

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Verkehrstechnik

**Nutzung fahrzeuggenerierter Daten
zur Ermittlung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands
in Streckenbeeinflussungsanlagen**

Alexander Michael Dinkel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Steinauer (em.)
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Die Dissertation wurde am 15.11.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 08.02.2013 angenommen.

Die vorliegende Dissertation geht aus dem durch Herrn Dipl.-Ing. Alexander Dinkel im Rahmen einer Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München bearbeiteten Projekt „Zuverlässige Ermittlung des Fahrbahnzustands zur Erhöhung der Verkehrssicherheit auf Autobahnen“ (FE 82.338/2007 der Bundesanstalt für Straßenwesen) hervor.

Kurzfassung

Der witterungsbedingte Fahrbahnzustand stellt durch die Reduzierung der Griffigkeit aufgrund von Nässe oder Glätte eine entscheidende Größe für die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer dar. Deshalb erfolgt mittels Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) eine an die vorherrschenden Umfeld- und Verkehrsbedingungen angepasste Steuerung des Verkehrs auf Autobahnen. Auf Basis der derzeit üblichen Umfelddatenerfassung im Rahmen von SBA lässt sich der Fahrbahnzustand räumlich-zeitlich nicht lückenlos bestimmen. Daher wird in dieser Arbeit ein Modell entwickelt, das neben den herkömmlichen, stationär erfassten Umfelddaten auch fahrzeuggenerierte mobil erfasste Daten (sogenannte extended floating car data - xFCD) fusioniert. Mit diesem sogenannten Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell wird die Erfassung witterungsbedingter Fahrbahnzustände auf Autobahnen verbessert. Um geeignete fahrzeuggenerierte Daten als Eingangsgrößen zu identifizieren, werden mit zwei Serienfahrzeugen Befahrungen durchgeführt und die an den Fahrzeug-CAN (Controller Area Network)-Bus vorliegenden xFCD analysiert und Vergleichswerten aus dem Testfeld für Umfelddatenerfassung in SBA „Eching Ost“ gegenübergestellt. Als Resultat dieser Untersuchung werden die fahrzeuggenerierten Informationen zu Lufttemperatur, Wischerstufe, Nässeerkennung, Frontwaschen und Fahrzeuggeschwindigkeit in das Modell eingebunden. Es stehen keine fahrzeuggenerierten Daten zur Verfügung, die eine direkte Aussage zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand ermöglichen. Das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell ist modular aufgebaut und weist die folgenden Funktionalitäten auf:

- Aufbereitung der Eingangsdaten und Lokalisierung von Fahrzeugen im Streckennetz (Input-Modul)
- Ermittlung von streckenbezogenen Aussagen zu witterungsbedingten Fahrbahnzuständen, Glättewarnungen, Temperaturen und Nässe auf Basis fusionierter xFCD und stationär erfasster Umfelddaten im sogenannten xFBZ-Modul
- Anwendungsspezifische Aufbereitung der Modellergebnisse und Fusion der auf einzelnen Fahrzeugen basierenden Ergebnisse zu einer Gesamtaussage (Output-Modul)
- Qualitätssicherung für Daten, Prozesse, Module und Modelle im Qualitäts-Modul

In dem Modell wird Fuzzy-Logik eingesetzt, die sich insbesondere aufgrund der Unschärfe von Umfeldinformationen sehr gut für deren Interpretation und Verarbeitung eignet.

Für die mittels des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells ermittelten verbesserten streckenbezogenen Informationen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand wird dargelegt, welche technischen, funktionalen und organisatorischen Anforderungen erfüllt werden müssen, um sie in die Praxis einzubinden und so zu einem optimierten Betrieb von SBA beitragen zu können. Ergänzend werden rechtliche und wirtschaftliche Aspekte einer Integration des entwickelten Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in die SBA behandelt.

Da das Modell aufgrund fehlender weiterer datenliefernder Fahrzeuge und Kommunikationsinfrastruktur nicht implementiert wird und somit keine Evaluation der Modellergebnisse durchgeführt werden kann, wird in Anlehnung an eine sogenannte SWOT-Analyse eine kritische Einordnung der Arbeit durchgeführt. Hierfür werden das methodische Vorgehen der Modellentwicklung und die Resultate strukturiert analysiert und darauf basierend Empfehlungen zum weiteren Vorgehen gegeben. Dabei werden auch mögliche Einflüsse zukünftiger Entwicklungen und Technologien diskutiert.

Für eine Praxiseinführung sind die derzeit bestehenden Defizite in der fahrzeugseitigen Bereitstellung und Standardisierung der xFCD, sowie in Übertragung und Empfang der Daten zu beheben.

Abstract

Due to the reduction of grip as a consequence of moisture or sleekness the weather related surface condition is an important parameter for the safety of road traffic. Thus, Line Control Systems (LCS) control traffic on motorways according to current weather and traffic conditions. Based on the present acquisition of road weather data within LCS, there is no possibility to consistently determine road surface condition spatiotemporal.

Therefore, a model is developed, which fuses conventional stationary acquired road weather data with mobile vehicle generated data (extended floating car data - xgcd). This so called extended road surface status-model improves the determination of weather related road surface conditions on motorways. In order to identify appropriate vehicle generated data as input data, trips were carried out with two ordinary vehicles. xgcd were saved from vehicle's CAN (Controller Area Network)-bus. In the frame of subsequent data analysis xgcd were compared to reference values derived from the German test site for road weather data acquisition. As a result of these analyses, vehicle generated information on air temperature, wiper status, wiper's moisture detection and front washing as well as vehicle's velocity were used in the model. Currently no vehicle generated data allowing a direct inference on weather related road surface conditions are available. The extended road surface status-model is modular and features the following functionalities:

- Preparation of input data and map matching of vehicles (so called Input-Module)
- Determination of stretch-wise information on weather related road surface conditions, temperatures and moisture, warnings against sleekness based on the fusion of xgcd and stationary acquired road weather data within the so called xFBZ-Module
- Specific preparation of the model's results and fusion of results, which are based on single vehicles (Output-Module)
- Quality management for data, processes, modules and models within the so called Quality-Module

Fuzzy-logic is used for interpretation and processing of road weather data and xgcd.

There is a discussion of technical, functional, organizational, legal and economic requirements for integrating the road surface status-model in LCS.

As the model is not implemented to practice due to missing communication infrastructure and vehicles being able to provide xgcd, the model's results have not been evaluated yet. Hence, based on so called SWOT-analyses, a critical analysis of the work is carried out. For this purpose the methodology of model development and the results are analyzed. Based on this, recommendations for further procedure are given. Potential effects of future developments and technologies are discussed.

For future model commissioning, the present deficits in the provision, standardization and transmission of vehicle generated xfd have to be removed.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	V
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand	6
2.1 Übersicht	6
2.2 Einfluss des witterungsbedingten Fahrbahnzustands auf den Verkehr	6
2.2.1 Fahrzeug	6
2.2.2 Verkehrsablauf	8
2.2.3 Verkehrssicherheit	10
2.3 Witterungsbedingter Fahrbahnzustand und weitere Umfeldgrößen	12
2.3.1 Fahrbahngrößen	12
2.3.2 Atmosphärische Größen	17
2.4 Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen	18
2.5 Nutzung von fahrzeuggenerierten Daten in kooperativen Systemen	21
2.5.1 Diskussion der mobilen Datenerfassung	21
2.5.2 Fahrzeuggenerierte Daten und CAN-Bus	22
2.5.3 Kooperative Systeme	24
2.5.4 Projekte und Anwendungen	25
2.6 Sensor- und Datenqualität	29
2.7 Zwischenfazit	33
3 Analyse fahrzeuggenerierter und stationär erfasster Daten	35
3.1 Übersicht	35
3.2 Datenerfassung und -aufbereitung	36
3.2.1 Anforderungen und Spezifikationen	36
3.2.2 Versuchsfahrzeuge und Ausstattung	38
3.2.3 Befahrungsgebiet	39
3.2.4 Datenaufbereitung	40
3.2.5 Datenerfassung	41
3.3 Hypothesen zur Vorauswahl und Analyse der Daten	42
3.3.1 Vorgehen	42
3.3.2 Hypothesen zu den bestimmenden Größen des Fahrbahnzustands	43
3.4 Analyse fahrzeuggenerierter Daten	45

3.4.1	Spezifikation der ausgewählten fahrzeuggenerierten Daten	45
3.4.2	Witterungsbedingter Fahrbahnzustand	45
3.4.3	Luft- und Fahrbahntemperatur	50
3.4.4	Niederschlag	54
3.5	Analyse stationär erfasster Daten	59
3.5.1	Luft- und Fahrbahntemperatur	59
3.5.2	Luftfeuchtigkeit	61
3.6	Zwischenfazit	63
4	Modell zur Ermittlung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands	64
4.1	Übersicht	64
4.2	Modellentwicklung	64
4.2.1	Anforderungen	64
4.2.2	Aufbau des Modells	65
4.2.3	Einsatz von Fuzzy-Logik	67
4.3	Input-Modul	68
4.4	xFBZ-Modul	76
4.4.1	Aufbau	76
4.4.2	Temperatur-Modell	76
4.4.3	Nässe-Modell	80
4.4.4	Glätte-Modell	86
4.4.5	Fahrbahnzustand-Modell	90
4.5	Qualitäts-Modul	92
4.5.1	Einordnung	92
4.5.2	Qualitätsmanagementkonzept und Funktionalitäten	93
4.5.3	Aufbau und Ergebnisgenerierung	94
4.5.4	Geräte-Monitor	95
4.5.5	Daten-Monitor	97
4.5.6	Modell-Monitor	99
4.5.7	System-Monitor	100
4.6	Output-Modul	100
4.7	Zwischenfazit	102
5	Voraussetzungen für einen Praxiseinsatz des Modells	103
5.1	Übersicht	103
5.2	Konzeptionell-funktionale Aspekte	103
5.3	Technisch-physische Aspekte	105
5.3.1	Übersicht	105
5.3.2	Fahrzeug	105
5.3.3	Datenübertragung	107

5.3.4	Streckenseitige SBA-Infrastruktur	109
5.3.5	Verkehrsrechner- und Unterzentralen	110
5.4	Organisatorisch-institutionelle Aspekte	110
5.5	Rechtliche Aspekte	112
5.6	Kosten- und Nutzenaspekte	114
5.7	Zwischenfazit	116
6	Kritische Einordnung der Arbeit	118
6.1	Übersicht	118
6.2	Bewertung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells	118
6.2.1	Hintergrund und Vorgehensbeschreibung der SWOT-Analyse	118
6.2.2	Diskussion des methodischen Vorgehens zur Modellentwicklung	119
6.2.3	Diskussion der internen Faktoren des Modells	121
6.2.4	Diskussion der externen Faktoren aus zukünftigen Entwicklungen und Technologien	122
6.2.5	Kombinationen zur Bewertung der Anwendung des Modells	127
6.3	Zwischenfazit und strategische Schlussfolgerungen	128
7	Zusammenfassung und Ausblick	130
7.1	Zusammenfassung der Arbeit	130
7.2	Ausblick mit Entwicklungs- und Anwendungsmöglichkeiten	132
	Glossar	137
	Abkürzungsverzeichnis	141
	Literaturverzeichnis	146
	Abbildungsverzeichnis	154
	Tabellenverzeichnis	156
	Anhang 1: Beschreibung von Regressionsanalysen	157
	Anhang 2: Ergänzende Grafiken zu den Befahrungen	159
	Anhang 3: Ergänzungen zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Luft- und Fahrbahntemperatur	160
	Anhang 4: Grundlagen der Fuzzy-Logik	167
	Anhang 5: Ergebnisse des Glätte-Modells	169

1 Einführung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Neben verkehrlichen Behinderungen und anderen Umfeldeinflüssen üben Fahrbahnzustände, die durch Nässe, Schnee oder Eis reduzierte Griffigkeiten hervorrufen, einen negativen Einfluss auf den Verkehrsablauf [zum Beispiel MANGOLD, 1996] und die Verkehrssicherheit [ADAC, 2012] aus. In der Europäischen Union waren im Jahr 2004 beispielsweise mehr als 12 % aller Verkehrsunfälle mit Todesfolge auf witterungsbedingt reduzierte Fahrbahngriffigkeiten zurückzuführen [SAFETYNET, 2006].

Aufgrund der für Deutschland bis zum Jahr 2025 prognostizierten weiteren Steigerung des Verkehrsaufkommens [BMVBS, 2007] sind intelligente Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit bei kritischen Umfeldbedingungen zwingend erforderlich. Hierzu zählen die sogenannten „Intelligenten Verkehrssysteme“ (IVS, englisch: ITS – Intelligent Transport Systems), die gemäß IVS Richtlinie [EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT, 2010] die Verkehrsteilnehmer „in die Lage [...] versetzen, die Verkehrsnetze auf sicherere, koordiniertere und ‚klügere‘ Weise zu nutzen“.

Auf Autobahnen werden zur Warnung und Beeinflussung des Verkehrs bei kritischen Umfeldbedingungen Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) eingesetzt. Mit einer SBA erfolgt die Steuerung des Verkehrsablaufs auf Basis der aktuellen Verkehrs- und Umfeldbedingungen, die für eine regelbasierte Anpassung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und die Anzeige von Warnungen auf Wechselverkehrszeichen (WVZ) verwendet werden [FGSV, 2011]. Die witterungsbedingten Steuerungsmaßnahmen basieren auf aktuell und lokal ermittelten Messwerten von stationären Sensoren zur Umfelddatenerfassung, die zur Verkehrsbeeinflussung auf Autobahnen in Deutschland bestenfalls einen Abstand von 2 bis 4 Kilometer zueinander aufweisen [FGSV, 2010a]. Für die Nässe werden in der Steuerung als Eingangsgrößen die Messwerte des Zustands der Fahrbahnoberfläche, der Wasserfilmdicke auf der Fahrbahn sowie für Art und Intensität des Niederschlags verwendet.

Für die derzeit übliche Praxis der Erfassung und Nutzung von Umfelddaten zur Beschreibung der Fahrbahnzustände im Rahmen von SBA werden die folgenden Schwachstellen identifiziert:

- Obwohl es sich bei Umfelddaten um inhomogene und instationäre Ereignisse handelt, erfolgt die Erfassung von Umfelddaten lokal und stationär. Auf Basis dieser stationär an festen Orten erhobenen Messwerte werden die Umfeldbedingungen auf Streckenabschnitte extrapoliert und der Verkehr entsprechend beeinflusst. Da keine streckenbezogene Kenntnis bezüglich der Umfeldbedingungen vorliegt und die Anzahl der Anzeigequerschnitte begrenzt ist, kann die Steuerung nicht immer optimal für die gesamten Streckenabschnitte erfolgen.
- Beim Ausfall von Messstationen wird dieser Effekt noch verstärkt, da dann zu großen Teilen des Streckennetzes keine Informationen vorliegen. Da die Umfeldbedingungen

wesentlichen Einfluss auf das Verkehrsgeschehen und die Verkehrssicherheit ausüben, sollten Informationen über aktuelle Umfeldbedingungen zum Zweck der Verkehrsbeeinflussung räumlich und zeitlich durchgängig vorliegen.

- Eine durch die Umfeldbedingungen hervorgerufene Reduzierung der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche wird nicht direkt erfasst, obwohl sie die Fahrsicherheit stark beeinflusst. Dieser Effekt wird durch das Heranziehen beschreibender Größen zum atmosphärischen Niederschlag und zum Zustand der Fahrbahnoberfläche abgebildet.
- Die Akzeptanz und Befolgung der Schaltungen durch die Verkehrsteilnehmer und somit die Wirksamkeit der SBA hängen in hohem Maße von der Plausibilität der Anzeigen ab, die auf aktuell und stationär erhobenen Verkehrs- und Umfelddaten basieren [STEINHOFF, 2003]. Ergebnisse von Sensortests [zum Beispiel GROŠANIĆ ET AL., 2012 und DINKEL ET AL., 2008a] zeigen jedoch, dass die sensorielle Erfassung von Umfelddaten zurzeit teilweise noch ein deutliches Verbesserungspotenzial aufweist.
- Optimal konfigurierte Verfahren zur Steuerung von SBA und korrekte Eingangsdaten beeinflussen die Wirksamkeit von SBA maßgeblich. In der Praxis wird derzeit jedoch kein durchgängiges System zur Qualitätssicherung von Umfelddaten und Prozessen eingesetzt.

In einer Vielzahl aktueller Projekte, wie beispielsweise AKTIV [2012], COOPERS [2010], SAFESPOT [2012], sim^{TD} [2012], wurden kooperative Ansätze für den Austausch von Informationen zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur gewählt, eine Optimierung der witterungsabhängigen Beeinflussung und Warnung des Verkehrs wird jedoch nur ansatzweise behandelt.

Ausgehend von den oben genannten Defiziten im derzeitigen Stand der Erfassung von witterungsbedingten Fahrbahnzuständen verfolgt die vorliegende Arbeit die folgenden Ziele:

Die Ermittlung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands in SBA soll durch die Hinzunahme fahrzeuggenerierter Daten verbessert werden. Hierdurch sollen die Warnung der Kraftfahrer und die Beeinflussung des Verkehrsablaufs im Rahmen von SBA optimiert und so bei kritischen Fahrbahnzuständen eine Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Autobahnen erreicht werden.

Zur Erfüllung der oben genannten Zielsetzung werden die folgenden Unterziele formuliert:

- Da derzeit keine Informationen zu der Güte und Aussagekraft von fahrzeuggenerierten Daten für die Ermittlung witterungsbedingter Fahrbahnzustände vorliegen, sind fahrzeuggenerierte Daten zu erheben und zu analysieren.
- Es ist ein Modell zu entwickeln, das fahrzeuggenerierte und stationär erfasste Daten fusioniert, um verbesserte (im Sinne von korrekten, aktuellen und durchgängigen) Aussagen zum witterungsbedingten Zustand der Fahrbahnoberfläche zu erzielen.
- Die Voraussetzungen für eine zukünftige Integration fahrzeuggenerierter Informationen in die Steuerungsabläufe von SBA sind kritisch zu diskutieren.

1.2 Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Das Bild 1.1 stellt das in der Arbeit angewandte methodische Vorgehen strukturiert dar. Es wurde eine für planerische Aufgabenstellungen typische Vorgehensweise gewählt [FGSV, 2001], die sich aus Vororientierung, Problemanalyse, Maßnahmandarstellung und Handlungsempfehlungen zusammensetzt. Der anschließende Arbeitsschritt der Umsetzung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells mitsamt Wirkungskontrolle lässt sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgrund fehlender kooperativer Infrastruktur und einer nicht vorhandenen umfassenden Datenbasis nicht realisieren, stattdessen erfolgt eine kritische Einordnung der angewandten Methodik und der erzielten Ergebnisse.

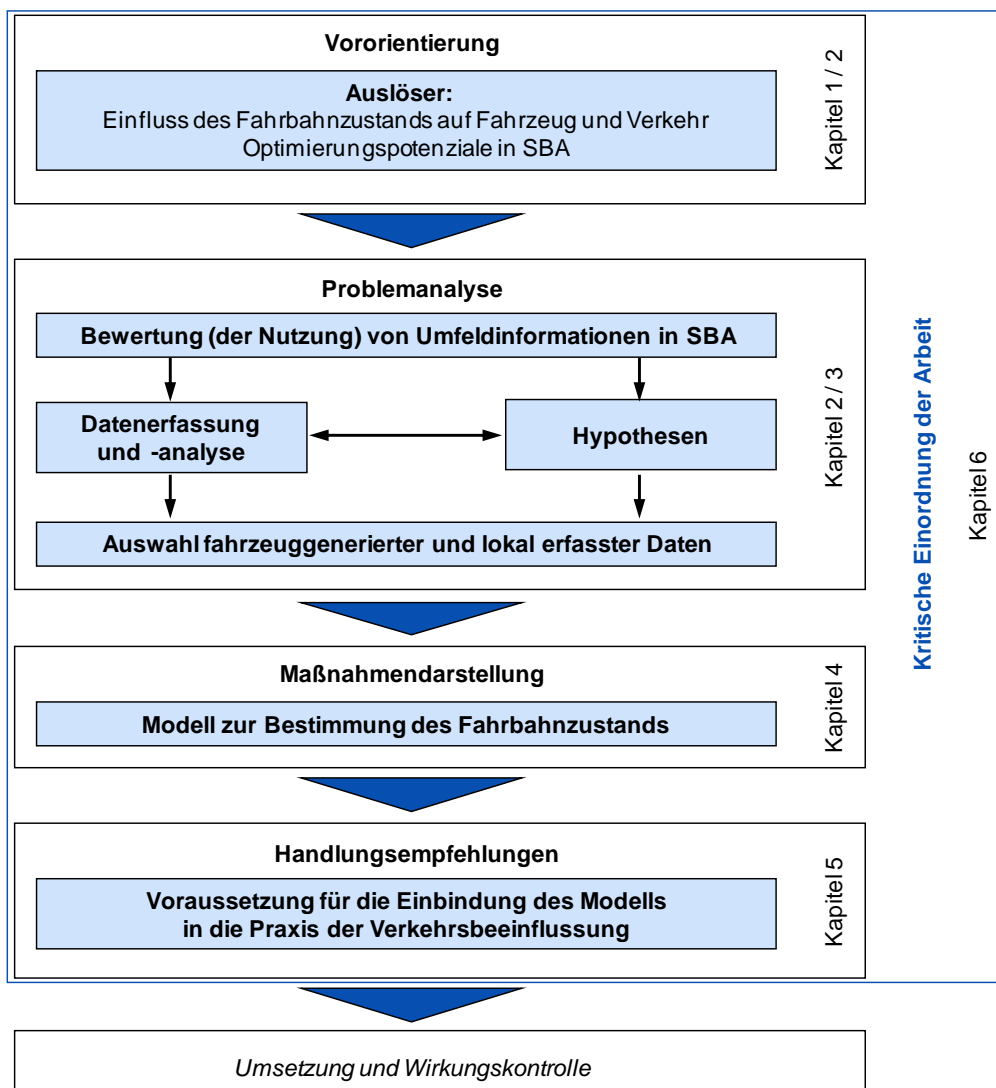


Bild 1.1 Darstellung des methodischen Vorgehens, nach FGSV [2001]

Im Einzelnen ist die Arbeit wie folgt strukturiert:

- Zur Vororientierung liefert das Kapitel 2 die Grundlagen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand. Basierend auf einer Recherche der negativen Einflüsse witterungsbedingter Fahrbahnzustände auf Fahrzeugverhalten, Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit werden Fahrbahnzustände und weitere Umfeldgrößen beschrieben. Die sensorielle Er-

fassung dieser Größen ist erforderlich, um mittels SBA Verkehrsteilnehmer situationsgerecht zu warnen und die zulässige Höchstgeschwindigkeit dynamisch anzupassen. Zudem werden neuartige kooperative Ansätze vorgestellt, die Umfeldinformationen zusätzlich zu der stationären Detektion auch mobil aus Fahrzeugen erfassen und nutzen. Abschließend werden Defizite in Sensor- und Datenqualitäten erläutert.

- Um die identifizierten Schwachstellen in der Ermittlung witterungsbedingter Fahrbahnzustände in SBA zu mindern, sollen ergänzend fahrzeuggenerierte Informationen herangezogen werden. Diese Methodik entspricht prinzipiell dem Vorgehen bei der Ergänzung der stationären Verkehrsdatenerfassung um mobil erfasste Floating Car Data (FCD). Stärker als bei den FCD besteht bei den erweiterten fahrzeuggenerierten Daten (extended Floating Car Data, xFCD) Forschungsbedarf hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Eignung als Informationsquelle für Rückschlüsse auf den witterungsbedingten Fahrbahnzustand in SBA. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist, dass aus den Fahrzeugen räumlich quasi durchgängig Informationen verfügbar sind, es existieren zu der Nutzung und Interpretation dieser Daten jedoch im Gegensatz zu der herkömmlichen punktuellen stationären Umfelddatenerfassung kaum Erfahrungen. Für die Auswahl geeigneter fahrzeuggenerierter Daten zur Integration in SBA werden Hypothesen formuliert und überprüft. Die Erfassung und Analyse fahrzeuggenerierter und stationär erfasster Daten wird in Kapitel 3 beschrieben.
- Die resultierende Datengrundlage wird in Kapitel 4 verwendet, um ein Modell zur Ermittlung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands zu entwickeln. xFCD und stationär erfasste Umfelddaten werden fusioniert, um unter Verwendung von Fuzzy-Logik Informationen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand, zu Nässe und Fahrbahnoberflächentemperaturen sowie Glättewarnungen zu ermitteln. Da die Qualität der Modellergebnisse stark von der Güte der Eingangsdaten abhängt, beinhaltet das Modell ein Qualitätsmanagementkonzept.
- In Form von Handlungsempfehlungen werden in Kapitel 5 die Voraussetzungen für eine Einbindung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in die Praxis der Verkehrsbeeinflussung behandelt. Hierfür werden technisch-physische, organisatorisch-institutionelle, rechtliche sowie Kosten- und Nutzen-Aspekte untersucht.
- Die beschriebene Methodik entspricht einem in der Planung klassischerweise angewendeten Vorgehen [FGSV, 2001], dem sich eine Implementierung und Wirkungskontrolle des Modells anschließen würde. Da dieser Schritt aufgrund fehlender Ausrüstung zur Datenübertragung im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht realisiert werden kann, erfolgt in Kapitel 6 eine kritische Untersuchung des methodischen Vorgehens und der erzielten Ergebnisse, was einem zusammenfassenden Fazit zu der Arbeit entspricht. Das gewählte Vorgehen orientiert sich an sogenannten SWOT-Analysen [CIO, 2012], indem Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken charakterisiert werden. Dabei finden als externe Faktoren auch zukünftige Entwicklungen und Technologien Berücksichtigung. Auf Basis dieser Ergebnisse werden Strategien für das weitere Vorgehen festgelegt.

- Das Kapitel 7 beinhaltet eine Zusammenfassung der Arbeit und stellt einen Ausblick zu Erweiterungsmöglichkeiten sowie zur Anwendung des Modells in weiteren Bereichen des Verkehrswesens dar.

2 Grundlagen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand

2.1 Übersicht

Das Kapitel 2 behandelt Grundlagen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand, der in Form von Fahrbahnnaße und -glätte eine Reduzierung der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche bewirkt.

In Abschnitt 2.2 sollen die resultierenden negativen Effekte auf die Fahrzeugführung, die Qualität des Verkehrsablaufs und die Verkehrssicherheit die Bedeutsamkeit der witterungsbedingten Fahrbahnzustände herausstellen. Der witterungsbedingte Fahrbahnzustand und weitere für die vorliegende Arbeit relevante Umfeldgrößen werden in Abschnitt 2.3 beschrieben.

Die Minderung der negativen Einflüsse der witterungsbedingten Fahrbahnzustände auf den Verkehr stellt eine Zielsetzung von SBA dar. Der Abschnitt 2.4 beinhaltet eine Darstellung des auf den erfassten Umfelddaten basierenden Steuerungsablaufs mittels SBA. Darüber hinausgehend existieren neuartige kooperative Ansätze, die Informationen aus fahrenden Fahrzeugen als Ergänzung zu der herkömmlichen Erfassung und Nutzung von Umfelddaten verwenden. Aktuelle Beispiele werden in Abschnitt 2.5 vorgestellt. Da die Qualität der Sensoren und erfassten Daten von entscheidender Bedeutung für die Wirksamkeit von SBA und neuartiger Ansätze sind, werden in Abschnitt 2.6 Ergebnisse von Qualitätsuntersuchungen aufgeführt.

Das Kapitel schließt in Abschnitt 2.7 mit der Bewertung der Grundlagen und darauf basierenden Schlussfolgerungen für die Ausrichtung und Durchführung der vorliegenden Arbeit.

2.2 Einfluss des witterungsbedingten Fahrbahnzustands auf den Verkehr

2.2.1 Fahrzeug

Die qualitative Bedeckung der Fahrbahnoberfläche bestimmt den witterungsbedingten Fahrbahnzustand. Naße und Glätte bewirken eine Minderung der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche. Bei der Griffigkeit handelt es sich um den Beitrag der Fahrbahnoberfläche zum Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn. Die Makrorauheit der Fahrbahnoberfläche beeinflusst das Abführen von Flüssigkeiten aus der Kontaktfläche des Reifens und die Aquaplaninggefahr. Sie hängt vom Kornaufbau und der Herstellung der Fahrbahnoberfläche ab. Die Mikrorauheit bestimmt maßgeblich die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche bei Naße. Sie wird von der Oberflächenfeingestalt der Fahrbahnoberfläche beeinflusst [BAST, 2010].

Die Reibungskräfte zur Beschleunigung, Verzögerung und Fahrtrichtungshaltung von Fahrzeugen werden über die Berührungsfächen übertragen. Durch Naße oder Glätte reduzierte

Fahrbahngriffigkeiten bewirken primär eine unmittelbare Verringerung der Traktion, der Stabilität und Manövrierbarkeit von Fahrzeugen [KLOTZ, 2002], indem die Übertragung der Längskräfte (Antriebs- und Bremskräfte) und Seitenkräfte (Zentrifugalkräfte bei Kurvenfahrt) von Fahrzeugreifen auf die Fahrbahn beeinflusst wird [MAURER, 2002]. Hierfür ist ursächlich, dass sich bei nicht-trockenen Fahrbahnzuständen die Möglichkeit zur Verzahnung zwischen der Raustruktur der Fahrbahnoberfläche und der Profilstruktur des Reifens im Vergleich zu trockenen Zuständen verringert [DURTH ET AL., 2004].

Die maximal erreichbaren Längs- und Quereschleunigungen eines Fahrzeugs werden durch den Reibwert an den vier Reifen, der sich aus dem Längsreibwert μ_x und dem Quereibwert μ_y zusammensetzt, begrenzt. Die den Reibwert maßgeblich bestimmenden Größen sind gemäß WEBER [2004]:

- Reifen (z. B. Typ, Profiltiefe, Material, Reifeninnendruck)
- Fahrbahn (Belag, Textur)
- Zwischenmedium (Zustand der Fahrbahnoberfläche: Trocken, feucht, nass, Schnee, Eis)

Der Zustand der Fahrbahnoberfläche übt den größten Einfluss auf das Reifenverhalten aus. Die Reifen können in Längsrichtung größere Reibwerte als in Querrichtung übertragen, so dass der maximal am Reifen übertragbare Reibwert μ_{\max} in Näherung eine Ellipsenform annimmt („reifenbezogene Reibwertellipse“). Anhand Bild 2.1 lässt sich erkennen, dass sich bei Beanspruchung eines Quereibwerts μ_y bei Kurvenfahrt das Brems- und Beschleunigungsvermögen $-\mu_{x,\max}$ und $\mu_{x,\max}$ verringern; gleiches gilt umgekehrt. Der Rand der Ellipse stellt den maximal beanspruchbaren Reibwert μ_{\max} dar, der sich aufgrund des witterungsbedingten Zustands der Fahrbahnoberfläche auf unter 10 % des optimalen Wertes verringern kann. Der Ellipsenrand wird bei ungünstigen Fahrbahnzuständen bedeutend früher und häufiger erreicht, wobei die aktuelle Reibwertnutzung durch den Ellipsenrand begrenzt ist [WEBER, 2004].

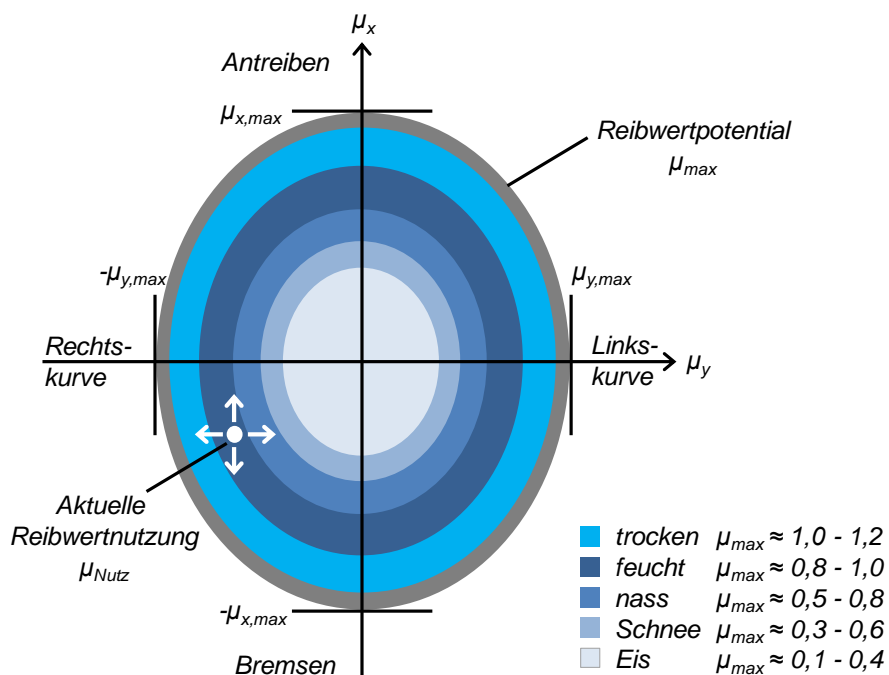


Bild 2.1 Grenzen der Reibwertnutzung am Reifen, nach WEBER [2004]

Aus diesen Randbedingungen bei der Bewegung von einzelnen Fahrzeugen (mikroskopisch) ergeben sich makroskopisch negative Effekte auf den Verkehrsablauf und die Verkehrssicherheit. Einige der in internationalen Studien quantifizierten Ergebnisse sind nachfolgend aufgeführt.

2.2.2 Verkehrsablauf

Makroskopisch lässt sich der Einfluss des witterungsbedingten Fahrbahnzustands auf die Qualität des Verkehrsablaufs anhand der Kenngrößen Geschwindigkeit, Reisezeit und Kapazität/Leistungsfähigkeit darstellen, indem man diese für identische Verkehrsverhältnisse bei unterschiedlichen Umfeldbedingungen vergleicht.

BRILON UND PONZLET [1996] ermittelten bei Fahrbahnässe auf vierspurigen Autobahnen eine Minderung des Geschwindigkeitsniveaus um 9,5 km/h, bei sechsspurigen Autobahnen ergibt sich eine Reduzierung der Geschwindigkeiten um 12 km/h. Hieraus resultierten Abminderungen der Kapazitäten um 350 Fz/h beziehungsweise 500 Fz/h.

Die Geschwindigkeitsreduktionen sind aufgrund des Bewusstseins für die Gefahrenkumulation am stärksten ausgeprägt, wenn mehrere kritische Umfeldzustände überlagert auftreten. Für unterschiedliche Umfeldbedingungen stellen MANGOLD ET AL. [1996] Summenhäufigkeiten der Geschwindigkeitsklassen dar. Hieraus geht hervor, dass bei uneingeschränkten Umfeldbedingungen (zum Beispiel hell und trocken) häufiger schnelle Geschwindigkeiten erreicht werden als bei ungünstigen Bedingungen (zum Beispiel dunkel und nass). Die Untersuchung der Leistungsfähigkeiten eines Streckenabschnitts der BAB A 5 zeigte, dass Regen eine Verringerung des Verkehrsstärkenmaximums bewirkt. Diese eindeutigen Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit lassen sich für Fahrbahnässe nicht generell bestätigen [MANGOLD ET

AL., 1996]. Dass sich kritische Umfeldbedingungen auf den Verkehrsablauf auf dem linken Fahrstreifen im Vergleich zum rechten und zum mittleren Fahrstreifen am stärksten negativ auswirken, wird von KLOTZ [2002] für winterliche Fahrbahnzustände gezeigt.

Bei Winterglätte stellt sich ein niedrigeres Geschwindigkeitsniveau als bei trockenen oder nassen Fahrbahnoberflächen ein und die Fahrer wählen größere Sicherheitsabstände zu den vorausfahrenden Fahrzeugen. Daraus ergibt sich eine Minderung der verkehrlichen Leistungsfähigkeit der Verkehrswege [DURTH ET AL., 2004].

Untersuchungen der Geschwindigkeiten auf kanadischen Autobahnen kommen zu dem Ergebnis, dass diese von Niederschlagsart und -intensität abhängen. Bei leichtem Regen sinken die gefahrenen Geschwindigkeiten um circa 2 km/h, bei starkem Schneefall können sich Geschwindigkeitseinbrüche um bis zu 38-50 km/h einstellen [IBRAHIM UND HALL, 1994].

Insbesondere in den USA wurden umfangreiche Untersuchungen zu den Einflüssen witterungsbedingter Fahrbahnzustände auf den Verkehrsablauf durchgeführt. In Tab. 2.1 sind die Ergebnisse zweier Studien den Vorgaben des Highway Capacity Manual [HCM, 2000] gegenübergestellt, das vergleichbar zum deutschen Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [FGSV, 2010b] die Qualität des Verkehrsablaufs für amerikanische Verhältnisse bestimmt. Auch wenn die in Tab. 2.1 dargestellten Werte zum Einfluss von Umfeldbedingungen auf den Verkehrsablauf nicht identisch sind, kann doch anhand des Vergleichs gezeigt werden, dass die Umfeldbedingungen einen erheblichen Einfluss auf den Verkehrsablauf ausüben können. Vermutlich aufgrund der in den verschiedenen Untersuchungen nicht identisch klassifizierten Niederschlagsintensitäten sowie der jeweils lokalen Gegebenheiten und Besonderheiten können die negativen Effekte nicht allgemeingültig angegeben werden. So konnten beispielsweise HRANAC ET AL. [2006] zeigen, dass in Regionen, in denen Schneesituationen seltener vorkommen, die negativen Effekte von Schneefall auf den Verkehrsablauf stärker ausgeprägt sind als in Regionen, in denen diese Umfeldbedingungen üblicher ist. Die Verkehrsteilnehmer scheinen ihre Fahrweise in einem Lernprozess an die vorherrschenden Verhältnisse anzupassen.

Umfeldbedingung und Einfluss auf den Verkehrsablauf	HCM [2000] [%]	STERN ET AL. [2003] [%]	AGARWAL ET AL. [2005] [%]
Starker Regen Reduzierung von: <ul style="list-style-type: none"> Mittlere Geschwindigkeit Kapazität 	5-17 0-15	3-16 10-30	4-7 10-17
Starker Schneefall Reduzierung von: <ul style="list-style-type: none"> Mittlere Geschwindigkeit Kapazität 	20-35 25-30	5-40 12-27	11-15 19-27

Tab. 2.1 Vergleich amerikanischer Studien zum Einfluss des Wetters auf den Verkehrsablauf mit Vorgaben des HCM [2000]

2.2.3 Verkehrssicherheit

Der negative Einfluss kritischer witterungsbedingter Fahrbahnzustände auf die Verkehrssicherheit lässt sich anhand einer Analyse von Unfallzahlen beschreiben. Um die Unfallzahlen bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen vergleichen zu können, wäre als zusätzliche Information zur korrekten Interpretation der Ergebnisse beispielsweise die jeweilige Verkehrsleistung erforderlich, diese liegt i. d. R. jedoch nicht vor. In Bild 2.2 sind als Anhaltswerte für die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Fahrbahnnaße und atmosphärischem Niederschlag Messwerte des Zeitraums August 2006 bis Juni 2007 an der BAB A 92 dargestellt [DINKEL ET AL., 2008c]. Die Grafik zeigt unter anderem, dass der Anteil nicht trockener Fahrbahnzustände je Monat zwischen rund 5 % und 60 % liegen kann.

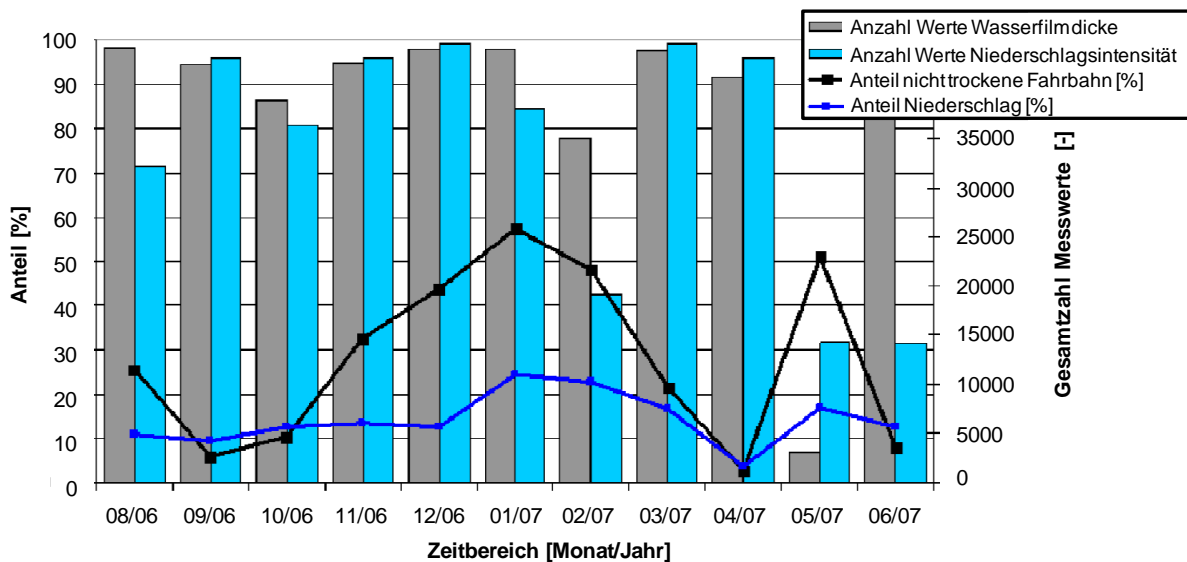


Bild 2.2 Anteil Niederschlag und nicht trockene Fahrbahnzustände von August 2006 bis Juni 2007 im Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ [DINKEL ET AL., 2008c]

Die Tab. 2.2 zeigt eine Auflistung der Straßenverkehrsunfälle und Unfallfolgen 2010 auf Autobahnen nach Straßenzustand. Im Jahr 2010 sind auf deutschen Autobahnen rund 27 %

der Unfälle mit Personenschaden bei nassen Fahrbahnoberflächen eingetreten. Da in diesem Jahr vergleichsweise häufig winterglatte Fahrbahnoberflächen vorhanden waren, fanden rund 10 % der Unfälle mit Personenschaden bei schneebedingt verringerten Fahrbahngriffigkeiten statt [STATISTISCHES BUNDESAMT, 2011].

Lichtverhältnisse Straßenzustand Hindernis neben der Fahrbahn	Unfälle mit Personenschaden				Verunglückte				Schwer- wiegende Unfälle m. Sach- schaden)
	insgesamt	mit Getöteten	mit Schwer- verletzten	mit Leicht- verletzten	insgesamt	Getötete	Schwer- verletzte	Leicht- verletzte	
auf Autobahnen									
Straßenzustand									
Trocken	11 711	256	2 432	9 023	18 759	292	3 252	15 215	5 101
Nass/Feucht/Schlüpfrig (Öl, Laub, usw.)	5 160	95	905	4 160	7 799	111	1 221	6 467	5 952
Winterglatt	1 958	23	345	1 590	2 745	27	451	2 267	5 631
Zusammen ...	18 829	374	3 682	14 773	29 303	430	4 924	23 949	16 684

Tab. 2.2 Straßenverkehrsunfälle und Unfallfolgen 2010 nach Straßenzustand [STATISTISCHES BUNDESAMT, 2011]

Im Jahr 2010 betrug die Unfallschwere auf deutschen Autobahnen, ausgedrückt als Anzahl der tödlich Verunglückten je 1000 Unfälle mit Personenschaden, bei winterglatten Fahrbahnen 10 Getötete im Vergleich zu rund 13 tödlich Verunglückten bei trockenen und rund 12,5 Getöteten bei nassen Fahrbahnzuständen [ADAC, 2011]. Es fällt auf, dass bei Unfällen bei widrigen Fahrbahnzuständen überproportional viele Getötete zu verzeichnen sind.

Die Verkehrssicherheit bei schneebedeckten Fahrbahnen wurde von MAZE ET AL. [2005] untersucht. Im amerikanischen Bundesstaat Iowa traten 21 % aller Unfälle bei winterlichen Wetterbedingungen ein, die lediglich in circa 5 % des Jahres vorhanden sind.

GOODWIN [2003] führt auf, dass in Florida auf zweistreifigen Straßen 69 % aller Unfälle bei nassen Fahrbahnoberflächen eintreten. Bemerkenswert ist, dass über die Hälfte dieser Unfälle nach Beendigung des Niederschlagsereignisses geschehen. Dies deckt sich mit Erfahrungen in Deutschland, wonach die Verkehrsteilnehmer das Fahrverhalten stärker den vorherrschenden Umfeldbedingungen anpassen, wenn diese über mehrere Sinne wahrgenommen werden [LEONHARDT ET AL., 2005].

Gemäß Angaben des Projekts „Slippery Road Information System“ [SRIS, 2009] ist in Skandinavien das Risiko eines Unfalls auf schneebedeckten Straßen neun Mal höher als auf trockenen Fahrbahnoberflächen. Bei eisglatten Fahrbahnoberflächen kann in Schweden die Unfallrate [Anzahl der Unfälle je 1 Millionen Fahrzeug-Kilometer] um bis zu 16-fach größer sein als bei trockenen Fahrbahnzuständen [WALLMANN, 2006]. Als mögliche Ursache für erhöhte Unfallzahlen werden in SRIS [2009] skandinavische Studien genannt, wonach lediglich 14 % der Fahrer reduzierte Fahrbahngriffigkeiten korrekt einschätzen.

Demnach ist es erforderlich die Verkehrsteilnehmer vor kritischen Fahrbahnzuständen zu warnen, wofür die Erfassung von Umfeldgrößen erforderlich ist. Relevante Größen werden im Folgenden beschrieben.

2.3 Witterungsbedingter Fahrbahnzustand und weitere Umfeldgrößen

2.3.1 Fahrbahngrößen

Zustand der Fahrbahnoberfläche und Wasserfilmdicke

Der Zustand der Fahrbahnoberfläche definiert die qualitative Bedeckung der Fahrbahnoberfläche. Für die Verkehrsbeeinflussung lassen sich mehrere Klassen unterscheiden [BAST, 2002]:

- Trocken
- Feucht beziehungsweise nass, schnee- oder eisbedeckt
- Benetzt mit Wasser oder wässriger Lösung
- Bedeckt mit Schnee/Schneematsch, Gemisch von flüssigem und gefrorenem Wasser beziehungsweise wässriger Lösung
- Bedeckt mit gefrorenem Wasser oder wässriger Lösung in festem Zustand
- Bedeckt mit Eis (festes, gefrorenes Wasser beziehungsweise gefrorene wässrige Lösung in festem Zustand)
- Bedeckt mit Raureif, aus der Luft sublimierte Eiskristalle ohne deckende Eisfläche

Für die Einsatzplanung im Straßenwinterdienst sind die Fahrbahnzustände gemäß DIN EN15518 folgendermaßen quantifiziert [HAUSMANN, 2007]:

- Trocken: Keine Flüssigkeit auf der Fahrbahnoberfläche
- Feucht: Flüssigkeitsfilm $>0,01$ mm auf der Fahrbahnoberfläche
- Nass: Flüssigkeitsfilm $>0,2$ mm auf der Fahrbahnoberfläche
- Extrem nass: Wasserfilm >2 mm auf der Fahrbahnoberfläche
- Glätte auf der Fahrbahn, auch mit teilweiser Taustofflösung

Nässe

Als quantitatives Maß für die Bedeckung der Fahrbahnoberfläche wird die Wasserfilmdicke [mm] angegeben. Sie beschreibt die Fahrbahnbenetzung mit Wasser oder wässriger Lösung (Salzlösung), welche sich am Messort beziehungsweise auf der in der Fahrbahn eingelassenen Sonde befindet [BAST, Entwurf 2007].

Der Prozess der Befeuchtung und Abtrocknung einer Fahrbahn wird von HENNES [1985] folgendermaßen beschrieben:

Zu Beginn eines Niederschlagsereignisses erfolgt bei einer ursprünglich trockenen Fahrbahn zunächst die Benetzung der Oberfläche. Nach dem Abdecken der Benetzungswassermenge werden die Rautiefen der Oberfläche gefüllt. Aufgrund der Grenz- und Oberflächenspannungen sowie der Kapillarwirkung erfolgt in diesem Anfangsstadium noch kein Abfluss. Sobald

die Niederschlagsmenge diese Kräfte überkompensiert, fließt das Niederschlagswasser von der Fahrbahnoberfläche ab. Hierfür muss die Differenz zwischen Regen- und Verdunstungsmenge größer als die für die Benetzung und partielle Füllung der Rautiefen benötigte Wassermenge sein.

Die Abtrocknung der Fahrbahnoberfläche erfolgt durch Verdunstung und Aufwirbelung durch überfahrende Fahrzeugreifen. Die Verdunstung wird von der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit beeinflusst. Korrelationsuntersuchungen von EULER ET AL. [1988] zeigten, dass die Temperatur der Fahrbahnoberfläche den größten Einfluss auf das Abtrocknungsverhalten ausübt. Die Feuchtemenge auf der Fahrbahn hängt gemäß EULER ET AL. [1988] im Wesentlichen von den folgenden Einflussgrößen ab:

- Den Umfeldbedingungen: Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wind, Strahlungsbilanz
- Den Entwässerungseigenschaften der Straße: Abflussrauheit, Rückhalte- und Speichervermögen, Neigung, Fließlänge
- Dem Verkehr: Verkehrsstärke, Geschwindigkeiten, Verkehrszusammensetzung
- Den Eigenschaften des Fahrbahnaufbaus: Wärmespeichervermögen, Strahlungseigenschaften

Nässe kann zusätzlich zu Griffigkeitsreduzierungen auch Einschränkungen der Sichtweiten hervorrufen, da an Oberflächen mit geschlossenen Wasserfilmen die Reflexionen spiegeln. Zudem kann von vorausfahrenden Fahrzeugen als Sprühfahnen aufgewirbelte Nässe die Sicht der nachfolgenden Verkehrsteilnehmer reduzieren.

Glätte

Schnee und/oder Eis auf der Fahrbahnoberfläche werden als Winterglätte bezeichnet. Damit sich in der Atmosphäre Eis- oder Schneekristalle bilden, müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein: Die Lufttemperatur sollte 0 °C unterschreiten und es sollten geeignete Luftfeuchtigkeitsverhältnisse und Kondensations- beziehungsweise Eisbildungskerne vorhanden sein. Sind außer der Existenz von Kondensations- oder Eisbildungskernen alle Bedingungen erfüllt, so kann unterkühlter Regen bei Auftreffen auf die Oberfläche als Eisregen sofort gefrieren [DURTH ET AL., 2004].

Aufgrund ihrer Entstehungsart lassen sich die folgenden Glättearten unterscheiden [DURTH ET AL., 2004]:

- Eisglätte resultiert aus dem Überfrieren vorhandener Nässe (zum Beispiel aufgrund von Niederschlag oder Schmelzwasser) auf der Fahrbahn bei fallenden Temperaturen.
- Glatteis entsteht bei gefrorenem Niederschlag (Eisregen mit einer Temperatur der Tropfen unter 0 °C) auf der Fahrbahn oder bei Regen auf einer unterkühlten Fahrbahn (homogene Eisschicht).
- Reifglätte bildet sich durch das Ablagern und Gefrieren von Eiskristallen aus der Luft auf der Fahrbahn bei hoher Luftfeuchtigkeit und sinkenden Temperaturen.

- Schneeglätte wird durch das Festfahren beziehungsweise Gefrieren von Schnee oder Schneematsch auf der Fahrbahn bewirkt.

Die Einflussfaktoren auf eine Glätteentstehung samt Auswirkungen und qualitativer Einschätzung der Stärke des Einflusses sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Einflussfaktoren	Auswirkungen, Art	Einfluss auf Glättebildung
Niederschlag	Schnee, unterkühlter Regen, Reif	Sehr stark
Temperatur	Fahrbahn, Luft, 0 °C-Grenze	Sehr stark
Fahrbahnoberfläche	Material, Textur, Profil	Stark
Luftfeuchtigkeit	Sublimation, Reifglätte	Stark
Strahlung	Energiezufuhr durch Sonne, Energieabgabe in der Nacht	Stark
Verkehr	Festgefahrener Schnee, Reibungswärme	Stark
Lage der Straße	Kleinklima, Windverhältnisse	Schwach
Windverhältnisse	Kaltluftströme, Kleinklima	Schwach

Tab. 2.3 Einflussfaktoren bei der Glättebildung [DURTH ET AL., 2004]

Temperaturen und Niederschlag üben demnach den größten Einfluss auf die Entstehung einer Fahrbahnglätte aus. BADEL ET AL. [2006] haben herausgefunden, dass bereits Wasserfilmdicken ab 0,01 mm zu Glätte mit Griffigkeitsverlusten führen können.

Die Verkehrssicherheit wird vor allem durch lokal begrenzte Glättebildungen beeinträchtigt [FGSV, 1997]. Vereisen kleinräumige Streckensegmente schneller als das angrenzende Straßennetz, kann dies bewirken, dass hier verstärkt glättebedingte Unfälle auftreten, da die Glättegefahr von den Kraftfahrern häufig nicht erkannt wird. Solche lokal begrenzte Glätte entsteht auf Streckenabschnitten, die im Vergleich zu den angrenzenden Straßensegmenten häufiger Feuchtigkeit aufweisen und auf denen der Gefrierpunkt früher unterschritten wird. Eine frühere Unterschreitung des Gefrierpunktes kann die folgenden Ursachen haben [FGSV, 1997]:

- Reduzierte Ausgangstemperaturen aufgrund von Schatten, geringerer Wärmezufuhr von unten, Wärmereflexions- und -absorptionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche oder
- schnellere Abkühlung als Folge von geringerer Wärmezufuhr von unten, besonderer Exposition oder Verdunstungskälte bei feuchter Fahrbahnoberfläche.

Erfassung von Fahrbahnzustand und Wasserfilmdicke

Zur Erfassung des Zustands der Fahrbahnoberfläche werden im Verkehrswesen unterschiedliche Messprinzipien eingesetzt. Eine Unterscheidung von „trocken“ und „nicht tro-

cken“ wird in der Regel über Messwerte der Leitfähigkeit oder über Kontaktmessungen getroffen [HAUSMANN, 2007].

Die Höhe der Wasserfilmdicke auf in die Fahrbahn eingebrachten Sensoren wird über die je nach Höhe der Wasserschicht charakteristische Reflexion von Radar- oder Lichtwellenstrahlung ermittelt [HAUSMANN, 2007].

Die Fahrbahnsensoren sind jeweils direkt in der Fahrbahn, an als kritisch und repräsentativ geltenden Stellen installiert. Die Platzierung der Sensoren erfolgt entweder in der Reifenspur oder in der Fahrstreifenmitte. In FGSV [2009] wird die Mitte des linken Fahrstreifens als Einbauort empfohlen.

Des Weiteren kann der Fahrbahnzustand sowie die Wasserfilmdicke mittels berührungsloser Messverfahren erfasst werden. Mögliche Befestigungsorte sind für die Sensorik beispielsweise auf Schilderbrücken über der Fahrbahnoberfläche oder an Pfosten am Fahrbahnrand, um den Zustand der Fahrbahnoberfläche mittels Sender-Empfänger-Prinzip quer über die Straße zu ermitteln. Über eine Interpretation der Reflexion der ausgesandten Strahlung kann auf die Wasserfilmdicke und den Zustand der Fahrbahnoberfläche geschlossen werden. Als Erfassungstechnologien werden Infrarot, Mikrowellenradar oder Laser eingesetzt [HAUSMANN, 2007].

Gefriertemperatur

Der gebräuchlichste Indikator für die Präsenz beziehungsweise Konzentration von Taustoffen auf der Fahrbahn ist die Gefriertemperatur. Die Messgröße beschreibt diejenige Temperatur, bei der eine auf der Oberfläche einer in die Fahrbahn eingebrachten Sonde vorhandene wässrige Taustofflösung gefriert und in einen festen Aggregatzustand übergeht [BAST, 2002]. Durch den Einsatz von Taustoffen kann die Gefriertemperatur abgesenkt und somit die Glättebildung bis zu einer bestimmten Temperatur verhindert werden.

Taustofflösungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit der Konzentration ihre Leitfähigkeit ändern. Über die Erfassung von Leitfähigkeitsveränderungen der Fahrbahnoberfläche lässt sich auf die Existenz von Taustoffen rückschließen. Für eine Auswertung der Konzentration muss die eingesetzte Taustoffart bekannt sein [HAUSMANN, 2007].

Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung von Gefriertemperaturen sind die sogenannten aktiven Fahrbahnsensoren, die eine auf der Sensoroberfläche vorhandene Lösung abkühlen bis sie zu gefrieren beginnt. Dieser Wechsel des Aggregatzustands von „flüssig“ zu „fest“ wird von den Sensoren taustoffunabhängig erfasst [HAUSMANN, 2007].

Eine Voraussetzung für die Ermittlung der Gefriertemperatur ist ein Wasserfilm von mindestens circa 0,05 mm Höhe [BAST, 2002]. Anhand eines Abgleichs der ermittelten Gefriertemperatur mit der Fahrbahnoberflächentemperatur kann auf eine Glättegefahr geschlossen werden, wenn die Fahrbahntemperaturen kleiner als die Gefriertemperaturen sind. Gemäß HAUSMANN [2007] ist das Messergebnis aufgrund der punktuellen Messungen nur wenig repräsentativ, was bei einer Nutzung dieser Messgröße entsprechend zu berücksichtigen ist.

Temperatur der Fahrbahnoberfläche

Die Temperatur der Fahrbahnoberfläche wird maßgeblich von der Bestrahlung beziehungsweise Beschattung beeinflusst. Die durch die klimatischen Umgebungsbedingungen und die materialspezifischen und thermodynamischen Eigenschaften beeinflusste Thermodynamik von Fahrbahnoberflächen wird von KAYSER [2007] beschrieben. Gemäß Energieerhaltungssatz sind sämtliche der Fahrbahnoberfläche zu- und abgeführten Energien (Wärmeströme) zu berücksichtigen. Wie in Bild 2.3 ersichtlich ist, kann die Übertragung mittels Wärmeleitung, -strömung und -strahlung erfolgen, die sich im Hinblick auf das Transportmedium unterscheiden.

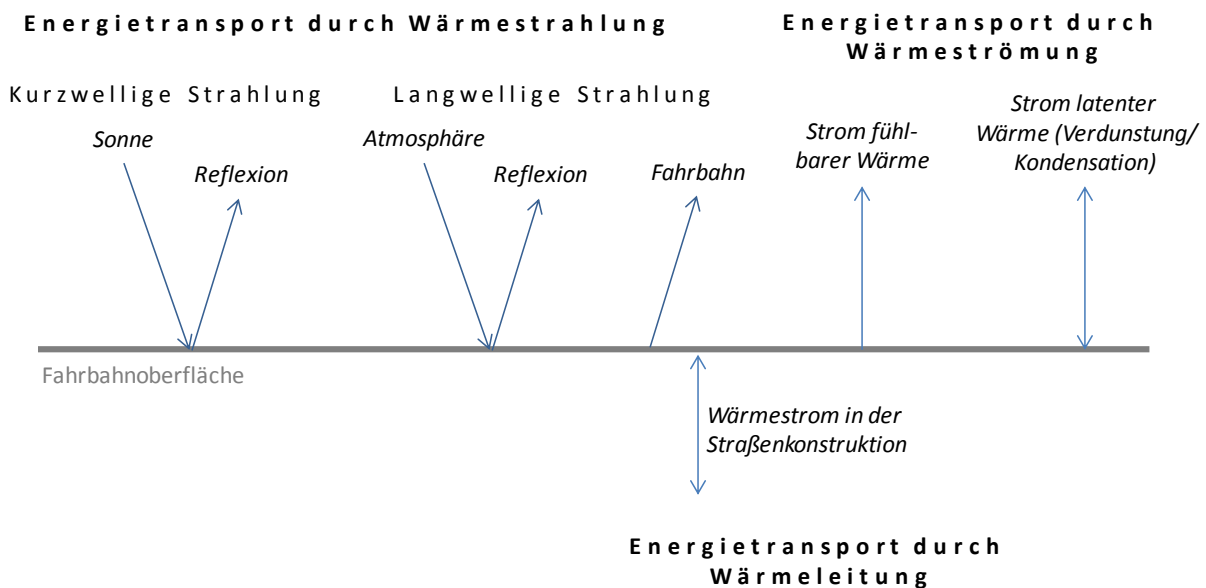


Bild 2.3 Grafische Darstellung der Wärmebilanzgleichung, nach KAYSER [2007]

Die Globalstrahlung und die langwellige Ausstrahlung, also die größten Wärmeströme von beziehungsweise zu der Fahrbahn und somit die Ausprägung der Temperatur der Fahrbahnoberfläche werden durch die Bewölkung stark beeinflusst. Bereits kleine Änderungen der Bewölkung können eine relativ große Änderung der Fahrbahnoberflächentemperatur bewirken. Dieser Einfluss besteht sowohl tagsüber als auch nachts. Zur Tageszeit bewirkt eine starke Bewölkung einen geringeren thermischen Unterschied zwischen beschatteten und direkt bestrahlten Bereichen. Bei Nacht reflektieren Wolken die ausgesendete langwellige Strahlung, was die Entstehung von kalter Luft verhindert und somit zu einer verringerten Abkühlung der Fahrbahnoberfläche führt. Vor allem bei klaren, unbewölkten Bedingungen mit geringen Windstärken besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Änderung der Fahrbahnoberflächentemperatur und der Änderung der Lufttemperatur. Die Verringerung der Fahrbahnoberflächentemperatur fällt aufgrund der thermischen Eigenschaften des Straßenaufbaus geringer aus als bei der Lufttemperatur. Neben den Wetterbedingungen und der Strahlung haben die Materialien des Straßenaufbaus, sowie Advektion (horizontale Bewegung) und Stagnation kalter Luftmassen Einfluss auf die Fahrbahnoberflächentemperatur [BOGREN ET AL., 2001].

Die Temperaturen der Fahrbahnoberfläche lassen sich beispielsweise stationär mit Bodensonden bestimmen. Es existieren unterschiedliche Messprinzipien, die anhand der Änderungen von Strom, Spannung oder Widerstand die Temperaturen ermitteln. Des Weiteren kann die Fahrbahnoberflächentemperatur durch den Einsatz von Infrarotmessverfahren auch berührungslos erfasst werden, indem Strahlungen im Infrarotbereich, die je nach Temperatur charakteristisch sind, interpretiert werden [HAUSMANN, 2007]. Dieses Messverfahren lässt sich sowohl stationär als auch mobil einsetzen. Seit den 1990er Jahren werden an Winterdienstfahrzeugen Infrarotsensoren betrieben, um den Fahrern und den Winterdienstzentralen Informationen zu der Fahrbahnoberflächentemperatur zu übermitteln [ITS INTERNATIONAL, 2009]. Berührungslos erfasste Fahrbahnoberflächentemperaturen können in der Praxis beispielsweise von Straßenwinterdiensten genutzt werden, um eine geeignete Streudichte zu wählen [STRAßEN.NRW, 2009].

Thermal Mapping Verfahren

Beim "Thermal Mapping" (auf Deutsch: Thermal-Kartierung) handelt es sich um eine streckenbezogene Maßnahme zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten [STRAßE UND AUTOBAHN, 2007]. Hierfür werden speziell mit Infrarotkameras ausgerüstete Fahrzeuge eingesetzt, die die emittierte Strahlungsleistung der Fahrbahnoberfläche erfassen und so streckenbezogene Informationen zu den Fahrbahnoberflächentemperaturen ermitteln. Im Rahmen des Thermal Mapping-Verfahrens werden per GPS (Global Positioning System) verortete Temperaturmesswerte in eine Straßenkarte übertragen, so dass befahrene Strecken mit spezifischen Temperaturprofilen versehen werden. Hierfür werden im Sekundentakt über eine Infrarotkamera Messwerte für die Fahrbahnoberflächentemperatur erhoben und per Datenlogger gespeichert. Das Thermal Mapping Verfahren kann für die Planung von beispielsweise Sensorstandorten für den Straßenwinterdienst ein sinnvolles Werkzeug darstellen, eine Online-Erfassung und Nutzung kritischer Fahrbahnzustände kann durch Thermal Mapping jedoch nicht erfolgen.

2.3.2 Atmosphärische Größen

Niederschlag

Niederschlagsart

Gemäß BAST [2007] erfolgt eine Klassifizierung des Niederschlags gemäß Aggregatzustand sowie Menge und Größe der Partikel. Charakteristische Arten des fallenden Niederschlags sind beispielsweise Niesel-/Sprühregen, Regen, Graupel/Hagel und Schnee.

Niederschlagsintensität

Die Niederschlagsintensität entspricht dem Quotient aus Niederschlagsmenge und Zeit [mm/h], sie stellt ein Maß für die Stärke eines Niederschlagsereignisses dar. Die Niederschlagsintensität entspricht der Höhe der Wasserschicht, die sich bei Niederschlag pro Zeiteinheit auf einer ebenen Fläche gebildet hätte [BAST, 2002].

Bei festem Niederschlag ist das Äquivalent der Höhe der entsprechenden Wasserschicht nach dem Schmelzen zu berechnen.

Erfassung von Niederschlag

Es werden meist sogenannte „Present Weather“ Systeme eingesetzt, die aus Art und Geschwindigkeiten der fallenden Niederschlagspartikel unter anderem die Niederschlagsart und die Niederschlagsintensität bestimmen. Hierfür erfolgt eine Abschätzung des Wasserbestands der fallenden Niederschlagspartikel. Kombiniert mit Ergebnissen von Forward-Scatter-Messungen (Vorwärtsstreuung: Durch den Vergleich von empfangenen mit ausgesendeten gepulsten Lichtstrahlen werden Aerosole erkannt) und Messwerten der Lufttemperatur wird auf das aktuell vorherrschende Wetter rückgeschlossen. Die Partikel können zum Beispiel über optische Infrarot-Lichtschranken, optische Sensoren nach dem Vorwärtslichtstreuungsprinzip und Niederschlagsradar detektiert werden.

Neben den genannten stationären Erfassungsmethoden kann zur Informationsgenerierung und Warnung vor Niederschlagsereignissen das Wetterradar eingesetzt werden, das in einem Messnetz den Doppler-Effekt nutzt [DWD, 2004].

Lufttemperatur

Gemäß den „Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen“ (TLS) handelt es sich bei der Lufttemperatur um die Temperatur der Umgebungsluft in der Nähe der Fahrbahnmessstelle, angegeben in Grad Celsius [BAST, 2002].

Bei wolkigen und windigen Bedingungen besteht zwischen Änderungen der Lufttemperatur und der Höhe ein starker Zusammenhang, wobei die lokale Topografie einen vergleichsweise geringen Einfluss ausübt. Es herrscht die generelle Beziehung, dass die Lufttemperatur mit dem Zuwachs der Höhe abnimmt [HUPFER UND KUTTLER, 2006].

Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte [%] entspricht dem prozentualen Verhältnis zwischen der momentanen absoluten Luftfeuchte und der Feuchte, die die Luft unter den gegebenen Lufttemperaturen maximal aufnehmen könnte. Die relative Luftfeuchte steht für den relativen Sättigungsgrad der Luft mit Wasserdampf [GLÄTTE24, 2010].

2.4 Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen

Für Streckenabschnitte im deutschen Bundesfernstraßennetz können mittels Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) die Verkehrssicherheit erhöht und der Verkehrsfluss optimiert werden. Hierfür werden neben Verkehrsdaten auch Umfelddaten erfasst und in den Steuerungslogiken der SBA berücksichtigt. Aktuell werden rund 2.450 Kilometer Richtungsfahrbahn auf Autobahnen mit SBA beeinflusst [BAST, 2011]. Sie passen die zulässige Höchstgeschwindigkeit dynamisch und meist regelbasiert den aktuellen Verkehrs- und Umfeldbedingungen an, die an Messquerschnitten (MQ) erhoben werden. Zudem werden die Ver-

kehrsteilnehmer vor Stau, Nebel, Nässe, Unfall und anderen Gefahren gewarnt. Diese Schaltungen werden mittels dynamischer Wechselverkehrszeichen (WVZ) an den Anzeigequerschnitten (AQ) umgesetzt und abschnittsweise angezeigt. Hierfür gelten die Vorgaben der "Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen" (RWVZ) [BAST, 1997a] und der "Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen" (RWVA) [BAST, 1997b].

Die „Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung“ [FGSV, 2011] beinhalten den aktuellen Stand der Technik der momentan im Einsatz befindlichen Steuerungsverfahren auf Autobahnen sowie eine detaillierte Darstellung des vollständigen Steuerungsablaufs. Es wird eine grundsätzliche Systematik des Steuerungsablaufs vorgeschlagen und angewendet, wobei der Steuerungsvorgang in die folgenden Teilschritte gegliedert wird [FGSV, 2011]:

- Auf der Basis von aktuell gemessenen Verkehrs- und Umfelddaten liefern Verfahren zur Situationsermittlung räumlich-zeitlich verortete Informationen zu verkehrsrelevanten Situationen (zum Beispiel eine bestimmte Nässestufe als Maß des Niederschlags oder den Verkehrszustand „Stau“).
- Um örtlich widerspruchsfreie Aussagen zu den vorherrschenden verkehrsrelevanten Situationen zu erhalten, werden die gegebenenfalls mittels unterschiedlicher Verfahren ermittelten Situationen untereinander abgeglichen. Zusätzlich können an dieser Stelle manuell weitere Situationen ergänzt werden, beispielsweise vor Ort von der Polizei gemeldete Glätteereignisse.
- Als Reaktion auf die ermittelten Situationen werden geeignete Maßnahmen ausgewählt, die in einer sogenannten Maßnahmenbibliothek vorgehalten werden. Eine mögliche Maßnahme stellt beispielsweise die Aktivierung einer Nässewarnung dar.
- Da in der Regel auf Streckenabschnitten mehrere (gegebenenfalls verschiedene) Maßnahmen aktiviert werden, ist ein Abgleich der Maßnahmen nötig. Dabei handelt es sich um eine Prüfung, damit sich im Netz räumlich überlagernde Maßnahmen nicht widersprechen. Das Resultat dieser sogenannten Maßnahmenbewertung sind innerhalb des Straßennetzes koordinierte Maßnahmen.
- Der sich anschließende Teilschritt der Schaltbildermittlung dient der Zuordnung von Schaltbildern zu den Maßnahmen. Hierdurch wird erreicht, dass den Verkehrsteilnehmern entlang der Strecke widerspruchsfreie Schaltbilder angezeigt werden.

Durch die Trennung der Verfahren zur Erkennung von Situationen (zum Beispiel Nässe- oder Stauerkennung) und den Steuerungsmaßnahmen (zum Beispiel Nässe- oder Stauwarnung) wird erreicht, dass verschiedene Verfahrensergebnisse und Maßnahmen miteinander abgeglichen werden können. Zur witterungsabhängigen Verkehrsbeeinflussung wurden die Verfahren „Witterungszustand Nässe nach MARZ“ sowie nach ‚Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen‘ [FGSV, 2010a] „Witterungszustand Nässe und Witterungszustand Nebel“ dokumentiert.

Die Verkehrs- und Umfelddaten werden stationär erfasst und über Streckenstationen (SST) und Unterzentralen (UZ) an eine Verkehrsrechnerzentrale (VRZ) übertragen, wo sie in den Steuerungsalgorithmen der SBA verwendet werden. Diese Übertragung der Daten im Rahmen von SBA sowie die Funktionsebenen der Systemarchitektur für Verkehrsbeeinflussungsanlagen auf Bundesfernstraßen sind in den TLS geregelt [BAST, 2002]. Die Umfelddaten bilden die Funktionsgruppe (FG) 3 in den TLS. Für die Messgrößen sind die Semantik (inhaltliche Bedeutung der Zeichen und Wörter) und die Syntax (Schreib- oder Befehlsvorschrift in Programmiersprachen und Programmen) der Messwerte festgelegt, zudem sind für alle Messgrößen die Wertebereiche und Default-Werte definiert. Um die Verkehrsteilnehmer möglichst schnell vor kritischen Umfeldbedingungen zu warnen, werden die Verkehrs- und Umfelddaten grundsätzlich kontinuierlich im 1-Minutenintervall erfasst, übertragen und verarbeitet [BAST, 2002].

Die zur Umfelddatenerfassung eingesetzten Sensoren weisen in Deutschland bestenfalls eine Distanz von zwei bis vier Kilometer zueinander auf [FGSV, 2010a]. Somit ist es erforderlich, dass in den VRZ die stationär erfassten Messwerte auf Streckenabschnitte extrapoliert werden. Die Aufbereitung und Nutzung der Umfelddaten zur Ermittlung von Schaltungen in den UZ und der VRZ der SBA ist in dem Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen – MARZ [BAST, 1999] geregelt. TLS und MARZ wurden per Rundschreiben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) eingeführt und stellen somit einem verbindlichen Standard für Bundesfernstraßen dar.

Ergänzend wurden für den Betrieb von UZ und VRZ Anforderungen aus fachlicher Sicht der Anwender dargestellt [KNIß ET AL., 2006] und ein Hinweispapier zur „Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen“ [FGSV, 2010a] veröffentlicht. Darin werden unter anderem der aktuelle Kenntnisstand zur Ermittlung der Zustände „Nässe“, „Sichttrübung“ und „Glätte“ sowie SBA-Schaltalgorithmen beschrieben:

- Zur Steuerung des Verkehrs aufgrund von Fahrbahnnässe dient das Modell „Ermittlung von Nässestufen“. Vorgeschlagen wird eine situationsangepasste zulässige Höchstgeschwindigkeit und eine Nässewarnung (Z 114 StVO „Schleudergefahr“). Der Zusatztext „Nässe“ soll gemäß RWVZ [BAST, 1997a] nicht genutzt werden.
- Gemäß des Modells „Ermittlung von Sichtweitenstufen“ erfolgt die Verkehrssteuerung, indem in Abhängigkeit der jeweiligen Sichtweitenreduzierungen verschiedene Zeichen dargestellt werden.
- Auf Basis eines Glättemodells sind Glättewarnungen (Z 113 StVO „Schnee- oder Eisglätte“) ohne Geschwindigkeitswarnung manuell zu schalten.

Für die Optimierung der dynamischen Verkehrsbeeinflussung empfiehlt KLOTZ [2002] eine Verbesserung und Verdichtung der Erfassungstechnologien.

In der Tab. 2.4 sind die in den TLS [BAST, 2002] definierten Umfelddaten mit gebräuchlichen Abkürzungen und den Einsatzbereichen der jeweiligen Messgrößen in SBA dargestellt.

Messgröße	Abkürzung	Zweck, Nutzung in SBA
Bodentemperatur in Tiefe 1 / Tiefe 3	TT1 / TT3	Nutzung bei der Prognose von Fahrbahnglätte (Schaltvorschlag)
Fahrbahnoberflächentemperatur	FBT	Nutzung bei der Ermittlung von Fahrbahnglätte (Schaltvorschlag)
Gefriertemperatur	GT	Nutzung bei der Ermittlung von Fahrbahnglätte (Schaltvorschlag)
Lufttemperatur	LT	Zur Bestimmung der Nachlaufzeit bei Nässeschaltung, als Eingangsgröße für die Empfehlung einer Glätteschaltung
Niederschlagsart	NS	Information und Plausibilisierung, Einschätzung der Glättegefahr
Niederschlagsintensität	NI	Wird über Schwellenwerte direkt in den Logiken für die automatische Steuerung von SBA berücksichtigt
Relative Luftfeuchte	RLF	Zur Bestimmung der Nachlaufzeit bei Nässeschaltungen, zur Plausibilisierung von Sichtweiten- und Niederschlagsmessungen, Glätteschaltungen, Erkennung von Reifglätte
Taupunkttemperatur	TPT	Erkennung von Reifglätte
Wasserfilmdicke	WFD	Wird über Schwellenwerte direkt in den Logiken für die automatische Steuerung von SBA berücksichtigt
Windgeschwindigkeit (Mittel)	WGM	Information, Einschätzung von Schneeverwehungen
Windgeschwindigkeit (Spitze)	WGS	Information, Windwarnanlagen
Windrichtung	WR	Information, Einschätzung von Schneeverwehungen
Zustand der Fahrbahnoberfläche	FBZ	Nutzung bei der Ermittlung von Fahrbahnglätte (Schaltvorschlag)

Tab. 2.4 Messgrößen gemäß TLS [BAST, 2002] und deren Nutzung in SBA, nach DINKEL ET AL. [2007]

2.5 Nutzung von fahrzeuggenerierten Daten in kooperativen Systemen

2.5.1 Diskussion der mobilen Datenerfassung

In Bild 2.4 werden für raum-zeitliche Umfeldbedingungen die stationäre und die mobile Datenerfassung skizzenhaft miteinander verglichen. Die ortsfesten Sensoren A, B, C und D

erfassen je Zeitintervall j stationäre Messwerte, die bestimmte Umfeldbedingungen charakterisieren.

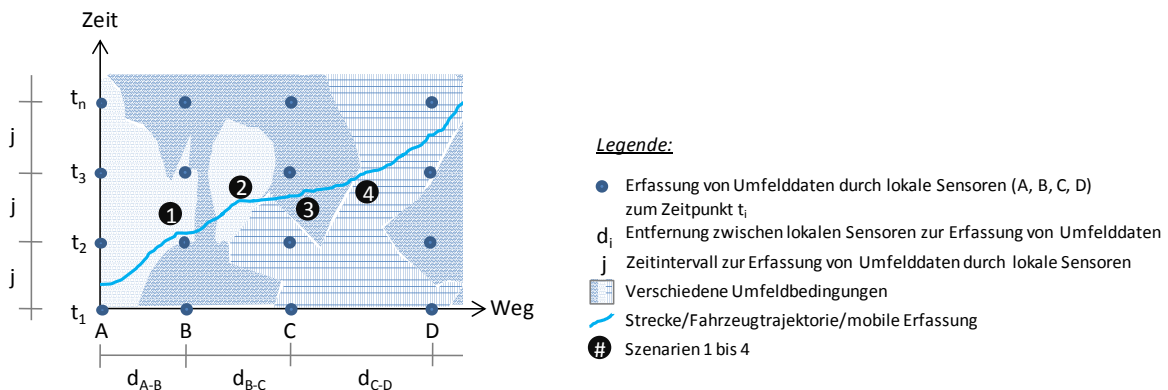


Bild 2.4 Gegenüberstellung stationäre versus mobile Umfelddatenerfassung mittels eines Fahrzeugs

Anhand der obigen Grafik lassen sich vier beispielhafte Szenarien beschreiben und Vorteile sowie Einschränkungen der streckenbezogenen Erfassung darstellen:

- Szenario 1: An der Stelle B ermittelt das Fahrzeug einen Zustandswechsel der Umfeldbedingungen, bevor dies im folgenden Zeitintervall t_3 von Sensor B erkannt wird.
- Szenario 2: Ein Wechsel der Umfeldbedingungen im Streckenabschnitt d_{B-C} (als gepunktetes Raster dargestellt) wird nur mobil erkannt, da die Zustandsänderung nicht im Erfassungsbereich eines Sensors an der Stelle B oder C stattgefunden hat.
- Szenario 3 und 4: Zu den räumlichen Änderungen der Umfeldbedingungen liegen bei der mobilen Erfassung bessere Informationen als bei der stationären Erfassung vor. Es gilt jedoch die Einschränkung, dass die abgebildete Trajektorie eines Fahrzeugs die Umfeldbedingung an einem Punkt im Netz nur zu einem bestimmten (Überfahr-)Zeitpunkt bestimmen kann.

Die dargestellten Szenarien zeigen Vorteile der streckenbezogenen fahrzeuggenerierten Informationen im Hinblick auf die räumliche und zeitliche Erfassung von Umfeldbedingungen entlang des Streckennetzes auf, zudem können die fahrzeuggenerierten Daten bei entsprechender Eignung zur Plausibilisierung der stationären Datenerfassung verwendet werden. Es wird aber auch deutlich, dass im Rahmen einer Zusammenführung der fahrzeuggenerierten Daten mit stationär erhobenen Informationen bei widersprüchlichen Aussagen festgelegt werden muss, welche der Informationsquellen unter welchen Bedingungen als vertrauenswürdiger eingestuft wird.

2.5.2 Fahrzeuggenerierte Daten und CAN-Bus

Moderne Fahrzeuge sind mit einer Vielzahl an Sensoren ausgerüstet, die die Fahrzeugumgebung sowie geringe Änderungen in der Fahrzeugführung erfassen und beispielsweise für verschiedene Fahrerassistenzsysteme (FAS) nutzen. Dabei handelt es sich um Messungen (zum Beispiel Lufttemperatur) oder um Statusinformationen (zum Beispiel Wischeraktivität).

Als Überbegriff für diese erweiterten fahrzeuggenerierten Informationen wird gemäß HUBER [2001] „Extended Floating Car Data (xFCD)“ verwendet. Im Unterschied zu den Floating Car Data (FCD), die aus Geo-Koordinaten und den zugehörigen Zeitstempeln bestehen, aus denen sich Geschwindigkeiten und gefahrene Routen ermitteln lassen, sind unter xFCD zusätzliche fahrzeuggenerierte Informationen zu verstehen. In modernen Kraftfahrzeugen ist intern eine Vielzahl an Informationen verfügbar, die Rückschlüsse zu den Umfeldbedingungen erlauben. Die Informationen aus fahrzeugseitigen Systemen liegen in dem sogenannten CAN-Bus (Controller Area Network–Binary unit system) vor. Dabei handelt es sich um ein Schnittstellensystem, das alle fahrzeuginternen Systeme zum Datenaustausch nutzen [BORGEEST, 2008]. Vorliegende Informationen sind beispielsweise:

- Geschwindigkeiten

Geschwindigkeiten stehen für das Fahrzeug, sowie über Drehzahlsensoren für die einzelnen Räder zur Verfügung.

- Antiblockiersystem (ABS)

Droht beim Bremsen ein Rad zu blockieren, greift binnen Sekundenbruchteilen das ABS ein, um an diesem Rad den Bremsdruck zu reduzieren. Der überhöhte Bremsschlupf wird über einen Vergleich von Fahrzeug- und Radgeschwindigkeiten bestimmt [BOSCH, 2008].

- Antriebsschlupfregelung (ASR)

Droht beim Gasgeben ein Rad durchzudrehen, wird der Bremsdruck an diesem Rad erhöht und so die Stabilität des Fahrzeugs verbessert. Der überhöhte Antriebsschlupf wird über einen Abgleich von Fahrzeug- und Radgeschwindigkeiten erfasst [BOSCH, 2008].

- Electronic Stability Control (ESC)

Weichen die vom Fahrer gewünschte und die tatsächliche Fahrtrichtung voneinander ab, wird durch ein gezieltes Abbremsen einzelner Räder (situationsabhängig kurveninneres oder kurvenäußeres Vorderrad) das Fahrzeug stabilisiert. Für das ESC-System werden neben den Drehzahlsensoren zur Ermittlung der Radgeschwindigkeiten ein Lenkwinkelsensor zur Erfassung des Lenkwunsches des Fahrers und ein Drehratensensor zur Bestimmung der Drehung des Fahrzeugs um seine Hochachse eingesetzt [BOSCH, 2008].

- Lufttemperatur

An Fahrzeugen wird die Lufttemperatur an verschiedenen Stellen erfasst, zum Beispiel hinter der Frontstoßstange oder im Kühlergrill vor dem Motorraum [PETTY UND MAHONEY, 2007].

- Nässesensor

Mittels Nässesensoren wird über Infrarot-Messstrecken Feuchtigkeit auf der Außenseite der Fahrzeugwindschutzscheibe detektiert. Diese Größe wird zur automatischen Steuerung der Wischvorgänge verwendet [HELLA, 2009].

- Wischerinformation

Auf dem CAN-Bus liegen Informationen zum Status des Scheibenwischers vor. Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass die Aktivierung des Scheibenwischers manuell vom Fahrer oder durch einen Nässe-Sensor automatisch geregelt erfolgen kann.

In Fahrzeugen sind mehrere voneinander unabhängige CAN-Busse verbaut. Die angeschlossenen Steuergeräte weisen abhängig von den zu übertragenden Informationen unterschiedliche Wiederholraten auf, so dass zwischen Highspeed- und Lowspeed-CAN-Bussen differenziert wird. Beispielsweise sind im Motor-CAN-Bus aus Gründen der Sicherheitsanforderungen höhere Datenübertragungsraten zum Beispiel für Signale des ABS als für den Innenraum-CAN-Bus (zum Beispiel Innenraumtemperatur) realisiert [BORGEEEST, 2008]. Der Zugriff der Steuergeräte auf den CAN-Bus erfolgt gleichberechtigt gemäß „Multi-Master-Prinzip“. Dies bedeutet, dass alle angebotenen Komponenten Informationen auf dem Bus zur Verfügung stellen, sowie auf erforderliche Informationen zugreifen können. Hierfür wird eine objektorientierte Adressierung gewählt, bei der die bereitgestellte Information einen sogenannten „Identifizier“ als Quelladresse enthält. Nachrichten innerhalb des CAN-Bus werden in genormten Telegrammrahmen, den so genannten Frames versendet. In den Datentelegrammen sind definierte Positionen für die Identifizier beziehungsweise Prüfbedingungen und die jeweiligen Daten festgelegt. Das Datenkennfeld der CAN-Nachrichten besteht je aus maximal 8 Bytes, wovon jedes Byte im Hexadezimalsystem angegeben wird [BORGEEEST, 2008].

2.5.3 Kooperative Systeme

Aktuelle Ansätze, insbesondere um durch Intelligente Verkehrssysteme die Verkehrssicherheit zu erhöhen, stellen die sogenannten kooperativen Systeme dar. Diese sind durch einen Austausch von Informationen gekennzeichnet und werden gemäß ITWISSEN [2012] folgendermaßen klassifiziert:

- Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (C2C: Car-to-Car-Communication)
Direkter Austausch von Warnungen und Informationen zwischen Fahrzeugen.
- Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation (C2I: Car-to-Infrastructure-Communication)
Datenübertragung zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (Verkehrszentralen/straßenseitige Kommunikationseinrichtungen) gegebenenfalls mit bi-direktionaler Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur, sowie durchgängige unidirektionale Ausstrahlung von Informationen mittels Rundfunk.

Den Überbegriff für diese beiden drahtlosen Kommunikationsansätze bezeichnet man als Car-to-X (C2X)–Kommunikation. Für die Integration von fahrzeuggenerierten Daten in SBA existieren derzeit die Ansätze bakengestützte C2I-Kommunikation sowie die mobilfunkgestützte C2I-Kommunikation (siehe Bild 2.5). Beide Ansätze erfordern eine Erweiterung der herkömmlichen SBA um Komponenten zur C2I-Kommunikation. Bei der bakengestützten C2I-Kommunikation sind SST zum Empfang von erweiterten fahrzeuggenerierten Daten als Baken (sogenannte Roadside-Units, RSU – alternativ als ITS Roadside Units (IRS) bezeichnet) auszubilden. Die mobilfunkgestützte C2I-Kommunikation erfordert Maßnahmen, um xFCD in einer Verkehrsrechner- oder Unterzentrale zu empfangen und zu interpretieren.

Beide Varianten setzen in den Fahrzeugen sogenannte On-Board-Units (OBU), neuerdings als IVS – ITS Vehicle Stations bezeichnet, zum Aufbereiten und Versenden von Daten voraus.

Variante 1: Bakengestützte C2I-Kommunikation

Variante 2: Mobilfunkgestützte C2I-Kommunikation

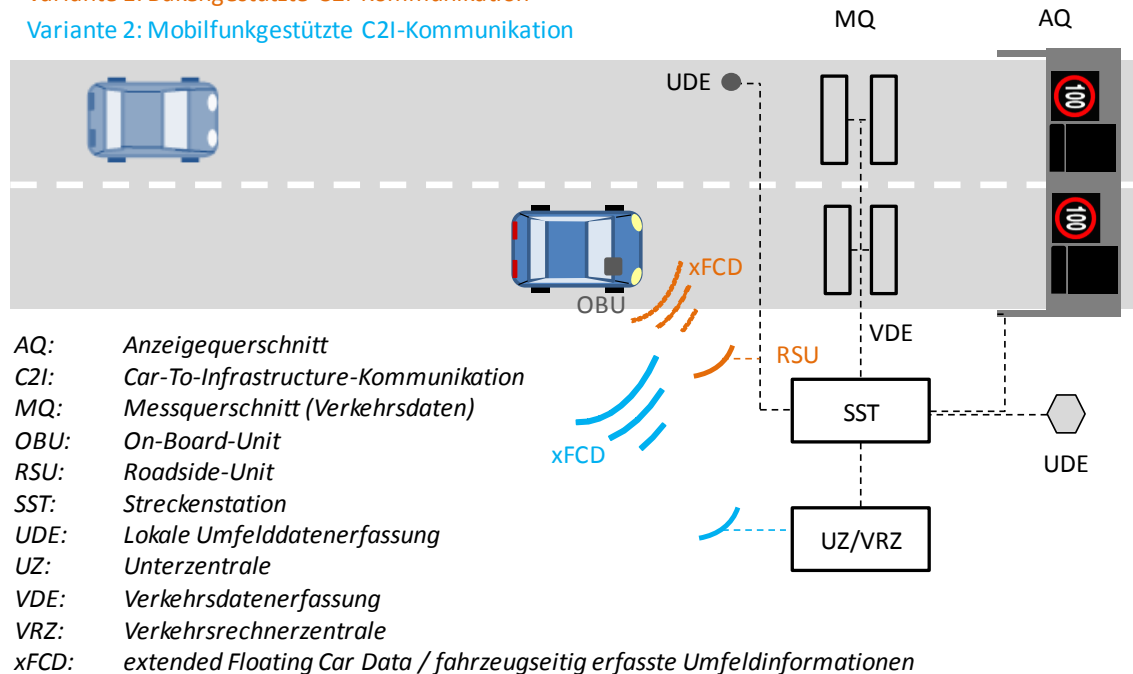


Bild 2.5 Varianten der C2I-Kommunikation zur Übertragung von xFCD auf Basis der SBA-Systemarchitektur

2.5.4 Projekte und Anwendungen

Nachfolgend werden exemplarisch einige Projekte und Anwendungen beschrieben, die fahzeuggenerierte Informationen im Kontext der Umfelddatenerfassung und Verkehrsbeeinflussung nutzen. Die öffentlich zugänglichen Quellen geben meist keine Auskünfte zu der Qualität der Erfassung sowie keine detaillierten Informationen zu Modellen zur Datenverarbeitung und -interpretation.

In Finnland werden im Rahmen des Floating Car Road Weather Monitoring [MYLLYLÄ, 2003] seit 2002 Fernreisebusse zur Informationsgewinnung auf Autobahnen genutzt. Dabei werden über ein fünftes mitlaufendes Rad die Griffigkeit, sowie die Luftfeuchtigkeit, die Fahrbahnoberflächentemperatur, per GPS die Koordinaten und Fotos vom aktuellen Verkehrsgeschehen erfasst. Diese Informationen werden per GSM (Global System for Mobile communications) zu der Straßenwetter-Zentrale der finnischen Straßenverkehrsbehörde Finnra (Finnish Road Administration) übertragen.

Ziel des abgeschlossenen deutschen INVENT (Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik)-Teilprojekts „Netzausgleich Individualverkehr“ NIV war eine Verbesserung der individuellen Information von Pkw-Fahrern und die strategische Lenkung von Verkehrsströmen. Es wurden neue Zielführungssysteme entwickelt und getestet, die neben stationär erfassten Umfeld- und Verkehrsdaten zusätzlich xFCD als Eingangsdaten nutzen. Für die fahrzeug-

generierten Daten wurden Datenverarbeitungsprozesse im Fahrzeug ausgeführt, um hieraus die vorherrschenden Verkehrs- und Umfeldbedingungen abzuleiten. Die relevanten Daten wurden über GSM an einen xFCD-Datenserver übertragen. Als xFCD wurden insbesondere Informationen eines Nässesensors und der Wischerstatus verwendet [INVENT, 2005]. Details sind nicht öffentlich zugänglich.

Ein Konzept zur Fusion stationärer Daten und Informationen von fahrzeugseitigen Sensoren wurde von BUSCH UND WEINRICH [2005] im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens REACT (Realising Enhanced Safety And Efficiency In European Road Transport) erstellt. Es wurden spezielle Systeme zur Erfassung der Griffbarkeit und der Sichtweite aus Videoaufzeichnungen in Fahrzeugen eingesetzt. Die folgenden fahrzeuggenerierten Informationen wurden zur Bestimmung der vorherrschenden Umfeldbedingungen genutzt: Fahrbahngriffigkeiten und der Zustand der Fahrbahnoberfläche als Ausgangsgrößen zusätzlicher Sensoren, der Status der Fahrzeugbeleuchtung und des Wischers sowie Messwerte der Lufttemperatur. Die Zustände wurden für Streckenabschnitte von 1 bis 2 Kilometern Länge ermittelt. In dem Nachfolgeprojekt COM2REACT (Cooperative Communication System To Realise Enhanced Safety And Efficiency in European Road Transport) wurde auf die in REACT entwickelten Technologien und Modelle aufgebaut [COM2REACT, 2008]. Durch die Bündelung mehrerer Fahrzeuge zu einer Gruppe („virtuelle Unterzentrale“), konnten durch C2C schnelle und zielgerichtete Störungsreaktionen realisiert werden. Unabhängig von stationär erfassten Messwerten können für Streckensegmente Regen und Schneefall, sowie mittels spezieller Sensorik Nebel und Glätteis ermittelt und übertragen werden [FIEDLER, 2007].

Bei WILLWARN (Wireless Local Danger Warning) handelt es sich um ein beendetes Teilprojekt des europäischen Projektes PReVENT (Preventive and Active Safety Applications), das zum Ziel hat, den Fahrern eine verbesserte on-board-Information und -Warnung zur Verfügung zu stellen. Hierfür sollen mittels speziell ausgerüsteten Fahrzeugen unter anderem verminderte Griffigkeiten erkannt werden [WILLWARN, 2007]. Als Eingangsgrößen dienen Fahrzeuginformationen zu Wischer, Temperaturen, Geschwindigkeiten und Licht. Warnmeldungen sind gemäß den TPEG (Transport Protocol Experts Group)-Warnungen aufgebaut und können so zu straßenseitiger Infrastruktur übertragen werden. Das entwickelte System liefert zum Zeitpunkt des Eingreifens von FAS eine Gefahrenmeldung. Hierfür werden über die vier Räder Griffigkeiten erfasst und gemessene Quer- und Längsbeschleunigungen übertragen. Zudem wird auch ohne Eingreifen dieser Stabilisationssysteme die aktuelle Griffbarkeit ermittelt und klassifiziert. Neben den oben genannten Daten sind beispielsweise der Wischerstatus, die Lufttemperatur und die Geschwindigkeit relevant, so dass Regen, Frost/Schnee, Eis und Aquaplaning erkannt werden können. Ist eine Zuordnung zu einer Ursache nicht eindeutig möglich, wird als Meldung „Griffbarkeit nicht bestimmbar“ gesendet. Es wurde zudem ein zusätzlicher sogenannter Nässesensor verwendet, der den Fahrzeugstatus auf der Basis von Lenkwinkel, Radgeschwindigkeiten, Gierrate, Quer- und Längsbeschleunigung ermittelt. Diese Signale sind beispielsweise in Fahrzeugen mit Antiblockiersystem vorhanden. Von Interesse sind Radkräfte und Radschlupf in Längs- und Querrichtung. Es wurden Algorithmen zur Erkennung von starkem Regen entwickelt. Genauere Informationen zu den WILLWARN-Modellen sind nicht öffentlich verfügbar.

In dem europäischen Forschungsvorhaben FRICTION [FRICTION, 2009] wurde ein on-board System zur Abschätzung der Griffigkeit entwickelt. Diese Information soll primär in fahrzeugautonomen Informations- und Assistenzsystemen genutzt werden, sie ist aber auch in kooperativen Systemen nutzbar. Im Rahmen des Projektes werden keine neuen Sensoren entwickelt sondern bestehende Systeme neuartig eingesetzt. Um den Fahrbahnzustand zu ermitteln, werden Daten von Fahrzeugsensoren, zum Beispiel zur Erfassung von Einzelradgeschwindigkeiten, Beschleunigungen, Lenkinformationen sowie speziellen Sensorsystemen (Video, Radar, Laser) miteinander verknüpft. Hierfür werden zudem spezielle Reifensensoren eingesetzt, um die an den Reifen auftretenden Kräfte zu erfassen. Das Gesamtsystem wurde in Praxistests erfolgreich validiert.

Road Friction Indicator ist ein Teil einer Softwarelösung, die von der schwedischen Firma Nira Dynamics AB angeboten wird und autonom in Fahrzeugen betrieben werden kann. Unter Nutzung von Fahrzeuginformationen aus dem ABS-System werden die Fahrer bei der Befahrung von Streckenabschnitten mit reduzierten Griffigkeiten mittels eines Displays gewarnt. Bei diesem fahrzeugautonomen System werden keine zusätzlichen Sensoren im Fahrzeug benötigt und es findet kein Datenaustausch mit stationären Sensoren oder anderen externen Informationsquellen statt [NIRA DYNAMICS, 2009].

Das US-amerikanische Projekt IntelliDrive [INTELLIDRIVE, 2009] ist aus einer Neuausrichtung und Umbenennung der Forschungsinitiative "Vehicle Infrastructure Integration" (VII) entstanden. PETTY UND MAHONEY [2007] untersuchten im Rahmen einer Machbarkeitsstudie die Eignung von derzeit sowie zukünftig verfügbaren xFCD zur Verwendung in kooperativen Systemen, um beispielsweise Fahrbahnzustände besser zu ermitteln. Hierfür wurden im Projekt VII die folgenden Anforderungen formuliert:

Da auf dem CAN-Bus von Fahrzeugen sehr große Datenmengen verfügbar sind, sollte in den zu entwickelnden Anwendungen die Datenverarbeitung und -interpretation möglichst effizient erfolgen. Für xFCD sind Plausibilitätsprüfungen zu entwickeln. Als möglicher Lösungsansatz wird vorgeschlagen, die Umfeldinformationen im Fahrzeug vorab zu bearbeiten („Wetterdaten-Wandler“), bevor sie als veredelte Informationen zu den Datenempfängern übertragen werden. Die Rohdaten sollen für weitere Anwendungen zur Verfügung stehen. Der Wetterdaten-Wandler könnte drei Aufgaben erfüllen: Filtern der Informationen, Qualitätskontrolle und Verarbeitung der fahrzeuggenerierten Daten. Unter anderem wurden die folgenden Empfehlungen gegeben:

- Bei der Interpretation und Nutzung fahrzeuggenerierter Daten in Wettermodellen sollte das Fachwissen von Meteorologen einfließen.
- Die wetterrelevanten Fahrzeuginformationen sollten weiter untersucht werden.
- Fahrzeuggenerierte Daten sollten nicht als alleinige Informationsquelle verwendet werden.
- Es sollten zunächst grundlegende Applikationen mit leicht verfügbaren und verständlichen Basisdaten entwickelt werden.

Für die Übertragung der Daten in kooperativen Systemen wird Dedicated Short Range Communication (DSRC) empfohlen. Genauere Informationen, welche Wetterinformationen im Rahmen von IntelliDrive generiert werden, liegen nicht vor.

Im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens TRACKSS (Technologies for Road Advanced Cooperative Knowledge Sharing Sensors) wurden in der Projektlaufzeit 2006 bis 2008 unter anderem fahrzeugseitige Sensoren zur Eisdetektion entwickelt. Zur Nutzung dieser Sensoren in einem kooperativen System wurden Verfahren zur Datenfusion sowie ein Entscheidungsunterstützungssystem erstellt und in verschiedenen Szenarien getestet. Die Informationen des fahrzeugseitigen Lasersensors zur Eisdetektion wurden mit den Daten stationärer Sensoren zur Fahrbahnzustandserfassung fusioniert [TRACKSS, 2009].

Das Ziel des schwedischen Projektes SRIS (Slippery Road Information System) ist die Bereitstellung aktueller Informationen zu reduzierten Fahrbahngriffigkeiten, die auch aus xFCD gewonnen werden. Hierfür wurde ein Konzept entwickelt, in dem neben stationär erfassten Umfelddaten Informationen des Antiblockiersystems und der elektrischen Stabilitätskontrolle sowie Wischerinformationen und Lufttemperaturen aus Fahrzeugen genutzt werden. Zur Fusion stehen Informationen aus 80 Straßenwetterstationen und 100 Fahrzeugen zur Verfügung. Die Fahrzeuge sind in den Regionen Göteborg und Stockholm eingesetzt. Die SWIS (Straßenzustands- und Wetterinformationssystem)-Stationen wurden zur Datenübertragung mit GPRS (General Packet Radio Service) ausgestattet. Die fahrzeugseitig erhobenen Daten wurden in Feldtests per GPRS und SMS (Short Message Service) übertragen [SRIS, 2011]. Die xFCD werden in Hintergrunddaten und Ereignisdaten unterschieden. Die Hintergrunddaten werden in 30-Sekunden-Intervallen erhoben und enthalten Informationen zu Temperaturen, Niederschlägen und Fahrzeugpositionen. Die Ereignisdaten werden nur dann gesendet, wenn Fahrerassistenzsysteme aktiviert werden. Die Informationsgenerierung für stationäre Sensoren erfolgt im sogenannten Wettermodell, für die fahrzeuggenerierten Informationen wurde das Fahrzeugwettermodell entwickelt. Im Wettermodell werden die stationär erhobenen Daten auf Streckenabschnitte extrapoliert, wobei Topografie, Flächennutzung und Sonneneinwirkung als Randbedingungen berücksichtigt werden. Die Information zu der Fahrbahnglätte wird unter Beachtung der Temperaturen, des Niederschlags sowie der Uhr- und Jahreszeit in den drei Stufen „sehr glatt“, „glatt“ und „nicht glatt“ angegeben. Das Fahrzeugdatenmodell liefert Informationen zu der aktuellen Position der Fahrzeuge und der Anzahl der Aktivierungen von Antiblockiersystemen und elektronischen Stabilitätskontrollen, die auf den Streckenabschnitten gemeldet werden. In einem letzten Schritt werden fusionierte Aussagen aus dem Wettermodell und dem Fahrzeugdatenmodell gebildet, indem die Ergebnisse der einzelnen Modelle verglichen und die Strecken in Segmente aufgeteilt werden. Das SRIS-Modell läuft zurzeit nicht automatisiert.

Grundlegende Lösungsmöglichkeiten für die Erfassung witterungsbedingter Fahrbahnzustände in SBA sowie für den Straßenwinterdienst wurden im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) im Rahmen des Projekts „Zuverlässige Ermittlung des Fahrbahnzustands zur Erhöhung der Verkehrssicherheit auf Autobahnen“ (FE 82.338/2007) entwickelt. Das Ziel des Projektes war eine streckenbezogene Erfassung witterungsbedingter Fahrbahnzustände, die durch Nässe, Schnee und Eis eine Verringerung des Kraftschlusses zwischen

Fahrzeugreifen und Fahrbahn bewirken. Hierfür wurden fahrzeuggenerierte Daten analysiert und mit stationär erfassten Umfelddaten fusioniert [BUSCH UND DINKEL, 2010].

Im Rahmen des 2010 abgeschlossenen europäischen Forschungsvorhabens Safespot [SAFESPOT, 2012] sollen die Fahrerinformation und die Verkehrssicherheit verbessert werden, indem zusätzliche Informationsquellen genutzt werden. Den Fahrern soll die zur Verfügung stehende Reaktionszeit erhöht werden, indem sie über Gefahrenstellen auf dem vorausliegenden Streckenabschnitt informiert werden. Reduzierte Fahrbahngriffigkeiten aufgrund von Eis sowie Sichteinschränkungen durch Nebel werden erfasst und zwischen Fahrzeugen übertragen. Hierfür werden beispielsweise Informationen zum Wischerstatus und zu Geschwindigkeiten sowie Daten spezieller zusätzlicher Sensoren (Laserscanner, Video) verwendet. Eis auf der Fahrbahnoberfläche soll mittels eines Kamerasystems erkannt werden. Es wurden verbesserte Möglichkeiten zur Datenerhebung und zum Datenaustausch entwickelt und die Nutzerakzeptanz der Systeme untersucht. Nähere Informationen zu den verwendeten Erfassungssystemen und den erzielten Ergebnissen sind nicht verfügbar.

Derzeit befindet sich das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Projekt „RAINCARs - Rainfall estimation using moving cars as rain gauges“ [DFG, 2012] in Bearbeitung. Das Ziel des Vorhabens ist eine Verbesserung der momentan eingesetzten Methoden zur Niederschlagsschätzung durch die Berücksichtigung von Sensoren zur Wischerregelung in Fahrzeugen. Hierfür werden in Versuchen funktionale Zusammenhänge zwischen Wischerfrequenzen und Niederschlagsintensitäten ermittelt. Im Fokus der Arbeit steht die Verbesserung der Vorhersage von Hochwasser.

2.6 Sensor- und Datenqualität

Eine Grundvoraussetzung für die positive Wirksamkeit von SBA ist die Befolgung der Anzeigen auf WVZ durch die Verkehrsteilnehmer. Akzeptanz und Befolgung hängen in hohem Maße von der Plausibilität und Nachvollziehbarkeit der Anzeigen für die Verkehrsteilnehmer ab [STEINHOFF, 2003]. Hierfür sind wiederum zuverlässige Eingangsdaten zur Generierung der Schaltungen/Anzeigen erforderlich.

Die Informationen können unterschiedliche Imperfektionen aufweisen, von WITTE [2002] verwendeten Kriterien zur Klassifizierung werden nachfolgend beispielhaft auf Umfelddaten angewendet:

- Eine Information wird als unsicher bezeichnet, wenn nicht eindeutig festgestellt werden kann, ob sie korrekt ist. Dies gilt zum Beispiel für widersprüchliche Aussagen aus unabhängigen Quellen. Durch den Vergleich der Messwerte mehrerer Sensoren im Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass die Messwerte unterschiedlicher Sensoren häufig voneinander abweichen (siehe unten). Die stationären Messungen von Umfeldsensoren sind somit als unsicher einzustufen. Des Weiteren stellen beispielsweise Statusmeldungen zur ABS-Aktivität unsichere Informationen dar, da sie durch das Verhalten der Fahrer beeinflusst werden (vergleiche Abschnitt 3.4.2).

- Werden Kategorien eingesetzt, für die keine scharfen Grenzen festgelegt sind (linguistische Variablen), liegen unscharfe Informationen vor. Ein Beispiel hierfür ist die Klassifizierung „schwacher Niederschlag“.
- Eine Information gilt als ungenau, wenn sie durch Intervalle oder grobkörnige Einheiten dargestellt wird. Fahrzeuggenerierte Lufttemperaturen mit einer Auflösung von 0,5 °C können als ungenau bezeichnet werden.

Da in der Vergangenheit die gewünschte Datenqualität nicht immer erreicht werden konnte, wurden Tests zur Überprüfung und Optimierung der Sensorqualität entwickelt und durchgeführt. Hierbei wurden die stationären Erfassungssysteme überprüft, umfassende Prüfungen fahrzeugseitiger Sensoren zum Einsatz in IVS sind nicht bekannt.

In Amerika wurden Sensoren zur Ermittlung der Fahrbahnoberflächentemperatur in Labor und Praxis getestet [AURORA, 2005]. Die Untersuchung kam zu dem Ergebnis, dass sämtliche Sensoren Optimierungspotenzial aufweisen, da sowohl im Labor als auch unter Praxisbedingungen die Differenzen zu den Referenzmessungen bis zu 1,0 °C betragen.

Von BADEL ET AL. [2006] wurden Verfahren zur Überprüfung der Messwertqualität der Sensoren zur Erfassung von Fahrbahnoberflächentemperatur, Niederschlagsintensität, Wasserfilmdicke und Gefriertemperatur entwickelt. Das Ergebnis war, dass die Messungen in der Praxis mit Problemen behaftet sind und eine Weiterentwicklung der Sensorik angestrebt werden muss.

Der Arbeitskreis der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV AK) 3.2.1 „Umfelddatenerfassung in SBA“ empfiehlt für den Praxisbetrieb die Erfassung zusätzlicher Hilfsgrößen (siehe Tab. 2.4), um für die Messwerte auf meteorologischen Grundlagen basierende Plausibilitätskontrollen durchzuführen [FGSV, 2010a].

Um die Qualität der Systeme zur Umfelddatenerfassung in SBA systematisch zu überprüfen und durch langfristige, wissenschaftliche Begleitung zu verbessern, wird im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) im Großraum München seit 2003 das Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ betrieben [TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 2012]. Im Testfeld werden Sensorsysteme verschiedener Hersteller unter identischen praxisnahen Bedingungen untersucht. Dadurch sollen die Sensoren zur Umfelddatenerfassung hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in SBA bewertet und verbessert werden. Als Kriterien zur Güteprüfung der Systeme gelten die Messgenauigkeit, die Reaktionszeit sowie die Fähigkeit der Systeme zur Ereignisabbildung. In dem Testfeld stehen unter anderem Webcams zur durchgängigen Dokumentation der Umfeldbedingungen, sowie für einzelne Messgrößen Sensoren für Referenzmessungen zur Verfügung. Zusätzlich werden regelmäßig Beobachtungen und Tests durchgeführt. Im Bereich des Testfeldes (Km 15,650) an der BAB A 92 handelt es sich um eine Betonfahrbahn mit -0,1% Längs- und -2,4% Querneigung. Charakteristische Eigenschaften der derzeit in der Praxis eingesetzten Sensorsysteme zur Umfelddatenerfassung werden nachfolgend anhand wesentlicher Ergebnisse der Testphasen 2005 bis 2008 kurz dargestellt. Es werden nur die Resultate der für die vorliegende Arbeit relevanten Messgrößen beschrieben.

Zustand der Fahrbahnoberfläche

Für die Messwerte des Zustands der Fahrbahnoberfläche konnten typische Charakteristika identifiziert werden: So wurde durch Tests festgestellt, dass die Übergänge von den Fahrbahnzuständen „trocken“ zu „feucht“ sowie von „feucht“ zu „trocken“ in den Messwerten teilweise mehrere Minuten verspätet erfolgen [DINKEL ET AL., 2008a]. Diese unsichere Information kann zum Beispiel zu falschen Aussagen von Glättewarnmodellen [zum Beispiel von BADELT UND BREITENSTEIN, 2005] führen.

Wasserfilmdicke

Die Sensorsysteme zur Ermittlung der Wasserfilmdicke auf der Fahrbahnoberfläche werden mittels Ganglinienvergleichen, Korrelationsuntersuchungen sowie Sensortests vor Ort bewertet.

Die Tests zeigen, dass einige der Sensoren teilweise mehrere Minuten verzögert auf eine entstehende Nässe reagieren. Dieses Verhalten kann insbesondere bei starken Niederschlagsereignissen zu Fehlschaltungen in SBA führen [DINKEL ET AL., 2008a]. Auch bei der Abtrocknung der Fahrbahnoberfläche, beziehungsweise der in der Fahrbahn eingebrachten Fahrbahnsonden, wurde eine verzögerte Reaktion der Messwerte für Wasserfilmdicke nachgewiesen [DINKEL ET AL., 2008a]. Als Konsequenz bedeutet dies, dass die Fahrbahnnässe in der Zentrale unter Umständen kritischer interpretiert wird als sie tatsächlich in der Realität vorliegt. Resultieren hieraus unberechtigte Nässe-Warnungen, dann sind diese für die Verkehrsteilnehmer nicht nachvollziehbar, was gemäß STEINHOFF [2003] zu einer Minderung der Wirksamkeit der SBA führen kann. In Verkehrsrechnerzentralen sind die Informationen zu der Wasserfilmdicke als unsicher zu klassifizieren.

Gefriertemperatur

Um eine zuverlässige Aussage zu der Gefriertemperatur zu ermitteln, benötigen die Sensoren einen relativ hohen Wasserfilm. In der Praxis werden jedoch auch bei nur feuchter Fahrbahn Messwerte ermittelt, woraus teilweise starke Messwertunterschiede resultieren können [DINKEL ET AL., 2007]. Differenzen zwischen zeitgleich ermittelten Messwerten könnten aus einer inhomogenen Verteilung der Taustoffe auf der Fahrbahnoberfläche resultieren [DINKEL ET AL., 2009]. Zur weiteren Nutzung sind die Messwerte im Abgleich mit anderen Messgrößen zu verifizieren. Die Messwerte der Gefriertemperatur sind als unsicher einzustufen, da zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Sensorsystemen erkannt wurden.

Temperatur der Fahrbahnoberfläche

Es konnte gezeigt werden, dass die Sonnenbestrahlung beziehungsweise die Beschattung der Sensoren zur Ermittlung der Fahrbahnoberflächentemperatur einen bedeutenden Einfluss auf das Messergebnis haben. Selbst bei Sensoren, die nahe beisammen platziert sind, wurden deutliche Messwertunterschiede erkannt [DINKEL ET AL., 2007]. Ursachen für die Differenzen ergaben sich zum Einen aus dem Verlauf des Schattenfalls, zudem wiesen die Sensoren verschiedener Hersteller bei bestimmten Bewölkungszuständen unterschiedliche Verhaltensweisen auf [DINKEL ET AL., 2008a]. Hierauf basieren zum Teil Zeitdifferenzen von

mehreren Stunden für den Zeitpunkt des Nulldurchgangs der Fahrbahntemperatur [DINKEL ET AL., 2009].

Im Rahmen der technischen Möglichkeiten im Testfeld „Eching Ost“ konnte nicht abschließend geklärt werden, welcher Sensortyp die zuverlässigste Informationsquelle darstellt. Für die Nutzung in SBA bedeutet dies, dass bei der Interpretation der Temperatur der Fahrbahnoberfläche Puffer zum Ausgleich von Messwertverfälschungen berücksichtigt werden sollten, da die vorliegende Information unsicher ist.

Niederschlagsart

Bei Untersuchungen der Messwerte der Niederschlagsart konnten Falschmessungen identifiziert werden [DINKEL ET AL., 2007], was auch eine Ursache dafür ist, dass in der Testphase 2007/2008 nur drei der fünf kontrollierten Sensorsysteme als „geeignet“ für den Einsatz in SBA bewertet wurden. Je ein Sensor wurde für den Einsatz in SBA als „nicht geeignet“ beziehungsweise als „mit Einschränkungen geeignet“ eingestuft [DINKEL ET AL., 2009]. Eine falsche Information zu der Niederschlagsart kann vor allem die Güte der Ergebnisse von Glättewarnmodellen (zum Beispiel von BADELDT UND BREITENSTEIN [2005]) mindern.

Niederschlagsintensität

Die Messwerte der Niederschlagsintensität sind Eingangsdaten der Nässe-Warnung und gehen somit direkt in die Verkehrssteuerung ein (siehe Tab. 2.4), weshalb eine möglichst hohe Erfassungsgüte angestrebt werden sollte. Im Testfeld „Eching Ost“ werden die Daten der geprüften Sensoren mit den Messwerten eines Sensortyps verglichen, der in größerem Umfang vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Erfassung von Niederschlagsintensitäten eingesetzt wird und deshalb für den Testbetrieb als Referenz gilt. Die Überprüfungen der Testphase 2005/2006 kamen zu dem Ergebnis, dass von sechs getesteten Sensoren ein System zum Einsatz in SBA „nicht geeignet“ erscheint, zwei Sensoren gelten als „mit Einschränkungen für den Einsatz in SBA geeignet“. Es zeigt sich, dass es sich bei der Niederschlagsintensität um eine schwierig zu erfassende Größe handelt, da teilweise sehr große Differenzen zu dem Referenzsensor und zwischen den überprüften Sensoren auftreten. Drei Systeme wurden für den Einsatz in SBA als „geeignet“ eingestuft, sie sind somit in der Lage, die Messgröße Niederschlagsintensität hinreichend genau zu erfassen [DINKEL ET AL., 2007].

Lufttemperatur

Die Analysen der Lufttemperaturen deckten keine größeren Probleme auf. Um Überschätzungen der Lufttemperaturen zu vermeiden, sind für Glätteprognosen Sensoren mit strahlengeschützten Gehäusen einzusetzen. Insbesondere für die Verwendung von Lufttemperaturen in Plausibilitätsprüfungen ist eine exakte Erfassung dieser Messgröße erforderlich [DINKEL ET AL., 2009].

2.7 Zwischenfazit

Nationale und internationale Untersuchungsergebnisse zeigen, dass witterungsbedingte Fahrbahnzustände die Fahrdynamik und damit die Verkehrssicherheit und die Effizienz des Verkehrsablaufs beeinträchtigen. Um dem zu entgegenen, werden in Rahmen von SBA neben Verkehrsdaten auch Umfelddaten ortsfest erfasst und zur Steuerung und Warnung des Verkehrs verwendet. Obwohl die Messwerte streng genommen nur die Umfeldbedingungen am Ort der Messung repräsentieren, werden sie auf größere Gebiete extrapoliert. Im Falle eines Sensorausfalls resultieren deshalb für größere Streckenabschnitte Informationslücken. Da es sich bei Wettersituationen um instationäre und inhomogene Ereignisse handelt, kann die auf einen Streckenabschnitt extrapolierte, stationär erfasste Information nicht immer für das gesamte Streckensegment repräsentativ sein. Die Kombination aus der aus wirtschaftlichen Gründen begrenzten Anzahl an Sensoren zur Datenerfassung und Aktorik zur Information der Verkehrsteilnehmer zieht Einschränkungen in der Funktionalität von SBA nach sich, da die angezeigten Inhalte nicht immer für die gesamten zugewiesenen Streckenabschnitte optimal abgestimmt sein können. Mit der derzeit üblichen Umfelddatenerfassung im Rahmen von SBA lässt sich der Fahrbahnzustand räumlich-zeitlich nicht lückenlos bestimmen, der von KLOTZ [2002] empfohlenen Verbesserung und Verdichtung der Erfassungstechnologien für SBA sind jedoch wirtschaftliche Grenzen gesetzt.

In modernen Fahrzeugen liegt eine Vielzahl interner Informationen vor, die zu einer witterungsabhängigen Verkehrsbeeinflussung beitragen können. Diese zusätzliche streckenbezogene Informationsquelle in Form von xFCD wird trotz erster realisierter Forschungsvorhaben und Projekte derzeit nicht in der Praxis der Verkehrsbeeinflussung berücksichtigt. Umfassende Informationen zu der Qualität und Zuverlässigkeit der verwendeten fahrzeuggenerierten Daten wurden nicht veröffentlicht. Es stellt sich die grundlegende Frage, ob fahrzeuggenerierte Daten stationär erfasste Umfelddaten inhaltlich substituieren beziehungsweise ergänzen können und wie die Informationen in die Steuerungsabläufe von SBA einzubinden sind. Qualitätsuntersuchungen zeigen, dass viele der zur Umfelddatenerfassung eingesetzten Sensorsysteme Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Messwertqualität aufweisen. Da Messwerte der Umfeldsensoren in der Praxis direkt zur Generierung von Schaltungen in SBA genutzt werden, ist eine hohe Qualität der Umfelddaten essenziell, dennoch werden Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Daten und Prozessen in der Praxis nicht durchgängig eingesetzt.

Zusammenfassend gilt, dass die oben genannten derzeit bestehenden Probleme durch eine verbesserte Fahrbahnzustandsermittlung in SBA unter Nutzung von fahrzeuggenerierten Informationen vermindert werden können. Es wird angenommen, dass aus einer Hinzunahme von fahrzeuggenerierten Informationen eine Verbesserung der Aussagen zum Fahrbahnzustand resultieren kann. Zum Einen, da durch eine Kombination unterschiedlicher Messprinzipien und durch die Nutzung streckenbezogener Fahrzeuginformationen die Detektionswahrscheinlichkeit kritischer Fahrbahnzustände erhöht werden kann, zum Anderen kann durch die zusätzliche Informationsquelle eine Plausibilisierung und Verbesserung der Aussagen zum Zustand der Fahrbahnoberfläche erreicht werden. Durch die zusätzlichen Informationsquellen besteht die Möglichkeit eines Messfehlerausgleichs.

Aufgrund fehlender veröffentlichter Ergebnisse ist vor einer Integration von xFCD in das System der SBA mit dem Ziel der verbesserten Fahrbahnzustandserkennung zunächst eine Untersuchung hinsichtlich der Übertragbarkeit und Zuverlässigkeit der mobil erfassten Informationen nötig.

3 Analyse fahrzeuggenerierter und stationär erfasster Daten

3.1 Übersicht

Die fahrzeuggenerierten Daten werden zusammen mit den stationär erfassten Daten dahingehend analysiert, in wie weit sie einen Beitrag zur möglichst umfassenden Beschreibung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands leisten können. Die vorbereitenden Prozesse und Festlegungen zur Erfassung und Aufbereitung der Daten sind in Abschnitt 0 beschrieben. Für eine Vorauswahl verfügbarer Daten werden in Abschnitt 3.3 Hypothesen formuliert, die die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der Daten zur weiteren Verwendung im Projekt behandeln. Mittels der Prüfung der Hypothesen werden diejenigen fahrzeuggenerierten (Abschnitt 3.4) und stationär erfassten (Abschnitt 3.5) Daten ausgewählt, die zur Ermittlung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands verwendet werden. Der Ablauf und die Einbindung der Datenanalyse in das Bearbeitungskonzept ist in Bild 3.1 dargelegt.

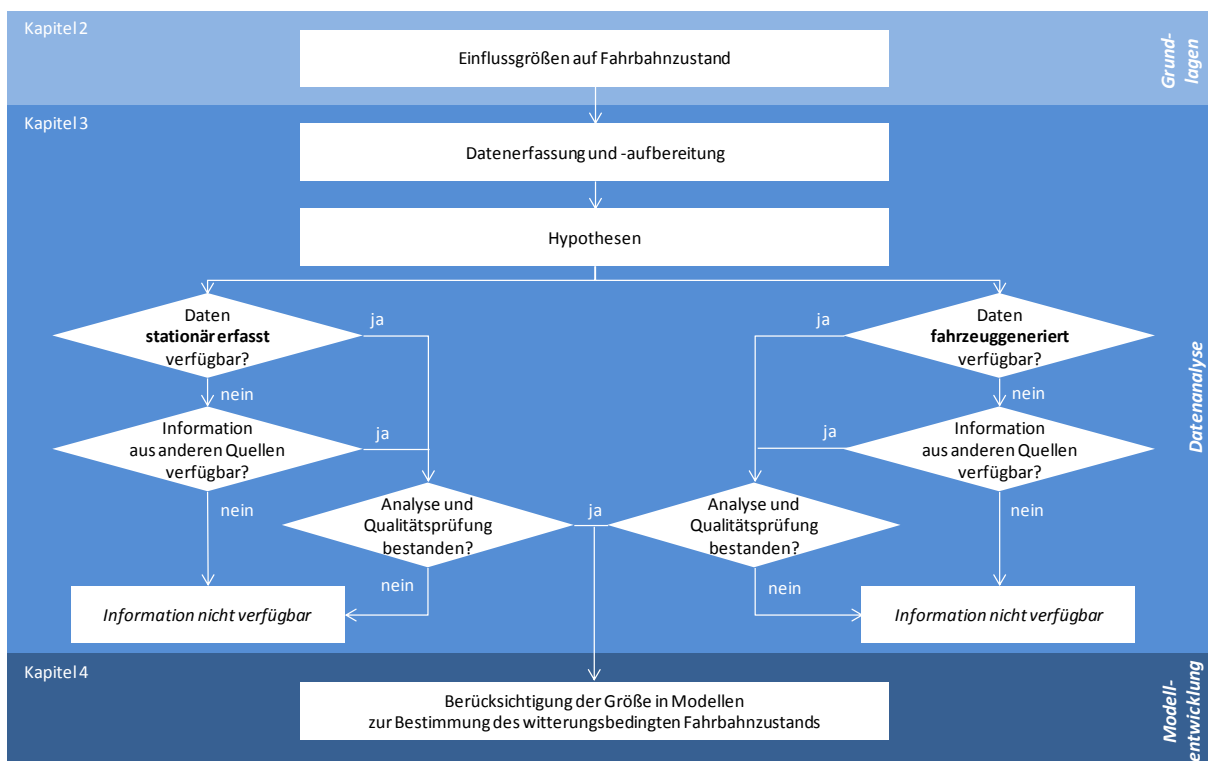


Bild 3.1 Ablauf der Datenanalyse und Einbindung in das Bearbeitungskonzept

3.2 Datenerfassung und -aufbereitung

3.2.1 Anforderungen und Spezifikationen

Vorgehen zur Erfassung von xFCD, Versuchsfahrzeuge und Ausstattung

Die Güte und Aussagekraft von xFCD sind zu überprüfen. Hierfür sind fahrzeuggenerierte Daten aufzuzeichnen und mit Referenzmessungen und stationär erfassten Umfelddaten zu vergleichen. Die Befahrungen sollten mit mehr als einem Fahrzeug durchgeführt werden, um fahrzeuggenerierte Daten zwischen verschiedenen Fahrzeugen vergleichen zu können. Um zumindest eine gewisse Übertragbarkeit und Prüfmöglichkeit zu gewährleisten, sind unterschiedliche Fahrzeugtypen verschiedener Hersteller zu vergleichen. Da in modernen Fahrzeugen eine Vielzahl an Informationen vorliegt, ist eine Vorauswahl der für das Projekt potenziell relevanten und zu überprüfenden Datenarten nötig. Eine Voraussetzung für eine vergleichsweise leichte und wirtschaftliche Einführung und Übertragbarkeit der Projektergebnisse in die Praxis ist, dass nur die standardmäßig in den Fahrzeugen und die stationär für SBA erfassten Daten verwendet werden. Bei den eingesetzten Versuchsfahrzeugen sollte es sich somit um Serienfahrzeuge handeln, in denen keine zusätzlichen Sensoren vorhanden sind. Die in Abschnitt 2.5.3 genannten Strukturen kooperativer Systeme stehen derzeit nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund sollen die xFCD lokal in den Fahrzeugen gespeichert und offline im Anschluss an die Befahrung aufbereitet werden.

Quellen für stationär erfasste Umfelddaten: Befahrungsgebiet

Als optimale Informationsquelle für stationär erfasste Umfeldinformationen bietet sich das Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ (siehe Abschnitt 2.6) an. Die umfangreiche Infrastruktur des Testfelds mit Webcams und redundanten Messsystemen, sowie die wissenschaftliche Begleitung mit regelmäßig durchgeführten Referenzmessungen haben den Vorteil, dass im Bereich des Testfeldes zur Modellbildung eine außergewöhnlich umfassende und hochwertige Wissensbasis zu den Umfeldbedingungen und -daten zur Verfügung steht.

Qualitätsprüfung stationär erfasster Umfelddaten und Datenaufbereitung

Aufgrund der Erfahrungen mit fehlerbehafteten Umfelddaten und der Bedeutsamkeit korrekter Eingangsdaten für die Befolgung und Wirksamkeit von SBA-Steuerungsverfahren [STEINHOFF, 2003], werden die für die Arbeit zur Verfügung gestellten stationär erfassten Umfelddaten vor einer Nutzung im Projekt hinsichtlich ihrer Qualität kontrolliert. Da es sich um Grundlagenforschung mit Datenanalyse handelt, können sämtliche Arbeitsschritte mit aufgezeichneten Daten stattfinden, ohne dass der online-Datenaustausch eines kooperativen Systems erforderlich wäre.

Wahl des xFCD-Aggregierungsintervalls

Die bei den Befahrungen in den Fahrzeugen gespeicherten Daten werden in unterschiedlichen Zykluszeiten aktualisiert, die jeweils geringer als das gemäß TLS [BAST, 2002] vorgeschriebene 1-Minuten-Intervall der stationären Datenerfassung sind. Für die Analyse der

xFCD ist eine zeitliche Aggregation und Reduktion der fahrzeuggenerierten Daten erforderlich, da fahrzeugintern eine sehr große Datenmenge generiert wird, die einen hohen Speicher- und Aufbereitungsaufwand erfordert. Das Aggregierungsintervall ist in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit und der demnach je Zeitschritt zurückgelegten Strecke festzulegen. In Bild 3.8 sind Streckenlängen bis 2000 m aufgetragen, was gemäß FGSV [2010a] dem empfohlenen maximalen Abstand zwischen lokalen Sensoren zur Umfelddateinerfassung entspricht. Die untersuchten Aggregierungsintervalle variieren zwischen 0,1 Sekunden und 60 Sekunden (Erfassungsintervall der TLS). Für die Szenarien der Geschwindigkeiten wurden Werte zwischen 180 km/h (freier Verkehr) und 30 km/h (Stau) angesetzt.

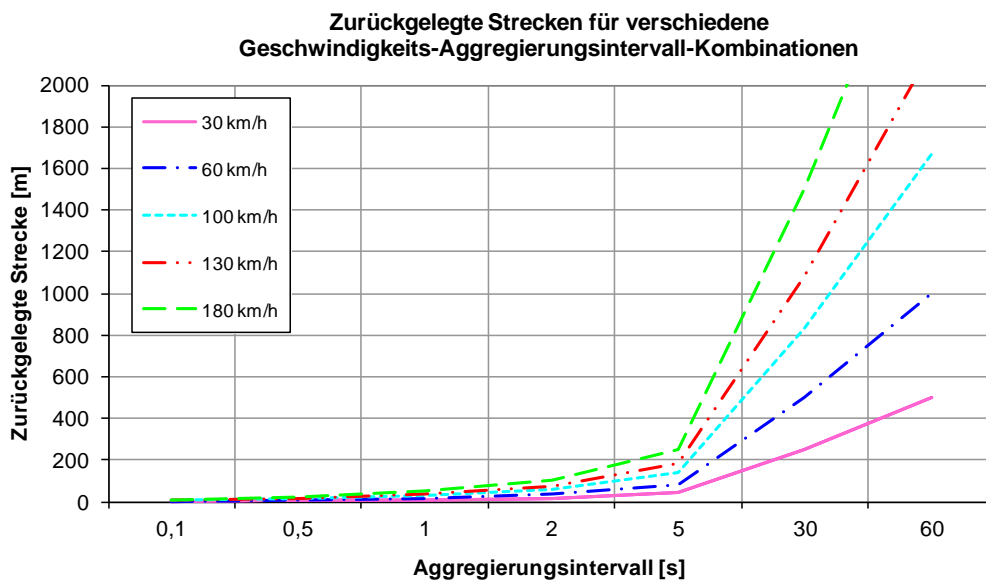


Bild 3.2 Vergleich von xFCD-Aggregierungsintervallen über die bei verschiedenen Geschwindigkeiten jeweils zurückgelegten Strecken

In Abwägung zwischen der Aussagekraft und Genauigkeit der fahrzeuggenerierten Informationen und dem erforderlichen Speicherbedarf wird das Aggregierungsintervall für xFCD in der vorliegenden Arbeit auf eine Sekunde festgelegt. Der zurückgelegte Weg bei gestörtem Verkehrsablauf mit Geschwindigkeiten von beispielsweise 30 km/h beträgt 8,3 m, bei freiem Verkehr und beispielhaften maximalen Geschwindigkeiten von 180 km/h würde in einer Sekunde eine Distanz von 50 m überwunden.

Datenerfassung

Als Unterstützung bei der Modellbildung, bei der Interpretation fahrzeuggenerierter Daten und um Fahrmanöver nachträglich nachvollziehen zu können, sind die Fahrten zu dokumentieren. Als Zeitraum wurden Monate mit winterlichen Straßenverhältnissen (Befahrungsphase 1: Januar 2008 bis April 2008 und Befahrungsphase 2: Oktober 2008 bis März 2009) gewählt. Die Befahrungen in Testphase 1 dienen dem Aufbau einer Datenbasis, anhand derer Plausibilitätskontrollen und Modelle entwickelt werden. Die Ergebnisse werden mittels der in Befahrungsphase 2 aufgezeichneten Daten verifiziert.

Datenanalyse und Modellbildung

Die Analyse der fahrzeuggenerierten sowie der stationär erfassten Daten ist in den Abschnitten 3.4 und 3.5 dargestellt. Die Methodik ist angelehnt an das Vorgehen der Sensorüberprüfungen im Rahmen des Testfelds für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ [DINKEL ET AL., 2009]. Anhand der Untersuchung exemplarischer Datensätze sollen tendenzielle Aussagen zu der Qualität und Aussagekraft der in den eingesetzten Versuchsfahrzeugen verfügbaren Daten für eine Nutzung in Modellen zur Bestimmung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands generiert werden (siehe Kapitel 4).

3.2.2 Versuchsfahrzeuge und Ausstattung

Eingesetzte Versuchsfahrzeuge

Zur Erhebung fahrzeuggenerierter Daten werden Befahrungen mit zwei unterschiedlichen Fahrzeugtypen durchgeführt. Eingesetzt werden ein Pkw des Typs Audi A4 Limousine (2000 cm³ Hubraum, Leistung 147 KW, Baujahr 2005) und ein Transporter VW Caravelle T5 (2500 cm³ Hubraum, Leistung 128 KW, Baujahr 2006). Beide Fahrzeuge verfügen über Allradantrieb. Die Ausstattung des Audi umfasst unter anderem einen Nässe-Sensor, der zur automatischen Steuerung der Wischertätigkeit eingesetzt wird. Einzige Modifikation der Fahrzeuge ist die Realisierung der Schnittstelle zu den Fahrzeug-CAN-Bussen, um hierüber den Datenverkehr zu speichern, ansonsten handelt es sich um technisch nicht modifizierte Serienfahrzeuge. In den nachfolgenden Auswertungen werden die Fahrzeuge als Fahrzeug A (Audi) und Fahrzeug V (VW) geführt.

Zum Aufzeichnen von Informationen während der Befahrungen wurden die Versuchsfahrzeuge mit den folgenden Systemen ausgerüstet:

- CAN-Bus-Datenlogger zur Speicherung objektiver fahrdynamischer Daten der Fahrzeuge
- Mikrofone, um subjektive Kommentare der Fahrer während der Fahrten aufzuzeichnen
- Kameras zum Dokumentieren der Befahrungen auf Bild- und Videodateien
- PDA (Personal Digital Assistant) um durchgängig die Koordinaten der Fahrten zu speichern

CAN-Bus-Datenlogger

Zur Verwendung der Informationen aus fahrzeugseitigen Systemen müssen diese vom CAN-Bus (vergleiche Abschnitt 2.5.2) abgegriffen werden. In beiden Versuchsfahrzeugen werden im Beifahrerfußraum Anschlussmöglichkeiten geschaffen, um die Daten des CAN-Bus mittels Datenlogger über RS232-Schnittstellen lokal zu speichern. Die Datenlogger sind an die CAN-Busse für Komfort, Antrieb und Unterhaltung angeschlossen und speichern deren Datenverkehr. Es werden zwei Datenlogger CCO-DL3 des Herstellers Condalo eingesetzt, deren Speicherkapazität jeweils 10 GB beträgt. Zum Betrieb der Datenlogger ist eine Stromversorgung erforderlich.

Mikrofone

Die Mikrofone werden hinter dem Lenkrad auf dem Armaturenbrett angebracht und per USB (Universal Serial Bus)-Verbindung an ein Notebook angeschlossen. Mittels einer Rekordersoftware können während der Befahrungen subjektive Eindrücke und Kommentare der Fahrer als Audiodateien aufgezeichnet werden. Diese werden im Anschluss an die Fahrt in Textdateien übertragen. Um die Informationen später zeitlich und räumlich verorten zu können, werden jeweils Zeitangaben mitprotokolliert.

Kameras

Es wird je eine Videokamera beziehungsweise eine Webcam zur Dokumentation der Befahrungen auf Video- und Bilddateien genutzt. Für die Befestigung der eingesetzten Kamerasysteme werden Positionen möglichst nahe an der Windschutzscheibe gewählt, um so den Einfluss störender Reflexionen zu minimieren. Durch die Anbringung der Kameras im Bereich der Wischer wird ein sauberes Blickfeld gewährleistet.

Für die Befestigung der Web-Kamera im Fahrzeug wurde eine spezielle Halterung erstellt. Die Kamera ist an einem Holzstück direkt an die Streben der Beifahrer-Kopfstütze geschraubt, der Sitz wurde gegen die Fahrtrichtung gedreht. Für die Webcam lässt sich das Einzelbildintervall einstellen, es wird für die Befahrungen auf 15 Bilder je Minute festgelegt. Die Einzelbilder werden direkt auf der Festplatte eines mittels LAN (Local Area Network)-Kabel angeschlossenen Notebooks im Format jpg (Joint Photographic Experts Group) gespeichert.

Mittels einer Halterung ist die Videokamera auf dem Armaturenbrett befestigt. Für den Betrieb ist eine Stromzufuhr erforderlich. Die Videostreams liegen im Format WMF (Windows Metafile) vor.

Personal Digital Assistant - PDA

Ein Zugriff auf den Navigations-CAN-Bus des Fahrzeugs A ist nicht möglich, da fahrzeugseitige Navigationssysteme über separate CAN-Busse betrieben werden, die ein in sich geschlossenes System darstellen. Aus diesem Grund werden in beiden Fahrzeugen die Positionsdaten sekundlich mittels einer auf Personal Digital Assistants (PDA) betriebenen Software aufgezeichnet. Diese Maßnahme ist zur nachträglichen räumlichen Verortung der Fahrzeuge erforderlich.

3.2.3 Befahrungsgebiet

Das Befahrungsgebiet erstreckt sich auf die BAB A 9 zwischen München und Ingolstadt sowie die BAB A 92 zwischen der Anschlussstelle (AS) Oberschleißheim und der AS Freising Ost (vergleiche BUSCH UND DINKEL, 2010). Die Fahrten passieren im Befahrungsgebiet das Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“. Die dort erhobenen Daten sowie die vorhandene Infrastruktur werden in vorliegender Arbeit primär genutzt, um die Zuverlässigkeit der fahrzeugseitigen Erfassungssysteme zu überprüfen.

Das Befahrungsgebiet liegt im Zuständigkeitsbereich der Autobahndirektion Südbayern, die für die vorliegende Untersuchung die in Tab. 2.4 aufgeführten stationär im Befahrungsgebiet erfassten Umfelddaten zur Verfügung stellt.

3.2.4 Datenaufbereitung

Datenkonvertierung und -aufbereitung

In Bild 3.3 ist die Aufbereitung und Zusammenführung unterschiedlicher stationär und mobil erfasster Daten in einer Datenbank zum Zweck weiterführender Auswertungen dargestellt. Die Schritte zur Konvertierung und zum Export der Daten finden jeweils offline mit lokal gespeicherten Daten statt.

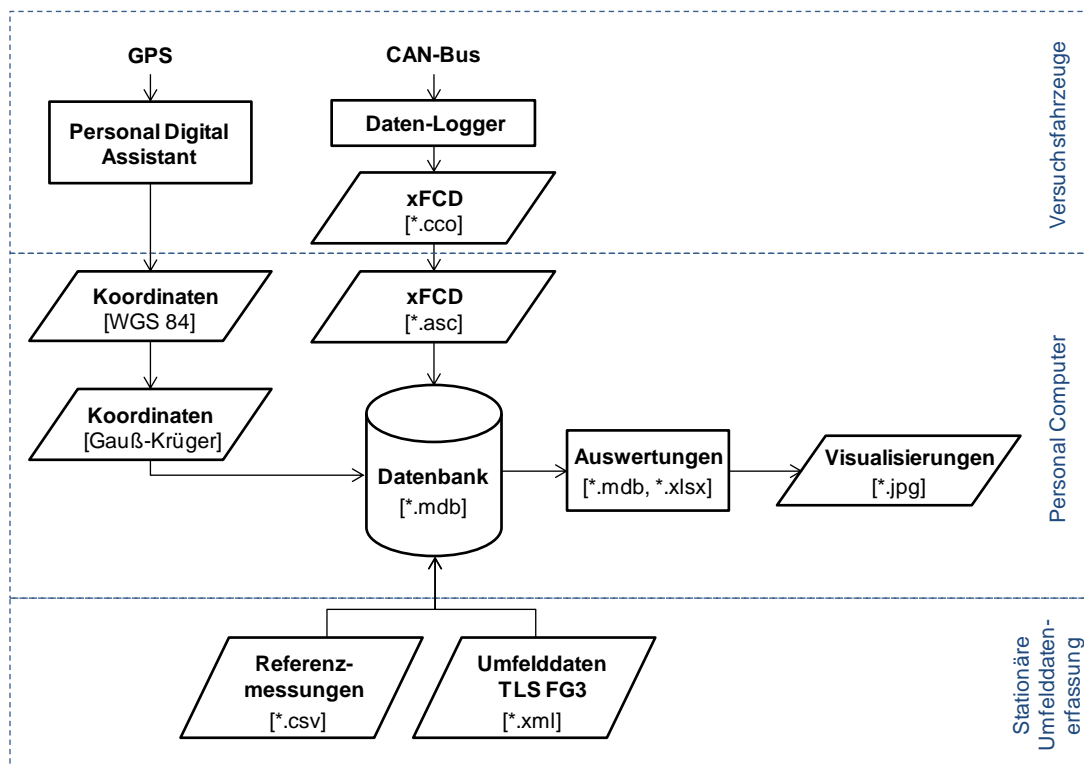


Bild 3.3 Aufbereitung und Zusammenführung verschiedener Datenarten aus unterschiedlichen Quellen in einer Datenbank

Die während der Fahrten lokal in den Versuchsfahrzeugen gespeicherten CAN-Bus-Daten werden am Ende des Aufbereitungsprozesses in einer Access-Datenbank (Format mdb: Microsoft Access Data Base) zur Verarbeitung am Personal Computer (PC) gespeichert. Hierfür wurden in Visual Basic für jedes Fahrzeug Prozeduren zum Einlesen der Daten programmiert. Die CAN-Bus-Daten der beiden eingesetzten Fahrzeuge variieren hinsichtlich der verfügbaren Informationen und sind bezüglich Syntax und Semantik unterschiedlich codiert, so dass die Prozeduren zum Einlesen der Daten jeweils spezifisch angepasst werden müssen. Die stationär erfassten Umfelddaten liegen in den Formaten xml (extensible markup language) und csv (comma separated values) vor. Um die Fahrten mittels eines Tools grafisch darstellen zu können, werden die mittels PDA generierten Geo-Koordinaten der Fahrten vom

Format World Geodetic System 1984 (WGS84) in das Gauß-Krüger-Format konvertiert. Des Weiteren werden die Audiokommentare in Textdateien (txt) übertragen und als zusätzliche Informationen zu den Fahrten archiviert.

Die in der Access-Datenbank gespeicherten Datensätze werden mit Microsoft Excel und dem Softwarepakete MATLAB (Matrix laboratory) weiterverarbeitet.

Qualitätsprüfung stationär erfasster Umfelddaten

Für die Prüfung der Qualität der stationär erfassten Umfelddaten wird ein auf Microsoft Excel basierendes Software-Tool zur Überprüfung von Umfelddaten genutzt [DINKEL ET AL., 2008b], das auf Vorarbeiten im Projekt „Benchmarking für Verkehrsdatenerfassungs- und Verkehrssteuerungssysteme“ [BUSCH ET AL., 2006] aufbaut. Mit Hilfe des Tools werden ausgewählte stationär erfasste Datensätze gemäß FGSV [2010a] auf ihre Plausibilität überprüft. Als unplausibel identifizierte Daten werden von einer weiteren Datenverarbeitung und Nutzung im Projekt ausgeschlossen. Es wurden nur vereinzelte Datensätze der verwendeten Sensorensysteme als nicht plausibel klassifiziert.

Für xFCD sind keine Verfahren zur Überprüfung der Plausibilität bekannt.

3.2.5 Datenerfassung

Die erforderlichen Eingangsgrößen der stationären Umfelddatenerfassung werden im Rahmen von SBA auf der BAB A 9 und A 92 erfasst und von der Autobahndirektion Südbayern bereitgestellt. Im Befahrungsgebiet befindet sich zudem an der BAB A 92 das Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“, aus dem für die vorliegende Untersuchung umfangreiche Datenbestände verwendet werden. Es werden nur die Messwerte vertrauenswürdiger Sensoren herangezogen, die auf Basis jährlich durchgeführter Bewertungen der Sensorensysteme [DINKEL ET AL., 2008] ausgewählt werden. Die umfassende Infrastruktur des Testfelds mit Webcams und redundanten Messsystemen sowie die wissenschaftliche Begleitung mit regelmäßig durchgeführten Referenzmessungen haben den Vorteil, dass im Bereich des Testfeldes für eine Modellbildung (siehe Kapitel 4) eine außergewöhnlich umfassende und hochwertige Wissensbasis zu den Umfelddaten zur Verfügung steht.

Es wurden Kameras zur Dokumentation der Fahrten eingesetzt sowie mit Mikrofonen subjektive Einschätzungen des Fahrbahnzustands und Kommentare der Fahrer aufgezeichnet. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise die Information relevant, ob Scheibenwischer aufgrund von atmosphärischem Niederschlag oder wegen der Sprühfahnen von vorausfahrenden Fahrzeugen betätigt wurden. Im Rahmen der Befahrungen wurde in Fahrzeug A die Wischertätigkeit stets automatisch über Sensorwerte des fahrzeugseitigen Nässesensors geregelt. Die Fahrten wurden von drei männlichen Fahrern im Alter von 24, 27 und 28 Jahren durchgeführt.

Um fehlerhafte Zeitangaben auszuschließen, wurden für die verwendeten Geräte regelmäßig Synchronisierungen der Systemzeiten durchgeführt.

In dem Befahrungsgebiet wurden mit den beiden Versuchsfahrzeugen insgesamt mehr als 5100 Kilometer bei den Fahrbahnzuständen trocken, feucht, nass und schneebedeckt zurückgelegt. Die aufgezeichneten Daten werden gemäß den getroffenen Festlegungen aufbereitet und in einer Datenbank gespeichert (vergleiche Bild 3.3). Für die xFCD erfolgt die Aggregation in das gewählte 1-Sekunden-Intervall über eine Mittelwertbildung.

3.3 Hypothesen zur Vorauswahl und Analyse der Daten

3.3.1 Vorgehen

Bewertung und Vorgehensweise der Datenanalyse orientieren sich an eine im Rahmen von Sensortests etablierte Methodik [DINKEL ET AL., 2009] und sollen dazu dienen, anhand beispielhafter Datensätze tendenzielle Aussagen zu der Qualität und Aussagekraft von Daten zu erhalten. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist, dass aus den Fahrzeugen räumlich quasi durchgängig Informationen verfügbar sind, es existieren zu der Nutzung und Interpretation dieser Daten jedoch im Gegensatz zu der herkömmlichen punktuellen stationären Umfelddatenerfassung kaum Erfahrungen. Die Reduktion der zu bearbeitenden Datenmenge ist erforderlich, da auf den CAN-Bussen der Versuchsfahrzeuge rund 700 unterschiedliche Informationen verfügbar sind, von denen die Mehrzahl nicht zu der Bestimmung von Fahrbahnzuständen beitragen kann.

Um witterungsbedingte Fahrbahnzustände direkt aus mobiler Datenerfassung bestimmen zu können, müsste die Messgröße „Zustand der Fahrbahnoberfläche“ idealerweise fahrzeuggeneriert vorliegen. Da dies in den verwendeten Serienfahrzeugen nicht der Fall ist, wird in vorliegender Arbeit untersucht, ob anhand von weiteren Informationen, die standardmäßig auf dem Fahrzeug-CAN-Bus verfügbar sind, auf den witterungsbedingten Zustand der Fahrbahnoberfläche – beziehungsweise ihn bestimmende Größen – geschlossen werden kann. Die Vorgehensweise zeichnet sich dadurch aus, dass Daten jener Größen verwendet werden, die den Zustand der Fahrbahnoberfläche wesentlich beeinflussen (vergleiche Abschnitt 2.3).

In Tab. 3.1 sind den Einflussfaktoren auf den Fahrbahnzustand die korrespondierenden, aus der stationären Umfelddatenerfassung verfügbaren Informationen gegenübergestellt. Anhand der Tabelle kann gezeigt werden, dass die stationäre Erfassung die Mehrzahl der für die Bestimmung des Fahrbahnzustands wesentlichen Umfeldinformationen liefert. Lediglich für die primär die Fahrbahnoberflächentemperatur bestimmende Strahlung steht im Rahmen der Arbeit kein stationäres Messsystem zur Verfügung. Zudem enthält die Tab. 3.1 die aus der mobilen Erfassung bereit stehenden direkt korrespondierenden Informationen. Die einzigen direkt vorliegenden fahrzeuggenerierten Größen sind die Lufttemperatur sowie die Werte der sogenannten Nässe Sensoren, die das Wischerintervall anhand der Niederschlagsintensität regeln.

Umfeldgröße	Stationäre Erfassung	Mobile Erfassung
Fahrbahnzustand	FBZ, WFD	/
Fahrbahntemperatur	FBT	/
Lufttemperatur	LT	LT
Luftfeuchtigkeit	RLF	/
Niederschlag	NI, NS	Daten Nässesensor
Strahlung	Im Projekt nicht verfügbar	/

Tab. 3.1 Direkte Verfügbarkeit von stationär und mobil erfassten Einflussgrößen auf den Fahrbahnzustand

Für die vorausgewählten Daten werden Hypothesen bezüglich der Nutzbarkeit fahrzeuggenerierter Daten zur Substitution beziehungsweise Ergänzung der Informationen aus der stationären Umfelddatenerfassung im Rahmen von SBA formuliert. Die entsprechende Datenanalyse im Hinblick auf Aussagekraft und Güte ist in den Abschnitten 3.4.2 bis 3.4.4 dargestellt. Hier werden die in Befahrungen aufgezeichneten Datensätze der beiden Versuchsfahrzeuge miteinander sowie mit Referenzmessungen, Beobachtungen und stationär erfassten Umfelddaten verglichen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dieser Arbeitsschritt nur exemplarisch anhand singulärer Ereignisse durchgeführt wird, um tendenzielle Aussagen zu der Datenqualität zu ermitteln.

Die Datenanalyse wird jeweils wie folgt gegliedert:

- Allgemeine Erkenntnisse aus der Literatur
- Methodisches Vorgehen zur Datenanalyse
- Analyse der bei den Befahrungen aufgezeichneten Daten
- Prüfung der in Abschnitt 3.3.2 formulierten Hypothese

Auch für eine erweiterte Nutzung stationär erfasster Umfelddaten, die über die bisherige Verwendung in SBA hinausgeht, werden Hypothesen aufgestellt und entsprechende Datenanalysen durchgeführt (siehe Abschnitt 3.5). Untersucht werden die Übertragbarkeit der Relativen Luftfeuchte und der Zusammenhang zwischen der Temperatur der Luft und der Fahrbahnoberfläche.

Als Resultat der Datenanalyse werden die für die Bestimmung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands relevanten und zu verwendenden fahrzeuggenerierten und stationär erfassten Daten festgelegt.

3.3.2 Hypothesen zu den bestimmenden Größen des Fahrbahnzustands

Die nachfolgend untersuchten Umfeldgrößen bestimmen den Zustand der Fahrbahnoberfläche maßgeblich (siehe Tab. 3.1), es stehen jedoch in der Regel keine xFCD zur direkten Ermittlung dieser Größen zur Verfügung. Für jede Umfeldgröße wird eine Hypothese formuliert, anhand der aus der Grundgesamtheit der vorliegenden mobil erfassten Daten potenziell nützliche fahrzeuggenerierte Daten ausgewählt und überprüft werden. Die Fragestellung

lautet hierbei, ob sich xFCD eignen, um weitere Informationen zur Beschreibung von den Fahrbahnzustand bestimmenden Umfeldgrößen zu erhalten.

Fahrbahnzustand

Der Zustand der Fahrbahnoberfläche und die vorherrschende Griffigkeit werden nicht direkt von den Fahrzeugen erfasst. Auf Basis der Literaturanalyse zu der Verwendung von Informationen aus Fahrerassistenzsystemen in kooperativen Systemen (siehe Abschnitt 2.5) wird die folgende Hypothese aufgestellt:

Aus Analysen der Statusmeldungen der Fahrerassistenzsysteme sowie den Differenzen zwischen den Geschwindigkeiten einzelner Räder lassen sich Fahrbahnzustände mit witterungsbedingt reduzierten Griffigkeiten erkennen.

Zur Überprüfung der Hypothese werden fahrzeugseitig die folgenden Informationen und Systeme herangezogen (vergleiche Abschnitt 2.5.2):

- Geschwindigkeiten
- ABS
- ASR
- ESC

Fahrbahn- und Lufttemperatur

Die Temperatur der Fahrbahnoberfläche wird nicht ermittelt, diese stellt im Vergleich zur Bestimmung einer Fahrbahnglätte(gefahr) jedoch die bedeutsamere Größe dar. Unter der Berücksichtigung, dass für die Strahlung als wesentliche Einflussgröße keine Informationen vorliegen und der Annahme, dass bei bestimmten Randbedingungen stationär ein hoher Zusammenhang zwischen den Temperaturen der Fahrbahnoberfläche und der Luft besteht, wird folgende Hypothese formuliert:

Die Fahrbahntemperatur lässt sich bei bestimmten Umfeldbedingungen aus den mobil erfassten Lufttemperaturen ableiten.

Als Hypothese für die mobil erfasste Lufttemperatur gilt:

Die fahrzeuggenerierten Messwerte der Lufttemperatur weisen eine vergleichbare Güte wie die stationär erfassten Werte auf und sind geeignet, diese zu substituieren.

Luftfeuchtigkeit

Aus Fahrzeugen stehen keine Messwerte für die relative Luftfeuchtigkeit oder Hilfswerte, um auf diese rückzuschließen, zur Verfügung. Aus diesem Grund werden in Abschnitt 3.5.2 Messwertschwankungen und die Übertragbarkeit der stationär erfassten relativen Luftfeuchtigkeit überprüft.

Niederschlag

Für den atmosphärischen Niederschlag wird die folgende Hypothese aufgestellt:

Aus den Wischeraktivitäten der Fahrzeuge lässt sich auf Niederschlagsereignisse schließen.

Um diese Aussage zu testen, werden fahrzeugseitig die folgenden Informationen und Systeme genutzt:

- Nässesensor
- Wischerinformation

3.4 Analyse fahrzeuggenerierter Daten

3.4.1 Spezifikation der ausgewählten fahrzeuggenerierten Daten

Die in den Hypothesen im vorherigen Abschnitt ausgewählten fahrzeuggenerierten Daten werden in Tab. 3.2 auf Basis der zur Befahrung eingesetzten Fahrzeuge spezifiziert.

Bezeichnung	Zykluszeit [Sekunden]	Auflösung	Wertebereich
Fahrzeuggeschwindigkeit	0,0002	1	0 .. 325 [km/h]
Geschwindigkeit je Rad	0,02	0,01	0 .. 326,39 [km/h]
Querbeschleunigung	0,02	0.01	-1,27 .. 1,27 [g]
ABS Status	0,1	1	0 .. 1 [-]
ASR-Anforderung	0,02	1	0 .. 1 [-]
Bremsdruck	0,02	0.1	0 .. 409,4 [bar]
ESC Status	0,02	1	0 .. 1 [-]
Lufttemperatur	0,1	0.5	-50 .. 77 [°C]
Nässesensor diskret	0,2	1	0 .. 1 [-]
Wischer Intervall	0,1	1	0 .. 5 [-]
Wischer Stufe	0,2	1	0 .. 2 [-]
Wischer Status	0,2	1	0 .. 1 [-]

Tab. 3.2 Spezifikation der ausgewählten xFCD auf Basis der Versuchsfahrzeuge

Diese Informationen werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Güte und Aussagekraft bei der Ermittlung witterungsbedingter Fahrbahnzustände analysiert. Bei positiven Resultaten werden die Daten zur Modellierung der Fahrbahnzustände herangezogen (siehe Kapitel 4).

3.4.2 Witterungsbedingter Fahrbahnzustand

Für den witterungsbedingten Fahrbahnzustand wurden Hypothesen für fahrzeuggenerierte Geschwindigkeiten und Informationen aus FAS formuliert, die nachfolgend geprüft werden.

Geschwindigkeiten: Allgemeine Erkenntnisse aus der Literatur

In Abschnitt 3.3 wird die Hypothese aufgestellt, dass durch einen Abgleich der Fahrzeuggeschwindigkeit mit den Geschwindigkeiten der einzelnen Räder auf (extreme) Fahrbahnzustände rückgeschlossen werden kann. Unterstützt wird die Aussage durch die Tatsache, dass die in Abschnitt 3.3 beschriebenen Fahrerassistenzsysteme die Differenzen zwischen den Geschwindigkeiten einzelner Räder interpretieren, um auf Änderungen in den Fahrbedingungen zu schließen.

Geschwindigkeiten: Methodisches Vorgehen zur Datenanalyse

Um Zusammenhänge zu erfassen, werden eindeutig ausgeprägte Fahrbahnzustände sowie insbesondere die Übergänge zwischen unterschiedlichen Fahrbahnzuständen entlang der Strecke detailliert untersucht. Hierzu werden fahrzeuggenerierte Daten aus Befahrungen bei schneebedeckter/eisiger Fahrbahnoberfläche mit trockenen und nassen Fahrbahnzuständen verglichen. Die räumlich und zeitlich verorteten Informationen zu den Fahrbahnzuständen werden auf Basis der Videoaufzeichnungen und der GPS-Tracks generiert. Aus den fahrzeuggenerierten Daten werden die folgenden Kenngrößen berechnet und dargestellt:

- Längsbeschleunigung (berechnet nach (3.1)) und die auf dem CAN-Bus vorliegende Information zur Querbeschleunigung, sowie daraus abgeleitete Größen (siehe unten),
- die berechneten Differenzen zwischen Fahrzeug- und Einzelradgeschwindigkeiten,
- die berechneten Differenzen zwischen den Geschwindigkeiten des Fahrzeugs und den einzelnen Rädern, in Relation zu der Fahrzeuggeschwindigkeit,
- die berechneten Varianzen zwischen den Geschwindigkeiten der Räder und daraus abgeleiteter Kenngrößen (siehe unten).

Zusätzlich wurden im Rahmen des Data Mining-Prozesses, dessen Ziel es war, Zusammenhänge zwischen den untersuchten Daten und den befahrenen Fahrbahnzuständen zu entdecken, der Bremsdruck und die Informationen der Lenkbewegungen berücksichtigt und grafisch mit den oben genannten Kenngrößen dargestellt.

Geschwindigkeiten: Analyse der bei der Befahrung aufgezeichneten Daten

Während des Prozesses der Datenanalyse stellte sich heraus, dass sich mittels der auf 1-Sekunden-Intervalle aggregierten Werte keine Merkmale in Form von geringen Abweichungen erkennen ließen, da gemäß Tab. 3.2 50 Einzelwerte für Radgeschwindigkeiten zu einem Wert aggregiert werden. Hierzu ist in Bild 3.4 dargestellt, dass die Geschwindigkeiten von einzelnen Rädern und dem Fahrzeug nur geringfügige Unterschiede aufweisen, die mit aggregierten Werten nicht erfasst werden können. Aus diesem Grund wurde die Analyse der fahrzeuggenerierten Daten zusätzlich mit den unveränderten Rohdaten durchgeführt.

Es ließen sich jedoch auch auf Basis intensiver Untersuchungen der Rohdaten keine Zusammenhänge oder Auffälligkeiten identifizieren.

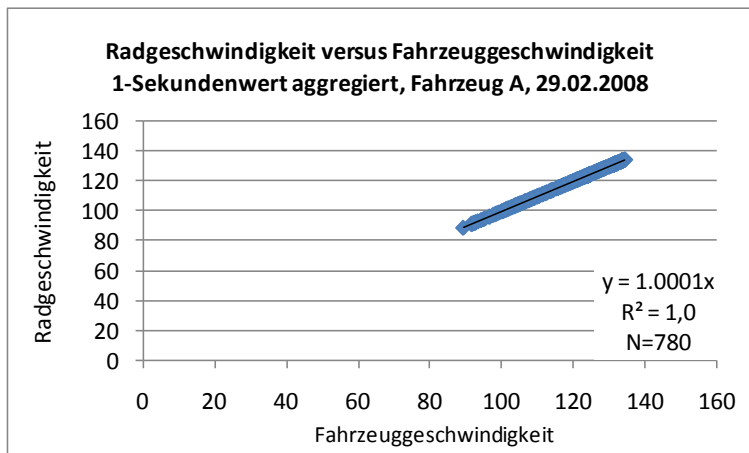


Bild 3.4 Korrelation Rad- vs. Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h], 29.02.2008

Geschwindigkeiten: Prüfung der Hypothese

Anfänglich vermutete Zusammenhänge ließen sich statistisch nicht belegen und reproduzieren. Die Geschwindigkeiten sowie daraus abgeleitete Kenngrößen können nicht zu der Modellierung witterungsbedingter Fahrbahnzustände herangezogen werden. Die Hypothese aus Abschnitt 3.3 lässt sich nicht bestätigen.

FAS: Allgemeine Erkenntnisse aus der Literatur

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigen, dass in vielen Projekten Statusinformationen des ABS als Eingangsgröße in Modelle zur Bestimmung des Fahrbahnzustands verwendet werden (vergleiche Abschnitt 2.5). HUBER [2001] gibt jedoch an, dass die Antriebsschlupf- und Anti-Blockier-Regelungseingriffe im normalen Fahrbetrieb nicht oder nur selten auftreten. Hintergrund ist, dass die Fahrerassistenzsysteme nicht der Reibwerterkennung, sondern der Stabilisierung des Fahrzeugs in kritischen Situationen dienen und zudem unter anderem von individuellem Fahrerverhalten, dem Reifenzustand, von Steigung und Trassierung sowie der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängen [HUBER, 2001].

FAS: Methodisches Vorgehen zur Datenanalyse

Es wird die Datenbasis aller aufgezeichneten Befahrungen analysiert, um jene Situationen herauszufiltern und gezielt zu untersuchen, in denen zur Stabilisierung des Fahrzeugs die Fahrerassistenzsysteme ABS, ASR und/oder ESC aktiv waren. Die Zielsetzung der vergleichenden Datenanalyse ist es, Zusammenhänge zwischen Änderungen der Statusmeldungen der Fahrerassistenzsysteme und Änderungen des Fahrbahnzustands zu ermitteln.

FAS: Analyse der bei der Befahrung aufgezeichneten Daten

Es wurde festgestellt, dass die Fahrerassistenzsysteme, trotz der vergleichsweise umfangreichen Datengrundlage von mehr als 5000 km Befahrungen, lediglich während einer einzigen Fahrt eingegriffen hatten.

Diese einzelne Situation, in der Aktivitäten der Fahrerassistenzsysteme zu verzeichnen waren, wird nachfolgend beschrieben.



Bild 3.5 Bild einer Fahrt auf winterglatter Fahrbahn. BAB A 9, 01.03.2008

Es handelt sich um eine Fahrt am 01. März 2008 auf der BAB A 9 in Richtung Norden. Während der Befahrung treten eisglatte Fahrbahnoberflächen auf (siehe beispielhaft Bild 3.6), weshalb die Durchschnittsgeschwindigkeit des Fahrzeugkollektivs sehr gering ist: Wie aus Bild 3.6 ersichtlich, betragen die gefahrenen Geschwindigkeiten über weite Teile der Fahrt weniger als 30 km/h.

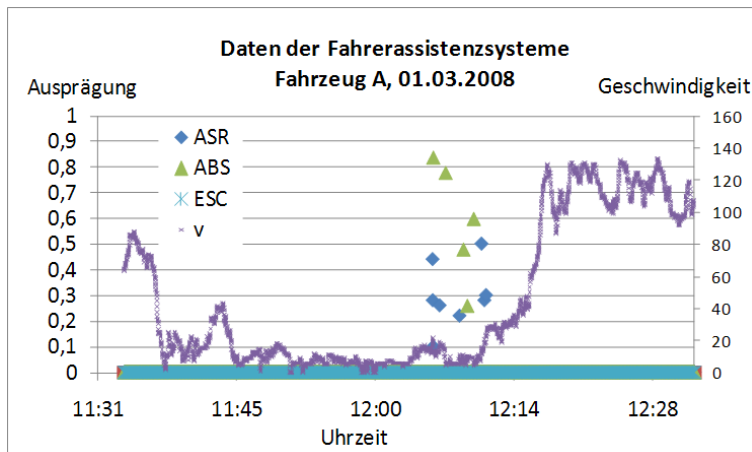


Bild 3.6 Status Fahrerassistenzsysteme. Fahrt BAB A 9, 01.03.2008

Das Bild 3.6 zeigt, dass die Fahrerassistenzsysteme nur in einem begrenzten Zeitintervall zwischen 12:00 Uhr und 12:14 Uhr regelnd eingriffen. Bei der Sichtung der zugehörigen Videoaufzeichnung wird deutlich, dass für den Teil der Strecke, auf dem die gefahrene Geschwindigkeit unterhalb 50 km/h liegt, eisglatte Fahrbahnzustände vorliegen (siehe beispielhaft Bild 3.5). Im stromabwärtigen Bereich mit höheren Geschwindigkeiten ist die Fahrbahnoberfläche teilweise sehr nass, eine vereiste Fahrbahn tritt nicht mehr auf.

Die Sichtung des Videomaterials zeigt, dass während großer Zeitbereiche der Fahrt kritische Fahrbahnzustände in Form von winterglatten und nassen Fahrbahnzuständen existierten. Die Fahrerassistenzsysteme griffen lediglich während eines vergleichsweise kleinen Zeitraums ein, obwohl sich der Fahrbahnzustand an dem Ort des Eingriffs der Systeme hinsichtlich der Kritikalität augenscheinlich nicht von weiten Teilen des Fahrbahnzustands während dieser Fahrt unterscheidet. Hieraus wird gefolgert, dass das individuelle Fahrverhalten einen großen Einfluss auf den Status der Fahrerassistenzsysteme hat.

Um das Fahrverhalten zu analysieren, sind in Bild 3.7 für die oben geschilderte Fahrt die Längs- und Querregelung über die Uhrzeit aufgetragen, wobei als Merkmale die Längs- und Querbeschleunigung untersucht werden. Dabei wird der Verlauf der Daten im Hinblick auf die Differenzen aufeinanderfolgender Werte sowie die absolute Ausprägung analysiert, um so Auffälligkeiten zu identifizieren. Messwerte der Querbeschleunigung stehen fahrzeuggeneriert zur Verfügung, die (mittlere) Fahrzeug-Längsbeschleunigung wird gemäß (3.1) als lineare Änderung der Geschwindigkeit (Δv) pro verstrichenem Zeitraum Δt berechnet.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (3.1)$$

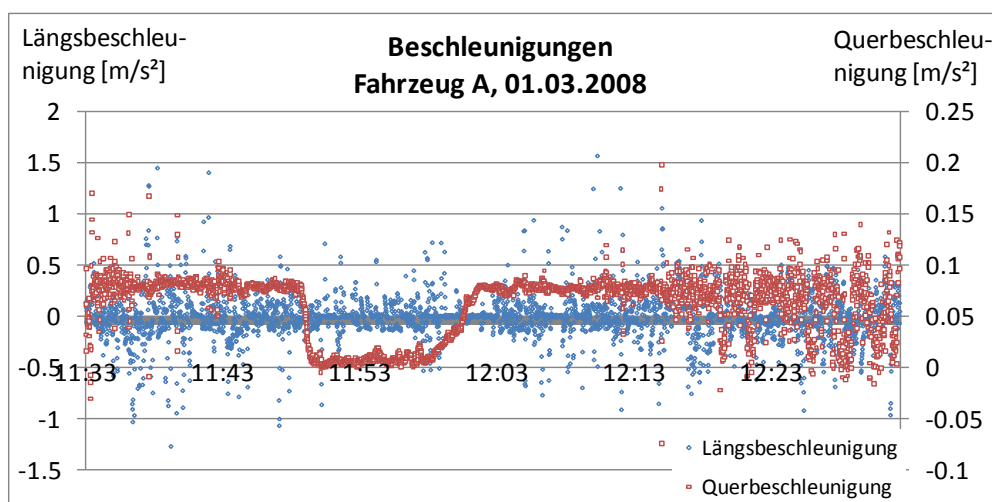


Bild 3.7 Beschleunigungen. Fahrt BAB A 9, 01.03.2008

Da für den Zeitraum, in dem die Fahrerassistenzsysteme eingriffen, auch eine exakte und umfassende Untersuchung keine Auffälligkeiten und Muster in den Beschleunigungswerten erkennen lässt, wird geschlossen, dass die Beschleunigungen nicht ursächlich für die Aktivität der Fahrerassistenzsysteme sind.

Eine ergänzende Analyse des Bremsdrucks (siehe Abschnitt 3.3.2) und der Lenkbewegungen ließ keine Auffälligkeiten und keinen Zusammenhang zwischen diesen Größen und dem Status der Fahrerassistenzsysteme erkennen. Während des genannten Zeitraums befährt der Fahrer ausschließlich den rechten Fahrstreifen, es sind keine abrupten Lenkbewegungen zu verzeichnen.

Diese Ergebnisse machen deutlich, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Fahrerassistenzsysteme keine eindeutig zu interpretierenden Informationen liefern können. Dieses Erkenntnis wird bei der Modellentwicklung in Kapitel 4 berücksichtigt.

FAS: Prüfung der Hypothese

Die in Abschnitt 3.3 formulierte Hypothese hinsichtlich der Aussagekraft von Informationen aus Fahrerassistenzsystemen bei der Bestimmung des Fahrbahnzustands kann nicht bestätigt werden. Die Informationen der Fahrerassistenzsysteme können prinzipiell genutzt werden, sie sollten jedoch nicht als alleinige und nicht als eindeutige Informationsquelle verwendet werden.

3.4.3 Luft- und Fahrbahntemperatur

Allgemeine Erkenntnisse aus der Literatur

Es ist bekannt, dass fahrzeugseitig erhobene Lufttemperaturen von der gefahrenen Geschwindigkeit und bei hohen Verkehrsdichten vom Umgebungsverkehr beeinflusst werden. Diese Randbedingungen sollen gemäß PETTY UND MAHONEY [2007] bei der Nutzung fahrzeuggenerierter Lufttemperaturen berücksichtigt werden.

Methodisches Vorgehen zur Datenanalyse

Zur Bewertung der Qualität der fahrzeuggenerierten Lufttemperaturen werden die Messwerte aus beiden Versuchsfahrzeugen sowohl miteinander, als auch mit Messungen aus folgenden Quellen verglichen:

- Referenzmessungen mit einem Psychrometer Handmessgerät, das auf eine Mess- und Ablesegenauigkeit von $\pm 0,05$ Kelvin (K) geeicht ist. Die Auflösung der Ableseskala beträgt 0,2 K, so dass insgesamt von einer Ungenauigkeit von $\pm 0,3$ K bei den Temperaturmessungen ausgegangen werden kann.
- Sensoren zur Erfassung der Lufttemperatur im Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“, die als „geeignet für den Einsatz in SBA“ bewertet wurden [DINKEL ET AL., 2007]. Es werden die Sensoren Thies Hygro Thermogeber und Vaisala HMP45D verwendet, da diese Sensoren im Vergleich zu Referenzmessungen mit einem Psychrometer Handmessgerät sehr gute Übereinstimmungen erzielten [DINKEL ET AL., 2007].

Analyse der bei der Befahrung aufgezeichneten Daten

Um die mobile mit der stationären Erfassung von Lufttemperaturen zu vergleichen, sind in Bild 3.8 die folgenden Messwerte gegenübergestellt:

- Fahrzeuggenerierte Lufttemperaturen aus Befahrungen, in beiden Fahrtrichtungen bei Vorbeifahrten auf Höhe des Testfelds für Umfelddatenerfassung ermittelt (mobile Erfassung: in der Grafik als LT_Fz_A_M/FS - Lufttemperatur aus Fahrzeug A in Fahrtrichtung München beziehungsweise Freising bezeichnet)

- Lufttemperaturen aus Fahrzeug, das im Testfeld für Umfelddatenerfassung parkt (stationäre Erfassung mit mobilem Messsystem: In der folgenden Abbildung mit LT_Fz_V_Testfeld für die Lufttemperaturen des im Testfeld für Umfelddatenerfassung parkenden Fahrzeugs V tituliert)
- Messungen im Testfeld mit einem Psychrometer Handmessgerät (stationäre Erfassung)
- Messwerte der Sensoren Thies Hygro Thermogeber und Vaisala HMP45D (stationäre Erfassung)

Bei der Interpretation des Bild 3.8 ist zu beachten, dass die fahrzeuggenerierten Lufttemperaturen eine Auflösung von 0,5 °C aufweisen (vergleiche Tab. 3.2), wohingegen die stationär erfassten Messwerte gemäß TLS [BAST, 2002] mit 0,1 °C aufgelöst sind. Für die in den Fahrzeugen ermittelten Lufttemperaturen wurde für die Zeitdauer der Vorbeifahrt am Gelände des Testfeldes „Eching Ost“ der arithmetische Mittelwert der nach der Datenaufbereitung gemäß Abschnitt 3.2.4 im 1-Sekundenintervall vorliegenden mobil erfassten Messwerte für Lufttemperatur berechnet.

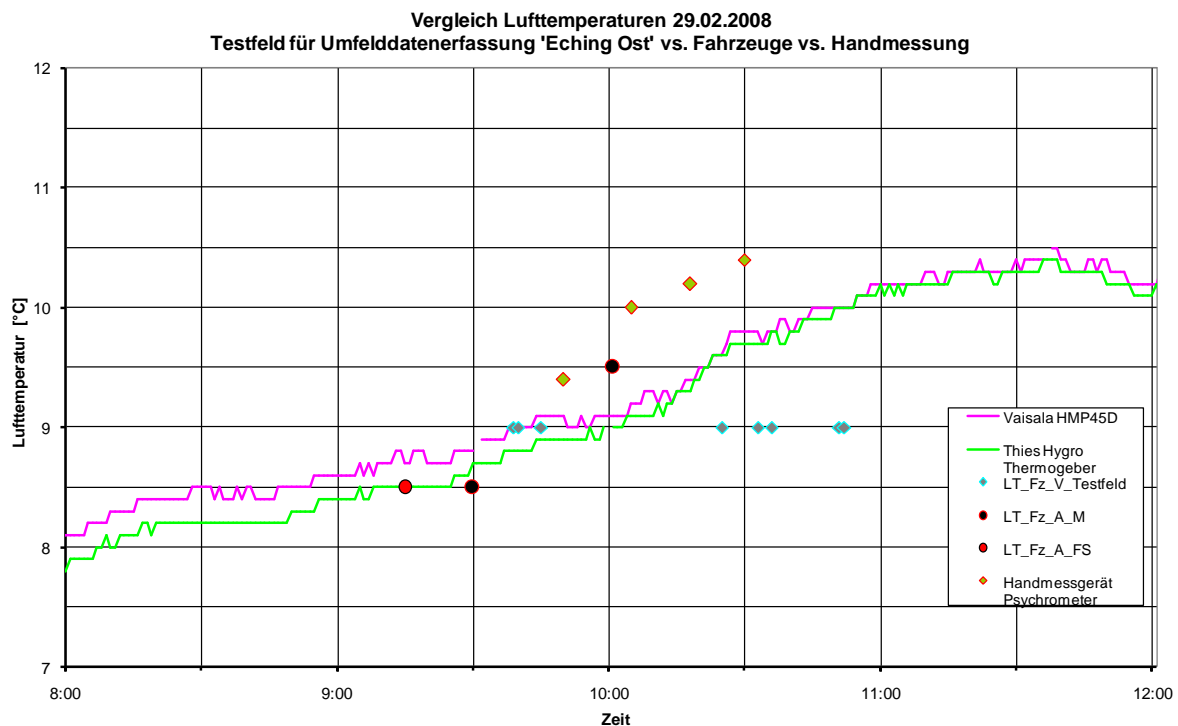


Bild 3.8 Beispiel für den Vergleich der Lufttemperaturen aus verschiedenen Quellen, 29.02.2008

Zu dem Zeitpunkt der in Bild 3.8 dargestellten Messungen hat es geregnet und die Fahrbahnoberfläche war nass.

Im direkten Vergleich mit den im Testfeld durchgeführten Handmessungen mit einem Psychrometer werden die xFCD als plausibel eingestuft. Differenzen lassen sich aufgrund der unterschiedlichen Zeitpunkte der Messungen nicht bestimmen. Es zeigt sich, dass die in beiden Fahrzeugen generierten Messwerte nahe an, beziehungsweise in der als plausibel einge-

schätzten Kurvenschar der Sensoren Vaisala HMP45D und Thies Hygro Thermogebler liegen. Die Temperaturabweichungen betragen nie mehr als 1,0 °C.

Ergänzend werden Regressionsanalysen für die fahrzeuggenerierten Lufttemperaturen und die stationär erhobenen Messwerten des Sensors Thies Hygro Thermogebler durchgeführt (siehe Bild 3.9). Allgemeine Beschreibungen zum Vorgehen und Hinweise zu der Interpretation von Regressionsanalysen finden sich in Anhang 1. Für beide Fahrzeuge können sehr hohe Zusammenhänge ermittelt werden:

- Für das Fahrzeug A wurde auf Basis von 79 gegenübergestellten Messwertpaaren ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,99 berechnet. Die Regressionskonstante b_0 beträgt 0,106, als Regressionskoeffizient wurde für das Fahrzeug A der Wert 0,94 ermittelt. Das Bild 3.9 stellt die Regression für Fahrzeug A dar.

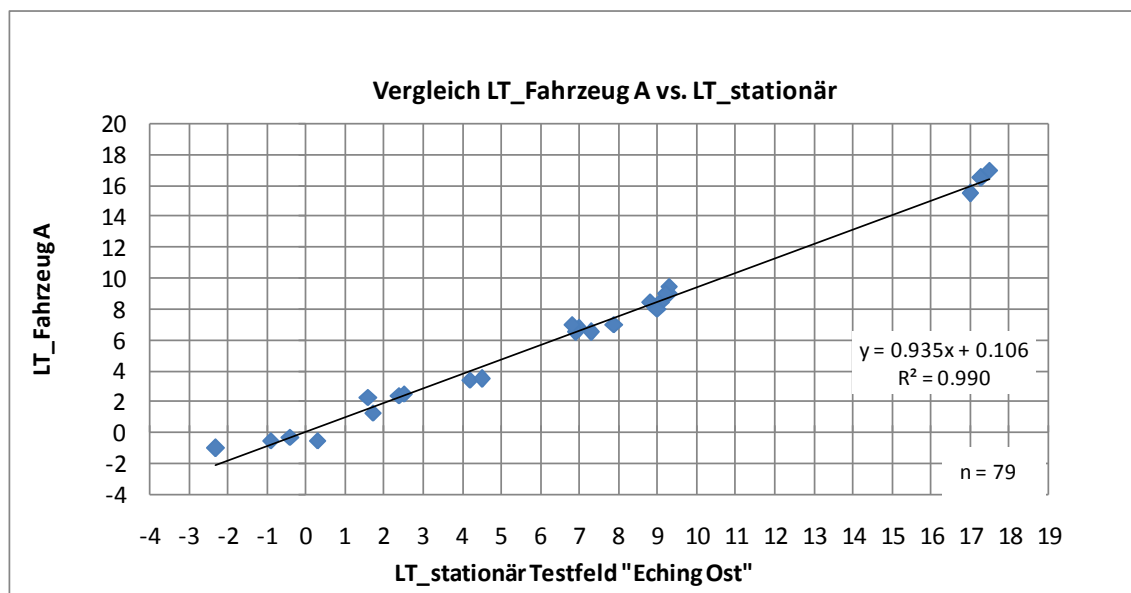


Bild 3.9 Regressionsanalyse zum Vergleich mobil/stationär erfasster Lufttemperaturen [°C]

- Der Vergleich von 112 Messwertpaaren aus Fahrzeug V und den stationär ermittelten Lufttemperaturen des Sensors Thies Hygro Thermogebler liefert als Ergebnis für R^2 den Wert 0,99. Die Regressionskonstante beträgt 0,41, der Regressionskoeffizient wurde zu 0,90 bestimmt.

Die nachfolgende Grafik stellt die Regression zwischen den Lufttemperaturen der beiden Fahrzeuge exemplarisch für eine Fahrt im Oktober 2008 dar ($n = 5742$ Messwertpaare). Zwischen den Messwerten der beiden Sensoren besteht für dieses Beispiel ein hoher Zusammenhang ($R^2 = 0,89$). Diese Fahrt zeichnet sich dadurch aus, dass sich die Temperaturen der Luft um den Nullpunkt bewegen.

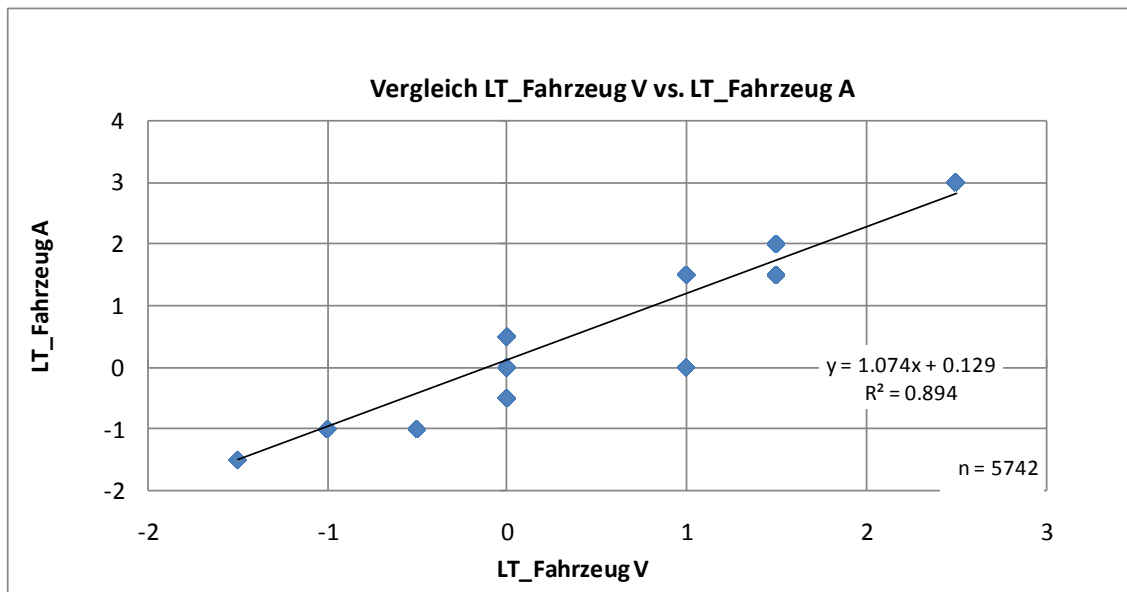


Bild 3.10 Regressionsanalyse für die aus den Fahrzeugen A und V erfassten Lufttemperaturen [°C]

Der Verlauf der fahrzeuggenerierten Lufttemperatur im Vergleich zu den jeweils passierten Messstellen ist in Bild 3.11 dargestellt. Auch hier zeigt sich eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen unterschiedlichen Datenquellen. Es wird anschaulich dargestellt, dass lokal stationierte Sensoren naturgemäß keine Schwankungen der Temperaturen entlang des Streckenverlaufs erfassen können.

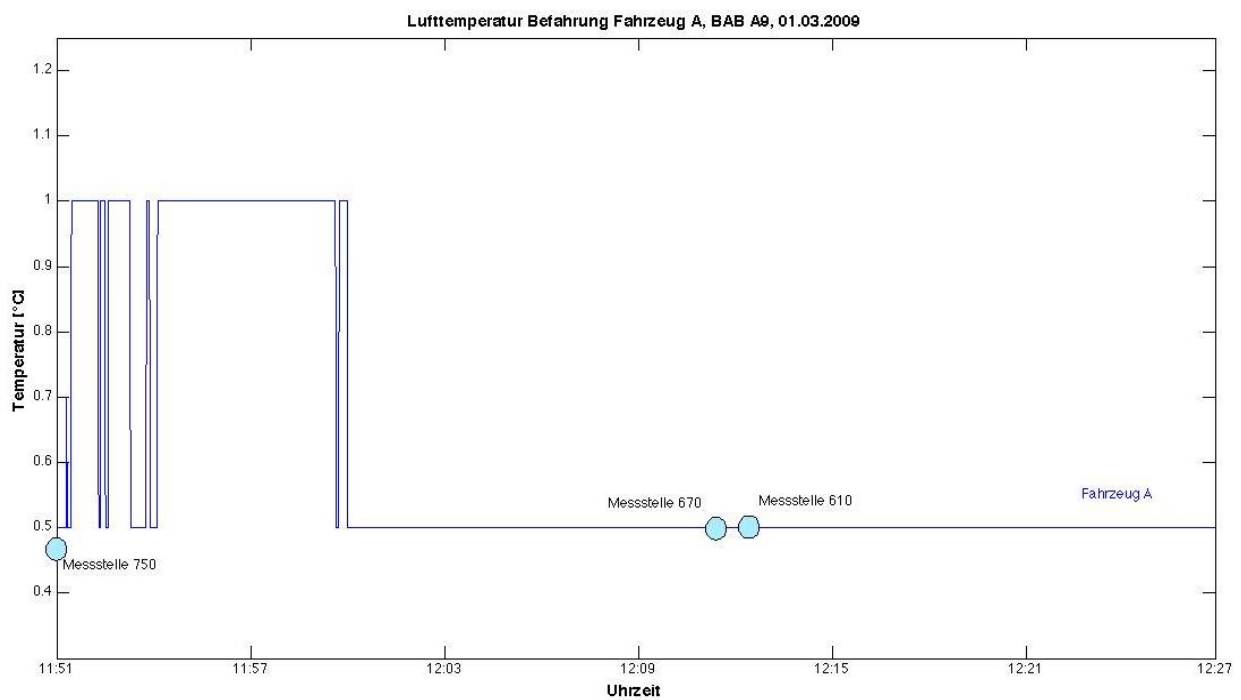


Bild 3.11 Beispiel für Lufttemperatur Fahrzeug A versus stationäre Sensoren BAB A 9, 01.03.2009

Prüfung der Hypothese

Die fahrzeuggenerierten Lufttemperaturen werden in Anlehnung an die Bewertungen im Rahmen des Testfelds für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ (z. B. DINKEL ET AL., 2007) als geeignet bewertet, um zu der Ermittlung des Fahrbahnzustands beizutragen. Die xFCD können als zusätzliche streckenbezogene Stützstellen für die stationär erfassten Daten dienen.

Die in Abschnitt 3.3 formulierte Hypothese wird bestätigt: Die fahrzeuggenerierten Lufttemperaturen weisen eine vergleichbare Güte wie die Messwerte der stationären Erfassung auf und eignen sich zur Substitution beziehungsweise Verdichtung der Information entlang der Strecke. Bei der Verwendung der Daten sind die genannten Unterschiede in den Auflösungen der Daten zu beachten.

3.4.4 Niederschlag

Allgemeine Erkenntnisse aus der Literatur

Über den Wischerstatus (an/aus) kann auf Niederschlagsereignisse rückgeschlossen werden. Die gewählte Intervallstufe kann Hinweise auf die Niederschlagsintensität geben. Basierend auf dieser Informationsquelle ist jedoch keine qualitative Aussage zu der Niederschlagsart möglich. Zur Nutzung der fahrzeuggenerierten Informationen von Wischern und Nässe Sensoren ist es hilfreich zu wissen, nach welchem Muster die Fahrer den Wischer betätigen. Untersuchungen haben ergeben, dass Fahrer mittleren Alters die Wischer am häufigsten nutzen und dass ältere Fahrer häufig nach dem Betätigen des Scheibenwischers die Geschwindigkeit reduzieren und den Abstand zum Vordermann vergrößern [PETTY UND MAHONEY, 2007]. In diesem Zusammenhang ist die Charakterisierung verschiedener Fahrertypen interessant. NÖCKER ET AL. [2006] haben belegen können, dass die gefahrene Geschwindigkeit Einfluss auf das Empfinden der Niederschlagsintensität hat. Mit steigender Geschwindigkeit werden bei identischen Niederschlagsereignissen die Wischergeschwindigkeiten größer gewählt.

Die von fahrzeugseitigen Nässe Sensoren zur automatischen Wischerregelung registrierte Menge hängt ebenfalls von der gefahrenen Geschwindigkeit ab. Der Sensor interpretiert Nebel, der an der Scheibenoberfläche kondensiert, sowie auf der Scheibe schmelzenden Schnee fälschlicherweise als fallenden Niederschlag [WILLWARN, 2007].

Gemäß HUBER [2001] ist die Erfassung von Niederschlägen mit Hilfe der Scheibenwischeraktivität beeinflusst von der Niederschlagsintensität, der Fahrtgeschwindigkeit des Fahrzeugs, von anderen Verkehrsteilnehmern (Sprühhäfen) und bei manueller Betätigung ohne automatische Regelung der Wischeraktivität vom Fahrer selbst. Für eine exakte Beurteilung der Wischerinformationen erachtet HUBER [2001] die folgenden zusätzlichen Systeme als notwendig: Reibwertsysteme zur Erfassung des streckenbezogenen Wasserfilms auf der Fahrbahnoberfläche, sowie Informationen aus Abstandsregelungssystemen, um auf Nässe aufwirbelungen des umgebenden Verkehrs rückschließen zu können.

Methodisches Vorgehen zur Datenanalyse

Das Ziel der Datenanalyse ist eine Überprüfung der automatisch geregelten Wischertätigkeiten und der in diesem Zusammenhang verfügbaren fahrzeuggenerierten Daten.

Bei Fahrzeug A wurde die Wischeraktivität stets automatisch über Sensorwerte des Nässe-sensors geregelt. Die Qualität dieser automatischen Regelung wird dreifach überprüft durch:

- Die subjektive Einschätzung der Fahrer während der Befahrungen
- Die Analyse einer komplexen Nässe-Situation
- Die Sichtung der Videoaufzeichnungen zur Plausibilisierung der gespeicherten Daten zur Wischeraktivität

Eine vorab durchgeführte Gegenüberstellung der Wischerintervalle zu den im Testfeld für Umfelddatenerfassung erfassten Messwerten für Niederschlagsintensität und Wasserfilmdicke lieferte keine aussagekräftigen Ergebnisse. Das eingestellte Wischerintervall zeigt keinen Zusammenhang zu den genannten Messgrößen oder den daraus abgeleiteten Nässe-Stufen [FGSV, 2010a]. Wie bei HUBER [2001] erfolgt die Überprüfung der Wischertätigkeiten ohne einen Abgleich mit den quantitativen Nässeinformationen aus stationärer sensorielle Erfassung.

Analyse der bei der Befahrung aufgezeichneten Daten

Überprüfung durch die Fahrer

Die Fahrer hatten die Instruktion, das installierte Mikrofon zu verwenden, um während der Befahrungen für sie unplausible automatische Wischeraktivitäten zu dokumentieren. Diesbezüglich fanden keine Aufzeichnungen statt. Auch eine nachträgliche Befragung der drei Fahrer kam zu keinem anderen Ergebnis: Das automatisch geregelte Wischerintervall entsprach stets dem Fahrerwunsch.

Überprüfung mittels Situationsanalyse

In Bild 3.12 sind die relevanten Informationen zu den Wischertätigkeiten für eine komplexe Situation mit unterschiedlichen Umfeldbedingungen beispielhaft dargestellt. Es handelt sich um eine Fahrt auf der BAB A 9 am 26.03.2008, während der sowohl kein Niederschlag, Niederschlag als auch Sprühhahnen bei trockenen und feucht-nassen Fahrbahnzuständen registriert werden.

In dem Diagramm sind Messwerte des fahrzeuginternen Niederschlagssensors dargestellt, wobei nur binäre Aussagen (Nässe erkannt [1] oder keine Nässe erkannt [0]) verfügbar sind. Durch die Aggregation auf das 1-Sekundenintervall ergeben sich auch Zwischenwerte innerhalb des Wertebereichs von 0 bis 1. Man kann in Bild 3.12 erkennen, dass zu Beginn der Fahrt sowie mehrmals während der Fahrt im Fahrzeug-CAN-Bus die Information „Nässe erkannt“ vorliegt.

Zudem sind in dieser Grafik die gewählten Intervalle und Wischerregelungen abgebildet. Verfügbar sind „Wischer aus“, „Intervall“ (basierend auf NässeSensor oder manueller Feineinstellung) sowie die Wischerstufen 1 und 2. Die Stufe 2 ist schneller als Stufe 1, genauere Informationen zu den Wischergeschwindigkeiten liegen nicht vor. Bis zu der Befahrungsdauer von rund 500 Sekunden ist das Automatikintervall aktiviert, im Anschluss wird in Übereinstimmung mit der NässeSensorausgabe manuell die Wischerstufe 1 gewählt. Während der Fahrt finden vereinzelte Scheibenreinigungsvorgänge statt.

Die Intervallstufen decken einen Wertebereich von 0 bis 15 ab, wobei „0“ lange Pausen bedeutet und die Stufe „15“ kurze Pausen zwischen den Wischvorgängen repräsentiert. Das Bild 3.12 zeigt, dass in der untersuchten Situation kurz vor dem Fahrtzeitpunkt von 400 Sekunden die höchste Intervallstufe in Höhe von 13 gewählt ist.

Aufschlussreich ist nun die Sichtung der Videoaufzeichnungen zu dieser Fahrt. Hier lässt sich erkennen, dass es sich bei der Nässe zu Beginn der Fahrt um starke Sprühfahnen der vorausfahrenden Fahrzeuge handelt.

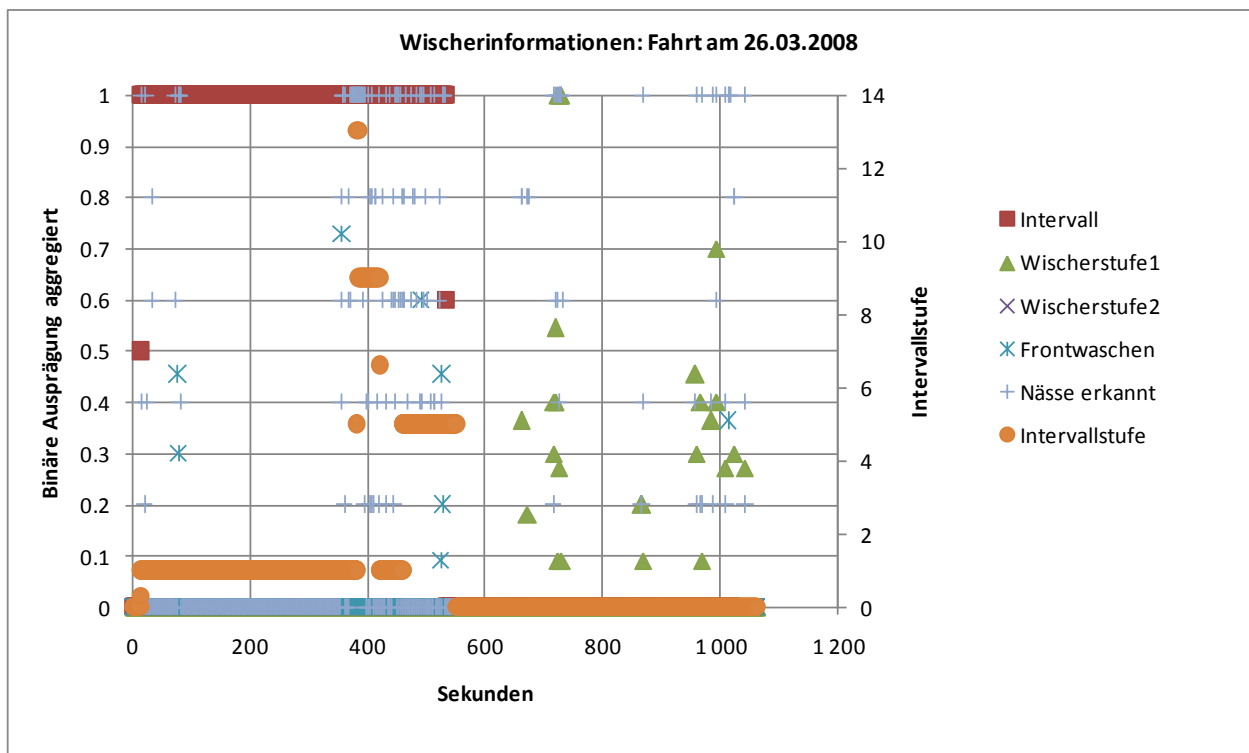


Bild 3.12 Beispiel für Wischerinformationen, 26.03.2008

Die Fahrt findet weitestgehend bei trockenen Umfeldbedingungen statt, wie Bild 3.13 exemplarisch zeigt. Die Erhöhung der Intervallstufe nach einer Fahrtdauer von rund 400 Sekunden wurde durch den Waschvorgang auf der Frontscheibe ausgelöst (vergleiche Bild 3.13).



Bild 3.13 Scheibenreinigungsvorgang - Bild der Videosequenz, 26.03.2008

Dieses Resultat macht deutlich, dass Informationen zu Reinigungsvorgängen unbedingt bei der Interpretation der fahrzeuggenerierten Wischerinformationen berücksichtigt werden müssen.

Überprüfung mittels Videoanalyse

Eine weitere Überprüfung findet durch die Analyse der während der Fahrten aufgezeichneten Videos statt. In 10-Sekunden-Schritten werden Videosequenzen gesichtet und die Wischeraktivität hinsichtlich der folgenden Kriterien beurteilt und klassifiziert:

- Wischer fälschlich an
- Wischer fälschlich aus
- Wischer korrekt an
- Wischer korrekt aus
- Intervall zu langsam
- Intervall zu schnell
- Intervall korrekt

Nachfolgend werden beispielhaft die Bewertungen der Wischeraktivitäten dreier Fahrten vorgestellt, die sich im Hinblick auf Nässeintensitäten und Niederschlagsarten unterscheiden.

Das erste Video dokumentiert eine Fahrt am 20.03.2008 auf der BAB A 92 (vergleiche exemplarisch Bild A2.1 in Anhang 2). Qualitativ traten bei dieser Befahrung die Niederschlagsarten Schnee und Schneeregen sowie Trockenheit auf. Bei aktivem Wischer war stets das Intervall 1 gewählt.

Das Ergebnis der Bewertung der Wischertätigkeit bei diesen Niederschlagsarten zeigt Bild 3.14.

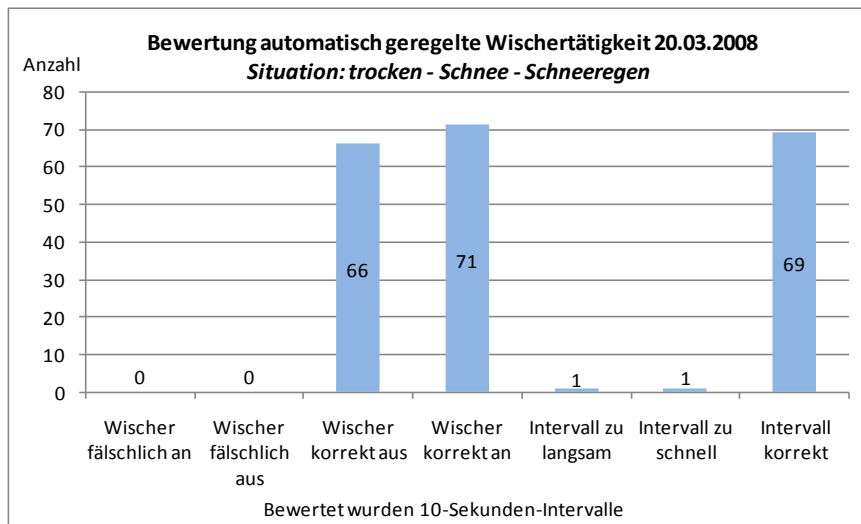


Bild 3.14 Bewertung Wischerregelung, 20.03.2008

Der Wischerstatus wurde jeweils als „korrekt an“ und „korrekt aus“ bewertet. Bezüglich der Wahl des Intervalls wurde in je einem 10-sekündigen-Intervall das Wischerintervall als „zu langsam“ beziehungsweise als „zu schnell“ beurteilt. Dies entspricht je einem Anteil von 1,4 % der insgesamt analysierten Intervalle.

Leichter Niederschlag sowie zum Teil Sprühhfahnen ohne Niederschlag sind die im zweiten untersuchten Szenario vorherrschenden Umfeldbedingungen. Das Bild A2.2 in Anhang 2 zeigt eine Aufnahme der Befahrung am 29.02.2008. Während der gesamten Fahrt wurde der Wischer auf Intervallstufe 1 betrieben, was durchgehend als korrekt eingestuft wird (vergleiche Bild 3.15). Für drei der untersuchten 10-Sekunden-Intervalle wurde das automatisch geregelte Intervall als „zu langsam“ eingestuft, was für diese Fahrt einem Anteil von 4,0 % entspricht.

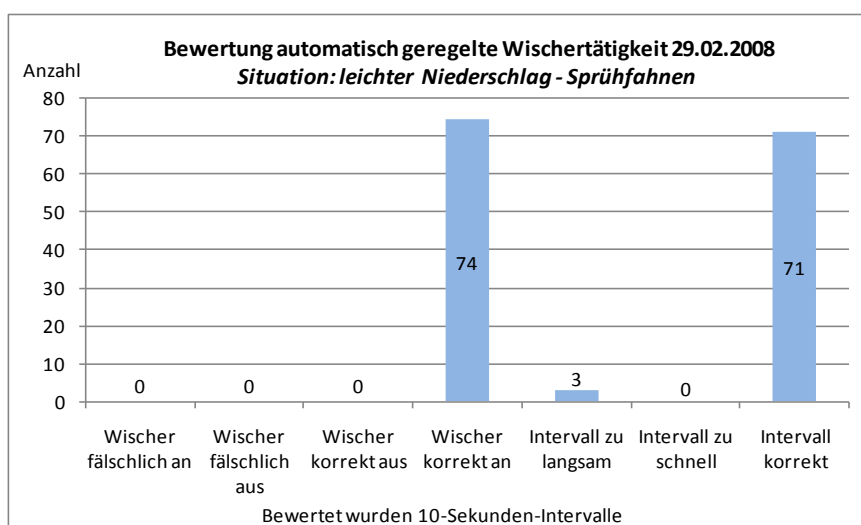


Bild 3.15 Bewertung Wischerregelung, 29.02.2008

Im dritten Beispiel vom 17.03.2008 (vergleiche Bild 3.16) war durchgängig die Intervallstufe 5 aktiv. Auch hier konnte die Sichtung der Videoaufzeichnung der Fahrt die Plausibilität der Wischeraktivität bestätigen.

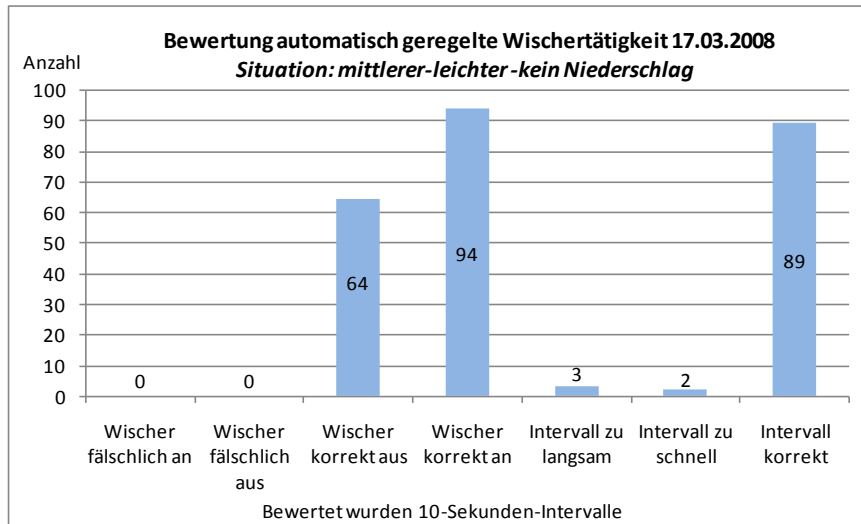


Bild 3.16 Bewertung Wischerregelung, 17.03.2008

Prüfung der Hypothese

Zusammenfassend werden die Daten der automatischen Wischerregelung als geeignet beurteilt, um sie bei der Bildung einer streckenbezogenen Aussage zu der vorherrschenden Nässe zu nutzen und um auf Niederschlagsereignisse rückzuschließen. Unmittelbar vorangegangene Scheibenwischvorgänge sind bei der Verwendung der Wischerinformationen unbedingt zu berücksichtigen. Die in Abschnitt 3.3 formulierte Hypothese lässt sich somit bestätigen.

3.5 Analyse stationär erfasster Daten

3.5.1 Luft- und Fahrbahntemperatur

Allgemeine Erkenntnisse

Untersuchungsergebnisse zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und der Fahrbahnoberflächentemperatur [BOGREN ET AL., 2001].

In Bild 3.17 sind exemplarisch die Tagesganglinien für Luft- und Fahrbahnoberflächentemperaturen verschiedener Sensoren im Testfeld „Eching Ost“ gegenübergestellt. Die Messwerte des beispielhaft ausgewerteten 22.03.2008 zeigen für die Zeiträume zwischen circa 0 Uhr und 7 Uhr sowie von 21 Uhr bis 24 Uhr näherungsweise einen linearen Zusammenhang. Für diese Zeitbereiche wird überprüft, ob eine Modellierung der Fahrbahntemperatur aus den Werten der Lufttemperatur möglich ist.

Das Bild 3.17 lässt erkennen, dass die Temperatur der Fahrbahnoberfläche (dargestellt als Sensor_FBT1, Sensor_FBT2 und Sensor_FBT3) zwischen 0 Uhr und 7 Uhr unterhalb 0 °C liegt, wohingegen sich die Lufttemperatur im positiven Temperaturbereich bewegt. Im Lauf des Vormittags steigt die Fahrbahntemperatur aufgrund der Bestrahlung und der thermischen Eigenschaften des Fahrbahnbelags im Vergleich zu der Lufttemperatur stärker. Die Ganglinienverläufe zeigen zudem, dass die Ermittlung eines Zusammenhanges zwischen Luft- und Fahrbahnoberflächentemperatur nicht für alle Wettersituationen (gleich gut) möglich sein kann.

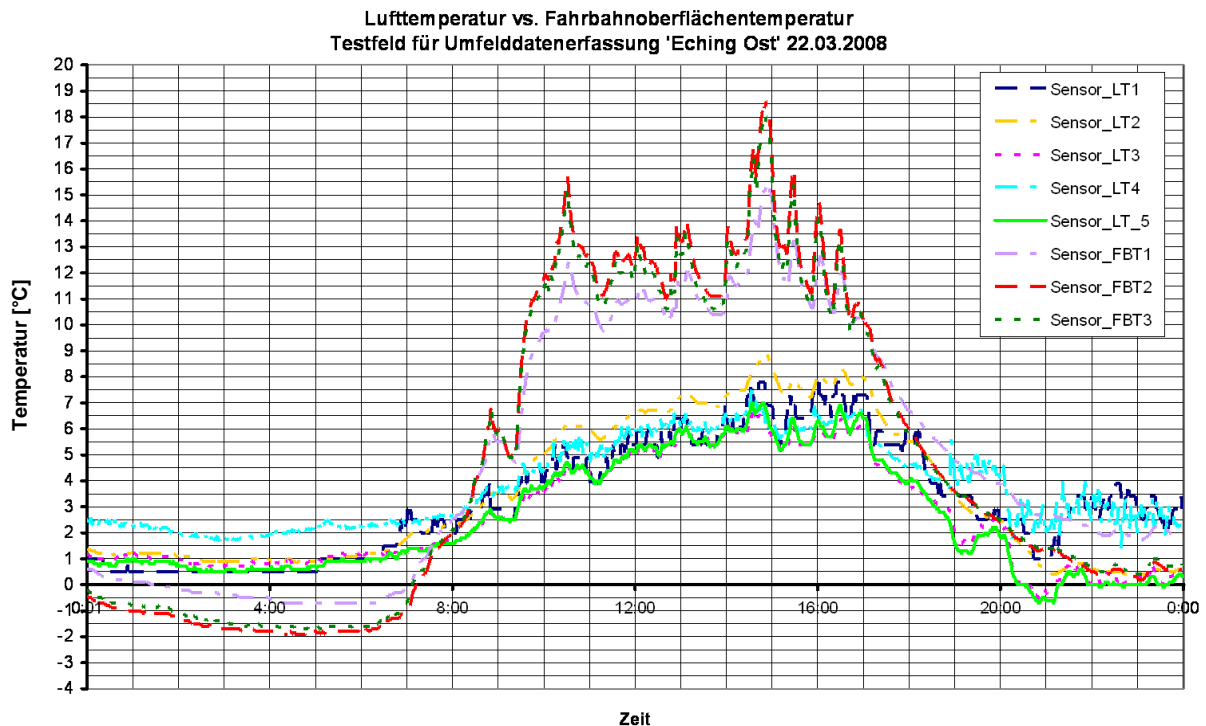


Bild 3.17 Lufttemperatur versus Fahrbahnoberflächentemperatur (stationär erfasst), 22.03.2008

Methodisches Vorgehen zur Datenanalyse

Die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen stationär erfassten Luft- und Fahrbahnoberflächentemperaturen mit dem Ziel, Rückschlüsse auf die Modellierbarkeit der Fahrbahntemperaturen aus stationär erfassten Lufttemperaturen zu erzielen, ist in Anhang 3 ausführlich beschrieben. Hier sei ausdrücklich darauf verwiesen, dass die Untersuchungen mit dem Wissen durchgeführt wurden, dass ohne Kenntnis der vorherrschenden Strahlung keine zuverlässige Ermittlung allgemeingültiger Zusammenhänge erwartet werden kann.

Analyse der stationär erfassten Daten

Die Durchführung und die Ergebnisse der Datenanalyse sind dem Anhang 3 zu entnehmen. Aus stationär erfassten Lufttemperaturen werden Fahrbahntemperaturen modelliert und die Abweichungen zu realen Messwerten bestimmt.

Prüfung der Hypothese

Die Hypothese kann für bestimmte Randbedingungen bestätigt werden: Aus einer stationär erfassten Lufttemperatur lässt sich unter Zuhilfenahme von weiteren Umfeldgrößen eine Fahrbahntemperatur ermitteln (siehe Tab. A2.4). Es ist jedoch anzumerken, dass die Spannweite der Differenzen auf eine vergleichsweise große Streuung der Abweichungen hinweist. Es ist kritisch zu bewerten, dass die maximalen Abweichungen zwischen modellierten und gemessenen Fahrbahntemperaturen bis zu 3,9 °C betragen. Diese Unsicherheit der Information ist bei einer Praxisnutzung der Daten zu berücksichtigen. Ohne eine Kenntnis der Strahlungsinformationen muss von einer Praxisnutzung abgesehen werden, da die Zuverlässigkeit der Ergebnisse/Zusammenhänge nicht gewährleistet werden kann. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Fahrbahnoberflächentemperaturen im Folgenden berücksichtigt, sie wären in der Praxis durch Informationsquellen zu der Strahlung zu ergänzen.

3.5.2 Luftfeuchtigkeit

Allgemeine Erkenntnisse

Außer durch zusätzliche Sensorik, zum Beispiel im Projekt Floating Car Road Weather Monitoring (vergleiche Abschnitt 2.5.4), sind keine anderweitigen Ansätze zur fahrzeugseitigen Erfassung der relativen Luftfeuchte bekannt.

Methodisches Vorgehen zur Datenanalyse

Für die relative Luftfeuchtigkeit steht keine mobile Datenquelle zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde in Abschnitt 3.3 die Hypothese aufgestellt, dass die relative Luftfeuchtigkeit raum-zeitlich je Zeitschritt nur so geringfügig variiert, dass die stationär erfasste relative Luftfeuchtigkeit ohne wesentliche Qualitätseinschränkungen auf SBA-Streckenabschnitte umgelegt werden kann und für diese Gültigkeit besitzt. Die stationär erhobenen Messwerte werden folgendermaßen überprüft:

- Raum-zeitliche grafische Auswertung der Messgröße mittels Contourplots für mehrere Tage
- Auswertung der Schwankungen in den stationär erfassten Messwerte über mehrere Monate und Vergleich mit den Vorgaben zu der Differenzialkontrolle in FGSV [2010a]
- Auswertung der Abweichungen der Messwerte zwischen verschiedenen Messstellen.

Es sollen so Aussagen zu der Ausprägung der relativen Luftfeuchtigkeit sowohl stationär als auch über die Strecke ermöglicht werden.

Analyse der stationär erfassten Daten

Es werden die minütlich erfassten Messwerte der Messstellen A bis G vereinfacht über Raum und Zeit linear interpoliert. Ein beispielhafter Contourplot ist in Bild 3.18 dargestellt.

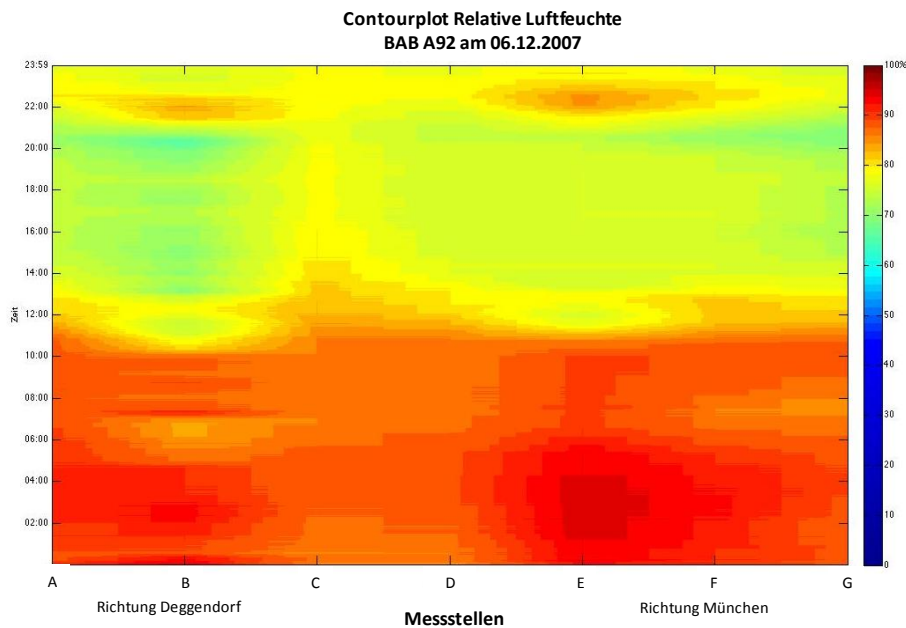


Bild 3.18 Contourplot für die stationär erfasste relative Luftfeuchtigkeit, 06.12.2007

Es zeigt sich, dass sich die Messgröße in dem Beispiel über Raum und Zeit einen sehr homogenen Verlauf aufweist. Die Aussage wird unterstützt durch die Darstellung der Differenzialkontrolle in FGSV [2010a]. Demnach werden, basierend auf umfangreichen Analysen der Messwerte für relative Luftfeuchtigkeit, sehr hohe Zeitdauern der Ergebniskonstanz als typisch und üblich eingestuft.

Ergänzend wurden für die Sensoren entlang der BAB A 9 stichprobenartig für zwei Tage die mittleren Abweichungen zwischen den jeweils aufeinanderfolgenden Messstellen berechnet [siehe Tab. 3.3].

Untersuchungszeitraum	Minimale mittlere Differenz	Maximale mittlere Differenz
13.02.2008, ganztags	0,2 %	7,0 %
15.02.2008, ganztags	0,3 %	2,2 %

Tab. 3.3 Extreme mittlere Abweichungen zwischen den Messwerten für relative Luftfeuchtigkeit aus benachbarten Sensoren im Rahmen der SBA der BAB A 9

Prüfung der Hypothese

Die Ergebnisse erlauben die Interpretation, dass die stationär erhobenen Messwerte im Kontext des Projektansatzes vereinfacht für komplette Streckenabschnitte gelten können, da innerhalb der Streckenabschnitte keine maßgebenden Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit zu erwarten sind.

3.6 Zwischenfazit

Da die auf dem Fahrzeug-CAN-Bus anliegenden Informationen nicht standardisiert sind, stellte der Prozess der Datenaufbereitung für zwei Fahrzeuge einen großen Aufwand dar. Durch die Befahrungen wurden sehr große Datenmengen (mehrere hundert Gigabyte) xFCD generiert.

Es waren keine Datenausfälle der Datenlogger zu verzeichnen und die Videofilme und Webcambilder lieferten qualitativ hochwertige und hilfreiche Informationen. Um Blendungseffekte zu vermeiden, sind diese Erfassungssysteme möglichst nahe an der Windschutzscheibe zu platzieren. Bei der Auswertung der dokumentierten Befahrungen konnten die durchgängigen Videoaufzeichnungen besser zur Analyse verwendet werden als die Einzelbilder der Webcam. Bei der Einschätzung der xFCD half, dass zwei Versuchsfahrzeuge unterschiedlicher Typen und Hersteller eingesetzt und als Datenlieferanten verglichen werden konnten. Die in Abschnitt 2.5 formulierten Anforderungen der Machbarkeitsstudie von PETTY UND MAHONEY [2007] wurden berücksichtigt. Durch den Einsatz von Serienfahrzeugen wird gesichert, dass in der Praxis verfügbare xFCD aufgezeichnet werden und sich der gewählte Ansatz vergleichsweise leicht in die Praxis übertragen lässt.

Das gewählte Aggregierungsintervall von einer Sekunde stellt einen guten Kompromiss zwischen Aussagekraft und Aufwand zur Datenverarbeitung und -haltung dar. Es zeigte sich jedoch, dass für detaillierte Datenanalysen, wie sie für die Einzelradgeschwindigkeiten durchgeführt wurden, die hoch aufgelösten Rohdaten besser geeignet sind als die aggregierten Werte.

Für den witterungsbedingten Fahrbahnzustand stehen keine fahrzeuggenerierten Messwerte zur Verfügung. Die Datenanalyse erfolgte für Daten, die den Zustand der Fahrbahnoberfläche wesentlich beeinflussen. Gemäß der anhand singulärer Ereignisse durchgeführten Untersuchung erfüllen die folgenden fahrzeuggenerierten Daten die Anforderungen an Zuverlässigkeit und Genauigkeit, um direkt oder als Hilfsgrößen zu einer verbesserten Ermittlung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands im Rahmen von SBA beizutragen:

- Fahrzeuggenerierte Geschwindigkeit
- Information zum Scheibenwaschvorgang
- Lufttemperatur
- Daten des Nässesensors zur Wischerregelung
- Statusmeldungen der Fahrerassistenzsysteme ABS und ESC
- Wischerstufe

Zusätzlich sind die stationär in SBA erfassten Umfelddaten verfügbar.

4 Modell zur Ermittlung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands

4.1 Übersicht

Die in der Datenanalyse ausgewählten stationär und fahrzeugseitig erfassten Daten sind zu einem Gesamtbild über den aktuellen Zustand der Fahrbahnoberfläche zusammenzuführen. Dies erfolgt mit einem Fahrbahnzustand-Modell, dessen Entwicklung und Elemente in diesem Kapitel dargestellt werden.

In Abschnitt 4.2 wird die allgemeine Modellentwicklung beschrieben. Es werden das methodische Vorgehen sowie der Aufbau, die Annahmen und Randbedingungen des Modells erläutert. Da die Eingangsdaten Imperfektionen aufweisen, werden die Verwendung von Fuzzy-Logik im Modell begründet und die aus dem Einsatz der Fuzzy-Logik resultierenden Vorteile aufgezeigt.

In den folgenden Abschnitten 4.3 bis 4.6 werden die einzelnen Module des entwickelten Modells dargelegt, wobei in der Regel nach folgender Struktur gegliedert wird:

- Funktionalitäten: Die von den jeweiligen Modulen erfüllten Aufgaben im Gesamtmodell
- Eingangsgrößen: Die für die Funktionalität des Moduls erforderlichen Informationen
- Aufbau: Bestandteile und Zusammenwirken einzelner Komponenten je Modul
- Ergebniserzeugung: Beschreibung der Prozesse zur Bestimmung von Ergebnissen und Hinweise zu deren Interpretation

Das entwickelte Modell wird in Abschnitt 4.7 zusammenfassend reflektiert.

4.2 Modellentwicklung

4.2.1 Anforderungen

Um Systeme zu beschreiben, werden mathematische Modelle eingesetzt. Hierbei besteht eine generelle Herausforderung darin, die Realität mittels (häufig erheblichen) Idealisierungen in die mathematischen Modelle zu überführen [KRUSE ET AL., 1995].

Um zu einer verbesserten Aussage zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand zu gelangen, ist ein Modell zur Fusion fahrzeugseitig und stationär erfasster Umfeldinformationen zu entwickeln. Die Ergebnisse der Datenanalyse liefern die im Modell nutzbaren Eingangsdaten, wobei das durchgeführte Data Mining zeigte, dass aus fahrzeuggenerierten Daten keine direkten Rückschlüsse auf verminderte Fahrbahngriffigkeiten möglich sind. Es sind verschiedene Informationen zusammenzuführen, die an unterschiedlichen Orten zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst wurden. Für die Modellentwicklung sind die ausgewählten Daten qualita-

tiv zu klassifizieren. Diese Klassifizierung hinsichtlich der Imperfektionen der Daten (siehe Abschnitt 2.6) unterstützt die Fusion der unterschiedlichen Daten, indem sie die Einschätzung ihrer jeweiligen Aussagekraft ermöglicht.

Gemäß den Ausführungen in Kapitel 3 beeinflussen Nässe und Temperaturen den Zustand der Fahrbahnoberfläche maßgeblich. Demnach werden zur Generierung von Aussagen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand die folgenden Informationen benötigt:

- Temperatur der Fahrbahnoberfläche, um zwischen Nässe und Glätte zu unterscheiden und Glättegefahren abschätzen zu können, sowie
- Niederschlag, da Niederschlagsintensität und –art den Zustand der Fahrbahnoberfläche beeinflussen.

Im Kontext der SBA-Steuerung ist je Streckenabschnitt die kritischste Ausprägung von Umfeldbedingungen zu ermitteln, um darauf basierend den Verkehr zu steuern und zu warnen.

Obwohl die Modellentwicklung auf den Ergebnissen der Analyse realer Daten basiert und die Zielanwendung des Modells bestehende SBA sind, wurden im Rahmen der Modellentwicklung Annahmen getroffen und Randbedingungen als erfüllt vorausgesetzt. Hierzu zählt, dass eine Fahrzeugflotte zur Generierung und Übertragung von xFCD zur Verfügung steht. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Voraussetzungen zum Datenaustausch in Form von C2I-Kommunikation geschaffen sind.

Die zur Realisierung der Voraussetzungen und Randbedingungen zu treffenden technischen, funktionalen und organisatorischen Maßnahmen sind Gegenstand des 5. Kapitels.

4.2.2 Aufbau des Modells

Zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen wird das sogenannte „Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell“ entwickelt. Diese Bezeichnung wird gewählt, da die Modellierung des Fahrbahnzustands unter Verwendung erweiterter fahrzeuggenerierter Daten xFCD im Rahmen mehrerer Modelle und Module erfolgt.

In Bild 4.1 ist der Aufbau des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells sowie die in der vorliegenden Arbeit angewendete vereinheitlichte grafische Darstellung abgebildet.

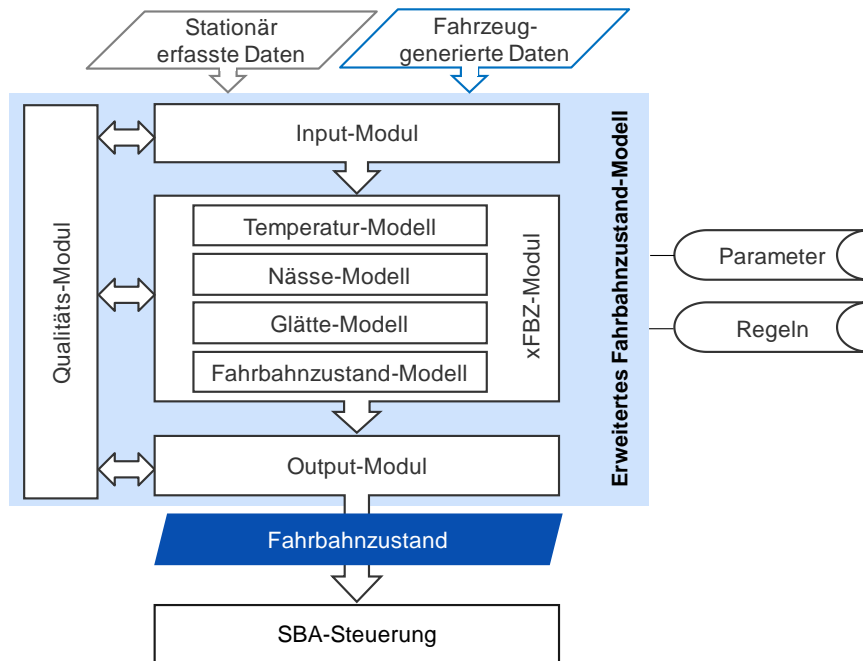


Bild 4.1 Aufbau des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells

In den sogenannten Modulen (dargestellt als weiße Rechtecke) werden mehrere zusammengehörige Maßnahmen zur Datenverarbeitung zusammengefasst. Die Interpretation und Veredelung von Daten (stationär erfasste Daten werden mit grauer Umrandung abgebildet, fahrzeuggenerierte Daten weisen eine blaue Umrandung auf) findet in den übergeordneten Modellen (dargestellt als hellblaue Rechtecke) unter Beachtung vorab definierter Regeln statt. Die Module und Modelle verwenden definierbare Parameter, die untereinander mit Prozessen verknüpft sind, so dass Informationen zwischen den verschiedenen Einheiten ausgetauscht werden können. Die Ergebnisse der Modelle werden im Folgenden als dunkelblau gefüllte Rauten visualisiert.

Das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell besteht im Einzelnen aus den folgenden Modulen, die jeweils eine spezifische Aufgabe erfüllen:

- Input-Modul

Die Eingangsdaten werden zur Verwendung im xFBZ-Modul aufbereitet.

- xFBZ-Modul

Basierend auf fahrzeugseitig und stationär erfassten Eingangsdaten werden in den folgenden Modellen Informationen generiert:

- Temperatur-Modell
- Nässe-Modell
- Glätte-Modell
- Fahrbahnzustand-Modell

- Qualitäts-Modul
Durch die Integration von Methoden zur Qualitätssicherung für Daten, Prozesse, Module und Modelle stehen möglichst zuverlässige Informationen zu Fahrbahnzuständen zur Verfügung.
- Output-Modul
Die ermittelten Modellergebnisse werden derart bearbeitet und ausgegeben, dass sie als Eingangsgrößen zur SBA-Steuerung verwendet werden können.

4.2.3 Einsatz von Fuzzy-Logik

Grundsätzlich stehen für die Modellierung und Informationsgenerierung unterschiedliche Lösungsansätze zur Verfügung, die sich im Hinblick auf beispielsweise Modellgüte und -komplexität, Modellierungsaufwand und Verwendungszweck voneinander unterscheiden [BERND UND OTTO, 1999]. Um eine geeignete Methode auszuwählen, werden im Folgenden grundlegende Eigenschaften der in der vorliegenden Arbeit zu verarbeitenden Daten charakterisiert:

- Die zu fusionierenden Informationen haben unterschiedliche
 - Auflösungen (zum Beispiel stationär versus fahrzeugseitig erfasste Lufttemperaturen),
 - Wertebereiche (zum Beispiel stationär versus fahrzeugseitig erfasste Lufttemperaturen) und
 - Einheiten (zum Beispiel Messwerte stationär ermittelter Niederschlagsintensitäten versus die Ausgaben fahrzeugseitiger Nässe Sensoren).
- Die verfügbare Information kann
 - lückenhaft (zum Beispiel punktuelle stationäre Umfelddatenerfassung im 1-Minuten-Intervall),
 - partiell veraltet (zum Beispiel streckenbezogene, aber gegebenenfalls nicht aktuell vorliegende Informationen aus Fahrzeugen),
 - ungenau (beispielsweise durch Schatten beeinflusste stationäre Messwerte der Fahrbahnoberflächentemperaturen) oder
 - unscharf (Aussagen zum Fahrbahnzustand, wie beispielsweise „feucht“ in Abgrenzung zu „nass“)sein.
- Unterschiedliche Größen sollen zu einer Umfeldinformation zusammengefasst werden (zum Beispiel die Fusion der Informationen von Scheibenwischer und stationär erhobenen Niederschlagsgrößen zu einer Nässe-Aussage).

Zudem kann in die Modellierung Expertenwissen einfließen, da zu den Daten des Testfelds „Eching Ost“, die eine Grundlage für die durchgeführten Analysen darstellen, umfassende Erfahrungen zu den Sensorqualitäten vorliegen.

Es kann demnach gefolgert werden, dass Ansätze, die exakt schließen und mit den genannten Imperfektionen der Daten nicht umgehen können, zur Erfüllung der vorliegenden Aufgabenstellung nicht optimal geeignet sind. Vielmehr bietet sich der Einsatz von Techniken der Künstlichen Intelligenz zur numerischen Bestimmung von Näherungslösungen an, die unter dem Sammelbegriff „Soft Computing“ zusammengefasst werden [GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON, 2012]. Die Soft Computing-Ansätze Fuzzy-Logik, Neuronale Netze (mit einer am Vorbild der Prozesse im Gehirn orientierten Informationsverarbeitung) sowie Genetische Algorithmen mit einer evolutionären Problemlösungsheuristik werden von KOOTHS [2004] hinsichtlich ihrer Lernfähigkeit sowie dem Umgang mit explizitem Wissen und Unschärfe klassifiziert. Der Vergleich zeigt, dass die Fuzzy Logik insbesondere im Umgang mit unscharfen Informationen und der Möglichkeit zur Integration von Expertenwissen für die vorliegende Arbeit Vorteile aufweist. Da im Rahmen der Modellierung aufgrund der unterschiedlich genauen Eingangsgrößen eine exakte Klassifizierung weder möglich noch notwendig ist, wird in der vorliegenden Arbeit die Fuzzy-Logik zur Klassifizierung eingesetzt. Diese an den menschlichen Entscheidungsprozess angepasste Art der wissensbasierten Datenverarbeitung ermöglicht trotz unsicherer oder fehlender Daten die Generierung logischer Ergebnisse [WITTE, 2002]. Die Grundlagen der Fuzzy-Logik sind in Anhang 4 kurz beschrieben.

Im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell wird die Fuzzy-Logik zur Klassifizierung und Verknüpfung von Informationen eingesetzt. Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Zugehörigkeitsfunktionen und Regelbasen wurden zur Veranschaulichung exemplarisch entwickelt. Sie sind bei einer Implementierung des Modells zu validieren und bei Bedarf anzupassen. In den Zugehörigkeitsfunktionen wurden aus Gründen der Nachvollziehbarkeit und Anschaulichkeit lineare Funktionen gewählt. Grundsätzlich sind hier auch andere Funktionen möglich.

4.3 Input-Modul

Funktionalitäten

Um mittels des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells Aussagen zu den Fahrbahnzuständen zu treffen, sind Eingangsgrößen bereitzustellen, zu verarbeiten und zu bewerten. Die hierfür erforderlichen datenverarbeitenden Prozesse finden im Input-Modul statt.

Eingangsgrößen

Die folgenden Größen stellen Eingangsdaten des Input-Moduls dar:

- Sämtliche im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell verwendeten xFCD
- Alle im Modell benötigten stationär erfassten Umfelddaten
- Vorab festzulegende Regeln zur Aufbereitung und Distribution der xFCD

- Regeln und Parameter für Fuzzy-Logik: Zugehörigkeitsfunktionen für xFCD-Alter und Stichprobengröße

Die Messwerte sollen mit Zeitstempel und eindeutiger aber nicht personenbezogener Referenzierung bereitstehen.

Aufbau

Der in Bild 4.2 dargestellte Aufbau des Input-Moduls wird nachfolgend kurz erläutert. Eine ausführliche Beschreibung wesentlicher Funktionalitäten findet sich im Abschnitt „Ergebnisgenerierung“.

In der Fahrzeuglokalisierung werden die Koordinaten der datenliefernden Fahrzeuge über einen definierten Regelsatz dem zugehörigen Straßennetz sowie den dort stationierten und im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell verwendeten Sensoren zugeordnet. Dieser Prozess ist nur für die Variante der mobilfunkgestützten C2I-Kommunikation erforderlich, da bei der bakengestützten C2I-Kommunikation eine Lokalisierung der Fahrzeuge über die verorteten Baken erfolgen kann.

Auf Basis der stationär erfassten Messwerte der nächstgelegenen Messstelle erfolgt im Rahmen der sogenannten Situationserkennung die Bestimmung der aktuellen Umfeldsituation in Form einer Nässestufe. Dieses Ergebnis wird im Nässe-Modell (vergleiche Abschnitt 4.4.3) genutzt.

Zudem dient das Input-Modul der Aufbereitung stationär und fahrzeugseitig erfasster Daten gemäß den Erfordernissen der Module und Modelle des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells. Die Fusion von xFCD erfolgt unter Verwendung von Fuzzy-Logik, indem Regeln zur Interpretation und Gewichtung unterschiedlicher Daten definiert und angewendet werden. Ausgangsgrößen des Input-Moduls sind aufbereitete Umfelddaten und xFCD.

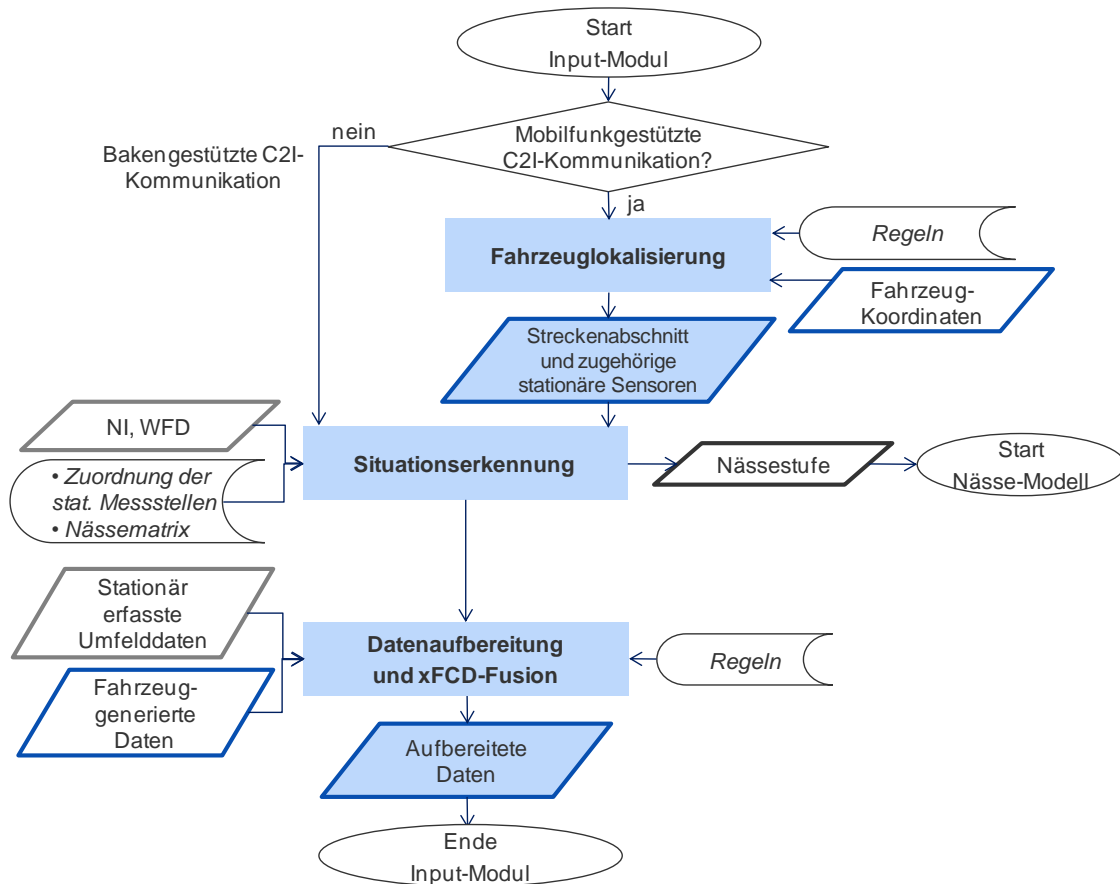


Bild 4.2 Aufbau des Input Moduls

Ergebnisgenerierung

Fahrzeuglokalisierung

Der Prozess der Fahrzeuglokalisierung liefert eine aktuelle Information darüber, welche Streckenabschnitte von datenliefernden Fahrzeugen befahren werden. Basierend auf dieser Information werden die den Fahrzeugen nächstgelegenen und in den Modellen zu nutzenden stationären Sensoren identifiziert. Hierfür werden die Fahrzeug-Koordinaten einem Streckenabschnitt zugeordnet. Dieser Prozess wird als „Map Matching“ (Karteneinpassung) bezeichnet. Die Streckenabschnitte sind vorab zu definieren und werden als sogenannte Regeln bei der Fahrzeuglokalisierung genutzt.

Die Fahrzeuglokalisierung entfällt bei der bakengestützten C2I-Kommunikation, da die Lokalisierung der datenliefernden Fahrzeuge in diesem Fall durch die verorteten Baken erfolgt.

Situationserkennung

Der Prozess der Situationserkennung generiert auf Basis stationärer Sensoren Aussagen zu den Umfeldbedingungen auf den Streckenabschnitten. Hierfür werden stationär ermittelte Umfelddaten beispielsweise gemäß FGSV [2010a] in einer Nässematrix interpretiert (vergleiche Tab. 4.4). Das Ergebnis ist eine in Abhängigkeit der Messwerte für Wasserfilmdicke und

Niederschlagsintensität ermittelte Nässe-Stufe, die für die übrigen im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell enthaltenen Modelle und Module zur Verfügung steht.

	NI = 0 mm/h	NI ≥ 0,3 mm/h	NI ≥ 1,2 mm/h	NI ≥ 5,0 mm/h	NI ≥ 12,0 mm/h	Wert nicht verfügbar
WFD = 0 mm	0	0	1	2	2	0
WFD ≥ 0,2 mm	1	1	2	3	4	1
WFD ≥ 0,5 mm	2	2	2	3	4	2
WFD ≥ 1,2 mm	2	2	3	3	4	3
Wert nicht verfügbar	0	0	1	2	3	/

Tab. 4.4 Matrix zur Ermittlung der Nässe-Stufen für stationär erfasste Umfelddaten, nach FGSV [2010a]

Datenaufbereitung

Einen zentralen Prozess des Input-Moduls stellt die spezifische Aufbereitung der Eingangsdaten gemäß der Anforderungen der datennutzenden Module dar.

Für die im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell genutzten fahrzeuggenerierten Daten bedeutet dies eine streckenbezogene Aggregation der Informationen in ein 1-Minutenintervall gemäß BASt [2002]. Es wird eine Extremwert- und/oder Mittelwertbildung durchgeführt. Gemäß den Anforderungen an die SBA-Steuerung ist je Streckenabschnitt und Umfeldgröße die kritischste Ausprägung zu ermitteln. Die jeweilig durchzuführende Aufbereitung ist in den Regeln vorab zu definieren und je nach Erfordernis gemäß Tab. 4.1 anzuwenden.

Datenart	Globales Minimum	Globales Maximum	Arithmetischer Mittelwert
ABS Status		X	X
ASR-Status		X	X
ESC Status		X	X
Frontwaschen		X	X
Lufttemperatur	X		X
Nässesensor		X	X
Wischer Intervall		X	X
Wischer Status		X	X

Tab. 4.1 Beispiel für Regeln zur Aggregation der fahrzeuggenerierten Daten

Die Auswertung der Daten erfolgt gemäß den folgenden Formeln:

- Globales Minimum (Min)

$$f(x_0) \leq f(x) \quad (4.1)$$

für alle $x \in U$

- Globales Maximum (Max)

$$f(x_0) \geq f(x) \quad (4.2)$$

für alle $x \in U$

f : Verlauf der xFCD-Messwerte, dargestellt als Funktion

U : Teilmenge der reellen Zahlen; Umfang der je Zeitintervall und Streckenabschnitt vorliegenden untersuchten fahzeuggenerierten Daten

x : Einzelwerte je xFCD-Datenart (vergleiche Tab. 4.1)

x_0 : Messwert, für den f ein globales Maximum/Minimum aufweist

- Arithmetischer Mittelwert (MW)

$$x_{\text{Mittel}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (4.3)$$

für x_1, \dots, x_n reelle Zahlen

n : Anzahl der betrachteten Messwerte je xFCD-Datenart, Zeitintervall und Streckenabschnitt

Fusion von xFCD

Für die Fusion sind Regeln zur Interpretation und Gewichtung unterschiedlicher Ergebnisse zu erstellen. Hierzu wird die Fuzzy-Logik angewendet. So werden Kriterien für den Fusionsprozess charakterisiert, indem eine Fuzzyifizierung durchgeführt wird. Diese Aussagen werden mittels einer Regelbasis interpretiert und bewertet. Das Resultat sind individuelle Gewichtungsfaktoren, die eine flexible und situationsangepasste Fusion erlauben.

Die Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzyifizierung sind nachfolgend für verschiedene Größen dargestellt. Die Liste an Zugehörigkeitsfunktionen stellt eine beliebige Auswahl dar, die zu erweitern und anzupassen ist.

Die xFCD werden je Streckenabschnitt eine gewisse Zeit vorgehalten und je Zeitschritt (1 Minute gemäß BAST [2002]) hinsichtlich ihrer Relevanz und Aussagekraft im Modell bewertet. Ein Kriterium hierfür ist die Aktualität der Information, die als xFCD-Alter exemplarisch in Bild 4.3 fuzzyfiziert dargestellt ist. Anders als in der herkömmlichen Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in SBA werden die fahzeuggenerierten Daten, aufgrund ihres Streckenbezugs und damit erhöhten Aussagekraft, länger als eine Minute vorgehalten. Mit der Zeit ver-

lieren die Daten an Relevanz und werden entsprechend schwächer gewichtet in der Fusion berücksichtigt. Gehen zwischenzeitlich aktuellere Werte ein, so werden diese höher gewichtet und zusätzlich zu den älteren Werten berücksichtigt. Nach einer parametrierbaren Zeitspanne verlieren die historischen xFCD ihre Gültigkeit und werden im Fusionsprozess nicht weiter berücksichtigt.

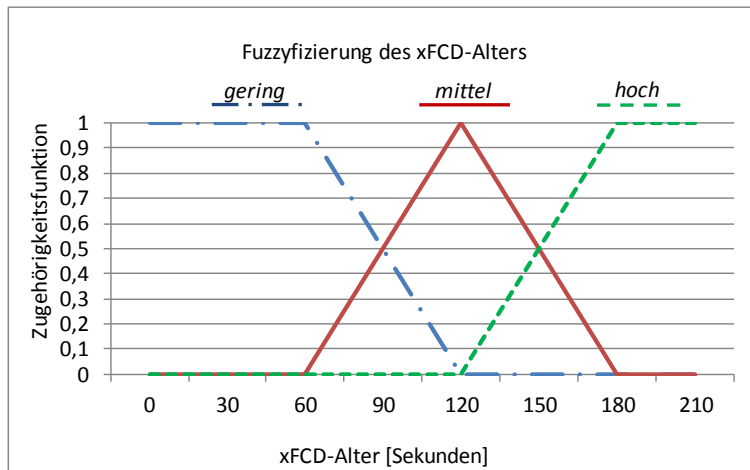


Bild 4.3 Zugehörigkeitsfunktion Zeitdifferenz für die xFCD-Bewertung und –Distribution, Variante bakengestützte Kommunikation

Die Zeitdifferenzen zwischen den zu fusionierenden Einzelergebnissen mit demselben örtlichen Bezug, wie bei der bakengestützten Kommunikation, sind in Bild 4.3 dargestellt. 120 Sekunden Zeitdifferenz werden als „mittleres“ Alter der Information interpretiert, ab 180 Sekunden gilt das Alter der xFCD als „hoch“. Das Alter der Daten wird in Abhängigkeit von der untersuchten Informationen unterschiedlich interpretiert: Bei Messwerten der Lufttemperaturen, die zeitlich eine geringe Variabilität aufweisen, ist das Datenalter weniger kritisch zu sehen als beispielsweise bei Nässeinformationen, die sich sehr kurzfristig grundlegend ändern können. Für die mobilfunkgestützte Kommunikation sind wie in Bild 4.4 bei der Festlegung eigene xFCD-Alter zu definieren. Diese hängen von der Länge der Streckenabschnitte sowie der Störungshäufigkeiten ab.

Als weiteres grundsätzliches Kriterium zur Klassifizierung der xFCD wird die zugrundeliegende Stichprobengröße, als Anzahl an datenliefernden Fahrzeugen je 1-minütigem Zeitintervall, vorgeschlagen. Ein Vorschlag zur Fuzzyfizierung dieser Information zeigt Bild 4.4.

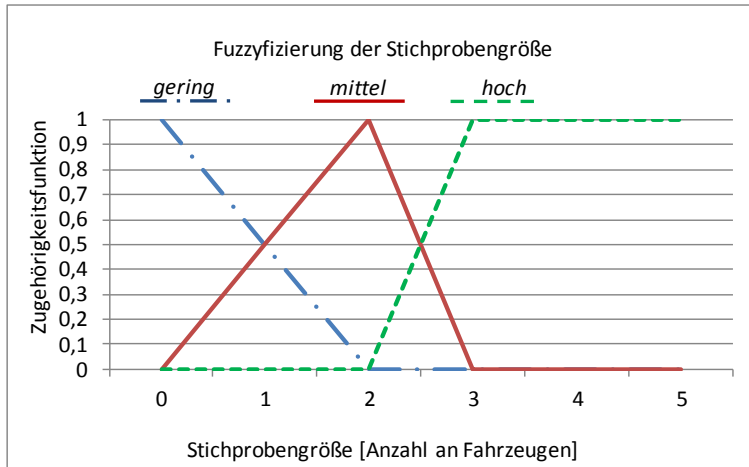


Bild 4.4 Zugehörigkeitsfunktion Stichprobengröße für die xFCD-Bewertung und -Distribution

Ab drei datensendenden Fahrzeugen wird die Stichprobengröße als hoch eingeschätzt. Diese Einstufung hängt von der Übertragbarkeit und Qualität der xFCD, sowie der generell erreichbaren Stichprobengröße ab.

Des Weiteren wird im Rahmen der „xFCD-Bewertung und –Distribution“ je xFCD-Datenart und je Streckenabschnitt zugeordnet, ob ein Übertrag der Information auf die jeweils entgegengesetzte Fahrtrichtung erfolgen kann. Grundsätzlich ist für sämtliche fahrzeuggenerierten Messgrößen eine Übertragbarkeit zwischen den Richtungsfahrbahnen gegeben.

Die Zugehörigkeiten zu den entwickelten Funktionen werden in einer Regelbasis interpretiert und daraus die jeweilige spezifische Gewichtung abgeleitet (vergleiche Bild 4.5 als Beispiel). Die Gewichtungsfaktoren können als Grad der „Wichtigkeit“ beziehungsweise als Maß in das „Vertrauen in das Ergebnis“ interpretiert werden. Die „Bedeutung“ der Aussage für den vorliegenden Fusionsprozess wird durch einen zusätzlichen Faktor bestimmt. Je größer der Faktor, desto bedeutsamer ist die jeweilige Regel. Faktoren < 1 bewirken eine Minderung der Aussage. In den dargelegten Beispielen werden die Faktoren maßgeblich von der Kritikalität bestimmt, die Gewichtung beruht auf den Ausprägungen der übrigen Indikatoren.

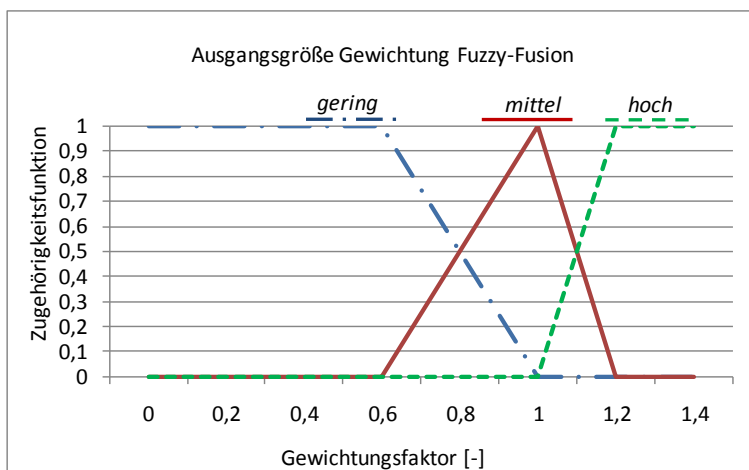


Bild 4.5 Zugehörigkeitsfunktion Gewichtung

Dieses Vorgehen erlaubt eine weitestgehende Anpassung an die implizit formulierten Anforderungen an Qualitäten und räumliche und zeitliche Verfügbarkeiten und eine dementsprechende Berücksichtigung im Fusionsprozess. Die Faktoren ermöglichen eine Favorisierung der bedeutendsten und vermeintlich verlässlichsten Ergebnisse gegenüber Ergebnissen geringerer Aussagekraft in qualitativer, zeitlicher oder räumlicher Hinsicht. Um möglichst zuverlässige Ergebnisse zu erzielen, unterstützt diese Option insbesondere bei Vorhandensein vieler datenliefernder Fahrzeuge.

Es gilt, dass die fahrzeuggenerierten Daten mit ihrem Alter an Aussagekraft verlieren und diese mit der zugrundeliegenden Datenbasis (Anzahl an Fahrzeugen) steigt.

Regel	Prämisse	Faktor f	Konsequenz
1	WENN Zeitdifferenz GERING UND Stichprobengröße MITTEL UND Kritikalität GERING	1,0	DANN Gewichtung HOCH
2	WENN Zeitdifferenz HOCH UND Stichprobengröße MITTEL UND Kritikalität HOCH	1,2	DANN Gewichtung HOCH
3	WENN Zeitdifferenz HOCH UND Stichprobengröße HOCH UND Kritikalität GERING	0,8	DANN Gewichtung NIEDRIG
4	WENN Zeitdifferenz GERING UND Stichprobengröße NIEDRIG UND Kritikalität HOCH	1,0	DANN Gewichtung MITTEL
...	<i>Weitere Regeln gelten analog</i>

Tab. 4.2 Regelbasis für die Gewichtung von xFCD (beispielhafter Auszug)

Die Erstellung der Regeln erfolgt für die Verkehrsbeeinflussung Extrema-orientiert. Die Inferenz erfolgt mittels des Maximum-Operators (UND), die Defuzzifizierung wird mittels der Schwerpunktmethodem durchgeführt. Dabei wird aus dem Schwerpunkt der in der Akkumulation ermittelten Fläche ein aussagekräftiger Wert g berechnet. Es ergibt sich hieraus je Fahrzeug i ein Gewichtungsfaktor g , mit dem die Einzelergebnisse E multipliziert werden. Der fusionierte Gesamtwert G wird für intervallskalierte Größen (beispielsweise die Fahrbahnoberflächentemperatur) als arithmetischer Mittelwert gemäß (4.4) ermittelt:

$$G = \sum_n \frac{f_i * g_i * E_i}{n} \quad (4.4)$$

Für nominalskalierte Größen (zum Beispiel Glättewarnungen unterschiedlicher Ausprägungen) wird der Modalwert als häufigster Wert einer Häufigkeitsverteilung bestimmt. Die einzelnen Ergebnisse werden analog mit Gewichtungsfaktoren beaufschlagt. Das gewählte Vorgehen gewährleistet eine hohe Transparenz der Entscheidungsfindung, wodurch eine gute Anpassbarkeit der verwendeten Parameter/Zugehörigkeitsfunktionen erzielt wird. In

Abhängigkeit der verfügbaren Stichprobengröße sollte aber beispielsweise auch das Auftreten von Extremwerten geprüft und berücksichtigt werden.

Zudem sollte im Rahmen der xFCD-Bewertung gewährleistet werden, dass die bereits fahrzeugintern als fehlerbehaftet identifizierten Daten eine entsprechende Kennzeichnung („Flag“) erhalten und nicht in das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell eingehen.

4.4 xFBZ-Modul

4.4.1 Aufbau

Die Aussagen des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells zu den auf den befahrenen Strecken vorherrschenden Umfeldbedingungen werden im Wesentlichen im sogenannten xFBZ-Modul generiert. Der Name setzt sich zusammen aus „x“, analog der Bezeichnung der xFCD steht der Buchstabe als Abkürzung für „extended“ (auf Deutsch: „Erweitert“), sowie „FBZ“, was gemäß BAST [2002] eine Kurzbezeichnung für Fahrbahnzustand ist. Das xFBZ-Modul besteht aus mehreren Modellen, die die folgenden streckenbezogenen Aussagen generieren:

- Temperaturen im „Temperatur-Modell“, dargestellt in Abschnitt 4.4.2,
- Nässe (siehe Abschnitt 4.4.3 zum „Nässe-Modell“),
- Glättewarnungen des „Glätte-Modells“ (vergleiche Abschnitt 4.4.4), sowie
- Fahrbahnzustände gemäß der Beschreibung des „Fahrbahnzustand-Modells“ in Abschnitt 4.4.5.

Die Modelle und deren Abhängigkeiten zueinander werden in den folgenden Abschnitten ausführlich dargelegt.

4.4.2 Temperatur-Modell

Funktionalitäten

Für die Streckenbeeinflussung stellt die Temperatur der Fahrbahnoberfläche eine bedeutende Größe zur Ermittlung von Fahrbahnzustand und von Glätte(gefahren) dar. Sensoren in den eingesetzten Versuchsfahrzeugen erfassen die Lufttemperatur; die Temperatur der Fahrbahnoberfläche kann nicht ermittelt werden. Vor allem für eine Abschätzung von Glätte(gefahren) weisen Werte der Fahrbahnoberflächentemperatur jedoch eine höhere Aussagekraft als Lufttemperaturen auf. Da die Fahrbahntemperatur von den Fahrzeugen nicht erfasst wird, soll im Rahmen der Arbeit unter bestimmten Umfeldbedingungen die Fahrbahnoberflächentemperatur aus der fahrzeuggenerierten Lufttemperatur modelliert werden. Die hohe Güte und prinzipielle Eignung der fahrzeugseitig erfassten Messwerte der Lufttemperatur wurde in Abschnitt 3.4.3 nachgewiesen. Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Fahrbahnoberflächentemperaturen und stationär oder fahrzeugseitig erfassten Lufttemperaturen erfolgte in Abschnitt 3.5.1. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Fahrbahn-

oberflächentemperatur bei bestimmten Umfeldbedingungen aus den Messwerten der Lufttemperatur modellieren lässt. Der Vergleich zwischen den fahrzeuggenerierten und den stationär erfassten Lufttemperaturen zeigte einen hohen Zusammenhang zwischen den fahrzeuggenerierten Messwerten und den stationär im Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ ermittelten Lufttemperaturen. Diese Erkenntnis wird mit dem Grundgedanken, dass sich Temperaturverläufe in Situationen mit vergleichbaren Umfeldbedingungen wiederholen, im Temperatur-Modell genutzt. Hierfür werden in einem Clustering-Prozess aus den vorliegenden historischen Umfelddaten möglichst aussagekräftige und typische Umfeldsituationen gebildet (vergleiche Abschnitt 3.5.1). Für diese Umfeldsituationen wird der Zusammenhang zwischen stationär erfassten Luft- und Fahrbahntemperaturen ermittelt. Mittels der Berechnung des Zusammenhangs zwischen stationärer und fahrzeuggenerierter Lufttemperatur kann auf die Fahrbahntemperatur entlang der Strecke rückgeschlossen werden. Dies erfolgt streckenbezogen auf Basis der fahrzeuggenerierten Lufttemperaturen.

Das Temperatur-Modell dient der Ermittlung streckenbezogener Fahrbahnoberflächentemperaturen (FBT_{Modell}) und Lufttemperaturen (LT_{Modell}). Durch die streckenbezogene Bestimmung der Fahrbahnoberflächentemperatur wird die durchgängige Ermittlung von Fahrbahnzuständen ermöglicht. Somit können beispielsweise bis dato unbekannte glättegefährdete Stellen oder je Streckenabschnitt die kritischsten Streckenpunkte identifiziert werden. Die streckenbezogene Lufttemperatur kann als Hilfsgröße und zur Plausibilisierung der stationär erfassten Lufttemperatur genutzt werden, zum Beispiel für:

- Plausibilitätsprüfung logisch/physikalisch für NS [FGSV, 2010a]
- Langzeit-PL-Prüfung für LT [FGSV, 2010a]
- Plausibilisierte Nebelstufenermittlung [DINKEL ET AL., 2008c].

Zur Generierung der streckenbezogenen Ausgangsgrößen ist eine Modellierung von Zusammenhängen nötig (vergleiche Bild 4.6), zwischen

- den stationär gewonnenen Temperaturen der Luft und der Fahrbahnoberfläche (p1 im sogenannten FBT-Modell),
- den stationär und den fahrzeugeitig erfassten Lufttemperaturen (p2 im sogenannten LT-Modell) sowie
- den fahrzeuggenerierten Lufttemperaturen und den stationär erhobenen Temperaturen der Fahrbahnoberfläche (p3 im FBT-Modell).

Die zugrundeliegende Logik des entwickelten Ansatzes für das LT- und das FBT-Modell, die auf Basis historischer Datensätze für das Temperatur-Modell grundlegende Zusammenhänge ermitteln, sind in Bild 4.6 dargestellt. In der Grafik symbolisieren Doppelpfeile (\leftrightarrow) die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen zwei Größen mittels Regressionsanalyse (vergleiche Anhang 1). Die Vorgehensweise zur Ermittlung von p1 und p2 als Maß für den Zusammenhang zweier Größen sowie exemplarische Analysen sind in Abschnitt 3.4.3 und in Abschnitt 3.5.1 entwickelt und beschrieben. Diese Größen werden verwendet, um auf Basis fahrzeuggenerierter Lufttemperaturen mittels des Parametersatzes p3 Fahrbahnoberflächentemperaturen zu bestimmen (siehe unten, Abschnitt „Aufbau“).

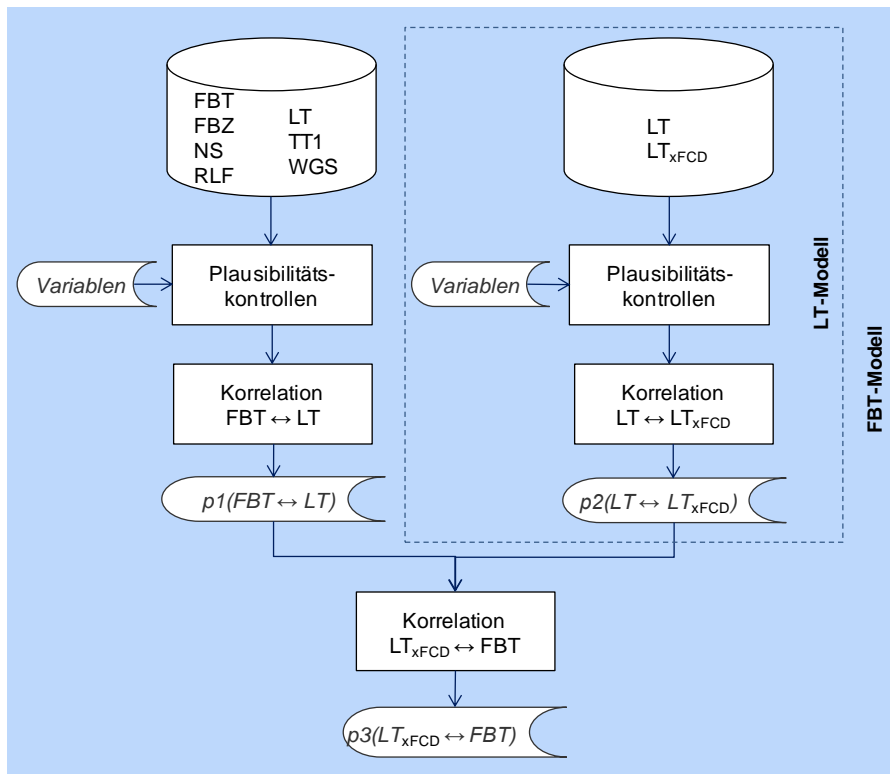


Bild 4.6 FBT-Modell zur Bestimmung des Zusammenhangs $p3$ zwischen LT_{xFCD} und FBT

Eingangsgrößen

Als Eingangsgrößen in das Temperatur-Modell dienen

- stationär und fahrzeugseitig generierte Lufttemperaturen,
- stationär ermittelte Fahrbahntemperaturen, sowie
- die aus historischen Wertepaaren mittels Regressionsanalysen ermittelten statistischen Zusammenhänge $p1$, $p2$ und $p3$.

Aufbau

Der Aufbau des Temperatur-Modells ist Bild 4.7 zu entnehmen. Zunächst wird anhand stationär erfasster Umfelddaten in dem Modell abgefragt, ob für die aktuell vorherrschende Umfeldsituation in der Clustermatrix gültige historische Zusammenhänge hinterlegt sind, das heißt ob sich die Fahrbahnoberflächentemperatur aus der fahrzeuggenerierten Lufttemperatur mit ausreichender Genauigkeit modellieren lässt (siehe Abschnitt 3.5.1). Ist dies nicht der Fall, ist im Folgenden die Größe LT_{xFCD} direkt zu verwenden. Ansonsten werden aus LT_{xFCD} und anhand des zugehörigen Clusterkürzels und der vorab ermittelten statistischen Zusammenhänge $p1$, $p2$ und $p3$ analog zu Formel (A2.1) die Größen $\text{LT}_{\text{Modell}}$ und $\text{FBT}_{\text{Modell}}$ berechnet.

Als qualitätssichernde Maßnahme werden im Bereich von stationären FBT-Messstellen die modellierten und stationär erfassten Fahrbahntemperaturen miteinander verglichen. Beste-

hen zu große Differenzen, sind anstatt der modellierten Werte die stationären Messwerte zu nutzen. Als Erstversorgung des Schwellenwertes zum Verwerfen des modellierten Wertes wird in Anbetracht der Ergebnisse in Abschnitt 3.5.1 sowie der Annahmen von BADELDT UND BREITENSTEIN [2005] eine tolerierbare Differenz von 2,0 °C vorgeschlagen.

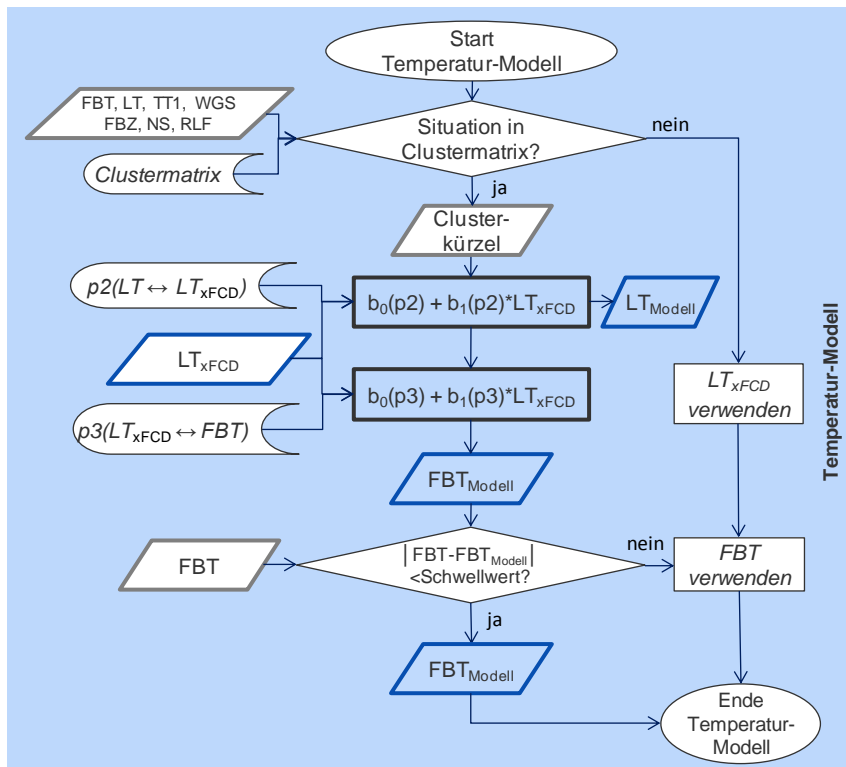


Bild 4.7 Aufbau des Temperatur-Modells

Ergebnisgenerierung mit Validierung und Diskussion

Das Temperatur-Modell setzt voraus, dass anhand einer historischen Datenbasis je Sensorstandort die statistischen Zusammenhänge ermittelt werden. Dies sollte zumindest einmalig, bestenfalls kontinuierlich erfolgen. Dieses Vorgehen wurde beispielhaft für den Standort „Testfeld ‚Eching Ost‘“ durchgeführt. Änderungen des Streckenverlaufs und der Umgebungsbedingungen entlang der Strecke werden im Temperatur-Modell nicht berücksichtigt. Die Zusammenhänge werden vereinfachend vom Messort auf den gesamten Streckenabschnitt übertragen. Aufgrund der Nutzung streckenbezogener Informationen wird dennoch eine Verbesserung der derzeitigen Praxis der stationären Umfelddatenerfassung erwartet.

Es wurden b_0 und b_1 der Parametersätze von p_2 überprüft, indem die mittels p_2 modellierten Werte mit realen Daten verglichen werden (analog zu Formel (A2.1)). Für p_2 ist das Resultat, dass sich durch die Modellierung der fahrzeugseitig erfassten Lufttemperaturen Abweichungen ergeben, die stets weniger als 1,0 °C betragen und deshalb als gering eingestuft werden. Ein Vergleich machte jedoch deutlich, dass die modellierten Werte stärker von den realen Werten abweichen als sie bei der Verwendung der xFCD-„Rohdaten“ entstehen würden. Als Konsequenz wird im Rahmen des Projektes auf die Umrechnung mittels p_2 verzichtet und es werden direkt die fahrzeuggenerierten Lufttemperaturen genutzt. Zur Beibehaltung

der Allgemeingültigkeit verbleibt die Berechnung und Nutzung von p_2 als Arbeitsschritt im allgemeinen Modellablauf.

Für die Zeitbereiche „Tag, mit Sonnenstrahlung“ konnten vermutlich insbesondere aufgrund der unterschiedlichen thermischen Charakteristika von Luft und Fahrbahnaufbau keine allgemeingültigen Zusammenhänge ermittelt werden. Da die Fahrbahntemperaturen tagsüber in der Regel größer als die Lufttemperaturen sind, ist für diese Situationen die Kenntnis der streckenbezogenen Lufttemperatur ausreichend.

Die Ausprägungen der Merkmale zur Definition der Cluster wurden diskret gewählt und Messwertpaare definierten Umfeldsituationen eindeutig zugeordnet. Durch die Anwendung der Fuzzy-Logik könnte hier erreicht werden, dass Messwertkombinationen verschiedenen Clustern mit bestimmten Graden zugehören. Dies ist beispielsweise der Fall bei der Unterscheidung zwischen Tages- und Nachtzeit, die vereinfacht auf 7:30 Uhr festgelegt wurde oder Messwerten nahe an den Schwellenwerten (beispielsweise bei einer Lufttemperatur von 2,1 °C). Bei einer über die im Rahmen eines Vorversuchs hinausgehenden Datenanalyse wäre intelligenter zwischen Tag und Nacht (beziehungsweise der Strahlungsintensität) zu unterscheiden. Würden Strahlungswerte zur Verfügung stehen, könnte eine Steigerung der Prognosegenauigkeiten erzielt werden.

Weiteres Optimierungspotenzial besteht hinsichtlich einer feingliedrigeren Differenzierung zwischen einzelnen Clustern sowie der Berechnung der Regressionen für größere Datenmengen. Die bislang ermittelten Zusammenhänge sind nur für den Bereich des Testfelds „Eching Ost“ gültig, ein Übertrag auf andere Standorte steht noch aus. Zudem wird für künftige Auswertungen geraten, zur Validierung dasselbe Sensor-Set wie bei der Modellierung zu nutzen (vergleiche Abschnitt 3.4.3).

Mittels archivierter streckenbezogener Temperaturprofile könnte analog zur Verwendung von Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien [KNIß ET AL., 2006] und in Anlehnung an die Nutzung von Werten des Thermal Mappings (siehe Abschnitt 2.3.1) ein Verfahren der Ganglinienprognose erprobt werden. Unter der Annahme, dass sich Verläufe der Fahrbahnoberflächentemperatur an gleichen Messorten unter gegebenen Randbedingungen (Clustering) weitestgehend gleich verhalten, könnten aus archivierten Temperaturprofilen zukünftige Werte prognostiziert werden.

Für eine weitere Verifizierung des Modells werden zielgerichtete Befahrungen während der relevanten und abbildbaren Clusterbedingungen bei Nacht empfohlen, da dieser Zeitbereich im Rahmen der Befahrungskampagne nicht berücksichtigt wurde.

4.4.3 Nässe-Modell

Funktionalitäten

Die Ermittlung von Nässe ist eine bedeutsame Aufgabe, da die Nässe eine maßgebende Größe für Glätteentstehung und Fahrbahngriffigkeit darstellt (vergleiche Abschnitt 2.3.1). Im Nässe-Modell werden mittels Fuzzy-Logik aus fahrzeuggenerierten Informationen zu Wi-

schertätigkeiten in Fahrzeugen sowie Informationen zur vorhandenen Nässe aus stationären Sensoren Aussagen zu der Nässe entlang der Strecke gebildet. Es wird in dem Modell bewusst die Bezeichnung „Nässe“ gewählt, da allein aus den verfügbaren Eingangsdaten keine Unterscheidung getroffen werden kann, ob Scheibenwischer wegen eines atmosphärischen Niederschlagsereignisses oder wegen der Sprühfahnen vorausfahrender Fahrzeuge aktiviert sind. Aufgrund der in Abschnitt 3.4.4 geschilderten Probleme mit der Interpretation von fahrzeuggenerierten Daten ist im Nässe-Modell eine Prüfung enthalten, ob innerhalb einer definierten Zeitspanne ein Frontwaschvorgang stattgefunden hat.

Das Ergebnis des Nässe-Modells wird als sogenanntes Nässe-Level angegeben, das eine Aussage zu der streckenbezogenen vorherrschenden Stärke der Nässe liefert. Auf Basis einer Verknüpfung der stationär erfassten Niederschlagsart mit der fahrzeuggenerierten Lufttemperatur wird zudem die Art des Niederschlags bestimmt.

Eingangsgrößen

Die folgenden Größen werden im Nässe-Modell verwendet:

- Fahrzeuggenerierte Informationen: Wischerintervall, Fahrzeuggeschwindigkeit, Lufttemperatur
- Stationär erfasste Informationen: Niederschlagsart NS
- Ergebnisse aus xFBZ-Einzelmodellen: Nässe-Stufe aus der Situationserkennung (gemäß Abschnitt 4.3) auf Basis stationär erfasster Messwerte
- Regeln und Parameter für Fuzzy-Logik: Zugehörigkeitsfunktionen für Wischerintervall, Nässe-Stufen und Nässe-Level, Regelbasis für Nässe-Modell, sowie Zeitbereich seit dem letzten Frontwaschen

Aufbau

Der Aufbau des Nässe-Modells ist in Bild 4.8 dargestellt. Zunächst wird im Rahmen des Nässe-Modells über die fahrzeuggenerierten Kenngrößen Wischeraktivität, Nässesensorsignal (wenn verfügbar) und Frontwaschen geprüft, ob ein Niederschlagsereignis oder Fahrbahnnässe vorliegen, ansonsten wird das Modell beendet. Sind entsprechende Nässeinformationen detektiert, werden mittels Fuzzy-Logik die Eingangsgrößen Wischerintervall und Fahrzeuggeschwindigkeit sowie die auf Basis stationärer Messwerte bestimmte Nässe-Stufe fusioniert und ein Nässe-Level ermittelt. Anhand von $LT_{x\text{FCD}}$ und NS wird das Nässeereignis hinsichtlich der Niederschlagsart spezifiziert.

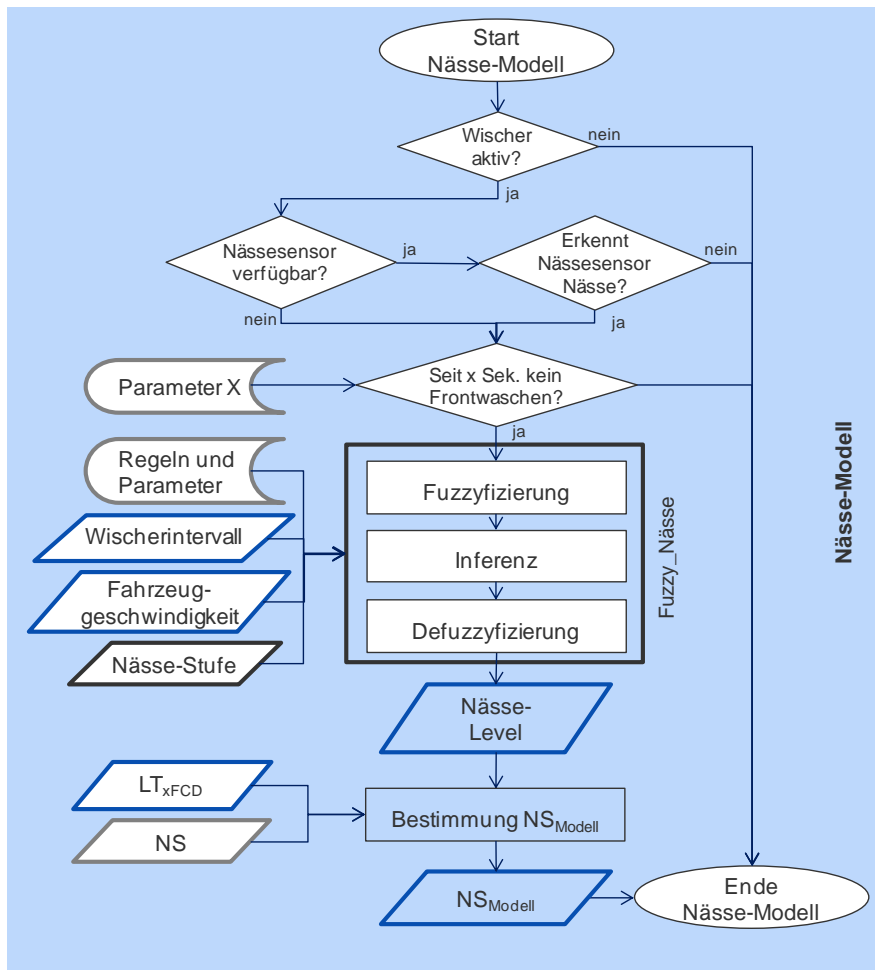


Bild 4.8 Aufbau des Nässe-Modells

Ergebnisgenerierung

Für das Nässe-Level werden vier Ausprägungen definiert:

- Nässe-Level 0: Trocken
- Nässe-Level 1: Wenig Nässe
- Nässe-Level 2: Mittlere Nässe
- Nässe-Level 3: Starke Nässe

Die Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgrößen Wischerintervall und Nässe-Stufe sind in Bild 4.9 und Bild 4.10 dargestellt (Fuzzyfizierung). Die Fuzzyfizierung wurde auf Basis der zur Befahrung eingesetzten Fahrzeuge durchgeführt. Die nachfolgenden Funktionen stellen Vorschläge für Erstversorgungen dar. Die folgenden Grafiken zeigen, wie die Wischerintervalle 0 bis 5 als schnell, mittel und langsam eingestuft werden. So repräsentiert das Wischerintervall 2 beispielsweise eindeutig (zu 100 % der Zugehörigkeitsfunktion) ein mittleres Wischerintervall. Das Wischerintervall 3 würde zu 50 % einem mittleren und zu 50 % einem schnellen Wischerintervall entsprechen.

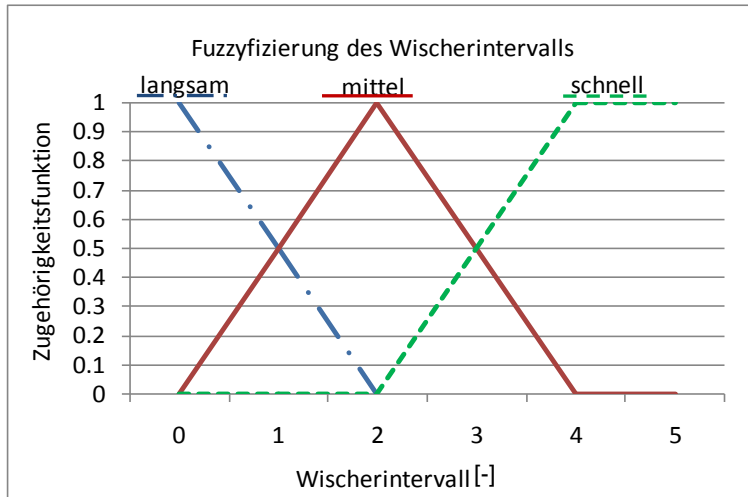


Bild 4.9 Zugehörigkeitsfunktion Wischerintervall

Ab Wischerintervall 4 wird das Intervall als schnell interpretiert.

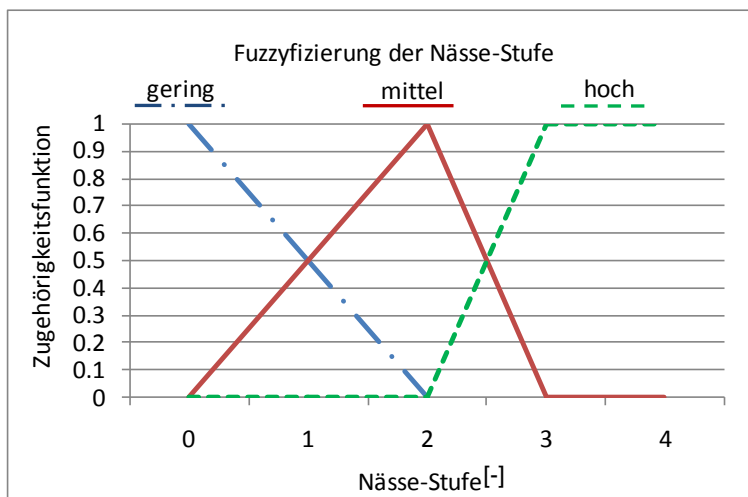


Bild 4.10 Zugehörigkeitsfunktion Nässe-Stufe

Die Nässe-Stufe 2 wird als „mittlere“ Stufe eingestuft, ab Nässe-Stufe 3 wird der Wert als „hoch“ interpretiert.

Die in Bild 4.11 dargestellte Zugehörigkeitsfunktion der Fahrzeuggeschwindigkeit und die Beschreibung der Verwendung dieser Größe bei der Interpretation der Wischertätigkeiten ist angelehnt an Untersuchungen von HUBER [2001]. Die fuzzyfizierte Fahrzeuggeschwindigkeit kann zu einer Überarbeitung des fuzzyfizierten Wischerintervalls verwendet werden: Je höher die Fahrzeuggeschwindigkeit, desto schneller werden die Wischer geregelt. Dies bedeutet, dass mit steigenden Fahrzeuggeschwindigkeiten eine Reduzierung des fuzzyfizierten Wischerintervalls zu erfolgen hat. Da in der vorliegenden Arbeit keine dementsprechende Datenauswertung stattgefunden hat, wird dieser Arbeitsschritt nur theoretisch formuliert.

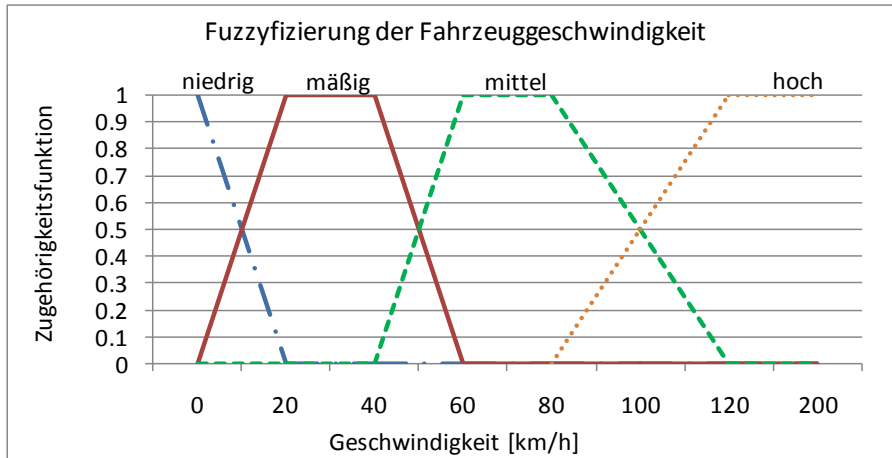


Bild 4.11 Zugehörigkeitsfunktion Fahrzeuggeschwindigkeit, angelehnt an HUBER [2001]

Bild 4.12 zeigt die fuzzyfizierte Ausgangsgröße des Fuzzy-Nässe-Modells. Ab Nässe-Level 2 wird dieser als „hoch“ beurteilt.

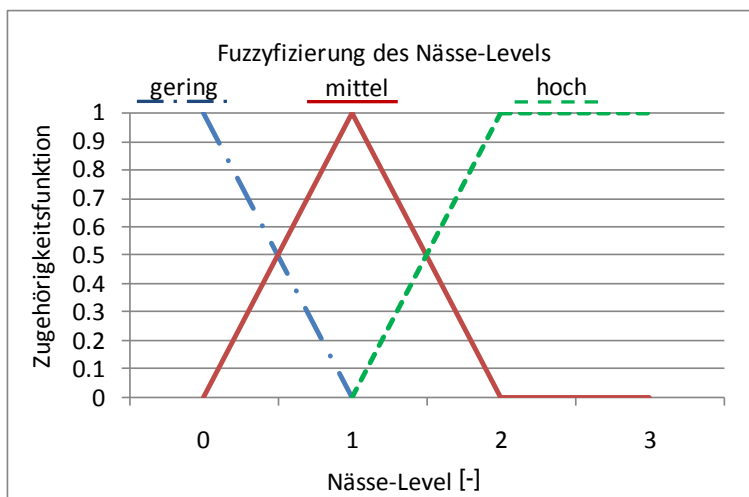


Bild 4.12 Fuzzy-Nässe-Modell

Die Regeln des Fuzzy-Nässe-Modells (Wissensbasis) werden während des Prozesses der Inferenz geprüft (vergleiche Tab. 4.3).

Regel	Prämisse	Konsequenz
1	WENN Wischerintervall GERING UND Nässe-Stufe GERING	DANN Nässe-Level GERING
2	WENN Wischerintervall GERING UND Nässe-Stufe MITTEL	DANN Nässe-Level GERING
3	WENN Wischerintervall GERING UND Nässe-Stufe HOCH	DANN Nässe-Level MITTEL
4	WENN Wischerintervall MITTEL UND Nässe-Stufe GERING	DANN Nässe-Level MITTEL
5	WENN Wischerintervall MITTEL UND Nässe-Stufe HOCH	DANN Nässe-Level HOCH
6	WENN Wischerintervall HOCH UND Nässe-Stufe GERING	DANN Nässe-Level HOCH
7	WENN Wischerintervall HOCH UND Nässe-Stufe MITTEL	DANN Nässe-Level HOCH
8	WENN Wischerintervall HOCH UND Nässe-Stufe HOCH	DANN Nässe-Level HOCH

Tab. 4.3 Regelbasis Fuzzy-Nässe-Modell

Anhand der Regelbasis lässt sich erkennen, dass die fahrzeuggenerierten Daten gegenüber den stationär ermittelten Informationen priorisiert werden. Dies liegt darin begründet, dass die fahrzeuggenerierten Informationen streckenbezogen vorliegen, was insbesondere bei der Detektion von Niederschlagsereignissen die Wahrscheinlichkeit der Erkennung von Niederschlägen erhöht. Die in Tab. 4.3 dargestellte Regelbasis entspricht den Forderungen nach schneller und auch zuverlässiger Erkennung von Nässeereignissen.

Bei der Defuzzifizierung wird aus der Fuzzy-Menge ein einzelner repräsentativer Wert gebildet. Hierfür wird die Schwerpunktmethod gewählt, bei der aus dem Schwerpunkt der in der Akkumulation ermittelten Fläche ein aussagekräftiger Wert für die Nässe berechnet wird.

Aufgrund der unterschiedlichen Skalen der Eingangsgrößen kann das Nässe-Modell keine konkreten Intensitäten ausgeben. Analog der Nässe-Stufe, die aus stationär erfassten Umfelddaten bestimmt wird, erfolgt für die Nässe-Level keine Unterscheidung unterschiedlicher Niederschlagsarten. Die Zusammenführung der Eingangsgrößen, die unterschiedliche Wertebereiche aufweisen, wird durch die Verwendung von Fuzzy-Logik erleichtert.

Basierend auf den von der FGSV [2010a] dokumentierten Zusammenhängen und Schwellenwerten der logisch-physikalischen Plausibilitätsprüfungen für stationär erfasste Messwerte wird bei der Bestimmung der Ausgabegröße NS_{Modell} die Übereinstimmung von fahrzeuggenerierter Lufttemperatur und stationär erfasster Niederschlagsart der nächstgelegenen Messstelle überprüft. Diese Maßnahme dient der Qualitätssicherung der Ergebnisse des Modells. Wird die Niederschlagsart „Regen“ ermittelt, sollte die Lufttemperatur ≥ -5 °C betragen, für die Niederschlagsart „Schnee“ gilt die Überprüfung entsprechend umgekehrt.

4.4.4 Glätte-Modell

Funktionalitäten

Von BADELTE UND BREITENSTEIN [2005] wird ein Modell entwickelt und getestet, in dem aus mehreren stationär erfassten Umfeldgrößen Aussagen zu Glättegefahren generiert werden. Mittels Trendberechnungen können zudem Warnungen ausgegeben werden. Der ursprüngliche Anwendungsbereich war der Straßenwinterdienst; in FGSV [2010a] erfolgte eine Adaption an die Erfordernisse der Verkehrsbeeinflussung. Für die vorliegende Arbeit wird das Modell angepasst, so dass streckenbezogene Aussagen zu Glättewarnungen möglich werden. Hierfür ersetzen fahrzeuggenerierte Informationen des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells die ursprünglich von BADELTE UND BREITENSTEIN [2005] eingesetzten stationär erfassten Umfelddaten.

Das Modell ermittelt bereits ab Fahrbahnoberflächentemperaturen von +2 °C eine Glättewarnung mit akuter Glättegefahr („Glätte sofort möglich“). So sollen sicherheitskritische Fehlinterpretationen aus Messfehlern ausgeschlossen werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Fahrbahnbeläge auf die Glättebildung werden in dem Modell nicht berücksichtigt.

Stehen seit drei Minuten keine stationär erfassten Messwerte zur Verfügung, ist das Modell nicht anzuwenden. Maßnahmen des Straßenwinterdienstes, wie das Aufbringen von Taustoffen, was zu einer Erniedrigung der Gefrieretemperatur führt, berücksichtigt das Modell nicht.

Eingangsgrößen

Die folgenden Daten sind für das Glätte-Modell erforderlich:

- Fahrzeuggenerierte Informationen: Lufttemperatur $LT_{x_{FCD}}$
- Ergebnisse aus xFBZ-Einzelmodellen: Streckenbezogene Fahrbahnoberflächentemperatur und streckenbezogener Fahrbahnzustand
- Stationär erfasste Fahrbahnoberflächen- und Taupunkttemperatur (aktuell und historisch)

Aufbau

Das Bild 4.13 stellt den Aufbau des Glätte-Modells dar. Das Modell liefert schwellenwertbasiert Informationen zu vorhandenen oder zukünftig möglichen Glätteereignissen entlang von Strecken. Hierzu werden stationär erfasste Umfelddaten sowie fahrzeuggenerierte Luft- und modellierte Fahrbahntemperaturen interpretiert. Die möglichen Meldungen des Glätte-Modells sind in Anhang 5 kurz beschrieben. Basierend auf BADELTE UND BREITENSTEIN [2005] und [FGSV, 2010a] werden dort zudem für den Betrieb von SBA konkrete Handlungsempfehlungen behandelt.

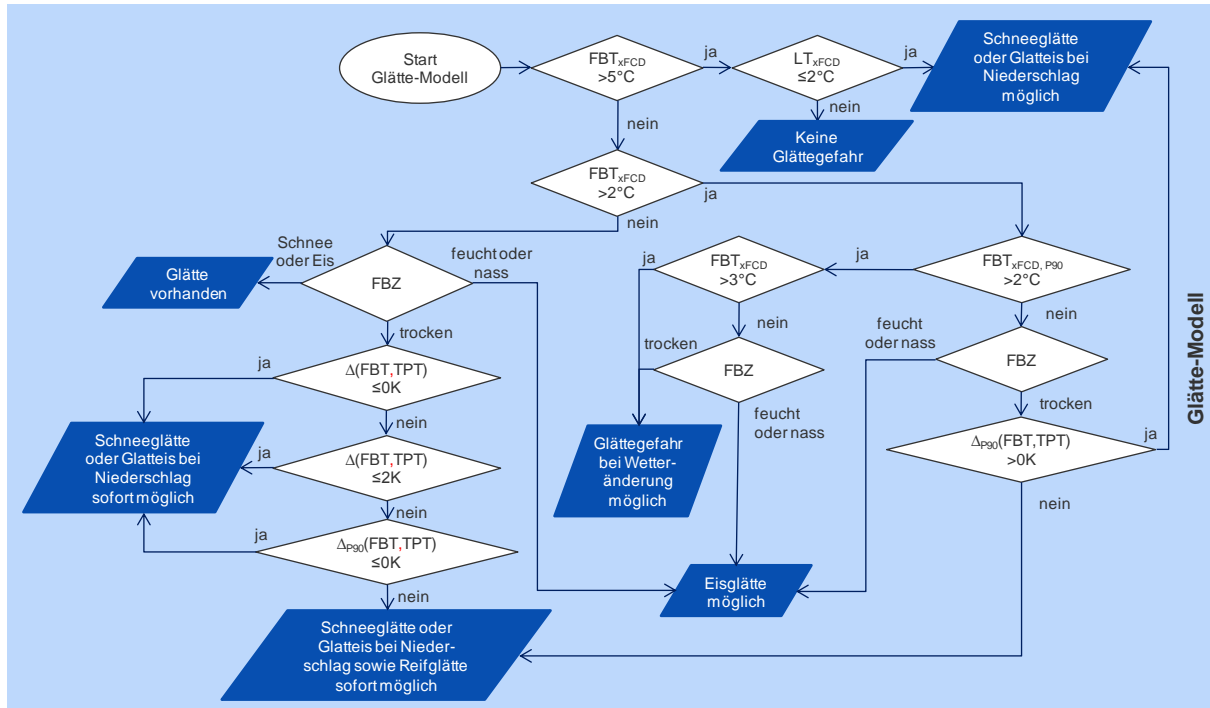


Bild 4.13 Aufbau des Glätte-Modells

Ergebnisgenerierung

Für die Einschätzung zukünftiger Umfeldbedingungen ist es im Rahmen des Glätte-Modells erforderlich, für Messwerte der Fahrbahnoberflächentemperaturen und Taupunkttemperaturen Trendextrapolationen durchzuführen (vergleiche Bild 4.13). Angelehnt an FGSV [2010a] wird die lineare Trendextrapolation gemäß (4.5) empfohlen:

$$y = a * x + b \tag{4.5}$$

mit:

$$a = \frac{\sum_i (x_i * y_i) - n * x_m * y_m}{\sum_i x_i^2 - n * x_m^2}$$

$$b = y_m - a * x_m \quad \text{mit}$$

$$x_m = \frac{\sum_i x_i}{n}$$

$$y_m = \frac{\sum_i y_i}{n}$$

a: Linearer Faktor (Steigung)

b: Verschiebungskonstante

x: Abszisse: Anzahl der Minuten vom aktuellen Zeitpunkt bis zu dem Zeitpunkt, für den die Trendtemperatur für die Fahrbahnoberfläche oder den Taupunkt berechnet werden soll. Diese Zeitspanne ist individuell festzulegen.

- y : *Ordinate: Zu berechnender Prognosewert, Trendtemperatur (Fahrbahnoberfläche oder Taupunkt) in der Zukunft*
- x_i : *Anzahl der Minuten seit einem vorherigen Messzeitpunkt bis zu dem aktuellen Messzeitpunkt für einen Parameterwert (Fahrbahnoberflächentemperatur oder Taupunkttemperatur)*
- n : *Anzahl der Parameter*
- i : *Index für einen Messzeitpunkt*
- x_m : *Mittelwerte der genutzten Zeitabstände*
- y_m : *Mittelwerte Fahrbahnoberflächentemperaturen/Taupunkttemperaturen*

Die zukünftigen Zeitpunkte sind parametrierbar, vorgeschlagen werden +5, +15, +30, +60 und +90 Minuten.

Da zu den Taupunkttemperaturen keine fahrzeuggenerierten Informationen vorliegen, werden im Modell die stationär erfassten Werte verwendet. Die Trendextrapolation erfolgt ausschließlich für die stationär erfassten Messwerte.

Validierung

Die Ausgaben des Glätte-Modells werden im Rahmen einer Validierung exemplarisch überprüft.

Das Glätte-Modell nutzt als fahrzeuggenerierte Information im Wesentlichen die mobil erfasste Lufttemperatur. Für diese Messgröße konnte durch die Überprüfung der Differenzen zu stationär erfassten Lufttemperaturen eine hohe Güte belegt werden (vergleiche Abschnitt 3.4.3).

Um für eine Validierung des Glätte-Modells eine aussagekräftigere Stichprobengröße zu erhalten, werden historische Daten des Monats Februar 2009 aus dem Testfeld „Eching Ost“ verwendet. Das Glätte-Modell wird nachträglich auf historische Messwerte angewendet und ex post ein Abgleich der vom Modell ermittelten Glätte(gefahren) mit den real eingetretenen Ereignissen durchgeführt. Für tatsächlich eingetretene Glätteereignisse wird geprüft, ob durch das Modell vorab eine korrekte Glättewarnung generiert worden wäre (Detektionsrate). Eine aussagekräftige Bestimmung der Fehlalarmrate des Modells ist nicht möglich, da das Glätte-Modell mögliche Änderungen der Umfeldbedingungen einbezieht, die eintreten können aber nicht eintreten müssen. Zudem liegen zu den durchgeführten Maßnahmen der Glättевorbeugung durch den Straßenwinterdienst keine Informationen vor.

Das Glätte-Modell wurde mittels Microsoft Excel Visual Basic for Applications programmiert und anhand von Daten des Testfelds für Umfelddatenerfassung des Monats Februar 2009 getestet. Hierbei handelt es sich um einen repräsentativen Wintermonat in Südbayern:

- Mittelwert der Temperatur der Fahrbahnoberfläche: 0,75 °C
- Maximale Temperatur der Fahrbahnoberfläche: 19,1 °C
- Minimale Temperatur der Fahrbahnoberfläche: -10,7 °C

Als Eingangsdaten für das Modell wurden Messwerte des als „geeignet für den Einsatz in SBA“ [DINKEL ET AL., 2009] bewerteten Sensors Vaisala DRS511 für Fahrbahngrößen, sowie der als verlässlich eingestufte Sensor Vaisala HMP45D zur Erfassung der atmosphärischen Messwerte verwendet. Die Bodensonde lieferte im Februar 2009 die in Tab. 4.4 gelisteten Ergebnisse. Eine genaue Analyse der Minutenwerte der Fahrbahnzustände „schneebedeckt“ und „gefrierend“, die insgesamt je eine Dauer von 121 und 144 Minuten aufweisen zeigt, dass es sich um vier separate Ereignisse handelte.

Messwert	Anzahl Minuten
Nicht gemessen	0
Trocken	20794
Feucht	2259
Nass	320
Nass und Chemikalien	5570
Frost	0
Schneebedeckt	121
Gefrierend	144
Feucht und Chemikalien	10404

Tab. 4.4 Fahrbahnzustände Februar 2009, Sensor Vaisala DRS 511

Die Ergebnisse des Glätte-Modells sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Ergebnis Glätte-Modell	Anzahl Minuten Februar 2009
Keine Glättegefahr	5079
Glätte vorhanden	265
Schneeglätte oder Glatteis bei Niederschlag sowie Reifglätte sofort möglich	1
Glättegefahr bei Wetteränderung möglich	2472
Eisglätte möglich	32063
Schneeglätte oder Glatteis bei Niederschlag möglich	0
Schneeglätte oder Glatteis bei Niederschlag sofort möglich	0

Tab. 4.5 Ergebnisse der Validierung des Glätte-Modells für Februar 2009

Die Anwendung des Glätte-Modells führte zu dem Ergebnis, dass vor sämtlichen kritischen Zuständen vorab gewarnt wurde. Dem vorne in diesem Textabschnitt beschriebenen Untersuchungsansatz würde somit eine Detektionsrate, als Quotient aus erkannten Glättesituationen zu der Anzahl insgesamt aufgetretener Glättesituationen, in Höhe von 100 % entsprechen.

chen. Die grundsätzliche Funktionstüchtigkeit des Modells konnte mittels dieses vereinfachten Validierungsverfahrens belegt werden. Die Ergebnisse lassen zudem erkennen, dass das Glätte-Modell vorhandene Taustoffe nicht berücksichtigt. Im untersuchten Beispiel wird sehr häufig die Meldung „Eisglätte möglich“ ausgegeben, obwohl Taustoffe aufgebracht sind und vom Sensor erkannt werden (als „Chemikalien“ in den Messwerten ersichtlich). Eine Berücksichtigung der Taustoffe wäre wünschenswert, diese Information ist streckenbezogen jedoch derzeit nicht verfügbar, so dass die Ergebnisse des Modells „auf der sicheren Seite“ liegen.

4.4.5 Fahrbahnzustand-Modell

Funktionalitäten

Das Fahrbahnzustand-Modell dient zur Ermittlung des streckenbezogenen Zustands der Fahrbahnoberfläche. Zur Quantifizierung und Klassifizierung der Fahrbahnnässe wird ein Fuzzy-Logik-Modell entwickelt, Fahrbahnglätte wird im Glätte-Modell ermittelt.

Eingangsgrößen

Die Eingangsdaten des Fahrbahnzustand-Modells sind:

- Ergebnisse aus xFBZ-Einzelmodellen (soweit verfügbar): Streckenbezogene Fahrbahnoberflächentemperatur, streckenbezogene Lufttemperatur, Nässe-Level
- Stationär erfasste Informationen: Fahrbahnzustand, Lufttemperatur und Wasserfilmdicke
- Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion für die Wasserfilmdicke

Aufbau

Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau des Fahrbahnzustand-Modells. Das Modell stellt eine zentrale Komponente innerhalb des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells dar, da es Ergebnisse des Nässe-Modells (Nässe-Level) und des Temperatur-Modells ($FBT_{x_{FCD}}$) nutzt sowie bei niedrigen Fahrbahntemperaturen ein Verweis auf das Glätte-Modell stattfindet. In Abhängigkeit von der Temperatur der Fahrbahnoberfläche liefert das Fahrbahnzustand-Modell mittels Fuzzy-Logik auf Basis der stationär erfassten Wasserfilmdicke und dem Nässe-Level Informationen zu der Fahrbahnnässe (trocken, feucht, nass, sehr nass).

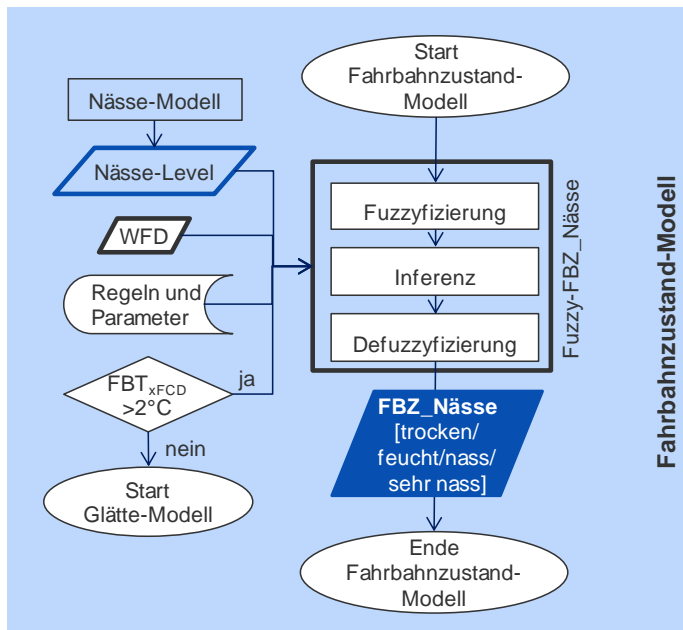


Bild 4.14 Aufbau des Fahrbahnzustand-Modells

Ergebnisgenerierung

Eine mögliche Variante zur Fuzzyfizierung der Wasserfilmdicke im Hinblick auf den Zustand der Fahrbahnoberfläche ist in Bild 4.15 dargestellt.

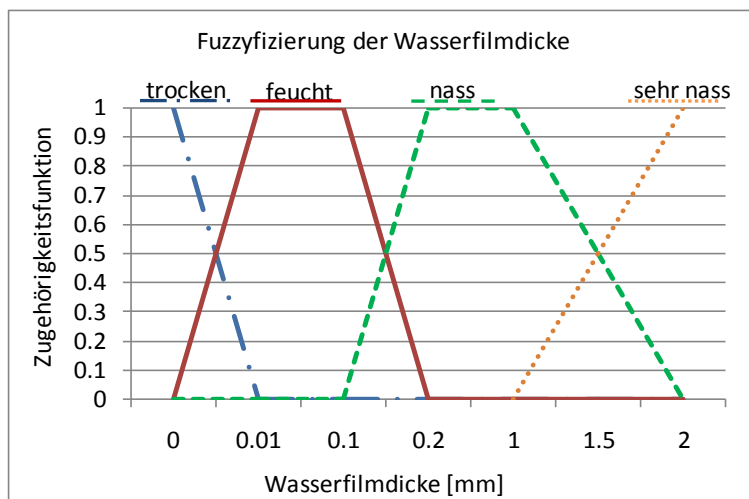


Bild 4.15 Zugehörigkeitsfunktion Wasserfilmdicke

Die Zugehörigkeitsfunktion des Nässe-Levels kann Bild 4.10 entnommen werden.

Mittels der Regelbasis in Tab. 4.6 kann das auf Fuzzy-Logik basierende Modell „Fuzzy-FBZ_Nässe“ unterschiedliche Fahrbahnzustände von trocken bis sehr nass unterscheiden.

Regel	Prämisse	Konsequenz
1	WENN Nässe-Level GERING UND Wasserfilmdicke TROCKEN	DANN FBZ_Nässe FEUCHT
2	WENN Nässe-Level MITTEL UND Wasserfilmdicke TROCKEN	DANN FBZ_Nässe FEUCHT
3	WENN Nässe-Level GERING UND Wasserfilmdicke SEHR NASS	DANN FBZ_Nässe NASS
4	WENN Nässe-Level HOCH UND Wasserfilmdicke SEHR NASS	DANN FBZ_Nässe SEHR NASS
...

Tab. 4.6 Regelbasis Fuzzy-FBZ_Nässe

Wie aus der obiger Tabelle ersichtlich ist, wird in der Regelbasis die fahrzeuggenerierte Information in dem Nässe-Level gegenüber stationär erfassten Größen priorisiert.

4.5 Qualitäts-Modul

4.5.1 Einordnung

Die Wirksamkeit der SBA-Maßnahmen hängt stark von der Qualität der ermittelten Daten und der eingesetzten Modelle ab. Es ist deshalb wichtig, die Qualität der erfassten Daten und Prozesse durchgängig zu überprüfen, um so bei Bedarf erforderliche Verbesserungsmaßnahmen einleiten zu können [TURNER, 2002]. Basierend auf den Erfahrungen in der Erhebung und Nutzung stationär erfasster Umfelddaten wird der Entwicklung und Anwendung qualitätssichernder Maßnahmen für xFCD eine hohe Wichtigkeit beigemessen. Die Zielsetzung besteht darin, die Ausgabe unsicherer Informationen zu vermeiden und möglichst korrekte, aktuelle und kontinuierlich vorliegende Ergebnisse zu erhalten.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen wird ein System zum Qualitätsmanagement entwickelt, das nachfolgend dargestellt wird. Es soll damit eine durchgängige und umfassende Qualitätsbewertung aller Daten, Prozesse und eingesetzten Komponenten durchgeführt werden.

Die Bezeichnung „Qualität“ ist vom lateinischen Begriff „qualitas“ abgeleitet, der für „Beschaffenheit“ und „Zustand“ steht. Maßnahmen zur Herstellung der gewünschten Qualität und zur Mängelerkennung werden der „Qualitätssicherung“ zugeordnet. Die Realisierung der Qualitätssicherung kann mittels eines Systems für „Qualitätsmanagement“ erfolgen. Diese Maßnahmen sollen gewährleisten, dass die Qualität von Prozessen und Verfahren dauerhaft überprüft und aufrecht erhalten, beziehungsweise optimiert wird. Festgelegt sind die Grundsätze des Qualitätsmanagements in der Qualitätsmanagementnorm, die in der europäischen Normenreihe DIN EN ISO 9000 ff. [2006] enthalten ist. Ein wesentliches Kriterium ist die Ausprägung von Merkmalen, die in der Norm als „Eigenschaft zur Erkennung oder zur Unterscheidung von Einheiten“ definiert werden. Es handelt sich um messbare Kenngrößen (beispielsweise generelle Funktionalität, Vollständigkeit, Aktualität, Konsistenz, Korrektheit), die

zur eindeutigen Beschreibung von Systemzuständen unterschiedlicher Prozesse verwendet werden können.

Basierend auf WAGNER [2006] wird zwischen dem zeitsynchronen Überwachen von Einzelprozessen (Prozessmonitoring) und der langfristigen Beobachtung eines Prozesses zur Identifikation von Tendenzen (Prozessreporting) unterschieden:

- Im Prozessmonitoring werden durch Qualitätsprüfungen mit statistischen Verfahren grobe Fehler (zum Beispiel (Teil-)Ausfälle der Gerätetechnik) sowie zufällige Fehler erkannt, die durch Methoden der mathematischen Statistik beschrieben und modelliert werden können.
- Durch die Aggregation der Ausprägungen der im Prozessmonitoring überwachten Kennzahlen über einen längeren Zeitraum können mittels Prozessreporting systematische Fehler ermittelt werden. Es lassen sich (kritische) Tendenzen erkennen, die durch ein reines Prozessmonitoring nicht zu entdecken wären. Die Voraussetzungen sind, dass die überprüften Prozesse bei der Einführung fehlerfrei laufen und die Fehler quantifizierbar sind.

Für fahrzeuggenerierte Umfeldinformationen wurden bislang keine Qualitätsmanagementkonzepte realisiert.

Um zuverlässige Informationen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand zu erhalten, wird ein durchgängiges System zum Qualitätsmanagement erstellt, das als Qualitäts-Modul in das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell integriert wird. Der Aufbau und die Funktionalität orientieren sich an einem Benchmarkingsystem für SBA nach BUSCH ET AL. [2006]. Hier wurden für sämtliche relevanten Systemkomponenten (Hard- und Software von SBA) Merkmale festgelegt und Maßnahmen zur durchgängigen Überwachung der Ausprägungen entwickelt. Eine Überprüfung aktueller Systemzustände im Vergleich zu vorab definierten Soll-Zuständen, den sogenannten Benchmarks, bewirkt für die Teilprozesse von SBA eine umfassende Qualitätssicherung der Systemkomponenten. Bei den Benchmarks handelt es sich um Zielvorgaben (zum Beispiel betreffend der Geräteverfügbarkeit oder Datenplausibilität), die sowohl von Leistungen externer Organisationen, als auch von historischen oder geplanten Leistungen abgeleitet werden können. Eine spezielle Methodik zur Überprüfung der Qualität der Umfelddatenerfassung im Rahmen von SBA wurde von GROŠANIĆ ET AL. [2012] vorgestellt. Dabei werden mittels FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) mögliche Fehler bereits vor ihrem Auftreten systematisch charakterisiert und im Vorfeld adäquate Maßnahmen definiert, um einen möglichst ungestörten SBA-Betrieb zu erzielen.

4.5.2 Qualitätsmanagementkonzept und Funktionalitäten

Die im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell eingesetzten Verfahren und Modelle, sowie die Ein- und Ausgangsgrößen werden durch ein Qualitätsmanagementsystem überprüft. Die Grundlage bildet ein Qualitätsmanagementkonzept für streckenbezogene Verkehrsdaten [DINKEL ET AL., 2008d], das im Folgenden auf die Überprüfung der hier im Fokus stehenden fahrzeuggenerierten Umfeldinformationen angepasst wird. In Anlehnung an REFIOR UND

RICHERS [2009] wird im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell für das Qualitätsmanagement-konzept die folgende Systematik und Terminologie verwendet:

- Es werden Ziele formuliert und deren Erreichungsgrad mittels Bewertungsverfahren ermittelt. Als Zielsetzung gilt, dass Fehlerquellen identifiziert und geeignete Schritte zur Erhöhung der Qualität von Daten, Verfahren und letztlich des SBA-Betriebs initiiert werden.
- Indikatoren stellen messbare Merkmale der Zielerreichung dar (siehe Abschnitt 4.2). Inhaltlich zusammengehörige Indikatoren werden unter dem Ordnungsbegriff „Kriterien“ zusammengefasst.
- Das Ziel wird in die Kriterien „Geräte(technik)“, „Daten“, „Modell“ und „System“ untergliedert.
- Das Qualitätsmanagementsystem basiert auf der Auswertung einzelner merkmalsüberprüfender Verfahren. Sämtliche Verfahren liefern Kennzahlen, welche gewichtet und zusammengefasst werden, um im Gesamtkontext zu der Ermittlung einer Qualitätsaussage (Service-Level) beizutragen.

4.5.3 Aufbau und Ergebnisgenerierung

Es werden sogenannte Monitore definiert, welche „online“ die Ausprägung bestimmter Indikatoren kontrollieren („Monitoring“):

- Geräte-Monitor: Überprüfung der Geräte- und Datenübertragungstechnik
- Daten-Monitor: Datenkontrolle
- Modell-Monitor: Prüfung der Ergebnisse aus den Modellen
- System-Monitor: Übergeordnetes Qualitätsmanagement des Gesamtsystems mittels einer Analyse der Ergebnisse der vorangegangenen Monitore und die dementsprechende Aktivierung von Störungsreaktionen

In den Monitoren werden mehrere Verfahren gebündelt, um so validierte Informationen zu der Ausprägung definierter Qualitätsindikatoren zu erhalten. Es werden dabei jeweils Qualitätsprüfungen zusammengefasst, die die gleichen Prozesse beziehungsweise Aggregierungszustände der Daten behandeln und einheitliche Merkmale überprüfen. Exemplarisch für die Datenerhebung sind in Bild 4.16 die Überprüfung der Geräteverfügbarkeit und der prinzipiellen Funktionstüchtigkeit der Übertragungstechnologien im Geräte-Monitor, sowie die Kontrolle der fahrzeuggenerierten und stationär erhobenen Daten im Daten-Monitor dargestellt. Als Ergebnis werden von allen zusammengefassten Überprüfungen Qualitätsindikatoren generiert, in Bild 4.16 sind dies beispielsweise die Geräteverfügbarkeit, Latenzzeiten und Vollständigkeit für den Geräte-Monitor. In den jeweils zugehörigen Monitoren erfolgt die Fusion der Qualitätsindikatoren nach festzulegenden Regeln. Bei der Fusion sind die Wichtigkeit und der Vertrauensgrad der einzelnen Verfahren einzubeziehen. Die je Merkmal aggregierten Qualitätsaussagen werden im System-Monitor interpretiert (Prozessmonitoring) und vorab definierte Maßnahmen, wie beispielsweise die Bildung von Ersatzwerten oder Störungsreaktionen initiiert. Die Störungsreaktionen umfassen in Anlehnung an FGSV [2011]

Maßnahmen zur Wartung und Instandhaltung sowie zur Optimierung von Prozessen. Es ist zu beachten, dass sich Störungsquellen auch aus den höheren Ebenen, den Monitoren und Modulen, zurückverfolgen und identifizieren lassen sollen, da nur so gezielt Störungsreaktionen initiiert werden können.

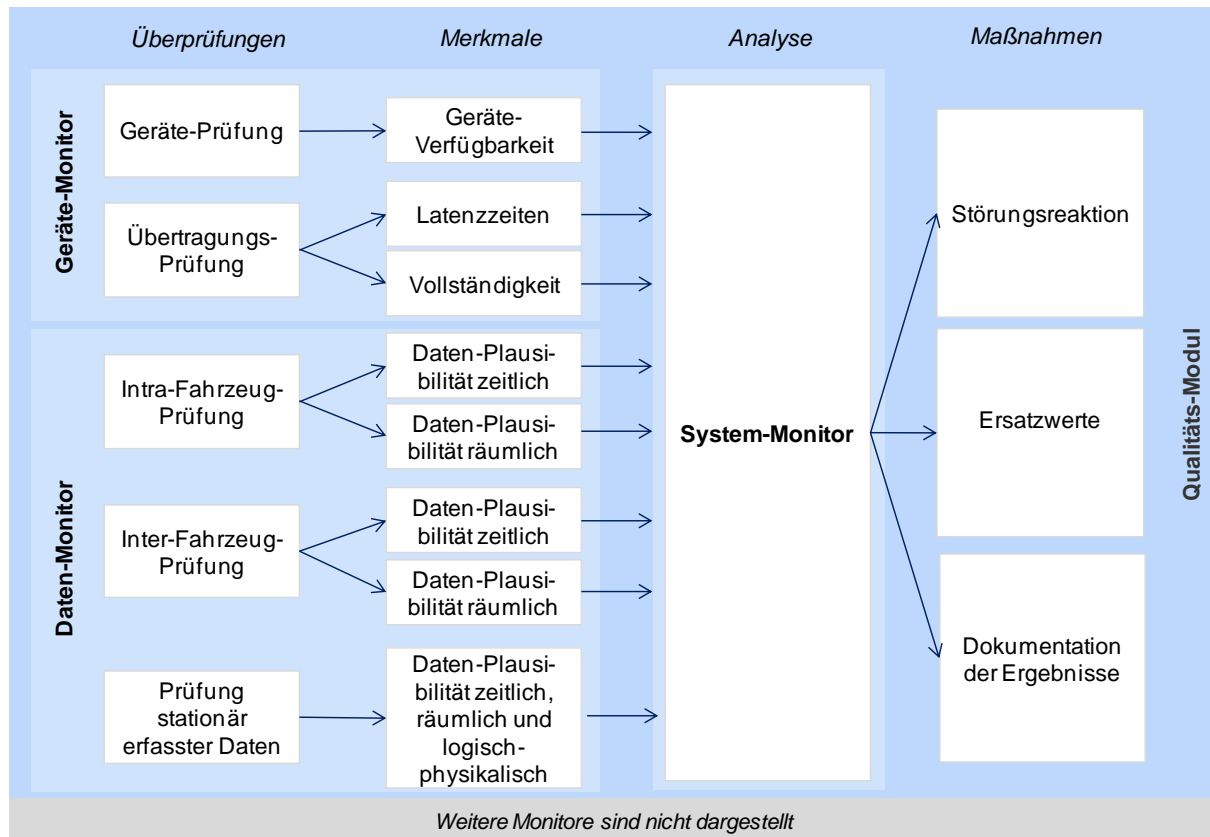


Bild 4.16 Qualitätsmanagementkonzept zur Datenerhebung, nach DINKEL ET AL. [2008d]

4.5.4 Geräte-Monitor

Aufbau

Der Geräte-Monitor dient zur Überprüfung der Gerätetechnik im Allgemeinen sowie der Übertragungstechnik im Besonderen. Im Geräte-Monitor werden die Verfügbarkeit von Messwerten und die Existenz von Fehlermeldungen ausgewertet. Der Prozess der Informationsgenerierung ist beispielhaft für den Geräte-Monitor in Bild 4.17 schematisiert dargestellt. Die mittels (falls verfügbar mehreren) Verfahren geprüften Indikatoren Geräteverfügbarkeit, Latenzzeiten und Vollständigkeit der Datensätze werden zusammengeführt und daraus eine aggregierte Aussage zum „Zustand der Gerätetechnik“ gebildet. Hierfür sind Gewichtungen und Fusionen von Einzelaussagen erforderlich. Das Resultat wird im System-Monitor analysiert, um darauf basierend geeignete Maßnahmen (beispielsweise Störungsreaktionen) zu initiieren.

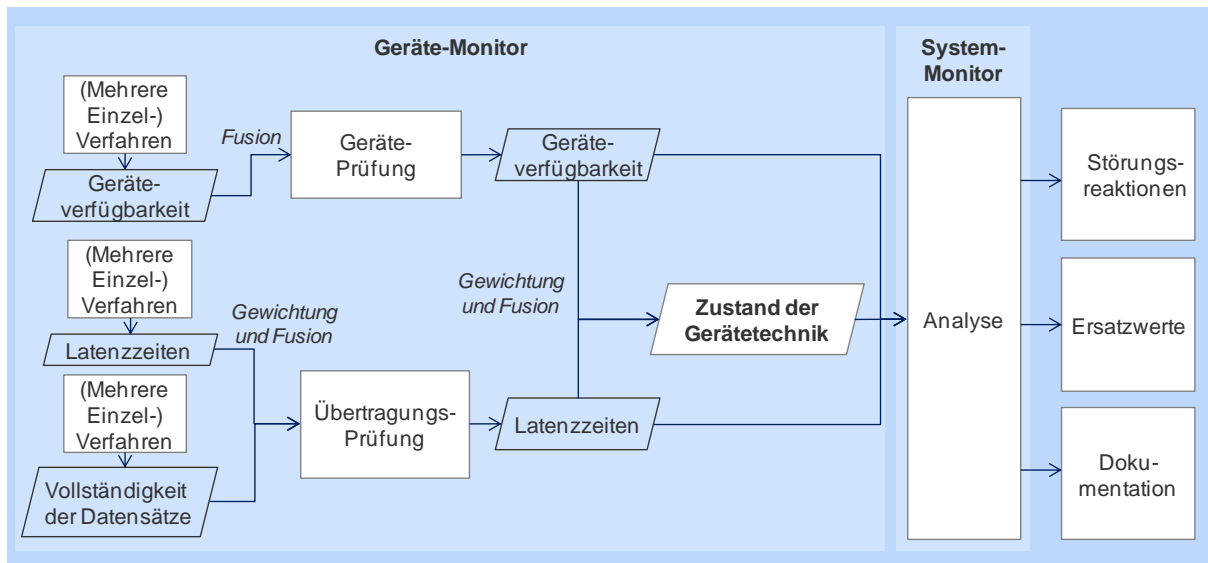


Bild 4.17 Informationsgenerierung im Geräte-Monitor und Anbindung an den System-Monitor

Geräte-Prüfung

Zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Gerätetechnik werden Verfahren verwendet, die im Rahmen des Prozessmonitorings das Merkmal „Geräteverfügbarkeit“ analysieren. Als fehlerhaft markierte beziehungsweise innerhalb einer parametrierbaren Zeit nach Ablauf des Messintervalls nicht übertragene Messwerte gelten als ausgefallen. Die Geräte-Prüfung lässt sich auf alle Datenarten anwenden.

Übertragungs-Prüfung

Da in einem Online-Betrieb des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells die Übertragung von Daten eine bedeutende Rolle spielt (siehe Bild 2.5), wird im Qualitätsmanagement insbesondere die Datenübertragung überprüft. Hierfür ist eine Definition der Prozesse zur Datenübertragung erforderlich. Die Teilprozesse sind in Tab. 4.7 dargestellt. Es sind zudem die Qualitätskriterien genannt, die bei der Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Datenübertragungstechnik auszuwerten sind.

Überprüfter Prozess	Qualitätsindikatoren
Datenaufbereitung zum Versand	Vollständigkeit, Latenzzeit
Verbindungsaufbau und -überwachung	Verbindungsverfügbarkeit, Zeitbedarf Verbindungsaufbau, Störungshäufigkeit
Datenübertragung	Vollständigkeit, Latenzzeit

Tab. 4.7 Überprüfte Prozesse und zugehörige Qualitätsindikatoren zur Übertragungs-Prüfung

Die Indikatoren Latenzzeit (als Maß für Verzögerungen in der Datenübertragung) und Vollständigkeit der Übertragung werden durch Qualitätsprüfungen im Prozessmonitoring kontrolliert. Das Prozessreporting dient zur Überprüfung der zeitlichen Verfügbarkeit der Übertragungstechnik.

4.5.5 Daten-Monitor

Aufbau

Die im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell verwendeten stationär und fahrzeugseitig erfassten Datenarten werden im Daten-Monitor auf ihre Plausibilität überprüft. XFCD werden im Rahmen der sogenannten Intra-Fahrzeug-Prüfungen mit weiteren Informationen innerhalb der Fahrzeuge abgeglichen. Bei den sogenannten Inter-Fahrzeug-Prüfungen findet ein Querabgleich mit Informationen aus mehreren Fahrzeugen statt, sofern weitere Datenquellen in ausreichender räumlicher und zeitlicher Nähe verfügbar sind. Der Qualitätsindikator Plausibilität wird im Rahmen des Prozessmonitorings kontrolliert. Im Prozessreporting werden Ergebnisse zur Verlässlichkeit der Einzelrohdaten gebildet.

Die im Daten-Monitor eingesetzten Verfahren zur Plausibilitätsprüfung orientieren sich an den Verfahren für die Messwerte stationärer Umfeldsensoren [FGSV, 2010a].

Intra-Fahrzeug-Prüfungen

Im Rahmen dieses Moduls erfolgt die Überprüfung der Plausibilität fahrzeuggenerierter Daten mit Hilfe der aus einem Fahrzeug gewonnenen Informationen. Es werden als Informationsquelle nur die in diesem Fahrzeug ermittelten Informationen herangezogen. Bei der Bezeichnung „intra“ handelt es sich um das lateinische Präfix für „innerhalb“.

Einzelne Prüfungen sind nachfolgend kurz beschrieben.

- Grenzwertüberwachung

Um als plausibel eingestuft zu werden, müssen die Ausprägungen der in den Fahrzeugen ermittelten Daten innerhalb parametrierbarer Grenzen liegen. Zur Kontrolle ist der folgende Algorithmus anzuwenden:

$$\text{Grenzwert}_{\text{Min}} \leq \text{Messwert} \leq \text{Grenzwert}_{\text{Max}} \quad (4.6)$$

Diese Prüfung ist insbesondere für Messwerte der Lufttemperatur LT_{XFCD} von Belang, da diese Messwerte durch externe Einflüsse verfälscht werden können (vergleiche Abschnitt 3.4.3). Als Grenzwerte werden angelehnt an die stationär erfassten Lufttemperaturen in einer Erstversorgung -30 °C für den $\text{Grenzwert}_{\text{Min}}$ und $+50\text{ °C}$ als $\text{Grenzwert}_{\text{Max}}$ vorgeschlagen.

- Differenzialkontrolle

Die Änderungen der Ausprägung von Umfeldgrößen beruhen auf physikalischen Zusammenhängen. So gilt die Ergebniskonstanz einer Messgröße ab einer bestimmten Zeitdauer als nicht plausibel. Für LT_{XFCD} wird als Erstversorgung 60 Minuten als noch plausible Zeitdauer vorgeschlagen.

- Logisch-physikalische Plausibilitätskontrollen

Hierbei handelt es sich um Querabgleiche zwischen verschiedenen Messgrößen beziehungsweise Informationsquellen (in diesem Modul: Innerhalb eines Fahrzeugs). Beispielsweise kann es sich hier um einen Abgleich zwischen dem Nässesensorsignal und

der Wischeraktivität handeln, da diese Größen übereinstimmende Aussagen bilden sollten. Unstimmigkeiten weisen auf externe Einflüsse oder Störungen hin, wobei Scheibenwaschvorgänge gemäß den Darlegungen in Abschnitt 3.4.4 zu berücksichtigen sind.

- **Anstiegs-Abfalls-Kontrolle**

Mittels der Anstiegs-Abfalls-Kontrolle wird überprüft, ob die Differenz zweier zeitlich aufeinander folgender Messwerte innerhalb eines (parametrierbaren) Rahmens liegt. Als Erstversorgung werden als Schwellenwert für die Anstiegs-Abfall-Kontrolle für $LT_{x\text{FCD}}$ $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorgeschlagen.

Inter-Fahrzeug-Prüfung

In diesem Modul werden zur Kontrolle der fahrzeuggenerierten Daten zusätzlich Informationen aus weiteren Fahrzeugen oder stationären Sensoren genutzt. Das Modul ist nach dem lateinischen Präfix „inter“ für „zwischen“ bezeichnet.

Im Rahmen des Prozessreportings sollen unsichere Einzelfahrzeugdaten (vergleiche Abschnitt 4.2.3) erkannt und ausgeschlossen werden, wofür die folgenden Verfahren eingesetzt werden:

- **Logisch-physikalische Plausibilitätskontrollen**

Analog zur Logik der logisch-physikalischen Plausibilitätskontrollen in der Intra-Fahrzeug-Prüfung sind Informationen aus Wischer und NässeSensor unterschiedlicher Fahrzeuge miteinander abzugleichen. Messwerte benachbarter stationärer NässeSensoren tragen zu der Entscheidung bei, welche der Informationsquellen (un)plausibel erscheint.

- **Räumliche Plausibilitätskontrollen**

Es werden Regeln hinterlegt, um zum Einen bei der Nässeerfassung beispielsweise Tunneldurchfahrten zu berücksichtigen. Zum Anderen soll über einen Abgleich der Fahrzeuggeschwindigkeiten einzelner Fahrzeuge mit dem zeitgleich fahrenden Fahrzeugkollektiv ermittelt werden, ob sich ein Fahrzeug im Kollektiv auf der BAB bewegt oder beispielsweise die Verkehrsflächen angrenzender Tank- und Rastanlagen befährt. Die xFCD werden dann für eine weitere Verwendung im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell ausgeschlossen, da diese zu Fehlinterpretationen der Umfeldbedingungen führen würden.

- **Langzeit-Plausibilitätskontrolle**

Regelmäßig über größere Zeitbereiche durchgeführte Vergleiche der Mittelwerte fahrzeuggenerierter Werte in dem einen stationären Sensor zugeordneten Bereich mit dem Mittelwert dieses Sensors kann auf Verstimmungen der stationären oder fahrzeuginternen Sensorik hinweisen.

Prüfung stationär erfasster Daten

Für die Überprüfung der stationär erfassten Daten wird die Anwendung der Plausibilitätskontrollen der FGSV [2010a] vorgeschlagen:

- Ausfallüberwachung: Erkennung als fehlerhaft markierter oder innerhalb einer parametrierbaren Zeit nach Ablauf des Messintervalls nicht übertragener Messwerte
- Grenzwertüberwachung: Kontrolle ob sich Messwerte innerhalb eines definierten Wertebereiches befinden
- Differentialkontrolle: Prüfung ob innerhalb eines bestimmten Zeitraumes eine Änderung des Messwertes eintritt
- Anstiegs-Abfall-Kontrolle: Kontrolle der Differenz zweier zeitlich aufeinander folgender Messwerte
- Plausibilitätsprüfung logisch/physikalisch: Plausibilitätskontrollen mithilfe von vergleichbaren oder meteorologisch voneinander abhängigen Messgrößen
- Langzeit-PL-Prüfungen: Überprüfung von Umfelddaten über längere Zeiträume um systematische Fehler zu identifizieren

Zur Erstversorgung nutzbare Schwellenwerte, die im Rahmen des Testfelds für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ für unterschiedliche Umfeldgrößen entwickelt und getestet wurden, sind FGSV [2010a] zu entnehmen.

Zudem können für SBA streckenbezogene Daten zur Plausibilisierung stationär erhobener Messwerte genutzt werden. Beispielsweise kann die Lufttemperatur aus xFCD bei den folgenden Plausibilitätskontrollen für stationär erfasste Lufttemperaturen einen Mehrwert liefern:

- Plausibilitätsprüfung logisch/physikalisch für NS [FGSV, 2010a]
- Langzeit-PL-Prüfung für LT [FGSV, 2010a]
- Plausibilisierte Nebelstufenermittlung [DINKEL ET AL., 2008c]

4.5.6 Modell-Monitor

Im Modell-Monitor erfolgt der Abgleich von prognostizierten und modellierten Daten mit den tatsächlich eingetretenen realen Werten über einen längeren Zeitraum. Dies kann auf die Ausgangsgrößen der Glätte-, LT- und FBT-Modelle (vergleiche Abschnitt 4.4.2) angewendet werden. Hierfür ist Voraussetzung, dass der real eingetretene Zustand bekannt ist. Die Ergebnisse der Modelle müssen also additiv als Information vorliegen. Die Resultate müssen analysiert werden und können zum Beispiel durch Hinweise auf erforderliche Parameteranpassungen zu einer Verbesserung der Ergebnisgüte und damit der Qualität und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems beitragen. Es lässt sich beispielsweise erkennen, wenn verschiedene Eingangsgrößen grundsätzlich voneinander abweichende Aussagen treffen. In diesem

Fall wird eine genaue Analyse der Eingangsdaten beziehungsweise der in den Modellen hinterlegten Algorithmen erforderlich.

Dieses Vorgehen wurde zum Beispiel bei der Untersuchung des Glätte-Modells gewählt. Als aussagekräftige Kenngrößen dienen die Fehlalarmrate, als Häufigkeitsmaß für die Meldung eines nicht vorhandenen Ereignisses, sowie die Detektionsrate, als ein Maß für die korrekte Erfassung einer Situation durch ein Modell.

4.5.7 System-Monitor

Im System-Monitor erfolgen die Analyse der Ergebnisse der übrigen Monitore des Qualitäts-Moduls und die übergeordnete Überwachung des Gesamtsystems. Werden definierte Soll-Standards nicht erreicht, folgt eine Veranlassung vorab festgelegter Störungsreaktionen (zum Beispiel Instandhaltungsmaßnahmen, Information zuständiger Stellen, Modellanpassungen, ...).

Beispielsweise werden im System-Monitor im Rahmen des Prozessmonitorings für den Geräte-Monitor Störungsdauern und -häufigkeiten berechnet und analysiert. Werden häufige oder lang anhaltende Störungen ermittelt (die Spezifizierung dieser Angaben muss parametrierbar sein), so sind zuständige Stellen möglichst exakt über die Störungen zu informieren, so dass die Störungen zielgerichtet behoben werden können. Zudem sind gegebenenfalls weitere vorab festgelegte Störungsreaktionen zu veranlassen. Zum Beispiel liefert das Prozessmonitoring für die Übertragungs-Prüfung Aussagen zu der Zuverlässigkeit und Durchgängigkeit der Datenübertragung, woraus auf Schwierigkeiten im Datenversand oder –empfang rückgeschlossen werden kann.

4.6 Output-Modul

In den vorherigen Abschnitten wurde beschrieben, wie mit dem xFBZ-Modul Aussagen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand und weitere für das Verkehrswesen bedeutsame dynamische Umfeldinformationen ermittelt werden. Diese basieren auf stationär erfassten Umfelddaten und den Informationen der jeweils verfügbaren Fahrzeuge. Im Rahmen des Output-Moduls erfolgt eine anwendungsorientierte Veredelung der Ergebnisse hinsichtlich zeitlicher, räumlicher und qualitativer Belange. Die Anforderungen hängen von dem Einsatzbereich des Modells ab, möglich sind beispielsweise die folgenden Konvertierungen:

- Ausgabe der Extremwerte je Zeitbereich, zum Beispiel Ermittlung der minimalen Fahrbahnoberflächentemperatur einer bestimmten Dauer
- Unter Verwendung der gefahrenen Geschwindigkeiten Umrechnung der zeitbasierten Modellausgaben auf Strecken:

$$s = v \times t \quad (4.7)$$

mit

s: Zurückgelegte Strecke [Kilometer; Meter]

t : Zeitintervall [Sekunde]

v : In dem Zeitintervall gefahrene Geschwindigkeit [Kilometer/Stunde; Meter/Sekunde]

- Ausgabe der Extremwerte je Streckenabschnitt, zum Beispiel Ermittlung der minimalen Fahrbahnoberflächentemperatur eines Streckenabschnitts
- Qualitätsaussagen, zum Beispiel zur Geräteverfügbarkeit:

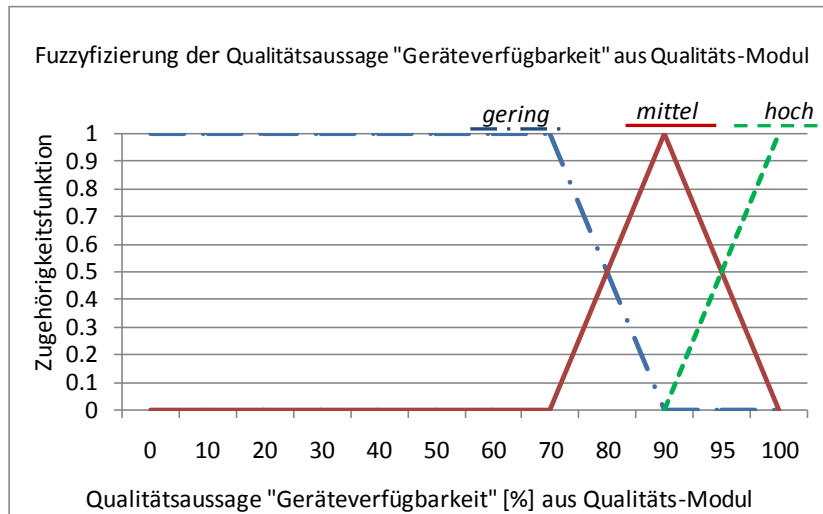


Bild 4.18 Zugehörigkeitsfunktion Geräteverfügbarkeit

- Bezüglich der Kritikalität der einzelnen Aussagen kann zum Beispiel für das Glätte-Modell die in folgender Abbildung gewählte Zuordnung gelten:

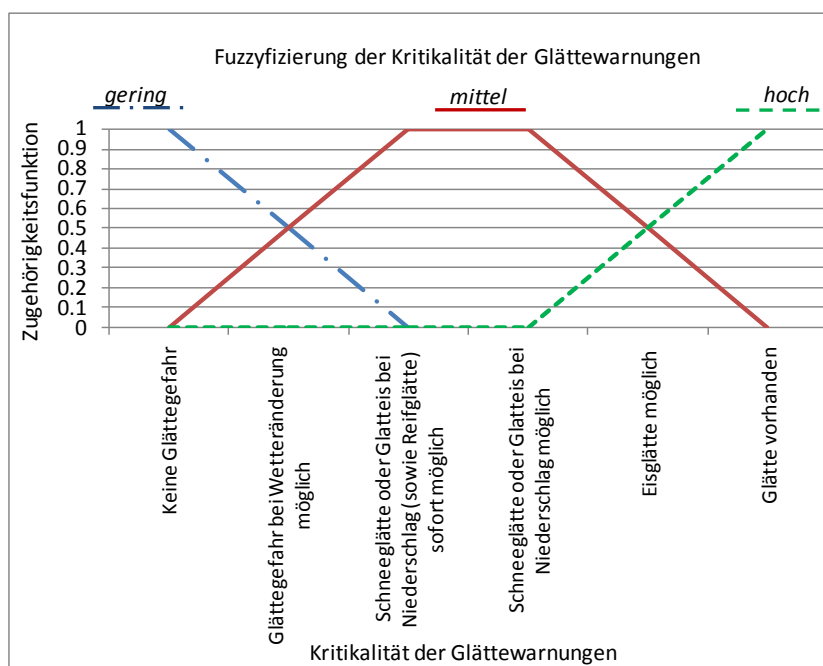


Bild 4.19 Zugehörigkeitsfunktion Glättewarnungen

Durch eine Kombination aus den oben dargestellten Zugehörigkeitsfunktionen zu der Kritikalität und der Geräteverfügbarkeit kann beispielsweise im Rahmen des Qualitäts-Moduls eine Priorisierung von Störungsmeldungen erwirkt werden. Desweiteren lassen sich statistische Größen dokumentieren.

4.7 Zwischenfazit

Es wurde das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell entwickelt, das fahrzeuggenerierte Daten und in SBA vorliegende stationär erfasste Umfelddaten fusioniert. Das Modell ermöglicht streckenbezogene Aussagen zum witterungsbedingten Zustand der Fahrbahnoberfläche, Informationen zu Nässe und Fahrbahnoberflächentemperaturen sowie Glättewarnungen. Im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell kann nicht zwischen atmosphärischem Niederschlag und Fahrbahnnässe unterschieden werden, weshalb der Überbegriff „Nässe“ verwendet wird.

Das Konzept sieht vor, dass die Fusion auf Ergebnisebene stattfindet. Dies bedeutet, dass die Modelle je Fahrzeug Resultate liefern und die Ergebnisse unterschiedlicher Fahrzeuge in der Zentrale fusioniert und veredelt werden. Das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell ist modular aufgebaut und verwendet Fuzzy-Logik, die sich aufgrund der Unschärfe der Umfeldinformationen sehr gut zu deren Interpretation und Verarbeitung eignet. Die Möglichkeit bei der Datenfusion mit Fuzzy-Logik Expertenwissen aus dem Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ einzubringen erwies sich bei der Modellbildung als vorteilhaft.

Da die Qualität der Modellergebnisse stark von der Güte der Eingangsdaten abhängt, beinhaltet das Gesamtmodell Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Eingangsdaten und Modellergebnissen. Das Qualitätsmanagementkonzept beinhaltet auch die Überprüfung von xFCD, wofür keine Ansätze aus anderweitigen Projekten bekannt sind. Durch die Nutzung unterschiedlicher Datenquellen und die konsequente Anwendung qualitätssichernder Maßnahmen lassen sich zuverlässige Modellergebnisse erwarten.

5 Voraussetzungen für einen Praxiseinsatz des Modells

5.1 Übersicht

Für die Entwicklung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells wurden „ideale“ Voraussetzungen und Randbedingungen vorausgesetzt. Die Verfügbarkeit der für den Betrieb erforderlichen Infrastruktur und Daten wurden dabei weitestgehend außer Acht gelassen. Um das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell in der Praxis der Verkehrsbeeinflussung zu nutzen, sind einige Voraussetzungen zu schaffen, die im Folgenden dargestellt werden. Angelehnt an KELLER [2004], BOLTZE ET AL. [2006] und BUSCH ET AL. [2007] wird die folgende klassische Gliederung für Systemarchitekturen verwendet:

- Konzeptionell-funktionale Aspekte (Abschnitt 5.2):
Verkehrstechnische Gesichtspunkte, wie Einsatzzweck, Datenbedarf, Wechselwirkungen von Funktionseinheiten und ihre Verknüpfungen
- Technisch-physische Aspekte (Abschnitt 5.3):
Gerätetechnik, Kommunikationseinrichtungen, technische Netzstruktur und Schnittstellen
- Organisatorisch-institutionelle Aspekte (Abschnitt 5.4):
Zusammenwirken der beteiligten Institutionen und Akteure, deren Aufgaben und Kompetenzen

Ergänzend werden in Abschnitt 5.5 die eine Praxiseinführung flankierenden rechtlichen Rahmenbedingungen skizziert, sowie in Abschnitt 5.6 in Form einer grundsätzlichen Nennung von Kosten- und Nutzenkomponenten die wirtschaftlichen Aspekte einer Einführung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells behandelt.

Ein Zwischenfazit zu den für einen Einsatz des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in der Praxis der Verkehrsbeeinflussung erforderlichen Voraussetzungen, sowohl von Seiten des Modells als auch der SBA, ist Abschnitt 5.7 zu entnehmen.

5.2 Konzeptionell-funktionale Aspekte

SBA sind primär dadurch gekennzeichnet, dass die Verkehrsteilnehmer mittels WVZ situationsgerecht auf Basis von aktuellen Wetter- und Verkehrsbedingungen gewarnt werden und der Verkehr durch eine Anpassung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit möglichst sicher und effizient abgewickelt werden soll. Diese konzeptionell-funktionalen Aspekte herkömmlicher SBA werden durch eine Integration des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells erweitert, indem zusätzliche Daten(quellen) im Rahmen von SBA verwendet werden.

Jene SBA, die das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell anwenden, werden im Folgenden als „xSBA“ (erweiterte/extended SBA) bezeichnet. xSBA zeichnen sich dadurch aus, dass xFCD direkt oder über Roadside-Units empfangen und zu einer VRZ/UZ übertragen werden (vergleiche Bild 2.5). Dort tragen sie als Eingangsgrößen im Erweiterten Fahrbahnzustand-

Modell zu verbesserten Aussagen zum witterungsbedingten Zustand der Fahrbahnoberfläche bei. Die Einbindung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in die Prozessabläufe der SBA kann die folgenden Funktionalitäten von SBA verbessern und ergänzen:

- Schaltung bei Nässe

Die Schaltung bei Nässe basiert auf stationär erfassten Messwerten für NI und WFD [FGSV, 2010a]. Das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell kann hierzu korrespondierend streckenbezogene und qualitätsgesicherte Aussagen zu Nässe und Fahrbahnzustand generieren. Als Grundlage für die Schaltbildermittlung dienen die Empfehlungen der FGSV [2010a].

- Schaltung bei Glätte

Diese Schaltung erfolgt manuell gemäß den Ausgaben eines Glätte-Modells, indem das Z 113 StVO „Schnee- oder Eisglätte“ angezeigt wird [FGSV, 2010a]. Durch die Verwendung zusätzlicher fahrzeugseitiger Informationsquellen kann das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Modell zur Glättewarnung eine Verbesserung bewirken, da die verwendeten Daten die Umfeldbedingungen entlang der Strecke besser repräsentieren als dies bei ausschließlicher Nutzung stationär erfasster Messwerte der Fall sein kann.

Zur Integration des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells und der Berücksichtigung der Ergebnisse sind die Steuerungslogiken anzupassen und gemäß der Gegebenheiten (Definition der Streckenabschnitte) und Anforderungen (Berücksichtigung bei der Festlegung der Fusionsregeln) je Anwendung zu parametrieren. Es werden eine Verbesserung der Qualität der Schaltungen und damit erhöhte Befolgungsraten durch die Verkehrsteilnehmer erwartet.

Da die bestehende Struktur der Streckenbeeinflussung auf Autobahnen und die dort eingesetzten stationär erfassten Umfelddaten bei der Konzeptentwicklung als Grundlage verwendet wurden, passt sich das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell gut in die Praxis der Verkehrsbeeinflussung mit SBA ein und lässt sich dort additiv oder substitutiv für Schaltungen bei Nässe und Glätte nutzen. Um die Integrationsfähigkeit des Modells zu verifizieren, wird das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell nachfolgend auf die in FGSV [2011] dargelegte Methodik zur Strukturierung des Steuerungsablaufs angewendet. Das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell umfasst sowohl Funktionalitäten der „Verfahren zur Situationsermittlung“, der „Maßnahmenauswahl“ als auch des „Situationsabgleichs“:

- Auf Grundlage aktuell stationär erfasster Umfelddaten und streckenbezogener xFCD werden räumlich-zeitlich verortete Informationen zu verkehrsrelevanten Witterungsbedingungen generiert, so dass diese Funktionalität des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells den Verfahren zur Situationsermittlung zugeordnet wird.
- Des Weiteren wird im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell ein Situationsabgleich durchgeführt. Mit dem Ziel, örtlich widerspruchsfreie Informationen zu den vorherrschenden Witterungsbedingungen zu generieren, findet im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell im Rahmen der Fusionen ein Abgleich der auf Basis der stationär und fahrzeugseitig erfassten Daten ermittelten Situationen statt.

- Im Steuerungsablauf folgt die Auswahl der auf die ermittelte Situation zugeschnittenen Maßnahmen, wofür vorab geeignete Maßnahmen zu definieren und in einer Maßnahmenbibliothek zu speichern sind. Das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell ermöglicht die Anforderung von Nässe- sowie manuellen Glätte-Schaltungen.

Die folgenden Teilschritte des Steuerungsvorgangs schließen sich an das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell an:

- Bewertung zur Koordinierung von sich räumlich überlagernden Maßnahmen innerhalb des Straßennetzes. Dieser Schritt ist je Anlage und Maßnahmenbibliothek durchzuführen.
- Zuordnung von Schaltbildern zu den gewählten Maßnahmen, um im Streckenverlauf widerspruchsfreie Schaltbilder zu erzielen. Hierzu sind die Vorgaben der RWVA [BAST, 1997b] zu konsultieren.

Dies bedeutet, dass in dem Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell die konzeptionell-funktionalen Strukturen zur Schaltbildermittlung in SBA gut abgebildet wurden und sich die logischen Prozesse eingliedern lassen. Das Erweiterte Fahrbahnzustands-Modell lässt sich in konzeptionell-funktionaler Hinsicht in SBA integrieren.

5.3 Technisch-physische Aspekte

5.3.1 Übersicht

Das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell setzt auf den bestehenden Datenübertragungsstrukturen von SBA auf und berücksichtigt die Vorgaben der TLS [BAST, 2002] und Empfehlungen des MARZ [BAST, 1999]. Die Realisierung der xSBA-Funktionalitäten erfordert dennoch eine Erweiterung und Anpassung technisch-physischer Komponenten, sowohl für die bestehende SBA-Infrastruktur, als auch seitens der Fahrzeuge und SBA-Kommunikationsarchitektur. Im Folgenden werden die zur Realisierung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells erforderlichen Modifikationen der Gerätetechnik, Kommunikationseinrichtungen, technischen Netzstruktur und Schnittstellen beschrieben. Die Erweiterung einer SBA zu einer xSBA soll bei voller Verträglichkeit der bestehenden Komponenten stattfinden.

Neben dem fahrzeugseitigen Bereitstellen von xFCD in Abschnitt 5.3.2 werden in Abschnitt 5.3.3 die Vorkehrungen für die Übertragung der Daten und in Abschnitt 5.3.4 die Nutzung der zusätzlichen Informationen in der VRZ beschrieben.

5.3.2 Fahrzeug

Eine grundsätzliche Voraussetzung zum Einsatz des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells ist die Verfügbarkeit fahrzeuggenerierter Informationen vom Fahrzeug-CAN-Bus. Die Normierung der CAN-Bus-Technologie ermöglicht eine standardisierte Schnittstelle zur fahrzeuginternen Übertragung der auf dem CAN-Bus vorliegenden Daten. Als wesentliche Norm

für den Einsatz des CAN-Bus in der Automobilindustrie gilt die ISO 11898-2 für den „High-Speed-CAN“. Es existieren weitere Spezifikationen, beispielsweise für den „Low-Speed-CAN“, die sich auf die Bitübertragungsschicht und die Sicherungsschicht des ISO/OSI-Referenzmodells (DIN ISO 7498) beziehen [REIF, 2007]. Die fahrzeuginterne Bereitstellung der Daten lässt sich somit gemäß der genannten Vorgaben realisieren.

Es bestehen jedoch keine Regelungen zur Vereinheitlichung von Codierung und Quelladressen, Auflösungen und Wertebereichen von xFCD. Dieses Defizit erschwert eine Erstellung allgemeingültiger datenverarbeitender Prozeduren. Die xFCD müssen demnach in On-Board-Units (OBU) vor dem Versand fahrzeugspezifisch an die Anforderungen der xSBA-Infrastruktur angepasst werden. Durch den gewählten Systemaufbau (vergleiche Bild 2.5) werden die CAN-Daten im Fahrzeug in den On-Board-Units vorgehalten bevor sie zu der RSU übertragen werden. Es bietet sich an, diese Übertragung in definierten Zeitintervallen oder durch einen Pollingprozess zu initiieren. Gemäß LINAUER [2005] erfolgt diese Abruf-Übertragung nur nach „Aufforderung“ und eignet sich deshalb gut, um Informationen für definierte Streckenabschnitte zu erhalten. Entsprechende OBU sind verfügbar, aufgrund der mangelnden Verbreitung von Maßnahmen jedoch noch nicht weit in der Praxis verbreitet.

Für die bakengestützten Systeme zur C2I-Kommunikation werden streckenseitige Baken zum Empfang der xFCD-Protokolle eingesetzt. Die folgende Systembeschreibung ist an LINAUER [2005] angelehnt. Aufgrund der kurzen Übertragungswege bietet sich zur Kommunikation Infrarot- bzw. Mikrowellentechnologie (DSRC) an. Fahrzeugseitig sind OBU zur Aufbereitung und Übertragung der xFCD erforderlich. Die xFCD-Datenpakete werden beim Passieren von Baken dorthin übertragen. In den SST werden die xFCD in das SBA-Kommunikationsnetz nach TLS [BAST, 2002] eingegliedert und zu der VRZ übertragen. Durch diesen Systemansatz entstehen relativ hohe Kosten, die für die umfangreiche Infrastruktur der OBU und RSU anfallen. Gemäß LINAUER [2005] reduzieren sich die Kosten, wenn man existierende Infrastruktur nutzt, was für den xSBA-Ansatz der Fall ist.

Die Ansätze mit Mobilfunk-Kommunikation zeichnen sich dadurch aus, dass die xFCD nicht über Baken sondern über Mobilfunk direkt in die VRZ übertragen werden. Der Rückkanal zur direkten Information und Beeinflussung des Fahrers ist hier problemlos möglich. Aufgrund der hohen Verfügbarkeit der Kommunikationsnetze werden bei diesem Systemansatz keine Investitionen in straßenseitige RSU benötigt. Aufwendungen sind für Ausrüstungen der Fahrzeuge und zur Kommunikation in der Zentrale erforderlich. Aufgrund der Ortsunabhängigkeit der Datenübertragung wird eine größere Flexibilität der Datenübertragung ermöglicht [LINAUER, 2005]. Eine Ortsbestimmung wird für diesen Ansatz vorausgesetzt. Die Festlegung des Kommunikationsansatzes bestimmt auch die Wahl der Übertragungsmethode (siehe Abschnitt 5.3.3).

Die xFCD sollen den zuletzt befahrenen und durch zwei AQ begrenzten Streckenabschnitt repräsentieren, was durch Maßnahmen zur Datenaufbereitung im Fahrzeug sichergestellt werden kann. Zur Minimierung der zu übertragenden Datenmenge sollte bereits im Fahrzeug eine Aggregation der xFCD stattfinden. HUBER [2001] hat eine Vorgehensweise entwickelt, bei der Meldungen nur bei Zustandsänderungen ereignisorientiert versendet werden. Hier-

durch lassen sich die Anforderungen an die erforderliche Bandbreite reduzieren. Da die xFCD als Ergänzung zu der Datenerfassung im Rahmen von SBA durchgängig vorliegen müssen, kann diese Methodik hier nicht angewendet werden.

Um den erforderlichen Speicherplatz für fahrzeuggenerierte Informationen zu minimieren und den Anforderungen an den Datenschutz gerecht zu werden, sollten die xFCD im Fahrzeug nur für eine begrenzte Zeit gespeichert und dann gelöscht werden. Dies lässt sich beispielsweise durch die Datenvorhaltung in Form eines Ringpuffers realisieren. Zudem sind nur ausgewählte Daten vom CAN-Bus bereitzustellen, hierzu zählen zusätzlich zu den in Abschnitt 3.6 genannten Daten beispielsweise die folgenden Informationen:

- Eindeutige Bezeichnung der Datenquelle (für Fahrzeuge aus Datenschutzgründen dynamisch zugewiesen und anonymisiert)
- Der durch die Daten abgedeckte Zeitraum und die zurückgelegten Entfernungen

Soweit verfügbar sind Störungsinformationen der einzelnen Datenquellen zu berücksichtigen. Spezifikationen zu Wertebereichen, Auflösungen, Aktualisierungsintervallen und so weiter sind vorab verbindlich in Form von Mindestanforderungen festzulegen. Diese müssen bei der Installation der OBU erfüllt sein.

Die OBU müssen in der Lage sein, spezifische xFCD vom CAN-Bus zu empfangen, die Daten zu aggregieren und zu den RSU zu übermitteln. Die zur Übertragung der Daten aus den Fahrzeugen zu den RSU erforderliche Ausrüstung wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

5.3.3 Datenübertragung

Die Grundzüge des kooperativen Datenaustauschs sind in Abschnitt 2.5.1 dargestellt. Die folgende Auflistung der bedeutendsten Standards zur drahtlosen Datenübertragung ist angelehnt an BILSTRUP [2007], HOLFELDER [2004] und ITWISSEN [2011]. Für die C2I-Kommunikation werden zur Datenübertragung typischerweise eingesetzt:

- WLAN (Wireless Local Area Network) gemäß der Standards IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11a, 802.11b oder 802.11g, die sich unter anderem hinsichtlich Datenraten, Frequenzbereichen und Modulationsverfahren unterscheiden. Die maximale Reichweite der Netzwerke wird mit circa 150 m bis 500 m angegeben.
- Bluetooth, das eine maximale Reichweite von bis zu 100 m aufweisen kann.
- Diverse Mobilfunksysteme unterschiedlicher Generationen, beispielsweise:
 - GSM (Global System for Mobile communications), ein Mobilfunksystemen der 2. Generation (2G), das eine Datenübertragungsrate von rund 200 kbit/s aufweist.
 - UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), das aufgrund der Verwendung von Leistungsmerkmalen der Leitungsvermittlung der GSM-Technik und der Datenpaketvermittlung der GPRS (General Packet Radio Service)-Technik ein 3G-Mobilfunksystem mit schnellem Datentransfer darstellt.

- HSPA (High Speed Packet Access), als System der 3,5. Generation eine Fortentwicklung von UMTS. Die Datenraten betragen rund 14,4 Mbit/s (Downlink) und 5,7 Mbit/s für den Uplink.
- Long Term Evolution (LTE), mit Datenraten von 100 Mbit/s im Downlink bzw. 50 Mbit/s im Uplink ein Mobilfunksystem der 4. Generation.
- Terrestrische Rundfunksysteme, zum Beispiel DAB (Digital Audio Broadcast) und Digital-TV mit terrestrischer Ausstrahlung (DVB-T: Digital Video Broadcast-Terrestrial) sowie das Pendant für mobile Endgeräte DVB-H (DVB for handhelds).

Die Auswahl einer geeigneten Datenübertragungsmethode wird maßgeblich durch die Anschaffungs- und Betriebskosten sowie von Qualitätsmerkmalen, wie beispielsweise Bandbreite, Ausfallsicherheit, Sicherheit sowie der Verfügbarkeit im Sinne der Netzabdeckung beeinflusst [HOLFELDER, 2004].

Derzeit werden zwei grundlegende Ansätze der C2X-Kommunikation unterschieden [WESSELS, 2006]:

- WAVE (Wireless Access for Vehicular Environment), das eine Funkkommunikation zwischen Fahrzeugen und Einrichtungen am Straßenrand (Roadside-Units, RSU) vorsieht, sowie
- VANet (Vehicular Adhoc Networks), bei der eine Echtzeitkommunikation zwischen Einzelfahrzeugen stattfindet.

Beide Techniken werden vom Car to Car Communication Consortium (C2C-CC) vorangetrieben und benutzen die WLAN-Technik 802.11 beziehungsweise 802.11p. Gemäß Bild 2.5 entspricht der in der vorliegenden Arbeit gewählte Systemaufbau dem WAVE-Ansatz. Für den Austausch der fahrzeuggenerierten Daten kann der Aufbau der Telegramme an das etablierte VANet-Telegramm angelehnt werden.

In den USA ist das 2002 gegründete Vehicle Safety Communication Consortium (VSC) bestrebt, den C2X-Informationsaustausch mittels 5.9 GHz DSRC zu etablieren. Bei DSRC handelt es sich um einen Kommunikationsstandard der bidirektionalen Funktechnik VANet [WESSELS, 2006], der als Ergänzung des Mobilfunknetzes zur C2X-Kommunikation eingesetzt werden kann und auf IEEE 802.11p basiert.

Bei der Realisierung der C2I-Kommunikation sollten die Fahrzeuge nicht rückverfolgbar sein, was sich beispielsweise durch zufallsgenerierte Identifikationen erreichen lässt. Über eine Authentifizierungsprozedur sollte der Versand gefälschter Nachrichten unterbunden sein, sowie durch eine Verschlüsselung des Datenverkehrs das Abhören vereitelt werden. Das C2C-CC setzt sich auf europäischer Ebene für einen Austausch fahrzeuggenerierter Daten mittels eines offenen Industriestandards ein [HOLFELDER, 2004]. Diese Bestrebungen sind nach Möglichkeit für die Zwecke der xSBA zu beeinflussen.

Das ISO/TC 204 CALM (Communication Air-interface Long and Medium range) entwickelt einen offenen und technologieübergreifenden Kommunikationsstandard für C2X-

Kommunikationsschnittstellen [ISO/TC 204, 2004], dessen Anwendbarkeit für xSBA zu prüfen ist.

Neben einer Etablierung der Maßnahmen zum Datenaustausch sind Maßnahmen zur Datensicherung vorzusehen. Erste Ansätze und Standardisierungen, die bei einer Praxiseinführung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells berücksichtigt und angewendet werden können, werden nachfolgend vorgestellt:

- Das Vorhaben COMeSafety2 zielt auf eine Standardisierung und dadurch vereinfachte Einführung kooperativer Maßnahmen ab. Im Fokus steht die Vereinheitlichung technischer und rechtlicher Anforderungen [COMESAFETY2, 2012], die bei einer Implementierung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells Berücksichtigung finden können.
- Das Projekt EVITA (E-safety vehicle intrusion protected applications) behandelt Maßnahmen gegen kriminelle Störungen der Datenübertragung innerhalb von Fahrzeugen (Anzeige von Falschmeldungen, Gerätemanipulation). Es wird eine Systemarchitektur für die Fahrzeugnetze entwickelt, in der sicherheitsrelevante Komponenten und Daten bei der Übertragung innerhalb des Fahrzeugs gegen Missbrauch geschützt werden [EVITA, 2008]. Für xSBA ist die gesamte Datenübertragungskette zu schützen.
- Bei der ISO 20828 „Road vehicles — Security certificate management“ [ISO, 2006] handelt sich um ein erweitertes Sicherheitsschema für den Datenaustausch zwischen und innerhalb von Fahrzeugen. Die xFCD würden bei der Übertragung durch einheitliche Einstellungen der Sicherheitszertifikate geschützt werden.
- Die Entwicklung eines offenen, sicheren und standardisierten Software- und Kommunikations-Moduls erfolgt in dem Projekt OVERSEE ("Open Vehicular Secure Platform") [OVERSEE, 2012]. Die Erkenntnisse können bei der Etablierung der fahrzeugseitigen Komponenten zur C2X-Kommunikation im Rahmen von xSBA unterstützen.
- Im Rahmen des durch die Europäische Union geförderten Projektes SeVeCom (Secure Vehicular Communication) wurden umfassende Anforderungen an Sicherheit und Datenschutz bei der C2X-Kommunikation definiert und implementiert. Es werden auch Aspekte wie Missbrauch, Anforderungen an die Verfügbarkeit und den Datenschutz sowie Kosten behandelt [SEVECOM, 2009], die bei der Projektierung der xSBA-Kommunikation konsultiert werden sollten.

Die Vorhaben machen deutlich, dass es sich bei der Sicherheit der Datenübertragung um einen sehr bedeutenden und intensiv untersuchten Aspekt der C2X-Kommunikation handelt. In engem Zusammenhang zu den genannten Aspekten der Datensicherheit sind bei der Übertragung von Informationen von einzelnen Fahrzeugen die rechtlichen Vorgaben (siehe Abschnitt 5.5) zu berücksichtigen.

5.3.4 Streckenseitige SBA-Infrastruktur

Die streckenseitig erforderlichen Anpassungen der SBA-Infrastruktur sind aus Abschnitt 2.5.1 ersichtlich. Hierzu zählt primär die Bereitstellung der RSU-Funktionalität (Variante 1 in Bild 2.5), um xFCD mittels Baken zu empfangen und in die kabelgebundenen SBA-

Kommunikationswege SST – UZ – VRZ gemäß TLS [BAST, 2002] einzubinden. Hierfür ist eine Erweiterung und Aktualisierung der TLS um die fahrzeuggenerierten Daten nötig. Innerhalb des SBA-Systems sind die xFCD gleichberechtigt zu den stationär generierten Umfeld-daten über den Datenverteiler [BAST, 2006] zu übertragen.

Für die Fahrer muss es möglich sein, bundesweit mit einheitlich standardisierter technischer Ausrüstung erweiterte C2X-Funktionalitäten nutzen zu können. Hierfür sind bundeseinheitliche Standards für die Übertragung fahrzeuggenerierter Daten zu RSU zu schaffen. Dies erfordert einen grundlegenden Abstimmungsbedarf zwischen politischen Entscheidungsträgern, Industrievertretern und Behörden. Gemäß HOLFELDER [2004] werden Ansätze erarbeitet, um die Nutzung und Übertragung fahrzeuggenerierter Daten in verkehrstechnischen Anwendungen zu vereinheitlichen und zu standardisieren. Im Projekt sim^{TD} [SIM^{TD}, 2012] werden für Datenformate derzeit entsprechende Vorarbeiten geleistet.

Für die direkte Übertragung der xFCD in die Verkehrsrechnerzentrale (Variante 2 in Bild 2.5) fallen streckenseitig keine Investitionen an.

5.3.5 Verkehrsrechner- und Unterzentralen

Die bestehende Struktur aus der stationären Datenerfassung und Verkehrsrechner- und Unterzentrale(n) mit den steuernden Prozessen kann prinzipiell beibehalten und genutzt werden. Einzelne Erweiterungen sind zentralenseitig je nach gewähltem Systemansatz (vergleiche Abschnitt 2.5.1) erforderlich. Für beide Varianten sind in der jeweiligen Zentrale Schnittstellen anzupassen, um xFCD zu empfangen und zu verarbeiten, damit die fahrzeuggenerierten Informationen in den Algorithmen des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells genutzt werden können. Entsprechende Softwareanpassungen sind vorzunehmen und das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell ist zu implementieren. Aufgrund der zusätzlichen Informationsquellen und Daten erhöhen sich der Aufwand zur Datenverarbeitung und der Speicherplatzbedarf. Die Arbeiten auf der Zentralebene sollten im Kontext des bundeseinheitlichen VRZ-Software-Basissystems erfolgen. Die Verkehrsrechner- und Unterzentralen sind modular strukturiert und weisen einheitliche Schnittstellen zwischen den Softwareeinheiten und dem Datenverteiler als Kernkomponente auf [BAST, 2006]. Das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell ist unter Beibehaltung dieser Grundsätze an den Bestand anzugliedern. Im Vergleich der beiden Systemvarianten zeigt sich für die Ausgestaltung der Verkehrsrechner- und Unterzentralen, dass sich in Variante 2 die Aufwände für Datenentgegennahme, –aufbereitung, –nutzung und –speicherung im Vergleich zu Variante 1 erhöhen.

5.4 Organisatorisch-institutionelle Aspekte

Grundsätzlich lassen sich in Abhängigkeit von den erbrachten Leistungen die folgenden Beteiligten unterscheiden:

- Dateneigner (Content Owner),
- Datenveredler (Content Provider) und

- Dienstanbieter (Service Provider).

Bei der Datengenerierung und –nutzung lassen sich in Deutschland gemäß STEINAUER ET AL. [2006] die folgenden Beteiligten differenzieren:

- Fahrzeughersteller und Institutionen, die Fahrzeuge zur Datenerfassung aufbereiten. Sie stellen ausgerüstete Fahrzeuge zur Erfassung und Übertragung von xFCD bereit.
- Dateneigner sind die Verkehrsteilnehmer, die ausgerüstete Fahrzeuge zur Datenaufzeichnung nutzen, oder zwischen Verkehrsteilnehmern und SBA-Betreibern zwischengeschaltete Institutionen.
- Dienstanbieter, der für die Übermittlung der aufbereiteten Informationen an den Verkehrsteilnehmer zuständig ist (zum Beispiel Betreiber von SBA oder externe Dienstleister).
- Netzbetreiber, der ein Kommunikationsnetz zur Datenübertragung zwischen Fahrzeugen und RSU (Variante 1) und direkt mit der Zentrale (Variante 2) bereitstellt.
- Datenveredler, der xFCD verarbeitet, um daraus Informationen zu generieren (zum Beispiel SBA-Betreiber oder externe Dienstleister).
- Dienstanbieter, die für die Übermittlung der aufbereiteten Informationen an den Verkehrsteilnehmer zuständig sind. Diese Leistung kann auch durch Dritte erbracht werden, für Verkehrsinformationen beispielsweise durch Automobilklubs.

Für die im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell benötigten Eingangsdaten gelten die folgenden organisatorischen Zuständigkeiten:

- Die Umfelddaten werden stationär im Rahmen von SBA erfasst, so dass die Zuständigkeit klar geregelt ist und bei der öffentlichen Hand (Straßenverkehrsbehörden gemäß § 44 und § 45 der StVO) als Betreiber der SBA liegt. Im Rahmen des in der vorliegenden Arbeit gewählten Ansatzes wird davon ausgegangen, dass die öffentliche Hand als SBA-Betreiber die erforderlichen technisch-physischen Anpassungen der SBA-Infrastruktur vornimmt und betreibt. Hierzu zählt sämtliche Aktorik, Software, Infrastruktur und Sensorik von SBA.
- Für eine Umsetzung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in die Praxis stellt sich die grundsätzliche Frage, welche Institution Fahrzeuge zur Generierung der xFCD einsetzen würde. Hieraus ergeben sich entsprechende Zuordnungen der Dateneigner. XFCD werden durch speziell ausgerüstete Fahrzeuge bereitgestellt. Diese müssen nicht im Zuständigkeitsbereich der SBA-Betreiber liegen, sie können beispielsweise durch das allgemeine Verkehrskollektiv geliefert werden. Eine weitere Möglichkeit ist es, bestimmte Flottenfahrzeuge gezielt auszurüsten, so dass beispielsweise Behörden, wie Autobahndirektionen oder Polizei, Taxis, und so weiter über OBU xFCD erfassen und übertragen. In diesem Fall wären die Flottenbetreiber oder zwischengeschaltete Stellen die Dateneigner. Die Datenüberlassung ist zwischen den jeweils Beteiligten zu regeln.

Da xFCD zurzeit nicht in größerem Umfang erfasst und zwischen unterschiedlichen Institutionen ausgetauscht werden, besteht für die Datenüberlassung bislang keine allgemeingültige

Regelung. Die momentan im Bereich der Verkehrstelematik existierenden Konzepte zur Datenüberlassung regeln zumeist finanzielle Aspekte und sind nicht xFCD-spezifisch [STEIN-AUER ET AL., 2006]. Hier werden je nach Ausgestaltung des Konzepts für xSBA und die beteiligten Institutionen zukünftig verbindliche Festlegungen zu treffen sein.

5.5 Rechtliche Aspekte

Verbindliche Richtlinien zur Verkehrssteuerung sind gemäß FGSV [2011] vor allem die RWVZ [BAST, 1997a] und die RWVA [BAST, 1997b]. Grundsätzlich gilt für die Verkehrsteilnehmer die Straßenverkehrsordnung (StVO), insbesondere mit den in § 1 formulierten Grundregeln sowie dem § 3 [BMVBS, 2010]: „Der Fahrzeugführer darf nur so schnell fahren, daß er sein Fahrzeug ständig beherrscht. Er hat seine Geschwindigkeit insbesondere den Straßen-, Verkehrs-, Sicht- und Wetterverhältnissen sowie seinen persönlichen Fähigkeiten und den Eigenschaften von Fahrzeug und Ladung anzupassen.“

Derzeit bestehen im Hinblick auf rechtliche Vorgaben zur Einführung kooperativer Systeme noch Defizite. Die folgende Beschreibung weiterer rechtlicher Aspekte der C2X-Kommunikation stützt sich auf den Ausführungen des Forschungsinformationssystems [FIS, 2009]. Im Kontext der xSBA werden die Rechte der Datenlieferanten mit xFCD als personenbezogenen Informationen diskutiert sowie Aspekte der Haftung behandelt, insbesondere die Staatshaftung für staatlich betriebene Infrastruktur.

Personenbezogene Informationen

Auf Bundesebene haben das Telekommunikationsgesetz und das Telemediengesetz (TMG) Einfluss auf die Erfassung, Übertragung und Nutzung von fahrzeuggenerierten und damit potenziell personenbezogenen Informationen. In Deutschland dürfen personenbezogene Informationen nur dann erhoben werden, wenn eine gesetzliche Grundlage oder die Zustimmung der betroffenen Personen vorliegt. Personenbezogene Daten sind in § 1, Artikel 3 des BDSG (Bundesdatenschutzgesetz) definiert als Informationen, die durch persönliche oder materielle Umstände auf eine identifizierte oder identifizierbare Person schließen lassen. Wenn durch Daten auf die Position einer natürlichen Person gefolgert werden kann, so handelt es sich um Personendaten. Die Erfassung und Verarbeitung von Personendaten muss in der Regel gemäß BDSG erfolgen, wobei dieses durch spezifischere Gesetze ersetzt werden kann. Der deutsche IT-Grundschutz-Katalog des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) behandelt die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit fahrzeuggenerierter Daten.

Auch das Europäische Parlament hat sich mit Fragen des Schutzes natürlicher Personen beschäftigt [EG, 1995 und EG, 2000]. Demnach sind die Rechte und Freiheiten der Personen, vor allem die Achtung der Privatsphäre, auch bei der automatisierten Datenverarbeitung zu berücksichtigen. Personen, deren Daten erfasst werden, haben das Recht die Daten einzusehen. Diese Schutzprinzipien finden keine Anwendung wenn die Daten derart anonymisiert werden, dass keine Personen identifizierbar sind.

Für den Betrieb von xSBA bedeutet dies, dass die fahrzeuggenerierten Daten keinen Fahrzeugkennzeichen oder Personen zugeordnet werden dürfen. Bei der Verarbeitung der anonymisierten Daten in der Verkehrsrechnerzentrale müssen technische und organisatorische Maßnahmen zum Datenschutz getroffen werden. Beispielhafte Maßnahmen zur Datensicherheit sind in Abschnitt 5.3.3 aufgeführt.

Bei der Realisierung der C2I-Kommunikation sollten die Fahrzeuge nicht rückverfolgbar sein, was sich beispielsweise durch zufallsgenerierte Identifikationen erreichen lässt. Über eine Authentifizierungsprozedur sollte der Versand gefälschter Nachrichten unterbunden sein sowie eine Verschlüsselung des Datenverkehrs das Abhören vereiteln.

Haftung

Im Rahmen von SBA stellen die angezeigten zulässigen Geschwindigkeiten verbindliche Vorgaben dar, wohingegen zusätzliche informierende Anzeigen nur empfehlenden Charakter haben. Dunkle Anzeigen sind nicht damit gleichzusetzen, dass aufgrund der vorherrschenden Verkehrs- und Umfeldbedingungen keine Gefahren zu erwarten wären, sondern es kann auch bedeuten, dass die Anlage außer Betrieb ist. Entsprechend resultiert selbst im Falle dunkler Anzeigen kein Haftungsanspruch gegenüber den (x)SBA-Betreibern [COOPERS, 2010]. Die Verantwortlichkeit im Falle eines technischen Defekts und daraus resultierendem Fehlverhalten ist zu klären. Bei einem Ausfall von xSBA-Komponenten dürfen keine Gefahrensituationen für die Verkehrsteilnehmer resultieren.

Fragen der Haftung sind vor allem für den Einsatz von OBU zum Anschluss an den Fahrzeug-CAN-Bus und Abgreifen von xFCD relevant.

Die Zulassung und der Einsatz von Systemen wie beispielsweise den dargestellten OBU sind in Deutschland durch die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) geregelt. Hierin ist für die Beschaffenheit des Fahrzeugs und der darin verbauten Komponenten gefordert, dass bei einer verkehrsüblichen Nutzung keine Schädigung, Belästigung oder Behinderung auftreten darf. Es darf sich zu keinem Zeitpunkt die Gefahr eines Unfalleintritts erhöhen. Diese Vorgaben basieren auf dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr, welches die Verkehrs- und Zulassungsbestimmungen der Vertragsstaaten regelt [SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT, 2009]. Wird durch ein Fahrzeugsystem ein Schaden verursacht, so ist gemäß Haftungsrecht für die Schadensregulierung zu klären, ob der Fahrer, der Fahrzeughalter oder der Hersteller des Systems verantwortlich ist. Demzufolge wird zwischen der Haftung des Fahrers, des Halters, des Herstellers (Produkthaftung) sowie der Staatshaftung unterschieden [BEWERSDORF, 2005], wobei nachfolgend aufgrund des Betriebs der SBA durch Straßenverkehrsbehörden die Staatshaftung näher behandelt wird.

Die Staatshaftung tritt bei technischem Versagen von staatlich betriebener Infrastruktur ein. Es lassen sich bei Verschulden eines Amtsträgers die Amtshaftung und der polizeiliche Entschädigungsanspruch der Länder, wenn kein Verschulden eines Amtsträgers vorliegt, unterscheiden.

Gemäß § 839 des Bürgerlichen Gesetzbuch BGB [BGB, 2009] und Artikel 34 des Grundgesetzes [BUNDESTAG, 2009] entsteht der Ersatzanspruch im Zuge der Amtshaftung gegen den hoheitlich handelnden Amtsträger, wenn der Beamte seine Amtspflicht einem Dritten gegenüber verletzt hat [BEWERSDORF, 2005]. Für Vertreter von Straßenverkehrsbehörden sind dies beispielsweise Verstöße gegen die Verkehrssicherungspflichten. Hierzu zählen zum Beispiel der Betrieb und die Wartung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen sowie Verkehrsregelungspflichten, wie die Programmierung und Installation von Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung. Die Straßenverkehrsbehörden sind verpflichtet eine optimale Verkehrsbeeinflussung anzustreben, um einen möglichst sicheren und harmonischen Verkehrsablauf zu erreichen.

Die Entschädigungsvorschriften der Polizeigesetze der Länder gelten bei Vermögensschäden aufgrund der Verletzung der Verkehrsregelungspflicht. Erleidet ein Geschädigter durch eine rechtswidrige Maßnahme der Ordnungsbehörden (zum Beispiel die Darstellung eines fehlerhaften Signals), unabhängig von einem Verschulden einen Schaden, kann ein Anspruch auf Entschädigung bestehen. Dies ist unabhängig von der Rechtswidrigkeit des Verhaltens des zuständigen Beamten [BEWERSDORF, 2005 und BERZ, 2002].

Somit ist es für den Betrieb von (x)SBA zwingend erforderlich, dass diese optimal konfiguriert sind und den Verkehr fehlerfrei gemäß der tatsächlich vorherrschenden Verkehrs- und Umfeldbedingungen beeinflussen. Die Erfüllung dieser Anforderungen lässt sich vor allem durch Maßnahmen des Qualitätsmanagements (vergleiche Abschnitt 4.5) erreichen.

Umfassende ergänzende Ausführungen sind den „Spezifikationen der IT-Sicherheitslösungen“ des Projekts sim^{TD} zu entnehmen [SIM^{TD}, 2009].

5.6 Kosten- und Nutzenaspekte

Die negativen Effekte witterungsbedingter Fahrbahnzustände auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf sind in Kapitel 2 dargelegt. Es wird erwartet, dass sich diese durch den Einsatz des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in der Verkehrsbeeinflussung reduzieren lassen. Durch die Erweiterung der Datengrundlage mit Fahrzeugen als unabhängigen Informationsquellen lassen sich zu witterungsbedingten Fahrbahnzuständen zuverlässigere Aussagen bestimmen. Diese bilden die Basis für optimierte Schaltungen, die von den Verkehrsteilnehmern besser befolgt und akzeptiert werden. Hieraus resultieren positive Nutzen im Hinblick auf die Verkehrssicherheit und die Kapazität.

Investitionsentscheidungen für SBA werden auf Grundlage einer bundesweiten Prioritätenreihung der Wirtschaftlichkeit aus einer Gegenüberstellung von geschätzten Kosten und Nutzen geplanter Verkehrsbeeinflussungsanlagen getroffen. Im „Projektplan Straßenverkehrstelematik 2015“ ist der mit den Ländern abgestimmte Ausbaubedarf für Verkehrsbeeinflussungsanlagen dokumentiert [BMVBS, 2012a]. Hierbei handelt es sich sowohl um die Neuerstellung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen, als auch um die Ertüchtigung und Erweiterung bestehender Anlagen.

Für die Erweiterung bestehender SBA zu xSBA wird nachfolgend allgemein das Vorgehen nach der Methode der Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) beschrieben, die beispielsweise in HOFFMANN ET AL. [2012] angewendet wurde. Mittels dieses Verfahrens werden die durch die geplante Erweiterung zu xSBA hervorgerufenen Wirkungen als Nutzen auf den betroffenen BAB-Streckenabschnitten in Form von Geldbeträgen angesetzt. Es erfolgt ein Vergleich mit dem Finanzbedarf für Investition und Betrieb der Maßnahme. Mit der Bestimmung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses (NKV) wird das Bewertungsergebnis auf einen Zahlenwert reduziert der angibt, wie viele Euro Nutzen je aufzubringendem Euro Kosten zu erwarten sind. Vorhaben, die ein $NKV > 1$ erreichen gelten als bauwürdig – wobei im konkreten Fall spezifische höhere Mindestwerte zu definieren sind. Die Bestimmung der gesamtwirtschaftlichen Nutzen und Kosten infolge der Implementierung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells kann orientiert an das Bewertungsverfahren zur Aufstellung des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) 2003 erfolgen [BMVBW, 2005]. Anders als bei den für den BVWP 2003 typischen Anwendungen, für die im Verkehrsbereich Nutzen in der Regel aus veränderten Verkehrsbelastungen aufgrund von räumlichen Verlagerungen (Neubau) und/oder aus den Querschnittsänderungen einer Straße (Ausbau) resultieren, sind die Nutzenkomponenten für xSBA erst zu identifizieren. Die nicht-monetären Wirkungen werden in finanzielle Größen überführt. Die Quantifizierung der Wirkung stellt einen komplexen Prozess dar, der von BUSCH ET AL. [2009] beispielsweise für SBA durchgeführt wurde.

In verkehrlicher Hinsicht resultieren aus Geschwindigkeitsunterschieden zu monetarisierende Kostenaspekte der xSBA. Aufgrund einer Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit durch Schaltungen aufgrund von Ausgangsgrößen des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells ergeben sich im Vergleich zu einem unbeeinflussten Verkehrsablauf zum Einen Erhöhungen der Reisezeiten für die Verkehrsteilnehmer, die als Kosten angesetzt werden können. Den reduzierten Geschwindigkeiten stehen zum Anderen jedoch Nutzen im Hinblick auf die Verkehrssicherheit gegenüber. Über das Ausmaß des Nutzens von SBA-Schaltungen bei witterungsbedingten Fahrbahnzuständen sind aus der Literatur und der Praxis der Verkehrsbeeinflussung keine Zahlen bekannt. Eine grobe Abschätzung des Nutzens einer xSBA bei Fahrbahnässe/-glätte für die Verkehrssicherheit kann in Anlehnung an ein in Südbayern geplantes Vorgehen [SCHIEFERSTEIN, 2012] erfolgen:

- Über je mindestens drei Jahre wird ein Vorher–Nachher Vergleich der Unfälle aufgrund von Nässe auf einer Autobahn durchgeführt. Die Unfallzahlen werden um den durchschnittlichen Rückgang der Unfallrate bereinigt und gegenübergestellt.
- In einem Mit-Ohne-Vergleich werden die Anteile der Nässeunfälle an den Gesamtunfallzahlen mit und ohne SBA berechnet. Wie in Verkehrssicherheitsanalysen üblich, sollte der Untersuchungszeitraum auch hier mindestens drei Jahre umfassen.
- Die Veränderungen der Unfälle aufgrund von SBA, die aus einem Vorher-Nachher-Vergleich und einem Mit-Ohne-Vergleich gewonnen werden, werden gegenübergestellt und es wird geprüft, ob sich in beiden Verfahren eine ähnliche Entwicklung abzeichnet. Falls dem so ist, wird diese als Sicherheitsgewinn von SBA bei Nässe gewertet.

Eine Monetarisierung der Unfälle findet gemäß der jährlich aktualisierten Unfallkostensätze für Personen- und Sachschäden [BAST, 2009b] statt. Es müssen Unfallstatistiken untersucht werden, um jene in der Vergangenheit auf dem zu untersuchenden Streckenabschnitt eingetretenen Unfälle zu identifizieren, die bei der Existenz einer verbesserten Fahrbahnzustandserkennung vermutlich nicht eingetreten wären. Durch Multiplikation mit den jeweiligen Unfallkostensätzen lassen sich die finanziellen Einsparungen durch die potenziell vermiedenen Unfälle abschätzen.

Bei den dargestellten Berechnungen handelt es sich um ex post-Evaluierungen von herkömmlichen in Betrieb befindlichen SBA. Die Ergebnisse sind auf ex ante Wirksamkeitsabschätzungen für xSBA zu übertragen, wobei erwartet wird, dass durch xSBA höhere Nutzen als durch SBA erzielt werden können. Die für SBA erzielten Resultate würden dementsprechend eine konservative Schätzung für die Nutzen von xSBA darstellen.

Bezüglich der Verfügbarkeit der Informationen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand gilt neben dem generellen Vorhandensein der Information, dass die vom Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell generierten Informationen aller Voraussicht nach schneller, genauer und richtiger als in herkömmlichen SBA vorliegen. Diese Aspekte werden in der Wirtschaftlichkeitsabschätzung nicht berücksichtigt, da sich diese Effekte nur schwer nachweisen und monetarisieren lassen.

Dem Nutzenpotenzial einer verbesserten Fahrbahnzustandserkennung werden die zu erwartenden erforderlichen Betriebs- und Investitionskosten gegenübergestellt. Da diese Kosten in Abhängigkeit des Anwendungsfalls stark variieren, wird in der vorliegende Arbeit auf eine Nennung konkreter Kosten verzichtet. Die zu beziffernden Kostenpositionen für die Investition umfassen die in Abschnitt 5.3 beschriebenen technisch-physischen Erweiterungen von SBA. Im Betrieb fallen gegebenenfalls Kosten für den Empfang der xFCD sowie für die Energieversorgung der RSU an. Für die Erweiterung von SBA zu xSBA stehen die für RSU streckenseitig erforderlichen Strom- und Datenkabel bereits zur Verfügung. In Relation zu den Gesamtkosten einer SBA werden die Aufwände für die Erweiterung um das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell samt den begleitenden Anpassungen als vergleichsweise gering eingeschätzt. Zum Beispiel werden die Kosten für die elektrotechnische Ausrüstung eines 10,5 Kilometer langen Autobahnabschnitts mit Streckenbeeinflussung und Seitenstreifenfreigabe auf 4,8 Millionen Euro beziffert [ABDNB, 2008]. Für die Ausrüstung der SBA mit Komponenten des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells wird nur ein Bruchteil dieser Kosten erwartet. Eine alternative Verdichtung der Sensorik ließe sich nicht wirtschaftlich realisieren.

5.7 Zwischenfazit

In Kapitel 5 wurde untersucht, welche Anforderungen für eine Einbindung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in die Praxis der Verkehrsbeeinflussung mit SBA zu erfüllen sind.

In konzeptionell-funktionaler Hinsicht lässt sich das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell in die logische Struktur von SBA eingliedern, es sind keine grundsätzlichen Hindernisse vorhanden. Dies wurde überprüft, indem es erfolgreich auf eine Methodik zur Strukturierung des

Steuerungsablaufs gemäß eines Hinweispapiers zu Steuerungsverfahren der FGSV [2011] angewendet wurde.

Für einen Praxiseinsatz des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells sind verschiedene technisch-physische Komponenten bereitzustellen. Hierzu zählt fahrzeugseitige Ausrüstung, um xFCD vom CAN-Bus abzugreifen und an streckenseitige Roadside-Units oder direkt in die Verkehrsrechnerzentrale zu übertragen. Da keine einheitlichen und verbindlichen Vorgaben zur Codierung von Daten auf dem CAN-Bus existieren, lassen sich keine allgemeingültigen datenverarbeitenden Prozeduren etablieren. Dieser Umstand erschwert eine Praxiseinführung des kooperativen xSBA-Ansatzes. Zur Realisierung der C2X-Kommunikation stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Streckenseitig sind mit den RSU Empfangseinheiten zu schaffen, die für den Empfang und die Einführung der xFCD in die nachrichtentechnische Struktur der SBA gemäß TLS [BAST, 2002] sorgen. Wird die direkte Übertragung der xFCD in die Verkehrsrechnerzentrale gewählt, erhöhen sich zentralseitig die Aufwände zur Datenaufbereitung und -verarbeitung. Diese Variante zeichnet sich dahingegen dadurch aus, dass keine streckenseitigen Einrichtungen und Investitionen erforderlich sind. Die Erfüllung der technisch-physischen Anforderungen bildet eine zu erbringende Grundvoraussetzung für die Einführung des Modells in die Praxis der Verkehrsbeeinflussung.

Im gewählten Untersuchungsansatz wird davon ausgegangen, dass die Straßenverkehrsbehörden als Betreiber der SBA den Betrieb des Modells und der zugehörigen streckenseitigen Infrastruktur übernehmen. Die xFCD werden durch das Verkehrskollektiv bereitgestellt. Es werden keine grundsätzlichen organisatorisch-institutionellen Hemmnisse erwartet.

Unterschiedliche rechtliche Aspekte werden benannt. Bei der Berücksichtigung der Anforderungen, die insbesondere an den Datenschutz bestehen, sollten einer Praxiseinführung keine rechtlichen Grenzen gesetzt sein. Aufgrund der großen Anzahl an derzeit laufenden Projekten zur Datensicherheit lässt sich erkennen, dass dies ein wesentlicher Aspekt der C2X-Kommunikation ist, der für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb von xSBA sorgfältig ausgebildet sein muss.

Da es sich bei der Praxiseinführung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells um eine Erweiterung von bestehender SBA-Infrastruktur handelt, wird davon ausgegangen, dass die Maßnahme gemäß „Projektplan Straßenverkehrstelematik“ vom Bund gefördert wird [BAST, 2012]. Um die Wirkungen von xSBA abschätzen zu können, wird ein Grobkonzept erstellt.

In Anbetracht der Darlegungen wird für die Ertüchtigung von SBA zu xSBA von einem NKV weit über 1 ausgegangen. Es wird erwartet, dass die vom Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell generierten Informationen schneller, genauer und richtiger als in herkömmlichen SBA vorliegen. Die für eine Ertüchtigung von SBA zu xSBA anfallenden Kosten sind im Vergleich zum erhöhten Nutzen und der bereits verfügbaren SBA-Infrastruktur als sehr gering einzuschätzen.

6 Kritische Einordnung der Arbeit

6.1 Übersicht

Um das gewählte methodische Vorgehen und die in der Arbeit erzielten Ergebnisse einer kritischen Einordnung zu unterziehen, werden diese in Kapitel 6 hinterfragt und bewertet. Da das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell nicht in der Praxis angewendet wurde, wird hierfür ein strukturiertes Vorgehen in Anlehnung an SWOT-Analysen (siehe Abschnitt 6.2) gewählt. Neben einer Diskussion der methodischen Vorgehensweise bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung werden Stärken und Schwächen des entwickelten Modells charakterisiert und analysiert. Um externe Einflüsse auf zukünftige Praxiseinsätze des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells abschätzen zu können, werden in Abschnitt 6.2.4 zudem als externe Faktoren Chancen und Risiken dargestellt. Basierend auf einer kombinatorischen Analyse der diskutierten Aspekte werden abschließend ein zusammenfassendes Fazit gezogen und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen gegeben. Das Kapitel 6 bietet somit neben der kritischen Einordnung der gewählten Vorgehensweise und dem hiermit entwickelten Modell Hilfestellung bei der strategischen Entscheidung über dessen Praxiseinführung unter Berücksichtigung externer Tendenzen und Entwicklungen.

6.2 Bewertung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells

6.2.1 Hintergrund und Vorgehensbeschreibung der SWOT-Analyse

Gemäß Bild 1.1 folgen der in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Modellentwicklung und den Handlungsempfehlungen die Umsetzung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells mitsamt Wirkungskontrolle. Da das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell aufgrund der fehlenden xSBA-Infrastruktur nicht implementiert wurde, muss von den Empfehlungen der FGSV [2011] abgewichen werden. Aufgrund der fehlenden Daten- und Erfahrungsgrundlage lassen sich in der vorliegenden Arbeit sowohl quantitative als auch qualitative Bewertungsverfahren, wie beispielsweise eine Nutzwertanalyse, nicht anwenden. Um die Arbeit dennoch einer kritischen Einordnung zu unterziehen, sollen in Abschnitt 6.2 das gewählte methodische Vorgehen und die in der Arbeit erzielten Ergebnisse hinterfragt und bewertet werden.

Die Recherche verschiedener Analysetechniken [BMI, 2012] zeigte auf, dass beispielsweise Ursache-Wirkungs-Diagramme und FMEA stark auf eine Analyse von Fehlern fokussieren. Diese Untersuchung soll an dieser Stelle nicht im Mittelpunkt der Untersuchung stehen. Die sogenannte Pareto-Analyse wird zur Priorisierung unterschiedlicher Handlungsstrategien verwendet. Dies stellt keine in der vorliegenden Arbeit zu behandelnde Aufgabe dar. Es wird beschlossen, das strukturierte Vorgehen gemäß einer SWOT-Analyse anzuwenden, bei der systematisch Stärken (Strengths), Schwächen (Weaknesses), Chancen (Opportunities) und Risiken (Threats) untersucht werden [CIO, 2011]. Im Vergleich zu den weiteren Analysever-

fahren bietet die SWOT-Analyse als Mittel des strategischen Managements die Möglichkeit, die interne und externe Sicht zu verknüpfen [BMI, 2012].

Dabei wird wie folgt vorgegangen: Die Stärken und Schwächen bilden interne Faktoren ab, die aus der Sicht des xSBA-Betriebs im Hinblick auf die Ausprägung und Anwendung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells untersucht werden. Diese Aspekte zeichnen sich dadurch aus, dass es sich um Merkmale und Fähigkeiten handelt, die beeinflussbar sind und die Güte der durchgeführten Arbeit charakterisieren. Sie werden in Abschnitt 0 aufgeführt.

Ergänzend werden als Chancen und Risiken sogenannte externe Faktoren untersucht, für die aus Sicht des SBA-Betreibers keine Kontroll- und Einflussmöglichkeiten bestehen. Sie umfassen beispielsweise Trends und regulatorische Vorgaben, die einen Betrieb von xSBA beeinflussen können. In Abschnitt 6.2.4 werden die externen Faktoren als Einfluss zukünftiger Entwicklungen und Technologien beschrieben und gemäß der in Kapitel 5 behandelten Voraussetzungen für die Einbindung des Modells in die Praxis der Verkehrsbeeinflussung strukturiert dargelegt.

Die internen und externen Faktoren werden in den folgenden Abschnitten bereits diskutiert und bewertet. Der sich gemäß CIO [2011] anschließende Schritt der Umsetzung der Ergebnisse der SWOT-Analyse in Handlungen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt. Durch die strukturierte und offene Diskussion der einzelnen Aspekte wird eine ganzheitliche Einordnung des erstellten Modells und der angewandten Methodik ermöglicht. Hierfür wird in Abschnitt 6.2.4 anhand der Analyse bedeutender Kombinationen der internen und externen Faktoren eine Strategie zum weiteren Vorgehen entwickelt (siehe Abschnitt 6.2.5).

Als Ergänzung zu den genannten Untersuchungen wird im folgenden Abschnitt das methodische Vorgehen charakterisiert.

6.2.2 Diskussion des methodischen Vorgehens zur Modellentwicklung

Da das gemäß FGSV [2001] empfohlene Vorgehen aus den oben genannten Gründen nicht stringent angewendet werden konnte, erfolgt im Folgenden eine Prüfung der zur Bearbeitung der Aufgabenstellung gewählten Vorgehensweise. Diese Bewertung kann zudem Hilfestellung bei der Bearbeitung ähnlich gelagerter zukünftiger Aufgaben liefern. Analysiert wird insbesondere das in Kapitel 3 geschilderte Vorgehen im Rahmen der Datenanalyse, die als Vorbereitung zu der in Kapitel 4 dargestellten Modellentwicklung dient.

Zunächst sei hervorgehoben, dass die Prüfung von Qualität und Aussagekraft der fahrzeuggenerierten Daten vor deren Anwendung in der Modellentwicklung eine Stärke und auch ein Alleinstellungsmerkmal des Untersuchungsansatzes darstellt, zumal zu der Qualität von xFCD aus der Literatur keine allgemeingültigen Aussagen bekannt sind.

Die im öffentlichen Straßennetz konsistent und zielorientiert abgewickelten Befahrungen zur Datenerfassung, die auf einer umfassenden Grundlagenrecherche (vergleiche Kapitel 2) basieren, stellen eine Stärke des Untersuchungsansatzes dar. Der Einsatz zweier Versuchs-

fahrzeuge unterschiedlicher Typen hilft bei der Einschätzung der aufgezeichneten Daten und zeigt die Vorteile mobiler Erfassung bereits deutlich auf. Um die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen und die Übertragbarkeit der Erkenntnisse zu überprüfen, sollte jedoch zum Einen die Anzahl der untersuchten Ereignisse erhöht werden. Zudem sind mehr Fahrzeuge, unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Hersteller, als Datenquellen für weiterführende Analysen heranzuziehen. Die Verwendung einer größeren Anzahl an Fahrzeugen hätte auf der einen Seite vertiefte Kenntnisse über verfügbare xFCD erbracht, hätte andererseits aber einen hohen Bearbeitungsaufwand generiert. Insbesondere da die auf dem Fahrzeug-CAN-Bus vorhandenen Informationen nicht standardisiert sind und so die Datenaufbereitung aufwändig an jede Datenquelle individuell anzupassen ist. Die Vergleiche der Daten beider Hersteller lieferten positive Ergebnisse und stimmen für eine verbreitete Anwendung des Modells zuversichtlich.

Bei der Prüfung und Interpretation der fahrzeuggenerierten Daten stellten insbesondere die Verwendung der stationär erfassten Vergleichsdaten aus dem Testfeld für Umfelddatenerfassung aufgrund der Redundanz, der durchgeführten Qualitätssicherung und Referenzmessungen sowie der installierten Webcams zur Dokumentation der Verhältnisse vor Ort eine hilfreiche Informationsquelle sowie ein Alleinstellungsmerkmal dar. Um bei der Analyse der stationär erfassten versus der fahrzeuggenerierten Daten zuverlässige Ergebnisse zu erzielen, wird die Kontrolle der stationär erfassten Vergleichsdaten als sehr bedeutsam eingeschätzt und die Anwendung der Plausibilitätskontrollen somit als Stärke des gewählten Vorgehens gewertet.

Das gewählte Aggregierungsintervall von einer Sekunde stellt für die Datenanalyse einen guten Kompromiss zwischen Aussagekraft und Aufwand zur Datenverarbeitung und -haltung dar. Für detaillierte Untersuchungen von Kenngrößen werden besser feiner aufgelöste Rohdaten verwendet. So konnten für die Bestimmung von Nässe und Glätte aussagekräftige fahrzeuggenerierte und stationär erfasste Daten ermittelt werden, die im Rahmen der Modellentwicklung aufgegriffen wurden.

Die in den Befahrungen eingesetzte technische Ausrüstung der Fahrzeuge funktionierte fehlerfrei. So waren keine Datenausfälle der Datenlogger zu verzeichnen und die Videofilme und Webcambilder lieferten qualitativ hochwertige und hilfreiche Informationen, die bei der Interpretation der Befahrungen und aufgezeichneten Daten sowie der Modellbildung unterstützten.

Die methodische Vorgehensweise zeichnet sich dadurch aus, dass die Modellentwicklung auf Grundlage der Untersuchung von Realdaten erfolgt. Es ist zu bemängeln, dass das Modell nicht in der Realität eingesetzt und erprobt werden konnte.

6.2.3 Diskussion der internen Faktoren des Modells

Entwickeltes Modell (Kapitel 4)

Es gelten die folgenden Schwächen des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells:

Die Strahlung beeinflusst das thermische Verhalten der Fahrbahnoberfläche und somit die Entstehung von Glätte maßgeblich. Im Rahmen der Bearbeitung waren jedoch keine Strahlungsinformationen verfügbar, so dass die im Temperatur-Modell durchgeführten Modellierungen nur eine eingeschränkte Qualität und Vertrauenswürdigkeit aufweisen können. Vereinfacht wird diese fehlende Information kompensiert, indem mittels Clustering typische Umfeldsituationen gebildet und untersucht werden. Eine nachhaltige Verbesserung der Information kann jedoch nur durch die Integration von Strahlungsinformationen erfolgen.

Für das entwickelte Modell wurden folgende Stärken identifiziert:

Der modulare Aufbau des Modells erlaubt eine hohe Flexibilität für Anpassungen an unterschiedliche Einsatzbereiche oder sonstige Anforderungsänderungen. Die Fuzzy-Logik eignet sich aufgrund der Unschärfe der Umfeldinformationen sehr gut zu deren Interpretation und Verarbeitung. Die Verwendung von Fuzzy-Logik erlaubt bei der Fusion eine nachvollziehbare Gewichtung der Kriterien unterschiedlicher Quellen. Die Möglichkeit, in die Modellierung Expertenwissen einzubringen, erwies sich aufgrund der umfassenden Informationen und Erfahrungen aus dem Testfeld für Umfelddatenerfassung als vorteilhaft.

Das Konzept zum Qualitätsmanagement stellt einen erforderlichen aber bislang in keiner Praxisanwendung umfassend angewendeten Prozess dar. Für xFCD wurde im Rahmen des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells erstmalig ein durchgängiges Qualitätsmanagementkonzept für Daten und Modelle im Rahmen von SBA entwickelt.

Durch die Erweiterung der Datenerfassung um unabhängige Informationen aus fahrenden Fahrzeugen wird eine merklich verbesserte Informationslage mit positiven Effekten auf die Steuerungsqualität und damit die Verkehrssicherheit und die Kapazität von Autobahnabschnitten erwartet.

Voraussetzungen für den Einsatz des Modells in der Praxis der Verkehrsbeeinflussung (Kapitel 5)

Grundsätzlich zeichnen sich die Vorschläge zur Einbindung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in den SBA-Bestand dahingehend aus, dass das Modell auf eine Verwendung von xFCD aus Serienfahrzeugen aufbaut. Außer den Einrichtungen zur C2I-Kommunikation und den zentralenseitigen Methoden zur Datenverarbeitung sind keine zusätzlichen technischen Ausrüstungen erforderlich. Somit sind die für eine Praxiseinführung des Konzepts zu erfüllenden Anforderungen durch den gewählten Ansatz begrenzt worden. Dennoch ist hier festzuhalten, dass die maßgebliche derzeitige Einschränkung darin besteht, dass für die Realisierung einer der vorgeschlagenen C2I-Kommunikationsvarianten keine entsprechenden Infrastrukturen für Empfang und Versand von xFCD bereitstehen. Grundsätzlich sind entsprechende Kommunikationsausrüstungen auf dem Markt verfügbar. Weitere Defizite des

Modellansatzes sind die für einen Abgriff der Informationen aus den Fahrzeugen erforderlichen Standardisierungen sowie die Erfordernis, Fahrzeuge mit entsprechenden OBU auszurüsten. Zusammenfassend stellt es Schwächen des entwickelten zukunftsorientierten Ansatzes dar, dass wesentliche Infrastrukturelemente nicht vorhanden sind und für einen breiten Praxiseinsatz des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells Standardisierungen der fahrzeuggenerierten xFCD zu erbringen sind.

Die Effizienz von Datenaustausch und Datenhaltung wurde bei der Entwicklung des Konzepts für das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell nicht berücksichtigt. Ein Konzept von HUBER [2001] kann als Grundlage für Optimierungen dienen.

Es wird als Stärke gesehen, dass das methodische Vorgehen praxisnah an den Vorgaben und Anforderungen der derzeitig bestehenden SBA ausgerichtet ist und basierend auf dem Bestand darauf abzielt, deren Funktionalitäten zu erweitern und zu verbessern.

6.2.4 Diskussion der externen Faktoren aus zukünftigen Entwicklungen und Technologien

Einordnung

Wie die in Kapitel 5 dargestellten Voraussetzungen für die Einbindung des Modells in die Praxis der Verkehrsbeeinflussung zeigen, sind hierfür auf sämtlichen Ebenen der SBA-Systemarchitektur Anpassungen erforderlich. Eine Integration des Modells in bestehende SBA erscheint vor allem aufgrund der Nicht-Verfügbarkeit von xFCD und Ausrüstung mit RSU nicht zeitnah realisierbar. Aus diesem Grund wird auf Grundlage des derzeitigen Stands der Technik nachfolgend die Praxiseinbindung des Modells vor dem Hintergrund sich abzeichnender zukünftiger Entwicklungen diskutiert. Für die Diskussion dieser von SBA-Betreibern nicht beeinflussbaren externen Faktoren wird dieselbe Gliederungsstruktur wie in Kapitel 5 gewählt.

Konzeptionell-funktionale Aspekte

In konzeptionell-funktionaler Hinsicht werden keine Risiken diskutiert. In Bezug auf die konzeptionell-funktionalen Aspekte gelten die folgenden Chancen:

Die kollektive Verkehrsbeeinflussung mittels Verkehrsbeeinflussungsanlagen wird im Rahmen des „Projektplans Straßenverkehrstelematik 2015“ mit insgesamt 300 Millionen Euro für Voruntersuchungen und Realisierungen gefördert. Zu Ende des Förderzeitraums werden in Deutschland rund 3500 Kilometer Richtungsfahrbahn mit SBA ausgerüstet sein [BAST, 2012]. Dies bedeutet, dass die kollektive Verkehrsbeeinflussung, die als Grundlage für das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell dient, auch weiterhin den Stand der Technik zur Lösung von Verkehrsproblemen auf Autobahnen darstellt und bundesweit umfassend eingesetzt werden wird. Es ist zu erwarten, dass sich kooperative Ansätze, wie sie seit Jahren untersucht und weiterentwickelt werden, auch in der Praxis der SBA etablieren werden. Im Rahmen bedeutender nationaler und internationaler Projekte, wie z. B. AKTIV [2012], COOPERS [2012], CVIS [2012], FOTSIS [2012], SAFESPOT [2012] und SIM^{TD} [2012], wurden Grundlagen

kooperativer Ansätze erarbeitet und angewandt. Hierbei fand in der Vergangenheit eine Verschiebung der Forschungstätigkeiten von intelligenten Fahrzeugen hin zu kooperativen Ansätzen statt. Die vorliegende Arbeit zeichnet sich dadurch aus, dass konsequent auf den Strukturen und Logiken von SBA aufgesetzt wird und so von einem Ansatz auszugehen ist, der den Bestand und die dafür ausgegebenen Mittel optimal nutzt und vergleichsweise unaufwändig zu einem zukunftsorientierten und effizienten kooperativen Ansatz erweitert. Ein derart hoher Praxisbezug zu SBA wurde nicht in allen oben genannten Forschungsprojekten realisiert. Für den gewählten kooperativen Systemansatz wird gemäß EU [2012] von „mehr Sicherheit durch qualitativ höherwertige und verlässlichere Informationen“ ausgegangen, was als Chance für eine Praxisanwendung des Projekts bewertet wird.

Aufgrund der im Vergleich geringeren erforderlichen fahrzeugseitigen Anpassungen wird davon ausgegangen, dass eine Integration von FCD in die Steuerungsabläufe der SBA zeitlich vor einer Einbindung von xFCD stattfinden wird. Zusätzlich wird durch die Kommission der Europäischen Union im Kontext der "eSafety"-Initiative die Einführung des europäischen Fahrzeug-Notrufsystem "eCall" vorbereitet. Dabei wird bei einem Unfall mittels einer im Fahrzeug installierten On-Board-Unit über ein Mobilfunknetz eine Notrufverbindung initiiert. Für den Betrieb von eCall wird GSM verwendet und der Standort des Fahrzeugs über GPS erfasst. Es wird erwartet, dass die Etablierung von eCall erweiterte Telekommunikationsdienste nach sich zieht, was initial für die Markteinführung einer intelligenten Fahrzeug-Kommunikationsplattform wirken kann [BMVBS, 2011]. Entsprechende Entwicklungen würden eine positive Randbedingung für eine Realisierung von xSBA darstellen.

Da sich der Aufbau und die Einbindung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in den SBA-Steuerungsprozess auf die nationalen Empfehlungen der FGSV [2011] zur Strukturierung des SBA-Steuerungsablaufs anwenden lassen, stellen diese eine Chance für eine Berücksichtigung des Modells in zukünftigen Praxisanwendungen dar.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die konzeptionell-funktionalen Grundlagen für kooperative Systeme geschaffen sind. Es wird erwartet, dass diese langfristig bestehen bleiben werden. Die Nutzung und Erweiterung des millionenschweren Bestands an SBA-Infrastruktur zur Erfassung und Nutzung von FCD und xFCD stellt die logische Fortentwicklung des Stands der Technik für SBA dar.

Technisch-physische Aspekte

Es werden keine Risiken formuliert. Die Chancen im Hinblick auf die technisch-physischen Aspekte sind:

Die Strukturen von SBA sind festgelegt und dokumentiert. Zum Beispiel aus den Gremien der FGSV und seitens des BMVBS sind derzeit keine grundlegenden Änderungen absehbar. Somit besteht die Chance, dass der in der vorliegenden Arbeit dargelegte Ansatz auf zukunftssicheren Annahmen fußt und auch zukünftig anwendbar sein wird.

Den wesentlichen fehlenden Anknüpfungspunkt stellen die streckenseitigen RSU, die fahrzeugseitigen OBU sowie die Maßnahmen zur Datenkommunikation dar (vergleiche Bild 2.5).

Es wird davon ausgegangen, dass getrieben durch andere Anwendungen, wie zum Beispiel die Ausrüstung von innerstädtischen Lichtsignalanlagen mit WLAN-Sendern für einen Dienst zur Mobilitätsunterstützung für Blinde und Sehbehinderte [INMOBS, 2012], sogenannte „Enabler“ für die Ausrüstung von streckenseitiger Infrastruktur und Fahrzeugen entstehen. Zudem wird erwartet, dass die dort eingesetzten Kommunikationseinrichtungen bei sukzessive steigenden Ausstattungsgraden zur Nutzung in weiteren Anwendungen offen sind.

Fahrzeugseitig wird die Verfügbarkeit von Informationen aus Fahrerassistenzsystemen zukünftig steigen. So ist beispielsweise gemäß der Verordnung 661/2009/EC des EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES [2009] für alle neuen Straßenfahrzeuge ab 1. November 2014 und für solche mit neuer Typzulassung bereits ab 1. November 2011 die Ausrüstung mit ESC Pflicht. Weiterhin können in Abhängigkeit von den verwendeten Messprinzipien fahrzeugseitige Sensoren, wie beispielsweise lasergestützte Systeme, die in FAS zur Abstandsregelung oder Nachtsichtunterstützung eingesetzt werden, künftig gegebenenfalls Informationen zu witterungsabhängigen Sichtweiten liefern. Diese streckenbezogene Information würde die Funktionalität der xSBA unter Nutzung der bestehenden Kommunikationseinrichtungen steigern können.

Die Übermittlung der erweiterten Informationen aus den Fahrzeugen gestaltet sich schwieriger als für FCD, die eine Änderung der Koordinaten über die Zeit darstellen. Diese Information lässt sich auch aus externen Endgeräten (zum Beispiel Smartphones oder Navigationsgeräten) generieren, ohne dass ein Eingriff in die Fahrzeugelektronik nötig ist. Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Dienste zur Fahrerinformation, zum Beispiel von TOMTOM [2011] oder weiteren Anbietern zeigen, dass technische Möglichkeiten zur Übertragung und Fusion von Verkehrsdaten aus unterschiedlichen Quellen existieren. Es wird als positiv erachtet, dass es von den Verkehrsteilnehmern akzeptiert wird, als Informationslieferanten zu fungieren. Für die Generierung der xFCD sind jedoch Eingriffe in die Fahrzeugelektronik nötig, da sich sonstige Endgeräte nicht oder nur eingeschränkt als Datenlieferanten nutzen lassen.

Aktuell im Auftrag der BAST durchgeführte Untersuchungen zu den sogenannten D-Textanzeigen, die im Rahmen von SBA den Verkehrsteilnehmern zusätzliche Informationen vermitteln, sind eine ergänzende Möglichkeit, um die detaillierteren Resultate des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells darzustellen. Sie stellen eine Chance für die Verbreitung der mittels Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell generierten Informationen und damit den Einsatz des Modells dar.

Es wird erwartet, dass die Verbreitung von IVS und Datenübertragung sowie die Vernetzung von Systemen im Verkehrsbereich weiter zunehmen werden. Für den Austausch und die Integration von xFCD bedeutet dies, dass sich im verkehrstechnischen Umfeld ein entsprechendes Verständnis sowie Lösungsansätze für ähnlich gelagerte Aufgaben entwickeln werden. Im Hinblick auf einen Praxiseinsatz kann das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell hiervon profitieren.

Organisatorisch-institutionelle Aspekte

Organisatorisch-institutionelle Risiken sind die mangelnde Bereitschaft oder fehlende finanzielle Möglichkeiten, um die bestehenden SBA-Systeme im Hinblick auf die Integration und Nutzung von xFCD zu ertüchtigen. Hierzu sind sämtliche im Kontext einer Praxiseinführung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells erforderlichen Maßnahmen und Aktivitäten zu zählen.

Externe Faktoren als „Chancen“ sind:

Seit den 1990er Jahren wird die Verbreitung der Intelligenten Verkehrssysteme auch von der Europäischen Kommission unterstützt. Dabei fand bei der Förderung ein Wechsel von regionalen Telematikprojekten hin zu europäisch vereinheitlichten Diensten unter Nutzung von IVS statt. Im Jahr 2010 wurde die EU-Richtlinie (IVS Direktive) 2010/40/EU „zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern“ verabschiedet [EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT, 2010]. Neben einer Dokumentation des Bestands an IVS wurden der Europäischen Kommission je Mitgliedsstaat die innerhalb der folgenden fünf Jahre geplanten IVS-Maßnahmen berichtet. Die Ziele der Richtlinie sind europaweit kompatible IVS-Maßnahmen und eine schnellere Verbreitung von IVS für den Straßenverkehr und den Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern. Von den vier vorrangigen Bereichen sind für die vorliegende Arbeit vor allem die folgenden bedeutsam:

- Optimale Nutzung von Straßen-, Verkehrs- und Reisedaten
- Verbindung zwischen Fahrzeug und Verkehrsinfrastruktur

Basierend auf den auf der EU-Ebene definierten Maßnahmen und Aktionen wurde für Deutschland ein nationaler IVS-Aktionsplan für den Straßenverkehr samt den Schnittstellen zu weiteren Verkehrsträgern erstellt. Durch die verbindliche Richtlinie der Europäischen Kommission und die Möglichkeit, xSBA den beiden oben genannten prioritären und damit bevorzugt zu realisierenden Bereichen zuzuordnen, werden Impulse zur Beschleunigung der für eine Realisierung der xSBA-Funktionalitäten ausstehenden Arbeiten und Investitionen erwartet. Es ist grundsätzlich positiv zu bewerten, dass die Realisierung von xSBA als bedeutende Zukunftsmaßnahme betrachtet wird. Mit der Umsetzung in nationales Recht und der Inkraftsetzung des „IVS-Aktionsplans ‚Straße‘“ werden neben dem politischen Nachdruck begleitende finanzielle Anreiz- und Unterstützungsprogramme erwartet.

Eine europaweite Kooperation findet im Rahmen von EasyWay statt. Hierbei handelt es sich um eine von der DG MOVE (Direction Generale Mobility and Transport) geförderte Initiative, die eine Harmonisierung und Realisierung der Anforderungen der EU-Richtlinie und des IVS-Aktionsplans unterstützt. Dies erfolgt zum Beispiel anhand europaweit anwendbarer „Deployment Guidelines“ und die Bereitstellung von Kommunikationseinrichtungen für IVS. Da sich im Kontext der vorliegenden Arbeit auch im europäischen Umfeld noch keine weiter vorangeschrittenen Lösungen etabliert haben, kann das entwickelte Konzept als Grundlage für einen inhaltlichen Austausch auf europäischer Ebene dienen.

Es wird davon ausgegangen, dass sich bei der Betreiberrolle von SBA, und damit aller Voraussicht nach auch von xSBA, mittel- und langfristig keine Änderungen ergeben werden.

Gefördert durch das BMVBS erfolgt derzeit der Aufbau des sogenannten Mobilitäts Daten Marktplatzes (MDM) [MDM, 2012]. Durch die verbesserte Verfügbarkeit von Online-Verkehrsdaten schafft der MDM die Voraussetzung für die Entwicklung neuer Dienste [BMVBS, 2012b]. Für den Fall, dass xFCD auf dem MDM zur Verfügung gestellt werden, wird eine Anpassung der entwickelten Systemansätze (vergleiche Abschnitt 2.5.1) erforderlich. Zudem kann aus der Hinzunahme externer Datenlieferanten aber auch eine beschleunigte Realisierung der xSBA-Funktionalitäten resultieren.

Die derzeit herrschende Bereitschaft der Verkehrsteilnehmer, Daten zu teilen und zu übertragen, zeigt sich zum Beispiel im Bereich von mobilen Apps oder Navigationsgeräten, die mit dem Ziel der Verkehrslagerekonstruktion über einen Rückkanal Informationen der Nutzer übertragen. Dies wird im Hinblick auf die zukünftige Verfügbarkeit von xFCD in xSBA als Chance gesehen.

Rechtliche und wirtschaftliche Aspekte

Es ist zu klären, wer die Kosten für die Übertragung der Daten aus den Fahrzeugen in das xSBA-System trägt. Gleiches gilt für die Ausrüstung der Fahrzeuge mit OBU. Es besteht das Risiko, dass keine Zuständigen, Mittel oder Finanzierungsmöglichkeiten identifiziert werden können.

Im Rahmen der in Anlehnung an die SWOT-Systematik durchgeführten Analyse sind die folgenden Chancen ausgemacht worden:

Das Szenario der zukünftigen Einführung eines generellen Tempolimits für Autobahnen in Deutschland würde eine Vereinheitlichung der gefahrenen Geschwindigkeiten bewirken. Im Hinblick auf verkehrliche Schaltungen von SBA würden sich durch eine Harmonisierung des Verkehrsablaufs in Relation geringere positive Effekte erzielen lassen. Bei den sicherheitsrelevanten Warnungen vor widrigen Fahrbahnzuständen würden sich aufgrund des Tempolimits keine Reduzierungen der Nutzen der durch das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell ausgelösten Schaltungen ergeben.

Wie in Abschnitt 5.3.3 dargelegt, laufen derzeit etliche parallele Bestrebungen, um die Datenübertragung zu standardisieren und die Sicherheit der Gesamtsysteme zu gewährleisten. Die Aktivitäten zeigen sowohl die Bereitschaft als auch die Erfordernis von Aktivitäten in diesem Bereich. Die Resultate der Arbeiten werden erarbeitet und sind für den xSBA-Ansatz zu nutzen.

Die laufenden Kosten für die Datenübertragung werden langfristig sinken, so dass ein wirtschaftlicher Betrieb von xSBA für die Beteiligten zukünftig leichter realisiert werden kann. Für die Investition und die Ausrüstung der Strecke mit RSU wird erwartet, dass zunächst FCD in die SBA-Steuerungsprozesse eingebunden werden. Es wäre vorteilhaft, wenn diese Infrastruktur für die Integration von xFCD genutzt werden kann.

6.2.5 Kombinationen zur Bewertung der Anwendung des Modells

Die genannten internen und externen Kernfaktoren werden nachfolgend analysiert, indem die Stärken und Schwächen des Modells mit den externen Einflüssen in Form von Chancen und Risiken kombiniert werden. Die externen Faktoren behandeln vornehmlich die Einflüsse auf eine Implementierung des Modells, so dass im Folgenden die Anwendung des Modells bewertet wird. Hierzu werden ursprünglich dem Unternehmensmanagement entstammende typische Fragestellungen [CIO, 2011] an die vorliegende Aufgabenstellung angepasst. Angelehnt an INVENTOOL [2012] werden die folgenden Kernfragen formuliert und diskutiert:

- Stärken-Chancen-Kombination: *„Welche Stärken existieren, um die Chancen zu nutzen?“*

Eine Stärke des entwickelten Systemansatzes ist es, dass sich das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell in den SBA-Bestand eingliedert. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Anwendung des Modells positiven Nutzen im Hinblick auf Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeiten liefern kann. Diese Aspekte können die Chance stützen, dass eine weitere Förderung des Ansatzes durch die politische Ebene erreicht wird.

Des Weiteren kann die Stärke des Ansatzes, dass er praxisnah und SBA-orientiert ausgeprägt ist, mit der Chance, dass durch die Etablierung von Kommunikationswegen/infrastruktur über andere Projekte und Ansätze (beispielsweise die Integration von FCD oder die Etablierung von eCall) verknüpft werden. Da für eine Nutzung der bestehenden SBA-Infrastruktur nur relativ geringfügige Anpassungen und Erweiterungen erforderlich sind, besteht die Chance, dass in anderen Vorhaben entwickelte Lösungsansätze für einen Einsatz des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells (mit)genutzt werden können. Die genannten Stärken können zur Nutzung der Chancen dienen, dass die in den Fahrzeugen vorliegenden Informationen zunehmen werden sowie, dass die Verkehrsteilnehmer im Rahmen anderer Anwendungen bereit sind, Daten zur Verfügung zu stellen.

- Stärken-Risiken-Kombination: *„Existieren Stärken, um die Risiken abzuwenden? / Überlagern Risiken die Stärken?“*

Als Stärken des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells zählen beispielsweise, dass auch Aspekte des Qualitätsmanagements berücksichtigt wurden und dass erwartet wird, dass sich eine Anwendung positiv auf den Verkehrsablauf und vor allem die Verkehrssicherheit auswirkt. Dem muss als Risiko entgegengesetzt werden, dass sich keine Förderer der Ausrüstung der Kommunikationsinfrastruktur finden könnten.

Die Stärke des entwickelten C2I-Ansatzes, dass er sich praxisnah in den SBA-Bestand einbettet, kann dem Risiko begegnen, dass eine Ausrüstung mit OBU/RSU nicht erfolgt. Die Begründungen sind, dass die erforderlichen Investitionen im Vergleich zum SBA-Bestand gering sind und bestehende Infrastrukturen (Sensorik, Intelligenz und Aktorik) weiterverwendet werden können. Zudem kommt hier auch die Stärke zu tragen, dass herkömmliche moderne Serienfahrzeuge als zusätzliche Datenlieferanten dienen.

- Schwächen-Chancen-Kombination: *„Werden aufgrund der Schwächen Chancen verpasst? / Bieten Chancen die Möglichkeit, Schwächen zu egalisieren?“*

Die Schwäche, dass die Kommunikationstechniken (RSU, OBU, Kommunikationswege) nicht zur Verfügung stehen, kann sich auf mehrere potentielle Chancen negativ auswirken. Beispielsweise können andere Ansätze, die eine C2I-Kommunikation realisieren, nicht zeitnah mit genutzt und die Ausgestaltung entsprechend den Anforderungen des dargestellten Ansatzes nicht frühzeitig beeinflusst werden. Weitere Möglichkeiten zur Informationsübermittlung, beispielsweise über D-Textanzeigen, ließen sich ebenso wenig etablieren wie die Verwendung weiterer fahrzeuggenerierter Daten, wie beispielsweise Sichtweiteinformationen, die von den Verkehrsteilnehmern wohl durchaus zur Verarbeitung in xSBA zur Verfügung gestellt werden würden.

Eine Schwäche des auf dem Austausch fahrzeuggenerierter Daten beruhenden Ansatzes besteht darin, dass für eine breite Praxisanwendung zunächst Standardisierungen der auf dem CAN-Bus übertragenen Informationen stattfinden müssen. Hier würden sich die Chancen bieten, dass sich durch die Einbindung der politischen Ebene eine Unterstützung und Beschleunigung der Umsetzung erzielen lässt. Zudem wird der Umfang an Informationen, die in Fahrzeugen vorliegen, zukünftig weiter steigen und die Verkehrsteilnehmer wären bereit, diese xFCD im Rahmen von C2X-Anwendungen zur Verfügung zu stellen.

- Schwächen-Risiken-Kombination: *„Welche Risiken existieren aufgrund der Schwächen?“*

Aus der Schwäche des Ansatzes, dass im Hinblick auf eine breite Praxisanwendung für das Abgreifen und die Übertragung von fahrzeuggenerierten Daten Standardisierungen als Voraussetzung erforderlich sind, resultiert das Risiko, dass eine Ausrüstung mit OBU/RSU unterbleibt.

Aufgrund der Schwäche, dass die erforderliche Kommunikations-Infrastruktur derzeit nicht verfügbar ist, kann dem Risiko, dass keine Ausrüstung mit OBU/RSU stattfindet, nicht entgegnet werden. Es besteht zudem die Herausforderung, dass die datensendenden und -empfangenden Einheiten aufeinander abgestimmt realisiert und implementiert werden müssen.

Die dargestellten Kombinationen entscheidender Aspekte dienen neben der Bewertung letztlich dem Ziel, strategische Schlussfolgerungen abzuleiten [CIO, 2011]. Diese werden nachfolgend beschrieben.

6.3 Zwischenfazit und strategische Schlussfolgerungen

Grundsätzlich zeigen die vorangegangenen Abschnitte, dass derzeit keine Entwicklungstendenzen abzusehen sind, die gegen eine Integration des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in SBA sprechen. Vielmehr scheint die IVS-Direktive der Europäischen Kommission die Einführung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells zu unterstützen, da es den prioritären Aktionsbereichen „Optimale Nutzung von Straßen-, Verkehrs- und Reisedaten“ und „Verbindung von Fahrzeug und Infrastruktur“ zugeordnet werden kann. Die Analyse zeigt

auf, dass als maßgebliche Schwachstellen und Risiken der Modellentwicklung und des Systemansatzes zu sehen ist, dass die streckenseitige Ausrüstung mit RSU, um xFCD zu empfangen, sowie von Fahrzeugen, um xFCD aus den Fahrzeugen zu übertragen, nicht zur Verfügung stehen. Hier sind Investitionen erforderlich, um das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell betreiben zu können.

Auf Basis einer durchzuführenden Evaluation kann über einen weiteren Einsatz des Modells und die Umrüstung der SBA-Infrastruktur zu xSBA entschieden werden. Um dies zu erreichen, wird das folgende strategische Vorgehen vorgeschlagen:

- Im Rahmen einer Beispielanwendung sollte das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell implementiert werden. Begleitend sind zur Realisierung der Datenübertragung Fahrzeuge mit OBU und entsprechende Empfangseinheiten auszubilden. Die am besten geeignete Datenübertragungsmethode ist zu wählen und die C2X-Praxistauglichkeit ist zu erproben.
- Das Modell ist mit Versuchsfahrzeugen auf einem realen BAB-Streckenabschnitt zu betreiben. Die Modellergebnisse sind zu verifizieren, um bei Bedarf das Modell und das Systemkonzept anzupassen.
- Der Nutzen des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells ist genauer abzuschätzen, um die Vorteile einer Anwendung quantifiziert darstellen zu können.

Die folgenden Schritte sind anzugehen, wenn sich durch die Anwendung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells positive Resultate erzielen lassen und eine weitere Verfolgung der Thematik zielführend erscheint:

- Die Standardisierung und Harmonisierung der fahrzeuginternen Schnittstellen und der RSU-Schnittstellen sind voranzutreiben. Es sind zukunftsfähige Konzepte zu entwickeln, die auch von den Automobilherstellern und dem BMVBS getragen und unterstützt werden.
- Der Betrieb von xSBA sollte auf weitere nationale BAB-Streckenabschnitte ausgedehnt werden.
- Im Sinne der IVS-Direktive der Europäischen Kommission sollte ein Übertrag der Ergebnisse auf europäische Verhältnisse und eine europaweite Anwendung angestrebt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der Arbeit

Grundlagen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand

Der witterungsbedingte Fahrbahnzustand ist bei reduzierten Griffigkeiten durch Nässe oder Glätte eine entscheidende Größe für die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer. Anhand der reifenbezogenen Reibwertellipse und Statistiken zur Qualität des Verkehrsablaufs und Unfallzahlen bei unterschiedlichen witterungsbedingten Fahrbahnzuständen wurden deren negativen Einflüsse aufgezeigt. In SBA werden aus diesem Grund auf Autobahnen Verkehrs- und Umfelddaten stationär erfasst und zur dynamischen Warnung und Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer verwendet. Streng genommen bilden die minütlich aktualisierten Messwerte nur die Bedingungen am Ort der Erfassung ab, dennoch werden die Werte zur Verkehrsbeeinflussung auf größere Gebiete extrapoliert, obwohl es sich bei Wettersituationen um instationäre und inhomogene Ereignisse handelt. Desweiteren ist negativ zu bewerten, dass viele der zur Umfelddatenerfassung in SBA genutzten Sensoren verbesserungswürdige Messwertqualitäten aufweisen. Mittels der derzeit üblichen Umfelddatenerfassung im Rahmen von SBA kann der Fahrbahnzustand räumlich-zeitlich nicht lückenlos bestimmt werden. Eine Optimierung der witterungsabhängigen Verkehrsbeeinflussung kann durch zusätzliche Informationen in Form von erweiterten fahrzeuggenerierten Daten erreicht werden. Für die Übertragung der xFCD zu einer Verkehrsrechnerzentrale werden zwei grundsätzliche Varianten beschrieben: Zum Einen der Versand von fahrzeuggenerierten Informationen an Roadside-Units, zum Anderen die direkte Kommunikation von Fahrzeugen mit einer Zentrale.

Analyse fahrzeuggenerierter und stationär erfasster Daten

Um aussagekräftige und zuverlässige Eingangsdaten für ein Modell zur Bestimmung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands auszuwählen, obwohl xFCD aktuell noch nicht in den Prozessen von SBA eingesetzt werden und keine Kenntnisse zu deren Güte und Aussagekraft vorliegen, wird zunächst eine Qualitätsanalyse realer fahrzeuggenerierter Daten durchgeführt. xFCD wurden im Rahmen von Befahrungen im Großraum München aufgezeichnet und offline evaluiert. Hierfür wurden zwei unterschiedliche Versuchsfahrzeuge eingesetzt, die zur Erfassung möglichst vieler unabhängiger Informationen mit CAN-Datenloggern, Mikrofonen, Kameras und PDA bestückt wurden. Diese Ausrüstung ermöglichte ein einfaches nachträgliches Nachvollziehen von Umfeldsituationen und Fahrmanövern. Die Analyse der Daten erfolgte vornehmlich unter Zuhilfenahme der Infrastruktur des Testfelds für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ für stationäre Umfelddatenerfassung.

Um eine Übertragbarkeit und möglichst wirtschaftliche Anwendbarkeit der Projektergebnisse in der Praxis zu gewährleisten, werden zur mobilen Datengenerierung ausschließlich Serienfahrzeuge eingesetzt und die darin standardmäßig vorliegenden Informationen genutzt. Es wird keine zusätzliche Sensorik verwendet. Da die auf dem Fahrzeug-CAN-Bus anliegenden

Informationen nicht standardisiert sind, stellte die Datenaufbereitung und –aggregation einen aufwändigen Prozess dar.

Um geeignete fahrzeuggenerierte und stationär erfasste Daten auszuwählen, die zu einer zuverlässigen Ermittlung witterungsbedingter Fahrbahnzustände beitragen können, wurden Hypothesen aufgestellt und geprüft. Anhand der Untersuchung eines begrenzten Datenumfanges für singuläre Ereignisse wurden die folgenden fahrzeuggenerierten Daten ausgewählt:

- Daten eines Nässeensors zur Wischerregelung
- Geschwindigkeit des Fahrzeugs
- Information zum Scheibenwaschvorgang
- Lufttemperatur
- Statusmeldungen der Fahrerassistenzsysteme ABS und ESC
- Wischerstufe

Modellentwicklung

In Kapitel 4 wurde unter Nutzung der ausgewählten Daten als Eingangsgrößen ein umfassendes Modell zur Ermittlung witterungsbedingter Fahrbahnzustände entwickelt. Da in dem kooperativen Konzept die herkömmliche stationäre Umfelddatenerfassung um erweiterte fahrzeuggenerierte Daten - xFCD ergänzt wird, wurde das Modell als „Erweitertes Fahrbahnzustand-Modell“ bezeichnet. Es stehen keine fahrzeuggenerierten Daten zur Verfügung, die einen direkten Rückschluss auf witterungsbedingte Fahrbahnzustände ermöglichen. Nässe und Temperaturen beeinflussen den Zustand der Fahrbahnoberfläche maßgeblich, weshalb diese Zustände unter Nutzung möglichst vieler voneinander unabhängiger Informationsquellen bestimmt werden, um zuverlässige Rückschlüsse auf witterungsbedingte Fahrbahnzustände ziehen zu können. Das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell ist modular aufgebaut und weist die folgenden Funktionalitäten auf:

- Aufbereitung von Eingangsdaten und Lokalisierung von Fahrzeugen im Streckennetz (Input-Modul)
- Ermittlung von witterungsbedingten Fahrbahnzuständen, Glättewarnungen, Temperaturen sowie Nässe im xFBZ-Modul
- Output-Modul zur anwendungsspezifischen Aufbereitung der Modellergebnisse
- Qualitätssicherung für Daten, Prozesse, Module und Modelle mittels Qualitäts-Modul

In den Modulen wird Fuzzy-Logik eingesetzt, die sich aufgrund der Unschärfe der Umfeldinformationen gut zu deren Interpretation und Verarbeitung eignet. Expertenwissen aus dem Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ konnte bei der intelligenten Verknüpfung von Daten mittels Fuzzy-Logik gut eingebracht werden.

Durch die Nutzung unterschiedlicher Datenquellen und die konsequente Einbindung eines Konzepts zum Qualitätsmanagement lassen sich zuverlässige Modellergebnisse erwarten.

Voraussetzungen für den Einsatz des Modells in der Praxis der Verkehrsbeeinflussung

Für das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell werden in Kapitel 5 die Voraussetzungen beschrieben, die für einen Einsatz in SBA zu erfüllen sind. Hierfür werden unterschiedliche Aspekte diskutiert. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die fehlende technisch-physische Ausrüstung zum Übertragen von xFCD aus den Fahrzeugen und die Einbindung der Daten in die SBA-Strukturen die größte Hürde für einen Praxiseinsatz darstellen. Entsprechende technische Lösungen existieren zwar auf dem Markt, sind aber noch nicht etabliert. Eine weitere derzeit unerfüllte Anforderung ist die Standardisierung der xFCD, da sich bei vielen fahrzeugspezifisch unterschiedlichen proprietären Meldungen eine Einbindung in die SBA-Struktur nicht realisieren lassen wird. Konzeptionell-funktional lässt sich das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell in die Methodik zur Strukturierung des Steuerungsablaufs gemäß FGSV [2011] eingliedern. Als Betreiber des Modells sind in organisatorisch-institutioneller Hinsicht die Straßenverkehrsbehörden vorgesehen, die auch für den Betrieb der SBA zuständig sind. Die Finanzierung sollte über den Bund erfolgen. Zur Abschätzung der Nutzen einer Anwendung des Modells wird ein Konzept vorgeschlagen.

Kritische Einordnung der Arbeit

Das in der Arbeit angewandte methodische Vorgehen entspricht den für planerische Aufgabenstellungen typischen Schritten der Vororientierung, Problemanalyse, Maßnahmandarstellung und Handlungsempfehlungen. Die sich gemäß FGSV [2001] üblicherweise anschließende Implementierung und Wirkungskontrolle des Modells konnte aufgrund der fehlenden technischen Infrastruktur zur C2I-Kommunikation in der vorliegenden Arbeit nicht erfolgen. Aus diesem Grund wurde in Kapitel 6 eine kritische Untersuchung des methodischen Vorgehens und der erzielten Ergebnisse durchgeführt. Dies erfolgte strukturiert in Anlehnung an SWOT-Analysen [CIO, 2012]. Dabei wurden beeinflussbare interne Faktoren (Stärken und Schwächen) des entwickelten Modells charakterisiert. Die Untersuchung der nicht kontrollierbaren externen Faktoren, in Form von Chancen und Risiken aus zukünftigen Entwicklungen und Technologien, wird gemäß der in Kapitel 5 untersuchten Aspekte durchgeführt. Hier zeigt sich vor allem, dass das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell für SBA die vorrangigen Bereiche „Optimale Nutzung von Straßen-, Verkehrs- und Reisedaten“ und „Verbindung zwischen Fahrzeug und Verkehrsinfrastruktur“ der IVS-Direktive der Europäischen Kommission [EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT, 2010] adressiert. Mit einer Überführung der Richtlinie in nationales Recht kann politische Unterstützung für die Einführung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in die Praxis erhofft werden. Auf Basis der Ergebnisse der SWOT-Analyse werden Strategien für das weitere Vorgehen vorgeschlagen.

7.2 Ausblick mit Entwicklungs- und Anwendungsmöglichkeiten

Ausblick

Strategisch hergeleitete zukünftige Schritte wurden im Rahmen der kritischen Einordnung der Arbeit in Kapitel 6 entwickelt. Da bislang zur Analyse der xFCD nur singuläre Ereignisse überprüft wurden, ist zum Erzielen belastbarer Aussagen die Stichprobengröße für die An-

zahl untersuchter Ereignisse sowie Fahrzeuge (unterschiedliche Typen und Hersteller) zu erhöhen.

Die Evaluation einer Beispielanwendung in einer SBA könnte die Grundlage für die Entscheidung über weitere Einsätze liefern. Hierzu ist eine Wirkungskontrolle und bei Bedarf eine darauf basierende Optimierung und Anpassung des Modells erforderlich. Eine verbreitete über den singulären Forschungscharakter hinausgehende Anwendung hängt stark von der Verfügbarkeit und Etablierung von C2I-Kommunikationsinfrastruktur sowie der Standardisierung von CAN-Bus-Daten ab. Hierzu müssen verschiedene Beteiligte aus Politik, Industrie sowie den Behörden zusammenarbeiten. Unterstützung erfährt diese Bestrebung durch die Adressierung der durch die Europäische Kommission ausgegebenen prioritären Aktionsbereiche.

Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Systemansatzes

Im Vergleich zu den herkömmlichen Schaltungen bei Nässe und Glätte ergeben sich durch die Integration fahrzeuggenerierter Daten in das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell detailliertere räumliche und zeitliche Informationen zu den witterungsbedingten Fahrbahnzuständen. Um diese optimal nutzen zu können, bieten sich zusätzliche Anpassungen in der technisch-physischen Ebene der SBA-Systemarchitektur an. Beispielsweise lässt sich die durch das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell verfügbare verbesserte räumliche Auflösung der Informationen zum Fahrbahnzustand im Rahmen der bestehenden SBA-Strukturen nicht so flexibel nutzen, dass stets lokal vor Ereignissen gewarnt werden kann. Dies liegt daran, dass die für eine kollektive Warnung mittels WVZ benötigten AQ nur in einem mehrkilometrischen Raster verfügbar sind. Zudem stehen der optimierten zeitlichen Auflösung Restriktionen in Form des durch die TLS [BAST, 2002] festgelegten Datenübertragungsintervalls von einer Minute entgegen. Abhilfe könnte eine priorisierte und beschleunigte Übertragung und Nutzung hoch-kritischer Meldungen sein. STEINAUER ET AL. [2006] entwickelten ein theoretisches Konzept zur Einbindung von xFCD-Ereignismeldungen in Nässe- und Glättewarnungen von SBA. Die xFCD werden im Fusionsprozess dieses Projektes höher priorisiert als die stationär erfassten Umfelddaten. Diese bilden Stützstellen für die mobil erfassten xFCD und stellen eine Rückfallebene bei nicht vorhandenen xFCD dar.

Auch für die Information der Verkehrsteilnehmer wurden Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert: Prinzipiell denkbar wäre eine dynamische zusätzliche und genauere Lokalisierung und Warnung vor Bereichen mit reduzierten Fahrbahngriffigkeiten (B-Zeichen Z11StVO „Achtung Glättegefahr“/„Nässe“ zum Beispiel ergänzt um das C-Zeichen Z77 StVO „in 1000 m“). Aktuelle Bestrebungen der BAST, die WVZ um eine sogenannte D-Textanzeige zu ergänzen, untermauern diesen Ansatz. Sie stellen eine ergänzende Möglichkeit dar, um den Verkehrsteilnehmern im Rahmen von SBA die detaillierteren Resultate des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells darzustellen. Um in den mittels Glätte-Modell ermittelten Situationen, in denen bei Eintreten bestimmter Wetteränderungen eine Glättebildung möglich ist, eine Sensibilisierung der Verkehrsteilnehmer zu erreichen, könnte in den WVZ zusätzlich „Glättegefahr“ oder die Fahrbahnoberflächentemperaturen angezeigt werden.

Die für SBA gebildeten Streckenabschnitte sind für die zugrundeliegende quasi streckenbezogene Datenbasis zu grob gerastert. Vergleichsweise unaufwändig könnten solche Zusatzinformationen fahrzeugintern im Fahrzeugdisplay oder auf mittels entsprechenden App(likationen) ausgerüsteten Smartphones ortsspezifisch darstellbar sein. Um die Fahrerablenkung zu begrenzen, sind entsprechende Vorgaben zu berücksichtigen (zum Beispiel EU [2006], AAM [2002], SAE [2002], URBAS ET AL. [2007]).

Wie in Kapitel 5 gezeigt werden konnte, stellt die fehlende infrastrukturseitige Ausrüstung mit RSU ein maßgebliches Hemmnis der Einführung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in die Praxis dar. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, könnte der gemäß TLS [BAST, 2002] festgeschriebene Übertragungsweg über Streckenstationen für die kooperative Ausgestaltung von SBA alternativ umgangen werden, indem die xFCD direkt in die Verkehrszentrale übertragen werden. Die streckenseitige Ausrüstung mit RSU, beziehungsweise eine entsprechende Anpassung der SST könnte hierdurch entfallen. Es sind dann jedoch neue Aspekte zu berücksichtigen: Die Datenübertragung muss gemäß der neuen Anforderungen konzipiert werden, die übertragenen Meldungen müssen weitere Inhalte zu den Koordinaten der Fahrzeuge enthalten und die Datenübernahme und –aufbereitung in der Zentrale ist entsprechend anzupassen.

Des Weiteren könnte der vorgestellte bakengestützte C2I-Ansatz um Komponenten der C2C-Kommunikation erweitert werden. Durch „Multi-Hopping“ können Informationen auch von Fahrzeug zu Fahrzeug weitergereicht werden und so eine beschleunigte Datenübertragung zu der Zentrale und damit schnellere Reaktionszeiten von Schaltungen bewirken.

Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Modells

Im Projekt wurden zwei Fahrzeugtypen unterschiedlicher Hersteller eingesetzt. Vergleiche der Daten beider Hersteller lieferten übereinstimmende Ergebnisse (siehe Kapitel 3). Ausgedehnte Untersuchungen und Quervergleiche zu weiteren Fahrzeugfabrikaten nach Vorbild des Testfelds für Umfelddatenerfassung stehen jedoch noch aus. Zukünftig ist zu untersuchen, inwieweit die xFCD im Hinblick auf beispielsweise Auflösungen und Wertebereiche fahrzeugspezifisch vorliegen, zudem ist zu prüfen, ob weitere Datenarten als Eingangsgrößen in das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell genutzt werden können.

Obwohl die Strahlung die Temperatur der Fahrbahnoberfläche stark beeinflusst und zur Einschätzung zukünftiger Fahrbahnglätten einen wesentlichen Beitrag liefern könnte, standen für die Strahlung im Rahmen der Arbeit keine Messwerte zur Verfügung. Vereinfacht wurde die fehlende Information kompensiert, indem mittels Clustering typische Umfeldsituationen gebildet und untersucht wurden (vergleiche Abschnitt 3.5.1). Vorschläge für Optimierungsmöglichkeiten des Clusterings sind im Text benannt und sollten für eine weitere Messstation angewendet werden. Es ist zu prüfen, ob aus Fahrzeugen, die zur Regelung von Klimaanlage die sogenannten „Sonnensensoren“ verwenden, relevante Hinweise auf die Intensität der Strahlung liefern können. Dies könnte bei einer Berücksichtigung in dem Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell die Güte und Zuverlässigkeit der Ergebnisse steigern.

Der Einsatz eines zusätzlichen „Prognose-Moduls“ mit Wetterprognosen könnte eine sinnvolle Ergänzung des derzeitigen Modellansatzes für weitere Anwendungsbereiche darstellen. Hierzu ist unten als weitere Möglichkeit zur Anwendung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells die Netzbeeinflussungsanlage aufgeführt.

Bei entsprechender zukünftiger fahrzeugseitiger Verfügbarkeit weiterer Informationen wie beispielsweise Sichtweite oder Griffigkeit sind diese Werte in xSBA einzubinden und ein Modell zur Fusion von stationär erfassten und fahrzeuggenerierten Daten zu entwickeln. Die Funktionalität von (x)SBA könnte hierdurch entscheidend erweitert werden.

Weitere Möglichkeiten zur Anwendung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells

Neben SBA stellen Netzbeeinflussungsanlagen (NBA) ein mögliches Anwendungsfeld des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells dar. Mittels NBA wird der Verkehr in einem Netzausschnitt beeinflusst, wofür zwischen dynamischer Wegweisung mit integrierten Stauinformationen (dWiSta) und Wechselwegweisung (WWW) differenziert wird. Die dWiSta zeichnen sich dadurch aus, dass sie unmittelbar entscheidungsrelevante Verkehrsinformationen anzeigen können [HARTZ UND SCHMIDT, 2006]. Hier könnten auch Information über kritische Fahrbahnzustände eine Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer bewirken. In den Algorithmen der Alternativroutenempfehlung mittels WWW ließen sich kritische Fahrbahnzustände als Entscheidungskriterium hinterlegen. Hierzu existieren bislang keine Erfahrungen, Strategien sowie Schwellenwerte für Verkehrsstärken und Nässe- und Glättestufen wären vorab festzulegen. Vor allem für NBA stellt eine Prognosekomponente (siehe oben) eine sinnvolle Ergänzung des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells dar. Durch die Integration des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells in NBA könnten negative Einflüsse des Wetters auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf verringert werden, indem die Exposition betroffener Streckenabschnitte mit Fahrzeugen reduziert wird.

Der vorgestellte Ansatz lässt sich zudem zur Warnung vor kritischen Fahrbahnzuständen auf Landstraßen einsetzen. Auch hier können aus witterungsbedingten Fahrbahnzuständen negative Einflüsse auf Verkehrsablauf und –sicherheit resultieren. Eine Voraussetzung ist die Ausrüstung besonders gefährdeter Streckenabschnitte mit den erforderlichen Erfassungs- und Kommunikationseinrichtungen.

Die Ergebnisse des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells können zusätzlich in Dienste für erweiterte Verkehrsinformationen eingebunden werden. Service Provider können neben Routen- und Verkehrslageinformationen ergänzende Informationen zum Fahrbahnzustand bereitstellen, die von den Verkehrsteilnehmern pre-trip oder on-trip abgerufen werden könnten.

Paragraph 3 Absatz 3 des Bundesfernstraßengesetzes besagt, dass witterungsbedingt reduzierte Fahrbahngriffigkeiten vermieden oder behoben werden sollen. Der Straßenwinterdienst kommt der Straßenverkehrssicherungspflicht durch das Beseitigen von Schnee oder dem Entgegenwirken von Winterglätte durch das präventive Aufbringen von Taustoffen nach [DURTH ET AL., 2004]. Hierfür werden aktuelle und prognostizierte Umfeldinformationen benötigt. Das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell kann durch die Bereitstellung von durchgängi-

gen verbesserten Informationen zum Fahrbahnzustand unterstützen. Hierdurch würden sich Straßenwinterdienst-Einsätze besser situationsorientiert disponieren lassen, da umfassendere Informationen für ganze Strecken verfügbar wären und so eine optimale Priorisierung der Einsätze durchgeführt werden könnte. Stellen mit Glättegefährdung können (exakter) lokalisiert und darauf basierend Glättewarnungen erstellt werden, sowie die Einsätze entlang der Strecke flexibel und zielorientiert gestaltet werden. Für eine wirtschaftliche Dosierung der Mengen an aufzubringenden Taustoffen unterstützt insbesondere das Temperatur-Modell. Der Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur entlang der Strecke ist für die Winterdienstplanung eine wichtige Information. Eine streckenweise Archivierung von Luft- und Fahrbahnoberflächentemperaturprofilen würde eine Wissensbasis darstellen, die ähnlich wie im Thermal Mapping-Ansatz genutzt werden kann. Denkbar ist zudem eine direkte Übertragung von Informationen in das Winterdienstfahrzeug, um den Streueinsatz entlang der Strecke zu beeinflussen. Für das Erweiterte Fahrbahnzustand-Modell wurde ein für den Straßenwinterdienst entwickeltes Glätte-Modell um xFCD ergänzt. Entsprechend wird begründet davon ausgegangen, dass diese Ergänzung für Zentralen, die das „herkömmliche“ Glätte-Modell einsetzen, relativ leicht möglich ist.

Glossar

CAN-Bus	Schnittstellensystem zur Übertragung von Informationen zwischen einzelnen Komponenten; hier: In Fahrzeugen
Clusterkürzel	Eindeutige Kurzbezeichnung für die Gruppierung von Messgrößen zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Luft- und Fahrbahntemperaturen
Daten-Monitor	Prozess zur Kontrolle der im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell verwendeten Daten im Rahmen des Qualitäts-Moduls
Datenaufbereitung	Spezifische Aufbereitung von Eingangsdaten im Input-Modul
Erweitertes Fahrbahnzustand-Modell	Modellierung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands aus stationär erfassten Umfelddaten und xFCD
Extended Floating Car Data	xFCD: Erweiterte Informationen aus Fahrzeugen, die hier für Rückschlüsse auf vorherrschende Umfeldbedingungen genutzt werden
Fahrbahngriffigkeit	Beitrag der Fahrbahnoberfläche zum Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche
Fahrbahntemperatur	Temperatur der Fahrbahnoberfläche
Fahrbahnzustand	Qualitative Bedeckung der Fahrbahnoberfläche; auch: Zustand der Fahrbahnoberfläche
Fahrbahnzustand-Modell	Modell zur Bestimmung streckenbezogener Aussagen zu witterungsbedingten Fahrbahnzuständen im Rahmen des xFBZ-Moduls
Fahrzeuggeneriert	Auf dem CAN-Bus in Fahrzeugen vorliegend
Gefriertemperatur	Temperatur, bei der eine wässrige Lösung gefriert und einen festen Aggregatzustand annimmt
Geräte-Monitor	Prozess zur allgemeinen Überprüfung der im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell verwendeten Geräte- und Datenübertragungstechnik im Rahmen des Qualitäts-Moduls
Geräte-Prüfung	Im Geräte-Monitor gebündelte Verfahren zur Kontrolle der Funktionstüchtigkeit der im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell eingesetzten Gerätetechnik

Glätte	Schnee und/oder Eis auf der Fahrbahnoberfläche
Glätte-Modell	Modell zur Bestimmung streckenbezogener Glättewarnungen im Rahmen des xFBZ-Moduls
Griffigkeit	Beitrag der Fahrbahnoberfläche zum Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche; siehe Fahrbahngriffigkeit
Input-Modul	Ortung datenliefernder Fahrzeuge und Zuordnung auf definierte Streckenabschnitte, Ermittlung der aktuellen Umfeldsituationen aus stationär erfassten Umfelddaten, Datenaufbereitung, Verteilung der Daten innerhalb des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells
Inter-Fahrzeug-Prüfungen	Kontrolle fahrzeuggenerierter Daten auf Basis weiterer Fahrzeuge oder stationär erfasster Umfelddaten (inter: „Zwischen“)
Intra-Fahrzeug-Prüfungen	Kontrolle fahrzeuggenerierter Daten auf Basis der innerhalb eines Fahrzeugs vorliegenden Informationen (intra: „Innerhalb“)
Konzeptionell-funktionale Aspekte	Ebene der Systemarchitektur, die verkehrstechnische Aufgaben definiert
Lokal	Räumlich an einem Punkt
Modell-Monitor	Prozess zur Prüfung der Modelle im Erweiterten Fahrbahnzustand-Modell im Rahmen des Qualitäts-Moduls
Nässe-Modell	Modell zur Ermittlung von streckenbezogener Nässe aus xFCD und stationär erfassten Daten im Rahmen des xFBZ-Moduls
Niederschlagsart	Klassifizierung des fallenden Niederschlags gemäß Aggregatzustand, Menge und Größe
On-Board-Unit	Fahrzeugseitige Einheit für Aufbereitung und Versand von xFCD
Organisatorisch-institutionelle Aspekte	Ebene der Systemarchitektur, in der beteiligte Institutionen und deren Zuständigkeiten festgelegt sind
Output-Modul	Fusion der Ergebnisse des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells mit den Informationen aus weiteren verfügbaren Fahrzeugen und eine anwendungsorientierte Veredelung der Ergebnisse hinsichtlich zeitlicher, räumlicher und qualitativer Anforderungen

Qualitäts-Modul	System zum Qualitätsmanagement, für eine kontinuierliche und umfassende Qualitätsbewertung aller Daten, Prozesse und Komponenten
Roadside-Unit	Streckenseitige Einheit zum Empfang von xFCD
Situationserkennung	Ermittlung der aktuell vorherrschenden Umfeldsituationen basierend auf stationär erfassten Umfelddaten im Rahmen des Input-Moduls
Stationär	Ortsfest, Gegenteil von instationär/mobil
Straßenwinterdienst	Organisierte Maßnahmen zur Vermeidung oder Behebung von Winterglätte
Streckenbeeinflussungsanlage	Maßnahmen zur Beeinflussung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen mittels Wechselverkehrszeichen auf Basis vorherrschender Verkehrs- und Umfeldbedingungen
System-Monitor	Prozesse zum übergeordneten Qualitätsmanagement des Gesamtsystems, zur Analyse der Ergebnisse weiterer Monitore und gegebenenfalls Aktivierung von Störungsreaktionen im Rahmen des Qualitäts-Moduls
Technisch-physische Aspekte	Ebene der Systemarchitektur, die Gerätetechnik, Datenübertragungseinrichtungen und technische Netzstruktur beschreibt
Temperatur-Modell	Modell zur Ermittlung streckenbezogener Fahrbahnoberflächentemperaturen und Lufttemperaturen im Rahmen des xFBZ-Moduls
Übertragungs-Prüfung	Im Rahmen des Geräte-Monitors gebündelte Verfahren zur Kontrolle der Übertragung von Daten zwischen Fahrzeugen und Zentrale
Umfeldbedingung	Zustand des Wetters
Umfelddaten	Wetterinformationen
Verkehrsbeeinflussung	Dynamische Steuerung des Verkehrsablaufs
Wasserfilmdicke	Quantitatives Maß für die Bedeckung der Fahrbahnoberfläche mit Wasser oder wässriger Lösung
xFBZ-Modul	Hier werden streckenbezogene Aussagen zu Temperaturen, Nässe, Fahrbahnzuständen und Glättewarnungen generiert

xFCD	Extended Floating Car Data: Erweiterte Informationen aus Fahrzeugen, die hier für Rückschlüsse auf vorherrschende Umfeldbedingungen genutzt werden
xSBA	SBA, die über Roadside Units xFCD empfangen und übertragen, um mittels des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells verbesserte Aussagen zum witterungsbedingten Fahrbahnzustand zu generieren
Zustand der Fahrbahnoberfläche	Qualitative Bedeckung der Fahrbahnoberfläche, auch: Fahrbahnzustand

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
AK	Arbeitskreis
AQ	Anzeigequerschnitt
AS	Anschlussstelle
ASR	Antriebsschlupfregelung
BAB	Bundesautobahn
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BDSG	Bundesdatenschutzgesetz der Länder
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
C2C	Car-to-Car-Communication
C2C-CC	Car to Car-Communication Consortium
C2I	Car-to-Infrastructure-Communication
CALM	Communication Air-interface Long and Medium range
CAN-Bus	Controller Area Network-Binary unit system
COM2REACT	Projekt "Cooperative Communication System to Realise Enhanced Safety and Efficiency in European Road Transport"
COV	Kovarianz
csv	Comma separated values
DAB	Digital Audio Broadcast
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DG MOVE	Direction Generale Mobility and Transport

DSRC	Dedicated Short Range Communication
DVB-H	Digital Video Broadcast for handhelds
DVB-T	Digital Video Broadcast - Terrestrial
DWD	Deutscher Wetterdienst
dWiSta	Dynamische Wegweiser mit integrierten Stauinformationen
ESC	Electronic Stability Control
FAS	Fahrerassistenzsystem
FBT	Temperatur der Fahrbahnoberfläche
FBZ	Zustand der Fahrbahnoberfläche
FCD	Floating Car Data
FE	Forschung und Entwicklung
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
GB	Gigabyte
GHz	Gigahertz
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communications
GT	Gefriertemperatur
HK	Helligkeit
HSPA	High Speed Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc.
INVENT	Projekt „Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik“
IRS	ITS Roadside Station
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Intelligent Transport Systems
IVS	1) Intelligente Verkehrssysteme, oder 2) ITS Vehicle Station

K	Kelvin
Kfz	Kraftfahrzeug
LAN	Local Area Network
Lkw	Lastkraftwagen
LT	Lufttemperatur, stationär erfasst
LTE	Long Term Evolution
LT _{xFCD}	Lufttemperatur, fahrzeuggeneriert
Max	Maximum
MATLAB	Matrix laboratory (Softwarepaket)
mdb	Microsoft Access Database
MDM	Mobilitäts Daten Marktplatz
Min	Minimum
MW	Mittelwert
NBA	Netzbeeinflussungsanlage
NI	Niederschlagsintensität
NIV	Projekt „Netzausgleich Individualverkehr“
NKA	Nutzen-Kosten-Analyse
NKV	Nutzen-Kosten-Verhältnis
NS	Niederschlagsart
OBU	On-Board-Unit
OVERSEE	Projekt “Open Vehicular Secure Platform”
PC	Personal Computer
PDA	Personal Digital Assistant
Pkw	Personenkraftwagen
PL	Plausibilität
REACT	Projekt “Realising Enhanced Safety And Efficiency In European Road Transport”

RLF	Relative Luftfeuchtigkeit
RS	Restsalzgehalt
RSU	Roadside-Unit
RWVA	Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen
SBA	Streckenbeeinflussungsanlage
SeVeCom	Secure Vehicular Communication
SMS	Short Message Service
SRIS	Projekt „Slippery Road Information System“
SST	Streckenstation
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SW	Sichtweite
SWIS	Straßenzustands- und Wetterinformationssystem
TC	Technical Committee
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen
TMG	Telemediengesetz
TPEG	Transport Protocol Experts Group
TPT	Taupunkttemperatur
TRACKSS	Projekt “Technologies for Road Advanced Cooperative Knowledge Sharing Sensors”
TT1/3	Bodentemperatur in Tiefe 1/3
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
UZ	Unterzentrale
VANet	Vehicular Ad hoc Network
VII	Projekt „Vehicle Infrastructure Integration“
VRZ	Verkehrsrechnerzentrale

VSC	Vehicle Safety Communication Consortium
WFD	Wasserfilmdicke
WGM	Windgeschwindigkeit (Mittel)
WGS	Windgeschwindigkeit (Spitze)
WLAN	Wireless Local Area Network
WR	Windrichtung
WVZ	Wechselverkehrszeichen
xFCD	extended Floating Car Data
xml	extensible markup language
xSBA	erweiterte (extended) Streckenbeeinflussungsanlage (SBA)

Literaturverzeichnis

- AAM [2002]: Alliance of Automotive Manufacturers - Statement of principles, criteria and verification procedures on driver interaction with advanced in-vehicle information and communication system. Version 2.0, Washington, USA
- ABDNB [2008]: Bundesautobahn A73 Suhl-Bamberg-Nürnberg Verkehrsbeeinflussungsanlage mit Seitenstreifenfreigabe Baiersdorf - Möhrendorf – Erlangen. Autobahndirektion Nordbayern (Hrsg.), Nürnberg
- ADAC [2011]: <http://www.adac.de/infotestrat/ratgeber-verkehr/statistiken/default.aspx>, abgerufen am 17.09.2011
- AKTIV [2012]: <http://www.aktiv-online.org/deutsch/aktiv-vm.html>, abgerufen am 30.04.2012
- AGARWAL, M.; MAZE, T.H.; SOULEYRETTE, R. [2005]: Impacts of Weather on Urban Freeway Traffic Flow Characteristics and Facility Capacity. Iowa State University, Ames, USA
- AURORA [2005]: Laboratory and Field Studies of Pavement Temperature Sensors. Final Report
- BADEL, H.; BREITENSTEIN, J. [2005]: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik Heft V 129, Bergisch Gladbach
- BADEL, H.; BREITENSTEIN, J.; FLEISCH, J.; HÄUSLER, G.; SCHEURL, D.; WENDL, A. [2006]: Prüfung von Sensoren für Glättemeldeanlagen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik Heft V 146, Bergisch Gladbach
- BAST [2012]: <http://www.bast.de/DE/Aufgaben/abteilung-v/referat-v6/projektplan-telematik/projektplan.html>, abgerufen am 20.05.2012
- BAST [2009]: Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland 2004. http://www.bast.de/cln_005/nn_40694/DE/Publikationen/Infos/2007-2006/02-2006.html, abgerufen am 14.08.2009
- BAST [2006]: <http://www.bast.de/htdocs/fachthemen/referat/v2/rechner.htm>, abgerufen am 15.02.2006
- BAST [2002]: Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen. Bundesanstalt für Straßenwesen BAST (Hrsg.), Bergisch Gladbach
- BAST [1999]: Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ). Bundesanstalt für Straßenwesen BAST (Hrsg.), Bergisch Gladbach
- BAST [1997a]: Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen. Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Bergisch Gladbach
- BAST [1997b]: Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen. Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Bergisch Gladbach
- BERND, T.; OTTO, C. [1999]: Nutzung von Expertenwissen zur Modellierung eines pneumatischen Antriebs mit Fuzzy- und neuronalen Netzwerken. 9. Workshop Fuzzy Control, Dortmund

- BERZ, U. [2002]: Fahrerassistenzsysteme: Allgemeine Verkehrssicherheit und individuelle Nutzen. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Ausgabe 48, TÜV-Verlag GmbH, Köln
- BEWERSDORF, C. [2005]: Zulassung und Haftung bei Fahrerassistenzsystemen im Straßenverkehr. Schriften zum Technikrecht Heft 8, Duncker und Humblot GmbH, Berlin
- BGB [2009]: Bürgerliches Gesetzbuch, 64. Auflage. Beck Texte, München
- BMI [2012]: Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung. Bundesministerium des Innern in Zusammenarbeit mit dem Bundesverwaltungsamt (Hrsg.), Berlin
- BMVBS [2012a]: Projektplan Straßenverkehrstelematik 2015. BMVBS Referat StB 12, Berlin
- BMVBS [2012b]: Information an die EU-Kommission. IVS-Maßnahmen, die für den folgenden Fünfjahreszeitraum geplant sind, Berlin
- BMVBS [2011]: Status und Rahmenbedingungen für Intelligente Verkehrssysteme (IVS) in Deutschland. Bericht gemäß Artikel 17(1) der Richtlinie 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern, Berlin
- BMVBS [2010]: StVO – Straßenverkehrs-Ordnung. Vom 16. November 1970 (Bundesgesetzblatt, Teil I, S. 1585), zuletzt geändert mit Verordnung vom 1. Dezember 2010 (Bundesgesetzblatt, Teil I, S. 1737). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Berlin
- BMVBS [2007]: Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Berlin
- BMVBW [2005]: Die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik Bundesverkehrswegeplan 2003. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (Hrsg.), Berlin
- BOGREN, J.; TORBJÖRN, G.; BULLOCK, T. [2001]: Feasibility Study: Adaption of the Local Climatological Model (LCM) to Southern Ontario. Swedish National Road Administration, Borlänge, Schweden
- BOLTZE, M.; WOLFERMANN, A.; SCHÄFER, P. [2006]: Leitfaden Verkehrstelematik. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin
- BORGEEST, K. [2008]: Elektronik in der Fahrzeugtechnik. Vieweg-Teubner, Wiesbaden
- BOSCH [2009]: <http://www.bosch-esperience.de/de/language1/technik.html>, abgerufen am 16.10.2009
- BRILON, W.; PONZLET, M. [1996]: Variability of Speed-Flow Relationships on German Autobahns. Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, USA
- BUNDESTAG [2009]: <http://www.bundestag.de/dokumente/rechtsgrundlagen/grundgesetz/index.html>, abgerufen am 01.11.2009
- BUSCH, F.; DINKEL, A. [2010]: Zuverlässige Ermittlung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands zur Erhöhung der Verkehrssicherheit auf Autobahnen. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, München (unveröffentlicht)

- BUSCH, F.; GROŠANIĆ, S.; DINKEL, A.; SCHIEFERSTEIN, A.; STADLER, M. [2009]: Begleitung und Ergänzung des Merkblatts ‚Ermittlung der Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen‘. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- BUSCH, F.; DINKEL, A.; LEONHARDT, A.; ZIEGLER, J.; KIRSCHFINK, H.; PETERS, J. [2006]: Benchmarking für Verkehrsdatenerfassungs- und Verkehrssteuerungssysteme. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Heft 949, Bonn
- BUSCH, F.; DINKEL, A.; SCHIMANDL, F.; BOLTZE, M.; JENTSCH, H. [2007]: Leitfaden für die Vernetzung dynamischer Verkehrsbeeinflussungssysteme im zuständigkeitsübergreifenden Verkehrsmanagement. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Bonn
- BUSCH, F.; WEINRICH, O. [2005]: REACT Deliverable 4.2. Environmental Monitoring System, München
- CIO [2011]: <http://www.cio.de/strategien/methoden/alles-zur-swot-analyse/>, abgerufen am 14.06.2011
- COM2REACT [2009]: <http://www.com2react-project.org>, abgerufen am 16.10.2009
- COMESAFETY2 [2012]: www.comesafety.org, abgerufen am 01.06.2012
- COOPERS [2010]: D16-IR 8200/8500: Final report for disseminating the demonstration achievements, revised business development & roll out strategy. Wien, Österreich
- COOPERS [2012]: <http://www.coopers-ip.eu/>, abgerufen am 01.03.2012
- CVIS [2012]: <http://www.cvisproject.org>, abgerufen am 16.01.2012
- DFG [2012]: http://www.dfg.de/dfg_magazin/wissenschaft_oeffentlichkeit/ausstellungen_veranstaltungen/idee_erkennntnis/raincars/index.jsp, abgerufen am 15.04.2012
- DIN EN ISO 9000 FF. [2006]: Qualitätsmanagementsysteme. Beuth Verlag, Berlin
- DINKEL, A.; GROŠANIĆ, S.; BUSCH, F. [2009]: Umfelddatenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen, Testfeld "Eching Ost" des Bundes. Abschlussbericht 4. Testphase, München
- DINKEL, A.; LEONHARDT, A.; BUSCH, F. [2008a]: Umfelddatenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen, Testfeld "Eching Ost" des Bundes. Abschlussbericht 3. Testphase, München
- DINKEL, A.; LEONHARDT, A.; BUSCH, F. [2008b]: Dokumentation des Benchmarking-Tools zur Überprüfung von FG3-Messwerten, München
- DINKEL, A.; LEONHARDT, A.; BUSCH, F. [2008c]: Erweiterte Untersuchung der Sichtweite und Nässe, München
- DINKEL, A.; LÜßMANN, J.; SPANGLER, M. [2008d]: Qualitätssicherung für streckenbezogene Verkehrsdaten - Aufbau eines Monitoringsystems. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.). HEUREKA '08 "Optimierung in Verkehr und Transport" - Tagungsdokumentation, FGSV Verlag, Köln
- DINKEL, A.; LEONHARDT, A.; BUSCH, F. [2007]: Umfelddatenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen, Testfeld "Eching Ost" des Bundes. Abschlussbericht 2. Testphase, München
- DURTH, W.; HANKE, H. [2004]: Handbuch Straßenwinterdienst. Kirschbaum Verlag, Bonn

- DWD [2004]: Der Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes. Broschüre Deutscher Wetterdienst, Offenbach
- EG [2000]: Verordnung (EG) Nr. 45/2001 des europäischen Parlaments und des Rates zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten durch die Organe und Einrichtungen der Gemeinschaft und zum freien Datenverkehr, 18.12.2000
- EG [1995]: Richtlinie 95/46/EG des europäischen Parlaments und des Rates zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten und zum freien Datenverkehr, 24.10.1995
- EU [2012]: http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/smart_cars_technologies/cooperativesyst/index_de.htm, abgerufen am 01.03.2012
- EU [2006]: Empfehlungen der Kommission vom 22.12.2006 über sichere und effiziente bord-eigene Informations- u. Kommunikationssysteme
- EULER, G.; SCHRÖDER, R.; LANG, J.; PHLAK, R.; RETZLAFF, G.: [1988] Ermittlung der zeitlichen Feuchte- und Nässeverteilung auf Fahrbahnen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 567, Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), Bonn
- EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT [2010]: Richtlinie 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern, Brüssel
- EVITA [2008]: E-safety vehicle intrusion protected applications. Informationsbroschüre, Darmstadt
- FGSV [2011]: Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrssteuerung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Hinweispapier, FGSV Verlag, Köln
- FGSV [2010a]: Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln
- FGSV [2010b]: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln
- FGSV [2009]: Hinweise für Planung, Bau und Betrieb von Taumittel-Sprühanlagen TMS. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln
- FGSV [2001]: Leitfaden für Verkehrsplanungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln
- FGSV [1997]: Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln
- FIEDLER, I. [2007]: Environmental and Road Condition Prediction. COM2REACT Deliverable 1.2, München
- FIS [2009]: <http://www.forschungsinformationssystem.de>, abgerufen am 29.09.2009
- FRICITION [2009]: Final Report. FP6 - IST - 2004 - 4 - 027006
- GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON [2012]: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/75396/soft-computing-v6.html>. Gabler Verlag (Hrsg.), abgerufen am 07.11.2012

- GLÄTTE24 [2010]: <http://www.glaette24.de>, abgerufen am 16.02.2010
- GOODWIN [2003]: Best Practices for Road Weather Management. Version 2.0, USA
- GROŠANIĆ, S.; DINKEL, A.; PISZCZEK, S. [2012]: Optimized traffic control with benchmarked road weather data. Sirwec Conference, Helsinki, Finland
- HARTZ, B.; SCHMIDT, M. [2006]: Dynamische Wegweiser mit integrierten Stauinformationen (dWiSta). Wirtschaftsverlag N. W. Verlag für neue Wissenschaft (Hrsg.), Bremerhaven
- HAUSMANN, G. [2007]: Handbuch Winterdienst. Beckmann-Verlag, Lehrte
- HCM [2000]: Highway Capacity Manual, Special Report 209, Third Edition. Transport Research Board (Hrsg.), Washington DC, USA
- HELLA [2009]: http://www.hella.com/hella-de-de/assets/media_global/Autoindustry_ti_fas_d.pdf, abgerufen am 16.10.2009
- HERZ, R.; SCHLICHTER, H. G.; SIEGENER, W. [1992a]: Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner. Werner-Verlag, Düsseldorf
- HOFFMANN, S.; DINKEL, A.; MAHMOUDI, S. S.; FRENKEN, T. [2012]: Erweiterte Untersuchung der Wirtschaftlichkeit des Pre-Gate-Parkens für den Hafen Hamburg. Im Auftrag der Hamburg Port Authority, Hannover
- HOLFELDER, W. [2004]: Vehicle-to-Vehicle and Vehicle-to-Infrastructure Communication Recent Developments, Opportunities and Challenges. Contribution to the Workshop: Future Generation Software Architectures in the Automotive Domain Connected Services in Mobile Networks, La Jolla, USA
- HRANAC, R.; STERZIN, E.; KRECHMER, D.; RAKHA, H.; FAZANEH, M. [2006]: Empirical Studies on Traffic Flow in Inclement Weather. Federal Highway Administration (Hrsg.), Washington DC, USA
- HUBER, W. [2001]: Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von Verkehrsinformationen. Dissertation, Technische Universität München, München
- HUPFER, P.; KUTTLER, W. [2006]: Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- IBRAHIM, A.; HALL, F. [1994]: Effect of Adverse Weather Conditions on Speed-Flow-Occupancy Relationships. In Transportation Research Record, No. 1457, TRB, National Research Council, Washington DC, USA
- INTELLIDRIVE [2009]: <http://www.intellidriveusa.org/>, abgerufen am 16.10.2009
- INVENT [2005]: Ergebnisbericht, INVENT „erfahren“ – mobil mit 8 Sinnen. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Berlin
- INVENTOOL [2012]: <http://www.inventool.de/Tools/407%20SWOT-Analyse%20T.pdf>, abgerufen am 08.11.2012
- ISO/TC 204 [2004]: CALM Handbook, ISO TC204: ETSI ERM TG37
- ISO 20828:2006-07 [2006]: Road vehicles — Security certificate management, Genf
- ITS INTERNATIONAL [2009]: Righter Shade of pale. Route One Publishing, Juli/August 2009, New Jersey, USA
- ITWISSEN [2012]: <http://www.itwissen.info>, abgerufen am 15.04.2012

- JAANINEH, G. [2006]: Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control. Vogel-Verlag, Würzburg
- KAYSER, S. [2007]: Grundlagen zur Erfassung klimatischer Einflüsse bei Dimensionierungsrechnungen von Asphaltbefestigungen. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden
- KELLER, H. [2004]: ITS Architekturen. Exposé für ein Arbeitsprogramm für den FGSV AK 3.15.5 "ITS Architekturen", Köln
- KLOTZ, S. [2002]: Besonderheiten des Verkehrs auf Autobahnen unter winterlichen Bedingungen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt
- KRUSE, R.; GEBHARDT, J.; KLAWONN, F. [1995]: Fuzzy-Systeme. Teubner Verlag, Stuttgart
- KNIB, H.C.; SCHMITZ, R.; WESTERMANN, C. [2006]: Anwenderforderungen. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Aachen
- KOOTHIS, S. [2004]: Neuronale Netze / Soft Computing. Teil 1, WS 2004/2005. Business and Information Technology School, Iserlohn
- LEONHARDT, A.; DINKEL, A.; GLAS, F.; BUSCH, F. [2005]: Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“. Abschlussbericht der 1. Testphase, München
- MANGOLD, M. [1997]: Verkehrsbeeinflussung bei schwierigen Witterungsbedingungen. Straßenverkehrstechnik, Heft 07/1997, Kirschbaum Verlag, Bonn
- MANGOLD, M.; TRÄGER, K.; LINDENBACH, A. [1996]: Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Umfelddatenerfassung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 729, Bonn
- MAURER, P. [2002]: Griffigkeitsmessungen mit dem RoadSTAR. Arsenal Research, Wien, Österreich
- MAZE, T.; AGARWAL, M.; BURCHETT, G. [2005]: Whether Weather Matters to Traffic Demand, Traffic Safety and Traffic Flow, Ames, USA
- MDM [2012]: <http://www.mdm-portal.de/>, abgerufen am 17.06.2012
- MOORE, R. [1999]: Glossar zur Datenerhebung und statistischen Analyse. Macquarie University, Sydney, Australien
- MYLLYLÄ J.: [2003] Floating Car Road Weather Monitoring, Summary of the Development Work between 1996-2003. Finnish Road Administration, Helsinki, Finland
- HRANAC, R.; STERZIN, E.; KRECHMER, D.; RAKHA, H.; FARZANEH, M. [2006]: Empirical Studies on Traffic Flow in Inclement Weather, Publication No. FHWA-HOP-07-073. U.S. Department of Transportation (Hrsg.), Cambridge, USA
- LINAUER, M. [2005]: Generierung streckenbezogener Verkehrsdaten als Basis für den Einsatz in Verkehrstelematiksystemen. Dissertation an der Universität für Bodenkultur. Wien, Österreich
- NÖCKER, G.; STRASSBERGER, M.; LASOWSKI, R.; KRONJAEGER, W.; SEIBERT, W.; HILT, H.J.; WILLEMSSEN, D. [2006]: WILLWARN, D22.32/II Hazard detection algorithms, Stuttgart
- NIRA DYNAMICS [2009]: <http://www.niradynamics.se/products/rfi.htm>, abgerufen am 16.10.2009
- OVERSEE [2012]: www.oversee-project.com/, abgerufen am 12.05.2012

- PETTY, K.; MAHONEY, W. [2007]: Weather Applications and Products Enabled Through Vehicle Infrastructure Integration (VII): Feasibility and Concept. Development Study. Prepublication. U.S. Department of Transportation, Intelligent Transportation Systems Joint Program Office, Washington DC, USA
- REFIOR, O.; RICHERS, V. [2009]: Weiterqualifizierung Fachberaterinnen und Fachberater Unterricht Modul III: Nachhaltige Wirksamkeit von Fortbildung und Beratung für die Qualitätsentwicklung im Bereich Unterricht. Akademie Esslingen, Esslingen
- REIF, K. [2007]: Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure. Vieweg + Teubner, Wiesbaden
- SAE [2002]: Society of Automotive Engineers - Calculation of the Time to Complete In-Vehicle Navigation and Route Guidance Tasks, Warrendale, USA
- SAFESPOT [2012]: <http://www.safespot-eu.org>, abgerufen am 16.01.2012
- SAFETYNET [2006]: Annual statistical report 2006 based on data from CARE / EC, Building the European Road Safety Observatory. Deliverable No: D 1.9
- SCHIEFERSTEIN, A. [2012]: Protokoll INCA Workshop – Lkw-ÜV und Wetter. München
- SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT [2009]: http://www.admin.ch/ch/d/sr/0_741_10/index.html, abgerufen am 16.10.2009
- SEVECOM [2009]: <http://www.sevecom.org>, abgerufen am 16.10.2009
- SIM^{TD} [2012]: <http://www.simtd.de/>, abgerufen am 30.04.2012
- SIM^{TD} [2009]: Spezifikation der IT-Sicherheitslösung. Deliverable D21.5. Sindelfingen, 2009
- SRIS [2011]: <http://sris.nu.>, abgerufen am 16.10.2011
- STATISTISCHES BUNDESAMT [2011]: Verkehr - Verkehrsunfälle. DESTATIS Fachserie 8 Reihe 7, Wiesbaden
- STEINAUER, B.; BRAKE, M.; BAIER, M.; KATHMANN, T.; OFFERMANN, F.; FELDGES, M. [2006]: Integration mobil erfasster Verkehrsdaten (FCD) in die Steuerungsverfahren der kollektiven Verkehrsbeeinflussung. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr (Hrsg.), Bonn
- STEINHOFF, C. [2003]: Online Bewertung der Akzeptanz und der Wirksamkeit präventiver Schaltungen von Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen. Dissertation, Technische Universität München, München
- STERN, A.D.; SHAH, V.; GOODWIN, L.; PISANO, P. [2003]: Analysis of Weather Impacts on Traffic Flow in Metropolitan Washington DC. Mitretek Systems Inc. (Hrsg.), Falls Church, USA
- STRAÙE UND AUTOBAHN [2007]: Mit Thermal Mapping gefährliche Straßenabschnitte identifizieren. Kirschbaum Verlag, Heft 07, Bonn
- STRAÙEN.NRW [2009]: http://www.strassen.nrw.de/betrieb_verkehr/betrieb/winterdienst/abc.html, abgerufen am 18.05.2009
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN [2012]: http://www.vt.bv.tum.de/index.php?option=com_content&task=view&id=68&Itemid=213, abgerufen am 21.04.2012
- TOMTOM [2011]: White paper: How TomTom's HD TrafficTM and IQ RoutesTM data provides the very best routing, Amsterdam, Niederlande

- TRACKSS [2009]: <http://www.trackss.net>, abgerufen am 16.10.2009
- TURNER, S. [2002]: Defining and Measuring Traffic Data Quality. Traffic Data Quality Workshop, Washington, USA
- URBAS, L.; HEINATH, M.; LEUCHTER, S. [2007]: Bedienermodellgestützte Bewertung des Ablenkungspotenzials von Komfortsystemen in Kfz in frühen Phasen der Systementwicklung. iCom – Zeitschrift für interaktive und kooperative Medien, 2/2007, München
- WAGNER, K.W. [2006]: PQM – Prozessorientiertes Qualitätsmanagement. Carl Hanser Verlag, München
- WALLMANN, C.G. [2006]: The Winter Model – A Winter Maintenance System. Piarc XIIth Winter Road Congress, Turin, Italien
- WEBER, I. [2004]: Verbesserungspotenzial von Stabilisierungssystemen im Pkw durch eine Reibwertsensorik. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt
- WESSELS, S. [2006]: DSRC Dedicated Short Range Communication. Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen
- WILLWARN [2007]: WILLWARN Final report, Stuttgart
- WITTE, R. [2002]: Architektur von Fuzzy-Informationssystemen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1	Darstellung des methodischen Vorgehens, nach FGSV [2001]	3
Bild 2.1	Grenzen der Reibwertnutzung am Reifen, nach WEBER [2004]	8
Bild 2.2	Anteil Niederschlag und nicht trockene Fahrbahnzustände von August 2006 bis Juni 2007 im Testfeld für Umfelddatenerfassung „Eching Ost“ [DINKEL ET AL., 2008c]	10
Bild 2.3	Grafische Darstellung der Wärmebilanzgleichung, nach KAYSER [2007]	16
Bild 2.4	Gegenüberstellung stationäre versus mobile Umfelddatenerfassung mittels eines Fahrzeugs	22
Bild 2.5	Varianten der C2I-Kommunikation zur Übertragung von xFCD auf Basis der SBA-Systemarchitektur	25
Bild 3.1	Ablauf der Datenanalyse und Einbindung in das Bearbeitungskonzept	35
Bild 3.2	Vergleich von xFCD-Aggregierungsintervallen über die bei verschiedenen Geschwindigkeiten jeweils zurückgelegten Strecken	37
Bild 3.3	Aufbereitung und Zusammenführung verschiedener Datenarten aus unterschiedlichen Quellen in einer Datenbank	40
Bild 3.4	Korrelation Rad- vs. Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h], 29.02.2008	47
Bild 3.5	Bild einer Fahrt auf winterglatter Fahrbahn. BAB A 9, 01.03.2008	48
Bild 3.6	Status Fahrerassistenzsysteme. Fahrt BAB A 9, 01.03.2008	48
Bild 3.7	Beschleunigungen. Fahrt BAB A 9, 01.03.2008	49
Bild 3.8	Beispiel für den Vergleich der Lufttemperaturen aus verschiedenen Quellen, 29.02.2008	51
Bild 3.9	Regressionsanalyse zum Vergleich mobil/stationär erfasster Lufttemperaturen [°C]	52
Bild 3.10	Regressionsanalyse für die aus den Fahrzeugen A und V erfassten Lufttemperaturen [°C]	53
Bild 3.11	Beispiel für Lufttemperatur Fahrzeug A versus stationäre Sensoren BAB A 9, 01.03.2009	53
Bild 3.12	Beispiel für Wischerinformationen, 26.03.2008	56
Bild 3.13	Scheibenreinigungsvorgang - Bild der Videosequenz, 26.03.2008	57
Bild 3.14	Bewertung Wischerregelung, 20.03.2008	58
Bild 3.15	Bewertung Wischerregelung, 29.02.2008	58
Bild 3.16	Bewertung Wischerregelung, 17.03.2008	59
Bild 3.17	Lufttemperatur versus Fahrbahnoberflächentemperatur (stationär erfasst), 22.03.2008	60
Bild 3.18	Contourplot für die stationär erfasste relative Luftfeuchtigkeit, 06.12.2007	62
Bild 4.1	Aufbau des Erweiterten Fahrbahnzustand-Modells	66
Bild 4.2	Aufbau des Input Moduls	70
Bild 4.3	Zugehörigkeitsfunktion Zeitdifferenz für die xFCD-Bewertung und – Distribution, Variante bakengestützte Kommunikation	73
Bild 4.4	Zugehörigkeitsfunktion Stichprobengröße für die xFCD-Bewertung und -	

	Distribution	74
Bild 4.5	Zugehörigkeitsfunktion Gewichtung	74
Bild 4.6	FBT-Modell zur Bestimmung des Zusammenhangs p_3 zwischen $LT_{x_{FCD}}$ und FBT	78
Bild 4.7	Aufbau des Temperatur-Modells	79
Bild 4.8	Aufbau des Nässe-Modells	82
Bild 4.9	Zugehörigkeitsfunktion Wischerintervall	83
Bild 4.10	Zugehörigkeitsfunktion Nässe-Stufe	83
Bild 4.11	Zugehörigkeitsfunktion Fahrzeuggeschwindigkeit, angelehnt an HUBER [2001]	84
Bild 4.12	Fuzzy-Nässe-Modell	84
Bild 4.13	Aufbau des Glätte-Modells	87
Bild 4.14	Aufbau des Fahrbahnzustand-Modells	91
Bild 4.15	Zugehörigkeitsfunktion Wasserfilmdicke	91
Bild 4.16	Qualitätsmanagementkonzept zur Datenerhebung, nach DINKEL ET AL. [2008d]	95
Bild 4.17	Informationsgenerierung im Geräte-Monitor und Anbindung an den System-Monitor	96
Bild 4.18	Zugehörigkeitsfunktion Geräteverfügbarkeit	101
Bild 4.19	Zugehörigkeitsfunktion Glättewarnungen	101
Bild A2.1	Bild der Videosequenz, 20.03.2008	159
Bild A2.2	Bild der Videosequenz, 29.02.2008	159

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Vergleich amerikanischer Studien zum Einfluss des Wetters auf den Verkehrsablauf mit Vorgaben des HCM [2000]	10
Tab. 2.2	Straßenverkehrsunfälle und Unfallfolgen 2010 nach Straßenzustand [STATISTISCHES BUNDESAMT, 2011]	11
Tab. 2.3	Einflussfaktoren bei der Glättebildung [DURTH ET AL., 2004]	14
Tab. 2.4	Messgrößen gemäß TLS [BAST, 2002] und deren Nutzung in SBA, nach DINKEL ET AL. [2007]	21
Tab. 3.1	Direkte Verfügbarkeit von stationär und mobil erfassten Einflussgrößen auf den Fahrbahnzustand	43
Tab. 3.2	Spezifikation der ausgewählten xFCD auf Basis der Versuchsfahrzeuge	45
Tab. 3.3	Extreme mittlere Abweichungen zwischen den Messwerten für relative Luftfeuchtigkeit aus benachbarten Sensoren im Rahmen der SBA der BAB A 9	62
Tab. 4.4	Matrix zur Ermittlung der Nässe-Stufen für stationär erfasste Umfelddaten, nach FGSV [2010a]	71
Tab. 4.1	Beispiel für Regeln zur Aggregation der fahrzeuggenerierten Daten	71
Tab. 4.2	Regelbasis für die Gewichtung von xFCD (beispielhafter Auszug)	75
Tab. 4.3	Regelbasis Fuzzy-Nässe-Modell	85
Tab. 4.4	Fahrbahnzustände Februar 2009, Sensor Vaisala DRS 511	89
Tab. 4.5	Ergebnisse der Validierung des Glätte-Modells für Februar 2009	89
Tab. 4.6	Regelbasis Fuzzy-FBZ_Nässe	92
Tab. 4.7	Überprüfte Prozesse und zugehörige Qualitätsindikatoren zur Übertragungs-Prüfung	96
Tab. A2.1	Merkmale Clustering	162
Tab. A2.2	Bestimmtheitsmaße glätterelevanter Cluster	164
Tab. A2.3	Ergebnisse Regressionsanalyse als sogenannte Clustermatrix	165
Tab. A2.4	Validierung über den Vergleich der modellierten mit den realen Fahrbahntemperaturen	166
Tab. A4.1	Ergebnisse Glätte-Modell: Beschreibung und Empfehlungen, nach BADELDT UND BREITENSTEIN [2005] und FGSV [2010a]	171

Anhang 1: Beschreibung von Regressionsanalysen

Zur Überprüfung von Daten und zur Ermittlung des Maßes von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Datensätzen werden in der vorliegenden Arbeit Regressionsanalysen durchgeführt.

Bei der Regressionsanalyse handelt es sich um ein statistisches Verfahren, mit dem die Werte einer Zielvariablen y mit Hilfe der Werte einer oder mehrerer unabhängiger Variablen x_i vorhergesagt werden sollen. Das klassische Regressionsmodell betrachtet ausschließlich kontinuierliche Variablen. Die Regressionsanalyse kann als deskriptives Modell verwendet werden, um in einem Streudiagramm zweier Variablen x und y den linearen Trend der Punktwolke mit Hilfe einer Geraden zu beschreiben [HERZ ET AL., 1992]. Die Funktionsgleichung dieser Geraden lautet für alle $i = 1, \dots, n$:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_i \quad (\text{A1.1})$$

\hat{y}_i ist jeweils der Wert der Zielvariablen, der mittels dieses deskriptiven Modells vorhergesagt wird. Er sollte nicht zu stark von den jeweiligen beobachteten Werten x_i abweichen. b_1 wird als Regressionskoeffizient bezeichnet, b_0 stellt die Regressionskonstante dar. Die Parameter b_0 und b_1 werden so berechnet, dass die Summe der quadrierten Abweichungen für alle Untersuchungseinheiten minimiert wird [HERZ ET AL., 1992]:

$$b_0 = \frac{\sum x_i^2 * \sum y_i - \sum x_i * \sum x_i * y_i}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (\text{A1.2})$$

$$b_1 = \frac{\sum x_i * y_i - \frac{1}{n} \sum x_i * \sum y_i}{\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2} \quad (\text{A1.3})$$

Als Maß für die Abweichungen der Vorhersagen eines Regressionsmodells von den empirischen Daten wird der Determinationskoeffizient (das Bestimmtheitsmaß) R^2 berechnet. R^2 nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei $R^2 = 0$ bedeutet, dass die unabhängigen Variablen keine Vorhersage der Zielvariablen erlauben. $R^2 = 1$ weist auf eine perfekte Modellanpassung hin [HERZ ET AL., 1992].

Das Bestimmtheitsmaß wird nach Formel (A1.4) ermittelt:

$$R^2 = \frac{\text{Cov}(x, y)^2}{\text{Var}(x)\text{Var}(y)} \quad (\text{A1.4})$$

Die Kovarianz (Cov) ist ein Assoziationsmaß für zwei kontinuierliche Variablen x und y . Es wird für jedes i das Produkt der Abweichungen der x - und y -Werte vom jeweiligen arithmetischen Mittel der Variablen x und y berechnet. Die Varianz (Var) gibt an, wie stark ein Sach-

verhält streut. Sie wird berechnet, indem man die quadrierten Abstände der Messwerte vom Mittelwert summiert und durch die Anzahl der Messwerte dividiert [MOORE, 1999].

Anhang 2: Ergänzende Grafiken zu den Befahrungen



Bild A2.1 Bild der Videosequenz, 20.03.2008



Bild A2.2 Bild der Videosequenz, 29.02.2008

Anhang 3: Ergänzungen zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Luft- und Fahrbahntemperatur

Methodisches Vorgehen zur Datenanalyse

Um auf die Modellierbarkeit der Fahrbahntemperaturen aus stationär erfassten Lufttemperaturen zu schlußfolgern (siehe Abschnitt 3.3), werden nachfolgend die Zusammenhänge zwischen stationär erfassten Luft- und Fahrbahnoberflächentemperaturen untersucht. Bei positiven Resultaten erscheint in einem weiteren Schritt prinzipiell eine streckenbezogene Modellierung der Fahrbahnoberflächentemperatur aus fahrzeugseitig erhobenen Lufttemperaturen möglich. Aufgrund der Tatsache, dass keine Informationen zu vorherrschenden Strahlungen, die die Temperatur der Fahrbahnoberfläche maßgeblich beeinflussen, verfügbar sind, wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass keine übertragbaren und allgemeingültigen Ergebnisse erwartet werden können.

Zunächst werden mittels des statistischen Verfahrens „Clustering“ für definierte Umfeldsituationen die Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Kombinationen aus Luft- und Fahrbahnoberflächentemperaturen ermittelt.

Für den gesamten Zeitbereich mit direkter Sonnenbestrahlung (im Beispiel von circa 7 Uhr bis 20 Uhr, siehe Bild 3.8) erscheint eine Modellbildung ohne Kenntnis der Strahlungswerte aufgrund des nicht-linearen Zusammenhangs zwischen Luft- und Fahrbahntemperatur nicht realisierbar. Da aufgrund der Bestrahlung und der thermischen Eigenschaften die Fahrbahntemperaturen in der Regel höher als die Lufttemperaturen sind, ist in diesen Situationen die Kenntnis der streckenbezogenen Lufttemperatur ausreichend.

Das beschriebene Verhalten der Temperaturverläufe ist typisch und konnte im Rahmen der Arbeiten im Testfeld für Umfelddatenerfassung vielfach beobachtet werden. Die Verläufe der Temperaturen für Fahrbahnoberfläche und Luft stimmen für das dargestellte Beispiel für eine große Anzahl an Sensoren überein. Die für die Bearbeitung der Aufgabenstellung zur Verfügung stehende Datengrundlage aus dem Testfeld für Umfelddatenerfassung übersteigt die im Rahmen von SBA regulär vorhandenen Informationen bei Weitem.

Clusteranalyse

Es sollen nur die standardmäßig in SBA erfassten Umfeldinformationen verwendet werden. Die Einschränkung, dass zu der einflussreichen Strahlungsenergie keine Informationen vorliegen, soll durch die Gruppierung („Clustering“) von Umfelddaten zu typischen Wettersituationen gemindert werden. Hierfür werden historische und plausibilitätsgeprüfte Datensätze des Testfelds „Eching Ost“ so zusammengefasst und gruppiert, dass sie charakteristische, sich wiederholende Umfeldsituationen repräsentieren. Durch das Clustering sollen die erzielten Ergebnisse in Form von Zusammenhängen zwischen Luft- und Fahrbahntemperaturen bei verschiedenen Umfeldbedingungen vergleichbar und übertragbar sein.

Die Zusammenhänge sollen zunächst anhand der Sensoren und Randbedingungen im Testfeld „Eching Ost“ bestimmt und getestet werden. Hierfür werden plausible Messwerte der Monate November 2006 bis März 2007 von Sensoren verwendet, die von DINKEL ET AL. [2008a] als „geeignet für den Einsatz in SBA“ bewertet wurden. Zur Validierung dienen Daten des Zeitraums November 2008 bis Februar 2009.

Die Cluster werden so gewählt, dass die Umfeldsituation in einer Gruppe möglichst ähnlich und die Gruppen untereinander möglichst unähnlich sind. Da das zu entwickelnde Modell vor allem bei der Glätteermittlung und -warnung eingesetzt werden soll, wurden die Clustermerkmale zur Unterscheidung zwischen den Umfeldbedingungen in unterschiedlichen Clustern aus den Regeln eines Glättewarn-Modells [BADELDT UND BREITENSTEIN, 2005] abgeleitet, sowie basierend auf Analysen von Daten des Testfelds „Eching Ost“ wie in Tab. A2.1 dargestellt gewählt:

- Direkt vom Glättewarn-Modell nach BADELDT UND BREITENSTEIN [2005] beeinflusst wurde die Auswahl für die Schwellenwerte der Messgrößen FBT, LT und FBZ beziehungsweise WFD. Es wurden charakteristische Werte festgelegt, anhand derer die Möglichkeiten des Eintretens von Glättegefahren bestimmt werden können.
- Die Wahl der Ausprägung des Merkmals TT1 ist aus Schwellenwerte für FBT aus dem Glättewarn-Modell nach BADELDT UND BREITENSTEIN [2005] abgeleitet.
- Die in den Plausibilitätsprüfungen der FGSV [2010a] genannten Ausprägungen wurden für die Auswahl des Schwellenwerts für RLF genutzt.
- Für WGS steht aus der Literatur kein Anhaltspunkt für die Wahl des Schwellenwerts zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde für 6 Monate des Jahres 2008 eine Mittelwertberechnung der aufgezeichneten Messwerte durchgeführt. Als mittlere Windgeschwindigkeit wurde 6,5 m/s ermittelt, die Wahl des Schwellenwerts orientiert sich an diesem Wert.

Zur eindeutigen Bezeichnung der gemäß der Ausprägungen der gewählten Merkmale gruppierten Cluster wurde die folgende Nomenklatur entwickelt:

Jeder Clustername („Clusterkürzel“) setzt sich aus den Ausprägungen (1, 2, 3) der untersuchten Merkmale (a, b, c, d, e, f, g) zusammen (vergleiche Tab. A2.1), sodass sich der Name als „Ausprägung [1,2] Merkmal a'.Ausprägung [1,2] Merkmal b'.Ausprägung [1,2] Merkmal c'.Ausprägung [1,2] Merkmal d'.Ausprägung [1,2] Merkmal e'.Ausprägung [1,2] Merkmal f'.Ausprägung [1,2,3] Merkmal g“ liest. Eine Umfeldsituation mit beispielsweise

- a) $FBT \leq 2 \text{ }^\circ\text{C}$,
- b) $WFD = 0 \text{ mm}$,
- c) $RLF < 80\%$,
- d) $LT \leq 2 \text{ }^\circ\text{C}$,
- e) $TT1 \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$,

f) WGS > 6,5 m/s und

g) FBZ = „trocken“

entspreche somit dem Clusterkürzel „2.2.1.2.2.1.1“.

Für jedes Cluster wird durch Regressionsanalysen (vergleiche Anhang 1) der Zusammenhang p_1 zwischen den stationär im Testfeld erhobenen Luft- und Fahrbahnoberflächentemperaturen ermittelt. Diese Zusammenhänge werden im Rahmen einer Validierung mittels unabhängiger Datensätze überprüft. Es wird davon ausgegangen, dass je Messstelle unter ähnlichen Umfeldbedingungen ähnliche Zusammenhänge zwischen Luft- und Fahrbahnoberflächentemperaturen existieren.

Ausprägung	Merkmale						
	A	b	c	d	e	f	g
	FBT	WFD	RLF	LT	TT1	WGS	FBZ
1	>2 °C	>0 mm	<80 %	>2 °C	>5 °C	>6,5 m/s	Trocken
2	≤2 °C	=0 mm	≥80 %	≤2 °C	≤5 °C	≤ 6,5 m/s	Feucht/nass
3	/	/	/	/	/	/	Schnee etc.

Tab. A2.1 Merkmale Clustering

Die Daten werden gemäß der Kombinationen der in Tab. A2.1 aufgeführten Merkmale gruppiert. Im weiteren Verlauf werden nur diejenigen Situationen weiter verfolgt, in denen gemäß Glätte-Modell [FGSV, 2010a] eine Glätte auftreten könnte. Es werden also nur die Datensätze derjenigen Cluster untersucht, in denen die Lufttemperatur ≤ 2 °C beträgt und die Temperatur in Tiefe 1 unterhalb 5 °C liegt. Zur Modellbildung verbleiben somit 48 Cluster, für die jeweils die Zusammenhänge p_1 zwischen Luft- und Fahrbahnoberflächentemperatur ermittelt werden. Für eine ergänzende visuelle Überprüfung der Messwertpaare aus LT und FBT werden diese zusätzlich grafisch dargestellt.

Wie beschrieben wird die Linearität des Zusammenhangs zwischen Luft- und Fahrbahnoberflächentemperatur von der Strahlung beeinflusst. Die Kenntnis der vorherrschenden Strahlung als maßgebliche Einflussgröße auf die Fahrbahntemperatur wäre essenziell. Innerhalb jedes Clusters wurde zwischen Tages- und Nachtzeit unterschieden.

Es wird überprüft, welcher Zusammenhang zwischen den Messwerten für Lufttemperatur und Fahrbahnoberflächentemperatur besteht. Diese Untersuchungen werden zunächst für den Messort „Testfeld ‚Eching Ost‘“ durchgeführt, da hier eine genaue Kenntnis über die Güte der eingesetzten Sensoren vorliegt. Für den Aufbau der Datenbasis werden die aus dem Testfeld „Eching Ost“ zur Verfügung gestellten historischen Datensätze für Fahrbahnoberflächentemperatur und -zustand, Niederschlagsart, Relative Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Temperatur in Tiefe 1 und Windgeschwindigkeit (Spitze) gemäß FGSV [2010a] auf Plausibilität geprüft. Dies ist ein sehr wichtiger Arbeitsschritt, da dem zu entwickelnden Modell durch falsche Messwerte unzutreffende Zusammenhänge gelernt werden könnten. Es werden die Plausibilitätskontrollen Grenzwertüberwachung, Differentialkontrolle und Anstiegs-Abfallkontrolle auf die Daten angewendet (siehe FGSV [2010a]).

Validierung

Die Validierung der mittels Clustering für definierte Umfeldbedingungen bestimmten Zusammenhänge zwischen Luft – und Fahrbahntemperatur erfolgt, indem aus den minütlich stationär erfassten Lufttemperaturen die Fahrbahntemperaturen modelliert werden und diese Resultate mit real gemessenen Daten der Fahrbahntemperatur verglichen werden.

Hierfür werden die Daten in Clustern gruppiert und jeweils gemäß (A2.1) die real eingetretenen Fahrbahntemperaturen mit den mittels des Parametersatzes p_1 (b_0, b_1) modellierten Werten verglichen.

$$FBT_{Modell} = b_0(p_1) + b_1(p_1) * LT \quad (A2.1)$$

Analyse der stationär erfassten Daten

Die Datenbasis umfasst 213.509 Messwertpaare, die gemäß der in der „Beschreibung des methodischen Vorgehens“ geschilderten Regeln in verschiedene Cluster eingeteilt werden. Hierfür wurde eine Prozedur in Visual Basic programmiert. Die Regressionsanalysen werden für jedes Cluster mittels Microsoft Excel durchgeführt.

Die Ergebnisse der Regressionsuntersuchungen der für eine potenzielle Glättebildung relevanten Cluster sind in Tab. A2.2 dargestellt. Cluster, für die im Untersuchungszeitraum keine Messwertpaare gebildet werden konnten, sind nicht aufgeführt.

Wie in den Voruntersuchungen qualitativ festgestellt, ergeben sich für die Nachtzeiten in der Regel höhere Bestimmtheitsmaße. Gelten für Cluster geringe Zusammenhänge, dann lässt sich unter diesen Umfeldbedingungen die Fahrbahnoberflächentemperatur nicht zuverlässig aus der Lufttemperatur ableiten. Die Tab. A2.2 zeigt anhand der Ausprägungen der Bestimmtheitsmaße Cluster, die eine Modellierung der Fahrbahnoberflächentemperatur aus den Messwerten der Lufttemperatur ermöglichen. Insgesamt weisen viele Cluster Bestimmtheitsmaße oberhalb 0,9 auf, die beiden Cluster 2.2.2.2.2.1 und 2.1.2.2.2.3, denen die höchsten Anzahlen an Werten zugrundeliegen, haben mit 0,91 und 0,88 hohe Bestimmtheitsmaße.

Nachfolgend werden nur jene Cluster weiter untersucht, die mindestens einen „mittleren Zusammenhang“ aufweisen (siehe Anhang 1). Als Schwellenwert wurde für diese Differenzierung $R^2 \geq 0,8$ gewählt. Zudem wird festgelegt, dass die Cluster aus mindestens $n = 20$ Messwerten gebildet werden müssen.

Somit erfolgt aus diesen Anforderungen die Konsequenz, dass die Fahrbahntemperatur mit Hilfe der entwickelten Methodik nur für Nachtzeiten ohne direkte Sonnenbestrahlung aus der Lufttemperatur bestimmt werden kann (vergleiche Tab. A2.2). Für eine Ausweitung der Untersuchungen ist es, sowohl für Nacht- als auch Tageszeiten, zwingend erforderlich, dass Informationen zu der vorherrschenden Strahlung vorliegen.

Clusterkürzel	Tageszeit		Nachtzeit	
	n	R ²	n	R ²
2.2.2.2.2.1	1425	0,5418	6242	0,9068
1.2.2.2.2.1	1399	0,0004	1235	0,1917
2.2.1.2.2.1	18	0,8663	44	0,9968
2.1.2.2.2.3	999	0,6808	5798	0,8767
2.1.2.2.2.1	271	0,3937	1852	0,5389
2.1.2.2.1.2	3635	0,4616	424	0,4263
2.1.1.2.2.1.2	0	/	21	0,9996
1.2.1.2.2.1	0	/	30	0,022
1.1.2.2.2.3	1158	0,0653	1045	0,0539
1.1.2.2.2.1	353	0,3908	579	0,0506
1.1.2.2.1.2	0	/	83	0,0019
2.2.2.2.2.2	3	/	3	/
2.2.2.2.1.1	22	0,0211	239	0,9376
2.2.1.2.2.1.1	0	/	210	0,9909
2.1.2.2.2.2	253	0,0006	0	/
2.1.2.2.1.3	545	0,4262	507	0,8609
2.1.2.2.1.1	39	0,3393	135	0,8312
2.1.1.2.2.1.3	0	/	48	0,9995
2.1.1.2.2.1.1	0	/	1	/
1.2.2.2.2.2	20	0,4309	0	/
1.2.2.2.1.1	161	0,1366	96	0,346
1.2.1.2.2.1.1	1	/	58	0,9381
1.1.2.2.2.2	292	0,0032	834	0,0011
1.1.2.2.1.3	0	/	523	0,0021
1.1.2.2.1.1	0	/	4	0,9993

Tab. A2.2 Bestimmtheitsmaße glätterelevanter Cluster

Die Tab. A2.3 zeigt für diejenigen Cluster, die diesen Anforderungen entsprechen, die Regressionskonstanten b_0 und den Regressionskoeffizienten b_1 . Für diese Übersicht wird im Temperatur-Modell die Bezeichnung „Clustermatrix“ gewählt.

Clusterkürzel	Tageszeit		Nachtzeit	
	b_0	b_1	b_0	b_1
2.2.2.2.2.1	/	/	0,550	0,781
2.2.1.2.2.1	/	/	-0,191	0,895
2.1.2.2.2.3	/	/	0,550	0,769
2.2.1.2.2.1.1	/	/	0,383	0,921
2.1.2.2.2.1.3	/	/	-0,766	0,786
2.1.2.2.2.1.1	/	/	-1,599	0,660
1.2.1.2.2.1.1	/	/	9,032	4,485
1.1.2.2.2.1.1	/	/	5,048	4,395

Tab. A2.3 Ergebnisse Regressionsanalyse als sogenannte Clustermatrix

Validierung

Die Validierung erfolgt über den Vergleich der gemäß Tab. A2.4 modellierten Fahrbahntemperatur (FBT_{Modell}) mit der tatsächlich ermittelten Fahrbahntemperatur (FBT). Die modellierte Fahrbahntemperatur wird bestimmt, indem in Abhängigkeit von den aktuellen Umfeldbedingungen (p_1) die stationär erfassten Lufttemperaturen mit b_0 und b_1 beaufschlagt werden.

Aufgrund der hohen Übereinstimmung zwischen den stationär und den fahrzeugseitig erfassten Lufttemperaturen wird die Überprüfung des Parametersatzes $b_0(p_1)$ und $b_1(p_1)$ ausschließlich mittels stationär erfassten Werten der Luft- und Fahrbahnoberflächentemperaturen durchgeführt. Die hohe Übereinstimmung zwischen fahrzeuggenerierten und stationär erfassten Lufttemperaturen wurde in Abschnitt 3.4.3 belegt. Aufgrund des größeren Stichprobenumfangs an stationär ermittelten Lufttemperaturen im Vergleich zu fahrzeugseitig erfassten Werten steht so eine größere Anzahl an Clustern mit einer wesentlich größeren Stichprobengröße n zur Auswertung zur Verfügung. Zur Validierung von p_1 werden im Rahmen des Testfelds „Eching Ost“ gewonnene Daten des Zeitraums Dezember 2008 bis Februar 2009 genutzt, die gemäß DINKEL ET AL. [2008a] als zuverlässig eingestuft wurden. Es handelt sich bei der Validierung nicht um die gleiche Zusammenstellung an Sensoren, die zu der Modellierung verwendet wurde, da die Ansprüche an Verfügbarkeit und Qualität der Messwerte im Vergleichszeitraum einen Wechsel der verwendeten Sensoren erforderlich machte. Da die Messwerte jeweils durch die Sensorik hervorgerufene charakteristische Eigenschaften aufweisen, wird davon ausgegangen, dass der Sensortausch insbesondere eine Veränderung der Charakteristik der Fahrbahntemperaturen [vergleiche DINKEL ET AL., 2009] und somit eine Verschlechterung der Ergebnisse der Validierung bewirkt haben kann.

In Tab. A2.4 sind die modellierten Fahrbahntemperaturen FBT_{Modell} den real im Testfeld erfassten Fahrbahnoberflächentemperaturen FBT_{real} gegenüber gestellt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beschreibt den Grad der Übereinstimmung von modellierten und real erfassten Fahrbahntemperaturen.

Zur weitergehenden Analyse werden für alle je Minute vorliegenden Messwertpaare des Nachtzeitraums, die den oben genannten Anforderungen entsprechen, die folgenden beschreibenden statistischen Kenngrößen berechnet und in Tab. A2.4 dargestellt.

- Minimale Abweichung:

$$\text{Min}(| FBT_{\text{Modell}} - FBT_{\text{real}} |) \quad (\text{A2.2})$$

- Maximale Abweichung:

$$\text{Max}(| FBT_{\text{Modell}} - FBT_{\text{real}} |) \quad (\text{A2.3})$$

- Spannweite:

$$\text{Min}(| FBT_{\text{Modell}} - FBT_{\text{real}} |) + \text{Max}(| FBT_{\text{Modell}} - FBT_{\text{real}} |) \quad (\text{A2.4})$$

Die Extrema der Abweichungen stellen ein Maß für die besten und schlechtesten „Treffergenauigkeiten“ dar, die Spannweite ist ein einfaches statistisches Streuungsmaß.

Aufgrund des zu geringen Stichprobenumfangs im Untersuchungszeitraum wird das Cluster 2.1.1.2.2.1.2 aus der weiteren Bewertung ausgeschlossen.

Clusterkürzel	Betrag der minimalen Abweichung	Betrag der maximalen Abweichung	Spannweite	R ²	b ₀	b ₁	n
2.2.2.2.2.1	2,44	3,29	5,74	0,91	1,15	-0,61	24361
2.2.1.2.2.1	2,89	3,03	5,92	0,70	0,89	0,05	5371
2.1.2.2.2.3	2,04	3,90	5,95	0,75	1,11	-0,51	8438
2.1.1.2.2.1.2	0,67	0,97	1,64	0,75	-1,81	3,48	13
2.2.1.2.2.1.1	1,43	2,22	3,65	0,30	1,14	-0,09	1280
2.1.2.2.2.1.3	0,53	2,44	2,97	0,64	0,91	0,86	1343
2.1.2.2.2.1.1	0,12	3,23	3,12	0,87	1,56	2,60	133

Tab. A2.4 Validierung über den Vergleich der modellierten mit den realen Fahrbahntemperaturen

Die Interpretation der Resultate ist Abschnitt 3.5.1 zu entnehmen.

Anhang 4: Grundlagen der Fuzzy-Logik

Die folgende Beschreibung der Fuzzy-Logik basiert auf Ausführungen von KRUSE ET AL. [1995]. Die Fuzzy-Logik wurde aus der Theorie der unscharfen Mengen („Fuzzy Set Theory“) entwickelt, die 1965 von Lofti A. Zadeh aufgestellt wurde. Im Gegensatz zu der traditionellen Mengenlehre, gemäß der ein Element einer Menge entweder angehört oder nicht angehört, können bei der Verwendung von Zugehörigkeitsfunktionen („Fuzzy Sets“, sogenannte Fuzzy-Mengen) die Elemente zu einem gewissen Grad einer Menge angehören. Die Zugehörigkeit wird durch eine Zahl zwischen 0 und 1 ausgedrückt. Dabei entspricht der Wert „1“ einer kompletten Zugehörigkeit und „0“ bedeutet, dass keine Zugehörigkeit vorliegt. In den Fuzzy-Mengen wird den Elementen x_j der Grundmenge G ein Zugehörigkeitsgrad μ_M zugewiesen. Als Zugehörigkeitsfunktionen werden in der Regel einfache Funktionen u gewählt.

Ein Fuzzy-Menge A wird mathematisch folgendermaßen beschrieben:

$$A := \{(u, \mu_M(x)) \mid x \in G, \mu_M(x) \in [0,1]\} \quad (\text{A3.1})$$

Jeder mögliche Wert einer Variablen muss zumindest einer unscharfen Menge angehören.

Ein Fuzzy-Regel-System umfasst die folgenden datenverarbeitenden Schritte:

- Fuzzyfizierung der scharfen Eingangsgrößen:

Technische Größen werden sprachlich beschrieben. Mit der Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge wird für jede Eingangsgröße der Zugehörigkeitsgrad zum entsprechenden linguistischen Wert, wie beispielsweise „leicht“, „stark“, „wenig“, festgelegt.

- Inferenz und Komposition der Regeln:

Im zweiten Arbeitsschritt erfolgt durch WENN-DANN-Regeln die logische Verknüpfung der linguistischen Werte.

Die logischen Verknüpfungen UND, ODER und NICHT sind in der Fuzzy-Logik abbildbar, sie werden wie folgt ermittelt:

$$\text{UND} : \mu a \wedge b = \min\{\mu a, \mu b\} \quad (\text{A3.2})$$

$$\text{ODER} : \mu a \vee b = \max\{\mu a, \mu b\} \quad (\text{A3.3})$$

$$\text{NICHT} : \mu - a = 1 - \mu a \quad (\text{A3.4})$$

Auf Basis der Regelkataloge wird in der Inferenz aus den Eingangsgrößen eine Schlussfolgerung abgeleitet. Werden aus mehreren Regeln die gleichen Schlussfolgerungen generiert, so müssen die Ergebnisse zusammengeführt werden. Hierbei gilt der Rang der Regeln im Regelkatalog als entscheidendes Kriterium. Gleichrangig formulierte Regeln gelten alternativ, sie sind ODER-verknüpft. In einem Regelsystem betreffen meist mehrere Regeln eine Ausgangsgröße, deshalb müssen die Zugehörigkeitsfunktionen der Aktion nach der Inferenzbildung zu einer Gesamtzugehörigkeitsfunktion zusammengefasst werden (Komposition).

Hierfür wird häufig die Maximum-Bildung über alle Zugehörigkeitsfunktionen der Aktionen, die eine Ausgangsgröße betreffen, eingesetzt.

- Defuzzifizierung der scharfen Ausgangsgrößen:

Das Ergebnis der Inferenz ist eine unscharfe Größe. Die Ermittlung einer konkreten Ausgangsgröße aus der Gesamtzugehörigkeitsfunktion stellt den letzten Arbeitsschritt in einem Fuzzy-Regel-System dar („Defuzzifizierung“).

Hierbei sind als Zielvorgaben beispielsweise der „beste Kompromiss“ oder das „plausibelste Ergebnis“ möglich.

Dazu können verschiedene Verfahren angewendet werden. In der vorliegenden Arbeit wird die Schwerpunktmethodik gewählt. Hierbei wird der Schwerpunkt der Gesamtzugehörigkeitsfunktion ermittelt, was gemäß der Zielsetzung der Arbeit eine plausible und konservative Lösung darstellt.

In der Literatur finden sich zahlreiche Beispielanwendungen der Fuzzy-Logik (zum Beispiel JAANINEH [1996]). Die Fuzzy-Logik wurde bereits mehrfach im Verkehrswesen sowie bei der Verarbeitung von Umfelddaten angewendet. Eine Ideenskizze zur Nutzung von Fuzzy-Logik zur Nässeerkennung wird in FGSV [2001] vorgestellt. Hier wird gezeigt, dass die Schwellenwertanalyse durch die Fuzzifizierung anhand von Zugehörigkeitsfunktionen, sowie die Verknüpfung verschiedener Datenarten in Plausibilitätsprüfungen durch Fuzzy-Inferenzen, ersetzt werden können.

Anhang 5: Ergebnisse des Glätte-Modells

Ergebnis Glätte-Modell	Beschreibung	Handlungsempfehlung SBA
Keine Glättegefahr	Die Fahrbahnoberflächentemperatur ist größer als 5 °C, weshalb für die nächsten 90 Minuten keine Glättegefahr besteht. Eine Abkühlung innerhalb von 90 Minuten bis nahe 0 °C ist unwahrscheinlich.	Eine gegebenenfalls anstehende Glätteanzeige kann zurückgenommen werden.
Glättegefahr bei Wetteränderung möglich	Die Fahrbahnoberflächentemperatur beträgt zwischen +2 °C und +5 °C. Aufgrund der linearen Trendextrapolation wird abgeschätzt, dass die Fahrbahnoberflächentemperatur bei der gegenwärtigen Wettersituation innerhalb der nächsten 90 Minuten nicht unter +2 °C sinkt. Eine Wetteränderung könnte kurzfristig eine Glättebildung hervorrufen.	Der Operator hat das Wettergeschehen in Form von Wetterberichten und den Werten benachbarter Messstellen zu beobachten. Eine Schaltung wird nicht empfohlen. Eine gegebenenfalls anstehende Schaltung kann zurückgenommen werden.
Eisglätte möglich	Die Fahrbahnoberflächentemperatur beträgt zwischen +2 °C und +5 °C bei feuchter oder nasser Fahrbahnoberfläche. Die lineare Trendextrapolation sagt aus, dass innerhalb der folgenden 90 Minuten bei der momentanen Wettersituation mit einer Fahrbahnoberflächentemperatur unter +2 °C zu rechnen ist. Es besteht die Gefahr des Überfrierens der Flüssigkeit auf der Fahrbahn.	Der Operator hat das Wettergeschehen in Form von Wetterberichten und den Werten benachbarter Messstellen zu beobachten. Eine Schaltung ist nur nach Überprüfung der Situation vor Ort zu aktivieren. Eine gegebenenfalls anstehende Schaltung kann aktiviert bleiben.
Tendenzberechnung nicht möglich	Die Fahrbahnoberflächentemperatur liegt zwischen +2 °C und +5 °C. Eine Trendberechnung kann nicht durchgeführt werden, da die erforderlichen historischen Daten nicht vorliegen. Es besteht die potentielle	Der Operator hat das Wettergeschehen in Form von Wetterberichten und den Werten benachbarter Messstellen zu beobachten. Eine Schaltung ist nur nach Überprüfung der Situation vor Ort zu aktivieren.

Ergebnis Glätte-Modell	Beschreibung	Handlungsempfehlung SBA
	Gefahr, dass innerhalb der nächsten 90 Minuten eine Fahrbahnglätte entsteht.	Eine gegebenenfalls anstehende Schaltung sollte nur dann weiterhin aktiviert bleiben, wenn eine Überprüfung der Situation vor Ort eine Glättesituation bestätigt.
Schneeglätte oder Glatteis bei Niederschlag möglich	Die Fahrbahnoberflächentemperatur beträgt +2 °C bis +5 °C bei trockener Fahrbahnoberfläche. Gemäß Trendberechnung kann die Fahrbahnoberflächentemperatur innerhalb der nächsten 90 Minuten auf unter +2 °C sinken. Bei beginnendem Niederschlag können Schneeglätte oder Glatteis entstehen.	Der Operator hat das Wettergeschehen in Form von Wetterberichten und den Werten benachbarter Messstellen nachzuvollziehen. Eine Schaltung ist sofort bei Niederschlag (NI>0 mm/h) oder basierend auf einer Überprüfung der Situation vor Ort zu aktivieren. Eine gegebenenfalls anstehende Schaltung kann bestehen bleiben.
Schneeglätte oder Glatteis bei Niederschlag sowie Reifglätte möglich	Die Fahrbahnoberflächentemperatur beträgt zwischen +2 °C und +5 °C bei trockener Fahrbahnoberfläche. Gemäß Trendberechnung kann die Fahrbahnoberflächentemperatur innerhalb der nächsten 90 Minuten unter +2 °C sinken. Bei beginnendem Niederschlag können Schneeglätte oder Glatteis entstehen.	Der Operator hat das Wettergeschehen in Form von Wetterberichten und den Werten benachbarter Messstellen zu verfolgen. Eine Schaltung ist sofort bei Niederschlag oder basierend auf einer Überprüfung der Situation vor Ort zu aktivieren. Eine gegebenenfalls anstehende Schaltung kann aktiviert bleiben.
Eisglätte sofort möglich	Die Fahrbahnoberflächentemperatur liegt unterhalb +2 °C bei feuchter oder nasser Fahrbahnoberfläche, es besteht die unmittelbare Gefahr des Überfrierens dieses Wasserfilms. Wenn weiterer Niederschlag fällt ist diese Gefahr besonders hoch. Mögliches Vorhandensein von Tausalz auf der Fahrbahnoberfläche wird nicht berücksichtigt.	Der Operator hat das Wettergeschehen in Form von Wetterberichten und den Werten benachbarter Messstellen zu beobachten. Eine Schaltung sollte sofort aktiviert werden, eine gegebenenfalls bereits aktivierte Schaltung kann bestehen bleiben.
Glätte vorhanden	Die Fahrbahnoberflächentemperatur beträgt weniger als	Eine Glätteschaltung sollte sofort aktiviert werden. Eine

Ergebnis Glätte-Modell	Beschreibung	Handlungsempfehlung SBA
	+2 °C und der Fahrbahnzustand wird als „glatt“ klassifiziert. Es besteht eine unmittelbare Glättegefahr.	gegebenenfalls bestehende Schaltung muss bestehen bleiben.
Eis oder Schnee auf der Fahrbahn	Die Fahrbahnoberflächentemperatur ist kleiner als +2 °C, als Fahrbahnzustand wird „Fahrbahn ist bedeckt mit Eis oder Schnee“ gemeldet. Es herrscht unmittelbare Glättegefahr.	Eine Glätteschaltung sollte sofort aktiviert werden, eine gegebenenfalls anstehende Schaltung muss bestehen bleiben. Wenn für eine Dauer von mindestens 10 Minuten keine neuen Daten gemeldet wurden, ist die Meldung „keine Daten vorhanden“ auszugeben.

Tab. A4.1 Ergebnisse Glätte-Modell: Beschreibung und Empfehlungen, nach BADELDT UND BREITENSTEIN [2005] und FGSV [2010a]