherem Ausmaß erreicht werden als mit dem Verfahren „Harmonisierung der Geschwindigkeit“. Es sollte jedoch untersucht werden, ob diese Aussage sich auch bei einer wiederholten Durchführung der Simulation halten lässt. Durch keines der verwendeten Steuerverfahren konnten Verbesserungen bezüglich der mittleren Verkehrsstufe oder der Reisezeit festgestellt werden. Bei den UF 1 bis 3, welche abseits der Störungsstellen liegen, wurden weder mit noch ohne Verwendung der SBA-Steuerung Verkehrsstörungen festgestellt. Es ist anzunehmen, dass hier keines der Steuerverfahren wirksam wurde und somit Schwankungen der Bewertungsgrößen nicht auf die SBA-Steuerung zurück geführt werden können. Daher wurden die Ergebnisse aus diesen UF nicht grafisch dargestellt.

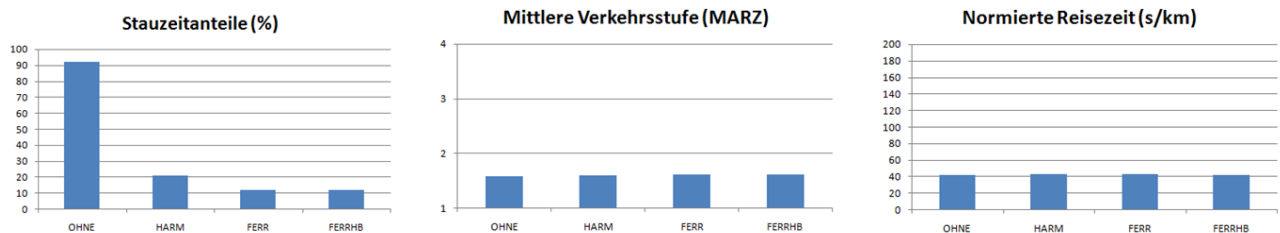


Abbildung 5: Simulationsergebnisse Szenario „vorübergehende Störungen“, UF 4 und 5

Bei gleichzeitiger Verwendung beider Szenarien stellten sich an den UF 1 bis 3 ähnliche Ergebnisse wie im Szenario „doppelte Verkehrsstärke“ ein. Auffällig ist, dass bei Verwendung der Steuerverfahren im Vergleich mit dem Falle einer inaktiven SBA-Steuerung eine teilweise erhebliche Erhöhung der Reisezeiten vorliegt. An den UF 4 und 5 kann durch die Verwendung der Steuerverfahren im Vergleich zum Versuch mit inaktiver SBA-Steuerung eine deutliche Verbesserung der Reisezeiten erzielt werden, welche sich gleichermaßen für alle Verfahren einstellte. Keines der Verfahren konnte hingegen eine Verbesserung der mittleren Verkehrsstufe bewirken. Bezüglich der Reisezeiten stellten sich jeweils unterschiedliche Ergebnisse für die UF 4 und 5 ein. Während in UF 5 keine wesentliche Veränderung der Reisezeit zu erkennen war, ist diese in UF 4 starken Schwankungen unterworfen. Nach

den Ergebnissen scheint einzig die Variante nach Heusch/Boesefeldt des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ geeignet, im vorliegenden Szenario Reisezeitverbesserungen zu erzielen. Jedoch ist zu beachten, dass während der Testphase Ergebnisse erzielt wurden, in denen dieses Verfahren wesentlich schlechtere und ein anderes wesentlich bessere Reisezeitwerte lieferten. Es wird daher festgestellt, dass die Reisezeitwerte aufgrund der starken, scheinbar zufälligen Schwankungen nicht interpretiert werden können.

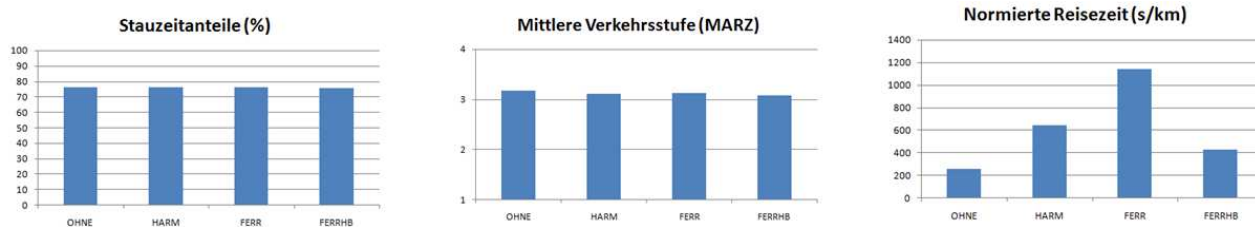


Abbildung 6: Simulationsergebnisse beide Szenarien, UF 1 bis 3

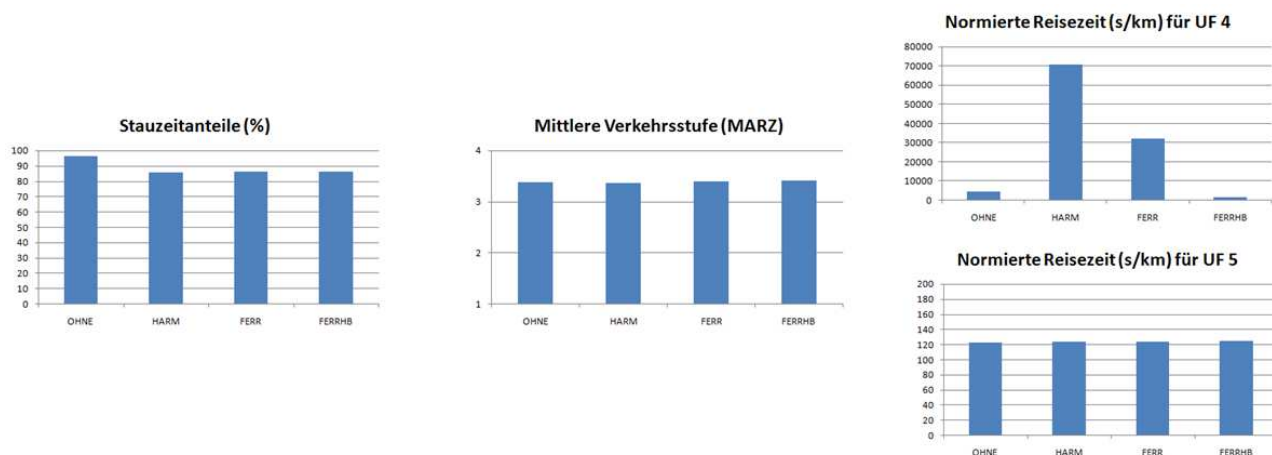


Abbildung 7: Simulationsergebnisse beide Szenarien, UF 4 und 5

Insgesamt legt das Simulationsergebnis die Erkenntnis nahe, dass die Wahl des Verfahrens zur präventiven Steuerung nur wenig Verbesserungspotenzial bietet. Da der Aufwand für die Implementierung eines neuen Verfahrens jedoch beträchtlich ist, sollte hierauf verzichtet werden.

Das Nutzenpotenzial der präventiven Steuerverfahren zeigte sich im Szenario „doppelte Verkehrsstärke“ in einer Verbesserung der Reisezeit als Bewertungsmerkmal für die Leistungsfähigkeit, während im Szenario „vorübergehende Störungen“ vor allem eine Verringerung der Stauzeiten zu verzeichnen war, worin ein Nutzenzuwachs bezüglich der Sicherheit gesehen werden kann.

Bei stark ausgeprägten Verkehrsstörungen erscheint die Bewertungsgröße der Reisezeit nicht geeignet, da sie selbst nach Mittelung über einen Simulationszeitraum von fünf Stunden für verschiedene Simulationsläufe unter gleichen oder ähnlichen Bedingungen stark unterschiedliche Ergebnisse liefert. Allgemein kann außerdem festgestellt werden, dass Reisezeitverluste durch die SBA-Steuerung nicht als Mangel zu sehen sind, solange nicht ausgeschlossen werden kann, dass diese durch restriktive Warnschaltungen verursacht wurden, welche vor allem die Erhöhung der Sicherheit zum Ziel haben.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ermittelt, welche Verfahren zur Streckenbeeinflussung derzeit in der Praxis genutzt werden, welche in Zukunft eingesetzt werden könnten und welche sich nicht bewährt haben. Auf der Grundlage einer Literaturrecherche und mehrerer Expertenbefragungen erfolgte eine Analyse der Funktionsweise sowie eine Zusammenfassung praktischer Erfahrungen mit einzelnen Verfahren. Es wurde deutlich, dass komplexe Verfahren, welche sich fortgeschrittener theoretischer Konzepte wie Filterschätzverfahren, Verkehrsmodellen oder Fuzzy-Logik bedienen, sich grundsätzlich gegenüber einfachen Schwellenwertverfahren nicht durchsetzen konnten. Es zeigte sich außerdem, dass Verbesserungspotenziale bei der Streckenbeeinflussung im Qualitätsmanagement sowie insbesondere in der Vorgehensweise der Parameterüberprüfung und -optimierung vorhanden sind. Jedoch bestehen bereits vielversprechende Ansätze, um diese Verbesserungspotenziale auszuschöpfen.

In einem nächsten Schritt wurden Methoden zur Qualitätsbewertung von SBA, welche jeweils im Rahmen einzelner Forschungsprojekte entwickelt wurden, daraufhin untersucht, ob sie für den Einsatz in einem automatisierten System zur Qualitätsbewertung geeignet sind. Einige Methoden eignen sich lediglich zur Durchführung von Langzeituntersuchungen, oder die benötigten Bewertungsgrößen sind nur mit hohem Aufwand zu erheben. Jedoch wurden einige Kriterien zur Bewertung der Sicherheit, Leistungsfähigkeit, Datenqualität und Akzeptanz einer SBA-Steuerung ermittelt. Auf dieser Grundlage wurde ein Vorschlag für ein automatisches Qualitätsbewertungssystem erarbeitet, welcher auf der Bildung von Qualitätsindizes für einzelne Bewertungsmerkmale beruht. Die Qualitätsindizes können mittels eines schwellenwertbasierten Verfahrens zur Erkennung von Mängeln bezüglich bestimmter Qualitätsmerkmale herangezogen werden, wodurch eine schnellere und gezieltere Ergreifung von Verbesserungsmaßnahmen möglich wird.

Schließlich wurde im Rahmen einer mikroskopischen Simulation am Beispiel präventiver Steuerverfahren untersucht, ob sich die Wahl der verwendeten Verfahren auf die Qualität der Streckenbeeinflussung auswirkt. Hierbei wurde das etablierte Verfahren „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“ dem Verfahren „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ gegenübergestellt. Beide Verfahren wurden bezüglich ihrer Fähigkeit zur Stauvermeidung und Reisezeitverbesserung bewertet. Es konnte gezeigt werden, dass die Qualität der Streckenbeeinflussung sich für die untersuchten Verfahren kaum unterscheidet, so dass im Ersatz des etablierten Verfahrens, welcher mit einem beträchtlichen Aufwand verbunden ist, kein großes Nutzenpotenzial zu sehen ist.

Im Rahmen weiterer Arbeiten könnte der Vorschlag für die Gestaltung eines automatischen Qualitätsbewertungssystems in einer Verkehrsrechnerzentrale implementiert und getestet werden. Hierbei sollte untersucht werden, ob die Qualitätsindizes für den praktischen Einsatz geeignet sind, insbesondere im Hinblick auf die Anfälligkeit gegenüber Messwertausfällen und Messfehlern, im Hinblick auf die Trägheit bzw. Unruhe der Bewertungskenngrößen sowie im Hinblick auf Nichtdetektionen und Fehlalarme bei Qualitätsmängeln.

Die im Zuge der Simulationsvorbereitung entwickelten Anwendungen könnten zur Durchführung weiterer Simulationsläufe genutzt werden. Hierbei wird vorgeschlagen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Simulation mehrfach zu wiederholen, um eine größere statistische Sicherheit bezüglich der Simulationsergebnisse zu erreichen. Dabei sollte insbesondere die Streuung der Mittelwerte der Bewertungsgrößen von Simulationslauf zu Simulationslauf untersucht werden. Weiterhin könnte die Simulation unter Verwendung anderer Verfahrensparameter durchgeführt werden, um den Einfluss der Parameterwahl abschätzen zu können. Durch den auf eine Erweiterbarkeit und Änderbarkeit ausgelegten

Aufbau der Anwendungen könnten auch weitere, hier nicht untersuchte Verfahren zur Streckenbeeinflussung implementiert und untersucht werden. Es sollte jedoch zunächst angestrebt werden, die Zeit zur Durchführung eines Simulationslaufes zu verkürzen. Dies könnte durch die Übernahme einiger in den Anwendungen implementierter Funktionalitäten in SUMO erreicht werden.

Erklärung

Hierdurch erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage eingereichte Diplomarbeit selbstständig verfasst und andere als die angegebenen Hilfsmittel nicht benutzt habe.

Dresden, den 2. Oktober 2009

Jan Grimm

Anhang

Inhaltsangabe

A	Detailbeschreibungen zu Verkehrsanalyseverfahren	79
A.1	Plausibilitätsprüfung und Ersatzwertbestimmung nach MARZ	79
A.2	Datenvervollständigung nach MARZ	80
A.3	Glättung und Trendprognose nach MARZ	81
A.4	Kalman-Filter-Verfahren	82
A.5	Traffic Forecast	84
B	Detailbeschreibungen zu Situationsbewertungsverfahren	85
B.1	Detektionsverfahren für verkehrsbedingte Situationen	85
B.2	Detektionsverfahren für Umfeldbedingungen	91
B.3	Prognoseverfahren	93
C	Detailbeschreibungen zu Steuerungsverfahren	101
C.1	Verfahren zur Störfallwarnung	101
C.2	Verfahren für die präventive Steuerung	103
D	Befragungsprotokolle	106
D.1	Autobahndirektion Südbayern	106
D.2	Autobahndirektion Südbayern, Nachfrage	119
D.3	Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen (Straßen.NRW)	120
D.4	Autobahnamt Thüringen	131
D.5	Autobahndirektion Nordbayern	139
D.6	Autobahnamt Sachsen (Kurzanfrage)	145
D.7	Autobahnniederlassung Hamm (Straßen.NRW, Nachfrage)	145
E	Simulationsergebnisse	146
E.1	Versuche mit Szenario „doppelte Verkehrsstärke“	146
E.2	Versuche mit Szenario „vorübergehende Störungen“	147
E.3	Versuche mit beiden Szenarien	150
	Abbildungsverzeichnis	153
	Tabellenverzeichnis	154
	Abkürzungsverzeichnis	155
	Symbolverzeichnis	156
	Literatur	157

A Detailbeschreibungen zu Verkehrsanalyseverfahren

A.1 Plausibilitätsprüfung und Ersatzwertbestimmung nach MARZ

Die Beschreibung erfolgt gemäß [16], Abschnitt 2.3.1.2.3 und 2.3.1.2.4, Seiten 22f.

Eingangsgrößen

Geprüft werden in jedem Beobachtungsintervall Rohdaten der folgenden Verkehrskenngrößen:

- q_{Kfz}
- v_{Pkw}, v_{Lkw}
- b

Die Rohwerte können implausible Messwerte, von der Unterzentrale als fehlerhaft gekennzeichnete Messwerte oder Messwertausfälle beinhalten.

Ausgangsgrößen

Es werden Messwerte zurückgegeben, die keine implausiblen oder fehlerhaften Werte enthalten. Ist kein Ersatzwertverfahren anwendbar, können jedoch Messwertausfälle weiterhin auftreten.

Parameter

- Grenzen der Plausibilitätsbereiche:
 - $q_{Kfz,max}$ (oberer Grenzwert der Gesamtverkehrsstärke je Fahrstreifen)
 - $v_{Lkw,max}$ (oberer Grenzwert der Lkw-Fahrgeschwindigkeit)
 - $v_{Pkw,max}$ (oberer Grenzwert der Pkw-Fahrgeschwindigkeit)
 - b_{max} (oberer Grenzwert der Belegung)
- zugeordneter Nachbarfahrstreifen für jeden Detektor
- zugeordneter Nachbarquerschnitt für jeden MQ, sofern in angemessener Entfernung (< 1500 m) und ohne dazwischen liegende Anschlussstelle verfügbar
- maximale Anzahl der Beobachtungsintervalle, für die in Folge ein Ersatzwert bestimmt werden darf

Algorithmus

siehe [16], Abschnitte 2.3.1.2.3 und 2.3.1.2.4.

A.2 Datenvervollständigung nach MARZ

Die Beschreibung erfolgt gemäß [16], Abschnitt 2.3.2.1.1 und 2.3.2.1.2, Seiten 24ff.

Eingangsgrößen

- q_{Kfz}, q_{Lkw}
- v_{Pkw}, v_{Lkw}
- b
- s_{Kfz}

Hierbei handelt es sich um auf Plausibilität geprüfte und ggf. ersetzte Werte (Ausnahme: s_{Kfz}).

Ausgangsgrößen

- $q_{Pkw}, Q_{Kfz}, Q_{Pkw}, Q_{Lkw}, Q_B$
- $v_{Kfz}, V_{Kfz}, V_{Pkw}, V_{Lkw}$
- k_{lok}, K_{lok}
- B, B_{max}
- a_{Lkw}, A_{Lkw}
- S_{Kfz}

Parameter

- Bestimmung der lokalen Verkehrsdichte:
 - $k_{Kfz,krit}, K_{Kfz,krit}$ (kritische Verkehrsdichte je Fahrstreifen bzw. je MQ)
 - $k_{Kfz,max}, K_{Kfz,max}$ (maximale Verkehrsdichte je Fahrstreifen bzw. je MQ)
- Bestimmung der Bemessungsverkehrsstärke:
 - f_1 (ausschließlich von q_{Lkw} abhängiger Teil des Pkw-Lkw-Äquivalenzwertes)
 - f_2 (von q_{Lkw} und der Pkw-Lkw-Geschwindigkeitsdifferenz abhängiger Teil des Pkw-Lkw-Äquivalenzwertes)

Unter der kritischen Verkehrsdichte wird die Verkehrsdichte verstanden, bei der ein Übergang vom nicht gestörten Verkehr in den Zustand einer Verkehrsstörung stattfindet.

Algorithmus

siehe [16], Abschnitte 2.3.2.1.1 und 2.3.2.1.2.

A.3 Glättung und Trendprognose nach MARZ

Die Beschreibung erfolgt gemäß [16], Abschnitt 2.3.2.1.3, Seite 27.

Eingangsgrößen

- für Glättung: alle Verkehrskenngrößen
- für Trendprognose:
 - Q_{Kfz} , Q_{Pkw} , Q_{Lkw} , Q_B
 - V_{Kfz} , V_{Pkw} , V_{Lkw}
 - S_{Kfz}

Die Größen sind, soweit vorgesehen, zuvor auf Plausibilität zu prüfen und gegebenenfalls zu ersetzen (vgl. Eingangsgrößen in Anhang A.1).

Ausgangsgrößen

- für Glättung: sämtliche Verkehrskenngrößen in geglätteter Form
- Trendprognose für o. g. Verkehrskenngrößen, zusätzlich: $K_{lok,P}$

Die Trendprognose der Verkehrsdichte wird aus $Q_{B,P}$ und $V_{Kfz,P}$ berechnet.

Parameter

- α (Glättungsfaktor Mittelwert)
- β (Glättungsfaktor Trendprognose)

Die Parameter können grundsätzlich dynamisch auf die Verkehrssituation angepasst werden (empfindlicher bei kritischen und träger bei unkritischen Situationen).

Algorithmus

siehe Gleichungen 1 bis 3 in Abschnitt 1 auf Seite 17 sowie [16], Abschnitt 2.3.2.1.3.

A.4 Kalman-Filter-Verfahren

Die Beschreibung erfolgt gemäß [8], Abschnitt 3.3.1.3, Seite 33ff.

Eingangsgrößen

- lokale Verkehrskenngrößen zweier aufeinander folgender MQ⁷⁵

Ausgangsgrößen

- Schätzung K_j , V_j und Q_j für jedes Teilsegment j des Abschnittes zwischen den MQ
- Schätzung Störfallindikator $Q_{d,j}$ für jedes Segment (optional)
- Schätzung sowohl der streckenbezogenen als auch der lokalen Geschwindigkeiten (nur im Rahmen der ESE)

Parameter

- räumlicher Glättungsfaktor α (für das Verkehrsmodell)
- weitere Parameter des Verkehrsmodells
- Segmentanzahl und -länge
- Zeitintervall zwischen zwei A-Posteriori-Schätzungen
- Initialwerte für Kovarianzmatrizen und die Korrekturmatrix

Der räumliche Glättungsfaktor wird zur Schätzung der Verkehrsstärke herangezogen (siehe unten).

Modell

Die in jedem Zeitschritt t und für jedes Teilsegment j zu schätzenden Größen K_j , V_j , Q_j und (sofern vorgesehen) $Q_{d,j}$ werden im Zustandsvektor \mathbf{x} zusammengefasst. An den MQ erhobene Verkehrskenngrößen werden im Messwertvektor \mathbf{y} und äußere Einflüsse (z. B. Verkehrsstärke im Zufluss) im Steuerwertvektor \mathbf{u} zusammengefasst.

Dem erweiterten Kalman-Filter liegen Modellgleichungen⁷⁶ zur rekursiven Schätzung von K_j und V_j und Q_j für alle Teilsegmente zugrunde. K_j und V_j werden rekursiv aktualisiert, während Q_j nach Gleichung 13 bestimmt wird (zunächst ohne Berücksichtigung des später beschriebenen Rauschterms).

$$Q_j(t) = \alpha K_{j-1}(t) V_{j-1}(t) + (1 - \alpha) K_j(t) V_j(t) \quad (13)$$

α kann dabei als räumlicher Glättungsparameter interpretiert werden.

⁷⁵ In einem modifizierten Verfahren, auf das ansatzweise in [3] eingegangen wird, werden Verkehrskenngrößen dreier aufeinanderfolgender MQ verwendet. ⁷⁶ siehe z. B. [8], Gleichungen 14a, b, c auf Seite 33

Die Modellgleichungen enthalten jeweils stochastische Terme, mit denen das Prozessrauschen (zufälliges Abweichen des vom Modell antizipierten Systemverhaltens vom realen Systemverhalten) modelliert wird. Der Einfluss von Messungenauigkeiten wird durch ein Messrauschen modelliert.

Es wird ein erweitertes Kalman-Filter verwendet, da das verwendete Verkehrsmodell nichtlinear ist und sich das gewöhnliche Kalman-Filter nur für lineare Modelle eignet.

Algorithmus

Die Schätzung $\hat{\mathbf{x}}$ des Zustandsvektors geschieht nach folgender Gleichung⁷⁷:

$$\hat{\mathbf{x}}(t+1) = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t), \mathbf{u}(t)) + \mathbf{D}(t) \cdot (\mathbf{y}(t) - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}(t))) \quad (14)$$

Diese Schätzung wird als A-Posteriori-Schätzung bezeichnet und ist die Ausgangsgröße des Verfahrens. Die Funktion \mathbf{f} beschreibt das zugrunde liegende Verkehrsmodell und liefert eine A-Priori-Zustandschätzung (ohne Berücksichtigung der Messungen). Die Funktion \mathbf{g} bildet die A-Priori-Schätzung auf einen Vektor ab, der die Differenzbildung mit dem Messwertvektor zulässt. Die Differenz geht gewichtet durch die Korrekturmatrix \mathbf{D} (auch: das Kalman Gain) in die A-Posteriori-Schätzung ein. Durch diese Gewichtung wird festgelegt, wie gut sich das Modell und wie gut sich die Messwerte an die unbekanntere reale Verkehrssituation annähern.

Bei der Bestimmung der A-Priori-Schätzung wird eine Kovarianzmatrix des Prozessrauschens, bei der Bestimmung der Residuen eine Kovarianzmatrix des Messrauschens berücksichtigt. Die Kovarianzmatrizen und die Korrekturmatrix werden zu jedem Zeitschritt aktualisiert.

Die geschätzten Verkehrskenngrößen können als Eingangsgrößen für Steuerverfahren herangezogen werden. Der Störfallindikator $Q_{d,j}$ liefert eine Aussage, ob in einem bestimmten Segment die Ursache einer Verkehrsstörung liegt (Zufluss > Abfluss). Einwandernde Staus sowie „Stop & Go“-Verkehr können nicht durch $Q_{d,j}$, sondern durch Verletzung der durch das Verkehrsmodell definierten Bedingungen erkannt werden.

⁷⁷ entspricht Gleichung 17 in [8] auf Seite 34

A.5 Traffic Forecast

Die vorliegende Beschreibung basiert auf [8] (Abschnitt 3.2.2, Seite 32) und [3] (Abschnitt 4.15, Seiten 47ff).

Eingangsgrößen

- Verkehrskenngrößen am betrachteten, vorhergehenden und nachfolgenden MQ, i. d. R. Q_{Kfz} , Q_{Lkw} , V_{Pkw} und V_{Lkw}
- Umfelddaten von Detektoren, die dem betrachteten MQ zugeordnet sind, i. d. R. Sichtweite und Niederschlagintensität

Grundsätzlich können auch andere Eingangsgrößen gewählt werden. Einzelne (z. B. nicht gemessene) Größen können durch Parameterwahl ausgeschlossen werden.

Eingangsgrößen für verschiedene Zielgrößen sind in [3] (Tabelle 19 auf Seiten 49f) zusammengestellt.

Ausgangsgrößen

- Kurzzeitprognose für vorgegebene Zielgrößen (nach Bedarf wählbar⁷⁸)

Parameter

- Überprüfungsintervall (mindestens: 1 min und 5 min)
- Aktualisierungsschwelle
- Prognosehorizont (zwischen 3 min und 30 min)
- Dynamikintervall
- Adaptionintervall
- Güteindex für eine bestimmte Zielgröße
- Güteindizes für eine bestimmte Situation

Sämtliche Parameter (mit Ausnahme des zuletzt genannten) sind für jeden MQ und jede Zielgröße einzeln festlegbar.

Algorithmus

Es erfolgt eine zyklische Überprüfung der Prognosewerte. Ein Prognosewert wird aktualisiert, wenn eine Abweichung vom letzten Prognosewert eine parametrierbare Aktualisierungsschwelle überschreitet. Hierbei wird ein Korrelationsalgorithmus verwendet, der jedoch im Detail nicht in der Literatur zugänglich ist.

⁷⁸ nach [8] für den Einsatzbereich bei Köln: Geschwindigkeit am stromabwärtigen MQ

B Detailbeschreibungen zu Situationsbewertungsverfahren

B.1 Detektionsverfahren für verkehrsbedingte Situationen

B.1.1 Verkehrsstufen nach MARZ

Die Beschreibung erfolgt gemäß [16], Abschnitt 2.3.2.1.4, Seiten 27f.

Eingangsgrößen

- $V_{Kfz,P}$
- $K_{lok,P}$

Ausgangsgrößen

- Entscheidung für eine der folgenden Verkehrsstufen:
 - Z1:** freier Verkehr
 - Z2:** dichter Verkehr
 - Z3:** zähfließender Verkehr
 - Z4:** Stau

Parameter

- Schwellenwerte für beide Eingangsgrößen (einzeln für jede Verkehrsstufe und jeden MQ)

Algorithmus

Es wird zunächst das Vorhandensein aller vier Verkehrsstufen unabhängig voneinander auf der Grundlage der Schwellenwerte geprüft. Bei gleichzeitiger Feststellung verschiedener Verkehrsstufen wird diejenige ausgewählt, die den schlechtesten Verkehrszustand widerspiegelt. Eine detailliertere Beschreibung wird im MARZ gegeben.

B.1.2 Fuzzyfizierte Verkehrslage

Die Beschreibung erfolgt gemäß [3], Abschnitt 4.8, Seiten 34ff.

Eingangsgrößen

- V_{Kfz}
- K_{lok}

Ausgangsgrößen

- lokale und streckenbezogene Zugehörigkeitskennwerte für folgende Verkehrsstufen:
 - gestaut
 - zähfließend
 - dicht
 - frei
- Zugehörigkeitskennwerte für fünf Stufen von Q_{Kfz}
(sehr niedrig, niedrig, mittel, hoch, sehr hoch)

Die Zugehörigkeitskennwerte müssen stets Werte zwischen 0 und 1 annehmen.

Parameter

- Stützpunkte der trapezförmigen Zugehörigkeitsfunktionen für V_{Kfz} , K_{lok} und Q_{Kfz}

Parametervorgaben können [3] (Tabellen 12 und 13 auf Seiten 36f) entnommen werden.

Algorithmus

Folgende Schritte werden im Rahmen des Algorithmus umgesetzt:

1. Fuzzyfizierung von V_{Kfz} : Stufen niedrig, mittel und hoch
2. Fuzzyfizierung von K_{lok} : Stufen niedrig, hoch, sehr hoch und nicht sehr hoch
3. Bestimmung und Fuzzyfizierung von Q_{Kfz} : fünf Stufen (siehe oben)
4. Bestimmung der Verkehrsstufe am MQ aus den Zugehörigkeitskennwerten für V_{Kfz} und K_{lok}
5. Bestimmung der Verkehrsstufe für den Streckenabschnitt zwischen zwei MQ

B.1.3 VKdiff-Verfahren

Die Beschreibung erfolgt gemäß [16], Abschnitt 2.3.2.1.5, Seite 29.

Eingangsgrößen

- $V_{Kfz,P}$
- $K_{lok,P}$

Anstatt der Verkehrsdichte könnte nach [1] auch die mittlere Belegung aller Fahrstreifen verwendet werden. Dies ist jedoch nicht im MARZ verankert.

Ausgangsgrößen

- VK_{diff}

Parameter

- $K_{lok,Qmax}$ (Fahrzeugdichte bei maximaler Verkehrsstärke⁷⁹)
- V_{frei} (mittlere freie Geschwindigkeit)

Der erste Parameter ist empirisch zu bestimmen. Für den zweiten Parameter sind im MARZ folgende Werte vorgegeben:

- zweistreifiger Querschnitt: 115 km/h
- dreistreifiger Querschnitt: 120 km/h

Algorithmus

Der streckenbezogene Störfallindikator VK_{diff} wird an jedem MQ j für den stromabwärtigen Streckenabschnitt wie folgt berechnet:

$$VK_{diff,j} = \sqrt{\left(\frac{V_{frei,j} - V_{Kfz,P,j}}{V_{frei,j}}\right)^2 + \left(\frac{K_{lok,P,j}}{K_{lok,Qmax,j}}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{V_{frei,j+1} - V_{Kfz,P,j+1}}{V_{frei,j+1}}\right)^2 + \left(\frac{K_{lok,P,j+1}}{K_{lok,Qmax,j+1}}\right)^2} \quad (15)$$

⁷⁹ nach MARZ, in [1] wird stattdessen die maximale Verkehrsdichte $K_{lok,max}$ angegeben

B.1.4 VKdiffKfz-Verfahren

Die Beschreibung erfolgt gemäß [3], Abschnitt 4.4, Seiten 26ff.

Eingangsgrößen

- V_{Kfz}
- K_{lok}

Im Unterschied zum VKdiff-Verfahren werden hier keine Trendprognosewerte verwendet.

Ausgangsgrößen

- $VK_{\text{diff,Kfz}}$

Parameter

- $K_{\text{lok,Qmax}}$ (Fahrzeugdichte bei maximaler Verkehrsstärke)
- V_{frei} (mittlere freie Geschwindigkeit)
- t_{Reise} (mittlere Reisezeit für den betrachteten Streckenabschnitt)

Algorithmus

Der streckenbezogene Störfallindikator $VK_{\text{diff,Kfz},j}$ wird an jedem MQ für den stromabwärtigen Streckenabschnitt nach folgender Gleichung bestimmt:

$$VK_{\text{diff,Kfz},j}(t) = \sqrt{\left(\frac{V_{\text{frei},j} - V_{\text{Kfz},j}(t - t_{\text{Reise}})}{V_{\text{frei},j}}\right)^2 + \left(\frac{K_{\text{lok},j}(t - t_{\text{Reise}})}{2K_{\text{lok,Qmax},j}}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{V_{\text{frei},j+1} - V_{\text{Kfz},j+1}(t)}{V_{\text{frei},j+1}}\right)^2 + \left(\frac{K_{\text{lok},j+1}(t)}{2K_{\text{lok,Qmax},j+1}}\right)^2} \quad (16)$$

B.1.5 Erweiterte Situationserkennung (ESE)

Die Beschreibung erfolgt gemäß [2], Anhang III.S1, Seiten 65ff sowie [22].

Eingangsgrößen

- Hauptfahrbahn:
 - Q_{Pkw}
 - Q_{Lkw}
 - V_{Pkw}
 - V_{Lkw}
- Ein- und Ausfahrten (bei Bedarf):
 - Q_{Pkw}
 - Q_{Lkw}

Ausgangsgrößen

- Wahrscheinlichkeitsindikatoren für das Vorliegen folgender Verkehrszustandsklassen:
 - verkehrstechnischer Engpass
 - baulicher Engpass
 - bereichsweise Verdichtung
 - einwandernder Stau
 - zugestauter Abschnitt
 - stockender Verkehr
- geschätzte Verkehrskenngrößen für den segmentierten Streckenabschnitt zwischen je zwei MQ (Ausgangsgrößen des Kalman-Filter-Verfahrens)

Die Bedeutung der o. g. Verkehrszustandsklassen kann [2] entnommen werden.

Parameter

Die Menge der Parameter ist abhängig von der Art der verwendeten Verfahren innerhalb der ESE.

Algorithmus

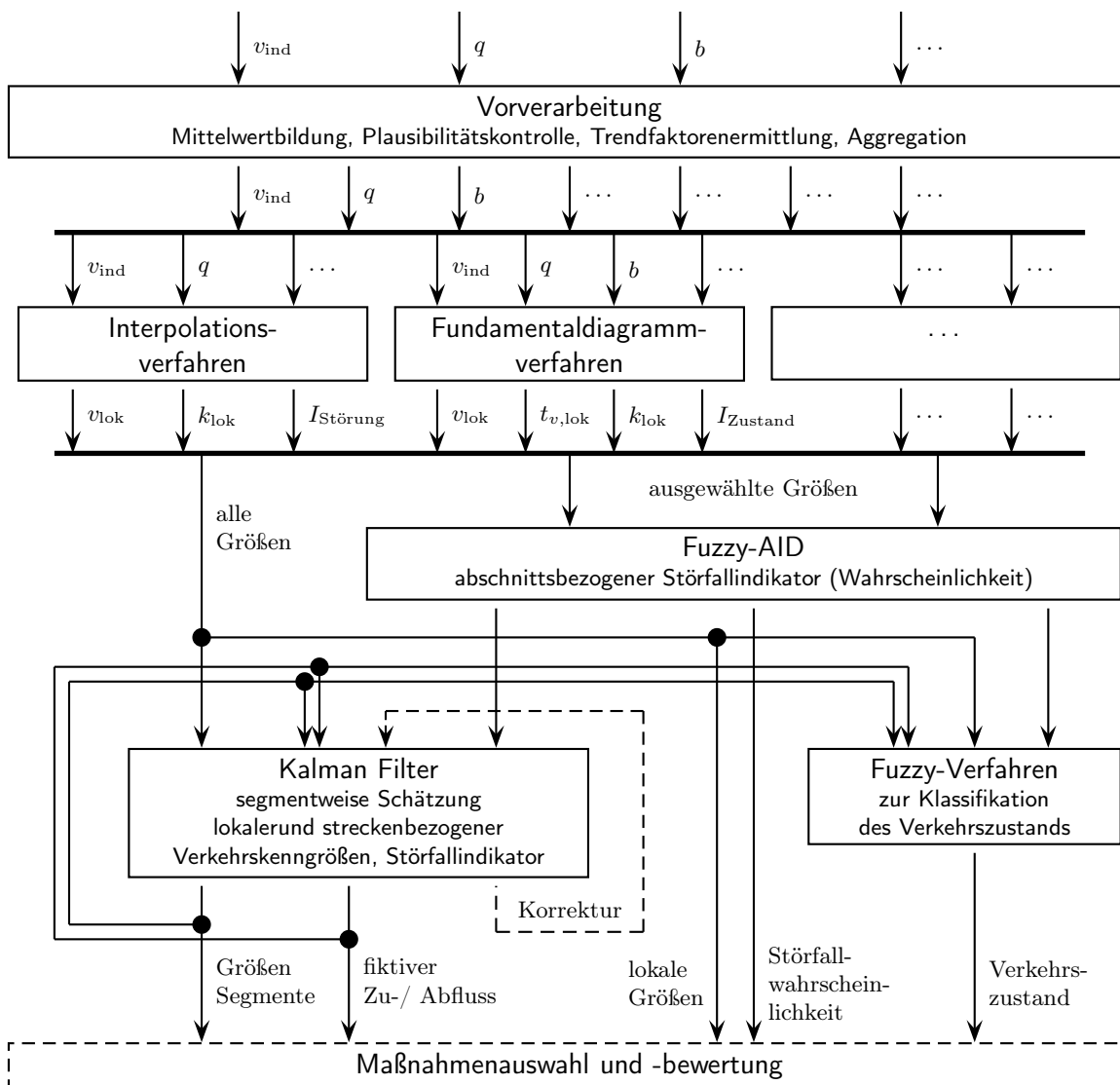


Abbildung 8: Komponenten und Funktionsweise der Erweiterten Situationserkennung

Diese Darstellung zeigt die Informationsflüsse innerhalb der ESE und wurde gemäß der Patentansprüche in [22] erstellt. Hierbei wird der Umstand ausgeblendet, dass die Arbeitsschritte z. T. an räumlich und funktional getrennten Instanzen durchgeführt werden, die durch Kommunikationsverbindungen miteinander verbunden sind.

B.2 Detektionsverfahren für Umfeldbedingungen

B.2.1 Niederschlagsstufen nach MARZ

Die Beschreibung erfolgt gemäß [16], Abschnitt 2.3.2.2.1, Seite 29.

Eingangsgrößen

- Niederschlagsintensität (mm/h)
- ggf. Luft- und Bodentemperatur

Ausgangsgrößen

- eine von vier Niederschlagsstufen („trocken“ und „nass 1“ bis „nass 3“)

Parameter

- Schwellenwerte für die Übergänge zwischen den Niederschlagsstufen
- Verzögerungszeit für den Rückgang in eine niedrigere Niederschlagsstufe

Die Wahl der Verzögerungszeit kann in Abhängigkeit von der Luft- und Bodentemperatur geschehen. Vorgaben für die Erstversorgung der Parameter können der MARZ entnommen werden.

Algorithmus

Bei Überschreiten entsprechender Schwellenwerte wird die jeweils höhere Niederschlagsstufe gewechselt. Bei Unterschreiten wird nach Ablauf einer Verzögerungszeit in die jeweils niedrigere Niederschlagsstufe gewechselt.

B.2.2 Sichtweitestufen nach MARZ

Die Beschreibung erfolgt gemäß [16], Abschnitt 2.3.2.2.2, Seite 30.

Eingangsgrößen

- Sichtweite (in m)

Ausgangsgrößen

- eine von sechs Sichtweitestufen

Parameter

- Schwellenwerte für die Übergänge zwischen den Sichtweitestufen

Vorgaben für die Erstversorgung können dem MARZ entnommen werden.

Algorithmus

wie für Niederschlagsstufen, jedoch ohne Verzögerungszeit

B.3 Prognoseverfahren

B.3.1 Unruhe im Verkehr nach MARZ

Die Beschreibung erfolgt gemäß [16], Abschnitt 2.3.2.1.5, Seiten 28f.

Eingangsgrößen

- $s_{\text{Kfz,links}}$
- $q_{\text{Kfz,links}}$
- Q_{Kfz}

$s_{\text{Kfz,links}}$ und $q_{\text{Kfz,links}}$ werden nur für den äußerst linken Fahrstreifen eines Richtungsquerschnittes benötigt.

Ausgangsgrößen

- binärer Unruheindikator

Parameter

- Ein- und Ausschaltgrenzwerte für jede der Eingangsgrößen

Vorgaben für die Erstversorgung können dem MARZ entnommen werden.

Algorithmus

Der Algorithmus kann dem MARZ entnommen werden.

Der Unruheindikator wird als zusätzliches Kriterium im Steuerverfahren „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“ verwendet.

B.3.2 Zuverlässigkeit des Verkehrs (Ferrari-Verfahren), Literaturvariante

Diese Beschreibung bezieht sich auf eine Variante des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“, welche im Rahmen dieser Arbeit in enger Anlehnung an die Arbeiten von Ferrari ([14], [15]) entwickelt wurde. Auf Unterschiede zu der durch das Unternehmen Heusch/Boesefeldt in der SBA im Großraum Dortmund implementierten Variante des Verfahrens wird in Anhang B.3.3 eingegangen.

Eingangsgrößen

- $v_{\text{ind},x}$ (individuelle Fahrgeschwindigkeit eines Kfz)
- $t_{\text{L,Brutto},x}$ (Brutto-Zeitlücke zwischen gerade den MQ passierendem und vorausfahrendem Kfz)

Die Eingangsgrößen werden nur für den äußerst linken Fahrstreifen eines Richtungsquerschnittes benötigt und für jedes Fahrzeug einzeln erhoben. Der Index x kennzeichnet die zeitliche Reihenfolge, in der die Fahrzeuge den MQ passieren. Gemessene Einzelfahrzeugdaten werden an eine Messdatenreihe angefügt, die sich auf eine feste Anzahl an Fahrzeugen, aber auf einen variablen Beobachtungszeitraum bezieht.

Ausgangs- und Zwischengrößen

Ausgangsgrößen:

- Φ (Zuverlässigkeitskennwert für den Zeithorizont T_{Hor})
- m (Steigung der Regressionsgeraden zur Punktwolke im $\hat{\sigma}^2$ -ln k -Diagramm)

Φ ist die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, dass innerhalb von T_{Hor} keine Verkehrsstörung auftritt unter der Bedingung, dass eine Verkehrsstörung nicht bereits vorliegt. Bei Vorliegen einer Verkehrsstörung hat Φ keine Bedeutung und muss nicht berechnet werden.

Nutzbare Zwischengrößen:

- q (Gesamtverkehrsstärke)
- k (Gesamtverkehrsdichte)

Die o. g. Zwischengrößen beziehen sich auf den äußerst linken Fahrstreifen eines Richtungsquerschnittes.

Weitere Zwischengrößen:

- $d_{\text{L,Brutto},x}$ (Brutto-Weglücke zwischen gerade den MQ passierendem und vorausfahrendem Kfz)
- Δv_x (Geschwindigkeitsdifferenz eines betrachteten zum vorausfahrenden Kfz)
- \hat{a}_x (Schätzung der normalverteilten, mittelwertfreien Verschiebung a_x der individuellen Fahrgeschwindigkeit vom Geschwindigkeitsniveau⁸⁰)
- T (Beobachtungsdauer für eine Messdatenreihe)
- $\hat{\lambda}$ (Schätzung des Einflussfaktors λ für die Verschiebung a_x auf die Entwicklung des Geschwindigkeitsniveaus, Parameter des Zufallsprozesses)
- $\hat{\sigma}^2$ (Schätzung der Varianz σ^2 der Verschiebung a_x , Parameter des Zufallsprozesses)

⁸⁰ Das Geschwindigkeitsniveau ist das arithmetische Mittel aller individuellen Geschwindigkeiten einer Messdatenreihe und wird nicht explizit bestimmt.

Parameter

- N_{Kfz} (Anzahl der betrachteten Fahrzeuge in einer Messdatenreihe; Empfehlung nach [15]: 50 Kfz)
- N_{WP} (Anzahl der $\hat{\sigma}^2$ -ln k -Wertepaare, die bei der Bildung der Regressionsgeraden zu berücksichtigen sind; Empfehlung nach [15]: 10 Wertepaare)
- T_{Hor} (Zeithorizont für die Zuverlässigkeitsprognose; Empfehlung nach [15]: 15 min)
- Grenzwerte für Φ und m zur Maßnahmenauswahl (vgl. Abschnitt 3.3.3)⁸¹

Algorithmus

Der hier beschriebene Algorithmus wurde nach [14] (Abschnitt 5) und [15] (Abschnitt 4) so erarbeitet, dass er für den praktischen Einsatz und für die Simulation grundsätzlich geeignet ist.

Grundlage des Verfahrens ist die Modellierung des individuellen Geschwindigkeitsverhaltens durch einen Zufallsprozess, der durch folgende Gleichung beschrieben werden kann:

$$v_{\text{ind},x} = v_{\text{ind},x-1} + a_x - (1 - \lambda)a_{x-1} \quad (17)$$

Hierbei sind

- x ein Zählindex für einen MQ passierende Fahrzeuge,
- $v_{\text{ind},x}$ die individuelle Fahrgeschwindigkeit des x -ten Fahrzeuges an einem MQ,
- a_x die Abweichung der individuellen Fahrgeschwindigkeit des x -ten Fahrzeuges von einem gleitenden Mittelwert der Fahrgeschwindigkeiten (Geschwindigkeitsniveau) \bar{v}_x und
- λ ein Wert zwischen 0 und 1, der bestimmt, wie groß der Einfluss von a_x auf \bar{v}_x ist.

Der zufällige Charakter des individuellen Geschwindigkeitsverhaltens wird durch die normalverteilte, mittelwertfreie Zufallsgröße a_x einbezogen. Parameter des mit Gleichung 17 gegebenen Zufallsprozesses sind somit λ und die Varianz σ^2 der Zufallsgröße a_x .

Für jedes Kfz, das einen MQ passiert, werden die Eingangsgrößen $v_{\text{ind},x}$ und $t_{\text{L,Brutto},x}$ gemessen. Aus diesen werden zunächst (ebenfalls für jedes Kfz) $d_{\text{L,Brutto},x}$ und Δv_x bestimmt:

$$d_{\text{L,Brutto},x} = v_{\text{ind},x} \cdot t_{\text{L,Brutto},x} \quad (18)$$

$$\Delta v_x = v_{\text{ind},x} - v_{\text{ind},x-1} \quad (19)$$

⁸¹ Die Maßnahmenauswahl ist nicht Bestandteil dieses Verfahrens, jedoch müssen diese Grenzwerte in ein auf dieses Verfahren aufgesetztes Maßnahmenauswahlverfahren integriert werden.

Diese Einzelfahrzeugdaten werden in einer Messdatenreihe mit Bezug zu einer festen Anzahl von N_{Kfz} Kfz festgehalten, wobei für jeden neu hinzugefügten Messwertsatz der entsprechend älteste Messwertsatz entfernt wird („first in, first out“). Aus den Elementen der Messdatenreihe werden mit jedem hinzugefügten Messwertsatz folgende Größen aktualisiert:

- T nach Gleichung 20
- q nach Gleichung 21
- k nach Gleichung 22
- $\hat{\lambda}$ nach Gleichung 23
- $\hat{\sigma}^2$ nach Gleichung 24

$$T = \sum_{x=1}^{N_{\text{Kfz}}} t_{\text{L,Brutto},x} \quad (20)$$

$$q = \frac{N_{\text{Kfz}}}{T} \quad (21)$$

$$k = \frac{N_{\text{Kfz}}}{\sum_{x=1}^{N_{\text{Kfz}}} d_{\text{L,Brutto},x}} \quad (22)$$

$$\hat{\lambda} = -0,126 + 0,274 \ln k \quad (23)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N_{\text{Kfz}}} \sum_{x=1}^{N_{\text{Kfz}}} (\hat{a}_x - \bar{a})^2 \quad \text{mit} \quad (24)$$

$$\hat{a}_x = \Delta v_x + \hat{a}_{x-1}(1 - \lambda) \quad \text{und} \quad (25)$$

$$\bar{a} = \sum_{x=1}^{N_{\text{Kfz}}} \frac{\hat{a}_x}{N_{\text{Kfz}}} \quad (26)$$

Als Alternative zur Schätzung von σ^2 in der oben beschriebenen Weise könnte es auch sinnvoll sein, diese durch eine Varianz der gemessenen Fahrgeschwindigkeiten, hier bezeichnet als σ_v^2 , zu ersetzen. Diese bestimmt sich zu:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{N_{\text{Kfz}}} \sum_{x=1}^{N_{\text{Kfz}}} (v_x - \bar{v})^2 \quad (27)$$

Hierbei ist \bar{v} der Mittelwert der zum aktuellen Zeitschritt betrachteten Menge an N_{Kfz} Geschwindigkeitswerten. Durch Ersetzen von \hat{a}_x durch a_x und mit $a_x = v_x - \bar{v}$ liefert Gleichung 24:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N_{\text{Kfz}}} \sum_{x=1}^{N_{\text{Kfz}}} (v_x - \bar{v} - \bar{a})^2 \quad (28)$$

Gleichungen 27 und 28 unterscheiden sich nur durch den Mittelwert der Geschwindigkeitsschwankungen \bar{a} . Da die Zufallsgröße a_x im zugrunde liegenden Modell jedoch mittelwertfrei ist, kann angenommen werden, dass die Differenz zwischen $\hat{\sigma}^2$ und σ_v^2 für hinreichend große N_{Kfz} vernachlässigbar wird. Während der Testphase zur Vorbereitung der Simulation soll festgestellt werden, ob die modellgestützte Schätzung oder die Annäherung durch Verwendung der Varianz der Fahrgeschwindigkeiten sich für die Bestimmung des Zuverlässigkeitskennwertes besser eignet.

In bestimmten Auswertungsintervallen werden $\hat{\sigma}^2$ und $\ln k$ als Wertepaar festgehalten. Dieses bildet zusammen mit Wertepaaren für eine feste Anzahl N_{WP} zurück liegender Auswertungsintervalle eine Punktwolke. Wie für die Messwertsätze wird auch bei Hinzufügen eines neuen Wertepaares das älteste Wertepaar aus der Menge der betrachteten Wertepaare entfernt. In jedem Auswertungsintervall wird durch lineare Regression eine Gerade für die aktuell vorliegende Menge der Wertepaare bestimmt. Für die Gerade gilt die Zwangsbedingung, dass sie durch den Punkt $(\ln k = 3,4 \mid \hat{\sigma}^2 = 1,5)$ führen muss. Durch das Vorliegen dieser Zwangsbedingung lässt sich die Regressionsgerade durch den Steigungsparameter m eindeutig beschreiben, der nach folgender Vorschrift bestimmt werden kann⁸²:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{WP}}} (\hat{\sigma}_i^2 - 1,5)(\ln k_i - 3,4)}{\sum_{i=1}^{N_{\text{WP}}} (\ln k_i - 3,4)^2} \quad (29)$$

Zuletzt wird der Zuverlässigkeitskennwert Φ berechnet:

$$\Phi = 1 - 19,8 \cdot \left(\frac{q}{10^5}\right)^{8,82} \cdot T_{\text{Hor}}^{1,933} \cdot m^2 \quad (30)$$

Aus m und Φ können Schaltwünsche für die Geschwindigkeitsanzeige und die Zuflussdosierung abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 3.3.3).

Herleitung der Regressionsvorschrift

Gegeben sind N_{WP} Wertepaare in der $\hat{\sigma}^2$ - $\ln k$ -Ebene sowie der Zwangspunkt $(\ln k = 3,4 \mid \hat{\sigma}^2 = 1,5)$. Es ist eine Regressionsgerade so zu bestimmen, dass sie durch den Zwangspunkt führt und dass die Abweichungen zwischen der Gerade und den Wertepaaren minimal werden. Nachfolgend wird auf der Grundlage der *Methode der kleinsten Fehlerquadrate* die mit Gleichung 29 gegebene Regressionsvorschrift hergeleitet.

Für das Fehlermaß ε gilt grundsätzlich:

$$\varepsilon(m, \hat{\sigma}_0^2) = \sum_{i=1}^{N_{\text{WP}}} (\hat{\sigma}_i^2 - \hat{\sigma}_{\text{Gerade},i}^2)^2 \quad (31)$$

Hierbei sind:

- m die Steigung der Regressionsgeraden,
- $\hat{\sigma}_0^2$ der Abstand der Geraden vom Ursprung entlang der $\hat{\sigma}^2$ -Achse,
- $\hat{\sigma}_i^2$ der Wert $\hat{\sigma}^2$ für das i -te Wertepaar an der Stelle $\ln k_i$ und
- $\hat{\sigma}_{\text{Gerade},i}^2$ der entsprechende Wert der Regressionsgeraden an der gleichen Stelle.

⁸² vgl. Abschnitt „Herleitung der Regressionsvorschrift“

Durch die Zwangsbedingung gilt:

$$\hat{\sigma}_{\text{Gerade},i}^2 = 1,5 + m(\ln k_i - 3,4) \quad (32)$$

Somit ist ε nur abhängig von m . Durch Einsetzen von Gleichung 32 in Gleichung 31 erhält man:

$$\begin{aligned} \varepsilon(m) &= \sum_{i=1}^{N_{\text{WP}}} (\hat{\sigma}_i^2 - 1,5 - m(\ln k_i - 3,4))^2 \\ &= \sum_{i=1}^{N_{\text{WP}}} ((\hat{\sigma}_i^2 - 1,5)^2 - 2m(\hat{\sigma}_i^2 - 1,5)(\ln k_i - 3,4) + m^2(\ln k_i - 3,4)^2) \end{aligned} \quad (33)$$

Die Ableitung dieser Funktion nach m ist gegeben durch:

$$\frac{\partial \varepsilon(m)}{\partial m} = \sum_{i=1}^{N_{\text{WP}}} (-2(\hat{\sigma}_i^2 - 1,5)(\ln k_i - 3,4) + 2m(\ln k_i - 3,4)^2) \quad (34)$$

Diese Funktion hat die durch Gleichung 29 auf der vorherigen Seite gegebene Nullstelle. Da die zweite Ableitung von $\varepsilon(m)$ nach m (siehe Gleichung 35) stets positiv ist, weist $\varepsilon(m)$ an der durch Gleichung 29 definierten Stelle ein Minimum auf.

$$\frac{\partial^2 \varepsilon(m)}{\partial m^2} = \sum_{i=1}^{N_{\text{WP}}} (2(\ln k_i - 3,4)^2) \quad (35)$$

B.3.3 Zuverlässigkeit des Verkehrs (Ferrari-Verfahren), Variante nach Heusch/Boesefeldt

Diese Beschreibung bezieht sich auf eine Variante des Verfahrens „Zuverlässigkeit im Verkehr“, die durch das Unternehmen Heusch/Boesefeldt für die SBA der Autobahn A 1 bei Dortmund implementiert wurde. Diese Variante basiert ebenfalls auf [14] und [15], jedoch wurde in einigen Punkten von der dort vorgeschlagenen Vorgehensweise abgewichen. An dieser Stelle wird lediglich auf die Unterschiede zur Literaturvariante eingegangen. Die Beschreibung erfolgt nach [23].

Folgende wesentliche Abweichungen bestehen zur Literaturvariante:

- Es ist ausschließlich die Verwendung der Varianz der Geschwindigkeiten vorgesehen.
- Die Verarbeitung der Messwerte erfolgt blockweise. Eine gleitende Menge an Fahrzeugmesswerten, bei der für jedes neu erfasste Fahrzeug ein Messwert hinzugefügt und der älteste gelöscht wird, ist nicht vorgesehen. Stattdessen werden stets Messwerte für eine bestimmte Anzahl an Fahrzeugen gesammelt, ausgewertet und anschließend gelöscht.
- Es ist eine Grenzgeschwindigkeit vorgesehen, unterhalb der keine Bestimmung des Zuverlässigkeitskennwertes erfolgt, da Stau angenommen wird.
- Es wird keine Regression durchgeführt. Stattdessen wird zunächst nach Gleichung 36 die Steigung der Geraden bestimmt, welche durch einen mit einem Wertepaar gegebenen Punkt und den Zwangspunkt führt. Anschließend erfolgt die Bildung des arithmetischen Mittels über diese Steigungswerte (Gleichung 37).
- Aus Gleichung 36 wird deutlich, dass auf die Bildung des Logarithmus Naturalis der Verkehrsdichte verzichtet wird.
- Der Zuverlässigkeitskennwert wird nach einer anderen Vorschrift bestimmt, welche durch Gleichung 38 gegeben wird.
- Der Zuverlässigkeitskennwert wird jeweils für alle Fahrstreifen eines Richtungsquerschnittes verwendet. Maßgebend für die Steuerung sind die Werte für den Fahrstreifen, für den der Zuverlässigkeitskennwert am geringsten ist.
- Es sind Schaltwünsche in den Geschwindigkeitsstufen 100 km/h, 80 km/h und 60 km/h vorgesehen. Diese werden jeweils bei gleichzeitiger Unterschreitung eines Einschaltgrenzwertes für Φ und Überschreitung eines Einschaltgrenzwertes für die Verkehrsstärke aktiviert. Bei Überschreitung eines Ausschaltgrenzwertes für Φ oder bei Unterschreitung eines Ausschaltgrenzwertes für die Verkehrsstärke wird der Schaltwunsch zurückgenommen.
- Zusätzlich ist ein Lkw-Überholverbot als Maßnahme vorgesehen. Dieses wird bei gleichzeitiger Unterschreitung eines Einschaltgrenzwertes für Φ und Überschreitung eines Einschaltgrenzwertes für m aktiviert. Bei Überschreitung eines Ausschaltgrenzwertes für Φ oder Unterschreitung eines Ausschaltgrenzwertes für m wird der Schaltwunsch zurückgenommen.

$$m_i = \left| \frac{\sigma_i^2 - 1,5}{k_i - 30} \right| \quad (36)$$

$$m = \frac{1}{N_{\text{WP}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{WP}}} m_i \quad (37)$$

$$\Phi = 1 - 3,17 \cdot \left(\frac{q}{10000} \right)^{8,07} \cdot T_{\text{Hor}}^{2,09} \cdot m^2 \quad (38)$$

C Detailbeschreibungen zu Steuerungsverfahren

C.1 Verfahren zur Störfallwarnung

C.1.1 Stauwarnung nach MARZ

Eingangsgrößen

- b_i (Belegungsgrad Fahrstreifen i)
- \bar{V}_{Kfz} (geglättete Kfz-Geschwindigkeit Richtungsfahrbahn)
- $\bar{V}_{\text{Pkw,P}}$ (Trendprognose Pkw-Geschwindigkeit Richtungsfahrbahn)
- $\bar{V}_{\text{Lkw,P}}$ (Trendprognose Lkw-Geschwindigkeit Richtungsfahrbahn)
- Q_{Kfz} (Gesamtverkehrsstärke)
- Q_{Pkw} (Pkw-Verkehrsstärke)
- Q_{Lkw} (Lkw-Verkehrsstärke)
- VK_{diff} (streckenbezogener Störfallindikator, vgl. Abschnitt 3.3.1)
- Verkehrsstufe nach MARZ (vgl. Abschnitt 3.3.1)

Ausgangsgrößen

- binäre Angabe, ob ein Stauprogramm als Schaltwunsch anzugeben ist oder nicht.

Parameter

- $b_{\text{ein}}, b_{\text{aus}}$ (Ein- bzw. Ausschaltgrenzwert Belegungsgrad (Kriterium 1))
- $V_{\text{Kfz,ein}}, V_{\text{Kfz,aus}}$ (Ein- bzw. Ausschaltgrenzwert Prognosegeschwindigkeit (Kriterium 2))
- $Q_{\text{Kfz,Krit2,ein}}$ (Einschaltgrenzwert Verkehrsstärke (für Kriterium 2))
- $\Delta V_{\text{Pkw-Lkw,ein}}$ (Einschaltgrenzwert Pkw-Lkw-Geschwindigkeitsdifferenz)
- $VK_{\text{diff,ein}}, VK_{\text{diff,aus}}$ (Ein- und Ausschaltgrenzwert VKdiff (Kriterium 3))
- $Q_{\text{Kfz,Krit3,ein}}, Q_{\text{Kfz,Krit3,aus}}$ (Ein- und Ausschaltgrenzwert Verkehrsstärke (für Kriterium 3))

Zusätzlich hängt die Funktionsqualität des Verfahrens auch von den Parametern für das Verfahren VKdiff (vgl. Anhang B.1.3) und für die Zuweisung der Verkehrsstufe (vgl. Anhang B.1.1) ab. Sämtliche Parameter müssen einzeln für jeden MQ festgelegt werden können. Vorgaben für die Erstversorgung können [16] (Abschnitt 2.3.5.1, S. 33f) entnommen werden.

Algorithmus

Der Algorithmus kann dem MARZ entnommen werden.

C.1.2 Stauwarnung mit INCA

Eingangsgrößen

wie in „Stauwarnung nach MARZ“, ergänzt um Größen zur Bestimmung weiterer abschnittsbezogener Kennwerte

Ausgangsgrößen

Schaltwunsch für eine der folgenden Stauwarnprogramme:

- keine Warnung
- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h
- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 60 km/h
- Stautrichter lang
- Stautrichter kurz

Parameter

- Gewichte β zur Bewertung des Einflusses der einzelnen Kennwerte im Rahmen des LOGIT-Modells
- Einschaltgrenzwerte α für die Stauwarnprogramme

Algorithmus

- Bestimmung der einzelnen Kennwerte $x_n(t)$ für $n = 1 \dots n_{\max}$
- Bestimmung des gewichteten Mittels der Kennwerte als Störfallindikator $z(t)$ nach Gleichung 39
- Beaufschlagung des Ergebnisses mit einem zufälligen Fehlermaß $\varepsilon(t)$ nach Gleichung 40
- Auswahl einer restriktiveren Warnstufe bei Überschreitung eines Einschaltgrenzwertes oder Auswahl einer weniger restriktiven Warnstufe, wenn eine Verfallszeit für eine Störungsmeldung vergangen ist

$$z(t) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \beta_n x_n(t) \quad (39)$$

$$z^*(t) = z(t) + \varepsilon(t) \quad \text{mit} \quad (40)$$

$$F(\varepsilon) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{\varepsilon}{\sigma}}} \quad (41)$$

Zwischen dem langen und dem kurzen Stautrichter wird in Abhängigkeit von der Lage der Verkehrsstörung in Bezug zum AQ entschieden, für den der Schaltwunsch gilt.

C.2 Verfahren für die präventive Steuerung

C.2.1 Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ

Eingangsgrößen

- $Q_{B,Prog}$ (Trendprognose der Bemessungsverkehrsstärke)
- $\bar{V}_{Pkw,Prog}$ (Trendprognose der mittleren Pkw-Fahrgeschwindigkeit)
- $K_{B,Prog}$ (Trendprognose der Bemessungsverkehrsdichte)
- ggf. binärer Unruheindikator aus dem Verfahren „Unruhe im Verkehr nach MARZ“

Ausgangsgrößen

- Schaltwunsch für eine der Geschwindigkeitsstufen
 - keine Beschränkung
 - 120 km/h
 - 100 km/h
 - 80 km/h
 - 60 km/h

Parameter

- Ein- und Ausschaltgrenzwerte zwischen benachbarten Geschwindigkeitsstufen für jede der Eingangsgrößen

Vorgaben für die Erstversorgung können [16] (Abschnitt 2.3.5.1, Tabellen 7 und 8 auf S. 34) entnommen werden.

Algorithmus

Der Algorithmus kann dem MARZ entnommen werden.

C.2.2 Lkw-Überholverbot wegen Verkehrsbehinderung nach MARZ

Eingangsgrößen

- $Q_{B,P}$
- A_{Lkw}

Ausgangsgrößen

- binäre Entscheidung, ob ein Lkw-Überholverbot als Schaltwunsch angegeben werden soll oder nicht

Parameter

- Ein- und Ausschaltgrenzwert für $Q_{B,P}$
- Ein- und Ausschaltgrenzwert für A_{Lkw}

Algorithmus

Der Algorithmus kann dem MARZ entnommen werden.

C.2.3 Harmonisierung der Geschwindigkeit mit INCA

Eingangsgrößen

wie für „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“ (vgl. Anhang C.2.1), jedoch ohne Unruheindikator

Ausgangsgrößen

- Schaltwunsch für eine der Geschwindigkeitsstufen
 - keine Beschränkung
 - 120 km/h
 - 100 km/h
 - 80 km/h

Parameter

- Einschaltgrenzwerte zwischen benachbarten Geschwindigkeitsstufen für jede der Eingangsgrößen

Es existieren keine Ausschaltgrenzwerte. Stattdessen werden Verfallszeiten verwendet.

Algorithmus

wie für „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“, jedoch mit folgenden Abweichungen:

- kein Schaltkriterium „Unruhe im Verkehr“
- keine Geschwindigkeitsstufe 60 km/h
- zusätzlich Berücksichtigung von Schwellenwerten für die Geschwindigkeit und die Dichte beim Wechsel zwischen 120 km/h und 100 km/h

D Befragungsprotokolle

D.1 Autobahndirektion Südbayern

Gesprächspartner: Johannes Mutzbauer
Art der Befragung: telefonisch
Datum: 08.06.2009
Uhrzeit: ab 10:00 Uhr

Verwendete Verfahren

Nach eigenen Recherchen⁸³ werden und wurden im Zuständigkeitsbereich der ABDSB folgende Verfahren eingesetzt:

- Verkehrsanalyseverfahren:
 - Kalman-Filter-Verfahren (als Komponente der ESE) N
- Detektionsverfahren zur Situationsbewertung:
 - VKdiff-Verfahren (für „Stauwarnung nach MARZ“ und „Fuzzy-AID“) N
- Prognoseverfahren zur Situationsbewertung:
 - Unruhe im Verkehr nach MARZ (für „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“) R
- Verfahren zur Störfallwarnung:
 - Stauwarnung nach MARZ R
 - Stauwarnung mit INCA R P
 - Erweiterte Situationserkennung (ESE) N
 - Fuzzy-AID (als Komponente der ESE) N
- Präventive Steuerung:
 - Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ R
 - Harmonisierung der Geschwindigkeit mit INCA R P
- Umfelddatenerfassung:
 - Nebelwarnung R
 - Nässe- bzw. Regenwarnung R
 - Glättewarnung N

⁸³ vor Allem in [2], [3], [9], [10], [13] sowie für die Umfelddatenerfassung in [7], [11]

Frage 1:

Welche dieser Verfahren werden derzeit im Regelbetrieb (geschlossener Regelkreis) und welche im Probebetrieb (offener Regelkreis) betrieben? Welche Verfahren werden nicht mehr eingesetzt?

Im Regelbetrieb betriebene Verfahren wurden in oben stehender Liste mit **[R]**, im Probebetrieb befindliche Verfahren mit **[P]** und nicht mehr verwendete Verfahren mit **[N]** gekennzeichnet.

VKdiff wird weder für die Stauwarnung nach MARZ noch für Fuzzy-AID verwendet. INCA wird bei der SBA der BAB A 9 im Großraum München⁸⁴ im Regelbetrieb sowie bei einigen weiteren SBA im Probebetrieb eingesetzt.

Regen und Nebel werden automatisch erfasst nach den Prinzipien der MARZ, ergänzt um Prinzipien des Merkblattes für Nässeerfassung der FGSV. Es existieren Systeme zur Erfassung von Straßenglätte, jedoch wird die Glättewarnung derzeit nur per Handschaltung und auf der Grundlage von Informationen der Straßenbetriebsdienste und anderer Stellen eingeleitet. Zur automatischen Glätteerfassung läuft derzeit ein Forschungsvorhaben⁸⁵.

Frage 2:

Welche weiteren, noch nicht genannten Verfahren werden im Zuständigkeitsbereich der ABDSB eingesetzt? Wurden in der Vergangenheit Verfahren eingesetzt, die noch nicht erwähnt wurden?

Derzeit werden keine weiteren Verfahren eingesetzt. Es wurde früher ein Fuzzy-Verfahren zur Erfassung der Witterungsbedingungen genutzt⁸⁶.

Stauwarnung nach MARZ, VKdiff**Frage 3:**

Gibt es im Zuständigkeitsbereich der ABDSB Anlagen, bei denen das Verfahren „Stauwarnung nach MARZ“ nicht eingesetzt wird?

Bei der SBA, die INCA im Regelbetrieb nutzt, werden die Verfahren nach MARZ nicht mehr eingesetzt. Das Verfahren wird ohne die Komponente VKdiff eingesetzt.

Frage 4:

Aus welchen Gründen wird das VKdiff-Verfahren nicht eingesetzt?

Das Verfahren reagiert zu empfindlich. Dieses Problem kann durch Parameteranpassung nicht in ausreichendem Maße behoben werden. Das Verfahren ist anfällig für Fehlalarme.

⁸⁴ Fahrtrichtung Süd: von AD Holledau bis AS München-Fröttmaning-Süd, Fahrtrichtung Nord: von AS München-Fröttmaning-Süd bis AK Neufahrn ⁸⁵ vgl. Nachfrage (Anhang D.2) ⁸⁶ im Rahmen eines Forschungsprojektes der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen

Frage 5:

Welche der folgenden Aussagen gelten für die Wahl und die Anpassung der Parameter des Verfahrens „Stauwarnung nach MARZ“?

- 1. Die Parameter werden nach Augenmaß auf der Grundlage von Erfahrungen gesetzt.*
- 2. Die Parameter werden mittels Optimierungsverfahren bestimmt.*
- 3. Sie werden am realen Verkehrsgeschehen überprüft.*
- 4. Sie werden am offenen Regelkreis (ohne Anzeige) überprüft.*
- 5. Sie werden anhand einer Simulation oder theoretisch überprüft.*

Aussagen 1 und 3 treffen meist (insbesondere in der Vergangenheit) zu. Parameter wurden „am offenen Herzen mit verkehrstechnischem Sachverstand“ gewählt, wobei versucht wurde, einen Kompromiss zwischen verschiedenen Interessen (Betreiberinteressen, Nutzerinteressen, volkswirtschaftliche Interessen) herzustellen. Dies geschah in der Vergangenheit z. T. „unstrukturiert“, wobei es immer wieder Verbesserungen, jedoch mitunter auch nicht zielführende Parameteränderungen gab.

Es stellte sich die Frage, wie Parameter objektiv bewertet werden können. Dies führte zur Betrachtung von Kosten und Nutzen bei der Parameterwahl, die monetär bewertet werden. Dieses Verfahren wird nicht nur im Zusammenhang mit INCA, sondern auch bei Steuerung nach MARZ eingesetzt.

Frage 6:

Werden die Parameter regelmäßig oder nur nach Notwendigkeit überprüft und angepasst?

Eine regelmäßige Überprüfung der Parameter erfolgt nicht. Die Anpassung der Parameter erfolgt in unregelmäßigen Abständen aufgrund eigener Erkenntnisse (des Leitstellenpersonals), bei Beschwerden, bei Unfallhäufungen oder bei anderen Auffälligkeiten, bei denen die Parametrierung ursächlich sein kann. Ein regelmäßiges Qualitätsmanagement, bei dem die Parameter regelmäßig überprüft werden, ist zwar wünschenswert, in der Praxis wird jedoch nur bei Problemen eingegriffen.

Frage 7:

Haben sich bestimmte Parameter als besonders empfindlich erwiesen?

Die Parametrierung des VKdiff-Verfahrens war schwierig.

Der Pkw-Lkw-Umrechnungsfaktor spielt eine Rolle.

Die Glättungsparameter α und β haben einen großen Einfluss. Man gewinnt entweder ein träges (ruhiges) oder ein unruhigeres, stärker auf aktuellen Werten beruhendes Schaltbild.

Frage 8:

Wurde oder wird die Parametrierung durch externe Stellen wie Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros oder eine Betreiberfirma durchgeführt oder unterstützt?

Gelegentlich werden auch externe Partner einbezogen, jedoch ist die Parametrierung eine Kernaufgabe einer Autobahndirektion. Darum beschäftigt sich die ABDSB intensiv hiermit.

Frage 9:

Wie hoch werden ungefähr die Detektions- bzw. Fehlalarmrate für dieses Verfahren eingeschätzt?

Die Detektionsraten sind sowohl bei der Stauwarnung nach MARZ als auch bei INCA gut ($\geq 80\%$). Die Fehlalarmrate bei MARZ liegt bei ca. 8-12 %, bei INCA etwas niedriger.

Bei INCA gibt es noch einige Schritte, die umgesetzt werden müssen. Insgesamt können die Detektions- und Fehlalarmraten für beide Verfahren als gut angesehen werden.

In diesem Zusammenhang wurde auf einen Artikel in der Zeitschrift „Straßenverkehrstechnik“ [13] verwiesen, wo Untersuchungen zur DR und FAR der Verfahren nach MARZ sowie des Verfahrens INCA veröffentlicht wurden. Diese Veröffentlichung entspricht dem aktuellen Stand.

Frage 10:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Verfahren „Stauwarnung nach MARZ“? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

Größere Probleme gibt es derzeit nicht (ohne Berücksichtigung von VKdiff). Jedoch werden Staus u. U. erst spät erkannt, da sie erst detektiert werden, wenn sie einen MQ erreichen.

Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ**Frage 11:**

Gibt es im Zuständigkeitsbereich der ABDSB Anlagen, bei denen das Verfahren „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“ nicht eingesetzt wird?

vgl. Frage D.1

Frage 12:

Welche der folgenden Aussagen gelten für die Wahl und die Anpassung der Parameter des Verfahrens „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“?

- 1. Die Parameter werden nach Augenmaß auf der Grundlage von Erfahrungen gesetzt.*
- 2. Die Parameter werden mittels Optimierungsverfahren bestimmt.*
- 3. Sie werden am realen Verkehrsgeschehen überprüft.*
- 4. Sie werden am offenen Regelkreis (ohne Anzeige) überprüft.*
- 5. Sie werden anhand einer Simulation oder theoretisch überprüft.*

vgl. Frage 5

Bei der Parameteroptimierung, die auch INCA zugrundeliegt, fließt hier auch der monetäre Nutzen der Reisezeitverluste/ -gewinne ein.

Frage 13:

Werden die Parameter regelmäßig oder nur nach Notwendigkeit überprüft und angepasst?

vgl. Frage 6

Frage 14:

Haben sich bestimmte Parameter als besonders empfindlich erwiesen?

Das Verfahren ist empfindlich gegenüber der Wahl der Glättungsparameter α und β . Dies hat Einfluss darauf, ob eine Maßnahme zeitnah eingeleitet oder ein ruhiges Schaltbild erreicht wird.

Frage 15:

Wurde oder wird die Parametrierung durch externe Stellen wie Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros oder eine Betreiberfirma durchgeführt oder unterstützt?

vgl. Frage 8

Frage 16:

Erfolgt eine Bewertung der Harmonisierung? Wenn ja, erfolgt sie über eine Detektions- und Fehlalarmrate oder über ein Maß der Prognosegüte? Wenn ein Maß für die Prognosegüte verwendet wird, wie wird es bestimmt? Was sind wichtige Ergebnisse dieser Bewertung?

Eine Bewertung anhand objektiver Kriterien erfolgt nicht. Durch Überwachung des Verhaltens der SBA und durch Kontrollfahrten wird die Wirksamkeit der Harmonisierung überprüft.

Frage 17:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Verfahren „Stauwarnung nach MARZ“? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

An dieser Stelle wurde auch die in [9] geäußerte Vermutung angesprochen, dass das Verfahren „Harmonisierung der Geschwindigkeit“ in der Praxis nicht vorausschauend präventive Steuerungen umsetzt, sondern eher auf den aktuellen Verkehrszustand reagiert.

Große Probleme gibt es bei geeigneter Parametrierung nicht. Das Problem, das die Schaltung z. T. nur auf den Verkehrszustand reagiert, ist gegeben, stellt aber kein großes Problem dar. Es muss abgeschätzt werden, wann der geeignete Zeitpunkt für eine Reaktion ist, wobei unterschiedliche Fundamentaldiagramme und Verkehrsmodelle zugrunde gelegt werden können. Es besteht auch eine Abhängigkeit vom Nutzerkollektiv des betreffenden Streckenabschnittes.

Die Festlegung der maximalen Anzeigegeschwindigkeit für die Harmonisierung (nach MARZ 120 km/h) ist u. U. bereits zu niedrig, was zu einer niedrigen Akzeptanz führen kann. Aus diesem Grunde wurde diese bei der SBA der BAB A 92 auf 130 km/h erhöht.

Unruhe im Verkehr nach MARZ**Frage 18:**

Wird eine durch den Unruheindikator abgeleitete Schaltempfehlung eher häufig oder eher selten tatsächlich angezeigt?

Im Vergleich zu den Verfahren nach MARZ wird ein Schaltwunsch durch „Unruhe im Verkehr“ seltener berücksichtigt. Hier wird jedoch kein Problem gesehen, da das Verfahren nützlich ist, wenn ein Schaltwunsch berücksichtigt wird und ansonsten nicht schädlich ist.

Häufiger wird ein Schaltwunsch im Einfädungsbereich nach Autobahnknotenpunkten umgesetzt.

Frage 19:

Welche der folgenden Aussagen gelten für die Wahl und die Anpassung der Parameter des Verfahrens „Unruhe im Verkehr“?

- 1. Die Parameter werden nach Augenmaß auf der Grundlage von Erfahrungen gesetzt.*
- 2. Die Parameter werden mittels Optimierungsverfahren bestimmt.*
- 3. Sie werden am realen Verkehrsgeschehen überprüft.*
- 4. Sie werden am offenen Regelkreis (ohne Anzeige) überprüft.*
- 5. Sie werden anhand einer Simulation oder theoretisch überprüft.*

vgl. Frage 5

Frage 20:

Werden die Parameter regelmäßig oder nur nach Notwendigkeit überprüft und angepasst?

vgl. Frage 6

Frage 21:

Haben sich bestimmte Parameter als besonders empfindlich erwiesen?

vgl. Frage 14

Frage 22:

Wurde oder wird die Parametrierung durch externe Stellen wie Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros oder eine Betreiberfirma durchgeführt oder unterstützt?

vgl. Frage 8

Frage 23:

Hat sich das Verfahren „Unruhe im Verkehr“ bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich?

Das Verfahren hat sich bewährt. Die seltene Berücksichtigung des Schaltwunsches muss nicht als Nachteil gewertet werden. Das Verfahren ist eine nützliche Ergänzung zu den Verfahren nach MARZ.

Frage 24:

Wird die Prognosegüte des Verfahrens „Unruhe im Verkehr“ gemessen? Wenn ja, wie und mit welchem Ergebnis?

Die Prognosegüte wird nicht bewertet.

Frage 25:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Verfahren „Unruhe im Verkehr“? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

Große Probleme existieren nicht oder sind durch geeignete Parameteränderung zu beheben.

Erweiterte Situationserkennung (ESE)

Die nachfolgenden Fragen konnten nicht beantwortet werden, da der Gesprächspartner seine Tätigkeit bei der ABDSB aufgenommen hat, nachdem das Verfahren ESE außer Betrieb genommen wurde.

Frage 26:

Welche Verfahren werden zur Gewinnung streckenbezogener Verkehrskenngrößen herangezogen?

k. A.

Frage 27:

Welche der folgenden Aussagen gelten für die Wahl und die Anpassung der Parameter der ESE (inkl. der Komponenten „Kalman-Filter-Verfahren“ und „Fuzzy-AID“)?

- 1. Die Parameter werden nach Augenmaß auf der Grundlage von Erfahrungen gesetzt.*
- 2. Die Parameter werden mittels Optimierungsverfahren bestimmt.*
- 3. Sie werden am realen Verkehrsgeschehen überprüft.*
- 4. Sie werden am offenen Regelkreis (ohne Anzeige) überprüft.*
- 5. Sie werden anhand einer Simulation oder theoretisch überprüft.*
- 6. Es erfolgt eine Wirkungsabschätzung.*

k. A.

Frage 28:

Werden die Parameter regelmäßig oder nur nach Notwendigkeit überprüft und angepasst?

k. A.

Frage 29:

Haben sich bestimmte Parameter als besonders empfindlich erwiesen?

k. A.

Frage 30:

Wurde oder wird die Parametrierung durch externe Stellen wie Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros oder eine Betreiberfirma durchgeführt oder unterstützt?

k. A.

Frage 31:

Hat sich das Verfahren ESE bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich?

k. A.

Frage 32:

Wie hoch werden ungefähr die Detektions- bzw. Fehlalarmrate für dieses Verfahren eingeschätzt?

k. A.

Frage 33:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Verfahren ESE? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

k. A.

Kalman-Filter-Verfahren

Die nachfolgenden Fragen konnten im Wesentlichen nicht beantwortet werden, da der Gesprächspartner seine Tätigkeit bei der ABDSB aufgenommen hat, nachdem das Verfahren ESE und damit auch das Kalman-Filter-Verfahren außer Betrieb genommen wurde.

Frage 34:

Wird das Kalman-Filter-Verfahren nur im Rahmen der ESE oder auch als gesondertes Verfahren eingesetzt?

Das Verfahren wurde nur im Rahmen der ESE genutzt und heute nicht mehr verwendet.

Frage 35:

Wird das Verfahren als Störfallindikator, zur Datenvervollständigung oder für beide Zwecke eingesetzt?

k. A.

Frage 36:

Wenn das Verfahren auch als gesondertes Verfahren verwendet wird, hat es sich bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich?

k. A.

Frage 37:

Wie hoch werden ungefähr die Detektions- bzw. Fehlalarmrate des Störfallindikators eingeschätzt?

k. A.

Frage 38:

Wie hoch wird ungefähr die Genauigkeit der durch das Verfahren gewonnenen Verkehrskenngrößen eingeschätzt?

k. A.

Fuzzy-AID

Die nachfolgenden Fragen konnten im Wesentlichen nicht beantwortet werden, da der Gesprächspartner seine Tätigkeit bei der ABDSB aufgenommen hat, nachdem das Verfahren ESE und damit auch das Kalman-Filter-Verfahren außer Betrieb genommen wurde.

Frage 39:

Wird das Verfahren Fuzzy-AID nur im Rahmen der ESE oder auch als gesondertes Verfahren eingesetzt?

Das Verfahren wurde nur im Rahmen der ESE genutzt und heute nicht mehr verwendet.

Frage 40:

Wenn das Verfahren auch als gesondertes Verfahren verwendet wird, hat es sich bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich?

k. A.

Frage 41:

Wird die Qualität der Verkehrslageklassifikation gemessen? Wenn ja, wie und mit welchem Ergebnis?

k. A.

INCA**Frage 42:**

Werden die untergeordneten Verfahren der Stauwarnung und Harmonisierung in INCA häufiger oder seltener geschaltet als bei den Verfahren nach MARZ?

Eine signifikante Veränderung diesbezüglich wurde nicht beobachtet. Es trat meist eine leichte Verbesserung der DR und eine deutliche Verbesserung der FAR ein.

Frage 43:

Wurde oder wird die Wartung der Verfahrenssoftware (insbesondere die Parametrierung) durch externe Stellen wie Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros oder eine Betreiberfirma durchgeführt?

Das Verfahren wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens, an dem u. a. die TU München beteiligt war. Es kam erstmals bei der SBA der BAB A 8 (München – Salzburg, im Großraum München) zum Einsatz. Somit war die ABDSB als Erste in die Anwendung von INCA involviert. Die Parametrierung erfolgt automatisch.

Frage 44:

Hat sich das Verfahren INCA bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich?

Das Verfahren hat sich bewährt, jedoch haben die Verfahren nach MARZ ebenfalls ihre Stärken und können ebenso gut funktionieren. INCA ist kein vollständiger Ersatz für die Verfahren nach MARZ.

Frage 45:

Wie hoch werden ungefähr die Detektions- bzw. Fehlalarmrate für dieses Verfahren eingeschätzt?

Zahlenwerte können einem Artikel der Zeitschrift „Straßenverkehrstechnik“ [13] entnommen werden. Gegenüber den Verfahren nach MARZ können i. d. R. leicht verbesserte DR und deutlich verbesserte FAR erzielt werden.

Frage 46:

Erfolgt eine Bewertung der Harmonisierung? Wenn ja, erfolgt sie über eine Detektions- und Fehlalarmrate oder über ein Maß der Prognosegüte? Wenn ein Maß für die Prognosegüte verwendet wird, wie wird es bestimmt? Was sind wichtige Ergebnisse dieser Bewertung?

Eine Bewertung durch objektive Kriterien erfolgt nicht. Eine Einschätzung der Wirksamkeit erfolgt auf die gleiche Weise wie für die Harmonisierung nach MARZ (vgl. Frage 16).

Frage 47:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Verfahren INCA? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

Größere Probleme existieren nicht.

Umfelddatenerfassung**Frage 48:**

Werden Umfelddaten in Form bestimmter Schaltprogramme berücksichtigt oder wirken sie sich auf die Schwellenwerte für Harmonisierungsprogramme aus?

Es wurde die im MARZ beschriebene Vorgehensweise gewählt.

Frage 49:

Wie hoch wird die DR bzw. FAR der Nässe- und Nebelwarnung eingeschätzt?

Es sind keine Zahlen verfügbar, aber Nichtdetektionen und Fehlalarme kommen durchaus vor.

Frage 50:

Wie hoch wird die Einsatzbereitschaft automatischer Glättewarnanlagen eingeschätzt?

Glättewarnanlagen werden derzeit noch nicht im Automatikbetrieb eingesetzt. Handschaltungen aufgrund externer Meldungen sind möglich.

Neue Steuerverfahren

Diese Fragen werden zu jedem neu implementierten, in der Liste zu Frage 1 noch nicht genannten Steuerverfahren zusätzlich gestellt. Im Falle dieser Befragung sind keine solchen Steuerverfahren vorhanden.

Frage 51:

Ersetzt das neue Verfahren ein derzeit eingesetztes Verfahren?

Frage 52:

Worin werden die Vorteile des neuen Verfahrens gesehen?

Nicht mehr verwendete Steuerverfahren

Diese Fragen werden zu jedem Verfahren gestellt, das nicht mehr genutzt wird. Dies betrifft in dieser Befragung die ESE sowie das damit verbundene Kalman-Filter-Verfahren und Fuzzy-AID. Die Fragen beziehen sich auf die ESE.

Die nachfolgenden Fragen konnten größtenteils nicht beantwortet werden, da der Gesprächspartner seine Tätigkeit bei der ABDSB aufgenommen hat, nachdem das Verfahren ESE außer Betrieb genommen wurde.

Frage 53:

Wann wurde das Verfahren abgeschaltet?

Die Abschaltung erfolgte vor mehr als neun Jahren.

Frage 54:

Wurde das Verfahren ersetzt oder ersatzlos abgeschaltet?

Es wurde ersatzlos abgeschaltet. INCA funktioniert auf eine andere Weise und kann nicht als Ersatz angesehen werden.

Frage 55:

Welche Gründe für die Abschaltung gab es?

Die Gründe sind nicht genau bekannt, aber vermutlich war der Aufwand für den weiteren Einsatz des Verfahrens zu hoch.

Frage 56:

Wurde die Parametrierung oder Softwarewartung für das abgeschaltete Verfahren durch ein Unternehmen, eine Forschungseinrichtung oder ein Ingenieurbüro vorgenommen? Wenn ja, wurde die Zusammenarbeit eingestellt, bevor das Verfahren abgeschaltet wurde?

k. A.

Frage 57:

Gab es eine Schulung des Leitstellenpersonals für den Umgang mit dem Steuerverfahren?

k. A.

Frage 58:

War die Wirksamkeit des abgeschalteten Verfahrens bei seiner Einrichtung praktisch erprobt, durch Simulation bestätigt oder nur theoretisch nachgewiesen worden?

k. A.

Frage 59:

Welches waren typische, häufig auftretende Situationen, in denen die SBA-Steuerung unerwünschtes Verhalten gezeigt hat?

k. A.

Frage 60:

Wie hoch wurden ggf. DR und FAR bzw. die Prognosegüte mit dem abgeschalteten Verfahren eingeschätzt?

k. A.

Qualitätsmanagement**Frage 61:**

Welches sind typische, häufig auftretende Situationen, in denen die SBA-Steuerung insgesamt ein unerwünschtes Verhalten zeigt?

Abgesehen von den üblichen und mit vertretbarem Aufwand nicht vollständig zu vermeidenden Fehlalarme gibt es keine besondere Häufung bestimmter Probleme.

Frage 62:

Wird der Befolgungsgrad oder auch die Akzeptanz der SBA bewertet?

Anhand gemessener Fahrgeschwindigkeiten wird der Befolgungsgrad erfasst und so auf die Akzeptanz geschlossen. Die Bestimmung einer Akzeptanz wird als schwierig angesehen, da dies auf subjektiven Einflüssen beruht. Es finden außerdem Kontrollfahrten statt, die als Reaktion auf die Kritik von Verkehrsteilnehmern eingeführt wurden. Hierbei wird stichprobenartig neben den Anzeigezuständen auch das Verhalten der Verkehrsteilnehmer (z. B. dichtes Auffahren, Geschwindigkeitswahl, etc.) beobachtet.

Frage 63:

Welche weiteren Indikatoren für die kurzfristige Bewertung der Wirksamkeit einer SBA (neben Akzeptanz bzw. Befolgungsgrad sowie DR und FAR) werden derzeit eingesetzt?

Im Grunde werden keine weiteren Indikatoren eingesetzt.

Frage 64:

Werden besondere (über die Festlegungen im MARZ hinausgehende) Maßnahmen der Qualitätssicherung umgesetzt?

Ein aktuelles Forschungsvorhaben beschäftigt sich mit einer weitergehenden Plausibilitätsprüfung (z. T. bezogen auf die Umfelddatenerfassung). Ansonsten werden die Verfahren nach MARZ angewendet.

Frage 65:

Sind Probleme bei einzelnen Maßnahmen bekannt (z. B. keine Verbesserung der Verkehrssituation messbar, fehlende Akzeptanz)?

Es gibt keine besondere Häufung von Problemen für eine bestimmte Maßnahme. Wenn Probleme auftreten, können sie i. d. R. durch Parameteränderungen behoben werden.

In der Vergangenheit hat sich die höchste Geschwindigkeitsstufe bei der Harmonisierung (nach MARZ 120 km/h) als zu restriktiv herausgestellt. Die Anzeigegeschwindigkeit wurde auf 130 km/h erhöht.

Frage 66:

Ist das Messsystem ausfallsicher bzw. redundant?

Eine gewisse Ausfallsicherheit bzw. Redundanz wird nur durch die Ersatzwertverfahren nach MARZ und mit Einschränkungen (z. B. bei zwischen den MQ liegenden AS) erreicht. Eine weitergehende Redundanz existiert nicht.

Frage 67:

Sind Informationen über den Verkehrsablauf verfügbar, die in der SBA-Steuerung nicht verwendet werden, aber als unabhängige Größen zur Qualitätsbewertung herangezogen werden könnten?

Reisezeiten könnten ein unabhängiges Kriterium zur Bewertung der Qualität für den Nutzer darstellen, sind aber schwer zu erfassen (insbesondere Tür-zu-Tür-Reisezeiten, die den Nutzen für den Verkehrsteilnehmer explizit ausdrücken).

Allgemeine Potenziale**Frage 68:**

Wo sehen Sie wesentliche (systembedingte) Einschränkungen und Unzulänglichkeiten bei derzeit eingesetzten Steuerverfahren?

Akzeptanzprobleme spielen eine Rolle.

Frage 69:

Wo sehen Sie organisatorischen Verbesserungsbedarf?

Die Qualitätssicherung und -bewertung der SBA-Steuerverfahren spielt noch eine eher untergeordnete Rolle.

Eine regelmäßige Überprüfung der Parameter findet bei den Verfahren nach MARZ nicht statt.

Frage 70:

Welche mittel- bzw. langfristigen Maßnahmen könnten zur Verbesserung der SBA-Steuerung hilfreich sein?

Das Verfahren VKdiff sollte weiterentwickelt werden, so dass es für den Einsatz genutzt werden kann. Mit einem ausreichenden Arbeitseinsatz könnten die bestehenden Probleme gelöst werden.

Es sollten weitere Versuche unternommen werden, DR und FAR zu verbessern. Vor allem weitergehende Plausibilitätsprüfungen sind hierbei ein Potenzial.

Es sollten Maßnahmen untersucht werden, um die Akzeptanz zu steigern.

D.2 Autobahndirektion Südbayern, Nachfrage

Gesprächspartner: Johannes Mutzbauer
Art der Befragung: per Email
Datum: 10.06.2009

Frage 1:

Sie erwähnten Kontrollfahrten zur Beobachtung des Verkehrsverhaltens sowie des Verhaltens der SBA selbst. Werden diese in regelmäßigen Zeitabständen durchgeführt? Ist das Fahrzeug mit besonderer Messtechnik (z. B. Radar) oder mit Kameras ausgerüstet?

„Diese Fahrten finden während der Parametrierung und Einstellung von neuen oder geänderten Anlagen regelmäßig statt. Die Häufigkeit richtet sich nach den geänderten Parametern und der generellen Verkehrszusammensetzung (Werktage, Reiseverkehre, ...). Die Befahrungen werden als sogenannte Mitschwimmfahrten durchgeführt, d. h. wir versuchen auf dem vorhandenen Verkehrsfluss einzugehen. Die realisierte Geschwindigkeit wird mittels GPS-Empfängern in Weg-Zeit-Geschwindigkeitsdiagramme dargestellt. Zudem wird die Anzeige protokolliert und dargestellt.“

Frage 2:

Sie erwähnten außerdem ein Fuzzy-Modul für die Umfelddatenerkennung, das sich nicht durchgesetzt hat. Kennen Sie die Gründe hierfür?

„Das Modul ist im Merkblatt für Nässeerfassung der FGSV dokumentiert. Wegen der relativ aufwendigen Parametrierung und verschiedener systemtechnischer Probleme wurde das System nicht weiter (von uns) verfolgt.“

Frage 3:

Sie erwähnten ein Forschungsvorhaben, in dem u. a. Plausibilitätsprüfungen und andere Verbesserungsmöglichkeiten untersucht wurden. Sind zu diesem Forschungsvorhaben nähere Informationen z. B. im Internet abrufbar (z. B. Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens, Beteiligte)?

„Dies geschieht im Rahmen des FGSV AK 3.2.1. Die Ergebnisse der Merkblattarbeit sind noch nicht veröffentlicht. In der Straßenverkehrstechnik haben wir die ersten grundsätzlichen Ergebnisse zusammengestellt. Auf der Homepage der TUM-VT sind die Aktivitäten kurz zusammengestellt.

(http://www.vt.bv.tum.de/index.php?option=com_content&task=view&id=68&Itemid=94)“

Frage 4:

Können Sie mir einen Ansprechpartner empfehlen, der Erfahrung mit der Erweiterten Situationserkennung hat?

„Leider nein.“

D.3 Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen (Straßen.NRW)

Gesprächspartner: Michael Kalisch
Art der Befragung: persönliches Gespräch
Datum: 10.07.2009
Uhrzeit: ab 9:30 Uhr

Verwendete Verfahren

Nach eigenen Recherchen⁸⁷ werden und wurden in Nordrhein-Westfalen folgende Verfahren eingesetzt:

- Verkehrsanalyseverfahren:
 - Kalman-Filter-Verfahren (als eigenständiges Verfahren) N
- Detektionsverfahren zur Situationsbewertung:
 - VKdiff-Verfahren (für „Stauwarnung nach MARZ“) N
- Prognoseverfahren zur Situationsbewertung:
 - Unruhe im Verkehr nach MARZ (für „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“) R
 - Zuverlässigkeit des Verkehrs (Ferrari-Verfahren) N
 - Traffic Forecast N
- Verfahren zur Störfallwarnung:
 - Stauwarnung nach MARZ R
- Präventive Steuerung:
 - Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ R
- Umfelddatenerfassung:
 - Nebelwarnung R
 - Nässe- bzw. Regenwarnung R
 - Glättewarnung N

Frage 1:

Welche dieser Verfahren werden derzeit im Regelbetrieb (geschlossener Regelkreis) und welche im Probetrieb (offener Regelkreis) betrieben? Welche Verfahren werden nicht mehr eingesetzt?

Im Regelbetrieb betriebene Verfahren wurden in oben stehender Liste mit R, im Probetrieb befindliche Verfahren mit P und nicht mehr verwendete Verfahren mit N gekennzeichnet⁸⁸.

Derzeit werden keine Verfahren im Probetrieb eingesetzt; es sind nur die Verfahren nach

⁸⁷ vor Allem in [2], [3], [9], [10] sowie für die Umfelddatenerfassung in [7], [11] ⁸⁸ Nach Angaben vom Autobahnamt Hamm wurde bis Ende Juni 2009 ein zusätzliches Verfahren zur Pulkerkennung auf der BAB A 44 bei Dortmund eingesetzt.

MARZ im Einsatz. Einige Strecken verfügen auch über Zuflussdosierungsanlagen.

Im Autobahnkreuz Köln-Ost ist auch auf Überfahrten eine Stauwarnanlage im Einsatz. Diese wurde zunächst aufgrund der vorhandenen Messtechnik über Grenzwerte für die Belegung gesteuert, wobei sich diese Vorgehensweise jedoch als wenig effektiv erwiesen hat, da die Belegungswerte abhängig vom Schleifentyp, von der Schleifenqualität und vom Hersteller sind. Heute werden Doppelinduktionsschleifen verwendet.

Die Nebel- und Nässewarnung läuft in allen Anlagen im Automatikbetrieb, wobei jedoch in einigen Fällen relativ hohe Abstände zwischen den Messeinrichtungen vorliegen. Einige Anlagen wurden anfangs als Nebelwarnanlagen eingerichtet.

Die Glättewarnung erfolgt nicht durch automatische Schaltungen. Zwar wird die Fahrbahntemperatur und der Restsalzgehalt gemessen, jedoch werden diese Angaben vor Allem an den Winterdienst weitergegeben und nicht für die VBA-Steuerung genutzt. Die Glättewarnung kann per Handschaltung auf Zuruf durch die Polizei aktiviert werden.

Frage 2:

Welche weiteren, noch nicht genannten Verfahren werden in Nordrhein-Westfalen eingesetzt? Wurden in der Vergangenheit Verfahren eingesetzt, die noch nicht erwähnt wurden?

Es werden derzeit keine weiteren Verfahren eingesetzt. Auch in naher Zukunft ist der Einsatz neuer Verfahren zur Streckenbeeinflussung nicht geplant. In Nordrhein-Westfalen wird derzeit vor allem der Aufbau von Zuflussdosierungs- und Netzbeeinflussungsanlagen vorangetrieben.

Ob in der Vergangenheit noch weitere Verfahren eingesetzt werden, ist nicht bekannt.

Verfahren nach MARZ

Frage 3:

Gibt es in Nordrhein-Westfalen Anlagen, bei denen die Verfahren „Stauwarnung nach MARZ“ und „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“ nicht eingesetzt werden (z. B. reine Nebelwarnanlagen)?

Anfangs waren die SBA auf den BAB A 4 und A 61 westlich von Köln reine Nebelwarnanlagen, die nicht über solche Programme verfügten. Diese Anlagen wurden jedoch rasch zu vollwertigen SBA (mit verkehrsabhängiger Steuerung) ausgebaut. Die SBA auf der BAB A 45 im Sauerland könnte auch heute noch eine reine Nebelwarnanlage sein⁸⁹.

Frage 4:

Aus welchen Gründen wird das VKdiff-Verfahren nicht eingesetzt?

Die Gründe sind nicht bekannt. Das Verfahren ist zwar implementiert, wird jedoch seit langem nicht mehr eingesetzt und es ist nicht bekannt, ob es überhaupt jemals im Regelbetrieb (automatischer Betrieb) eingesetzt wurde. Die Abschaltung des Verfahrens erfolgt durch Wahl eines sehr hohen Schwellenwertes für VK_{diff} im Verfahren „Stauwarnung nach MARZ“.

Frage 5:

⁸⁹ Für Informationen zu dieser SBA wurde auf das Autobahnamt Hamm verwiesen. Hier wurde bestätigt, dass auch diese Anlage mittlerweile über eine verkehrsabhängige Steuerung verfügt.

Welche der folgenden Aussagen gelten für die Wahl und die Anpassung der Parameter der Verfahren nach MARZ?

- 1. Die Parameter werden nach Augenmaß auf der Grundlage von Erfahrungen gesetzt.*
- 2. Die Parameter werden mittels Optimierungsverfahren bestimmt.*
- 3. Sie werden am realen Verkehrsgeschehen überprüft.*
- 4. Sie werden am offenen Regelkreis (ohne Anzeige) überprüft.*
- 5. Sie werden anhand einer Simulation oder theoretisch überprüft.*

Aussagen 1 und 3 treffen zu.

Frage 6:

Werden die Parameter regelmäßig oder nur nach Notwendigkeit überprüft und angepasst?

Im Normalfall findet nach einer einmaligen Parametrierung der Anlage bei Inbetriebnahme keine weitere regelmäßige Überprüfung statt. Die Parameter werden nur bei Beschwerden und z. B. auf Zuruf durch die Polizei überprüft und ggf. angepasst.

Aktuell wird angestrebt, in jedem Jahr eine SBA zu überprüfen. Hierzu soll nach Möglichkeit auch eine Beobachtung des Verkehrsgeschehens und des Verhaltens der SBA vor Ort erfolgen, wobei sowohl die Beobachtung von einem festen Standort als auch das Befahren der Beeinflussungsstrecke in Betracht kommt. Messungen z. B. von Geschwindigkeitsverläufen längs der Strecke sind nicht geplant. Die Überprüfung der Anlagen gelingt nicht immer, da dieser Aufgabe im Vergleich zu anderen Projekten (z. B. Neueinrichtung von Zuflussdosierungs- und Netzbeeinflussungsanlagen, Aufbau einer neuen Verkehrsrechnerzentrale) nur eine geringe Priorität beigemessen wird.

Frage 7:

Haben sich bestimmte Parameter als besonders empfindlich erwiesen?

Früher wurde die Geschwindigkeitsstufe 100 km/h des Harmonisierungsprogrammes nur anhand eines Schwellenwertes für die Bemessungsverkehrsstärke geschaltet. Dies führte dazu, dass das Programm zu schnell aktiviert wurde. Daher werden in einigen SBA⁹⁰ zusätzlich Grenzwerte für die Geschwindigkeit und die Verkehrsdichte verwendet. Aus den gleichen Gründen wurde auf den Verkehrsstärkengrenzwert für die Geschwindigkeitsstufe 80 km/h verzichtet. Es wurde festgestellt, dass unter bestimmten Bedingungen mehr Fahrzeuge einen MQ passieren können als angenommen.

Frage 8:

Wurde oder wird die Parametrierung durch externe Stellen wie Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros oder eine Betreiberfirma durchgeführt oder unterstützt?

Die Inbetriebnahme einschließlich einer ersten Parametrierung wird von einem externen Unternehmen begleitet. Aufgrund der Tatsache, dass Straßen.NRW nicht ausreichend Personal für die Überprüfung von SBA hat, wurde in Erwägung gezogen, auch diese Aufgabe an externe Partner abzugeben. Es wird jedoch ein Problem bezüglich der Unabhängigkeit gesehen, wenn eine Betreiberfirma die selbst errichteten SBA prüfen soll.

Frage 9:

⁹⁰ genannt wurden die Anlagen auf den BAB A 3 und A 57

Wie hoch werden ungefähr die Detektions- bzw. Fehlalarmrate für die Stauwarnung eingeschätzt? Erfolgt eine Bewertung der Harmonisierung? Wenn ja, erfolgt sie über eine Detektions- und Fehlalarmrate oder über ein Maß der Prognosegüte? Wenn ein Maß für die Prognosegüte verwendet wird, wie wird es bestimmt? Was sind wichtige Ergebnisse dieser Bewertung?

Hier kann derzeit keine Aussage getroffen werden, da keine aktuellen Untersuchungsergebnisse vorliegen.

Frage 10:

Gibt es wesentliche Probleme mit den Verfahren nach MARZ? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

Mangels einer ausreichend intensiven Beobachtung des Verhaltens der SBA kann hierzu keine sinnvolle Aussage getroffen werden.

Unruhe im Verkehr nach MARZ

Frage 11:

Wird eine durch den Unruheindikator abgeleitete Schaltempfehlung eher häufig oder eher selten tatsächlich angezeigt?

Ohne dass dies durch eine Untersuchung belegt werden kann, führt Unruhe im Verkehr selten zu einer Schaltung.

Frage 12:

Gelten für die Parameter des Verfahrens „Unruhe im Verkehr“ die gleichen Grundsätze wie für die Verfahren nach MARZ?

Ja.

vgl. Fragen 5 bis 8

Frage 13:

Hat sich das Verfahren „Unruhe im Verkehr“ bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich?

In dem Verfahren wird ein grundsätzlicher Nutzen gesehen.

Frage 14:

Wird die Prognosegüte des Verfahrens „Unruhe im Verkehr“ gemessen? Wenn ja, wie und mit welchem Ergebnis?

Die Prognosegüte wird nicht bewertet.

Frage 15:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Verfahren „Unruhe im Verkehr“? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

k. A. (vgl. Frage 10)

Kalman-Filter-Verfahren

Die nachfolgenden Fragen konnten im Wesentlichen nicht beantwortet werden, da der Gesprächspartner seine Tätigkeit bei Straßen.NRW aufgenommen hat, nachdem das Kalman-Filter-Verfahren außer Betrieb genommen wurde.

Frage 16:

Gibt es neben den automatisch aktualisierten Parametern weitere Eingriffsmöglichkeiten, die entscheidend für die Qualität der Ausgangsgrößen sein können? Welche dieser Eingriffsmöglichkeiten ist besonders empfindlich?

k. A.

Frage 17:

Wurde oder wird die Parametrierung durch externe Stellen wie Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros oder eine Betreiberfirma durchgeführt oder unterstützt?

k. A.

Frage 18:

Nach Angaben in der Literatur (im Wesentlichen [8]) wird der Störfallindikator „fiktiver Zufluss“ nicht genutzt. Wie werden stattdessen Störungen erkannt?

k. A.

Frage 19:

Wie hoch wird ungefähr die Qualität der gewonnenen Verkehrsdaten eingeschätzt? Wie hoch wird (z. B. im Vergleich zu anderen Verfahren) die Detektions- bzw. Fehlalarmrate der Störfallerkennung eingeschätzt?

k. A.

Frage 20:

Hat sich das Kalman-Filter-Verfahren bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich?

Das Verfahren hat sich nicht bewährt, es ist jedoch nicht bekannt, warum es nicht mehr eingesetzt wird. Es wird vermutet, dass die Pflege zu aufwändig war und mangelnde Erfahrung des Leitstellenpersonals mit dem Verfahren die Nutzung erschwerte.

Frage 21:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Kalman-Filter-Verfahren? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

k. A.

Zuverlässigkeit im Verkehr (Ferrari-Verfahren)

Die nachfolgenden Fragen konnten im Wesentlichen nicht beantwortet werden, da die SBA-Steuerung für den Landschaftsverband Westfalen-Lippe noch immer durch das Autobahnamt Hamm durchgeführt wird. Außerdem wurde das Verfahren seit längerer Zeit nicht mehr genutzt. Als Ansprechpartner wurde Herr Kipper vom Autobahnamt Hamm vorgeschlagen.

Frage 22:

Wie wird eine erhöhte Störfallwahrscheinlichkeit in einen Schaltwunsch überführt? Welche Schaltbilder werden genutzt? (Gab es wesentliche Abweichungen von den Vorschlägen von Ferrari?)

k. A.

Frage 23:

Welche der folgenden Aussagen gelten für die Wahl und die Anpassung der Parameter des Verfahrens „Zuverlässigkeit im Verkehr“?

- 1. Die Parameter werden nach Augenmaß auf der Grundlage von Erfahrungen gesetzt.*
- 2. Die Parameter werden mittels Optimierungsverfahren bestimmt.*
- 3. Sie werden am realen Verkehrsgeschehen überprüft.*
- 4. Sie werden am offenen Regelkreis (ohne Anzeige) überprüft.*
- 5. Sie werden anhand einer Simulation oder theoretisch überprüft.*
- 6. Es erfolgt eine Wirkungsabschätzung.*

k. A.

Frage 24:

Werden die Parameter regelmäßig oder nur nach Notwendigkeit überprüft und angepasst?

k. A.

Frage 25:

Haben sich bestimmte Parameter als besonders empfindlich erwiesen?

k. A.

Frage 26:

Wurde oder wird die Parametrierung durch externe Stellen wie Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros oder eine Betreiberfirma durchgeführt oder unterstützt?

k. A.

Frage 27:

Hat sich das Verfahren „Zuverlässigkeit im Verkehr“ bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich (insbesondere im Vergleich zu „Unruhe im Verkehr“)?

k. A.

Frage 28:

Wie hoch werden ungefähr die Detektions- bzw. Fehlalarmrate für dieses Verfahren eingeschätzt?

k. A.

Frage 29:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Verfahren „Zuverlässigkeit des Verkehrs“? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

k. A.

Traffic Forecast

Die nachfolgenden Fragen konnten im Wesentlichen nicht beantwortet werden, da der Gesprächspartner seine Tätigkeit bei Straßen.NRW aufgenommen hat, nachdem das Verfahren „Traffic Forecast“ außer Betrieb genommen wurde.

Frage 30:

Erfolgt mit diesem Verfahren eine Störfallerkennung? Wenn ja, wie? Wo werden die Prognosewerte weiter verwendet?

k. A.

Frage 31:

Welche der folgenden Aussagen gelten für die Wahl und die Anpassung der nicht durch Erlernen von Zusammenhängen bestimmbar Parameter des Verfahrens „Traffic Forecast“?

- 1. Die Parameter werden nach Augenmaß auf der Grundlage von Erfahrungen gesetzt.*
- 2. Die Parameter werden mittels Optimierungsverfahren bestimmt.*
- 3. Sie werden am realen Verkehrsgeschehen überprüft.*
- 4. Sie werden am offenen Regelkreis (ohne Anzeige) überprüft.*
- 5. Sie werden anhand einer Simulation oder theoretisch überprüft.*
- 6. Es erfolgt eine Wirkungsabschätzung.*

k. A.

Frage 32:

Werden die Parameter regelmäßig oder nur nach Notwendigkeit überprüft und angepasst?

k. A.

Frage 33:

Haben sich bestimmte Parameter als besonders empfindlich erwiesen?

k. A.

Frage 34:

Wurde oder wird die Parametrierung durch externe Stellen wie Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros oder eine Betreiberfirma durchgeführt oder unterstützt?

k. A.

Frage 35:

Hat sich das Verfahren insbesondere im Vergleich zum Kalman-Filter-Verfahren bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich?

k. A.

Frage 36:

Wie hoch wird ungefähr die Genauigkeit der durch das Verfahren gewonnenen Prognosewerte eingeschätzt?

k. A.

Frage 37:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Verfahren „Traffic Forecast“? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

k. A.

Umfelddatenerfassung

Frage 38:

Werden Umfelddaten in Form bestimmter Schaltprogramme berücksichtigt oder wirken sie sich auf die Schwellenwerte für Harmonisierungsprogramme aus?

Es wurde die im MARZ beschriebene Vorgehensweise gewählt.

Frage 39:

Wie hoch wird die DR bzw. FAR der Nässe- und Nebelwarnung eingeschätzt?

Mangels entsprechender Untersuchungen liegen keine aktuellen Werte vor.

Frage 40:

Wie hoch wird die Einsatzbereitschaft automatischer Glättewarnanlagen eingeschätzt?

Glättewarnanlagen werden derzeit noch nicht im Automatikbetrieb eingesetzt. Warnungen werden nur auf Zuruf durch die Polizei durch Handschaltung umgesetzt.

Neue Steuerverfahren

Diese Fragen werden zu jedem neu implementierten, in der Liste zu Frage 1 noch nicht genannten Steuerverfahren zusätzlich gestellt. Im Falle dieser Befragung sind keine solchen Steuerverfahren vorhanden.

Frage 41:

Ersetzt das neue Verfahren ein derzeit eingesetztes Verfahren?

Frage 42:

Worin werden die Vorteile des neuen Verfahrens gesehen?

Nicht mehr verwendete Steuerverfahren

Diese Fragen werden zu jedem Verfahren gestellt, das nicht mehr genutzt wird. Dies betrifft in dieser Befragung das Kalman-Filter-Verfahren und die Verfahren „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ und „Traffic Forecast“.

Die nachfolgenden Fragen konnten nicht beantwortet werden, da der Gesprächspartner seine Tätigkeit bei Straßen.NRW aufgenommen hat, nachdem die Verfahren außer Betrieb genommen wurden.

Frage 43:

Wann wurde das Verfahren abgeschaltet?

Frage 44:

Wurde das Verfahren ersetzt oder ersatzlos abgeschaltet?

Frage 45:

Welche Gründe für die Abschaltung gab es?

Frage 46:

Wurde die Parametrierung oder Softwarewartung für das abgeschaltete Verfahren durch ein Unternehmen, eine Forschungseinrichtung oder ein Ingenieurbüro vorgenommen? Wenn ja, wurde die Zusammenarbeit eingestellt, bevor das Verfahren abgeschaltet wurde?

Frage 47:

Gab es eine Schulung des Leitstellenpersonals für den Umgang mit dem Steuerverfahren?

Frage 48:

War die Wirksamkeit des abgeschalteten Verfahrens bei seiner Einrichtung praktisch erprobt, durch Simulation bestätigt oder nur theoretisch nachgewiesen worden?

Frage 49:

Welches waren typische, häufig auftretende Situationen, in denen die SBA-Steuerung unerwünschtes Verhalten gezeigt hat?

Frage 50:

Wie hoch wurden ggf. DR und FAR bzw. die Prognosegüte mit dem abgeschalteten Verfahren eingeschätzt?

Qualitätsmanagement

Frage 51:

Welches sind typische, häufig auftretende Situationen, in denen die SBA-Steuerung insgesamt ein unerwünschtes Verhalten zeigt?

Bei Pulks langsam fahrender Fahrzeuge (z. B. Lkw) reagieren die SBA oft zu langsam. Das bedeutet, dass eine Geschwindigkeitsbegrenzung als Reaktion auf den durchfahrenden Pulk erst aktiv wird, wenn dieser den entsprechenden Abschnitt bereits wieder verlassen hat. Die Geschwindigkeitsbegrenzung ist dann für den Verkehrsteilnehmer nicht nachvollziehbar und kann zu Akzeptanzverlusten führen.

Frage 52:

Wird der Befolgungsgrad oder auch die Akzeptanz der SBA bewertet?

Beides wird nicht erfasst.

Frage 53:

Welche weiteren Indikatoren für die kurzfristige Bewertung der Wirksamkeit einer SBA (neben Akzeptanz bzw. Befolgungsgrad sowie DR und FAR) werden derzeit eingesetzt?

Die Wirksamkeit wird nur selten überhaupt bewertet. Indikatoren für die kurzfristige Bewertung werden im Wesentlichen nicht genutzt. Bei einer Bewertung wird i. d. R. eine qualitative Einschätzung des Verhaltens einer SBA getroffen.

Derzeit findet im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen eine Untersuchung zur Echt-

zeitbeurteilung der Wirksamkeit statt⁹¹.

Frage 54:

Werden besondere (über die Festlegungen im MARZ hinausgehende) Maßnahmen der Qualitätssicherung umgesetzt?

Nein.

Frage 55:

Sind Probleme bei einzelnen Maßnahmen bekannt (z. B. keine Verbesserung der Verkehrssituation messbar, fehlende Akzeptanz)?

Mangels entsprechender Untersuchungen kann hierzu nichts gesagt werden.

Frage 56:

Ist das Messsystem ausfallsicher bzw. redundant?

Da der Abstand der MQ auf den meisten durch SBA beeinflussten Strecken bei ca. 1-1,5 km liegt, kann bei Ausfall eines gesamten MQ u.U. das Ersatzwertverfahren nach MARZ angewendet werden. Es gibt jedoch auch Anlagen mit einem größeren Abstand zwischen den MQ (2-2,5 km, z. B. BAB A 4 zwischen Köln und Aachen), wodurch dort kein Ersatzwertverfahren angewendet werden kann.

Besondere Maßnahmen zur Schaffung einer Redundanz oder zur Erhöhung der Ausfallsicherheit sind nicht umgesetzt.

Frage 57:

Sind Informationen über den Verkehrsablauf verfügbar, die in der SBA-Steuerung nicht verwendet werden, aber als unabhängige Größen zur Qualitätsbewertung herangezogen werden könnten?

Nein, zur Zeit nicht. Informationen aus der Netzbeeinflussung (z. B. Reisezeiten) können nicht ohne Weiteres für die SBA-Steuerung genutzt werden, da die Steuerprozesse voneinander entkoppelt sind.

Allgemeine Potenziale

Frage 58:

Wo sehen Sie wesentliche (systembedingte) Einschränkungen und Unzulänglichkeiten bei derzeit eingesetzten Steuerungsverfahren?

Die Detektion von sich langsam bewegenden Fahrzeugpulks (z. B. verursacht durch überholende Lkw) führt erst zu spät zu einer Herabsetzung der Anzeigegeschwindigkeit. Zum Zeitpunkt der Schaltung hat der Pulk den Abschnitt oft bereits verlassen, so dass der Sinn der Geschwindigkeitsbegrenzung für den Verkehrsteilnehmer nicht nachvollziehbar ist, so dass Akzeptanzprobleme entstehen können. Das Problem kann zum Einen auf eine für diesen Einzelfall zu träge Parametrierung zurückzuführen sein. Zum Anderen kann sie auch durch die Verwendung eines Ein-Minuten-Zeitrasters für die Steuerung begründet werden.

⁹¹ Eine Kurzbeschreibung des Forschungsvorhabens kann unter [1], Projekt-Nr. 03.407 eingesehen werden. Es wird durchgeführt von Kappich Systemberatung, Aachen.

Frage 59:

Wo sehen Sie organisatorischen Verbesserungsbedarf?

Der Prüfung und Optimierung bestehender Anlagen sollte eine größere Bedeutung beimessen werden. Hierzu sind fachkundiges Personal und finanzielle Mittel in größerem Umfang nötig.

Die Qualität einer SBA sollte nicht allein über die Nutzeroberfläche der Verkehrsleitstelle überprüft werden, sondern hierzu ist auch eine Begutachtung vor Ort notwendig. Dies sollte nicht durch Stellen wie die Autobahnmeistereien oder die Polizei erfolgen, sondern durch fachkundige Mitarbeiter erfolgen.

Frage 60:

Welche mittel- bzw. langfristigen Maßnahmen könnten zur Verbesserung der SBA-Steuerung hilfreich sein?

Das Ein-Minuten-Raster für die Steuerung sollte aufgebrochen werden (z.B. durch Verwendung von 30-Sekunden-Intervallen). Außerdem sollte allgemein von einer eher trägen Parametrierung abgewichen werden. Dies könnte zur Steigerung der Akzeptanz von SBA beitragen.

Eine weitere Möglichkeit zur Lösung des Problems der zu trägen Reaktion auf Pulks könnte in einer auf diesen Fall zugeschnittenen Schaltstrategie bestehen, bei der der AQ, an dem die Geschwindigkeitsbeschränkung angezeigt werden soll, stromabwärts verschoben wird.

Der Einsatz oder der Test neuer Steuerverfahren wird als weniger zielführend angesehen, da dies mit einem hohen Aufwand verbunden ist, der oft nur einem geringen Mehrwert gegenübersteht.

D.4 Autobahnamt Thüringen

Gesprächspartner: Steffen Meier
Art der Befragung: telefonisch
Datum: 15.07.2009
Uhrzeit: ab 9:30 Uhr

Verwendete Verfahren

Nach eigenen Recherchen⁹² werden und wurden in Thüringen folgende Verfahren eingesetzt:

- Verkehrsanalyseverfahren:
 - Verfahren nach MARZ R
- Detektionsverfahren zur Situationsbewertung:
 - VKdiff-Verfahren N
- Prognoseverfahren zur Situationsbewertung:
 - Unruhe im Verkehr nach MARZ R
- Verfahren zur Warnung vor verkehrlich bedingten Gefahren:
 - Stauwarnung nach MARZ R
 - Warnung vor langsam fahrenden Fahrzeugen R
- Präventive Steuerung:
 - Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ R
- Umfelddatenerfassung:
 - Nebelwarnung R
 - Nässe- bzw. Regenwarnung R
 - Glättewarnung N

Frage 1:

Welche dieser Verfahren werden derzeit im Regelbetrieb (geschlossener Regelkreis) und welche im Probetrieb (offener Regelkreis) betrieben? Welche Verfahren werden nicht mehr eingesetzt?

Im Regelbetrieb betriebene Verfahren wurden in oben stehender Liste mit R, im Probetrieb befindliche Verfahren mit P und nicht mehr verwendete Verfahren mit N gekennzeichnet.

Im Wesentlichen werden die Verfahren nach MARZ (mit Ausnahme von VKdiff) verwendet. Für die Nässewarnung werden auch die Vorgaben im Merkblatt für Nässeerkennung genutzt. Darüber hinaus wird ein Verfahren zur Warnung vor langsam fahrenden Fahrzeugen genutzt.

Die Glättewarnung wird derzeit im offenen Regelkreis betrieben. Es ist Messtechnik zur Be-

⁹² vor Allem in [2], [3], [9], [10] sowie für die Umfelddatenerfassung in [7], [11]

stimmung der Fahrbahnoberflächentemperatur und zur Bestimmung der Gefriertemperatur des Wasser-Salz-Gemisches vorhanden, die jedoch nicht zuverlässig ist. Glättewarnungen werden per Handschaltung auch auf Zuruf der Polizei und Autobahnmeistereien aktiviert.

Bei einer älteren Anlage wird ein Ein-Minuten-Zeitraster, bei neueren Anlagen auch 30-Sekunden- und 15-Sekunden-Zeitraster für die Steuerung verwendet.

Frage 2:

Welche weiteren, noch nicht genannten Verfahren werden in Thüringen eingesetzt? Wurden in der Vergangenheit Verfahren eingesetzt, die noch nicht erwähnt wurden?

Es wurden in der Vergangenheit keine weiteren Verfahren genutzt. Mittelfristig wird der Einsatz von INCA in Erwägung gezogen, da dies auch VKdiff und somit ein streckenbezogenes Staukriterium nutzt.

Verfahren nach MARZ**Frage 3:**

Gibt es in Thüringen Anlagen, bei denen die Verfahren „Stauwarnung nach MARZ“ und „Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ“ nicht eingesetzt werden (z. B. reine Nebelwarnanlagen)?

Nein.

Frage 4:

Aus welchen Gründen wird das VKdiff-Verfahren nicht eingesetzt?

Das Verfahren weist interne Mängel auf. Für alle Varianten des Verfahrens (nach [1], nach MARZ bzw. nach AK VRZ) haben gemeinsam, dass sie nicht so parametrisiert werden können, dass sie nutzbar sind.

Frage 5:

Welche der folgenden Aussagen gelten für die Wahl und die Anpassung der Parameter der Verfahren nach MARZ?

- 1. Die Parameter werden nach Augenmaß auf der Grundlage von Erfahrungen gesetzt.*
- 2. Die Parameter werden mittels Optimierungsverfahren bestimmt.*
- 3. Sie werden am realen Verkehrsgeschehen überprüft.*
- 4. Sie werden am offenen Regelkreis (ohne Anzeige) überprüft.*
- 5. Sie werden anhand einer Simulation oder theoretisch überprüft.*

Aussagen 1 und 3 treffen zu. Bei der Parameterwahl werden q-v-Diagramme zugrunde gelegt.

Frage 6:

Werden die Parameter regelmäßig oder nur nach Notwendigkeit überprüft und angepasst?

Früher wurden die Parameter regelmäßig überprüft. Zur Zeit kann dies nicht erfolgen, da mehrere Neubauten von SBA zu betreuen sind. Es ist jedoch geplant, in Zukunft wieder eine regelmäßige Überprüfung durchzuführen.

Frage 7:

Haben sich bestimmte Parameter als besonders empfindlich erwiesen?

Im Wesentlichen kann man die Parameter nicht als empfindlich bezeichnen. Bei der Parametrierung wird die Streckencharakteristik (Vorhandensein eines Seitenstreifens, Steigung, Anzahl Fahrstreifen) berücksichtigt.

Der Belegungsparameter (für das entsprechende Kriterium bei der Stauwarnung) spielt eine Rolle, wenn Fahrzeuge z. B. bei einer Tagesbaustelle auf einer Induktionsschleife stehen, obwohl kein Stau vorhanden ist.

Frage 8:

Wurde oder wird die Parametrierung durch externe Stellen wie Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros oder eine Betreiberfirma durchgeführt oder unterstützt?

Die Erstversorgung bei Neuanlage einer SBA erfolgt durch das Bauunternehmen, wobei die Erstversorgungsparameter nach MARZ verwendet werden. Die Anpassung dieser Parameter erfolgt dann im Wesentlichen vom Autobahnamt Thüringen (zunächst im Blindbetrieb). Anschließende Parameteränderungen werden vom Autobahnamt durchgeführt.

Frage 9:

Wie hoch werden ungefähr die Detektions- bzw. Fehlalarmrate für die Stauwarnung eingeschätzt? Erfolgt eine Bewertung der Harmonisierung? Wenn ja, erfolgt sie über eine Detektions- und Fehlalarmrate oder über ein Maß der Prognosegüte? Wenn ein Maß für die Prognosegüte verwendet wird, wie wird es bestimmt? Was sind wichtige Ergebnisse dieser Bewertung?

Detektions- und Fehlalarmraten wurden nicht erhoben, werden jedoch als sehr gering eingeschätzt. Die Anlagen werden als zuverlässig angesehen.

Frage 10:

Gibt es wesentliche Probleme mit den Verfahren nach MARZ? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

Bei Tagesbaustellen wurde z. T. fälschlicherweise das Belegungskriterium für die Stauwarnung nach MARZ ausgelöst.

Unruhe im Verkehr nach MARZ**Frage 11:**

Wird eine durch den Unruheindikator abgeleitete Schaltempfehlung eher häufig oder eher selten tatsächlich angezeigt?

Unruhe im Verkehr führt selten zu einer Schaltung.

Frage 12:

Gelten für die Parameter des Verfahrens „Unruhe im Verkehr“ die gleichen Grundsätze wie für die Verfahren nach MARZ?

Ja.

Frage 13:

Hat sich das Verfahren „Unruhe im Verkehr“ bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich?

Im Allgemeinen hat sich das Verfahren bewährt. Es kann jedoch nicht im Umfeld der Anlage genutzt werden, mit der vor langsam fahrenden Fahrzeugen gewarnt wird, da dieses Verfahren deutliche Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Fahrstreifen hervorruft.

Frage 14:

Wird die Prognosegüte des Verfahrens „Unruhe im Verkehr“ gemessen? Wenn ja, wie und mit welchem Ergebnis?

Die Prognosegüte wurde nicht gemessen.

Frage 15:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Verfahren „Unruhe im Verkehr“? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

Mit dem Verfahren gibt es keine Probleme.

Warnung vor langsam fahrenden Fahrzeugen**Frage 16:**

Wie hoch ist die maximale Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei benachbarten Fahrstreifen, die bei der Warnung vor langsam fahrenden Fahrzeugen auftreten kann?

Die maximale Geschwindigkeitsdifferenz beträgt 40 km/h. Es gibt drei Programme, die in Abhängigkeit von der niedrigsten gemessenen Fahrgeschwindigkeit geschaltet werden:

- 100 km/h links, 80 km/h rechts
- 100 km/h links, 60 km/h rechts
- 80 km/h links, 60 km/h rechts

Frage 17:

Wird das Verfahren auf einem zwei- oder dreistreifigen Querschnitt eingesetzt?

Das Verfahren wird auf einem zweistreifigen Querschnitt ohne Seitenstreifen verwendet, an dem aufgrund einer Steigung von ca. 6 % die Geschwindigkeiten der Lkw sehr niedrig sein können (vereinzelt bis zu 25 km/h). Hierbei ist eine starke Sichtbehinderung durch eine Kurve gegeben.

Frage 18:

Wie wird die Parametrierung dieses Verfahrens durchgeführt?

Für dieses Verfahren wurde eine Reisezeitstatistik für langsamfahrende Fahrzeuge manuell erstellt. Diese wird benötigt, um den Zeitpunkt für die Aufhebung der Warnung zu ermitteln. Diese müssen von Zeit zu Zeit angepasst werden, z. B. da sich die Zusammensetzung der Lkw ändert. Ansonsten sind die Geschwindigkeitswerte vorgegeben, die für die Wahl des entsprechenden Schaltprogrammes benötigt werden. Das Verfahren arbeitet in einem 15-Sekunden-Zeitraster.

Frage 19:

Hat sich die Warnung vor langsam fahrenden Fahrzeugen bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich?

Das Verfahren hat einer Untersuchung zufolge eine Reduzierung der Unfallrate um 10 % bewirkt. Zuvor kam es auf diesem Streckenabschnitt häufig zu Auffahrunfällen und Unfällen beim Spurwechsel. Das Verfahren wird weitgehend akzeptiert.

Frage 20:

Wie hoch werden ungefähr die Detektions- bzw. Fehlalarmrate für dieses Verfahren eingeschätzt?

Probleme diesbezüglich werden nicht gesehen.

Frage 21:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Verfahren? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

Probleme mit dem Verfahren gibt es nicht. Eine Beschränkung besteht jedoch darin, dass aus der lokalen individuellen Fahrgeschwindigkeit auf eine Reisezeit geschlossen wird. Diese wird zwar nicht als längs der Strecke konstant angenommen, da bei den Messungen berücksichtigt wurde, dass die Fahrzeuge bei zunehmender Steigung noch langsamer werden. Jedoch werden sie für verschiedene Fahrzeuge mit gleicher individueller Geschwindigkeit als gleich angenommen.

Umfelddatenerfassung**Frage 22:**

Werden Umfelddaten in Form bestimmter Schaltprogramme berücksichtigt oder wirken sie sich auf die Schwellenwerte für Harmonisierungsprogramme aus?

Es wird die Vorgehensweise nach MARZ verwendet, ergänzt um die Festlegungen im Merkblatt für die Nässeerfassung.

Frage 23:

Wie hoch wird die DR bzw. FAR der Nässe- und Nebelwarnung eingeschätzt?

Die Detektions- und Fehlalarmraten werden als nicht problematisch eingeschätzt.

Frage 24:

Wie hoch wird die Einsatzbereitschaft automatischer Glättewarnanlagen eingeschätzt?

Die Messsensorik ist für den automatischen Einsatz nicht zuverlässig genug.

Neue Steuerverfahren

Diese Fragen werden zu jedem neu implementierten, in der Liste zu Frage 1 noch nicht genannten Steuerverfahren zusätzlich gestellt. Im Falle dieser Befragung sind keine solchen Steuerverfahren vorhanden.

Frage 25:

Ersetzt das neue Verfahren ein derzeit eingesetztes Verfahren?

Frage 26:

Worin werden die Vorteile des neuen Verfahrens gesehen?

Nicht mehr verwendete Steuerverfahren

Diese Fragen werden zu jedem Verfahren gestellt, das nicht mehr genutzt wird. Im Falle dieser Befragung sind keine solchen Steuerverfahren vorhanden.

Frage 27:

Wann wurde das Verfahren abgeschaltet?

Frage 28:

Wurde das Verfahren ersetzt oder ersatzlos abgeschaltet?

Frage 29:

Welche Gründe für die Abschaltung gab es?

Frage 30:

Wurde die Parametrierung oder Softwarewartung für das abgeschaltete Verfahren durch ein Unternehmen, eine Forschungseinrichtung oder ein Ingenieurbüro vorgenommen? Wenn ja, wurde die Zusammenarbeit eingestellt, bevor das Verfahren abgeschaltet wurde?

Frage 31:

Gab es eine Schulung des Leitstellenpersonals für den Umgang mit dem Steuerverfahren?

Frage 32:

War die Wirksamkeit des abgeschalteten Verfahrens bei seiner Einrichtung praktisch erprobt, durch Simulation bestätigt oder nur theoretisch nachgewiesen worden?

Frage 33:

Welches waren typische, häufig auftretende Situationen, in denen die SBA-Steuerung unerwünschtes Verhalten gezeigt hat?

Frage 34:

Wie hoch wurden ggf. DR und FAR bzw. die Prognosegüte mit dem abgeschalteten Verfahren eingeschätzt?

Qualitätsmanagement**Frage 35:**

Welches sind typische, häufig auftretende Situationen, in denen die SBA-Steuerung insgesamt ein unerwünschtes Verhalten zeigt?

Früher gab es häufige Beschwerden, da die Parametrierung nach einem Update auf einen Grundzustand gesetzt wurde, durch den eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 80 km/h angezeigt wurde. Dieses Problem ist jedoch behoben. Heute gibt es relativ wenige Beschwerden.

Frage 36:

Wird der Befolungsgrad oder auch die Akzeptanz der SBA bewertet?

Die Akzeptanz wird aus der Anzahl der Beschwerden abgeleitet. Außerdem wurde die Akzeptanz im Rahmen von Diplom- bzw. Bachelorarbeiten bewertet, indem die Fahrgeschwindigkeiten der Pkw (mit einer Toleranz von 10 % beaufschlagt) in 30-Sekunden-Intervallen im Vergleich mit den Anzeigeschwindigkeiten untersucht wurden.

Frage 37:

Welche weiteren Indikatoren für die kurzfristige Bewertung der Wirksamkeit einer SBA (neben Akzeptanz bzw. Befolungsgrad sowie DR und FAR) werden derzeit eingesetzt?

Es werden Durchfahrten durch beeinflusste Streckenabschnitte, die z. T. mittels Videokamera aufgezeichnet werden, und auch durch ortsfeste Beobachtungen der Verkehrssituation durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Auswertung der Verkehrssituation, der Schaltung und der Schaltgründe.

Frage 38:

Werden besondere (über die Festlegungen im MARZ hinausgehende) Maßnahmen der Qualitätssicherung umgesetzt?

Die Qualitätssicherung spielt zur Zeit eine untergeordnete Rolle. Es steht hierfür oft nicht ausreichend Zeit bzw. Personal zur Verfügung.

Frage 39:

Sind Probleme bei einzelnen Maßnahmen bekannt (z. B. keine Verbesserung der Verkehrssituation messbar, fehlende Akzeptanz)?

Bei o. g. Akzeptanzuntersuchungen wurde unter anderem festgestellt, dass nach einer Stauauflösung die Stauwarnung nicht rechtzeitig aufgehoben wird (wenn man bereits Geschwindigkeiten von über 60 km/h fahren kann, wird noch immer das Gefahrenzeichen „Stau“ angezeigt).

Frage 40:

Ist das Messsystem ausfallsicher bzw. redundant?

Das Ersatzwertverfahren nach MARZ kann angewendet werden, da die Abstände der MQ zwischen 1000 und 1500 m liegen, im Bereich von Tunneln sogar bei etwa 300 m.

Frage 41:

Sind Informationen über den Verkehrsablauf verfügbar, die in der SBA-Steuerung nicht verwendet werden, aber als unabhängige Größen zur Qualitätsbewertung herangezogen werden könnten?

Derartige Größen sind nicht vorhanden. Zum Beispiel Reisezeiten werden unbedingt als sichere Methode zur Qualitätssicherung gesehen, da sie Fehlern unterworfen sind. Insbesondere wenn aus lokalen Fahrgeschwindigkeiten Reisezeiten bestimmt werden, stellt die Annahme, dass diese für eine Strecke gleich bleibt, eine Einschränkung der Reisezeitmessung dar.

Allgemeine Potenziale

Frage 42:

Wo sehen Sie wesentliche (systembedingte) Einschränkungen und Unzulänglichkeiten bei derzeit eingesetzten Steuerverfahren?

Eine Einschränkung für die Verkehrsbeeinflussung ist durch eine Verfälschung der tatsächlichen Verkehrssituation durch Aggregation und durch die Trendprognose. Hierdurch wird eine Nichtübereinstimmung zwischen erlebter Verkehrssituation und Anzeige begünstigt, wodurch die Akzeptanz abnimmt.

Außerdem kann mit den derzeit implementierten Verfahren keine abschnittsbezogene Störfallerkennung erfolgen.

Frage 43:

Wo sehen Sie organisatorischen Verbesserungsbedarf?

Häufigere Geschwindigkeitskontrollen wären hilfreich.

Frage 44:

Welche mittel- bzw. langfristigen Maßnahmen könnten zur Verbesserung der SBA-Steuerung hilfreich sein?

Der Einsatz einfacher Verfahren sollte bevorzugt werden, da diese stärker am tatsächlichen Verkehrsgeschehen orientieren. Es wird die Verwendung von Einzelfahrzeugdaten für die Steuerung vorgeschlagen.

D.5 Autobahndirektion Nordbayern

Gesprächspartner: Peter Ermer
Art der Befragung: persönliches Gespräch
Datum: 27.07.2009
Uhrzeit: ab 9:00 Uhr

Verwendete Verfahren

Nach eigenen Recherchen⁹³ werden und wurden im Zuständigkeitsbereich der ABDNB folgende Verfahren eingesetzt:

- Verkehrsanalyseverfahren:
 - keine (außer der Datenanalyse nach MARZ)
- Detektionsverfahren zur Situationsbewertung:
 - VKdiff-Verfahren
- Prognoseverfahren zur Situationsbewertung:
 - Unruhe im Verkehr nach MARZ
- Verfahren zur Störfallwarnung:
 - Stauwarnung nach MARZ
 - Stauwarnung mit INCA
 - Warnung vor langsam fahrenden Fahrzeugen
- Präventive Steuerung:
 - Harmonisierung der Geschwindigkeit nach MARZ
 - Harmonisierung der Geschwindigkeit mit INCA
- Umfelddatenerfassung:
 - Nebelwarnung
 - Nässe- bzw. Regenwarnung
 - Glättewarnung

Frage 1:

Welche dieser Verfahren werden derzeit im Regelbetrieb (geschlossener Regelkreis) und welche im Probebetrieb (offener Regelkreis) betrieben? Welche Verfahren werden nicht mehr eingesetzt?

Im Regelbetrieb betriebene Verfahren wurden in oben stehender Liste mit , im Probebetrieb befindliche Verfahren mit und nicht mehr verwendete Verfahren mit gekennzeichnet.

Der Einsatz von INCA befindet sich für eine SBA derzeit in der Genehmigungsphase. Der

⁹³ vor Allem in [2], [3], [9], [10], [13] sowie für die Umfelddatenerfassung in [7], [11]

Einsatz an weiteren SBA ist vorgesehen.

Die Warnung vor langsam fahrenden Fahrzeugen wurde außer Betrieb genommen, da durch Ausbau der Autobahn die ungünstigen Streckencharakteristika (enge Kurvenradien, starke Steigung), die den Einsatz dieses Verfahrens nötig gemacht haben, nicht mehr gegeben waren.

Die Umfelddatenerfassung erfolgt nach MARZ bzw. nach Vorgaben des Merkblattes für Nässeerfassung. Die Nässeerfassung ist problematisch, so dass die Nässeprogramme teilweise deaktiviert sind.

Die Glättewarnung erfolgt nicht automatisch. Sie kann nur per Handschaltung ausgelöst werden. Die vorhandene Sensorik wird für das Straßenwetterinformationssystem (SWISS) zusammen mit einer Wettervorhersage des deutschen Wetterdienstes genutzt, um z. B. eine Einsatzplanung des Winterdienstes vorzunehmen. Dies ist jedoch eine andere betriebliche Ebene.

Frage 2:

Welche weiteren, noch nicht genannten Verfahren werden im Zuständigkeitsbereich der ABDNB eingesetzt? Wurden in der Vergangenheit Verfahren eingesetzt, die noch nicht erwähnt wurden?

Derzeit werden keine weiteren Verfahren eingesetzt. Es wurde früher ein Fuzzy-Verfahren zur Erfassung der Witterungsbedingungen genutzt⁹⁴.

Verfahren nach MARZ

Frage 3:

Aus welchen Gründen wird das VKdiff-Verfahren nicht eingesetzt?

VKdiff reagierte zu empfindlich. Es ist einmal im Regelbetrieb eingesetzt worden.

Frage 4:

Welche der folgenden Aussagen gelten für die Wahl und die Anpassung der Parameter der Verfahren nach MARZ?

- 1. Die Parameter werden nach Augenmaß auf der Grundlage von Erfahrungen gesetzt.*
- 2. Die Parameter werden mittels Optimierungsverfahren bestimmt.*
- 3. Sie werden am realen Verkehrsgeschehen überprüft.*
- 4. Sie werden am offenen Regelkreis (ohne Anzeige) überprüft.*
- 5. Sie werden anhand einer Simulation oder theoretisch überprüft.*

Aussagen 1 und 3 treffen zu.

Bei der Parameterwahl wird ein q-v-Diagramm zugrunde gelegt. Dabei werden restriktivere Bedingungen festgelegt, wenn z. B. eine geringe Sichtweite (baulich bedingt) besteht.

⁹⁴ im Rahmen eines Forschungsprojektes der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen

Frage 5:

Werden die Parameter regelmäßig oder nur nach Notwendigkeit überprüft und angepasst?

Ein rhythmisches Überprüfen und Anpassen der Parameter findet nicht statt. Bei Beschwerden werden die Parameter jedoch zumindest überprüft. Die Nutzung von TRANSAID zur Parameteroptimierung für Verfahren nach MARZ erfolgt nur für neue Anlagen. Ansonsten wird auf etablierte Parametersätze zurückgegriffen.

Frage 6:

Haben sich bestimmte Parameter als besonders empfindlich erwiesen?

Die Schwellenwerte für die Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit sowie die Glättungsparameter können als empfindlich eingestuft werden. Durch eine breite Hysterese wird hier ein zu häufiger Wechsel des Schaltbildes vermieden.

Frage 7:

Wurde oder wird die Parametrierung durch externe Stellen wie Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros oder eine Betreiberfirma durchgeführt oder unterstützt?

Ingenieurbüros werden bei der Parametrierung gelegentlich hinzugezogen. Mit diesen bestehen Rahmenverträge. Die Versorgung, Überwachung und Steuerung wird jedoch stets von der ABDNB selbst durchgeführt.

Frage 8:

Wie hoch werden ungefähr die Detektions- bzw. Fehlalarmrate für die Stauwarnung eingeschätzt? Erfolgt eine Bewertung der Harmonisierung? Wenn ja, erfolgt sie über eine Detektions- und Fehlalarmrate oder über ein Maß der Prognosegüte? Wenn ein Maß für die Prognosegüte verwendet wird, wie wird es bestimmt? Was sind wichtige Ergebnisse dieser Bewertung?

Fehlalarme und Nichtdetektionen für die Verkehrssteuerung liegen in einem akzeptablen Bereich. Eine Bewertung der Prognosegüte oder der Harmonisierungswirkung erfolgt nicht.

Frage 9:

Gibt es wesentliche Probleme mit den Verfahren nach MARZ? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

Die Verkehrssteuerung weist keine wesentlichen Probleme auf. Jedoch gibt es Probleme mit der Verlässlichkeit der Umfelddatenerfassung.

Unruhe im Verkehr nach MARZ**Frage 10:**

Wird eine durch den Unruheindikator abgeleitete Schaltempfehlung eher häufig oder eher selten tatsächlich angezeigt?

Unruhe im Verkehr führt relativ selten zu einer Schaltung.

Frage 11:

Hat sich das Verfahren „Unruhe im Verkehr“ bewährt, nicht bewährt oder ist eine Aussage noch nicht möglich?

In dem Verfahren wird ein grundsätzlicher Nutzen gesehen.

Frage 12:

Wird die Prognosegüte des Verfahrens „Unruhe im Verkehr“ gemessen? Wenn ja, wie und mit welchem Ergebnis?

Die Prognosegüte wird nicht bewertet.

Frage 13:

Gibt es wesentliche Probleme mit dem Verfahren „Unruhe im Verkehr“? Unter welchen Umständen kommt es häufig zu nicht erwünschten Schaltungen und wie sehen diese aus?

k. A. (vgl. Frage 9)

INCA

Auf eine Befragung zu INCA wurde nach Absprache mit Herrn Ermer verzichtet, da die Angaben von Herrn Mutzbauer (ABDSB) zu diesem Verfahren nicht wesentlich hätten ergänzt werden können.

Umfelddatenerfassung**Frage 14:**

Werden Umfelddaten in Form bestimmter Schaltprogramme berücksichtigt oder wirken sie sich auf die Schwellenwerte für Harmonisierungsprogramme aus?

Es wurde die im MARZ beschriebene Vorgehensweise gewählt.

Frage 15:

Wie hoch wird die DR bzw. FAR der Nässe- und Nebelwarnung eingeschätzt?

Die Verlässlichkeit der Umfelddatenerfassung (insbesondere der Nässeerkennung) ist problematisch. Bei einigen SBA sind die Nässeprogramme abgeschaltet worden.

Frage 16:

Wie hoch wird die Einsatzbereitschaft automatischer Glättewarnanlagen eingeschätzt?

Glättewarnanlagen werden derzeit noch nicht im Automatikbetrieb eingesetzt. Handschaltungen aufgrund externer Meldungen (zwei Programme mit Geschwindigkeitsbegrenzungen von 60 bzw. 40 km/h) sind möglich.

Qualitätsmanagement**Frage 17:**

Wird der Befolgungsgrad oder auch die Akzeptanz der SBA bewertet?

Die Akzeptanz und insbesondere der Vergleich der gefahrenen und angezeigten Geschwindigkeiten wird als nicht so wesentlich für die Qualitätsbewertung angesehen. Richtet man die Anzeigegeschwindigkeit zu sehr nach den gefahrenen Geschwindigkeiten, erreicht man zwar einen hohen Befolgungsgrad, steuert aber dem Verkehr hinterher.

Frage 18:

Welche weiteren Indikatoren für die kurzfristige Bewertung der Wirksamkeit einer SBA (neben Akzeptanz bzw. Befolungsgrad sowie DR und FAR) werden derzeit eingesetzt? Könnten z. B. Reisezeiten hierfür genutzt werden?

Systeme zur automatischen Netzbeeinflussung, bei denen Reisezeiten als Steuerungsgrundlage dienen, sind derzeit im Aufbau. Derzeit erfolgt in zwei Maschen eine manuelle Netzbeeinflussung und in einer weiteren, kleinräumigen Masche eine Steuerung anhand von lokalen Messgrößen. Die Netzbeeinflussung ist jedoch entkoppelt von der Streckenbeeinflussung, so dass auf die Reisezeiten nicht ohne Weiteres zurückgegriffen werden könnte.

Frage 19:

Werden besondere (über die Festlegungen im MARZ hinausgehende) Maßnahmen der Qualitätssicherung bzw. des Qualitätsmanagements umgesetzt?

Zum 1.10.2009 soll ein Pilotprojekt zum Aufbau eines Qualitätsmanagements bei der ABD-NB beginnen, bei dem insbesondere folgende Punkte im Vordergrund stehen:

- Transparenz der Arbeitsabläufe
- Optimierung der Aufgabenverteilung an die einzelnen Mitarbeiter gemäß ihrer Fähigkeiten und Kompetenzen
- Traffic IQ (System zur Qualitätssicherung, Qualitätsmonitoring in verschiedenen Ebenen)

Die Maßnahmen des Qualitätsmanagement orientieren sich am Verkehrsteilnehmer. Sie werden ausgehend von der allgemeinen Situation erarbeitet, dass z. B. Arbeitsabläufe nicht ausreichend dokumentiert und von verschiedenen Mitarbeitern unterschiedlich gehandhabt werden. Das Projekt hat eine Laufzeit von drei Jahren und wird durch einen Qualitätsmanagementbeauftragten begleitet.

Im Rahmen der Qualitätssicherung (Traffic IQ) sollen verschiedene Qualitätsindizes bestimmt werden. Erreicht ein Qualitätsindex einen schlechten Wert, sollen entsprechend zuständige Mitarbeiter informiert werden.

Seit dem 15.6.2009 wird außerdem ein System zum Störungsmanagement im Regelbetrieb eingesetzt. Hierbei soll eine transparente Störungsabwicklung durch jeweils geeignete Mitarbeiter gewährleistet werden. Einem Störungsereignis ist hierbei ein Status (z. B. „angenommen“ oder „erledigt“) zugewiesen.

Ansonsten erfolgt bei Neueinrichtung einer SBA eine Unfallanalyse über lange Zeiträume (Vorher-Nachher-Vergleich), wobei auch die globale (rückläufige) Entwicklung der Unfallzahlen berücksichtigt wird. Bei Neueinrichtung einer SBA und auch im Probetrieb von INCA werden bzw. wurden Fahrten durch den Beeinflussungsabschnitt durchgeführt. Dies geschieht jedoch nicht regelmäßig.

Frage 20:

Ist das Messsystem ausfallsicher bzw. redundant?

Der Messstellenabstand beträgt 1000 bis 1500 m, so dass die Ersatzwertverfahren nach MARZ prinzipiell angewendet werden können. Weitergehende Redundanz gibt es nicht.

Im Rahmen des Störungsmanagements wird jedoch die Erneuerung der Messtechnik für die SBA mit hoher Priorität umgesetzt. Als Detektoren kommen Radar-Überkopfsensoren zum Einsatz, die an den AQ angebracht sind. Trotz einer groberen Fahrzeugklassifikation als z. B. bei Induktionsschleifen wird diese Technik als wirtschaftlicher angesehen.

Allgemeine Potenziale

Frage 21:

Wo sehen Sie wesentliche (systembedingte) Einschränkungen und Unzulänglichkeiten bei derzeit eingesetzten Steuerungsverfahren?

In der verkehrsabhängigen Steuerung werden keine Unzulänglichkeiten gesehen. Fehlalarme und Nichtdetektionen lassen sich nicht ganz vermeiden. Größere Probleme bestehen bei der Umfelddatenerfassung. Ansonsten wird ein hohes Verbesserungspotenzial in der Organisation gesehen.

Frage 22:

Wo sehen Sie organisatorischen Verbesserungsbedarf?

Die oben beschriebenen Maßnahmen für das Qualitätsmanagement sollen helfen, Abläufe bei der ABDNB zu verbessern. Jedoch fehlt auch nach Einführung eines Qualitätsmanagement-Systems ein „Leitbild Verkehr“, mit dem eine grundsätzliche Vorgehensweise und Zielsetzung bei der Verkehrssteuerung festgelegt wird und nach außen transparent ist. So könnte z. B. zwischen unterschiedlichen Sichtweisen zu Lkw-Überholverböten oder zur Glättung („dem Verkehr nachregeln“) eine Entscheidung getroffen werden, die bei der Parameterwahl zu berücksichtigen sind.

Die Gewinnung von jungen Fachkräften (Ingenieuren) für die ABDNB wird als problematisch angesehen.

Frage 23:

Welche mittel- bzw. langfristigen Maßnahmen könnten zur Verbesserung der SBA-Steuerung hilfreich sein?

Wenn neue Verfahren genutzt werden, sollten diese robust sein und nur einen geringen Aufwand für die Parametrierung und Optimierung benötigen. Unter Umständen sollten bei Bedarf Rahmenverträge mit externen Partnern abgeschlossen werden.

D.6 Autobahnamt Sachsen (Kurzanfrage)

Gesprächspartner: Stefan Karg
Art der Befragung: telefonisch, informell
Datum/ Uhrzeit: k. A.

Das Telefonat lieferte folgende Erkenntnisse:

- In Sachsen werden ausschließlich die Verfahren nach MARZ eingesetzt.
- In allen SBA besteht eine zulässige Höchstgeschwindigkeit als Grundzustand. Somit wird der volle Funktionsumfang der Steuerverfahren nicht ausgeschöpft.
- VKdiff wurde in einer SBA auf der Autobahn A 4 im Probebetrieb eingesetzt, hat sich jedoch als zu träge erwiesen. Zur Begründung der Tatsache, dass diese Erfahrungen den Erkenntnissen aus der Literatur und den anderen Expertenbefragungen stehen, wurde vermutet, dass dies auf die Wahl der Parameter zurückgeführt werden könnte. Heute wird VKdiff nicht eingesetzt.

D.7 Autobahnniederlassung Hamm (Straßen.NRW, Nachfrage)

Gesprächspartner: Michael Beckamp
Art der Befragung: telefonisch, informell
Datum/ Uhrzeit: k. A.

Ursprünglich sollte dieses Telefonat mit Herrn Kipper durchgeführt werden, der während der Befragung von Herrn Kalisch bei der Hauptniederlassung des Landesbetriebs Straßenbau Nordrhein-Westfalen als geeigneter Ansprechpartner für Fragen der SBA-Steuerung in der Region Westfalen-Lippe benannt wurde. Dieser konnte jedoch nicht erreicht werden. Das Telefonat lieferte folgende Erkenntnisse:

- Die SBA auf der Autobahn A 45 bei Meinerzhagen, vormals eine reine Nebelwarnanlage, ist inzwischen mit einer verkehrsabhängigen Steuerung ausgestattet.
- Das Verfahren „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ ist in der SBA der Autobahn A 1 bei Dortmund noch implementiert, jedoch ist nicht bekannt, ob es noch genutzt wird oder ob es durch entsprechende Parametrierung deaktiviert wurde.
- Es wurde auf der Autobahn A 44 bei Dortmund ein Verfahren zur Pulkerkennung im Probebetrieb eingesetzt. Dieses wurde jedoch Mitte 2009 abgeschaltet.

Darüber hinaus wurde Informationsmaterial zur Implementierung des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“ [23] zur Verfügung gestellt, welches mit freundlicher Erlaubnis des Unternehmens Heusch/Boesefeldt in dieser Arbeit genutzt wurde.

E Simulationsergebnisse

E.1 Versuche mit Szenario „doppelte Verkehrsstärke“

Tabelle 4: Untersuchungsfelder im Szenario „doppelte Verkehrsstärke“

Nr.	Kanten-ID (SUMO)	Länge (m)	Anzahl Fahrstr.	Lage zwischen	und	AQ	MQ
UF 1	-562818694	1349,77	2	AS Freising-Mitte (7)	AD Flughafen (6)	AQ_02	MQ_03
UF 2	-562818699	1583,05	3	AS Freising-Süd (5)	AK Neufahrn/ AS Eching-Ost (4)	AQ_05	MQ_07
UF 3	-562818713	2264,24	2	AS Unterschleißheim (3)	AS Oberschleißheim (2)	AQ_11	MQ_15, MQ_16

Tabelle 5: Stau Szenario „doppelte Verkehrsstärke“

Verfahren	Anteil Stauzeit			Mittel (arithmetisch)
	UF 1 (AQ_02)	UF 2 (AQ_05)	UF 3 (AQ_11)	
OHNE	0,6704	0,7334	0,7186	0,7075
HARM	0,6964	0,7593	0,7001	0,7186
FERR	0,6927	0,7408	0,7038	0,7124
FERRHB	0,6667	0,7260	0,7112	0,7013

Tabelle 6: Verkehrsstufe Szenario „doppelte Verkehrsstärke“

Verfahren	Verkehrsstufe				Mittel (arithmetisch)
	UF 1 (MQ_03)	UF 2 (MQ_07)	UF 3 (MQ_15)	UF 3 (MQ_16)	
OHNE	3,2446	3,2854	2,8779	2,8630	3,0677
HARM	3,2261	3,3669	2,7742	2,7483	3,0289
FERR	3,1557	3,3261	2,8150	2,8409	3,0344
FERRHB	3,2261	3,2780	2,8335	2,8149	3,0381

Tabelle 7: Reisezeiten Szenario „doppelte Verkehrsstärke“

Verfahren	Reisezeit (s)			Summe
	UF 1 (-562818694)	UF 2 (-562818699)	UF 3 (-562818713)	
OHNE	1168	4769	229	6166
HARM	730	1277	213	2220
FERR	897	4833	221	5951
FERRHB	763	2516	224	3503

Tabelle 8: Normierte Reisezeiten Szenario „doppelte Verkehrsstärke“

Verfahren	Norm. Reisezeit (s/km)			Mittel (gewichtet nach Länge)
	UF 1 (-562818694)	UF 2 (-562818699)	UF 3 (-562818713)	
OHNE	866	3012	101	1186
HARM	541	807	94	427
FERR	664	3053	98	1145
FERRHB	566	1589	99	674

E.2 Versuche mit Szenario „vorübergehende Störungen“

Tabelle 9: Zusätzliche Untersuchungsfelder im Szenario „vorübergehende Störungen“

Nr.	Kanten-ID (SUMO)	Länge (m)	Anzahl Fahrstr.	Lage zwischen	und	AQ	MQ
UF 4	-771579087	466,37	3	AD Flughafen (6)	AS Freising-Süd (5)	AQ_04	MQ_05, MQ_06
	-586907255	76,71	3				
	-586907252	34,88	3				
	-562818697	265,83	3				
	-562818696	340,21	3				
	-79562272	218,08	3				
	-558301027	282,36	3				
UF 5	-562771178	1087,77	2	AS Unterschleißheim (3)	AS Oberschleißheim (2)	AQ_13	MQ_19

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Reisezeiten für das UF 4 aggregiert. Die in Tabelle 16 angegebenen Reisezeiten sind die Summen der Reisezeiten für alle Kanten des UF. Die in Tabelle 17 angegebenen normierten Reisezeiten sind die nach Länge der Kante gewichteten Mittelwerte der normierten Reisezeiten jeder Kante des UF.

Tabelle 10: Stau Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 1-3)

Verfahren	Anteil Stauzeit			Mittel (arithmetisch)
	UF 1 (AQ_02)	UF 2 (AQ_05)	UF 3 (AQ_11)	
OHNE	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
HARM	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
FERR	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
FERRHB	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabelle 11: Verkehrsstufe Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 1-3)

Verfahren	Verkehrsstufe				Mittel (arithmetisch)
	UF 1 (MQ_03)	UF 2 (MQ_07)	UF 3 (MQ_15)	UF 3 (MQ_16)	
OHNE	1,0000	1,0074	1,0111	1,0148	1,0083
HARM	1,0000	1,0037	1,0111	1,0148	1,0074
FERR	1,0000	1,0074	1,0185	1,0222	1,0120
FERRHB	1,0000	1,0185	1,0222	1,0296	1,0176

Tabelle 12: Reisezeiten Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 1-3)

Verfahren	Reisezeit (s)			Summe
	UF 1 (-562818694)	UF 2 (-562818699)	UF 3 (-562818713)	
OHNE	46,9	53,4	81,4	181,7
HARM	47,1	53,4	81,7	182,2
FERR	47,0	53,3	81,4	181,7
FERRHB	46,8	53,3	81,3	181,4

Tabelle 13: Normierte Reisezeiten Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 1-3)

Verfahren	Norm. Reisezeit (s/km)			Mittel (gewichtet nach Länge)
	UF 1 (-562818694)	UF 2 (-562818699)	UF 3 (-562818713)	
OHNE	34,8	33,7	36,0	35,0
HARM	34,9	33,7	36,1	35,1
FERR	34,9	33,7	36,0	35,0
FERRHB	34,7	33,7	36,0	35,0

Tabelle 14: Stau Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 4 u. 5)

Verfahren	Anteil Stauzeit		Mittel (arithmetisch)
	UF 4 (AQ_04)	UF 5 (AQ_13)	
OHNE	0,8371	1,0000	0,9186
HARM	0,3074	0,1111	0,2093
FERR	0,1407	0,1074	0,1241
FERRHB	0,1370	0,1037	0,1204

Tabelle 15: Verkehrsstufe Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 4 u. 5)

Verfahren	Verkehrsstufe			Mittel (arithmetisch)
	UF 4 (MQ_05)	UF 5 (MQ_06)	UF 5 (MQ_19)	
OHNE	2,1259	1,3074	1,3111	1,5815
HARM	2,1407	1,3111	1,3333	1,5950
FERR	2,2000	1,3148	1,3407	1,6185
FERRHB	2,2000	1,3148	1,3222	1,6123

Tabelle 16: Reisezeiten Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 4 u. 5)

Verfahren	Reisezeit (s)		Summe
	UF 4 (-771579087 bis -558301027)	UF 5 (-562771178)	
OHNE	70,1	46,5	116,6
HARM	71,1	47,5	118,6
FERR	72,3	46,8	119,1
FERRHB	71,3	46,3	117,6

Tabelle 17: Normierte Reisezeiten Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 4 u. 5)

Verfahren	Norm. Reisezeit (s/km)		Mittel (gewichtet nach Länge)
	UF 4 (-771579087 bis -558301027)	UF 5 (-562771178)	
OHNE	41,7	42,8	42,1
HARM	42,3	43,7	42,8
FERR	42,9	43,2	43,0
FERRHB	42,3	42,7	42,5

E.3 Versuche mit beiden Szenarien

Für die Untersuchungen mit gleichzeitiger Verwendung der Szenarien „doppelte Verkehrsstärke“ und „vorübergehende Störungen“ wurden die UF für das zuletzt genannte Szenario übernommen (vgl. Tabelle 9). Die Reisezeiten für UF 4 wurden auf die gleiche Weise aggregiert.

Tabelle 18: Stau beide Szenarien (UF 1-3)

Verfahren	Anteil Stauzeit			Mittel (arithmetisch)
	UF 1	UF 2	UF 3	
	(AQ_02)	(AQ_05)	(AQ_11)	
OHNE	0,7890	0,7038	0,7890	0,7606
HARM	0,7852	0,7001	0,7927	0,7593
FERR	0,7890	0,7001	0,7964	0,7618
FERRHB	0,7890	0,6890	0,7927	0,7569

Tabelle 19: Verkehrsstufe beide Szenarien (UF 1-3)

Verfahren	Verkehrsstufe				Mittel (arithmetisch)
	UF 1	UF 2	UF 3		
	(MQ_03)	(MQ_07)	(MQ_15)	(MQ_16)	
OHNE	3,2965	3,1743	3,1409	3,0594	3,1678
HARM	3,2965	3,1706	3,0108	2,9853	3,1158
FERR	3,2854	3,1817	3,0409	3,0076	3,1289
FERRHB	3,3076	3,1409	2,8927	2,9853	3,0816

Tabelle 20: Reisezeiten beide Szenarien (UF 1-3)

Verfahren	Reisezeit (s)			Summe
	UF 1	UF 2	UF 3	
	(-562818694)	(-562818699)	(-562818713)	
OHNE	488	603	246	1337
HARM	572	2538	251	3361
FERR	1017	4676	251	5944
FERRHB	745	1222	246	2213

Tabelle 21: Normierte Reisezeiten beide Szenarien (UF 1-3)

Verfahren	Norm. Reisezeit (s/km)			Mittel (gewichtet nach Länge)
	UF 1 (-562818694)	UF 2 (-562818699)	UF 3 (-562818713)	
OHNE	362	381	109	258
HARM	424	1603	111	647
FERR	753	2954	111	1144
FERRHB	552	772	109	426

Tabelle 22: Stau beide Szenarien (UF 4 u. 5)

Verfahren	Anteil Stauzeit		Mittel (arithmetisch)
	UF 4 (AQ_04)	UF 5 (AQ_13)	
OHNE	0,9260	1,0000	0,9630
HARM	0,8741	0,8445	0,8593
FERR	0,8778	0,8445	0,8612
FERRHB	0,8778	0,8445	0,8612

Tabelle 23: Verkehrsstufe beide Szenarien (UF 4 u. 5)

Verfahren	Verkehrsstufe			Mittel (arithmetisch)
	UF 4 (MQ_05)	UF 4 (MQ_06)	UF 5 (MQ_19)	
OHNE	3,7520	3,4557	2,9298	3,3792
HARM	3,7817	3,4669	2,8594	3,3693
FERR	3,7891	3,4706	2,9446	3,4014
FERRHB	3,8076	3,4669	2,9557	3,4101

Tabelle 24: Reisezeiten beide Szenarien (UF 4 u. 5)

Verfahren	Reisezeit (s)		Summe
	UF 4 (-771579087 bis -558301027)	UF 5 (-562771178)	
OHNE	4841	133,0	4974
HARM	61669	134,3	61804
FERR	28299	134,4	28433
FERRHB	3345	135,9	3481

Tabelle 25: Normierte Reisezeiten beide Szenarien (UF 4 u. 5)

Verfahren	Norm. Reisezeit (s/km)		Mittel (gewichtet nach Länge)
	UF 4 (-771579087 bis -558301027)	UF 5 (-562771178)	
OHNE	2874	122,3	1794
HARM	36611	123,5	22294
FERR	16800	123,6	10257
FERRHB	1986	125,0	1256

Abbildungsverzeichnis

1	Arbeitsschritte bei der Streckenbeeinflussung	14
2	Versagensmodell für die Unfallwahrscheinlichkeit	40
3	Komponenten des Qualitätsmanagements aus technischer Sicht	55
4	Simulationsergebnisse Szenario „doppelte Verkehrsstärke“	73
5	Simulationsergebnisse Szenario „vorübergehende Störungen“, UF 4 und 5	73
6	Simulationsergebnisse beide Szenarien, UF 1 bis 3	74
7	Simulationsergebnisse beide Szenarien, UF 4 und 5	74
8	Komponenten und Funktionsweise der Erweiterten Situationserkennung	90

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht zu den Expertenbefragungen	34
2	Größen zur Schätzung der Versagenswahrscheinlichkeiten im Versagensmodell	41
3	Qualitätsbewertungsmerkmale	53
4	Untersuchungsfelder im Szenario „doppelte Verkehrsstärke“	146
5	Stau Szenario „doppelte Verkehrsstärke“	146
6	Verkehrsstufe Szenario „doppelte Verkehrsstärke“	146
7	Reisezeiten Szenario „doppelte Verkehrsstärke“	147
8	Normierte Reisezeiten Szenario „doppelte Verkehrsstärke“	147
9	Zusätzliche Untersuchungsfelder im Szenario „vorübergehende Störungen“	147
10	Stau Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 1-3)	148
11	Verkehrsstufe Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 1-3)	148
12	Reisezeiten Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 1-3)	148
13	Normierte Reisezeiten Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 1-3)	148
14	Stau Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 4 u. 5)	149
15	Verkehrsstufe Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 4 u. 5)	149
16	Reisezeiten Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 4 u. 5)	149
17	Normierte Reisezeiten Szenario „vorübergehende Störungen“ (UF 4 u. 5)	149
18	Stau beide Szenarien (UF 1-3)	150
19	Verkehrsstufe beide Szenarien (UF 1-3)	150
20	Reisezeiten beide Szenarien (UF 1-3)	150
21	Normierte Reisezeiten beide Szenarien (UF 1-3)	151
22	Stau beide Szenarien (UF 4 u. 5)	151
23	Verkehrsstufe beide Szenarien (UF 4 u. 5)	151
24	Reisezeiten beide Szenarien (UF 4 u. 5)	151
25	Normierte Reisezeiten beide Szenarien (UF 4 u. 5)	152

Abkürzungsverzeichnis

AQ	Anzeigequerschnitt
DR	Detektionsrate
ESE	Erweiterte Situationserkennung
FAR	Fehlalarmrate
Kfz	Kraftfahrzeug
Lkw	Lastkraftwagen
MARZ	Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MQ	Messquerschnitt
Pkw	Personenkraftwagen
PkwE	Pkw-Einheiten
PR	Prognoserate
SBA	Streckenbeeinflussungsanlage
SUMO	Simulation of Urban Mobility
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen
TraCI	Traffic Control Interface
TTC	Time to Collision
UF	Untersuchungsfeld
VBA	Verkehrsbeeinflussungsanlage
WVZ	Wechselverkehrszeichen

Symbolverzeichnis

b	Belegung eines Detektors (einzelner Fahrstreifen an einem Messquerschnitt)
B	mittlere Belegung aller Detektoren an einem Messquerschnitt
k_{lok}	lokale Gesamtverkehrsdichte für einen Fahrstreifen
K_{lok}	lokale Gesamtverkehrsdichte für einen Richtungsquerschnitt
m	Steigung einer Regressionsgeraden; Ausgangsgröße des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“
Φ	Zuverlässigkeitskennwert; Ausgangsgröße des Verfahrens „Zuverlässigkeit des Verkehrs“
q	Gesamtverkehrsstärke für einen Fahrstreifen (auch: q_{Kfz})
q_{Pkw}	Pkw-Verkehrsstärke für einen Fahrstreifen
q_{Lkw}	Lkw-Verkehrsstärke für einen Fahrstreifen
q_{B}	Bemessungsverkehrsstärke für einen Fahrstreifen
Q	Gesamtverkehrsstärke für einen Richtungsquerschnitt (auch: Q_{Kfz})
Q_{Pkw}	Pkw-Verkehrsstärke für einen Richtungsquerschnitt
Q_{Lkw}	Lkw-Verkehrsstärke für einen Richtungsquerschnitt
Q_{B}	Bemessungsverkehrsstärke für einen Richtungsquerschnitt
s_{Kfz}	Standardabweichung der Kfz-Fahrgeschwindigkeiten für einen Fahrstreifen
S_{Kfz}	Standardabweichung der Kfz-Fahrgeschwindigkeiten für einen Richtungsquerschnitt
t	Zeit (diskret oder kontinuierlich)
v_{ind}	individuelle Fahrgeschwindigkeit eines Verkehrsteilnehmers
v_{Kfz}	mittlere Fahrgeschwindigkeit aller Kraftfahrzeuge
v_{Pkw}	mittlere Pkw-Fahrgeschwindigkeit
v_{Lkw}	mittlere Lkw-Fahrgeschwindigkeit
V_{Kfz}	mittlere Fahrgeschwindigkeit aller Kraftfahrzeuge
V_{Pkw}	mittlere Pkw-Fahrgeschwindigkeit
V_{Lkw}	mittlere Lkw-Fahrgeschwindigkeit
VK_{diff}	Stauindikator; Ausgangsgröße des gleichnamigen Verfahrens
$VK_{\text{diff,Kfz}}$	Stauindikator; Ausgangsgröße des gleichnamigen Verfahrens

Hinweis:

Symbole, die hauptsächlich innerhalb eines Abschnittes verwendet werden, sind hier nicht aufgeführt.

Literatur

- [1] Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit:
Hinweise für Steuerungsmodelle von Wechselverkehrszeichenanlagen in Außerortsbereichen
FGSV 359, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 1992
- [2] Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit:
Hinweise für neue Verfahren zur Verkehrsbeeinflussung auf Außerortsstraßen
FGSV 376, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2000
- [3] Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit:
Arbeitspapier AK 3.2.7 „VBA-Steuerungsverfahren“
Entwurf, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Mai 2008
- [4] Heinz Zackor, Gerhard Schwenzer:
Beurteilung einer situationsabhängigen Geschwindigkeitsbeeinflussung auf Autobahnen
Heft 532, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1988
- [5] Thomas Sachse, Hartmut Keller:
Einfluß des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Straßenabschnitten
Heft 614, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1992
- [6] Thomas Röhr, Agnes Lindenbach, Heinz Zackor, Werner Balz, Helmut Frik:
Entwicklung von Verfahren zur großräumigen Prognose der Verkehrsentwicklung und Folgerungen für den Datenaustausch von Verkehrsrechnerzentralen
Heft 727, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1996
- [7] Michael Mangold, Klaus Träger, Agnes Lindenbach, Heinz Zackor:
Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Umfelddatenerfassung
Heft 729, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1996
- [8] Marcus Hoops, Ronald Kates, Hartmut Keller:
Bewertung von Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf in Theorie, Praxis und Simulation
Heft 797, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 2000
- [9] Christiane Steinhoff, Ronald Kates, Hartmut Keller, Berthold Färber, Brigitte Färber:
Problematik präventiver Schaltungen von Streckenbeeinflussungsanlagen
Heft 853, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 2002
- [10] Thomas Pischner, Stefan Hangleiter, Uwe Lambacher, Stefan Trupat, Reinhart Kühne, Peter Schick:
Ermittlung und Bewertung der Nutzenkomponenten von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf den Verkehrsablauf
Heft 866, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 2003
- [11] Sylvia Piszczek, Alexander Dinkel, Axel Leonhardt, Johannes Mutzbauer:
Testfeld für die Erfassung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen
Heft 3.2007, Straßenverkehrstechnik, 2007

- [12] Samuel Denaes, Andrea Schieferstein, Stefanie Rieß, Peter Ermer:
*Neue Methoden zur Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen – Teil 1:
Zielfunktion zur Wirkungsmodellierung von Harmonisierungssteuerprogrammen und Stau-
warnungen*
Heft 3.2009, Straßenverkehrstechnik, 2009, Seiten 133-140
- [13] Samuel Denaes, Andrea Schieferstein, Stefanie Rieß, Peter Ermer:
*Neue Methoden zur Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen – Teil 2:
Das neue Steuerungsverfahren INCA*
Heft 4.2009, Straßenverkehrstechnik, 2009, Seiten 233-240
- [14] Paolo Ferrari:
The Reliability of the Motorway Transport System
Volume 22B, Issue 4, Transportation Research (Part B), 1988, Seiten 291-310
- [15] Paolo Ferrari:
The Control of Motorway Reliability
Volume 25A, Issue 6, Transportation Research (Part A), 1991, Seiten 419-427
- [16] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt):
Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen
Ausgabe 1999
- [17] Bundesministerium für Verkehr:
Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen
Ausgabe 2002
- [18] Bundesanstalt für Straßenwesen:
Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen
Ausgabe 1997
- [19] Bundesanstalt für Straßenwesen:
Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen
Ausgabe 1997
- [20] Ekbert Hering, Jürgen Triemel, Hans-Peter Blank:
Qualitätsmanagement für Ingenieure
4. Auflage, Springer Verlag, 1999
- [21] Peter Dilg:
Praktisches Qualitätsmanagement in der Informationstechnologie
Carl Hanser Verlag, 1995
- [22] Europäisches Patentamt:
Verfahren zur Ermittlung von Verkehrsinformationen
EP 0 908 861 A2, Siemens Aktiengesellschaft, 1999
- [23] Fa. Heusch/Boesefeldt:
Versorgung Verkehrsbeeinflussungsanlagen
Version 1.1, 1998, Seiten 2-16, 2-17, 5-1 bis 5-7
- [24] Stefan Lorkowski:
Fusion von Verkehrsdaten mit Mikromodellen am Beispiel von Autobahnen

Dissertation, Technische Universität Berlin, 2009

- [25] Lehrstuhl für Verkehrstechnik:
Testfeld für Umfelddatenerfassung in SBA „Eching-Ost“
http://www.vt.bv.tum.de/index.php?option=com_content&task=view&id=68&Itemid=94,
Technische Universität München, besucht am 04.06.2009
- [26] Yahoo! Inc.: *Yahoo! Maps, Driving Directions, and Traffic*
<http://maps.yahoo.com/>,
Luftbilder entlang der Autobahn A 92, besucht am 13.08.09