Grundlagen witterungsabhängiger Steuerungskonzepte für Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) auf Basis von fahrzeugbasierten Daten (FCD)

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Verkehrstechnik Heft V 441

bast
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Grundlagen witterungsabhängiger Steuerungskonzepte für Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) auf Basis von fahrzeugbasierten Daten (FCD)

von

Georg Mayer, Anna Diehl, Susanne Großmann

BUNG Ingenieure AG, Stuttgart

Christoph Schwietering, Christian Weinreis

SCHWIETERING-BUNG Ingenieure GmbH, Aachen

Axel Leonhardt, Simon Leu

ITIS GmbH der Universität der Bundeswehr München

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Verkehrstechnik Heft V 441

bast
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: https://bast.opus.hbz-nrw.de

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 03.0632
Grundlagen witterungsabhängiger Steuerungskonzepte für Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) auf Basis von fahrzeugbasierten Daten (FCD)

Fachbetreuung:
Jessica Hegewald

Referat:
Verkehrsbeeinflussung und Straßenbetrieb

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331 | ISBN 978-3-95606-963-5 | https://doi.org/10.60850/bericht-v441

Bergisch Gladbach, Oktober 2026

Kurzfassung

Grundlagen witterungsabhängiger Steuerungskonzepte für Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) auf Basis von fahrzeugbasierten Daten (FCD)

Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) dienen unter anderem der Warnung von Verkehrsteilnehmern vor kurzfristig auftretenden Gefahren wie schlechter Witterung, Unfällen, Stau und vergleichbaren Situationen. Für die Detektion von witterungsbedingten Gefahren wie Nebel, Regen oder Wind sind in bestimmten Abständen Messquerschnitte festgelegt. Aufgrund der großen Abstände zwischen den Umfeld-Messstationen, aber auch durch zeitliche Latenzen kann es innerhalb dieser Strecke zu Abweichungen zwischen den Bedingungen am Messquerschnitt und der Anzeige an der SBA kommen. In der Folge können erforderliche Warnungen räumlich zu spät angezeigt werden oder sie werden nicht rechtzeitig aufgehoben. In der Folge kommt es zu Inkonsistenzen zwischen den Schaltungen in den Anzeigequerschnitten (AQ) und der Wahrnehmung der Verkehrsteilnehmer. Die Akzeptanz von SBA und damit ihre Warnwirkung kann verringert werden.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist zu überprüfen, welche Potenziale durch das Einbeziehen von fahrzeugbasierten Umfelddaten (C2X bzw. xFCD) sowie detaillierten Wetterinformationen (RADOLAN) bei der Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) im Falle von witterungsabhängigen Schaltungen bestehen. Aufgrund der Datenverfügbarkeit liegt der Fokus auf der Ermittlung von Schaltungen in Folge von Nässe.

Als Datengrundlagen stehen FG3-Daten, wie sie standardmäßig für SBA verwendet werden, aus lokaler Umfelddatenerfassung sowie RADOLAN-Daten des DWD und fahrzeuggenerierte Daten von zwei verschiedenen Fahrzeugherstellern zur Verfügung. Die fahrzeuggenerierten Daten stehen nur als zeitlich und räumlich aggregierte, weiterverarbeitete Daten bereit. Die Daten aller Datenquellen wurden zeitlich und räumlich synchronisiert und anhand von 14 unterschiedlichen Ansätzen eine Nässestufe abgeleitet. Auf Basis der analysierten Ganglinien und berechneten Nässestufen wurde untersucht, welche hypothetischen Schaltungen sich im Fall einer Echtzeitverarbeitung durch eine SBA ergeben würden.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass FG3-Daten derzeit die zuverlässigste und operationell belastbarste Grundlage für eine zeitnahe Steuerung von SBA darstellen. Die untersuchten neuartigen Datenquellen eröffnen zwar vielversprechende Perspektiven für eine zukünftige Erweiterung der Datengrundlage, erreichen jedoch aktuell weder die erforderliche zeitliche Verfügbarkeit noch die operative Robustheit, um FG3 vollständig zu ersetzen. Ihr Nutzen liegt derzeit primär in einer unterstützenden Funktion, wobei die Daten des DWD für diesen Anwendungszweck schon kurzfristig einsetzbar sind. Mit steigender Anzahl an Fahrzeugen mit C-ITS Funktionalitäten ist ein zunehmender Nutzen zu erwarten. Insbesondere im Straßennetz außerhalb von Strecken mit SBA bleiben Verbesserungen in der Warnung vor Gefahren absehbar.

Abstract

Principles of weather-responsive control concepts for traffic management systems based on floating car data

Variable message sign (VMS) systems serve, among other things, to warn road users of sudden hazards such as bad weather, accidents, traffic jams, and similar situations. To detect weather-related hazards such as fog, rain, or wind measurement locations are established at specific spacings. Due to the large distances between the measurement locations, deviations between the conditions at the measuring locations and the VMS system may occur. This results in inconsistencies between the switched signals at the display points and the road users' perception, which can reduce the acceptance of the section control system and thus their warning effect.

The aim of this research project is to examine the potential of incorporating vehicle-based environmental data (C2X or xFCD) and detailed weather information (RADOLAN) into the control of VMS systems for weather-dependent switching, focusing on wet conditions. The data sources are FG3 data from local environmental data acquisition, as standard for section control systems, as well as RADOLAN data from the German Weather Service (DWD) and vehicle-generated data from two different vehicle manufacturers. The vehicle-generated data were provided only as aggregated, further processed data. The data are synchronized temporally and spatially; a wetness level was derived using 14 different approaches. Based on the analyzed time series and calculated wetness levels, the hypothetical switching options that would result from real-time processing by a VMS system have been investigated. Overall, the results demonstrate that FG3 data are currently representing the most reliable and operationally robust basis for prompt management of VMS systems. While the novel data sources examined offer promising prospects for future expansion of the database, they currently neither achieve the necessary timely availability nor the operational robustness to fully replace FG3. Their current utility lies primarily in a supporting function. As the number of vehicles with C-ITS functionalities will rise, increasing benefits are expected. Improvements in hazard warning remain foreseeable, particularly on the road network beyond VMS system controlled sections.

Summary

Principles of weather-responsive control concepts for traffic management systems based on floating car data

Initial Situation

Variable message sign systems (VMS) serve, among other things, to warn road users of short-term hazards such as bad weather, accidents, traffic jams, and similar situations. To detect weather-related hazards such as fog, rain, or wind measuring locations are established at specific spacing. Due to the large distances between them deviations between the conditions at the measuring locations and VMS may occur. This results in inconsistencies between the signals switched at the display points and the road users' perception, which can reduce the acceptance of systems and their warning effect.

Objective

The objective of this research project is to examine the potential of incorporating vehicle-based environmental data (C2X or xFCD) and detailed weather information (RADOLAN) into the control of VMS for weather-dependent switching. Due to data availability, the focus is on detecting switching signals due to wet conditions.

Approach

The focus of the research project is to identify potential improvements in the control of VMS due to weather-related influences using vehicle-generated environmental data and precipitation radar data. For this purpose, stationary data, vehicle-generated environmental data, and precipitation radar data were collected on two selected test routes equipped with VMS systems and analyzed with regard to successful switching operations. Wetness levels are usually clearly linked to switching suggestions in sub-control centers (e.g., "80 + wet"), so that a comparison of wetness levels corresponds to a comparison of switching suggestions. The first step will be to compile the fundamentals for collecting stationary and vehicle-based environmental data and for controlling VMS systems. Furthermore, data protection issues will be addressed as part of the basic analysis.

Based on this, a study concept will be developed to integrate the various data sources and the parameters to be investigated as well as their evaluation. The study concept also includes a description of the selected test routes.

In parallel, an analysis environment was set up for integration of stationary data (hereinafter "FG3"), vehicle-based data from two independent data sources (hereinafter "FGD_01" and "FGD_02"), and precipitation radar data (hereinafter "DWD"). The first step involved data preparation, in which all data were synchronized spatially and temporally. Based on this, the data were comparatively evaluated to determine correlations (qualitatively using graphical representations and quantitatively). Second, wetness levels were determined and subsequently analyzed using various logic/fusion approaches based on different combinations of stationary data, vehicle-generated data, and precipitation data. Bild 3 shows the data processing procedure.

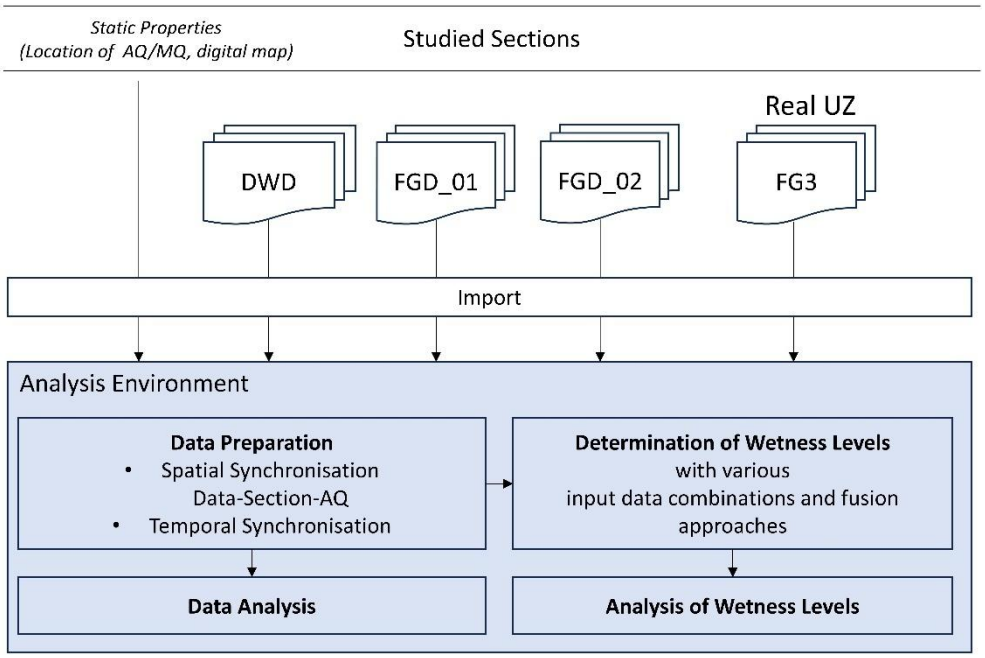

Bild 3: Procedure and data flow

Particular attention was paid to the investigation of the latencies of the various data sources, as these are crucial for their suitability in time-critical control processes of the SBA. Latency significantly influences whether and how quickly information from the data sources can be used for operational control decisions. Due to their high practical relevance, latency was analyzed particularly intensively throughout the project.

Studied sections

The studied sections are the fog warning system (FWS) on the motorway BAB 8 between Hohenstadt and Riedheim and the VMS system on the motorway BAB 8 between Leonberg and Wendlingen (VMS). The fog warning system extends over a length of 42.8 km in the direction of Stuttgart and 42 km in the direction of Munich. A total of 43 display points in both directions and 11 weather stations collecting environmental data are located along the route. The VMS system stretches 32 km in the direction of Karlsruhe and 31 km in the direction of Munich. The section features 45 AQs and 11 measuring devices recording environmental data.

The data sources include FG3 data from local environmental data acquisition, as standard for VMS system, as well as RADOLAN data from the German Weather Service (DWD), and vehicle-generated data from two different vehicle manufacturers. The RADOLAN data are provided with a resolution of 1 km x 1 km every 5 minutes. The vehicle-generated data are referred to below as FGD_01 and FGD_02. The vehicle-generated data sets FGD_01 include the friction coefficient µ between tire and road surface (mean, minimum, maximum), the air temperature and the wiper frequency. The vehicle-generated data sets for FGD_02 are only available for the VMS study section and include the precipitation intensity level ("RainIntensity"), the air temperature ("Temperature"), and the road condition ("RoadCondition") as parameters. The data is not provided directly by the vehicle manufacturer/supplier, but is pre-processed and then made available by Autobahn GmbH. In both cases, the data is aggregated, averaged from data sets for multiple vehicles over a longer period of time.

Evaluation

Since the data types used have different temporal resolutions and different spatial allocations, temporal synchronization and spatial allocation are performed. The vehicle-generated data are assigned to the display cross-section on the studied highway sections based on their geocoordinates. The allocation is always made to the upstream display cross-section. For temporal synchronization, all time stamps were converted to a uniform time zone (Coordinated Universal Time, UTC). In the next step, the new data sources (FGD, RADOLAN) were assigned to the actual measurement period and stored in an "annual table" for each display point with a resolution of one minute.

The next step was to determine a wetness level. For this purpose, the local environmental data (FG3) were first smoothed. Smoothing, however, is not performed for the new data types, since all data sets are aggregated data. The data were then merged using 14 different approaches. Tab. 2 shows the approaches examined for determining wetness levels based on the available data sources.

Ansatz	ID	DWD precipitation intensity levels	FGD_01 wiper frequency	FGD_02 precipitation intensity level	FG3 precipitation intensity level	FG3 water film thickness level	Output	Method
FG3 wetness level	0				x	x	Reference from TCC	
MARZ DWD	1	x					Wetness level	MARZ
MARZ DWD FG3 WFD	2	x				x	Wetness level	MARZ
Fuzzy DWD	3	x					Wetness level	Fuzzy logic
Fuzzy DWD FG3 NI	4	x			x		Wetness level	Fuzzy logic
Fuzzy DWD FG3 WFD	5	x				x	Wetness level	Fuzzy logic
Fuzzy FGD_01 wiper frequency	6		x				Wetness level	Fuzzy logic
Fuzzy FGD_01 wiper frequency FG3 NI	7		x		x		Wetness level	Fuzzy logic
Fuzzy FGD_01 wiper frequency FG3 WFD	8		x			x	Wetness level	Fuzzy logic
Fuzzy DWD FGD_01 wiper frequency	9	x	x				Wetness level	Fuzzy logic
Fuzzy DWD FGD_01 wiper frequency FG3 NI	10	x	x		x		Wetness level	Fuzzy logic
Fuzzy DWD FGD_01 wiper frequency FG3 WFD	11	x	x			x	Wetness level	Fuzzy logic
Fuzzy FGD_02 Precipitation intensity level	12			x			Wetness level	Fuzzy logic
Fuzzy FGD_02 Precipitation intensity level FG3 NI	13			x	x		Wetness level	Fuzzy logic
Fuzzy FGD_02 Precipitation intensity level FG3 WFD	14			x		x	Wetness level	Fuzzy logic

Tab. 2: Approaches to determining wetness levels based on available data sources

An absolute reference is missing for the assessment of the determined wetness levels, as the actual wetness level on the road surface is unknown. For this reason, the quality of the selected approaches was evaluated using a relative comparison. For this purpose, the mean, median, and frequency distribution of the wetness levels across all approaches were determined for each event day at each AQ, and the deviation of the approach from the mean was calculated. A second difficulty lies in the latencies with which the data considered in the project were provided.

The latency for the FG3 data is typically around 60 seconds. The DWD's RADOLAN data is provided in 5-minute intervals. The vehicle-generated data FGD_01 is collected over a sliding 60-minute window and the aggregation is updated every 10 minutes. The data is typically provided between 30 seconds and 3 minutes after the last vehicle value is collected. The aggregation of vehicle data FGD_02 occurs every 15 minutes, provided that data from at least three vehicles is collected. If this is not the case, the time window is adaptively extended. The data is provided with a fixed time offset of 8 minutes after the completion of the aggregation.

In principle, vehicle data can be collected in real time via so-called Roadside Units (RSUs). This data was not available during the project, making an in-depth analysis impossible. To investigate the potential of using extended data sources, an evaluation was conducted in addition to the real-world evaluation (real-world scenario) assuming that all data is provided without latency (ideal scenario).

Results

Bild 4 shows an example of the aggregate deviation from the mean for each approach in the real-world scenario. The red line represents the approach with the lowest mean deviation.

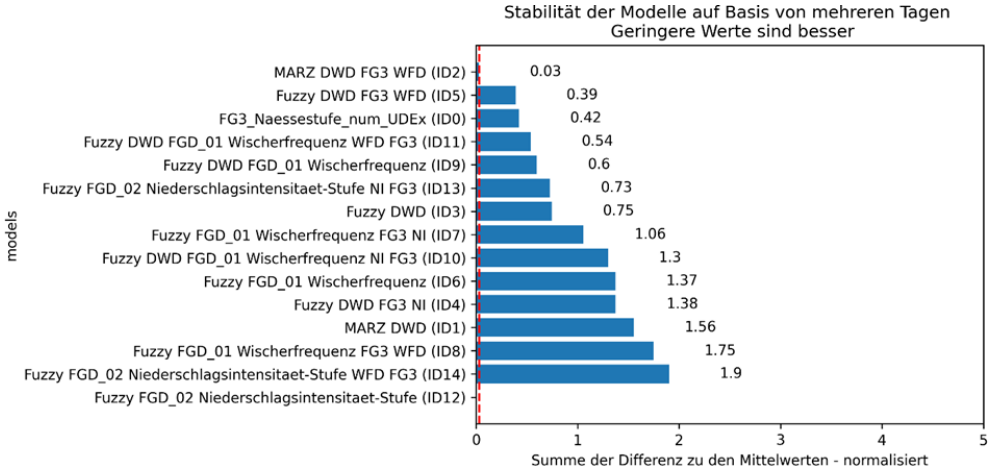

Bild 4: Mean calculation for all approaches for the real scenario

It is evident that some models stand out due to their comparatively small average deviations from the mean and thus demonstrate a high degree of internal consistency. The fusion approaches are particularly noteworthy here:

1. MARZ DWD FG3 WFD (ID2)
2. Fuzzy DWD FG3 WFD (ID5)
3. FG3_Naessestufe_num_UDEx (ID0)

These show a strikingly low dispersion compared to the consensus mean across all considered periods and indicate a robust and consistent processing of the input data under realistic conditions (SBA).

Conclusion

The research project investigated the extent to which vehicle-generated data (xFCD/C2X) and external weather information (RADOLAN) can be used for weather-adaptive control of route control systems (SBA). The analyses demonstrate that vehicle-generated data in its

current form is not yet suitable for real-time SBA control. The main reasons for this are the high latency resulting from aggregated data provision by fleet operators and insufficient fleet penetration. Significant future added value is seen in the direct processing of individual vehicle data, which could enable low latency, high transparency, and flexible plausibility checks at the sub-control center level. However, this requires sufficient equipment rates, which cannot currently be determined empirically and theoretically only appear feasible with large fleet shares.

At the same time, it became clear that RADOLAN data from the German Weather Service (DWD) has great potential due to its availability and spatial resolution, but is primarily suitable as a backup or validation source, as its time delay limits immediate control. The stationary FG3 sensors remain indispensable; they form the backbone of the control logic and remain central for reasons of quality assurance and redundancy. Complete replacement with new data sources is not expedient; rather, the added value lies in targeted data fusion, which contributes to increasing robustness and resilience.

Overall, the results show that improvements in reliability and quality assurance can be achieved in the short term, especially through the integration of RADO-LAN data. In the medium to long term, vehicle-based data offers great potential, but requires in-depth analyses of availability, validation, and suitable fusion strategies before they can be used as a reliable basis for SBA control.

Inhalt

Abkürzungen 13

1 Einleitung 16

1.1 Ausgangslage 16

1.2 Ziele des Forschungsprojektes 16

1.3 Vorgehensweise 16

2 Grundlagen 19

2.1 Stationäre Erfassung von Umfelddaten 19

2.2 Fahrzeugbasierte Erfassung (FCD und C2X) 20

2.2.1 Beispiel für Auslösebedingungen zur Meldung von Nebel 28

2.2.2 Beispiel für Auslösebedingungen zur Meldung von Niederschlag 28

2.2.3 Beispiel für Auslösebedingungen zur Meldung von Traktionsverlust 29

2.2.4 Fazit Fahrzeugbasierte Erfassung 30

2.3 Niederschlagsradar 31

2.4 Grundlagen der Steuerungsverfahren nach dem MARZ 32

2.5 Gefahrenwarnungen und Auslösebedingungen 36

2.6 Datenschutz bei der Verarbeitung von fahrzeuggenerierten Daten 41

2.6.1 Richtlinie 10/40/EU (IVS-RL) 42

2.6.2 Delegierte Verordnungen zur Ergänzung der Richtlinie 10/40/EU 44

2.6.3 Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) 46

2.6.4 Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) 48

2.6.5 Richtlinien zur Netzwerk- und Informationssicherheit (NIS) 48

2.6.6 IT-Sicherheitsgesetz und IT-Sicherheitsgesetz 2.0 50

2.6.7 Gesetz des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI-Gesetz) 50

2.6.8 Zusammenfassung der rechtlichen Rahmenbestimmungen zum Datenschutz 50

2.6.9 Konsequenzen für Datenerfassung und Datenübertragung mittels C2X 51

3 Untersuchungskonzept 52

3.1 Kriterien für den Einsatz wetterbezogener Datenquellen in der SBA-Steuerung 52

3.2 Einzubindende Datenquellen und Datenbeschaffungskonzept 53

3.3 Untersuchungsstrecken 53

3.3.1 Nebelwarnanlage BAB A8 Hohenstadt – Riedheim (Untersuchungsstrecke NWA) 54

3.3.2 Streckenbeeinflussungsanlage BAB A8 Leonberg – Wendlingen (Untersuchungsstrecke SBA) 55

3.4 Datenfluss 56

4 Datenaufbereitung 57

4.1 Überblick 57

4.2 Räumliche Synchronisierung der Daten 59

4.2.1 Fahrzeuggenerierte Daten (FGD_01) 59

4.2.2 Fahrzeuggenerierte Daten (FGD_02) 60

4.2.3 RADOLAN-Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) 62

4.2.4 Lokale Umfelddatenerfassung (FG3) 63

4.3 Zeitliche Synchronisierung der Daten 64

4.4 Datenverfügbarkeit von FGD_01, FGD_02 und DWD 66

5 Datenauswertung 68

5.1 Lufttemperatur 69

5.2 Niederschlagsintensität des Deutschen Wetterdienstes 71

5.3 Fahrzeugseitig erfasste Wischerfrequenz 76

5.4 Fahrzeugseitig erfasster Reibbeiwert 83

5.5 Fahrzeugseitig erfasster Fahrbahnzustand 84

5.6 Fahrzeugseitig erfasste Niederschlagsintensitäts-Stufe 85

5.7 Fazit 86

6 Ermittlung und Analyse von Nässestufen 88

6.1 Ermittlung der Nässestufe 88

6.1.1 Datenvorverarbeitung (Glättung) 88

6.1.2 Grundsätzliche Überlegungen und Anforderungen zur Zusammenführung unterschiedlicher Daten (Datenfusion) 88

6.1.3 Regelbasierte Ansätze zur Ermittlung der Nässestufe 89

6.2 Latenzen 95
6.2.1 RADOLAN-Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) 96
6.2.2 Fahrzeuggenerierte Datenquelle FGD_01 96
6.2.3 Fahrzeuggenerierte Datenquelle FGD_02 97
6.2.4 Schlussfolgerung Latenzen 97
6.3 Ermittelte Nässestufen und potenzielle Schaltungen im Vergleich realer und idealisierter Szenarien 98
6.3.1 Szenarien und methodisches Vorgehen 98
6.3.2 Statistische Auswertung und Modellvergleich (Konsistenzanalyse) 99
6.3.3 Ableitung hypothetischer Schaltungen und Fazit 106

7 Ausblick und Schlussfolgerungen aus dem Projekt 108
7.1 Schlussfolgerungen 108
7.2 Vorschlag zur Erweiterung des Regelwerks (MARZ 18 / FGSV 6) 114
7.3 Weiterer Forschungsbedarf 115
7.4 Ausblick 117

Literatur 118

Bilder 124

Tabellen 128

Anhang 130

Abkürzungen

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control (Automatische Distanzregelung)
ASC	Automatic Stability Control
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
ASR	Antriebsschlupfregelung
AQ	Anzeigequerschnitt
BAB	Bundesautobahn
BDSG	Bundesdatenschutzgesetz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVBS	Bundesministerium für sowie Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMVIT	Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (A)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BSI	Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik
C2C	Car to Car
C2I	Car to Infrastructure
C2X	Car to X
CAN	Controller Area Network
CAM	Cooperative Awareness Message
CCU	Communication Control Unit
C-ITS	Cooperative ITS Corridor
CSIRTs	Computer Security Incident Response Teams (CSIRTs)
CSV	Comma-Separated Values

Del. VO	Delegierte Verordnung
DENM	De-centralized Environmental Notification Messages
DSRC	Dedicated Short-Range Communication
DSGVO	Datenschutzgrundverordnung
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FBT	Fahrbahnoberflächentemperatur
FBZ	Fahrbahnzustand
FCD	Floating Car Data
FG	Funktionsgruppe (nach TLS)
FG3	Umfelddaten der Funktionsgruppe 3 (nach TLS: Witterungs- und Umweltinformationen)
FGD	Fahrzeug-Generierte Daten
FGSV	Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen
FINNRA	Finnish Road Administration
FR	Fahrtrichtung
GSM	Global System for Mobile Communications
I2C	Infrastructure to Car
IRC	Internet Relay Chat
ITS	Intelligent Transport Systems
IVS	Intelligente Verkehrssysteme
KFZ	Kraftfahrzeug
KITT	Künstliche Intelligenz zur Verbesserung der Sicherheit in Tunneln und Tunnelleitzentralen
LT	Lufttemperatur
LTE	Long Term Evolution
MARZ	Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen

MQ	Messquerschnitt
NIS	Richtlinien zur Netzwerk- und Informationssicherheit
NWA	Nebelwarnanlage
OBU	On-Board Unit
OSI	Open Systems Interconnection
RADOLAN	Radar-Online-Aneichung
RL	Richtlinie
RSU	Roadside Units
RWVA	Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen
RWVZ	Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen
SBA	Streckenbeeinflussungsanlage
SPoC	Single Point of Contact
SWIS	Straßenwetter-Informationssystem
TCC	Traffic Control Center
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TOM	Technische und Organisatorische Maßnahmen
TU	Technische Universität
TLS	Transport Layer Security
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen
UDE	Umweltdatenerfassung
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VBA	Verkehrsbeeinflussungsanlage
VRZ	Verkehrsrechnerzentrale
VZ	Verkehrszeichen
WFD	Wasserfilmdicke
WLAN	Wireless Local Area Network

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) dienen unter anderem der Warnung von Verkehrsteilnehmern vor kurzfristig auftretenden Gefahren wie schlechter Witterung, Unfällen, Stau und vergleichbaren Situationen. Für die Detektion von witterungsbedingten Gefahren wie Nebel, Regen oder Wind sind in bestimmten Abständen Messquerschnitte festgelegt. Aufgrund der großen Abstände zwischen den Messstationen kann es lokal zu Abweichungen zwischen den Bedingungen am Messquerschnitt und der SBA kommen. In der Folge kommt es zu Inkonsistenzen zwischen den Schaltungen in den AQ (Anzeigequerschnitten) und der Wahrnehmung der Verkehrsteilnehmer. Die Akzeptanz von SBA und damit ihre Warnwirkung wird verringert.

In Fahrzeugen werden heute durch fahrzeugeigene Sensoren bereits Informationen über den Fahrzeugzustand, aber auch die Umgebungsbedingungen erfasst. Diese Daten werden kontinuierlich durch die Fahrzeuge übertragen und stehen als xFCD oder C2X-Daten örtlich lückenlos zur Verfügung. Schätzungsweise sind aktuell ca. 1% der deutschen Fahrzeuge mit dieser Technologie ausgestattet. In diesem Forschungsprojekt soll untersucht werden, ob mit Hilfe von fahrzeuggenerierten Daten die Schaltung von VBA verbessert werden kann.

1.2 Ziele des Forschungsprojektes

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es zu überprüfen, welche Potenziale durch das Einbeziehen von fahrzeugbasierten Umfelddaten sowie detaillierten Wetterinformationen bei der Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) im Falle von witterungsabhängigen Schaltungen bestehen. Erwartet werden auch Aussagen dazu, welcher Datenumfang bzw. welche Durchdringung der Fahrzeugflotte in der Ausstattung mit xFCD/C2X-Technologien erforderlich ist, damit eine verlässliche Ergänzung der lokalen Datenerfassung möglich ist. Darüber hinaus ist aufzuzeigen, welche Synergien durch die Verwendung der neuen Datenquellen in Bezug auf die Ausstattung mit lokalen Datenerfassungssystemen erreicht werden können. Auf Basis der im Rahmen des Forschungsvorhabens erlangten Erkenntnisse sollen Empfehlungen zum normativen Regelwerk gegeben werden, um diese bei dem Entwurf, der Planung und dem Bau von neuen Streckenbeeinflussungsanlagen berücksichtigen zu können.

1.3 Vorgehensweise

Schwerpunkt des Forschungsvorhabens bildet das Aufzeigen von Verbesserungsmöglichkeiten hinsichtlich der Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) infolge von witterungsbedingten Einflüssen durch die Verwendung von fahrzeugbasierten Umfelddaten. Hierfür wurden an zwei ausgewählten Untersuchungsstrecken, die mit SBA ausgestattet sind, stationäre und fahrzeuggenerierte Umfelddaten erfasst und im Hinblick auf erfolgte Schaltungen analysiert. In einem ersten Schritt erfolgt die Zusammenstellung von Grundlagen zur Erfassung stationärer und fahrzeugbasierter Umfelddaten sowie zur Steu-

erung von Streckenbeeinflussungsanlagen. Des Weiteren werden im Rahmen der Grundlagenanalyse Fragen des Datenschutzes behandelt. Darauf aufbauend wird ein Untersuchungskonzept zur Einbindung der verschiedenen Datenquellen und der zu untersuchenden Kenngrößen sowie deren Bewertung erarbeitet. Außerdem beinhaltet das Untersuchungskonzept die Beschreibung der ausgewählten Untersuchungsstrecken. Parallel dazu erfolgt der Aufbau einer Analyseumgebung zur Integration von stationären, fahrzeugbasierten und Niederschlagsradardaten. Aus den erfassten Daten wurden anhand von entwickelten Logiken Nässestufen ermittelt. Basierend auf dem Untersuchungskonzept und der Analyseumgebung erfolgt deren Übertragung bzw. Anwendung auf die ausgewählten Untersuchungsstrecken zur Ermittlung von Nässestufen. Die Ergebnisse wurden schließlich in einem darauffolgenden Bearbeitungsschritt in einer vergleichenden Auswertung der Umfelddaten und der hypothetischen Schaltungen analysiert und bewertet. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Untersuchung der Latenzen der verschiedenen Datenquellen, da diese entscheidend für die Eignung in zeitkritischen Steuerungsprozessen der SBA sind. Die Latenzzeiten beeinflussen maßgeblich, ob und wie zeitnah Informationen aus den Datenquellen für operative Steuerungsentscheidungen nutzbar gemacht werden können. Aufgrund ihrer hohen praktischen Relevanz wurden die Latenzen daher im Projektverlauf besonders intensiv analysiert.

Um die Auswirkungen dieser Latenzen systematisch zu bewerten, wurde ein zweistufiges Analysekonzept entwickelt: In einem ersten Schritt wurden Nässestufen unter realitätsnahen Bedingungen ermittelt, bei denen die tatsächliche Datenverfügbarkeit (5 bzw. 10 Min.) sowie bekannte Aggregations- und Übertragungsverzögerungen berücksichtigt wurden. Ergänzend wurde ein idealisiertes Szenario betrachtet, das von einer minütlichen Verfügbarkeit aller relevanten Datenquellen ausgeht. Dieser methodische Vergleich ermöglicht eine fundierte Abschätzung der potenziellen Auswirkungen von Latenzen auf die Steuerbarkeit und Verwertbarkeit der betrachteten Datenquellen. Abschließend wurden auf Basis der erzielten Ergebnisse Empfehlungen für die Weiterentwicklung bestehender Regelwerke gegeben.

Das Gesamtprojekt gliedert sich somit in sechs Arbeitsschritte. Einen Überblick über die methodische Vorgehensweise gibt nachfolgendes Bild 1.

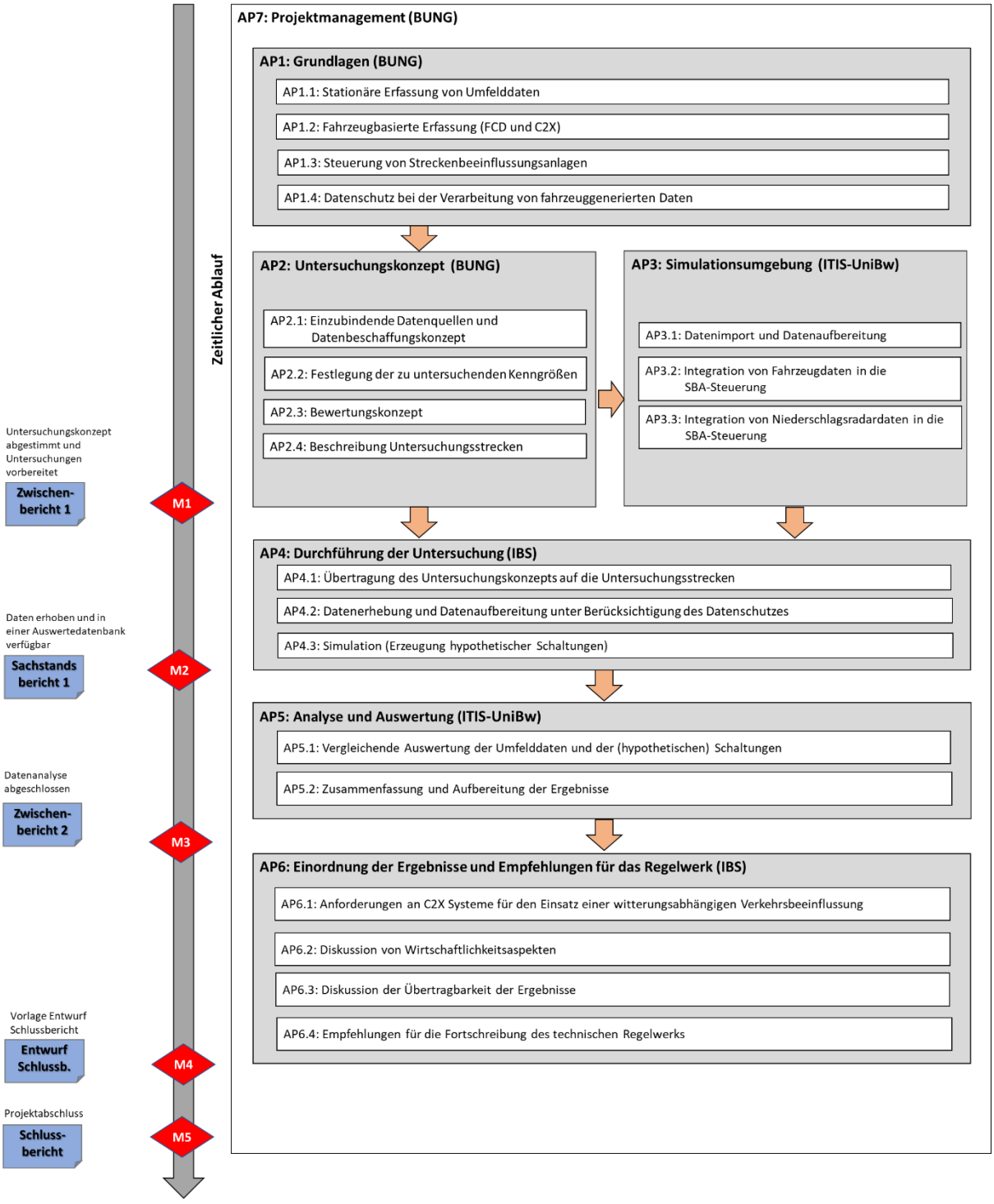

Bild 1: Methodische Vorgehensweise – Arbeitsprogramm

2 Grundlagen

2.1 Stationäre Erfassung von Umfelddaten

Die Umfelddatenerfassung im Rahmen der Nutzung für Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) erfolgt in Deutschland aufgrund des sukzessiven Ausbaus telematischer Infrastruktur durch Erfassungseinrichtungen, die entlang von ausgewählten Straßenabschnitten angeordnet sind. Die Datenerfassung erfolgt punktuell und kann spezifischen Anzeigequerschnitten (AQ) auf der Strecke räumlich zugeordnet werden. Befindet sich ein Messquerschnitt (MQ), an welchem Daten der Funktionsgruppe 3 nach TLS (FG3) stationär erfasst werden, am gleichen Standort wie ein AQ, so wird er diesem zugeordnet. Ist ein AQ jedoch räumlich zwischen zwei MQ stationiert, werden diesem je nach Lagekriterien ein oder auch beide MQ zugeordnet. Die Dateninhalte stationärer Umfelddaten erstrecken sich über Fahrbahntemperatur, Fahrbahnzustand, Lufttemperatur, Niederschlagsintensität, Sichtweite- und Wasserfilmdicke. Die zeitliche Auflösung entspricht hier dem Aggregationsintervall von einer Minute (zzgl. ggf. sensorinterner Glättungen). Die erfassten Umfelddaten werden gemäß dem Hinweispapier Umfelddaten (FGSV 2017) sowie dem MARZ 2018 (BASt 2018) zunächst plausibilisiert, aufbereitet und Stufen für die Niederschlagsintensität, die Sichtweite und die Wasserfilmdicke ermittelt. Diese Stufen dienen wiederum als Auslösebedingung für die Schaltung der SBA.

Die TU München (TUM 2016) baute im Auftrag des BMVI ein Testfeld auf, um die Qualität von Systemen zur Erfassung von Umfelddaten zu untersuchen (Projektzeitraum: 2003 bis 2015). Dem zugehörigen Abschlussbericht der 9. Testphase (BUSCH et al. 2014) ist zu entnehmen, dass nicht alle überprüften Sensoren die geforderten Qualitätsanforderungen erfüllen. Die Ergebnisse des Testfeldes können Betreibern bei der Auswahl und dem Betrieb von Sensoren zur Umfelddatenerfassung dienen. Grosanic und Piszczek (GROSANIC/ PISZCZEK 2011) beschreiben die Motivation zur Erstellung dieses Testfelds und fassen erste Schlüsse aus den Testergebnissen zusammen. Demnach müssen stationär erfasste Umfelddaten eine gute Qualität aufweisen und zeitnah abgebildet werden, um die Akzeptanz und somit die Befolgung der Verkehrsteilnehmer zu bewirken. Mit Verweis auf das Hinweispapier (FGSV 2010) nennen sie die Plausibilitätsprüfung der Umfelddaten in der Unterzentrale als einen wichtigen Punkt, um eine gute Qualität zu erhalten. Zu den Plausibilitätsprüfungen gehören Ausfall- und Grenzwertüberwachung, Differenzialkontrolle (Einhaltung bedingt kontinuierlicher Schwankungen) und Anstiegs-Abstiegs-Kontrolle (Differenzen zwischen Messwerten halten einen parametrierbaren Bereich ein). Anschließend erfolgt eine logisch-physikalische Überprüfung, z.B. durch meteorologische Abhängigkeiten der Messgrößen. Weitergehende Ansatzpunkte für eine erweiterte Potenzialausnutzung in der Verkehrssteuerung sind nach (GROSANIC/PISZCZEK 2011) die Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen Umfeldsituationen und dem Verkehrsablauf sowie die Ermittlung von Witterungszuständen über längere Streckenabschnitte.

Ein umfassender Überblick über den Stand der Technik der Umfelddatenerfassung in SBA ist im Schlussbericht des FE 03.0567/2018/IRB “Optimierte Nutzung von Umfelddaten in der Verkehrsbeeinflussung” (SCHWIETERING et al. 2022) dargestellt.

2.2 Fahrzeugbasierte Erfassung (FCD und C2X)

In modernen Fahrzeugen werden eine Reihe an Daten zum Fahrzeugzustand, Fahrverhalten und zum Fahrzeugumfeld über fahrzeugeigene Sensoren kontinuierlich erfasst und über die bordeigenen Systeme ausgewertet. So werden beispielsweise Informationen über die momentane Fahrzeugposition, die Geschwindigkeit, die Fahrtrichtung, Spurwechselvorgänge, Abstände zum vorausfahrenden Fahrzeug, die Längs- und Querbeschleunigung, den Fahrbahnzustand (trocken, nass, glatt), die Außentemperatur, die Beleuchtungsverhältnisse, den Zustand des Airbags, die Position der Scheibenwischer etc. gesammelt und verarbeitet. Die Bewegung der Scheibenwischer kann auf das Vorhandensein von Niederschlag hinweisen, stellt jedoch keinen eindeutigen Nachweis dar, da es auch durch Verschmutzung oder zur Reinigung zu Scheibenwischeraktivität kommen kann. Bei Auslösen eines Airbags kann direkt und ohne Zeitverzug auf einen Unfall geschlossen werden. Ein Liegenbleiber lässt sich über die Fahrgeschwindigkeit und das Aktivieren der Warnblinkanlage identifizieren. Mit Hilfe dieser neuen Kommunikationstechnologien ist es möglich, Daten und Meldungen zwischen einzelnen Fahrzeugen (Car to Car bzw. C2C) sowie zwischen Fahrzeugen und Infrastrukturen (Car to Infrastructure bzw. C2I oder xFCD) direkt auszutauschen. Die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und den ortsgebundenen Teilnehmern (wie z.B. Betriebszentralen, Tunnelleitzentralen, Verkehrsrechnerzentralen) erfolgt je nach Verfügbarkeit per Mobilfunk über Basisstationen der jeweiligen Mobilfunkbetreiber oder per WLAN über sogenannte Road Side Units (RSU). Diese bilden die Schnittstelle zwischen der luft- und der kabelgebundenen Übertragung. Nachfolgendes Bild 2 zeigt die grundsätzlichen Möglichkeiten der Datenübertragung. Je nach Fahrzeughersteller werden heute unterschiedliche Technologien eingesetzt. Mit C2X ausgestattete Fahrzeuge senden ihre Nachrichten über WLAN und können damit mit Infrastruktur und anderen Fahrzeugen kommunizieren. Alternativ werden bei Fahrzeugen die Daten zusätzlich über Mobilfunk an den Hersteller gesendet und dort ausgewertet.

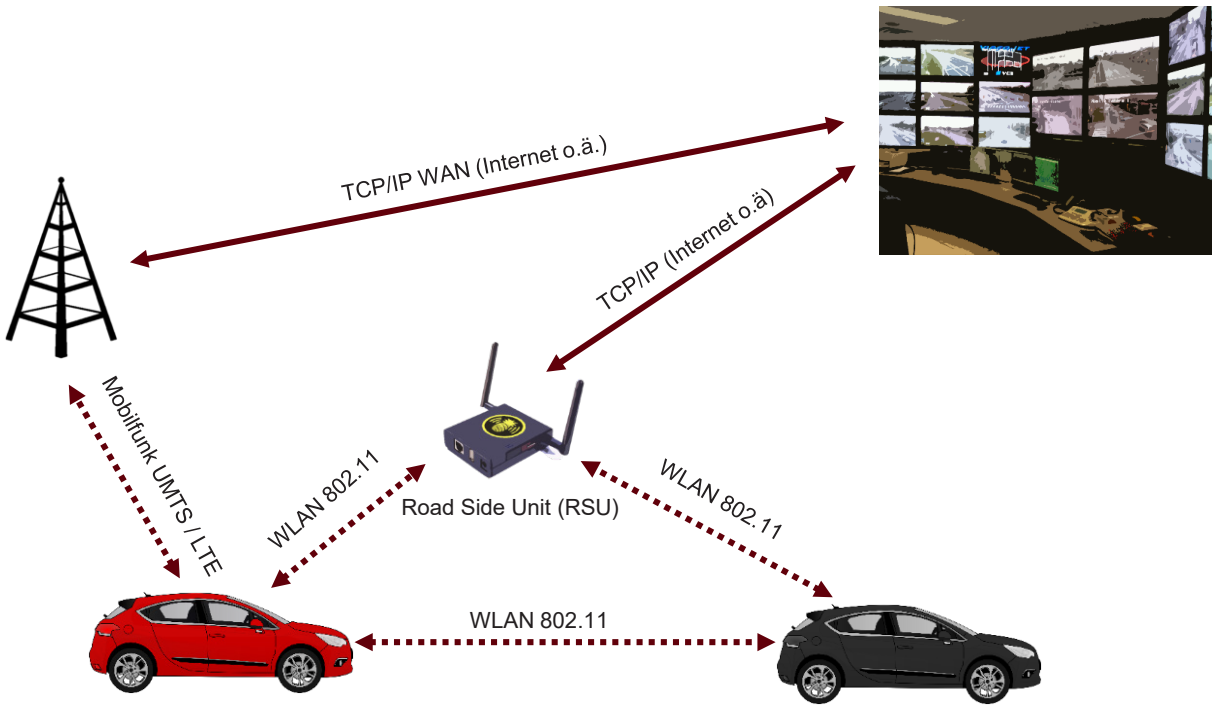

Bild 2: Grundsätzliche Technologien zur Datenübertragung per Funk (MAYER, LEHAN 2021)

Die Nutzung von fahrzeuggenerierten Daten zur Ermittlung von Straßenwetter-/Umfeldzuständen ist seit etwa 20 Jahren Gegenstand von Forschungsprojekten sowie auch praktischen Anwendungen.

Huber (HUBER 2001) untersuchte das Potenzial zur Erkennung von niederschlagsbedingten Sichtbehinderungen und glatter Fahrbahn auf Basis von xFCD. Eingangswerte für die Erkennung niederschlagsbedingter Sichtbehinderungen waren die Scheibenwischerfrequenz, Daten des Regensensors (wenn vorhanden), Scheinwerferzustände (in Kombination mit der Tageszeit) sowie die Fahrzeuggeschwindigkeit. Es wird (augenscheinlich) ein gut nutzbarer Zusammenhang zwischen diesen Größen und der durch einen Menschen auf Basis von Videoaufzeichnungen eingeschätzten Sichteinschränkung durch Niederschlag festgestellt. Ein Modell wird nicht formuliert. Für die Erkennung von glatter Fahrbahn werden Daten der Regelsysteme ABS und ASC betrachtet. Auf Basis der Daten von Testfahrten auf trockener und vereister Fahrbahn wird festgestellt, dass diese Stabilisierungssysteme nur bei Bedarf und in der freien Fahrt eher selten eingreifen. Zudem sind die Ergebnisse stark von der Fahrweise abhängig, was eine allgemeingültige Modellformulierung schwierig macht. Eine Betrachtung für die Nutzung in SBA erfolgte nicht.

Myllyllä (MYLLYLLÄ 2003) beschreibt die Nutzung von Fernbussen zur Umfelddatenerfassung in Finnland. Die Busse erfassen mithilfe eines fünften mitlaufenden Rades u. a. Informationen über die Griffigkeit und die Fahrbahnoberflächentemperatur. Diese Daten werden über GSM[1] an die Straßenwetter-Zentrale der finnischen Straßenverkehrsbehörde Finnra (Finnish Road Administration) übermittelt.

Steinauer et al. (STEINAUER et al. 2006) beschäftigten sich mit der Integration mobil erfasster Verkehrsdaten (FCD) in die Steuerungsverfahren der kollektiven Verkehrsbeeinflussung. Das Projekt fokussierte sich auf die Ermittlung von Verkehrszuständen auf Basis von FCD und zeigt simulativ auf, wie diese in die Steuerung von SBA integriert werden können. Bzgl. der Nutzung von xFCD zur Erkennung von Umfeldzuständen wird ein möglicher Ansatz zur Fusion mit lokal erfassten FG3-Daten konzeptionell diskutiert.

Bei der Fusion von fahrzeugbasierten Daten und Daten aus stationärer Umfelddatenerfassung besteht ein grundlegender Unterschied darin, dass im Gegensatz zu den stationären Daten die räumliche Zuordnung der xFCD/C2X im Nachgang noch vorgenommen werden muss. Die Übergabe der Ortsinformationen erfolgt in Abhängigkeit des Datenbereitstellers durch Geokoordinaten, Zuordnung zu Streckensegmenten einer digitalen Straßenkarte oder direkter Zuordnung zu einem AQ. Die Einzeldaten werden schließlich aggregiert. Solche fahrzeuggenerierten Daten müssen im Endeffekt konsolidiert mit steuerungstechnisch interpretierbarer Aussage vorliegen, wenn eine Fusion mit stationären Umfelddaten angestrebt ist.

Bislang gibt es hierzu verschiedene untersuchte Ansätze. Im Rahmen des EU Forschungsvorhabens REACT (Realising Enhanced Safety And Efficiency In European Road Transport) und dem Folgevorhaben COM2REACT (Cooperative Communication System To Realise Enhanced Safety And Efficiency in European Road Transport) wurden Konzepte zur Fusion stationärer Daten und fahrzeugseitig erfasster Daten zur Ermittlung der Sichtweite, des Fahrbahnzustandes und des Niederschlags (Art und Intensität) entwickelt. Zum Einsatz kamen u. a. Methoden der automatischen Bildverarbeitung und, im Rahmen von

[1] Global System for Mobile Communications

COM2REACT, auch die Fusion der Daten mehrerer, räumlich naher Fahrzeuge (unveröffentlichte Projektberichte (BUSCH UND WEINRICH 2005), (FIEDLER 2007)).

Im Teilprojekt WILLWARN (Wireless Local Danger Warning) des EU Projekts PReVENT (Preventive and Active Safety Applications) wurden unter anderem der Wischerstatus, die Lufttemperatur, die Geschwindigkeit sowie die über in den Rädern integrierte Sensoren ermittelte Griffigkeit sowie Quer- und Längsbeschleunigungen zur Erkennung des Fahrbahnzustands und von Niederschlagsereignissen genutzt (WILLWARN 2007).

In dem EU-Projekt FRICTION wurde ein System zur Abschätzung der Fahrbahngriffigkeit entwickelt. Hierzu wurden Daten von Fahrzeugsensoren, zum Beispiel zur Erfassung von Einzelradgeschwindigkeiten, Beschleunigungen, Lenkinformationen sowie von weiteren Sensorsystemen (Video, Radar, Laser) fusioniert (TRIMIS 2022).

Im Rahmen des EU Projekt TRACKSS (Technologies for Road Advanced Cooperative Knowledge Sharing Sensors) wurden unter anderem fahrzeugseitige Lasersensoren zur Eisdetektion untersucht (ARIEF/VON ARNIM 2008).

Ziel des schwedischen Projektes SRIS (Slippery Road Information System) war die Ermittlung 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 (BOGREN et al. 2008).

Ziel des EU-Forschungsprojekts SAFESPOT (SAFESPOT, 2010) war unter anderem die Warnung der Fahrer vor kritischen Umfeldbedingungen (reduzierte Fahrbahngriffigkeit aufgrund von Eis, Sichteinschränkung durch Nebel). Genutzt wurden hierfür einerseits Informationen aus Standardkomponenten (Wischerstatus, Fahrzeuggeschwindigkeit) und andererseits Daten spezieller zusätzlicher Sensoren (Laserscanner, Video).

Dinkel (DINKEL 2013) entwickelte Ansätze zur Nutzung fahrzeuggenerierter Daten zur Ermittlung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands in Streckenbeeinflussungsanlagen, wobei wesentliche Teile im Rahmen des FE 82.338/2007 „Zuverlässige Ermittlung des Fahrbahnzustands zur Erhöhung der Verkehrssicherheit auf Autobahnen“ erarbeitet wurden (Abschlussbericht unveröffentlicht). Konkret wird ein Modell entwickelt, das stationär erfasste Umfelddaten mit fahrzeuggenerierten mobilen Daten fusioniert. Das Ziel ist die Verbesserung der Erfassung witterungsbedingter Fahrbahnzustände auf Autobahnen. Um geeignete fahrzeuggenerierte Daten als Eingangsgrößen zu identifizieren, wurden Fahrten mit zwei Serienfahrzeugen durchgeführt und die xFCD, die am Fahrzeug-CAN (Controller Area Network)-Bus vorliegen, analysiert. Diese Daten wurden mit Vergleichswerten aus dem Testfeld für Umfelddatenerfassung "Eching Ost" an derA92 bei München verglichen. Fahrzeugseitig erfasst und in das Modell integriert wurden Lufttemperatur, Wischerstufe, Nässeerkennung, Frontwaschen, Statusmeldungen von ABS und ESC sowie die Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Ermittlung von streckenbezogenen Aussagen zu witterungsbedingten Fahrbahnzuständen erfolgte auf Basis einer Fusion der xFCD und stationär erfasster Umfelddaten unter Nutzung von Fuzzy-Logik. Als kritisch bewertet der Autor, dass Daten von lediglich zwei Fahrzeugen vorlagen und daher ein Verfahrenstest für eine Strecke über einen längeren Zeitraum nicht möglich war.

Das DFG-Projekt RAINCARS (Rainfall estimation using moving cars as rain gauges) untersuchte die Verwendung von Scheibenwischern und optischen Regensensoren als mögliche neue Datenquelle für die Ermittlung der Niederschlagsintensität. In Laboruntersuchungen

konnte eine klare Abhängigkeit zwischen der Sichtweite und der Niederschlagsintensität festgestellt werden. Sowohl die Scheibenwischerwischfrequenz als auch die Messwerte von zwei verschiedenen optischen Sensoren zeigten eine signifikante Korrelation mit Referenzmessungen, so dass entsprechende funktionale Beziehungen hergestellt werden konnten (sog. „W-R-Beziehungen“). Realversuche gestalteten sich aufgrund fehlender Referenzmessungen und starker räumlich-zeitlicher Variabilität schwieriger. Ein Ergebnis war, dass die (manuell eingestellte) Scheibenwischerwischfrequenz stärker mit der Fahrzeuggeschwindigkeit korreliert als mit der Niederschlagsmenge. Entsprechend wurde die Scheibenwischerwischfrequenz als eher ungeeignet für die Niederschlagsschätzung angesehen. Die Messwerte des optischen Sensors, die um den Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit korrigiert wurden, zeigen eine lineare Abhängigkeit von der aus dem Radar geschätzten Niederschlagsmenge. Die Fehler sind jedoch recht groß und es konnten keine zuverlässigen Vertrauensbereiche abgeleitet werden (RABIEI ET AL. 2013, 2016).

Collen und Casselgren (COLLEN UND CASSELGREN 2023) führen aus, dass die schwedische Straßenverkehrsbehörde im Rahmen des Projekts „Digital Vinter“ seit 2018 fahrzeuggenerierte Daten zur Feststellung von Straßenglätte bezieht. Das Ziel des Projekts ist die Analyse des Potenzials der Daten zur Nutzung im Winterdienst.

Im Forschungsprojekt SIM-TD (SIM-TD, 2015) wurden wesentliche Grundlagen zur Kommunikation zwischen einzelnen Fahrzeugen (C2C) sowie zwischen Fahrzeugen und Infrastrukturen (C2I) erarbeitet. Das Projekt wurde durch die Bundesministerien für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bildung und Forschung (BMBF) sowie Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) gefördert und unterstützt. Ziel des Forschungsprojektes war es, eine Standardisierung der C2X-Technologie zu erreichen. Im Verbund aus Automobilherstellern und -zulieferern, Forschungsinstitutionen sowie Planern von verkehrstechnischen Einrichtungen erfolgte die Spezifikation von:

- Car2X-Funktionen
- Funkschnittstellen (WLAN, Mobilfunk)
- Kommunikationsprotokollen
- IT-Sicherheitslösungen
- Fahrzeugseitigen Subsystemen
- Kommunikationseinheit (Communication Unit (CCU)
- Human Machine Interface (HMI)
- Infrastrukturseitigen Subsystemen
- Road Side Units (RSU)
- Kooperativen Verkehrszentralen

Die Umsetzung der in SIM-TD entwickelten Systemarchitektur wurde mittels eines groß angelegten Feldversuchs im Raum Frankfurt erprobt. Das Testfeld umfasste unter anderem die BAB A5 zwischen der Tank- und Rastanlage Wetterau und dem Westkreuz Frankfurt a.M. sowie mehrere umschließende Verbindungen aus Landstraßen sowie der Bundesstraßen B 3 und B 455.

Im Projekt Cooperative ITS Corridor (C-ITS[2]) findet die C2X-Technologie erstmals in einem größeren räumlichen Zusammenhang Anwendung. Das Ministry of Infrastructure and the Environment of the Netherlands, das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) sowie das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

[2] C-ITS: Cooperative ITS Corridor

(BMVI) haben sich im Jahr 2013 darauf verständigt, im Korridor Rotterdam – Frankfurt/Main – Wien kooperative Systeme aufzubauen. Der Fokus liegt hierbei auf der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen. Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastrukturen erfolgt hierbei auf Basis des WLAN-Standards 802.11p. Ziel des Forschungsprojektes ist es, durch kooperative Systeme (C2I) die Verkehrssicherheit zu erhöhen sowie den Verkehrsfluss zu verbessern. Im Rahmen des Projekts wurde eine Systemarchitektur einschließlich Datenmodell und Schnittstellenanforderungen entwickelt, um vor Tagesbaustellen frühzeitig warnen zu können und durch die Nutzung von fahrzeugbasierten Daten in Verkehrsrechnerzentralen (VRZ) ein verbessertes Verkehrsmanagement zu ermöglichen. Durch die grenzüberschreitende Zusammenarbeit soll ein europäischer Standard für die C2X-Kommunikation geschaffen werden, der offen für die Integration weiterer kooperativer Dienste ist und zur Harmonisierung der C2X-Technologie beiträgt.

Im Projekt FE 03.0522/2014/IRB “Steuerungsstrategien für VBA im Kontext von C2I-Kommunikation" (SCHWIETERING et al. 2021) wurden aus Sicht der Verkehrszentralen potenzielle Use Cases für C2I in der kollektiven Verkehrsbeeinflussung systematisch beschrieben. Dabei wurden auch Szenarien für witterungsbedingte Warnungen und Steuerungen dargestellt, z. B. “Nasse Fahrbahn”,” Geringe Sichtweite”, “Glatte Fahrbahn” und “Seitenwind auf Brücke”. Zudem wurden Anforderungen an die beteiligten Systeme Verkehrszentrale (zur Steuerung von SBA) und Kooperative Zentrale sowie an die notwendigen Daten aus C2I definiert.

Im Forschungsprojekt KITT – Künstliche Intelligenz zur Verbesserung der Sicherheit in Tunneln und Tunnelleitzentralen wurde durch ein binationales Konsortium aus Österreich und Deutschland ein Konzept zur Anwendung von künstlicher Intelligenz erarbeitet, um anhand von C2X-Daten Risikosituationen in Tunneln zu erkennen, um Tunneloperatoren frühzeitig zu warnen und ihnen situationsabhängig Handlungsempfehlungen zu geben. Mit Hilfe der KI werden die sogenannten CAM-Nachrichten analysiert. Diese enthalten u.a. Informationen zu Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung des sendenden Fahrzeugs. Anhand der Fahrzeuginformationen aus den CAM-Nachrichten kann auf Ereignisse wie Stau, Unfall, Brand etc. geschlossen werden. In einer Online-Risikoanalyse wird das aktuelle Risiko für die Ereignisse Unfall und Brand ermittelt und in einer Benutzeroberfläche dargestellt.

Mehrere Fahrzeughersteller gehen inzwischen dazu über, ihre Fahrzeuge mit entsprechenden Komponenten für die C2X-Kommunikation auszustatten. Seit 2019 stehen erste Serienfahrzeuge mit mit entsprechenden C2X-Komponenten zur Verfügung. Die Kommunikation mit der Infrastruktur erfolgt hierbei über den WLAN 802.11p Standard. Diese Fahrzeuge warnen beispielsweise vor folgenden Ereignissen:

- Stauende in x m
- Stehendes Fahrzeug voraus
- Pannenfahrzeug voraus
- Einsatzfahrzeug von rechts, von links, von hinten
- Notbremsung eines vorausfahrenden Fahrzeugs
- Baustellen (Kommunikation über Warnanhänger)

Da die C2X-Kommunikation auch als eine Grundvoraussetzung für das autonome Fahren gilt, wird dies ebenfalls zu einer weiteren Verbreitung der C2X-Technologie führen.

Im Rahmen von KITT wurden auf Basis der inzwischen erfolgten Festlegungen in Normen die Grundlagen der Datenübertragung systematisch aufbereitet. Maßgeblich für die C2X-Kommunikation in Europa sind die in den ETSI[3]-Standards getroffenen Festlegungen. Darin sind Form und Inhalt der zur C2X-Kommunikation erforderlichen Protokolle definiert. Die Normen umfassen die Beschreibung der Datenübertragung entsprechend dem OSI-Schichtenmodell von der Bitübertragungsschicht bis zur Anwendungsschicht. In nachfolgender Tab. 1 sind die einzelnen ETSI-Standards dem OSI-Schichtenmodell gegenübergestellt. Für das gegenständliche Forschungsvorhaben sind die Festlegungen zu den CAM[4] und DENM[5] maßgeblich.

[3] ETSI: European Telecommunications Standards Institute
[4] CAM: Cooperative Awareness Message
[5] DENM: De-centralized Environmental Notification Messages

No.	ISO/OSI-Model		C-ITS /ITS G5			
	Layer	Example protocols	Protocol stacks			Standard
7	Application Layer	HTTP FTP DNS etc.	Applications	C2X functions		No standard available
6	Presentation Layer	SSL TLS	Facilities	CAM DENM POI SPaT MAP IVI		ETSI EN 302 637-2 ETSI EN 302 637-3 ETSI TS 101 556-1 SAE J2735 SAE J2735 ISO TS 19321
5	Sesssion Layer	NetBIOS PPTP				
4	Transport Layer	TCP / UDP	Networking & Transport	BTP	TCP / UDP	ETSI EN 302 636-5-1
3	Network Layer	IPv4, IPv6		GN	IPv4, IPv6	ETSI EN 302 636-6-1
2b	Data Link Layer	LLC	Access	LLC		ETSI EN 302 663 / IEEE/ ISO/IEC 8808-2 with SNAP
2a		MAC		MAC		ETSI EN 302 663 / IEEE 802.11p
1b	Physical Layer	PLCP		PHY		ETSI EN 302 663 / IEEE 802.11p
1a		*PMD*				

Tab. 1: C-ITS Protokollstapel im Vergleich zum ISO/OSI-Modell (MAYER, 2022)

Hinsichtlich der übertragbaren Daten und Informationen ist jedoch zu beachten, dass die in den Protokollen definierten Inhalte aufgrund von beispielsweise fehlenden Sensoren nicht von allen Herstellern vollständig übermittelt werden. Informationen zur Witterung werden ereignisbedingt in einer DENM-Nachricht versendet. In der ETSI-Norm sind hierfür Parameter für die Sichtweite, das Wetter und den Fahrbahnzustand definiert. Für den Parameter Sichtweite bietet die ETSI-Norm beispielsweise die SubCause-Codes Nebel, Rauch, starker Schneefall, starker Regen, starker Hagel, niedriger Sonnenstand, Sandsturm und Insektenschwarm. Nachfolgende Tab. 2 gibt einen Überblick über die möglichen Ereignismeldungen (DENM) nach dem ETSI EN 302 637-3 Standard. Zu beachten ist hierbei, dass es sich bei der C2X-Kommunikation um eine Technologie handelt, die eine bidirektionale Kommunikation ermöglicht. D.h. es können Meldungen sowohl von den Fahrzeugen zur Infrastruktur (C2I) als auch von der Infrastruktur zu den Fahrzeugen (I2C) übermittelt werden.

Cause Code	Cause Code Description	Sub Cause Code	Sub Cause Code Description
6	Adverse weather condition - Adhesion (Haftung)	0	Unavailable
		1	heavyFrostOnRoad (schwerer Frost auf Fahrbahn)
		2	fuelOnRoad (Kraftstoff auf der Fahrbahn)
		3	mudOnRoad (Matsch auf Straße / ver-schmutzte Fahrbahn)
		4	snowOnRoad (Schnee auf Fahrbahn)
		5	iceOnRoad (Eis auf Fahrbahn)
		6	blackIceOnRoad (Glatteis)
		7	oilOnRoad (Öl auf der Fahrbahn / Ölspur)
		8	looseChippings (loser Splitt)
		9	instantBlackIce (Blitzeis)
		10	roadsSalted (gestreute Fahrbahn)
9	Hazardous location - Surface condition (Zustand Fahrbahnoberfläche)	0	unavailable
		5	snowDrifts (Schneeverwehung)
		6	stormDamage (Sturmschaden)
		9	fallingIce (Eisbruch)
17	Adverse weather condition - extreme weather condition (extreme Wetterbedingungen)	0	unavailable
		1	strongWinds (starke Winde)
		2	damagingHail (schädlicher Hagel)
		3	hurricane (Hurrikan)
		4	thunderstorm (Gewitter)
		5	tornado (Tornado / Windhose)
		6	blizzard (Schneesturm)
18	Adverse weather condition - Visibility (Sichtweite)	0	unavailable
		1	fog (Nebel)
		2	smoke (Rauch)
		3	heavySnowfall (starker Schneefall)
		4	heavyRain (Starkregen)
		5	heavyHail (schwerer Hagel)
		6	lowSunGlare (Blendung durch tiefstehende Sonne)

Cause Code	Cause Code Description	Sub Cause Code	Sub Cause Code Description
		7	Sandstorms (Sandstürme)
		8	swarmsOfInsects (Insektenschwarm)
19	Adverse weather condition - Precipitation (Niederschlag)	0	unavailable
		1	fog (Nebel)
		2	smoke (Rauch)
		3	heavySnowfall (starker Schneefall)
		3	softHail (leichter Hagel)

Tab. 2: Ereignismeldungen (DENM) nach ETSI EN 302 637-3 Standard

Die nachfolgenden Beispiele zu Auslösebedingungen bei ungünstigen Wetterbedingungen (Adverse weather conditions) basieren auf der Veröffentlichung des CAR 2 CAR Communication Consortium, in dem führende Fahrzeughersteller sowie weitere Partner aus Industrie, Forschung und Entwicklung sowie Straßeninfrastrukturbetreibern zusammengeschlossen sind (CAR 2 Car 2020).

2.2.1 Beispiel für Auslösebedingungen zur Meldung von Nebel

1. Fahrerreaktion und Lichtstatus

   a) Der Fahrer aktiviert das Nebelschlusslicht und das Abblendlicht ist eingeschaltet. Alle diese Bedingungen müssen länger als 20 s gültig sein (Um das Risiko einer Fehlbedienung durch den Fahrer zu minimieren, müssen die Bedingungen für einen längeren Zeitraum gültig sein).

   b) Der Fahrer aktiviert das Nebelschlusslicht, das Abblendlicht ist eingeschaltet und die Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt weniger als 60 km/h. Alle diese Bedingungen müssen für eine Dauer von mehr als 20 s gültig sein.

2. Sichtweitenmessgerät

   a) Die Sichtweite aufgrund von Nebel beträgt länger als 5 s weniger als 80 m +/-40 m Toleranz. Die Sichtbehinderung muss für einen angemessenen Zeitraum erkannt werden. Der Zeitraum ist aufgrund zuverlässigerer Informationen kürzer als bei den Bedingungen a) und b).

   b) Die Sichtweite aufgrund von Nebel beträgt länger als 5 s weniger als 80 m +/-40 m Toleranz und die Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt weniger als 60 km/h (wenn sich das Fahrzeug in einem nichtstädtischen Gebiet befindet, könnte diese Geschwindigkeit ein Hinweis auf eingeschränkte Sicht sein).

2.2.2 Beispiel für Auslösebedingungen zur Meldung von Niederschlag

1. Voraussetzungen

- Die Fahrzeuggeschwindigkeit ist größer als 7 km/h;
- die Fahrzeuggeschwindigkeit ist kleiner als 80 km/h;

- die Scheibenwaschfunktion ist nicht aktiv.

2. Wischerstufe und Lichtstatus

   a) Der Scheibenwischer arbeitet mit maximaler Geschwindigkeit. Das Abblendlicht ist eingeschaltet. Alle diese Bedingungen müssen länger als 20 s gültig sein.
   b) Der Scheibenwischer arbeitet mit maximaler Geschwindigkeit und die Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt weniger als 60 km/h. Das Abblendlicht ist eingeschaltet. Alle diese Bedingungen müssen länger als 20 s gültig sein.

3. Regenmesser, Wischerstufe und Lichtstatus

   a) Die Niederschlagsmenge beträgt mindestens 90 % der maximalen Leistung des Messgeräts und der Scheibenwischer arbeitet mit maximaler Geschwindigkeit. Das Abblendlicht ist eingeschaltet. All dies muss länger als 20 s gültig sein.

   b) Die Niederschlagsmenge beträgt mindestens 90 % der maximalen Leistung des Messgeräts und der Scheibenwischer arbeitet mit maximaler Geschwindigkeit. Das Abblendlicht ist eingeschaltet und die Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt weniger als 60 km/h. All diese Bedingungen müssen länger als 20 s gültig sein.

2.2.3 Beispiel für Auslösebedingungen zur Meldung von Traktionsverlust

1. Voraussetzungen

- Der Rückwärtsgang ist nicht aktiviert;
- Es werden keine Fehler bezüglich Motor, Antriebsstrang und Bremssystem gemeldet.

2. Auf der Grundlage positiver Beschleunigung

   a) Auf der Grundlage der Antriebsschlupfregelung (ASR), der Drosselklappenstellung, der Fahrzeugbeschleunigung und der Fahrzeuggeschwindigkeit: Eine ASR-Anforderung ist mindestens 200 ms lang aktiv (wie bei anderen Sicherheitsfunktionen, die von ASR abhängen). Die Drosselklappenstellung wird während des aktiven ASR-Eingriffs durchschnittlich mehr als 30 % des Maximalwerts gedrückt. Die Beschleunigung des Fahrzeugs (Beschleunigung gemäß gefiltertem Fahrzeugbussignal) beträgt weniger als 40 % der Fahrzeugbeschleunigung auf µ-High (trockener Asphalt 0,85) bei gleicher Startgeschwindigkeit und gleichem Fahrmanöver (hier wurden keine detaillierten Werte angegeben, um verschiedene Antriebskonfigurationen abzudecken, z. B. Zweirad- vs. Allradantrieb).

   b) Auf der Grundlage von ASR, der Drosselklappenstellung, der Fahrzeugbeschleunigung und der Fahrzeuggeschwindigkeit: Eine ASR-Anforderung ist mindestens 200 ms lang aktiv. Die Drosselklappenstellung wird während des aktiven ASR-Eingriffs durchschnittlich mehr als 30 % des Maximalwerts gedrückt. Die Beschleunigung des Fahrzeugs (Beschleunigung laut gefiltertem Fahrzeugbussignal) beträgt bei gleicher Startgeschwindigkeit und gleichem Fahrmanöver weniger als 20 % der Fahrzeugbeschleunigung auf µ-High (trockener Asphalt 0,85).

   c) Auf der Grundlage von ASR, Drosselklappenstellung, Fahrzeugbeschleunigung und Fahrzeuggeschwindigkeit: Eine ASR-Anforderung ist mindestens 200 ms lang aktiv. Die Drosselklappenstellung wird während des aktiven ASR-Eingriffs durchschnittlich um mehr als 30 % des Maximalwerts gedrückt. Die Beschleunigung des Fahrzeugs (Beschleunigung gemäß gefiltertem Fahrzeugbussignal) beträgt

weniger als 10 % der Fahrzeugbeschleunigung auf µ-High (trockener Asphalt 0,85) bei gleicher Startgeschwindigkeit und gleichem Fahrmanöver.

d) Auf der Grundlage von ASR und Drosselklappenstellung. Eine ASR-Anforderung ist mindestens 200 ms lang aktiv. Die Drosselklappenstellung wird während des aktiven ASR-Eingriffs durchschnittlich um weniger als 30 % des Maximalwerts gedrückt (um auf Böden mit hohem Reibwert keinen ASR-Eingriff auszulösen).

Anmerkung: Die Drosselklappenstellung bezieht sich auch auf eine entsprechende Anforderung durch andere Fahrereingabesysteme oder automatische Systeme wie ACC.

3. Auf Basis negativer Beschleunigung (Verzögerung)

   a) Auf der Grundlage von Antiblockiersystem (ABS), Bremsdruck und Verzögerung: ABS-Eingriff ist länger als 200 ms aktiv (entsprechend anderen Sicherheitsfunktionen, die von ABS abhängen). Bremsdruck beträgt mehr als 20 % des maximal möglichen Bremsdrucks. Die Verzögerung des Fahrzeugs (Verzögerung gemäß gefiltertem Fahrzeugbussignal) beträgt weniger als 50 % der Fahrzeugverzögerung auf µ-high (trockener Asphalt 0,85) bei gleicher Startgeschwindigkeit und Fahrmanöver.

   b) Auf der Grundlage von ABS, Bremsdruck und Verzögerung. ABS-Eingriff ist länger als 200 ms aktiv. Bremsdruck beträgt mehr als 20 % des maximal möglichen Bremsdrucks. Die Verzögerung des Fahrzeugs (Verzögerung gemäß gefiltertem Fahrzeugbussignal) beträgt weniger als 25 % der Fahrzeugverzögerung auf µ-high (trockener Asphalt 0,85) bei gleicher Startgeschwindigkeit und Fahrmanöver.

   c) Auf Basis von ABS, Bremsdruck und Verzögerung. ABS-Eingriff ist länger als 200 ms aktiv. Bremsdruck beträgt mehr als 20 % (um auf Untergrund mit hohem Reibwert keinen ABS-Eingriff auszulösen) des maximal möglichen Bremsdrucks. Die Verzögerung des Fahrzeugs (Verzögerung laut gefiltertem Fahrzeugbussignal) beträgt weniger als 10 % der Fahrzeugverzögerung auf µ-high (trockener Asphalt 0,85) bei gleicher Startgeschwindigkeit und Fahrmanöver.

   d) Auf Basis von ABS und Bremsdruck. ABS-Eingriff ist länger als 200 ms aktiv. Bremsdruck beträgt weniger als 20 % des maximal möglichen Bremsdrucks.

4. Auf Basis einer Reibwertschätzung

   a) Der Reibungskoeffizient ist für mindestens 5 s kleiner als 0,3 (der Reibungskoeffizient von Eis ist < 0,2; für Schnee und Splitt beträgt er ca. 0,4. Der Reibungskoeffizient muss für eine bestimmte Zeit nachgewiesen werden)

   b) Der Reibungskoeffizient ist für mindestens 5 s kleiner als 0,2.

2.2.4 Fazit Fahrzeugbasierte Erfassung

Fahrzeuggenerierte Meldungen basieren auf der Verarbeitung von Informationen, die über in den Fahrzeugen verbauten Sensoren bereitgestellt werden. Die Meldungen können hierbei aus Einzelinformationen oder der Fusion von Informationen aus verschiede-

nen Sensoren erzeugt werden. Letztendlich obliegt es den Fahrzeugherstellern auf welcher Grundlage Meldungen ausgelöst werden. Die Methodik der Informationsgewinnung unterscheidet sich dabei grundsätzlich von der konventionellen Datenerfassung mit ortsfesten Erfassungsgeräten. Im Gegensatz zu der konventionellen Technik erfolgt bei der fahrzeugbasierten Datenerfassung eine kontinuierliche Auswertung der Informationen über Raum und Zeit. Das Fahrzeug übernimmt dabei die Funktion eines Datenkollektors (Dataloggers), Datenverarbeiters und Informationsbereitstellers. Zur Unterstützung der Fahrerassistenzsysteme verfügen moderne Fahrzeuge über eine Vielzahl an Sensoren. Typischerweise werden in aktuellen Fahrzeugen Temperaturmesser, Tageslichterfassung, Regensensoren, Beschleunigungsmesser, Raddrehzahlerfassung, Ultraschallsensoren, Radarsysteme, Lidarsensoren, Kamerasysteme, Ortungssysteme (GPS) etc. verbaut. Auf Basis der über diese Sensoren bereitgestellten Informationen werden Fahrer in ihrer Fahraufgabe und in Notsituationen unterstützt. Die Datenbasis ist hierbei grundverschieden zu den über die Umfelddatenerfassung gewonnen Daten. Sie unterscheiden sich nicht nur in der Art der Datenerhebung, sondern auch in der Informationsvielfalt. Auf einem völlig anderen Weg der Informationsverarbeitung wird hierbei versucht vergleichbare Warnmeldungen zu generieren, wie diese auch durch konventionelle Systeme erzeugt werden. Für die Auslösung einer Warnmeldung werden vielfach neben einzelnen Sensorinformationen auch Fahrreaktionen und Fahrgeschwindigkeiten sowie die Ereignis- bzw. Handlungsdauer in die Entscheidung mit einbezogen. Dadurch findet auch das Verhalten von Fahrzeugführern in der jeweiligen Situation seine Berücksichtigung. Grundsätzlich lassen sich mit den beschriebenen Auslösebedingungen Gefahrenwarnungen zu Nebel, Niederschlag sowie Schleudern bei Nässe und Schmutz realisieren.

2.3 Niederschlagsradar

Für die Verkehrsbeeinflussung sind zu Rasterdaten aufbereitete Niederschlagsradardaten aufgrund der vollständigen räumlichen Abdeckung eines Gebiets (z.B. Deutschland) potenziell von großem Nutzen. In Deutschland werden Rasterdaten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) mit einem Modell aus den Daten von 17 Wetterradars und punktueller Aneichung an Niederschlagsstationen berechnet (RADOLAN - Radar-Online-Aneichung) und als Bild (siehe Bild 3) in Echtzeit sowie in Form von CSV-Dateien frei zur Verfügung gestellt. Aus den verschiedenen bereitgestellten RADOLAN-Produkten eignet sich besonders ein Deutschlandkomposit mit stündlichen Niederschlagshöhen in einer Intensitätsauflösung von 0,1 mm und einer räumlichen Auflösung von 1 km², welches im Echtzeitbetrieb innerhalb von 30 Minuten verfügbar ist.

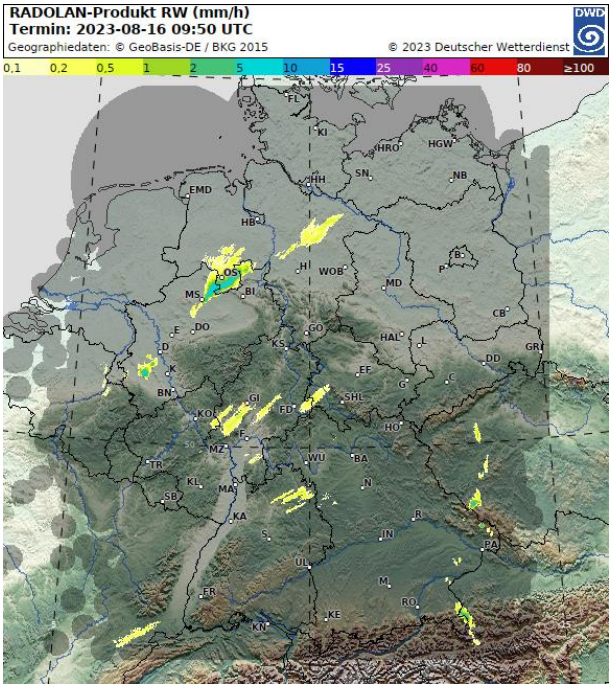

Bild 3: Flächendeckende Information zur Niederschlagshöhe (RADOLAN, Quelle: DWD[6])

Bisher sind keine Verfahren zur Integration von flächendeckenden Niederschlagsradardaten in die automatische Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen bekannt. Das MARZ 2018 nennt in Abschnitt 3.3.3.6 das Niederschlagsradar als eine mögliche Datenquelle bei der Abschätzung einer (sich anbahnenden) Glättegefahr durch Operatoren.

2.4 Grundlagen der Steuerungsverfahren nach dem MARZ

Die bestehenden umfeldbezogenen Steuerungsverfahren nach dem MARZ arbeiten mit Schwellenwerten auf Basis der nach den TLS standardisierten FG3-Daten. Hierbei werden anhand von geglätteten FG3-Daten auf Basis von Schwellenwerten „Zustandsstufen“ ermittelt, denen Schaltempfehlungen zugeordnet sind (z. B. „100 + Nässe“). Dabei werden standardmäßig die Daten des dem AQ zugeordneten MQ verwendet.

Bild 4 zeigt das grundsätzliche Vorgehen zur Datenaufbereitung nach dem MARZ. Der Datenfluss zur Ermittlung der Nässestufe ist im Bild rot gestrichelt umrandet.

[6] https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan_info/home_freie_radolan_kartendaten.html, abgerufen am 16.8.2023

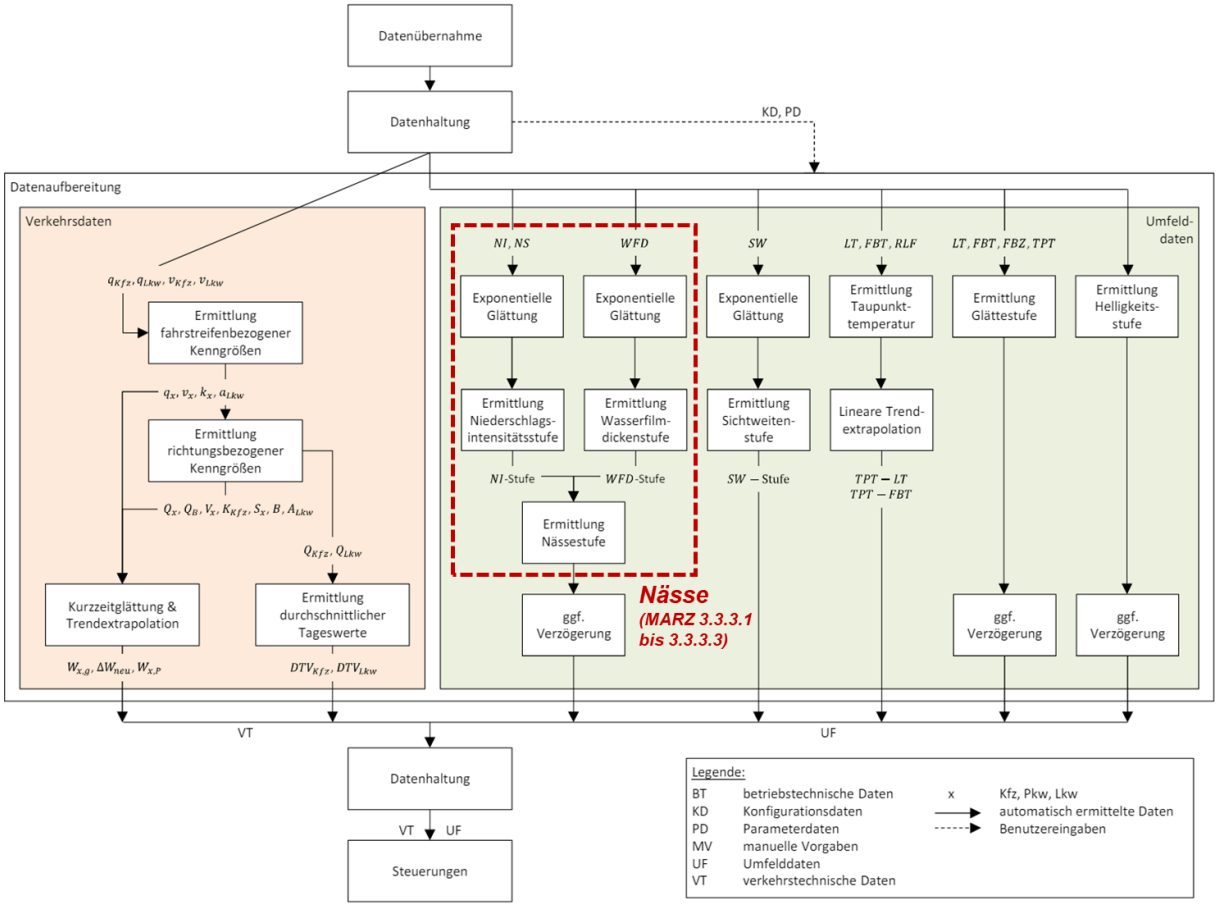

Bild 4: Fachliche Abläufe und Datenfluss der Datenaufbereitung (Quelle: MARZ 2018, S. 25)

Das konkrete Vorgehen zur Ermittlung der Nässestufe ist in den MARZ-Kapiteln 3.3.3.1 bis 3.3.3.3 beschrieben. Zunächst werden unabhängig voneinander NI-Stufen und WFD-Stufen gebildet. Diese werden anschließend über eine Matrix miteinander zu einer Nässestufe verknüpft (siehe Tab. 3).

Erstversorgung für hysteresebasierte Grenzwerte zur Klassifizierung der Wasserfilmdickenstufen				**Erstversorgung für hysteresebasierte Grenzwerte zur Klassifizierung der Niederschlagsintensitätsstufen**		
WFD-Stufe ein	**WFD-Stufe aus**	**WFD-Stufe**		**NI-Stufe ein**	**NI-Stufe aus**	**NI-Stufe**
≥ 0,0 mm/h		WFD 0		≥ 0,0 mm/h		N 0
≥ 0,02 mm/h	< 0,1 mm/h	WFD 1		≥ 0,3 mm/h	< 0,2 mm/h	N 1
≥ 0,5 mm/h	< 0,4 mm/h	WFD 2		≥ 1,2 mm/h	< 1,0 mm/h	N 2
≥ 1,2 mm/h	< 1,0 mm/h	WFD 3		≥ 5,0 mm/h	< 4,0 mm/h	N 3
				≥ 12,0 mm/h	< 10,0 mm/h	N 4

WFD-Stufe	NI-Stufe					
	N 0	N 1	N 2	N3	N 4	Wert n. v.
WFD 0	trocken	trocken	nass1	nass2	nass2	trocken
WFD 1	nass1	nass1	nass2	nass3	nass4	nass1
WFD 2	nass2	nass2	nass2	nass3	nass4	nass2
WFD 3	nass2	nass2	nass3	nass3	nass4	nass3
Wert n.v.	trocken	trocken	nass1	nass2	nass3	

Tab. 3: Ermittlung NI-Stufe, WFD-Stufe und Nässestufe nach dem MARZ (Quelle für die dargestellten Tabellen: MARZ 2018, S. 29f)

Die MQs auf den beiden Untersuchungsstrecken (vgl. Kapitel 3.3)sind den AQs nach dem Schema des MARZ 2018 sowie der aktuellen Versorgung des Betreibers zugeordnet (siehe Tab. 4):

- "AQs mit MQs am gleichen Standort werden genau diesen MQ zugeordnet."
- "AQs zwischen zwei MQs werden je nach Lage die beiden benachbarten (jeweils höherer Wert) oder nur ein MQ (der näher bzw. in Fahrtrichtung liegende) zugeordnet."

Messquerschnitt	MQ1		MQ2		MQ3			MQ4
Anzeigequerschnitt für Richtung <--- <--- <---	AQ 1	AQ 2	AQ 3	AQ 4	AQ 5	AQ 6	AQ 7	AQ 8
Anzeigequerschnitt für Richtung ---> ---> --->	AQ 9	AQ 10	AQ 11	AQ 12	AQ 13	AQ 14	AQ 15	AQ 16
Zuordnung Regelbetrieb	MQ 1	MQ 1 / MQ 2	MQ 2	MQ 2 / MQ 3	MQ 3	MQ 3	MQ 4	MQ 4
Maßgebend bei Regelbetrieb	MQ 1	Höherer Wert aus MQ 1 /MQ 2	MQ 2	Höherer Wert aus MQ 2 /MQ 3	MQ 3	MQ 3	MQ 4	MQ 4
Ersatz MQ für Richtung <--- <--- <---	MQ 2	-	MQ 3	-	MQ 4	-	-	-
Ersatz MQ für Richtung ---> ---> --->	-	-	MQ 1	-	MQ 2	-	-	MQ 3

Tab. 4: Zuordnung Messquerschnitt zu Anzeigequerschnitt beim Ersatzquerschnittverfahren (Quelle: MARZ 2018, Tab. 5, S. 24)

Die nach diesem Verfahren ermittelte Nässestufe für einen bestimmten Standort dient als Grundlage zur Auswahl eines geeigneten SBA-Schaltbilds. Dabei ist jeder Nässestufe ein spezifisches Schaltbild im Regenprogramm zugeordnet. Die Nässestufe 0 entspricht dem

Normalzustand (trockene Fahrbahn), bei dem kein Regenprogramm aktiviert ist. Mit zunehmender Nässestufe werden progressiv restriktivere Schaltbilder zur Erhöhung der Verkehrssicherheit aktiviert:

Nässestufe	Beschreibung	Zugeordnetes Schaltbild
0	trocken	kein Regenprogramm
1	leichter Regen	Regenprogramm (v = 120 km/h)
2	mittlerer Regen	Regenprogramm (v = 100 km/h)
3	Starkregen	Regenprogramm (v = 80 km/h)
4	Platzregen	Regenprogramm (v = 60 km/h)

Tab. 5: exemplarische Zuordnung der Nässestufen zu SBA-Schaltbildern

Diese systematische Verknüpfung von Umweltbedingungen mit konkreten Maßnahmen stellt sicher, dass die Verkehrsteilnehmenden frühzeitig und situationsgerecht auf veränderte Fahrbahnverhältnisse hingewiesen werden.

Neben der Fahrbahnnässe sind im MARZ 2018 weitere Witterungszustände definiert:

- **Witterungszustand Nebel**: Wenn die gemessene Sichtweite auf einem Streckenabschnitt eine Beeinflussung des Verkehrs erfordert, werden entsprechende Schaltbilder angefordert (für A-, B- und C-Zeichengeber). Es sind mindestens sechs Sichtweitenstufen vorzusehen, so dass alle Stufen der Geschwindigkeitsbeschränkung (120, 100, 80, 60, 40 km/h; erste Stufe: Dunkel) genutzt werden können. Zusätzlich können je nach Sichtweitenstufe das Gefahrenzeichen VZ 101 oder Lkw-Überholverbot (VZ 277) sowie textliche Zusätze („Nebel“ oder „7,5 t“) angefordert werden.
- **Windwarnung**: Zum Schutz vor windkritischen Situationen, insbesondere bei großflächigen Fahrzeugen (z.B. Lkw, Wohnmobile, Pkw mit Anhänger), werden anhand von gemessenen Winddaten an der Strecke Beeinflussungsmaßnahmen angefordert. Dafür werden sowohl die Windgeschwindigkeit als auch die Windrichtung gemessen. Die Klassifizierung erfolgt mittels Windstärke (13 Klassen – 0: Windstille bis 12: Orkan) auf Basis der (Spitzen-)Windgeschwindigkeit.
- **Fahrstreifenbezogene Verkehrslage in Abhängigkeit der Witterungsbedingungen**: Für eine Harmonisierung des Verkehrsablaufs sieht das Merkblatt auch eine fahrstreifenbezogene Betrachtung der aktuellen Verkehrslage vor, welche auf die Ergebnisse aus der Nässe- und Helligkeitsbestimmung zurückgreift. Bei Nässe, Dunkelheit oder einer Kombination dieser Zustände werden die Schwellenwerte zur Bestimmung der Harmonisierungsstufen durch entsprechende Faktoren angepasst.

Glätte wird derzeit vornehmlich durch das Bedienpersonal der Verkehrszentralen bewertet und eine mögliche automatisch ermittelte Gefahrenwarnung „Glätte“ ausschließlich per Handschaltung (nach manueller Plausibilisierung) ausgelöst. In den „Hinweisen zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen“ (FGSV 2017) wird ein neuer Ansatz zur Steuerung bei Glätte beschrieben, der hierfür eine semiautomatische Situationserkennung verwendet. Das Bedienpersonal muss im Falle einer Meldung möglicher Glätte anhand weiterer Kanäle (z.B. DWD-Wetterbericht, Meldungen der Autobahnmeistereien) diese verifizieren und eine entsprechende Schaltung freigeben. Das automatisierte Verfahren beruht auf aktuellen und vorhergehenden Messwerten (letzten 10

Minuten) zur Trendextrapolation, welche über ein Modell zur Bewertung der Glättegefahr führen. Zu den gemessenen Werten zählen Fahrbahnoberflächen- und Taupunkttemperatur sowie aktuelle Werte der Lufttemperatur und des Fahrbahnzustands.

Die Verkehrszentrale in Hessen verwendet zur Schaltermittlung von Regenprogrammen eine angepasste Einteilung der Niederschlagsstufen, die mögliche Unschärfen der Umfeldsituationserfassung vom Messstandort gegenüber der Situation auf der Strecke berücksichtigt. Hessen Mobil baut auf eine Verknüpfung des Regenprogramms mit der Harmonisierung (RIEGELHUTH/GLATZ 2015). Bei einer geringen Niederschlagsintensität wird lediglich die Harmonisierung verschärft. Liegt stärkerer Niederschlag vor, so wird zusätzlich ein Regenprogramm in Verbindung mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung angefordert. Im Falle eines Starkregenereignisses ist die Harmonisierung nicht relevant.

Das in Bayern eingesetzte INCA+ (Erweiterung des Projektes INCA, u. a. auch um die Einflüsse der Witterung) nutzt die witterungsbedingten Steuerungsverfahren aus (FGSV 2002/2010/2017). Dabei werden die Steuerungsparameter zyklisch ausgewertet und nach Bedarf mit Hilfe einer Zielfunktion optimiert. Die Zielfunktion bewertet die Verkehrs- und Umfeldsituation kontinuierlich. Aus den generierten Datensätzen werden die Nutzen und Kosten für die Steuerungsparameter ermittelt und nach Bedarf angepasst, um ein optimales Nutzen-Kosten-Verhältnis der Schaltungen zu erhalten.

Schwietering (SCHWIETERING 2010) entwickelte das Steuerungsverfahren „AIX-ProB“, das auf Basis von Verkehrs- und Umfelddaten proaktive Harmonisierungsschaltungen anfordern kann. Es berücksichtigt die Streckenkapazität nicht als deterministische, sondern als stochastische Größe und legt diese zugrunde, um eine Einbruchswahrscheinlichkeit der Geschwindigkeit zu bestimmen. Neben anderen Einflussfaktoren haben insbesondere auch witterungsabhängige Faktoren (z.B. Nässe, Helligkeit) einen Einfluss auf die Kapazität und somit auf die Störfallerkennung. AIX-ProB wurde auf österreichischen Autobahnen getestet und wird derzeit in die Verkehrszentrale der ASFINAG implementiert.

2.5 Gefahrenwarnungen und Auslösebedingungen

Witterungseinflüsse können sich nachteilig auf die Verkehrssicherheit auswirken. Mit Hilfe von Verkehrsbeeinflussungsanlagen werden daher Verkehrsteilnehmer vor witterungsbedingten Gefahren gewarnt. Zur Gefahrenwarnung stehen als WVZ des Typs B zur Streckenbeeinflussung das Z 101 StVO Gefahrstelle zur allgemeinen Gefahrenwarnung sowie das Z 114 StVO zum Hinweis auf Schleudergefahr bei Nässe oder Schmutz und das Z 113 StVO zur Warnung vor Schnee- oder Eisglätte zur Verfügung. Mit dem Zusatzzeichen vom Typ C können Gefahren wie z.B. aus Nebel oder Wind in Textform weiter spezifiziert werden.

Für eine zuverlässige Warnung vor den jeweiligen Gefahren wurden bisher unterschiedliche stationäre Messeinrichtungen verwendet, die in den TLS spezifiziert sind. Mit der C-ITS Technologie steht nun ein weiterer Ansatz zur Umfelddatenerhebung zur Verfügung. Diese Datenerfassung hat unterscheidet sich von bisherigen stationären Erfassungsmethoden. In nachfolgender Tab. 6 sind die mögliche Auslösebedingungen einander vergleichend gegenübergestellt. Es wird ersichtlich, wie die einzelne Warnmeldungen erzeugt werden.

<table>
<tr><th>Warnmeldungen</th><th>Auslösebedingungen nach Hinweisen zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in SBA (MARZ 2018)</th><th></th><th>C-ITS / C2X Auslösebedingungen nach C2C Consortium (CAR 2 CAR 2020)</th></tr>
<tr><td>Schleudergefahr bei Nässe oder Schmutz
</td><td>Schaltung erfolgt in Abhängigkeit von Nässestufen. Diese basieren auf Niederschlagsintensitäts- und Wasserfilmdickenstufen.
Niederschlagsintensitätsstufe 0 - 4
Basiert auf der Messgröße Niederschlagsintensität NI (DE-Typ 53 nach TLS)
Wasserfilmdickenstufe (0 – 3)
Basiert auf der Messgröße Wasserfilmdicke WFD (DE-Typ 72 nach TLS).
Beispiel einer Matrix zur Ermittlung der Nässestufe
<table><tr><th>WFD-Stufe</th><th colspan="6">NI-Stufe</th></tr><tr><th></th><th>NI 0</th><th>NI 1</th><th>NI 2</th><th>NI 3</th><th>NI 4</th><th>Wert n.v.</th></tr><tr><td>WFD 0</td><td>trocken</td><td>trocken</td><td>nass 1</td><td>nass 2</td><td>nass 2</td><td>trocken</td></tr><tr><td>WFD 1</td><td>nass 1</td><td>nass 1</td><td>nass 2</td><td>nass 3</td><td>nass 4</td><td>nass 1</td></tr><tr><td>WFD 2</td><td>nass 2</td><td>nass 2</td><td>nass 2</td><td>nass 3</td><td>nass 4</td><td>nass 2</td></tr><tr><td>WFD 3</td><td>nass 2</td><td>nass 2</td><td>nass 3</td><td>nass 3</td><td>nass 4</td><td>nass 3</td></tr><tr><td>Wert n.v.</td><td>trocken</td><td>trocken</td><td>nass 1</td><td>nass 2</td><td>nass 3</td><td></td></tr></table>
(siehe Tab. 3)
Nässestufe 1:
Schaltung v_{zul} = 120 km/h
Nässestufe 2:
Schaltung v_{zul} = 100 km/h, Schleudergefahr
Nässestufe 3:
Schaltung v_{zul} = 80 km/h, Schleudergefahr
Nässestufe 4:
Anzeige v_{zul} = 60 km/h, Schleudergefahr</td><td></td><td>- Fahrgeschwindigkeit
7 km/h ≤ v_f ≤ 80 km/h
- Scheibenwaschfunktion ist nicht aktiv.
- Scheibenwischer arbeitet auf höchster Stufe.
- Abblendlicht ist aktiviert.
- Niederschlagsmenge ≥ 90% der max. Erfassungsmenge des Regensensors
Gefahrenmeldung (DENM):
heavyRain (Starkregen)</td></tr>
<tr><td>Schnee- oder Eisglätte
</td><td>Schaltung erfolgt in Abhängigkeit von der Fahrbahnoberflächentemperatur, der Lufttemperatur und des Fahrbahnzustands.
Die Temperatur der Fahrbahnoberfläche basiert auf der Messgröße FBT (DE-Typ 49) nach TLS.</td><td></td><td>Die Berechnung des Traktionsverlusts kann auf verschiedenen Grundlagen erfolgen:
- positiver Beschleunigung
- negativer Beschleunigung
- auf einer Reibwertschätzung.</td></tr>
</table>

Warnmeldungen	Auslösebedingungen nach Hinweisen zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in SBA (MARZ 2018)		C-ITS / C2X Auslösebedingungen nach C2C Consortium (CAR 2 CAR 2020)
	- Die Glättegefahr nimmt bei einem FBT-Wert ≤ 2°C zu. Die Lufttemperatur basiert auf der Messgröße LT (DE-Typ 48) nach TLS. - Die Glättegefahr nimmt bei einem LT-Wert ≤ 2°C zu, die Bildung von Schneeglätte oder Glatteis bei Niederschlag ist möglich. Die Fahrbahnzustand basiert auf der Messgröße FBZ (DE-Typ 70) nach TLS. - Hinsichtlich des Zustands der Fahrbahnoberfläche wird unterschieden zwischen trocken, feucht oder nass sowie vorhandener Glätte Ist die Differenz aus Fahrbahnoberflächentemperatur und Taupunkttemperatur ≤ 0 K ist die Bildung von Schneeglätte oder Glatteis bei Niederschlag sowie Reifglätte sofort möglich.		**Positive Beschleunigung** Die Berechnung des Traktionsverlusts erfolgt auf der Antriebsschlupfregelung (ASR), der Drosselklappenstellung, der Fahrzeugbeschleunigung und der Fahrzeuggeschwindigkeit. - ASR-Anforderung ist mindestens 200 ms lang aktiv. - Drosselklappenstellung wird während des aktiven ASR-Eingriffs durchschnittlich um mehr als 30 % des Maximalwerts gedrückt. - Beschleunigung des Fahrzeugs beträgt weniger als 40 % / 20 % / 10 % der Fahrzeugbeschleunigung auf trockenem Asphalt. - Drosselklappenstellung wird während des aktiven ASR-Eingriffs durchschnittlich um weniger als 30 % des Maximalwerts gedrückt. (um auf Böden mit hohem Reibwert keinen ASR-Eingriff auszulösen). **Negative Beschleunigung** Die Berechnung des Traktionsverlusts erfolgt auf der Grundlage von Antiblockiersystem (ABS), Bremsdruck und Verzögerung. - ABS-Eingriff ist länger als 200 ms aktiv. - Bremsdruck beträgt mehr als 20 % des maximal möglichen Bremsdrucks. - Verzögerung des Fahrzeugs beträgt weniger als 50% / 25 % / 10 % der Fahrzeugverzögerung auf trockenem Asphalt - Oder auf Basis von ABS und Bremsdruck.

Warnmeldungen	Auslösebedingungen nach Hinweisen zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in SBA (MARZ 2018)		C-ITS / C2X Auslösebedingungen nach C2C Consortium (CAR 2 CAR 2020)
			- ABS-Eingriff ist länger als 200 ms aktiv. - Bremsdruck beträgt weniger als 20 % des maximal möglichen Bremsdrucks.
			Reibwertschätzung - Reibungskoeffizient ist für mindestens 5 s kleiner als 0,3. - Reibungskoeffizient ist für mindestens 5 s kleiner als 0,2. - Reibungskoeffizienten: Eis < 0,2 - Schnee und Splitt: ca. 0,4
			Gefahrenmeldung (DENM): - heavyFrostOnRoad - snowOnRoad - iceOnRoad - blackIceOnRoad (Glatteis - instantBlackIce **Darüber hinaus** - fuelOnRoad / oilOnRoad - mudOnRoad

Warnmeldungen	Auslösebedingungen nach Hinweisen zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in SBA (MARZ 2018)		C-ITS / C2X Auslösebedingungen nach C2C Consortium (CAR 2 CAR 2020)
Nebel  	Schaltung erfolgt in Abhängigkeit von Sichtweitenstufen. Sichtweitenstufen 0 – 5 Basiert auf der Messgröße Sichtweite SW (DE-Typ 58 nach TLS). **Sichtweitenstufe 0** (SW > 400 m) - Schaltung: keine **Sichtweitenstufe 1** (SW ≤ 400 m) - Schaltung v_{zul} = 120 km/h **Sichtweitenstufe 2** (SW ≤ 250 m) - Schaltung v_{zul} = 100 km/h, - Gefahrenwarnung Nebel **Sichtweitenstufe 3** (SW ≤ 120 m) - Schaltung v_{zul} = 80 km/h, - Gefahrenwarnung Nebel **Sichtweitenstufe 4** (SW ≤ 80 m) - Schaltung v_{zul} = 60 km/h, - Lkw-Überholverbot **Sichtweitenstufe 5** (SW ≤ 50 m) Schaltung v_{zul} = 40 km/h, Lkw-Überholverbot		- Ermittlung von Neber erfolgt über Fahreraktion und Sichtweitenmessgerät. - Nebelschlusslicht ist aktiviert. - Abblendlicht eingeschaltet - Sichtweite ≤ 80 m (Sensor zur Sichtweitenbestimmung) - Fahrgeschwindigkeit ≤ 60 km **Gefahrenmeldung (DENM):** fog

<table>
<tr><th>Warnmeldungen</th><th>Auslösebedingungen nach Hinweisen zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in SBA (MARZ 2018)</th><th></th><th>C-ITS / C2X Auslösebedingungen nach C2C Consortium (CAR 2 CAR 2020)</th></tr>
<tr><td>Wind

</td><td>Schaltung erfolgt in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und Windrichtung
- Windrichtung basiert auf der Messgröße WR (DE-Typ 56 nach TLS).
- Die mittlere Windgeschwindigkeit basiert auf der Messgröße Windgeschwindigkeit (Mittel) WGM (DE-Typ 57 nach TLS).
- Die Spitzenwindgeschwindigkeit basiert auf der Messgröße Windgeschwindigkeit (Spitze) WGS (DE-Typ 64 nach TLS).
- Windstärke 8: stürmischer Wind, Windgeschwindigkeit 62 – 74 km/h

<table><tr><th>Windstärke</th><th>Bezeichnung</th><th>Geschwindigkeit</th></tr><tr><td>8</td><td>Stürmischer Wind</td><td>62 – 74 km/h</td></tr><tr><td>9</td><td>Sturm</td><td>65 – 88 km/h</td></tr><tr><td>10</td><td>Schwerer Sturm</td><td>89 – 102 km/h</td></tr><tr><td>11</td><td>Orkanartiger Sturm</td><td>102 – 117 km/h</td></tr><tr><td>12</td><td>Orkan</td><td>118 – 133 km/h</td></tr></table>
Schaltung ist von örtlicher Situation abhängig.</td><td></td><td>Messgrößen:
- Spurhaltung
- Lenkwinkel
- Querkraft
Gefahrenmeldung (DENM):
strongWinds</td></tr>
</table>

Tab. 6: Gegenüberstellung konventioneller und C-ITS Methoden zur Gefahrenwarnung

2.6 Datenschutz bei der Verarbeitung von fahrzeuggenerierten Daten

Für die Nutzung von fahrzeuggenerierten Daten in der SBA-Steuerung müssen diese Daten erhoben und verarbeitet werden. Dabei sind grundsätzliche Regelwerke für die Erhebung, Verarbeitung, Nutzung, Speicherung, Weiterleitung und Löschung von Daten zu beachten. Ein besonderer Schutz gilt für personenbezogene Daten. In den im Folgenden beschriebenen Regelwerken werden die Rahmenbedingungen für die Erhebung und Verarbeitung von Daten beschrieben und definiert, für welche Art von Daten welche Regelungen gelten.

In Bezug auf Fragen des Datenschutzes sind insbesondere folgende Regelwerke maßgebend.

- Richtlinie 2010/40/EU (IVS-RL)
- Delegierte Verordnungen zur Ergänzung der Richtlinie 2010/40/EU
- Datenschutzgrundverordnung (DSGVO)
- Bundesdatenschutzgesetz (BDSG)
- Richtlinien zur Netzwerk- und Informationssicherheit (NIS)
- IT-Sicherheitsgesetz
- Gesetz des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI-Gesetz)

2.6.1 Richtlinie 2010/40/EU (IVS-RL)

Die von der EU erlassene Richtlinie RL 2010/40/EU7 vom 07. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern bildet den rechtlichen Rahmen für den Austausch von Daten zwischen Infrastruktur und Verkehrsteilnehmern. Als intelligente Verkehrssysteme (IVS) gelten danach Systeme, bei denen Informations- und Kommunikationstechnologien im Straßenverkehr, einschließlich seiner Infrastrukturen, Fahrzeuge und Nutzer, sowie beim Verkehrs- und Mobilitätsmanagement und für Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern eingesetzt werden (Art. 4 Nr. 1).

Wesentliche Bestandteile der RL 2010/40/EU (IVS-RL) sind

- Vorschriften über Vertraulichkeit, Sicherheit und Weiterverwendung von Informationen,
- Vorrangige Bereiche und Maßnahmen,

auf die im Folgenden weiter eingegangen wird.

Vorschriften über Vertraulichkeit, Sicherheit und Weiterverwendung von Informationen

In Art. 10 der IVS-RL werden Vorgaben gemacht im Hinblick auf:

- Einklang mit Unionsvorschriften,
- Schutz vor Missbrauch,
- Anonymisierung und Erforderlichkeit,
- Einwilligung.

Einklang mit Unionsvorschriften (Art. 10, Abs 1)

In Absatz 1 wird bestimmt, dass die Mitgliedstaaten bei der Verarbeitung personenbezogener Daten im Zusammenhang mit IVS die Einhaltung der Unionsvorschriften zum Schutz der Grundrechte und Grundfreiheiten natürlicher Personen – insbesondere die Datenschutzrichtlinie (ABI.L281 1995) und die ePrivacy-Richtlinie (ABI.L201 2002) – sicherzustellen haben.

Schutz vor Missbrauch (Art. 10, Abs 2)

[7] Richtlinie RL 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 07. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern

Nach Absatz 2 haben die Mitgliedstaaten sicherzustellen, dass personenbezogene Daten gegen Missbrauch, wie unrechtmäßigen Zugriff, Veränderung oder Verlust, geschützt sind.

Anonymisierung und Erforderlichkeit (Art. 10, Abs 3)

In Absatz 3 wird die Anonymisierung personenbezogener Daten zum Schutz der Privatsphäre gefordert, soweit dies angemessen ist. Personenbezogene Daten sollen nur dann verarbeitet werden, wenn dies für den Betrieb von IVS-Anwendungen und -Diensten erforderlich ist.

Einwilligung (Art. 10, Abs 4)

Nach Absatz 4 haben die Mitgliedstaaten sicherzustellen, dass die Bestimmungen über die Einwilligung in die Verarbeitung personenbezogener Daten eingehalten werden, insbesondere bei der Verarbeitung besonderer Kategorien personenbezogener Daten.

Vorrangige Bereiche und Maßnahmen

Art. 5 der IVS-RL verpflichtet die Mitgliedstaaten zur Einhaltung festgelegter Spezifikationen und Grundsätze bei der Einführung von IVS-Anwendungen und IVS-Diensten. In Art. 2 und 3 sind hierzu vier vorrangige Bereiche und sechs vorrangige Maßnahmen festgelegt.

Als vorrangige Bereiche gelten nach Art. 2:

- Optimale Nutzung von Straßen-, Verkehrs- und Reisedaten,
- Kontinuität der IVS-Dienste in den Bereichen Verkehrs- und Frachtmanagement,
- IVS-Anwendungen für die Straßenverkehrssicherheit,
- Verbindung zwischen Fahrzeug und Verkehrsinfrastruktur.

Die Verbindung zwischen Fahrzeug und der Verkehrsinfrastruktur wird somit explizit als ein vorrangiger Bereich im Hinblick auf Datenschutzfragen adressiert.

Vorrangige Maßnahmen sind gemäß Art 3 sind:

- die Bereitstellung EU-weiter multimodaler Reise-Informationsdienste,
- die Bereitstellung EU-weiter Echtzeit-Verkehrsinformationsdienste,
- Daten und Verfahren, um Straßennutzern, soweit möglich, ein Mindestniveau allgemeiner für die Straßenverkehrssicherheit relevanter Verkehrsmeldungen unentgeltlich anzubieten,
- harmonisierte Bereitstellung einer interoperablen EU-weiten eCall-Anwendung,
- Bereitstellung von Informationsdiensten für sichere Parkplätze für Lastkraftwagen und andere gewerbliche Fahrzeuge,
- Bereitstellung von Reservierungsdiensten für sichere Parkplätze für Lastkraftwagen und andere gewerbliche Fahrzeuge.

Im Hinblick auf witterungsabhängige Steuerungskonzepte für Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) sind insbesondere die vorrangigen Maßnahmen zur **Bereitstellung von Echtzeit-Verkehrsinformationsdienste** sowie von **Daten und Verfahren für Verkehrsmeldungen** von Interesse.

Anforderungen an Echtzeit-Verkehrsinformationsdienste

An Echtzeit-Verkehrsinformationsdienste werden in Anhang 1, vorrangiger Bereich I, Nr. 2 C-ITS-RL Anforderungen gestellt hinsichtlich:

- Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von Verkehrsdaten,
- Erleichterung des grenzüberschreitenden Datenaustauschs sowie

- zeitnahe Aktualisierung von Verkehrsdaten und Echtzeit-Verkehrsinformationen.

Daten und Verfahren für Verkehrsmeldungen

Hinsichtlich der Daten und Verfahren für Verkehrsmeldungen bestehen nach Anhang 1, vorrangiger Bereich I, Nr. 4 C-ITS-RL folgende Anforderungen:

- Erstellung und Verwendung einer standardisierten Liste sicherheitsrelevanter Verkehrsereignisse, die den IVS-Nutzern unentgeltlich übermittelt werden sollten, sowie
- Kompatibilität dieser Ereignisse mit und deren Integration in IVS-Dienste

2.6.2 Delegierte Verordnungen zur Ergänzung der Richtlinie 2010/40/EU

Zu den vorrangigen Maßnahmen hat die Europäische Kommission gemäß Art. 6 Abs. 1 und Art. 7 der IVS-RL Spezifikationen in Form von Delegierten Verordnungen (Del. VO) erlassen, die unmittelbare Gültigkeit in den Mitgliedstaaten besitzen.

Del. VO (EU) 2015/962 zur Ergänzung der RL 2010/40/EU hinsichtlich Echtzeit-Verkehrsinformationsdienste

Die Delegierte Verordnung (EU) 2015/962 nimmt bzgl. der Verwendung von Echtzeit-Verkehrsinformationsdienste Bezug zu:

- Personenbezogene Daten,
- Zugänglichkeit und Aktualisierung von Daten,
- Normung,
- Datenkategorien (Straßen- und Verkehrsdaten).

Personenbezogene Daten

In Erwägungsgrund 9 der Del. VO (EU) 2015/962 wird bestimmt, dass **personenbezogene Daten unwiderruflich anonymisiert** werden und ferner die **Grundsätze** der **Zweckbindung** sowie der **Datenminimierung einzuhalten** sind.

Zudem soll die Verarbeitung von Daten im Einklang mit Unionsrecht stehen. Hierbei wird explizit auf die Datenschutz-Richtlinie (RL 95/46/EG), die inzwischen durch die Datenschutz-Grundverordnung (EU) 2016/679 ersetzt wurde, sowie die ePrivacy-Richtlinie (RL 2002/58/EG) verwiesen.

Zugänglichkeit und Aktualisierung von Daten

Hinsichtlich der Zugänglichkeit und Aktualisierung von Daten enthält die Delegierte Verordnung Del. VO (EU) 2015/962 folgende Festlegungen.

Art. 4 bis 6 beinhalten Regelungen zu Zugänglichkeit, Austausch und Weiterverwendung von Daten. Die Daten sollen in einem maschinenlesbaren, genormten Format, das mit DATEX II kompatibel und interoperabel ist, diskriminierungsfrei und rechtzeitig über einen nationalen Zugangspunkt zur Verfügung gestellt werden.

Art. 7 S. 2 bestimmt, dass Straßenverkehrsbehörden, Straßenbetreiber und Diensteanbieter alle Daten regelmäßig aktualisieren und Ungenauigkeiten rechtzeitig berichtigen, damit sich Echtzeit-Verkehrsinformationsdienste gemäß Art. 7 S. 1 Del. VO (EU) 2015/962 auf aktuelle statische Straßendaten, dynamische Straßenstatusdaten und Verkehrsdaten oder auf Kombinationen dieser Daten stützen können.

Art. 8 bis 10 Del. VO (EU) 2015/962 beinhalten konkretere Regelungen zur Aktualisierung dieser Daten.

Normung

In Erwägungsgrund 11 der Del. VO (EU) 2015/962 wird zur Normung auf europäische und internationale Normungsorganisationen wie DATEX II (CEN/TS 16157) oder ISO verwiesen.

Datenkategorien (Straßen- und Verkehrsdaten)

Die Delegierte Verordnung sieht hinsichtlich der Bereitstellung EU-weiter Echtzeit-Informationsdienste drei Kategorien von Daten vor. In Art. 2 der Del. VO (EU) 2015/962 werden unter Nummer 6 bis 8 folgende Kategorien definiert:

- statische Straßenstatusdaten,
- dynamische Straßendaten,
- Verkehrsdaten.

Im Anhang der delegierten Verordnung werden zu den einzelnen Datenkategorien Beispiele in nicht abschließenden Aufzählungen aufgeführt.

Zu den statischen Straßendaten zählen gemäß Anhang Nr. 1:

- Geometrie,
- Straßenbereite,
- Anzahl Fahrstreifen
- Längsneigung,
- Kreuzungen,
- Verkehrszeichen,
- Geschwindigkeitsbegrenzungen
- Standorte von Parkplätzen
- etc.

Dynamische Straßenstatusdaten sind gemäß Anhang Nr. 2

- Sperrungen,
- Baustellen,
- Unfälle,
- Störungen,
- Dynamische Geschwindigkeitsbegrenzungen,
- **Wetterbedingungen mit Auswirkungen auf Straßenbelag und Sichtbarkeit,**
- etc.

Verkehrsdaten sind nach Anhang 3:

- Verkehrsaufkommen,
- Geschwindigkeit,
- Lage und Länge von Verkehrsstaus,
- Reisezeiten,
- etc.

Del. VO (EU) 886/213 zur Ergänzung der RL 2010/40/EU hinsichtlich Daten und Verfahren für Verkehrsmeldungen

Die Delegierte Verordnung (EU) 886/213 nimmt bzgl. der Verwendung von Daten und Verfahren für Verkehrsmeldungen Bezug zu:

- Personenbezogene Daten,
- Zugänglichkeit und Aktualisierung von Daten,
- Normung,

- Ereigniskategorien.

Personenbezogene Daten

In Erwägungsgrund 5 der Del. VO (EU) 886/2013 wird bestimmt, dass **personenbezogene Daten unwiderruflich anonymisiert** werden und ferner die **Grundsätze** der **Zweckbindung** sowie der **Datenminimierung einzuhalten** sind.

Zudem soll die Verarbeitung von Daten im Einklang mit Unionsrecht stehen. Hierbei wird explizit auf die Datenschutz-Richtlinie (RL 95/46/EG), die inzwischen durch die Datenschutz-Grundverordnung (EU) 2016/679 ersetzt wurde, sowie die ePrivacy-Richtlinie (RL 2002/58/EG) verwiesen.

Zugänglichkeit und Aktualisierung von Daten

Im Hinblick auf die Zugänglichkeit und Aktualisierung von Daten enthält die Delegierte Verordnung Del. VO (EU) 2015/962 folgende Festlegungen.

In Art. 7 der Del. VO (EU) 886/2013 ist festgelegt, dass Daten von Straßenbetreibern und Dienstleistern in einem maschinenlesbaren Format über einen Zugangspunkt, der von den Mitgliedstaaten verwaltet wird, zur Verfügung stehen müssen.

In Absatz 3 ist geregelt, dass die Bereitstellung der Daten diskriminierungsfrei zu erfolgen hat.

Absatz 4 bestimmt, dass Straßenbetreiber und Dienstleister die rechtzeitige Aktualisierung und Qualität der Daten gewährleisten müssen.

Normung

In Art. 7 der Del. VO (EU) 886/2013 wird zum Austausch von Daten zwischen Straßenbetreibern und/oder Dienstleistern auf das Format DATEX II (CEN/TS 16157) oder ein damit vollständig kompatibles Format verwiesen.

Ereigniskategorien

In Art. 3 Del. VO (EU) 886/2013 werden die sicherheitsrelevanten Ereignisse und Bedingungen aufgeführt (standardisierte Liste gem. Anhang 1, vorrangiger Bereich 1, Nr. 4 C-ITS-RL, s.o. B.I.2.b.). Folgende Ereigniskategorien werden hierbei unterschieden:

- **vorübergehend rutschige Fahrbahn**;
- Tiere, Personen, Hindernisse, Gegenstände auf der Fahrbahn;
- ungesicherte Unfallstellen;
- Kurzzeitbaustellen;
- **eingeschränkte Sicht**;
- Falschfahrer;
- nicht ausgeschilderte Straßenblockierungen;
- **außergewöhnliche Witterungsbedingungen**.

2.6.3 Datenschutzgrundverordnung (DSGVO)

Die datenschutzrechtlichen Anforderungen aus der IVS-RL und den Del. VO stehen mit den Anforderungen der DSGVO in Einklang. Die Anforderungen der DSGVO gehen jedoch darüber hinaus. Auch diese Anforderungen sind bei der Verarbeitung personenbezogener Daten zu beachten. Auf nachfolgende Themenfelder wird im Weiteren eingegangen:

- Personenbezogene Daten,
- Datenverarbeitung,

- Löschpflichten/Recht auf Vergessenwerden,
- Privacy by Design/Privacy by Default,
- Verantwortliche Stelle / Auftragsverarbeiter.

Personenbezogene Daten

Personenbezogene Daten sind nach Art. 4 Nr. 1 der DSGVO sämtliche Informationen, die sich auf eine identifizierte oder identifizierbare natürliche Person (im Folgenden „betroffene Person“) beziehen.

Datenverarbeitung

Die Grundsätze für die Verarbeitung personenbezogener Daten sind in Art. 5 der DSGVO festgelegt. Danach sind im Rahmen der Datenverarbeitung beispielsweise folgende Anforderungen einzuhalten:

- Grundsatz zur Datenminimierung,
- Gebot zur Transparenz,
- Sicherung der Integrität und Vertraulichkeit der Daten.

Löschpflichten/Recht auf Vergessenwerden

Die Pflicht zum Löschen von Daten können sich aus Art. 17 Abs. 1 der DSGVO ergeben. Hier wird einer betroffenen Person das Recht einräumt, von dem Verantwortlichen zu verlangen, personenbezogene Daten unverzüglich zu löschen. Der Verantwortliche ist jedoch auch dazu verpflichtet, personenbezogene Daten unverzüglich zu löschen, wenn einer der folgenden Gründe vorliegt:

- Die personenbezogenen Daten sind für die Zwecke, für die sie erhoben oder auf sonstige Weise verarbeitet wurden, nicht mehr notwendig.
- Die betroffene Person widerruft ihre Einwilligung, auf die sich die Verarbeitung stützte und es an einer anderweitigen Rechtsgrundlage für die Verarbeitung fehlt.
- Die betroffene Person legt Widerspruch gegen die Verarbeitung ein und es liegen keine vorrangigen berechtigten Gründe für die Verarbeitung vor.
- Die personenbezogenen Daten wurden unrechtmäßig verarbeitet.
- Die Löschung der personenbezogenen Daten ist zur Erfüllung einer rechtlichen Verpflichtung nach dem Unionsrecht oder dem Recht der Mitgliedstaaten erforderlich, dem der Verantwortliche unterliegt.
- Die personenbezogenen Daten wurden in Bezug auf angebotene Dienste der Informationsgesellschaft für Kinder unter 16 Jahre erhoben.

Gegebenenfalls gilt es, gesetzliche Aufbewahrungspflichten zu beachten.[8]

Das Recht auf Vergessenwerden regelt Art. 17 Abs. 2 der DSGVO. Danach ist der Verantwortliche dazu verpflichtet, unter Berücksichtigung der verfügbaren Technologien und der Implementierungskosten angemessene Maßnahmen, die auch technischer Art sein können, zu treffen, um für die Datenverarbeitung Verantwortliche, welche die personenbezogenen Daten verarbeiten, darüber zu informieren, dass eine betroffene Person von ihnen die Löschung aller Links zu diesen personenbezogenen Daten oder von Kopien oder Replikationen dieser personenbezogenen Daten verlangt hat.

[8] In Betracht zu ziehen sind hier insbesondere solche Aufbewahrungsfristen aus Steuer- und Handelsrecht.

Privacy by Design/Privacy by Default

Bei der Verarbeitung von Daten ist der Datenschutz durch Technikgestaltung („Privacy by Design“) und durch datenschutzfreundliche Voreinstellungen („Privacy by Default“) zu beachten. Art. 25 Abs. 1 der DSGVO hält hierzu folgendes fest.

„Unter Berücksichtigung des Stands der Technik, der Implementierungskosten und der Art, des Umfangs, der Umstände und der Zwecke der Verarbeitung, sowie der unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeit und Schwere der mit der Verarbeitung verbundenen Risiken für die Rechte und Freiheiten natürlicher Personen, trifft der Verantwortliche sowohl zum Zeitpunkt der Festlegung der Mittel für die Verarbeitung als auch zum Zeitpunkt der eigentlichen Verarbeitung geeignete technische und organisatorische Maßnahmen – wie z. B. Pseudonymisierung –, die dafür ausgelegt sind, die Datenschutzgrundsätze, wie etwa Datenminimierung, wirksam umzusetzen und die notwendigen Garantien in die Verarbeitung aufzunehmen, um den Anforderungen dieser Verordnung zu genügen und die Rechte der betroffenen Personen zu schützen.“

Verantwortliche Stelle/Auftragsverarbeiter

Nach Art. 4 Nr. 7 der DSGVO ist der **Verantwortliche** eine

- natürliche oder juristische Person,
- Behörde,
- Einrichtung oder
- andere Stelle,

die allein oder gemeinsam mit anderen über die Zwecke und Mittel der Verarbeitung von personenbezogenen Daten entscheidet.

Sind die Zwecke und Mittel dieser Verarbeitung durch das Unionsrecht oder das Recht der Mitgliedstaaten vorgegeben, so kann der Verantwortliche beziehungsweise können die bestimmten Kriterien seiner Benennung nach dem Unionsrecht oder dem Recht der Mitgliedstaaten vorgesehen werden.

Eine **Auftragsverarbeitung** bei Daten im Auftrag des Verantwortlichen durch einen Auftragsverarbeiter verarbeitet werden, kann gemäß Art. 4 Nr. 8 bzw. Art. 28 der DSGVO hierbei ebenfalls in Betracht gezogen werden.

2.6.4 Bundesdatenschutzgesetz (BDSG)

Das Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) wurde in Deutschland aufgrund des Erlasses der DSGVO im Jahr 2018 neu gefasst.

Maßgeblich sind hier die Teile 2 und 3 des BDSG. Der Teil 2 enthält die Durchführungsbestimmungen für die Verarbeitung zu Zwecken gemäß Art. 2 der DSGVO. Der Teil 3 beinhaltet die Bestimmungen für die Verarbeitung zu Zwecken gemäß Art. 1 Abs. 1 der JI-Richtlinie (RL 2016/680/EU).

2.6.5 Richtlinien zur Netzwerk- und Informationssicherheit (NIS)

Die Richtlinie über Maßnahmen für ein hohes gemeinsames Cybersicherheitsniveau in der Union (NIS-2-Richtlinie) wurde am 14. Dezember 2022 durch die EU veröffentlicht und hebt die bisherige Richtlinie über Maßnahmen zur Gewährleistung eines hohen gemeinsamen Sicherheitsniveaus von Netz-Informationssystemen in der Union (NIS-Richtlinie) zum 18. Oktober 2024 auf.

Durch die NIS-2-Richtlinie werden strengere Anforderungen an die nationalen Behörden als durch die bisherige NIS-Richtlinie gestellt. Für die nationalen Behörden gelten nun strengere Aufsichtsmaßnahmen und strengere Durchsetzungsanforderungen. Durch eine Vereinheitlichung der Sanktionsmöglichkeiten wird eine weitgehende Harmonisierung der Regelungen in allen Mitgliedstaaten erreicht.

Die Mitgliedstaaten werden durch die Richtlinie zur Verabschiedung einer nationalen Cybersicherheitsstrategie verpflichtet. Darüber hinaus sind nationale Computer Security Incident Response Teams (CSIRTs) einzurichten, die für den Umgang mit Risiken und Störungen innerhalb der Netz- und Informationssysteme zuständig sind. Mit der Einrichtung sog. Single Point of Contact (SPoC) soll die grenzüberschreitende Zusammenarbeit der Behörden der Mitgliedstaaten sichergestellt werden.

Bei einem Netz- und Informationssystem handelt nach Art. 6 Nr. 1 NIS-2-Richtlinie um ein elektronisches Kommunikationsnetz im Sinne des Art. 2 Nummer 1 der (RL 2018/1972/EU). Danach gelten als elektronische Kommunikationsnetze sämtliche Übertragungssysteme, unabhängig davon,

- ob sie auf einer permanenten Infrastruktur oder zentralen Verwaltungskapazität basieren,
- gegebenenfalls Vermittlungs- und Leitwegeinrichtungen sowie anderweitige Ressourcen — einschließlich der nicht aktiven Netzbestandteile –, die die **Übertragung von Signalen** über **Kabel**, **Funk**, **optische** oder **andere elektromagnetische Einrichtungen** ermöglichen,
- einschließlich **Satellitennetze**,
- **feste** (leitungs- und paketvermittelt, einschließlich Internet) und **mobile Netze**,
- Stromleitungssysteme, soweit sie zur Signalübertragung genutzt werden,
- Netze für Hör- und Fernsehfunk sowie Kabelfernsehnetze, unabhängig von der Art der übertragenen Informationen.

Anstelle von „Betreiber wesentlicher Dienste“ wird nun differenziert zwischen wesentliche und wichtige Einrichtungen. Einrichtungen die bisher als „Betreiber wesentlicher Dienste“ bezeichnet wurden, sollen nun als wesentliche Einrichtungen gelten. Beispiele für wesentliche Einrichtungen sind in Anhang 1 und Anhang 2 der Richtlinie aufgeführt.

In Anhang 1 sind die Beispiele getrennt nach einzelnen Sektoren (Sektoren mit hoher Kritikalität) aufgeführt. Der Sektor Verkehr ist in die Teilsektoren Luftverkehr, Schienenverkehr, Schifffahrt und Straßenverehr untergliedert. Als **wesentliche Einrichtungen** gelten demnach für den **Teilsektor Straßenverkehr**

- **Straßenverkehrsbehörden** die für **Verkehrsmanagement** und **Verkehrssteuerung** verantwortlich sind
- **Betreiber intelligenter Verkehrssysteme**

Anbieter digitaler Dienste gelten als wichtige Einrichtungen (Sonstige kritische Sektoren). Gemäß Anhang 2 der Richtlinie handelt es sich hierbei um Anbieter von

- Online-Marktplätzen,
- Online-Suchmaschinen,
- Plattformen für Dienste soziale Netzwerke.

Mit der Richtlinie werden Regeln für wesentliche und wichtige Einrichtungen aufgestellt.

2.6.6 IT-Sicherheitsgesetz und IT-Sicherheitsgesetz 2.0

Das nationale IT-Sicherheitsgesetz aus dem Jahr 2015 und sein Nachfolgegesetz, das IT-Sicherheitsgesetz 2.0 aus dem Jahr 2021 bilden den rechtlichen Rahmen zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme und haben zu umfangreichen Änderungen u.a. im bundesdeutschen BSI-Gesetz geführt.

2.6.7 Gesetz des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI-Gesetz)

Das erste BSI-Gesetz (BSIG) wurde auf nationaler Ebene im Jahr 2009 veröffentlicht. Die verschiedenen nationalen und internationalen Vorschriften zum Datenschutz finden darin letztlich ihre Berücksichtigung und führen zu einer stetigen Fortschreibung. Das BSI-Gesetz ist für den **Betrieb Kritischer Infrastrukturen** in Deutschland maßgeblich.

Zu den Kritischen Infrastrukturen zählen nach § 2 Abs. 10 des BSI-Gesetzes Einrichtungen, Anlagen oder Teile davon, die den Sektoren Energie, Informationstechnik und Telekommunikation, **Transport und Verkehr**, Gesundheit, Wasser, Ernährung sowie Finanz- und Versicherungswesen angehören und von hoher Bedeutung für das Funktionieren des Gemeinwesens sind und bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung erhebliche Versorgungsengpässe oder Gefährdungen für die öffentliche Sicherheit eintreten.

Diese werden durch Rechtsverordnung nach § 10 Abs. 1 des BSI-Gesetzes durch Festlegung der in den jeweiligen Sektoren wegen ihrer Bedeutung als kritisch anzusehenden Dienstleistungen näher bestimmt. Weitere Festlegungen dazu erfolgt mittels der KRITIS-Verordnung (BSI-KritisV 2016). Gemäß § 8 der BSI-KritisV ist „Transport und Verkehr“ ein kritischer Sektor.

In § 8a des BSI-Gesetzes werden die Pflichten für Betreiber Kritischer Infrastrukturen festgelegt. Durch § 8b des BSI-Gesetzes wird das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) als zentrale Meldestelle für Betreiber Kritischer Infrastrukturen festgelegt.

2.6.8 Zusammenfassung der rechtlichen Rahmenbestimmungen zum Datenschutz

In der IVS-Richtlinie als auch in den Delegierten Verordnungen sind im Hinblick auf den Datenschutz einige fundamentale Grundsätze festgelegt. Sie enthalten datenschutzrechtliche Bestimmungen hinsichtlich

- Anonymisierung personenbezogener Daten,
- Datenminimierung,
- Einklang mit Unionsrecht,
- Sicherstellung des Schutzes personenbezogener Daten gegen Missbrauch.

Des Weiteren sind in den Regelwerken Grundsätze enthalten zur

- Zugänglichkeit und Verfügbarkeit von Daten,
- rechtzeitigen Aktualisierung von Daten.

Die Delegierten Verordnungen (Del. VO) enthalten außerdem Vorgaben zur

- technischen Normung nach europäischen Normungsorganisationen.

Die wesentlichen Grundsätze aus der IVS-RL und den Delegierten Verordnungen finden sich auch in der für alle Datenverarbeitungsvorgänge innerhalb der EU maßgeblichen Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) wieder.

2.6.9 Konsequenzen für Datenerfassung und Datenübertragung mittels C2X

Technologiebedingt ist über die zur Datenerfassung und Datenübertragung in C-ITS/C2X-fähigen Fahrzeugen verbaute On-board Unit (OBU) eine Fahrzeugidentifikation möglich. Darüber könnten potenziell personenbezogene Daten verarbeitet werden, obwohl die genaue Art der Daten nicht spezifiziert ist. Durch die Verwendung einer eindeutigen Fahrzeugkennung kann eine eindeutige Fahrzeugidentifikation stattfinden. Jedoch lassen sich dadurch noch keine Rückschlüsse auf eine natürliche Person ziehen.

Bei der Übertragung von CAM werden Informationen über die Position des Fahrzeugs gesendet (Positionsdaten). Da diese anonymisiert übertragen werden, ist erst in Verbindung mit weiteren Daten, wie z.B. einer Kennzeichenerfassung oder eines Videoüberwachungssystems, ggf. ein Personenbezug herstellbar. Dies würde gemäß der DSGVO ein sensibles Datum bedeuten, jedoch nicht als ein personenbezogenes oder gar sensitives Datum.

Die Übertragung der Daten von den ortsgebundenen Empfangseinheiten (RSU/Sende- und Empfangsmasten) zu einer Zentralen Leittechnik erfolgt über getrennte Netze. Die weitere Verarbeitung der Daten durch Rechner/Serversysteme stellen im Sinne der DSGVO technische und organisatorische Maßnahmen (TOM) dar. Dies ist jedoch keine Frage des Vorliegens personenbezogener Daten, sondern der Ausgestaltung der technischen Vorgänge.

Im Ergebnis werden bei der C2X/C-ITS-Technologie nur Daten zur Fahrzeugidentifikation und Daten über die Position eines Fahrzeugs verarbeitet. Daten einer natürlichen Person werden hierbei nicht genutzt. Ein Personenbezug würde erst dann hergestellt, wenn neben der Fahrzeugidentifikation eine Zuordnung zu einem Fahrzeughalter erfolgen würde. Da diese Verknüpfung nicht vorgesehen ist, werden bei diesem technischen Vorgang keine personenbezogenen Daten verarbeitet.

Im Rahmen des Projekts erfolgt lediglich die Auswertung von aufbereiteten, anonymisierten Daten. Es erfolgt keine Aggregierung mit Informationen, die Rückschlüsse auf persönliche Daten zulassen wie z.B. Videodetektion. Der Datenschutz ist daher durchweg gewährleistet.

Im Falle einer realen Anwendung in Echtzeit und der damit verbundenen Auswertung von einzelnen fahrzeuggenerierten Daten ist jedoch sicherzustellen, dass die genannten datenschutzrechtlichen Vorgaben eingehalten und insbesondere keine Verfahren entwickelt, eingesetzt und verbreitet werden, die eine Verknüpfung der Fahrzeugidentifikation mit Informationen zum Fahrzeughalter erlauben. Dies gilt insbesondere für Verfahren, die eine Kennzeichenerfassung ermöglichen, wie beispielsweise automatische Bildauswerteverfahren (Videosysteme), Section Control, Mautsysteme etc. Zur Einhaltung der Datenschutzrechtlichen Anforderungen kommt daher der anonymisierten Datenverarbeitung eine zentrale Rolle zu.

3 Untersuchungskonzept

Im folgenden Kapitel werden die Datenquellen und der Datenfluss beschrieben. Des Weiteren werden die zu untersuchenden Kenngrößen festgelegt, ein Bewertungskonzept definiert und die Untersuchungsstrecken vorgestellt.

3.1 Kriterien für den Einsatz wetterbezogener Datenquellen in der SBA-Steuerung

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Verfügbarkeit externer meteorologischer Daten ergibt sich grundsätzlich das Potenzial, solche Datenquellen auch automatisiert zur Unterstützung der SBA-Steuerung heranzuziehen. Bereits auf Grundlage der systemischen Anforderungen lassen sich allgemeine Kriterien formulieren, die bei einer zukünftigen Integration zu beachten wären:

1. **Räumliche Auflösung:** Die Daten sollten mindestens eine räumliche Auflösung von 1 km² oder kleiner aufweisen, um eine streckenbezogene Auswertung und AQ-Zuordnung zu ermöglichen. Diese räumliche Auflösung ermöglicht vor dem Hintergrund, dass AQ in der Regel in ca. 2 km Abständen in SBA errichtet werden, eine gute räumliche Zuordnung zu einem lokalen Sensor, ohne dass die räumliche Glättung der Information (insbesondere von extremen Witterungsverhältnissen) zu groß wird.
2. **Zeitliche Verfügbarkeit:** Eine möglichst zeitnahe Aktualisierung (≤ 1 Minuten) ist erforderlich, um dynamische Wetterlagen frühzeitig zu erfassen und in die Steuerung einzubeziehen. Die zeitliche Auflösung orientiert sich damit an der Steuerung mit lokalen Umfelddaten. Wäre die zeitliche Auflösung signifikant größer, würde sich dies nachteilig auf die Steuerungsqualität verglichen mit der Steuerung auf Basis von lokalen Messdaten auswirken.
3. **Zeit- und ortsgenaue Zuordnung:** Die Daten sollen präzise georeferenziert und mit einheitlich definierten Zeitstempeln versehen sein, um eine Synchronisation mit lokal erfassten oder fahrzeuggenerierten Daten zu ermöglichen.
4. **Kontinuität und Ausfallsicherheit:** Eine dauerhaft gesicherte Datenverfügbarkeit ist notwendig, um die Steuerungsfähigkeit zu erhalten.
5. **Standardisierte Schnittstellen:** Eine automatisierte Verarbeitung setzt voraus, dass die Daten über dokumentierte, maschinenlesbare Formate wie CSV, JSON oder OGC-konforme Webdienste zugänglich sind.
6. **Verlässlichkeit und Transparenz:** Für eine belastbare Verwendung in sicherheitskritischen Steuerungsverfahren müssen Herkunft, Erhebungsmethoden und ggf. Glättungs- oder Interpolationsverfahren der Daten nachvollziehbar dokumentiert sein.

Diese übergeordneten Anforderungen sind aus derzeitiger Sicht als orientierend zu verstehen. Sie schaffen jedoch bereits in der Grundlagenbetrachtung ein wichtiges Fundament für eine spätere Bewertung der Eignung solcher Datenquellen zur Nutzung im Rahmen automatisierter, witterungsbasierter Steuerungsverfahren.

3.2 Einzubindende Datenquellen und Datenbeschaffungskonzept

Für die Untersuchung wurden konventionelle Umfelddaten an zwei Untersuchungsstrecken mit erweiterten Umfelddaten und fahrzeuggenerierten Daten gegenübergestellt. Hierfür stehen lokale Umfelddaten der Autobahn GmbH zur Verfügung. Diese wurden durch stationäre Umfelddatensensoren entlang der Untersuchungsstrecken ermittelt. Zusätzlich stellt die Autobahn GmbH die Schaltungen der AQs auf den beiden Untersuchungsstrecken bereit. Darüber hinaus wurden RADOLAN Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Dabei handelt es sich um flächendeckende, radarbasierte Niederschlagsdaten, die für ganz Deutschland verfügbar sind. Sie können über die Webseite des Deutschen Wetterdiensts bezogen und in verschiedenen zeitlichen und räumlichen Auflösungen genutzt werden. Die bisher genannten Datenarten werden durch fahrzeuggenerierte Daten ergänzt. Diese Untersuchung verwendet fahrzeuggenerierte Daten von zwei verschiedenen Datenbereitstellern. Bei diesen Daten handelt es sich um Daten, die direkt auf der Fahrbahn durch Fahrzeuge gemessen und durch die Datenbereitsteller aufbereitet und aggregiert worden sind.

Da in den fahrzeuggenerierten Daten keine Informationen über die Sichtweite enthalten sind, beschränkt sich die Untersuchung auf Daten zur Nässe.

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Untersuchungsstrecken beschrieben und die zwei ausgewählten Strecken vorgestellt.

3.3 Untersuchungsstrecken

Anhand der geplanten Untersuchungen wurden folgende Anforderungen an die Untersuchungsstrecken definiert:

- Möglichst große Länge, kombiniert mit einer möglichst umfangreichen und dichten stationären Umfelddatenerfassung;
- Verfügbarkeit archivierter Umfeld-, Verkehrs- und Schaltdaten im dokumentierten und maschinenlesbaren Format (Textdateien (*.csv, *.txt, *.xml) oder Datenbank) für mindestens ein Jahr;
- Umfeldbezogene Steuerungsverfahren nach MARZ (1999 bzw. 2018) mit bekannten bzw. dokumentierten Schwellenwerten zur Nachvollziehbarkeit der Schaltungen;
- Verfügbarkeit von mindestens einer Quelle für fahrzeugbasierte Daten, ebenfalls möglichst für mindestens ein Jahr;
- Ausreichend hohe Verkehrsbelastungen, um auch bei den erwartbaren noch geringen Ausstattungsraten möglichst viele fahrzugbasierte Informationen zu erhalten;
- Erfahrungen mit den Anlagen/Daten liegen im Bearbeiterkonsortium vor.

Aufgrund dieser Randbedingungen wurden zwei Untersuchungsstrecken ausgewählt: einerseits die Nebelwarnanlage auf der A8 zwischen Hohenstadt und Riedheim und andererseits die Streckenbeeinflussungsanlage auf der A8 zwischen Leonberg und Wendlingen.

3.3.1 Nebelwarnanlage BAB A8 Hohenstadt – Riedheim (Untersuchungsstrecke NWA)

Die Nebelwarnanlage auf der BAB A8 zwischen Hohenstadt und Riedheim erstreckt sich über eine Länge von 84,8 km, davon 42,8 km in Fahrtrichtung Stuttgart und 42 km in Fahrtrichtung München (siehe Bild 5). Ihre Inbetriebnahme erfolgte im Jahre 2016. Der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) auf diesem Streckenabschnitt beträgt 71.600 Kfz/24 h bei einem Schwerverkehrsanteil von 16,3 %. Im weiteren Verlauf wird diese Strecke als Untersuchungsstrecke NWA bezeichnet.

Die Untersuchungsstrecke NWA umfasst insgesamt 43 AQs in beiden Fahrtrichtungen. 11 Wetterstationen stehen für die Umfelddatenerfassung zur Verfügung. Die Zuweisungen von AQs zu Umfelddatensensoren sind in Tab. 7 aufgelistet.

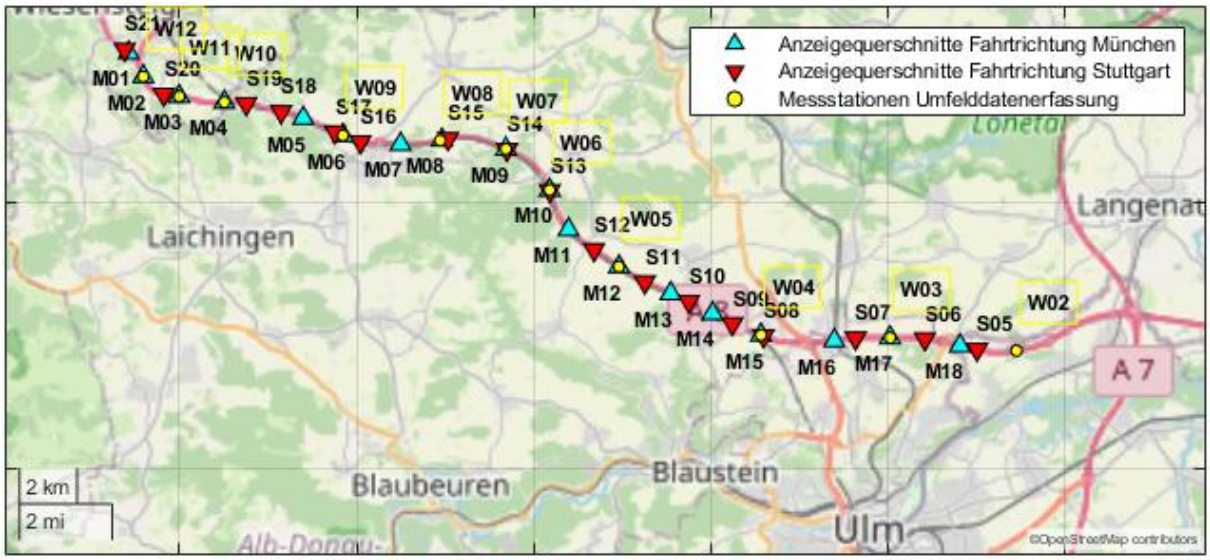

Bild 5: Untersuchungsstrecke NWA auf der BAB A8 zwischen Hohenstadt und Riedheim. Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

Bezeichnung Umfelddatensensor	Anzeigequerschnitte
W02	M18
W03	M16, M17, S05, S06
W04	M13, M14, M15, S07, S08
W05	M11, M12, S09, S10, S11
W06	M10, S12, S13
W07	M09, S14
W08	M07, M08, S15
W09	M05, M06, S16, S17
W10	M04, S18, S19
W11	M03, S20
W12	M01, M02, S21

Tab. 7: Umfeldsensoren auf Untersuchungsstrecke NWA mit zu speisenden Anzeigequerschnitten

3.3.2 Streckenbeeinflussungsanlage BAB A8 Leonberg – Wendlingen (Untersuchungsstrecke SBA)

Die Streckenbeeinflussungsanlage auf der BAB A8 zwischen Leonberg und Wendlingen hat eine Länge von 63 km, davon 32 km in Fahrtrichtung Karlsruhe und 31 km in Fahrtrichtung München (siehe Bild 6). Sie wurde im Jahr 2012 in Betrieb genommen. Der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) auf diesem Streckenabschnitt beträgt 150.500 Kfz/24 h bei einem Schwerverkehrsanteil von 12,6 %. Im weiteren Verlauf wird diese Strecke als Untersuchungsstrecke SBA bezeichnet.

Insgesamt stehen auf der Untersuchungsstrecke SBA 45 AQs in beiden Fahrtrichtungen zur Verfügung. Für die Umfelddatenerfassung sind 11 Messstationen installiert, die u. a. den Niederschlag messen und den Fahrbahnzustand erfassen. Die Zuweisungen von AQs zu Umfelddatensensoren sind in Tab. 8 aufgelistet.

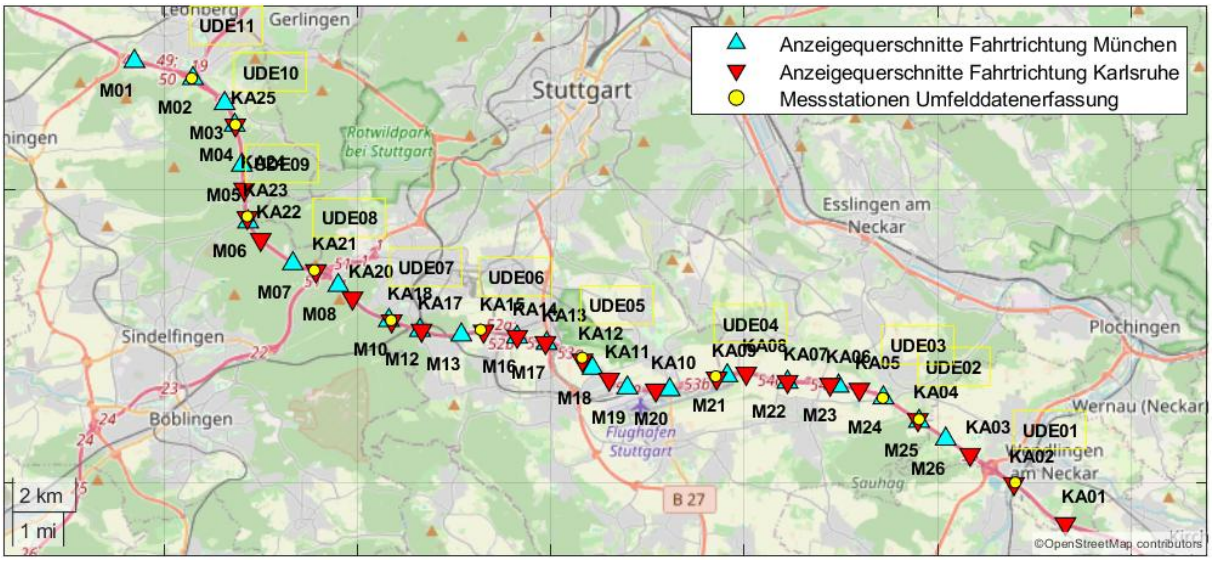

Bild 6: Untersuchungsstrecke SBA auf der BAB A8 zwischen Leonberg und Wendlingen. Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

Bezeichnung Umfelddatensensor	Anzeigequerschnitte
UDE01	KA01, KA02, KA03, M26
UDE02	KA03, KA04, M24, M25, M26
UDE03	KA05, KA06, M22, M23, M24
UDE04	KA07, KA08, KA09, M19, M20
UDE05	KA10, KA11, KA12, M17, M18
UDE06	KA13, KA14, KA15, M12, M13
UDE07	KA17, KA18, M08, M10
UDE08	KA20, KA21, M07, M08
UDE09	KA22, KA23, M05, M06
UDE10	KA24, KA25, M03, M04
UDE11	KA25, M01, M02, M03

Tab. 8: Umfeldsensoren auf Untersuchungsstrecke SBA mit zu speisenden Anzeigequerschnitten

3.4 Datenfluss

Der Datenfluss und die wesentlichen Funktionsblöcke der Datenverarbeitung sind in Bild 7 dargestellt. Details zu den einzelnen Verarbeitungsschritten und den Auswertungen sind in den Kapiteln 4, 5 und 6 beschrieben.

Sämtliche zu verarbeitende witterungsbezogene Daten („Umfelddaten“: Stationäre Daten FG3; fahrzeuggenerierte Daten; Niederschlagsradarinformationen des Deutschen Wetterdienstes) werden in eine Analyseumgebung importiert und aufbereitet (räumliche und zeitliche Synchronisierung). Die aufbereiteten Daten werden einerseits gegenübergestellt und vergleichend analysiert. Andererseits werden mit verschiedenen Ansätzen und Kombinationen von Daten „Nässestufen“ ermittelt, die ebenfalls vergleichend analysiert werden. Nässestufen sind i. d. R. eindeutig mit nässebezogenen Schaltvorschlägen verknüpft (z. B. „T80+ Nässewarnung“).

Bei der Datenverarbeitung sind vier wesentliche Funktionsblöcke zu unterscheiden, die in Bild 7 dargestellt sind. Technisch sind die Datenaufbereitung (oben links), die vergleichende Datenauswertung (unten links) sowie Verfahren zur Ermittlung von Nässestufen (oben rechts) mit Matlab umgesetzt. Die Analyse der Nässestufen (unten rechts) erfolgt in Excel. Ergebnisse sind Diagramme und statistische Auswertungen zum direkten Vergleich der Umfelddaten sowie der mit verschiedenen Ansätzen ermittelten Nässestufen.

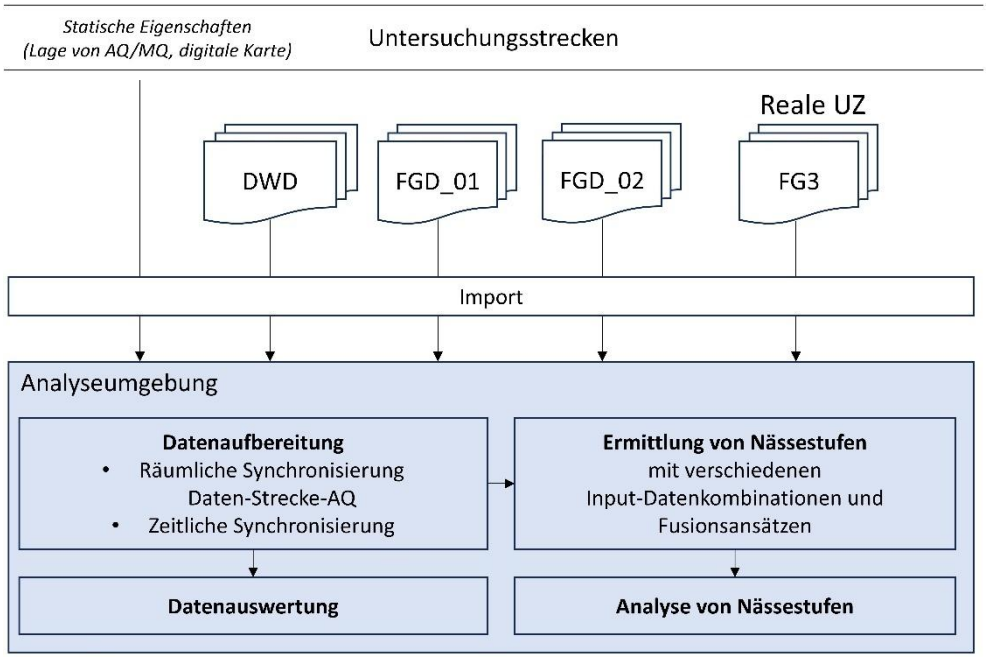

Bild 7: Tools und Datenfluss im Projekt

4 Datenaufbereitung

Da die verwendeten Datenarten unterschiedliche zeitliche Auflösungen und verschiedene räumliche Zuordnungen besitzen, wird in diesem Kapitel die zeitliche Synchronisierung und räumliche Zuordnung dargestellt, damit eine Vergleichbarkeit ermöglicht wird. Für die zeitliche Synchronisierung werden alle Daten auf ein 1-Minuten Raster gebracht. Für die räumliche Zuordnung wird folgender Ansatz gewählt: Als räumlicher Zuordnungspunkt werden die AQ-Standorte definiert. Die Umfeld- und Schaltdaten werden bereits von der Autobahn GmbH den AQ-Standorten zugeordnet. Bei den RADOLAN-Daten des Deutschen Wetterdiensts wird der nächstliegende Datenpunkt den AQ-Standorten zugeordnet. Die fahrzeuggenerierten Daten werden dem entgegen der Fahrtrichtung nächsten AQ zugewiesen. Details zu dem beschriebenen Vorgehen für die zeitliche Synchronisierung und räumliche Zuordnung sind für jede Datenart in Kapitel 4.2 und 4.3 zu finden.

4.1 Überblick

Tab. 9 zeigt eine Übersicht der verwendeten Datenarten, die Datenbereitsteller, die räumliche und zeitliche Auflösung sowie die Verfügbarkeit für die beiden Untersuchungsstrecken (NWA und SBA) für das Jahr 2023. Es liegen zweierlei fahrzeuggenerierte Daten vor. Da es nicht um eine Bewertung, sondern um eine Grundlagenermittlung und Potentialanalyse geht, werden die Datenquellen (Fahrzeughersteller/Zulieferer) anonymisiert als „FGD_01“ und FGD_02“ dargestellt. FGD_01 wurde direkt vom Hersteller bereitgestellt. FGD_02 wurde von der Autobahn GmbH aufbereitet zur Verfügung gestellt. Die RADOLAN-Daten des Deutschen Wetterdienstes werden im Folgenden einheitlich als „DWD-Daten“ bezeichnet.

Datenart	Datenbereitsteller	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Verfügbarkeit 2023
Fahrzeuggenerierte Daten (FGD_01)	Hersteller	Streckensegmente (in Form von Geokoordinaten)	Ereignisbasierte Daten, in 10-Minuten Paketen vorliegend	SBA, NWA
Aufbereitete Fahrzeuggenerierte Daten (FGD_02)	Autobahn GmbH	zugeordnet zu AQs	Ereignisbasierte Daten	Untersuchungsstrecke SBA (6.2.23 – 31.12.23)
Radar-Online-Aneichung RADOLAN (DWD)	Deutscher Wetterdienst	1 km x 1 km Raster	5-Minuten-Intervall	Untersuchungsstrecke SBA und NWA
Umfelddaten (FG3)	Autobahn GmbH	zugeordnet zu AQs	1-Minuten-Intervall	Untersuchungsstrecke SBA und NWA
Schaltungen (FG4)	Autobahn GmbH	zugeordnet zu AQs	Ereignisbasiert	Untersuchungsstrecke SBA und NWA

Tab. 9: Überblick über die Datenarten der verschiedenen Datenlieferanten

In Tab. 9 sind für die verschiedenen Datenarten die vorliegenden Kenngrößen inkl. Einheit und Beispielwert bzw. Ausprägung dargestellt. Im Bericht werden die Kenngrößen mit der hier angeführten Bezeichnung („FGD_01 Reibung“ etc.) benannt. Weitere Informationen zu den Kenngrößen der einzelnen Datenarten – insbesondere zum Datenformat und den enthaltenen Inhalten – sind in Kapitel 4.2 ausführlich beschrieben.

Die vorliegenden Daten sind bzgl. der Inhalte (Kenngrößen) sowie der räumlichen und zeitlichen Auflösung heterogen. Für die Gegenüberstellung der Daten aus unterschiedlichen Quellen (Kapitel 5) und die Ermittlung von Schaltvorschlägen/Nässestufen (Kapitel 6) werden die Daten auf ein einheitliches räumliches und zeitliches Raster gebracht.

Datenart	Kenngröße, Beschreibung	Bezeichnung	Einheit	Beispielwerte / Ausprägungen
Fahrzeuggenerierte Daten (FGD_01)	Friction, Reibbeiwert (Mittelwert)	FGD_01 Reibung	-	0,9755423
	Min Friction, Reibbeiwert (Minimum)	FGD_01 Reibung (Minimum)	-	0,9317647
	Max Friction, Reibbeiwert (Maximum)	FGD_01 Reibung (Maximum)	-	0,99764705
	Temperature, Lufttemperatur	FGD_01 Lufttemperatur	°C	3,25
	Wiperspeed, Scheibenwischergeschwindigkeit	FGD_01 Wischerfrequenz	Hz	0,136
Aufbereitete Fahrzeuggenerierte Daten (FGD_02)	RainIntensity, Niederschlagsintensität-Stufe	FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe	-	„None“, „Low“, „Medium“, „High“
	RoadCondition, Fahrbahnzustand	FGD_02 Fahrbahnzustand	-	„Dry”, „Wet”, „Slippery Wet”, „Slippery Ice”
	Temperature, Lufttemperatur	FGD_02 Lufttemperatur	°C	11,9
Radar-Online-Aneichung RADOLAN (DWD)	RADOLAN, Niederschlagsintensität	DWD Niederschlagsintensität	mm/5min	0,2000
Umfelddaten (FG3)	FBT, Fahrbahntemperatur	FG3 Fahrbahntemperatur	° C	„7,8“
	FBZ, Fahrbahnzustand	FG3 Fahrbahnzustand	-	„trocken“, „feucht“, „nass“, „Eis“, „gefrorenes Wasser“
	LT, Lufttemperatur	FG3 Lufttemperatur	° C	„0,6“
	NI, Niederschlagsintensität	FG3 Niederschlagsintensität	mm/h	„3,6“
	NI-Stufe, Niederschlagsintensität-Stufe	FG3 Niederschlagsintensität-Stufe	-	„0“, „1“, „2“, „3“, „4“
	SW, Sichtweiten	FG3 Sichtweite	m	1000
	SW-Stufe, Sichtweiten-Stufe	FG3 Sichtweiten-Stufe	-	„0“, „1“, „2“, „3“, „4“, „5“
	WFD, Wasserfilmdicke	FG3 Wasserfilmdicke	µm	0,09
	WFD-Stufe, Wasserfilmdicke-Stufe	FG3 Wasserfilmdicke-Stufe	-	„0“, „1“, „2“, „3“
Schaltungen (FG4)	A-Typ, Anzeige	A-Typ	-	„60 km/h“, „120 km/h“, „Ende 100 km/h“, „Aus“
	B-Typ, Anzeige	B-Typ	-	Baustelle“, „Gefahr“, „Stau“, „ÜV Lkw“, „Ende Lkw ÜV“, „Aus“
	C-Typ, Anzeige	C-Typ	-	„1500 m“, „Auf 1500 m“, „Stau“, „Aus“

Tab. 10: Übersicht über aller Kenngrößen

4.2 Räumliche Synchronisierung der Daten

Im Folgenden wird die räumliche Synchronisierung der Daten beschrieben, ausgehend von den vorliegenden Dateiinhalten und -formaten. Da das Ziel die Datenanalyse im Hinblick auf eine Integration der Daten in die Streckenbeeinflussung ist, werden die AQs auf den Untersuchungsstrecken als Bezugsraster gewählt.

4.2.1 Fahrzeuggenerierte Daten (FGD_01)

Die fahrzeuggenerierten Daten FGD_01 enthalten den Reibbeiwert μ zwischen Reifen und Fahrbahn (Mittelwert, Minimum, Maximum), die Lufttemperatur und die Wischerfrequenz, wobei jede Messgröße jeweils in einer eigenen Datei (*.csv) bereitgestellt wird. Tab. 11 zeigt exemplarisch den Inhalt der Rohdaten für die Wischerfrequenz.

Timestamp	Date	Wiperspeed	Linestrings
1674303000000	21.01.2023	0,3278	9,80889 48,51946; 9,80921 48,5194
1674303000000	21.01.2023	0,0433	9,81489 48,51802; 9,8152 48,51793
1674383400000	22.01.2023	0,0800	9,8105 48,51914; 9,81074 48,51909; 9,81082 48,51907; 9,81114 48,519
1674383400000	22.01.2023	0,0800	9,81146 48,51893; 9,81171 48,51887; 9,81177 48,51885; 9,81209 48,51877
1674383400000	22.01.2023	0	9,8124 48,5187; 9,81272 48,51862
1674383400000	22.01.2023	0	9,81272 48,51862; 9,81274 48,51861; 9,81303 48,51853
1674383400000	22.01.2023	0,2200	9,81458 48,51811; 9,81489 48,51802
1674398400000	22.01.2023	0	9,80889 48,51946; 9,80921 48,5194

Tab. 11: Auszug der Rohdaten für die Wischerfrequenz aus den FGD_01

Jede Zeile in den Kenngrößen-Dateien hat einen Zeitstempel (Unix-Zeit: Millisekunden seit dem 1. Januar 1970, 00:00 Uhr UTC) und eine Georeferenz in Form eines sog. Linestrings (Folge von Geokoordinaten), der einen Abschnitt von jeweils etwa 500 Metern auf einer der Untersuchungsstrecken beschreibt. Die angegebene Kenngröße (in Tab. 11 für die Wischerfrequenz) ist der Mittelwert der Kenngrößen, die von Fahrzeugen aus dem beschriebenen Abschnitt in den letzten 10 Minuten gemeldet wurden. Das 10-Minuten-Zeitfenster wird im Rhythmus von zehn Minuten auf Basis der jeweils verfügbaren Daten aktualisiert. Die genaue Anzahl der Fahrzeuge, die zur Bildung der Kenngröße in einem bestimmten Abschnitt und Zeitfenster beigetragen haben, ist den Daten jedoch nicht zu entnehmen. Entsprechend beträgt die zeitliche Auflösung der Daten 10 Minuten (einheitliches Raster, z. B. 09:20, 09:30, 09:40 etc.). Die Kenngrößen werden ereignisbasiert aufgezeichnet. Die Anzahl der vorliegenden 10-Minuten-Intervalle variiert mit der Anwesenheit meldender Fahrzeuge. So gibt es etwa 10-Minuten-Intervalle, in denen für viele Abschnitte Kenngrößen vorliegen und – vor allem nachts – auch 10-Minuten-Intervalle, in denen für keinen Abschnitt Kenngrößen vorliegen. Wenn für ein 10-Minuten-Intervall für einen AQ mehrere Meldungen vorlagen, wurde das arithmetische Mittel der jeweiligen Kenngröße gebildet.

Die Lufttemperatur und der Reibbeiwert liegen analog zur oben beschriebenen Wischerfrequenz vor. Einziger Unterschied ist, dass für den Reibbeiwert je Zeitintervall und Abschnitt neben dem Mittelwert auch ein Minimal- und ein Maximalwert vorliegen. Zusätzlich wird der Reibbeiwert über ein 1-Stunden-Zeitfenster ermittelt, welches auch alle 10 Minuten aktualisiert wird. Die Reibbeiwerte werden fahrzeugseitig nicht kontinuierlich, sondern fahrsituationsabhängig ermittelt und sind nach Aussage des Lieferanten aktuell

als Parameter zur Erkennung von Fahrbahnglätte durch Eis oder Schnee gedacht und nicht zur Erkennung von Fahrbahnfeuchte/-nässe geeignet. Wischerfrequenz und Lufttemperatur werden hingegen kontinuierlich, d.h. fahrsituationsunabhängig, gemessen.

Bild 8 zeigt exemplarisch die Geokoordinaten eines Linestrings. Die roten Punkte beschreiben Positionen von AQ in Fahrtrichtung Karlsruhe auf der Untersuchungsstrecke SBA, die türkisen Quadrate beschreiben Positionen von AQ in Fahrtrichtung München.



Bild 8: FGD_01-Geokoordinatenfolge (blaue Punkte). Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

Die Linestrings werden pro Fahrtrichtung dem jeweils stromaufwärts liegenden AQ zugeordnet. Fällt ein Linestring in den Einzugsbereich von zwei AQ, wird dieser Linestring beiden AQ zugeordnet. Der in Bild 8 dargestellte Linestring wird gemäß dieser Logik in Fahrtrichtung Karlsruhe dem AQ KA05 zugeordnet. In Fahrtrichtung München wird der Linestring den AQ M22 und M23 zugeordnet.

4.2.2 Fahrzeuggenerierte Daten (FGD_02)

Die fahrzeuggenerierten Daten FGD_02 liegen nur für die Untersuchungsstrecke SBA vor und enthalten als Kenngrößen die Niederschlagsintensität-Stufe („RainIntensity“), die Lufttemperatur („Temperature“) und den Fahrbahnzustand („RoadCondition“). Die Daten werden nicht direkt vom Fahrzeughersteller/Zulieferer bereitgestellt, sondern vorab durch die Autobahn GmbH aufbereitet und dann zur Verfügung gestellt.

Die an die Autobahn GmbH übergebenen Rohdaten (Meldungen) liegen in einem Raster von 100 Metern über die Untersuchungsstrecke SBA vor. Für die Aufbereitung wurden die Abschnitte zwischen je zwei AQ pro Fahrtrichtung in Segmente mit einer Länge von 250 Metern unterteilt. Die Meldungen wurden zunächst einem Segment und anschließend dem ersten stromaufwärts liegenden AQ zugeordnet.

Tab. 12 zeigt den Aufbau der von der Autobahn GmbH bereitgestellten Daten. Die Meldung in der ersten Zeile beispielsweise ist dem AQ KA20 zugeordnet, im Bereich zwischen

500 und 750 Metern stromabwärts des AQ. Die Daten liegen ereignisbasiert, d.h. ohne festes Zeitraster vor. Das Alter (Latenz zwischen der eigentlichen Erfassung und dem Zeitstempel) der Daten liegt bei 8 Minuten. Die Anzahl an Fahrzeugen, die zu einer Meldung beigetragen haben, lässt sich aus den Daten nicht rekonstruieren.

Zeitstempel	AQ_KA	Segmentnummer Fahrtrichtung KA	AQ_M	Segmentnummer Fahrtrichtung M	Location_x	Location_y	Temperature	Rain-Intensity	RoadCondition
00:00:31	KA20	500-750m			9,07532	48,72260	7,3	HIGH	SLIPPERY_WET
00:00:31	KA18	250-500m			9,09201	48,71410	7,1	LOW	DRY
00:00:31			M07		9,07475	48,72270	7,3	HIGH	SLIPPERY_WET
00:00:31			M08	0-250m	9,07498	48,72280	7,3	HIGH	SLIPPERY_WET
00:00:31			M08		9,09488	48,71340	7	NONE	DRY
00:00:31			M08	500-750m	9,08158	48,71850	7,4	LOW	DRY
00:00:31	KA18	750-1000m			9,08803	48,71530	7,9	LOW	DRY
00:00:31			M08	1250-1500m	9,08803	48,71530	7,9	LOW	DRY
00:00:31			M08	750-1000m	9,08345	48,71750	7,6	LOW	DRY
00:00:31	KA20	500-750m			9,07498	48,72280	7,3	HIGH	SLIPPERY_WET
00:00:39	KA14	750-1000m			9,13964	48,70970	8,5	LOW	DRY
00:00:39			M13	0-250m	9,12952	48,70880	7,7	MEDIUM	WET
00:00:39	KA15	750-1000m			9,12492	48,70860	7,4	MEDIUM	WET
00:00:39			M13	750-1000m	9,14012	48,70990	8,5	LOW	DRY
00:00:31	KA20	500-750m			9,07532	48,72260	7,3	HIGH	SLIPPERY_WET
00:00:31	KA18	250-500m			9,09201	48,71410	7,1	LOW	DRY
00:00:31			M07		9,07475	48,72270	7,3	HIGH	SLIPPERY_WET
00:00:31			M08	0-250m	9,07498	48,72280	7,3	HIGH	SLIPPERY_WET

Tab. 12: Auszug von der Autobahn GmbH übergebenen FGD_02 für den 01.04.2023

Jede Meldung ist mit einer Geokoordinate versehen. In Bild 9 sind die Meldungen eines Tages (1. April 2023) als grüne Punkte auf der Untersuchungsstrecke SBA in Fahrtrichtung Karlsruhe dargestellt. Datum und Zeit sind in MEZ bzw. MESZ angegeben.

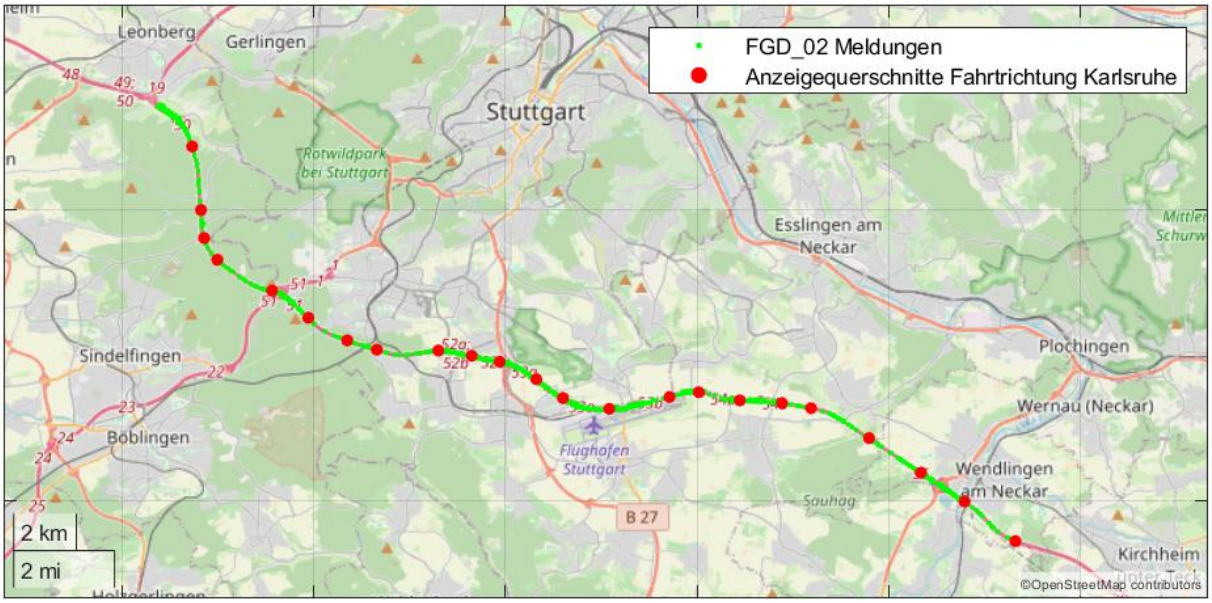

Bild 9: Positionen aller FGD_02 Meldungen in Fahrtrichtung Karlsruhe vom 1. April 2023 (grüne Punkte). Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

4.2.3 RADOLAN-Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD)

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) veröffentlicht verschiedene Wetterdaten zum Download auf seiner Webseite, unter anderem Niederschlagsintensitäten in der Einheit [mm/5min] für ganz Deutschland in einem 1 km x 1 km Raster, mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten.

Die Niederschlagsintensitäten werden mittels „Radar-Online-Aneichung“ (RADOLAN) ermittelt. Eingangsdaten hierfür sind Daten von 17 Radarstationen (instantan, Messung der Reflexionen) und 1200 Ombrometer (Messung der NI-Menge). Die Daten sind im Echtzeitbetrieb derzeit (Stand März 2025) nach 30 Minuten verfügbar.

Die Daten werden als 1100x900 Matrizen je 5 Minuten Intervall in Form von Textdateien (*.ASC) zur Verfügung gestellt. Jede Zelle korrespondiert zu einem Quadratkilometer. Zur Lokalisierung stellt der DWD die Geokoordinaten der Zentroide jeder Zelle zur Verfügung. Eine ausführlichere Beschreibung des Dateiformats findet sich in der Beschreibung des Kompositformats des DWD (DWD RADOLAN Komposit). Der Zeitstempel ist im Dateinamen enthalten, wobei sich die Werte in der Datei auf die 5 Minuten ab diesem Zeitstempel beziehen. Die Datenmenge für ein Jahr beträgt ~400 GB.

In Bild 10 sind die Zentroide der 1 km x 1 km Zellen auf der Untersuchungsstrecke SBA als türkise Quadrate dargestellt. Für die anzeigequerschnittsbezogenen Auswertungen wird jedem AQ pro Fahrtrichtung (rote Punkte Fahrtrichtung Karlsruhe) der nächstgelegene Zentroid (blaue Rauten) automatisiert über die Luftliniendistanz zugeordnet.

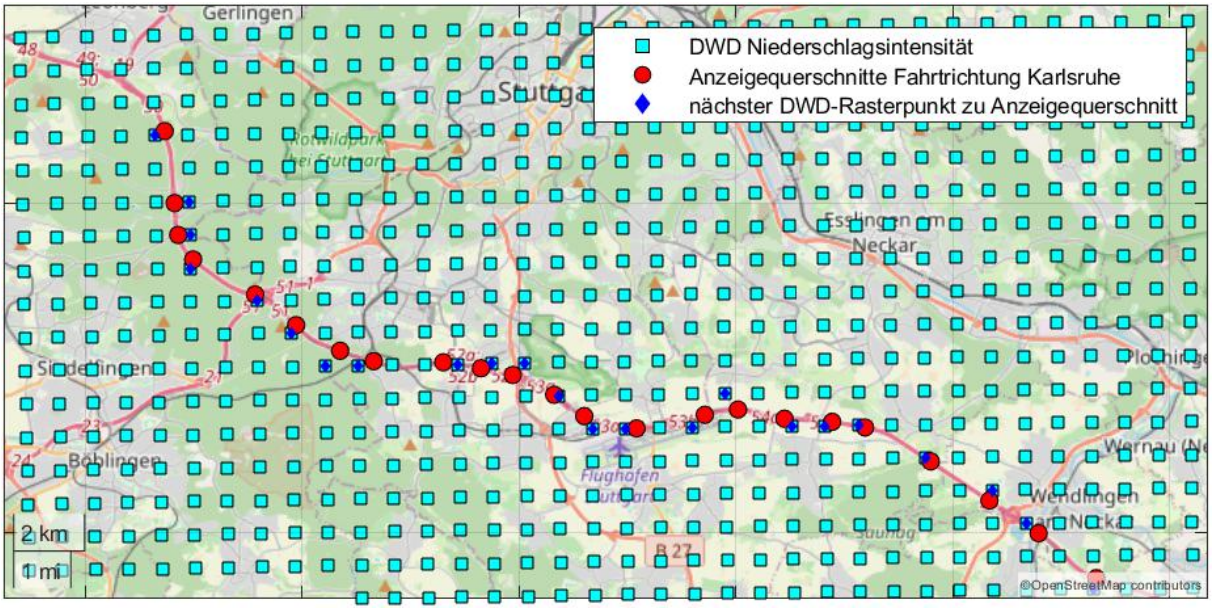

Bild 10: DWD Niederschlagsintensitäten (türkise Quadrate), Standorte der Anzeigequerschnitte in Fahrtrichtung Karlsruhe (rote Punkte) und nächster DWD-Rasterpunkt zu jedem Anzeigequerschnitt (blaue Rauten). Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

Nach der räumlichen Zuordnung liegt für jeden AQ für jedes 5-Minuten-Intervall die Niederschlagsintensität in mm/h vor (in Tab. 13 exemplarischer Ausschnitt für die Untersuchungsstrecke SBA in Fahrtrichtung Karlsruhe).

KA01	KA02	KA03	KA04	KA05	KA06	KA07	KA08	KA09	KA10	KA11	KA12	KA13	KA14	KA15	KA17	KA18	KA20	KA21	KA22	KA23	KA24	KA25
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,1	0,2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,3	0,6	0,4	0,3	0,3
0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,5	0,6	0,2	0,5	0,5	0,3
0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0	0
0	0	0,1	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0
0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0	0
0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0
0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0	0	0	0
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0
0,1	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0	0	0
0	0	0	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0
0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 13: Niederschlagsintensität in 5-Minuten-Intervallen (Zeilen) pro Anzeigequerschnitt (Spalten)

4.2.4 Lokale Umfelddatenerfassung (FG3)

An mittels stationärer Sensorik erfassten Umfelddaten der Funktionsgruppe 3 (FG3) liegen die Fahrbahntemperatur (FBT), der Fahrbahnzustand (FBZ), die Lufttemperatur (LT), die Niederschlagsintensität (NI), die Niederschlagsintensitäts-Stufe (NI-Stufe), die Sichtweite (SW), die Sichtweiten-Stufe (SW-Stufe), die Wasserfilmdicke (WFD) und die Wasserfilmdicken-Stufe (WFD-Stufe) vor. Die Daten wurden von der Autobahn GmbH in Form von *.csv-Dateien monatsweise zur Verfügung gestellt und anschließend so aufbereitet, dass

für jede Kombination aus Kenngröße, Untersuchungsstrecke, Fahrtrichtung, Umfelddaten-erfassungs-Einheit (UDE) und Kalenderwoche jeweils eine separate Datei vorliegt. Die Daten sind in 1-Minuten-Intervallen verfügbar, jeweils mit Zeitstempel in MEZ bzw. MESZ.

4.3 Zeitliche Synchronisierung der Daten

Um die Kenngrößen aus den unterschiedlichen Datenquellen vergleichen zu können, wurden zunächst alle Zeitstempel auf eine einheitliche Zeitzone (koordinierte Weltzeit, UTC) umgestellt.

Im nächsten Schritt wurden die neuen Datenquellen dem tatsächlichen Messzeitraum zugeordnet (Beschreibung für jeweilige Datenart unterhalb) und für die weiteren Auswertungen in einer „Jahrestabelle“ pro AQ mit einer Auflösung von einer Minute gespeichert. Eine Übersicht in welchen Aggregationsintervallen, mit welchen Latenzen und mit welcher zeitlichen Auflösung die Datenarten vorliegen, ist in Bild 11 dargestellt.

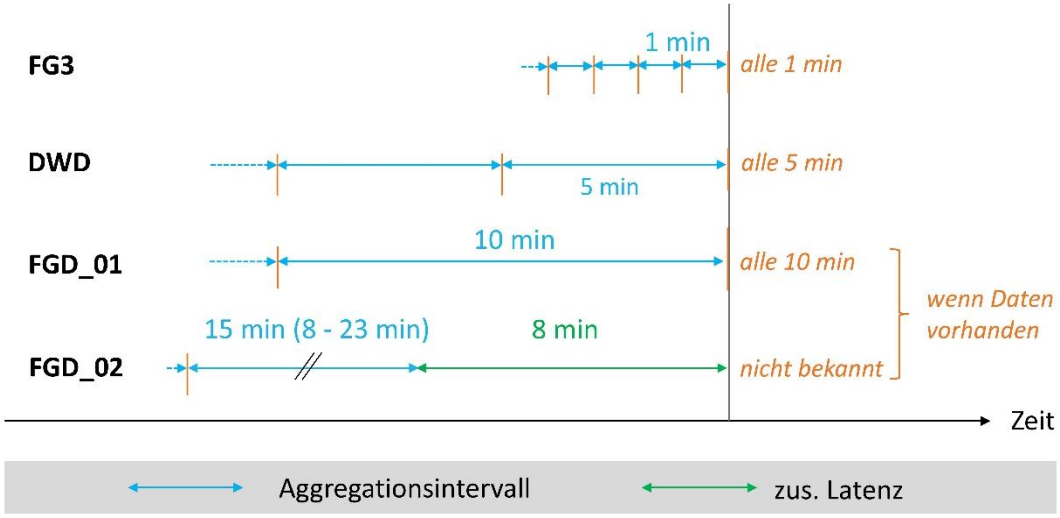

Bild 11: Aggregationsintervalle, Latenzen und Auflösung der Datenarten

Die lokal erfassten Umfelddaten (FG3) liegen bereits in 1-Minuten-Intervallen vor, die Werte zu einem Zeitstempel beziehen sich auf die vorhergehende Minute (Beispiel: Die Daten zum Zeitstempel 10:00 wurden im Zeitintervall von 09:59 bis 10:00 erfasst). Wird ein AQ von mehr als einem Umfeldsensor versorgt, werden für jede Minute die Messwerte des Umfeldsensors verwendet, der die höhere Nässestufe erfasst hat (bei Gleichheit höhere FG3 Niederschlagsintensität).

Die DWD-Daten liegen in einem 5-Minuten-Raster vor. Der Niederschlagsintensitäts-Wert [mm/5min] zu einem Zeitstempel bezieht sich auf die 5 Minuten ab dem Zeitstempel. Um die Daten auf das 1-Minuten-Raster zu bringen, werden die 5-Minuten-Werte gleichmäßig auf die einzelnen Minuten verteilt und für eine bessere Vergleichbarkeit mit den Niederschlagsintensitäten der lokalen Umfelddatenerfassung auf eine Stunde hochgerechnet (Beispiel: Wenn für 10:00 eine Niederschlagsintensität von 0,3 mm/5min angegeben ist, wird den Zeitstempeln 10:00, 10:01, …, 10:04 eine Niederschlagsintensität von 0,3/5 = 0,06 mm/min = 3,6 mm/h zugeordnet).

Die fahrzeuggenerierten Daten FGD_01 liegen in einem fixen 10-Minuten-Raster vor, aber ereignisbasiert (also abhängig von der Verfügbarkeit meldender Fahrzeuge). Die einzelnen

Meldungen wurden jeweils aus den erfassten Daten einer aus den vorliegenden Daten nicht mehr ermittelbaren Anzahl von Fahrzeugen erzeugt. Die Zeitpunkte der Datenerfassung sind nicht genau ermittelbar. Für die weiteren Auswertungen werden die FGD_01 den dazugehörigen 10 Minuten des Messzeitraums zugeordnet. (Beispiel: Für die Meldung mit Zeitstempel 10:00 wurde in der Jahrestabelle der Wert dieser Meldung von 10:00 bis 10:09 eingetragen).

Die fahrzeuggenerierten Daten FGD_02 liegen ereignisbasiert mit einem sekundenfeinen Zeitstempel vor. Zur Zuordnung in das 1-Minuten-Raster wird auf Minutenwerte gerundet. Einem AQ können in einem 1-Minuten-Intervall mehrere Meldungen zugeordnet sein, die für die weiteren Auswertungen zusammengefasst werden. Für die Lufttemperatur wird das arithmetische Mittel der einzelnen Lufttemperaturmeldungen berechnet. Für den Fahrbahnzustand und die Niederschlagsintensitäts-Stufen werden die gemeldeten Zustände bzw. Stufen aneinandergereiht und es wird je Zustand bzw. Stufe der Anteil ermittelt. Tab. 14 zeigt beispielhaft, wie drei für eine Minute einem AQ zugeordnete Meldungen („Ausgangsdaten“) zusammengefasst werden.

Ausgangsdaten für Zeitstempel 03.04.23 11:12	**Zusammengefasste Meldung für Zeitstempel 03.04.23 11:12**
Meldung 1: „Wet“ Meldung 2: „Dry“ Meldung 3: „Wet Wet Dry“	Aneinandergereiht: „Wet Dry Wet Wet Dry“ Anteil Dry: 40 % Anteil Wet: 60 % Anteil SlipperyWet: 0 % Anteil SlipperyIce: 0 %.

Tab. 14: Zusammenfassung von FGD_02-Meldungen

Ergebnis der zeitlichen Synchronisierung und der räumlichen Zuordnung aller Daten ist eine Tabelle je AQ mit einer Zeile pro Minute und einer Spalte je Messgröße. Für die Untersuchungsstrecke SBA sind dies für das Jahr 2023 insgesamt 45 AQ-Tabellen (22 AQ FR M und 23 AQ FR KA), mit je 525.600 Zeilen und 19 Spalten. Für die Untersuchungsstrecke NWA sind es 35 AQ-Tabellen im beschriebenen Format (18 AQ FR M und 17 AQ FR S).
Tab. 15 zeigt einen Auszug aus der Jahrestabelle für AQ KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA.

Zeitstempel	FGD_02 Lufttemperatur	FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe	FGD_02 Fahrbahnzustand	FGD_01 Reibung	FGD_01 Reibung (Minimum)	FGD_01 Reibung (Maximum)	FGD_01 Lufttemperatur	FGD_01 Wischerfrequenz	FG3 Fahrbahntemperatur	FG3 Lufttemperatur	FG3 Niederschlagsintensität	FG3 Niederschlagsintensität-Stufe	FG3 Sichtweite	FG3 Sichtweite-Stufe	FG3 Wasserfilmdicke	FG3 Wasserfilmdicke-Stufe	FG3 Fahrbahnzustand	DWD Niederschlagsintensität
06:40	NaN			0,986	0,925	1	8,9	0,711	NaN	9,2	0	0	1000	0	0,21	0	nass	2,4
06:41	NaN			NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0	0	1000	0	0,2	0	nass	2,4
06:42	NaN			NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	9,1	0	0	1000	0	0,19	0	nass	2,4
06:43	NaN			NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	9,6	9	1,2	2	1000	0	0,2	0	nass	2,4
06:44	NaN			NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	9,7	NaN	2,4	2	1000	0	0,2	0	nass	2,4
06:45	9,4	MEDIUM MEDIUM MEDIUM	WET WET WET	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	5,4	3	1000	0	0,21	0	nass	16,8
06:46	NaN			NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	8,9	6	3	1000	0	0,24	0	nass	16,8
06:47	9,2	MEDIUM MEDIUM MEDIUM MEDIUM	WET WET WET WET	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	7,2	3	1000	0	0,25	0	nass	16,8
06:48	NaN			NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	9,6	NaN	7,2	3	1000	0	0,25	0	nass	16,8
06:49	9,4	MEDIUM HIGH ME-DIUM ME-DIUM	WET SLIPPE RY_WE T WET WET	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1,8	3	1000	0	0,24	0	nass	16,8
06:50	NaN			0,991	0,941	1	8,9	0,82	9,7	NaN	1,2	3	1000	0	0,25	0	nass	2,4
06:51	NaN			NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	9,6	NaN	1,2	3	1000	0	0,23	0	nass	2,4
06:40	NaN			0,986	0,925	1	8,9	0,711	NaN	9,2	0	0	1000	0	0,21	0	nass	2,4
06:41	NaN			NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0	0	1000	0	0,2	0	nass	2,4
06:42	NaN			NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	9,1	0	0	1000	0	0,19	0	nass	2,4

Tab. 15: Auszug aus Jahrestabelle am 31.03.2023 mit allen Datenquellen für Anzeigequerschnitt KA04

4.4 Datenverfügbarkeit von FGD_01, FGD_02 und DWD

Die DWD Niederschlagsintensität weist in den Jahrestabellen auf allen Untersuchungsstrecken eine Verfügbarkeit von über 99,4 % auf. Die Datenlücken entstehen durch kurzzeitige Ausfälle der Radare. Bspw. sind am 13.03.2023 6 UTC in Süddeutschland die Radare in Memmingen und Türkheim ausgefallen. Dadurch gibt es in diesem Bereich eine Datenlücke.

Da FGD_01 ereignisbasiert in 10-minütlicherer Auflösung vorliegt, wird die 10-Minuten Verfügbarkeit untersucht.

Auf der Untersuchungsstrecke NWA liegen für die mittlere FGD_01 Wischerfrequenz in durchschnittlich 81,9 % aller 10-Minuten-Intervalle des Jahres verwertbare Daten vor, für die FGD_01 Reibung beträgt die Verfügbarkeit 80,7 %. Auf der Untersuchungsstrecke SBA liegt die Verfügbarkeit bei 88,6 % (FGD_01 Wischerfrequenz) bzw. 86,4 % (FGD_01 Reibung). Fehlen FGD_01-Meldungen, waren in den jeweiligen Intervallen keine Fahrzeuge auf der Strecke unterwegs, die entsprechende Daten übermittelt haben. Die Abweichungen der Verfügbarkeiten von FGD_01 Wischerfrequenz und FGD_01 Reibung kommen durch die Datengenerierung, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, zustande: FGD_01 Reibung-Werte werden nur bei Fahrmanöver erzeugt, wohingegen FGD_01 Wischerfrequenz-Werte immer von den verfügbaren Fahrzeugen gemeldet werden. Komplett fehlende FGD_01 gibt es bei M01 und S21 auf der Untersuchungsstrecke NWA, da diese AQs nicht mehr im Bereich der bereitgestellten Daten liegen. Gleiches gilt für die AQ M25 und M26 auf der Untersuchungsstrecke SBA.

Da die FGD_02 Meldungen nur sporadisch auftreten, ist hier die Datenverfügbarkeit deutlich geringer. FGD_02 ist nur auf der Untersuchungsstrecke SBA verfügbar. Bei der 10-Minuten Verfügbarkeit liegt diese im Schnitt bei 56,0 %. In Tab. 16 ist für vier ausgewählte AQs, die Datenverfügbarkeit angegeben.

AQ	10 Minuten-Verfügbarkeit FGD_01		10-Minuten Verfügbarkeit FGD_02		1-Minuten Verfügbarkeit DWD Niederschlagsintensität [%]
	Wischerfrequenz [%]	Reibung [%]	Niederschlagsintensität-Stufe [%]	Fahrbahnzustand [%]	
NWA M12	85,0	82,6			99,4
NWA S14	85,0	84,7			99,4
SBA KA04	88,0	86,4	61,6	61,6	99,4
SBA M02	87,0	86,4	60,5	60,5	100,0

Tab. 16: Datenverfügbarkeit auf der Untersuchungsstrecke SBA bzw. NWA für ausgewählte AQs

5 Datenauswertung

Im vorliegenden Kapitel werden die erstellten Jahrestabellen mit den FGD_01, FGD_02, DWD und FG3-Daten ausgewertet, um zu ermitteln, wie gut die zugrundeliegenden Datenquellen zueinander passen. Der Fokus liegt hierbei auf der Nässe, da die neuen Datenquellen (FGD und DWD) keine Informationen zur Sichtweite liefern. Es ist dabei zu beachten, dass es keine Referenzmessungen gibt. Der tatsächliche Umfeldzustand auf/an der Fahrbahn ist nicht bekannt. Somit ist keine Aussage möglich, ob die neuen Datenquellen genauer sind als FG3-Daten.

Die Daten liegen vollständig für beide Untersuchungsstrecken und Fahrtrichtungen vor (Ausnahme: FGD_02 fehlt für die Untersuchungsstrecke NWA).

Aufgrund des Umfangs von 45 AQ auf der Untersuchungsstrecke SBA und 43 AQ auf der Untersuchungsstrecke NWA wird im Folgenden pro Untersuchungsstrecke und Richtung nur ein AQ näher betrachtet. Dabei wurde darauf geachtet, dass diese AQ nahe bei einem Umfelddatensensor liegen. Zusätzlich wurden die AQ so gewählt, dass diese in unterschiedlichen Bereichen der Strecke liegen (siehe Bild 12), damit diese von unterschiedlichen Umfelddatensensoren versorgt werden. Die AQ KA04 (Standort des Sensors UDE02), M02 (Standort des Sensors UDE11), S14 (40 Meter entfernt von Sensor W07) und M12 (Standort des Sensors W05) werden im Weiteren detailliert betrachtet.

Bei den Tagesanalysen werden die folgenden Tage ausgewertet, da die Tage verschiedene Regenereignisse auf Basis der FG3 Niederschlagsintensitäten repräsentieren, von allen Datenarten möglichst alle Daten vorliegen und es möglichst viele Messwerte ungleich null (d. h. Regenereignis) gibt:

- 14.03.2023 mit mehrmaligem Nieselregen über Tagesverlauf
- 28.04.2023 mit Dauerregen in der ersten Tageshälfte von 4 bis ca. 11 Uhr
- 21.06.2023 mit gebietsweisem Platzregen am Vormittag
- 11.07.2023 mit einmaligem Starkregenereignis ab ca. 20 Uhr

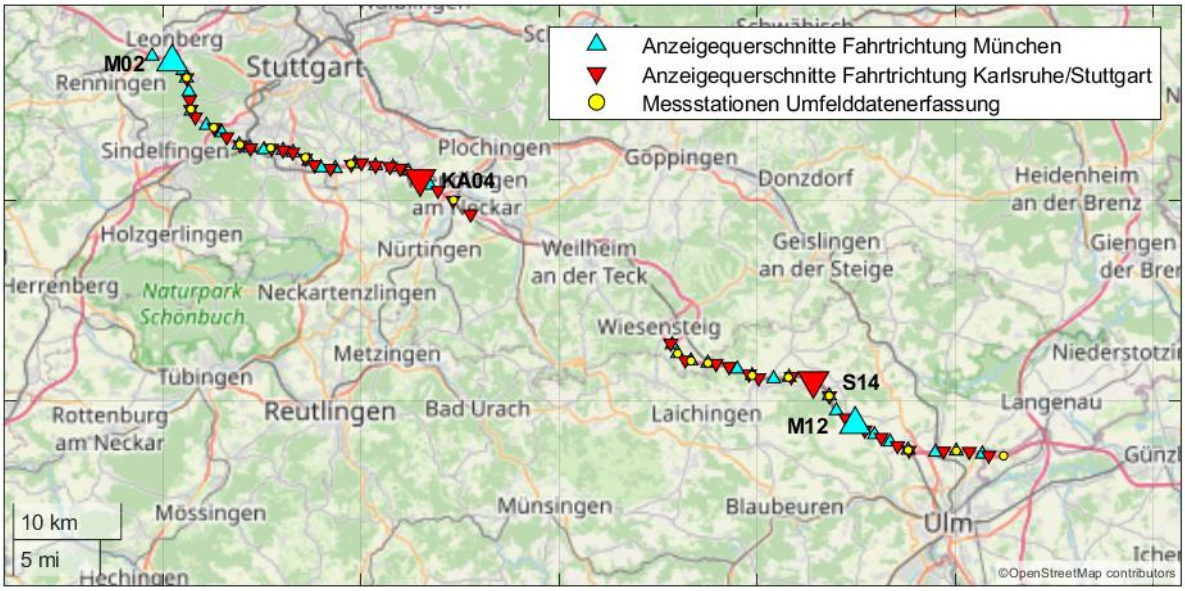

Bild 12: Positionen der ausgewählten AQs für die Untersuchungsstrecke SBA (oben links) und für die Untersuchungsstrecke NWA (unten rechts) für die Auswertungen. Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

5.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur wird in der SBA-Steuerung zwar nicht direkt verwendet (Hilfsgröße), jedoch bietet der Vergleich der gemeldeten Lufttemperaturen die Möglichkeit, das grundsätzliche Zusammenpassen der unterschiedlichen Datenquellen (FG3, FGD_01, FGD_02) einzuschätzen. Bild 13 zeigt den zeitlichen Verlauf aller vorliegenden Lufttemperaturen in den Jahrestabellen für ausgewählte Tage. Die Temperaturverläufe sind am 14.3. und 28.4. ähnlich, wobei sich vor allem nachts größere Unterschiede zwischen FG3 und FGD zeigen. Eine mögliche Ursache hierfür kann die geringere Anzahl meldender Fahrzeuge sein. Am 21.6. gibt es einen Temperatursturz am Vormittag. FGD_02 liegt an diesem Tag nur zweimal vor (wie oben beschrieben, sind Meldungen sporadisch ohne festes Zeitraster). Am Nachmittag werden die Abweichungen zwischen FG3 und FGD_01 größer. Ein ähnliches Verhalten ist auch am 11.7. erkennbar: Tagsüber sind die von den Fahrzeugen gemeldeten Lufttemperaturen höher als die der stationären Sensorik. Eine wahrscheinliche Ursache hierfür ist, dass die Fahrzeuge die Temperatur nahe der Fahrbahn erfassen (abstrahlende Wärme). Dieses Verhalten zeigt sich prinzipiell an Tagen mit Temperaturen über 20 Grad Celsius. Nachts und bei niedrigeren Temperaturen sind die Unterschiede zwischen FG3 und FGD Lufttemperatur geringer.

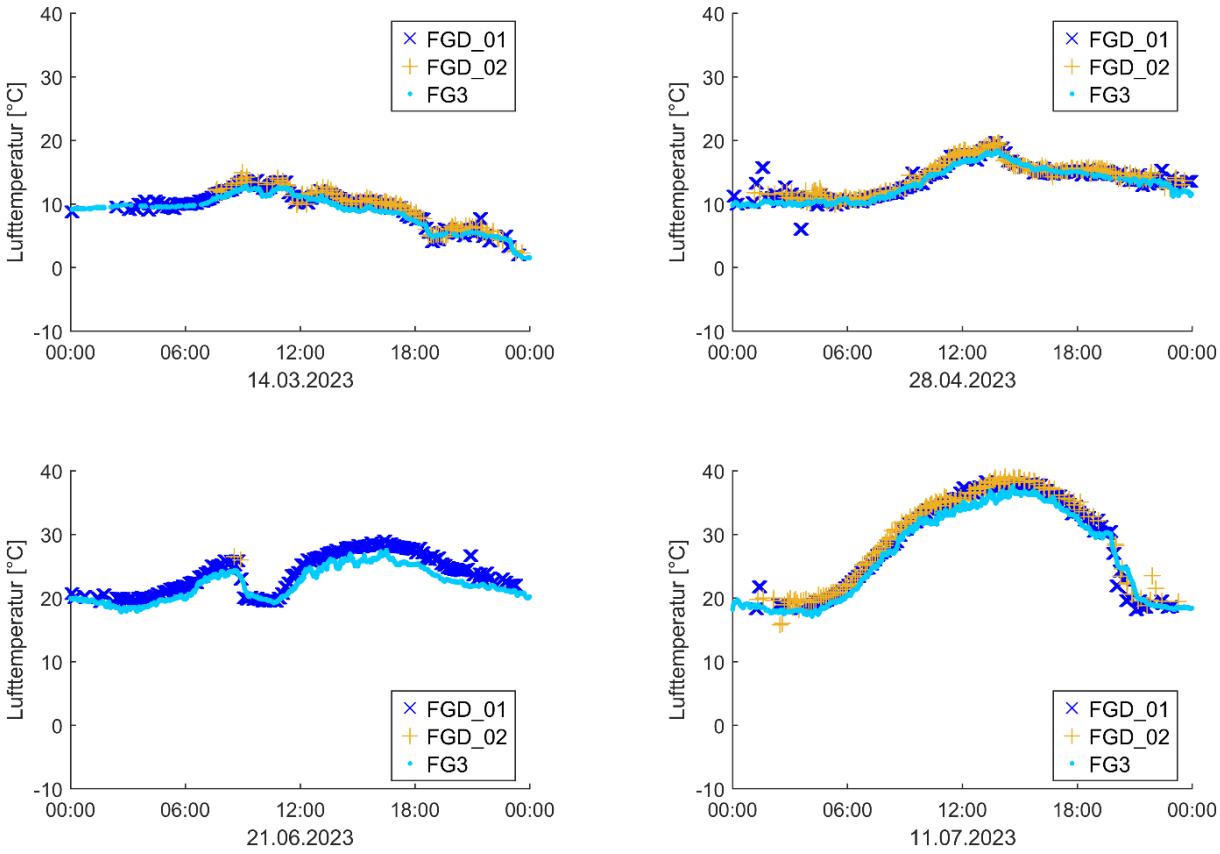

Bild 13: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperaturen für SBA KA04 für die ausgewählten Tage

Eine Gegenüberstellung der Lufttemperaturmesswerte des ganzen Jahres 2023 zeigt, dass die von den Fahrzeugen erfassten Lufttemperaturen tendenziell höher sind als die lokal erfassten Lufttemperaturen (Bild 14 links und Mitte). Die Lufttemperaturen der fahrzeuggenerierten Daten untereinander weisen keine systematische Abweichung auf (Bild 14 rechts).

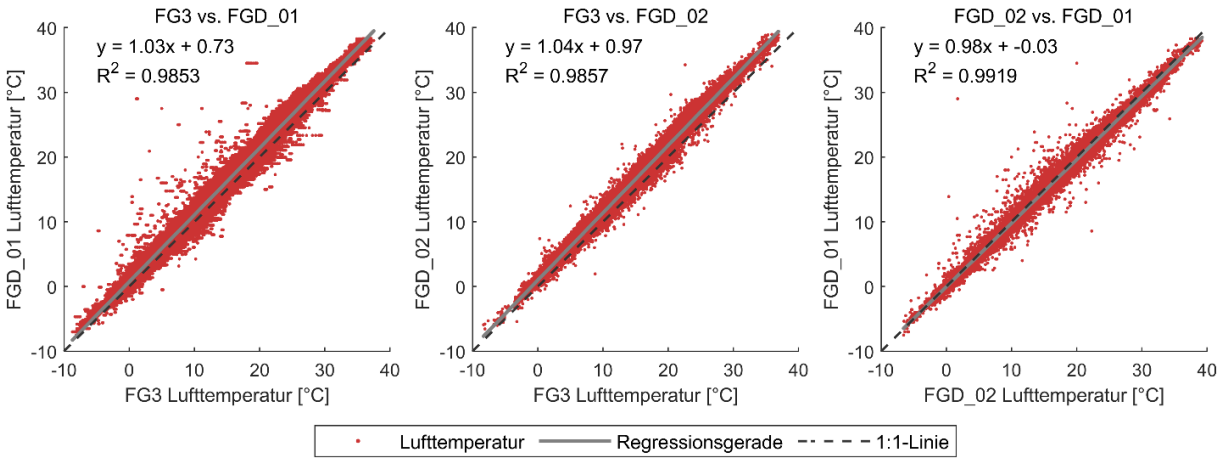

Bild 14: Scatterplot aller Lufttemperaturgegenüberstellungen von AQ SBA KA04

Für die Untersuchungsstrecke SBA ergibt sich ein mittleres Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9836 für den Vergleich FG3 vs. FGD_01 Lufttemperatur, 0,9849 für FG3 vs. FGD_02 Lufttemperatur sowie 0,9925 für FGD_01 vs. FGD_02 Lufttemperatur.

Auf der Untersuchungsstrecke NWA liegt das durchschnittliche Bestimmtheitsmaß R^2 für den Vergleich FG3 vs. FGD_01 Lufttemperatur bei 0,9870. Dies spricht für eine hohe Übereinstimmung und ermöglicht eine gegenseitige Plausibilisierung der verschiedenen Datenarten. Weitere Vergleiche konnten hier nicht untersucht werden, da auf dieser Strecke keine FGD_02 Daten vorliegen.

5.2 Niederschlagsintensität des Deutschen Wetterdienstes

Die DWD Niederschlagsintensitäten liegen in 5-minütlicher Auflösung vor, die FG3 Niederschlagsintensitäten in minütlicher Auflösung. Bild 15 zeigt Wertepaare aus FG3 Niederschlagsintensitäten und DWD Niederschlagsintensitäten. Links ist der Vergleich zwischen minütlichen FG3 Niederschlagsintensitäten und minütlichen DWD Niederschlagsintensitäten aufgetragen. Dafür wurden die 5-minütlichen DWD Niederschlagsintensitäten in minütliche Werte disaggregiert, d. h. jeder 5 Minuten Messwert wird anteilig auf die Minuten verteilt.

Rechts im Bild 15 wurden die FG3 Niederschlagsintensitäten auf 5-Minuten-Summen zusammengefasst und mit den 5-minütlichen DWD Niederschlagsintensitäten verglichen. Zu erwarten ist, dass die systematische Abweichung bei der Verwendung der 5-Minuten-Mittelwerte geringer wird, da die DWD Niederschlagsintensitäten als Rohdaten in 5-minütlicher Auflösung vorliegen. Bild 15 zeigt, dass die Streuung um die 1:1-Linie geringer wird. Entsprechend steigt das Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,4940 auf 0,6215. Ebenso nimmt bei den 5-Minuten-Mittelwerten die Steigung der Regressionsgerade zu (von 0,61 auf 0,77).

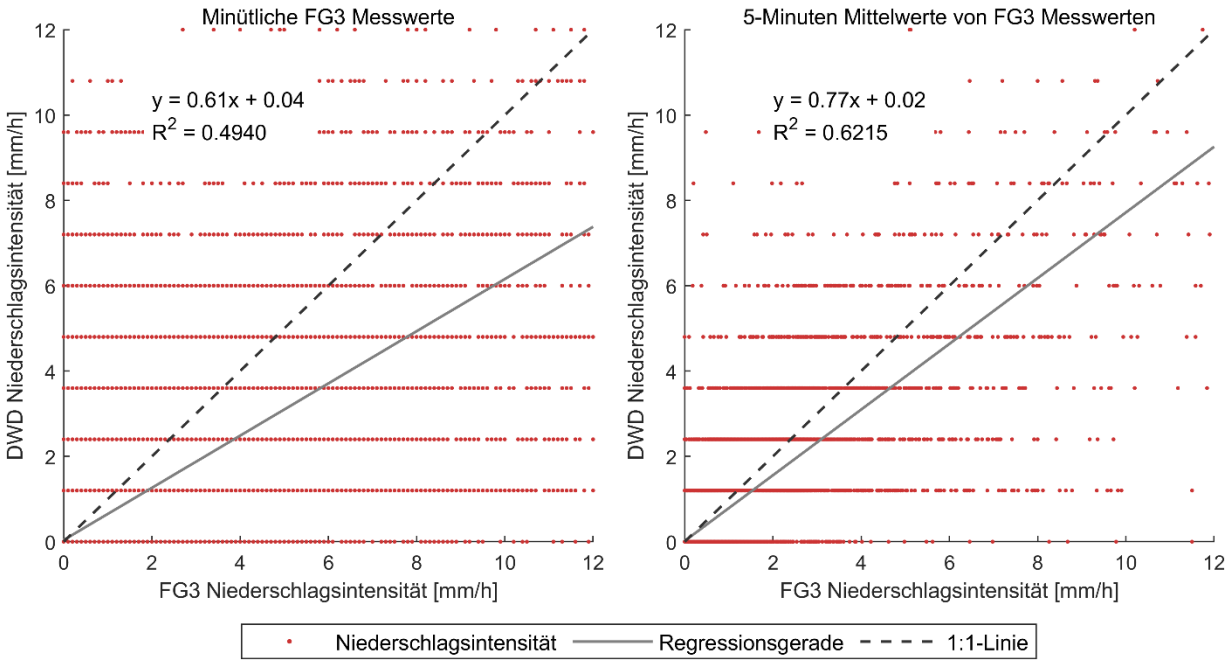

Bild 15: Regression FG3 Niederschlagsintensität vs. DWD Niederschlagsintensität auf der Untersuchungsstrecke NWA bei AQ S14

Bei der Analyse aller Bestimmtheitsmaße R^2 bestätigt sich die Annahme, dass diese durch die Verwendung der 5-Minuten-Intervalle steigen (Bild 16 und Bild 17). Auch im Vergleich der beiden Untersuchungsstrecken zeigt sich, dass auf der Untersuchungsstrecke NWA ein

stärkerer Zusammenhang zwischen den FG3 Niederschlagsintensitäten und DWD Niederschlagsintensitäten besteht (mittleres R^2 von 0,38 bei 1-Minuten-Intervallen und 0,49 bei 5-Minuten-Intervallen) als auf der Untersuchungsstrecke SBA (mittleres R^2 von 0,29 bzw. 0,39).

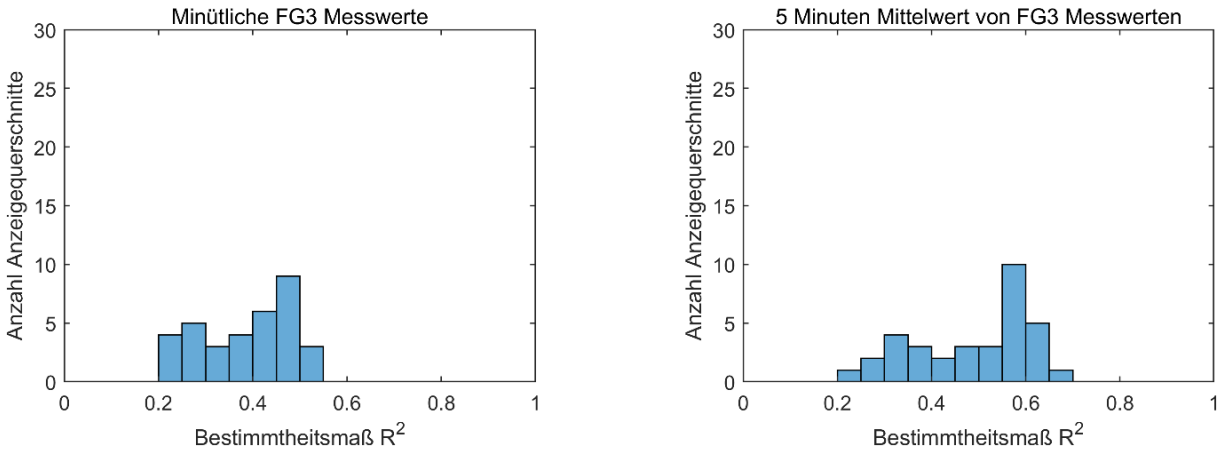

Bild 16: Bestimmtheitsmaß R^2 der Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke NWA

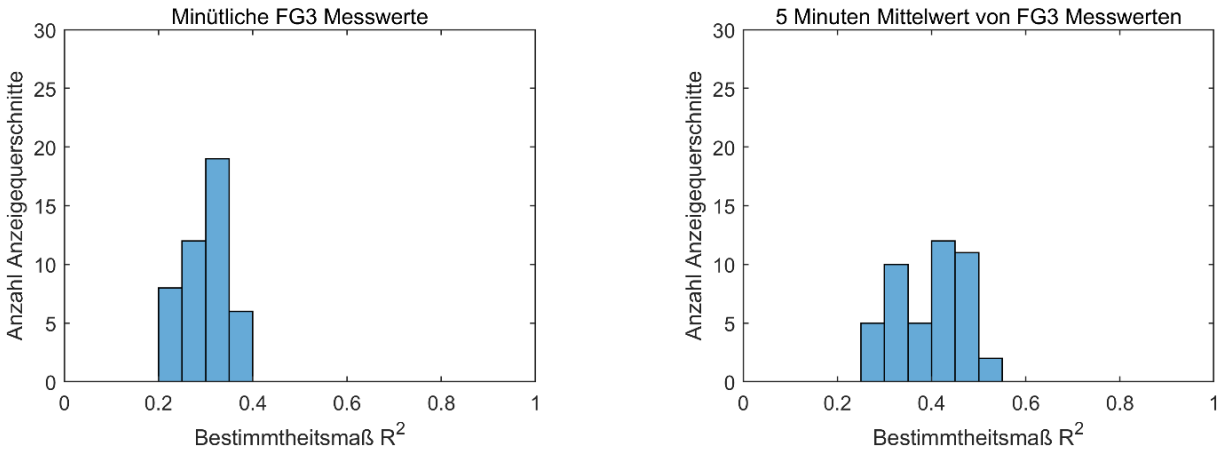

Bild 17: Bestimmtheitsmaß R^2 der Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke SBA

Da bei der Analyse der Niederschlagsintensitäten (FG3 und DWD) insbesondere der Zeitpunkt des Auftretens von Interesse ist (z. B. zur Erkennung potenzieller Latenzen), wurden Zeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von 24 Stunden sowie 2 Stunden erstellt. Für die vier gewählten Tage stehen diese Zeitreihen zur Verfügung. Bei der Überprüfung der Ergebnisse zeigt sich, dass Regenereignisse in der Regel von beiden Datenquellen erkannt werden. Auch die ermittelte Niederschlagsintensität in mm/h liegt meist in einer vergleichbaren Größenordnung. Bei vermeintlichen Platz- oder Starkregenereignissen können jedoch teilweise deutliche Abweichungen auftreten (siehe Bild 18 unten 21.06.23 bzw. 11.07.23). In den 2 Stunden Zeitdiagrammen (siehe Bild 19) ist zu erkennen, dass die DWD Niederschlagsintensitäten geglättet - als berechnete 5-Minuten-Werte und in einer Auflösung von 1,2 mm/h - vorliegen. Die gemessenen FG3 Niederschlagsintensitäten sind deutlich sensitiver und haben feinere Abstufungen.

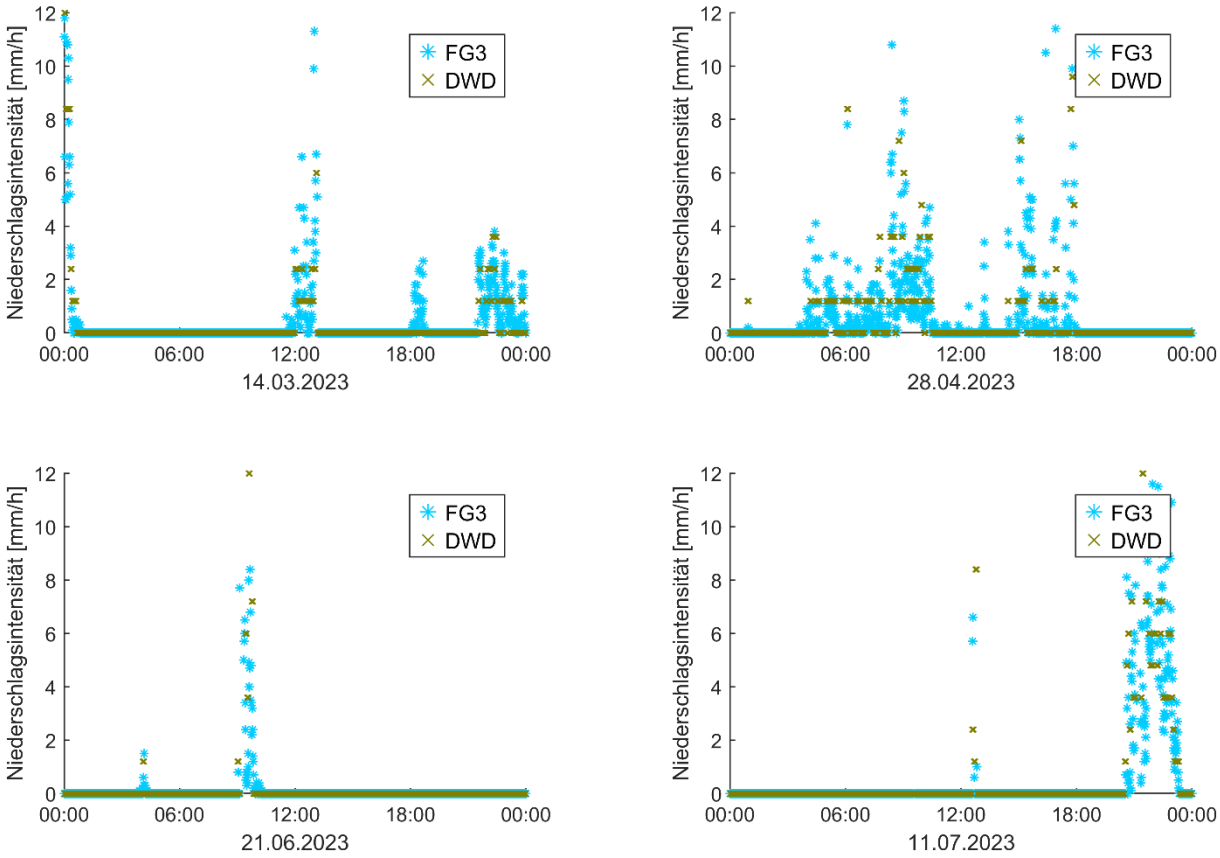

Bild 18: FG3 Niederschlagsintensität und DWD Niederschlagsintensität über 24 Stunden auf der Untersuchungsstrecke NWA bei AQ S14

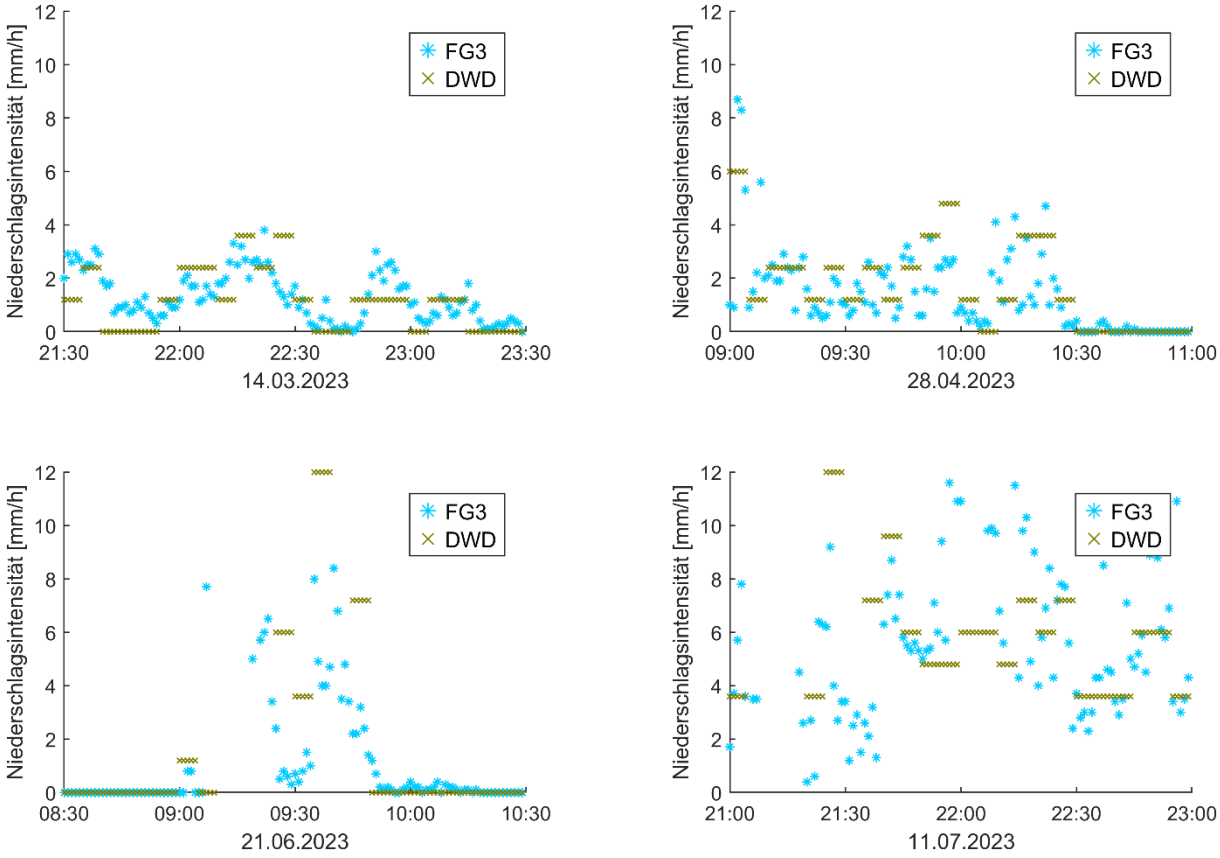

Bild 19: FG3 Niederschlagsintensität und DWD Niederschlagsintensität über 2 Stunden auf der Untersuchungsstrecke bei AQ NWA S14

Um die Analyse der Niederschlagsintensitäten nicht nur auf isolierte Betrachtung von einzelnen AQs zu beschränken, wurden für die ausgewählten Tage und beide Untersuchungsstrecken Weg-Zeit-Diagramme erstellt. In Bild 20 bzw. Bild 21 ist die FG3 Niederschlagsintensität bzw. DWD Niederschlagsintensität für die Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart für den 21.06.2023 dargestellt. Die y-Achse zeigt jeweils die Position entlang der Strecke (in Streckenkilometern ab BAB-km 117,87), während die x-Achse den zeitlichen Verlauf über 24 Stunden dieses Tages abbildet. Jeder horizontale Balken repräsentiert einen AQ. Die Farbgebung basiert auf den gemessenen Niederschlagsintensitäten:

- Blau bis Rot kennzeichnet Intervalle mit einer registrierten Niederschlagsintensität größer null
- Grau markiert Bereiche ohne Niederschlag (Niederschlagsintensität = 0)
- Weiße Bereiche gibt es, wenn für das betreffende Intervall keine Messwerte vorliegen, d. h. Daten fehlen in diesem Zeitabschnitt (bspw. in Bild 20 bei BAB-km 4 und 7)
- Identische Farbverläufe über mehrere AQ-Bänder deuten darauf hin, dass diese Anzeigequerschnitte durch denselben Umfelddatensensor (UDE) gespeist wurden.

Die rechts dargestellte Farbskala zeigt die Niederschlagsintensität in mm/h. Die vertikale Anordnung der AQ-Bänder entspricht ihrer räumlichen Lage entlang des Streckenabschnitts. Der Diagrammaufbau entspricht dem der weiteren Weg-Zeit-Darstellungen in dieser Arbeit und ermöglicht so eine einheitliche Interpretation sowie eine bessere Vergleichbarkeit der Ereigniswerte.

Beim Vergleich der Bild 20 und Bild 21 ist zu sehen, dass der Platzregen um 09:00 Uhr von beiden Datenarten (FG3 und DWD) detektiert wurde. Unterschiede sind in den erfassten

Intensitäten ersichtlich. Zusätzlich ist in Bild 20 ersichtlich, dass ein Umfelddatensensor ab ca. 15:00 Uhr ausgefallen ist. Ebenso zeigt sich, dass nur ein Umfelddatensensor über den ganzen Tag Niederschlagsintensitäten melden (siehe Strecken-km 25 in Bild 20).

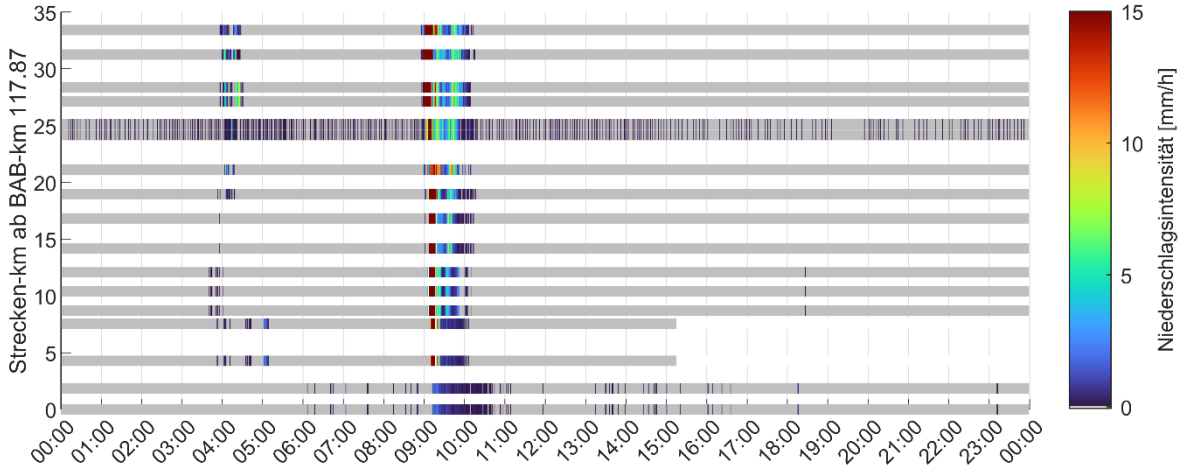

Bild 20: FG3 Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 21.06.2023

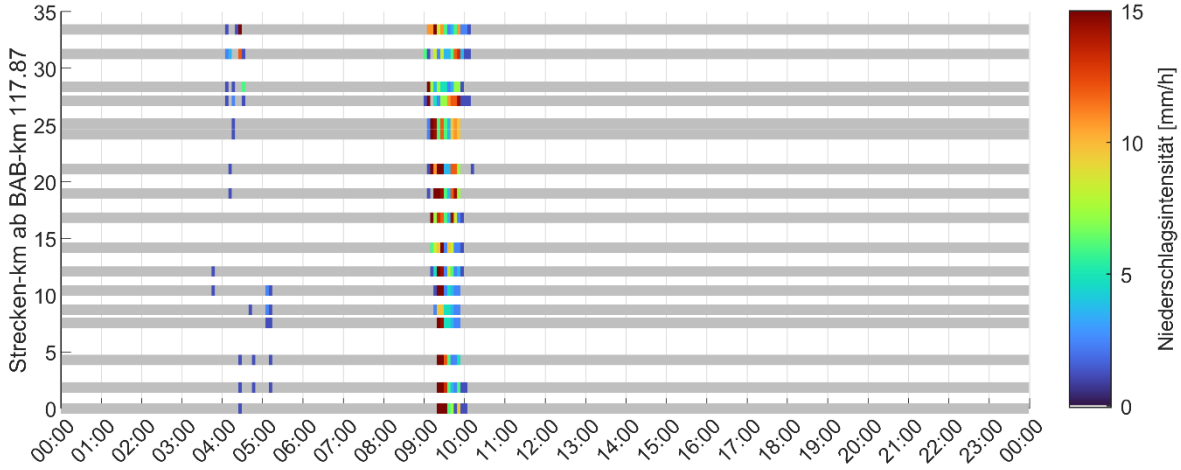

Bild 21: DWD Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 21.06.2023

Die Bilder Bild 22 und Bild 23 zeigen, dass die von FG3 erkannten mehrmaligen Nieselregen über den Tagesverlauf in den meisten Fällen auch in den DWD-Daten nachvollzogen werden können (z. B. Regen zwischen 00:00–02:00, 11:00–12:00, 17:00–18:00 sowie ab 21:00 Uhr). Deutliche Unterschiede bestehen jedoch, wie schon bei Bild 20 bzw. Bild 21, in der erfassten Intensität (mm/h) – insbesondere bei größeren Niederschlagsmengen: Im Abschnitt zwischen 11:00 und 12:00 Uhr erfasst FG3 beispielsweise eine Intensität von rund 8 mm/h, während DWD im gleichen Bereich lediglich 0 bzw. max. etwa 2 mm/h ausweist. Zudem zeigen die DWD-Daten kleinere, kurzzeitige und schwach ausgeprägte FG3-Regenereignisse – wie z. B. das Ereignis um 09:10 Uhr (siehe Bild 23) – nicht an.

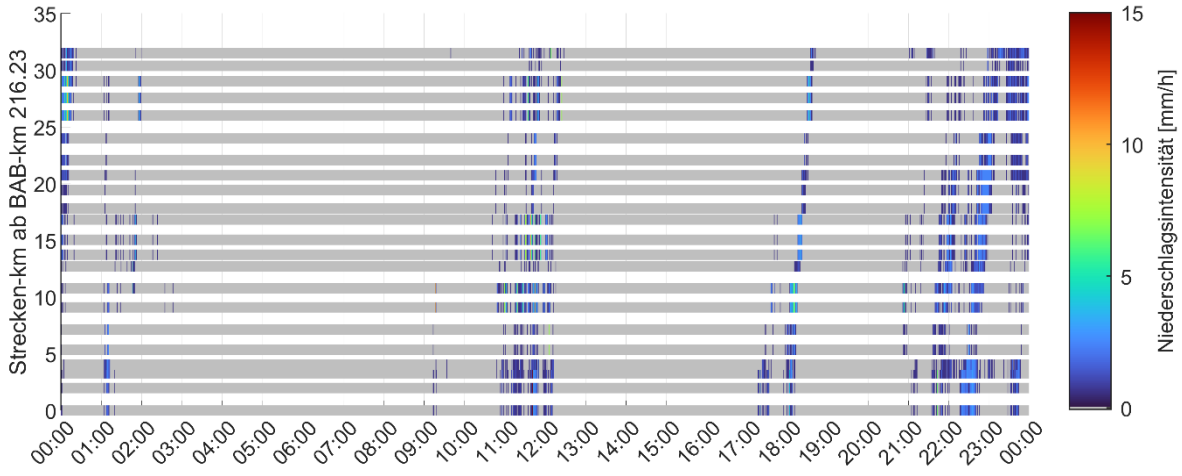

Bild 22: FG3 Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung München am 14.03.2023

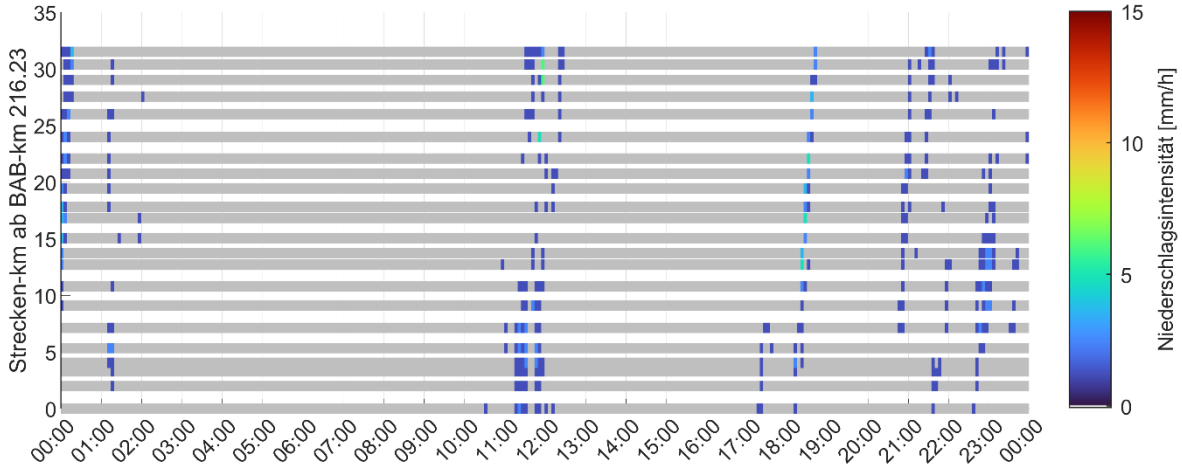

Bild 23: DWD Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung München am 14.03.2023

5.3 Fahrzeugseitig erfasste Wischerfrequenz

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen lokal erfassten Wasserfilmdicken / Niederschlagsintensitäten und der mittleren FGD_01 Wischerfrequenz beispielhaft für den AQ S14 auf der Untersuchungsstrecke NWA und KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA gezeigt. Ein Überblick über alle Bestimmtheitsmaß R^2 der beiden Untersuchungsstrecken schließt sich an.

Am AQ S14 auf der Untersuchungsstrecke NWA (Bild 24) ist zwischen der FG3 Niederschlagsintensität und der FGD_01 Wischerfrequenz, sowohl für den Vergleich der 1-Minuten-Werte als auch für die 10-Minuten Mittelwerte, kein Zusammenhang (Bestimmtheitsmaß R^2 = 0,1221 bzw. 0,1863) erkennbar (Bild 24 rechts bzw. links oben). Zwischen der FG3 Wasserfilmdicke und der FGD_01 Wischerfrequenz ist ein mäßiger Zusammenhang (Bestimmtheitsmaß R^2 = 0,2786) erkennbar (Bild 24 links unten). Für den Vergleich von 10-Minuten Mittelwerten der FG3 Wasserfilmdicke steigt das Bestimmtheitsmaß R^2 auf 0,3132 (Bild 24 rechts unten).

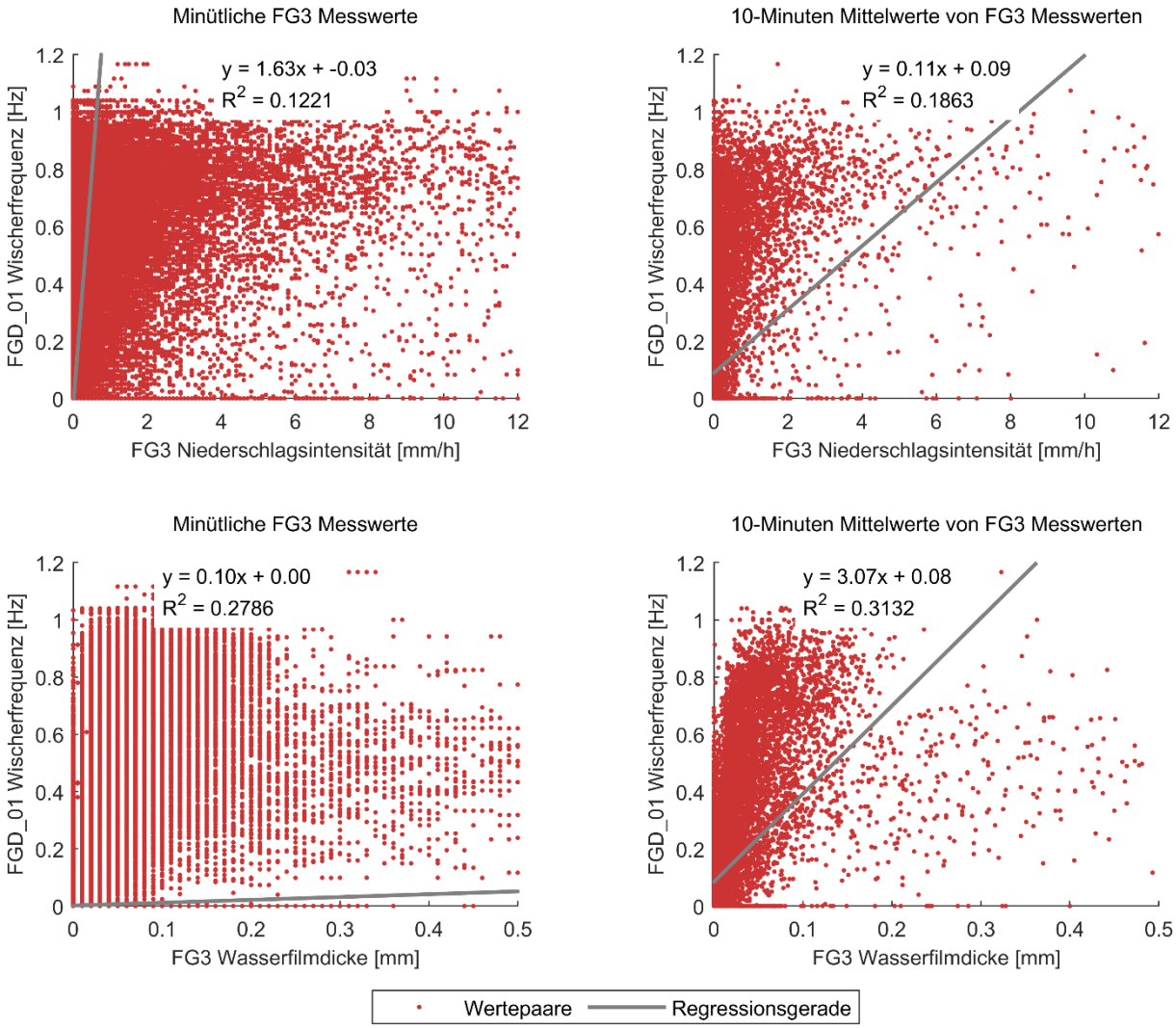

Bild 24: Scatterplot FG3 Niederschlagsintensität (oben) bzw. FG3 Wasserfilmdicke (unten) vs. FGD_01 Wischerfrequenz von AQ S14 auf der Untersuchungsstrecke NWA

Am AQ K04 auf der Untersuchungsstrecke SBA (Bild 25) ist hingegen ein deutlicher Zusammenhang (Bestimmtheitsmaß R^2 = 0,7321 bzw. 0,7060) zwischen der FG3 Wasserfilmdicke und der FGD_01 Wischerfrequenz erkennbar (Bild 25 links bzw. rechts unten), der Zusammenhang zwischen der FG3 Niederschlagsintensität und der FGD_01 Wischerfrequenz ist schwach (Bestimmtheitsmaß R^2 = 0,0859 bzw. 0,1140) (Bild 25 links bzw. rechts oben).

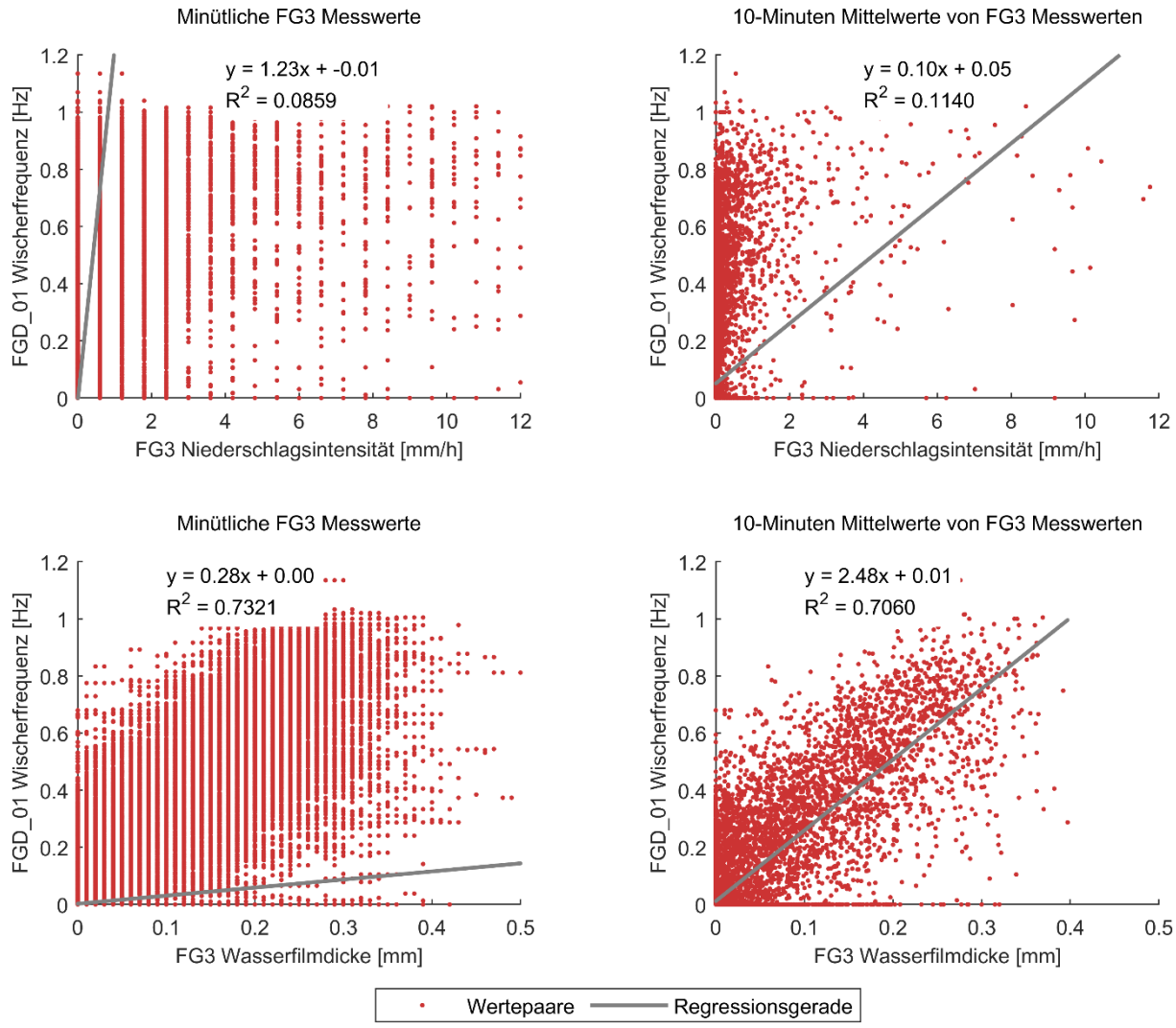

Bild 25: Scatterplot FG3 Niederschlagsintensität (oben) bzw. FG3 Wasserfilmdicke (unten) vs. FGD_01 Wischerfrequenz von AQ KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA

Bei Analyse aller Bestimmtheitsmaße R^2 bestätigt sich die Tendenz, dass es auf der Untersuchungsstrecke SBA einen größeren Zusammenhang zwischen FGD_01 Wischerfrequenz und FG3 Wasserfilmdicke gibt als auf der Untersuchungsstrecke NWA. So gibt es bei der Untersuchungsstrecke NWA kein Bestimmtheitsmaß R^2 (sowohl für die 1-Minuten Werte als auch für die 10-Minuten Mittelwerte) über 0,5 (siehe Bild 26 rechts). Auf der Untersuchungsstrecke SBA liegt das Bestimmtheitsmaß R^2 bei knapp der Hälfte aller AQs bei über 0,65 (siehe Bild 27 rechts).

Bei dem Vergleich der Bestimmtheitsmaße R^2 von FG3 Niederschlagsintensität und FGD_01 Wischerfrequenz ist es auf keiner der beiden Untersuchungsstrecken möglich, einen Zusammenhang zu identifizieren (siehe Bild 26 links und Bild 27 links). D. h. wie es auch in Bild 24 oben und Bild 25 oben zu sehen ist, muss bei hoher FG3 Niederschlagsintensität nicht zwingend eine hohe FGD_01 Wischerfrequenz in der Meldung angegeben sein.

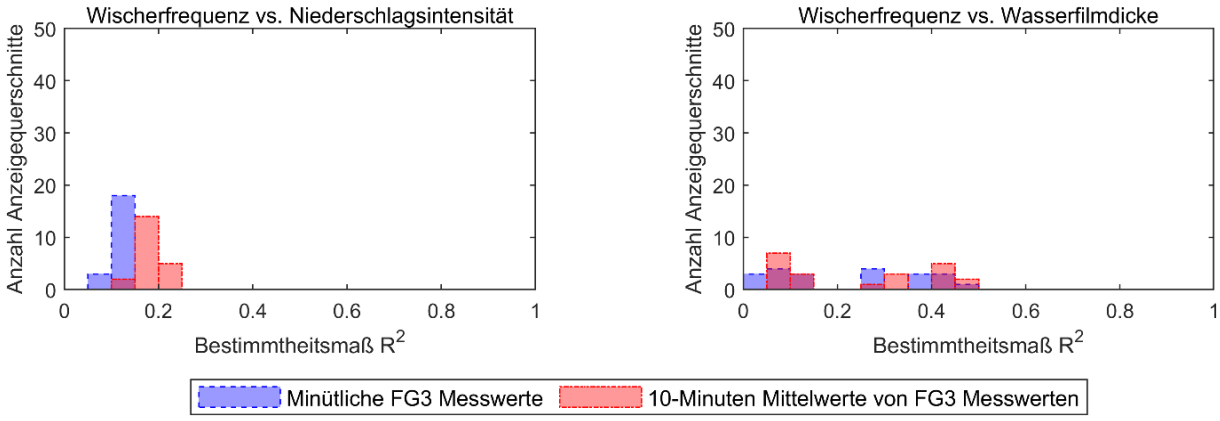

Bild 26: Bestimmtheitsmaß R^2 der FGD_01 Wischerfrequenz vs. FG3 Wasserfilmdicke bzw. Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke NWA

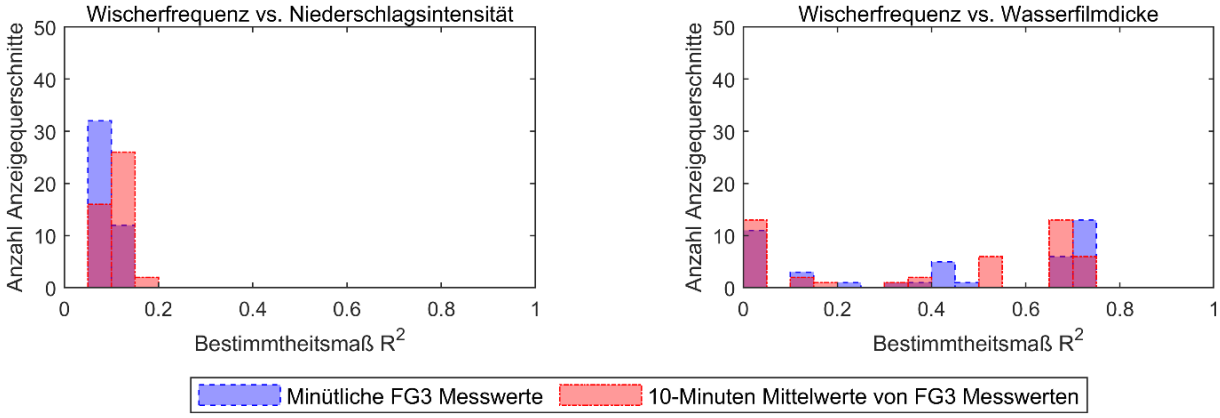

Bild 27: Bestimmtheitsmaß R^2 der FGD_01 Wischerfrequenz vs. FG3 Wasserfilmdicke bzw. Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke SBA

Da die obigen Analysen zeigen, dass es einen Zusammenhang zwischen FG3 Wasserfilmdicke und FGD_01 Wischerfrequenz gibt, sind in Bild 28 und Bild 29 die Zeit-Weg-Diagramme für die Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart für den 28.04.2023 dargestellt. Dieser Tag ist gekennzeichnet durch Dauerregen in der ersten Tageshälfte.

Bild 28 zeigt mit den weißen Lücken (bspw. bei Strecken-km 25 um 05:00 Uhr) und weißen Balken (bspw. bei Strecken-km 0, 4 oder 21), dass in diesen Bereichen keine FG3 Wasserfilmdicke-Werte vorliegen.

Bild 29 bestätigt, dass die Meldungsdichte insbesondere nach Mitternacht sehr gering ist und es daher keine Daten gibt. So gibt es von 00:00 Uhr bis 02:00 Uhr fast keine Meldungen. Die FGD_01 Wischerfrequenz ist auch abhängig von der persönlichen Präferenz einer Person und Scheibenwischeraktivität kann es auch durch Verschmutzung geben. Dies könnten mögliche Erklärungen sein, warum auf Strecken-km 15 bis 30 ab 20 Uhr keine Wasserfilmdicke gibt, aber die FGD_01 Wischerfrequenz eine Aktivität aufzeigt. Prinzipiell zeigt sich aber, dass bei einer vorhandenen FG3 Wasserfilmdicke auf der Fahrbahn mit einer Aktivität des Scheibenwischers zu rechnen ist.

Insbesondere in Zeiten mit einer Wasserfilmdicke größer als 0 mm und einer Wischerfrequenz im Bereich von 1 Hz sind auch FG3 und DWD Niederschlagsintensitäten (Bild 30 und Bild 31) registriert worden.

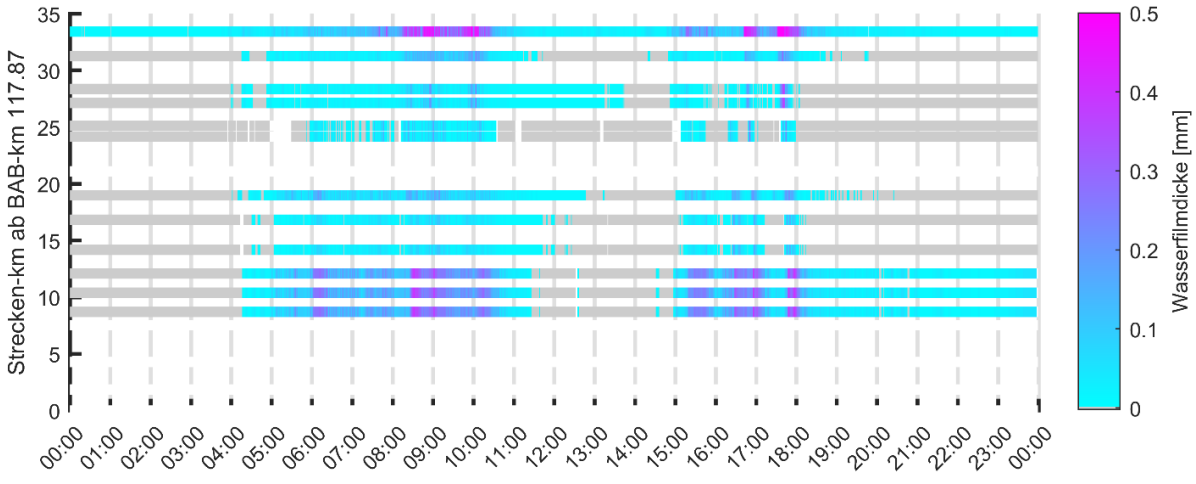

Bild 28: FG3 Wasserfilmdicke auf der Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 28.04.2023

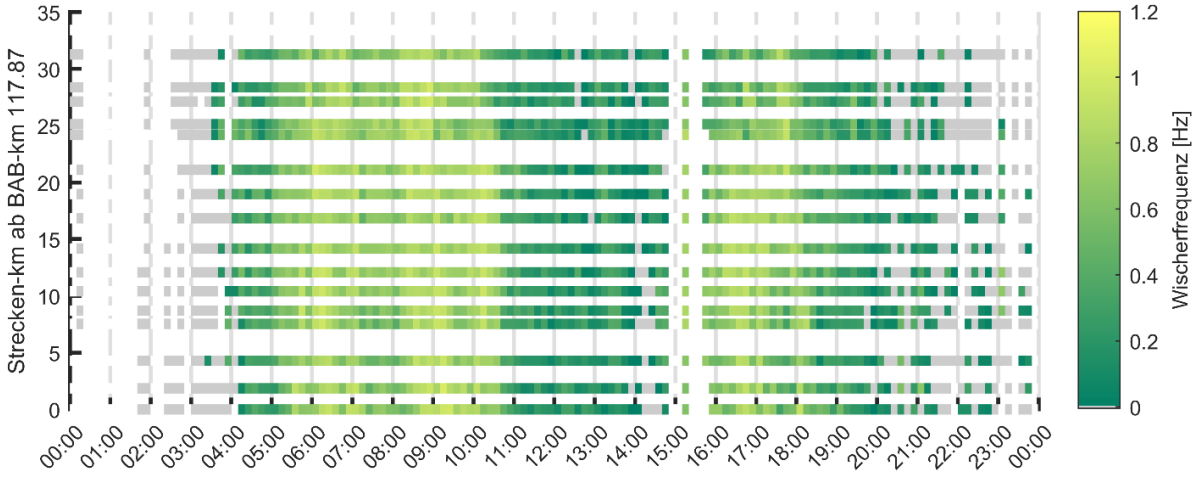

Bild 29: FGD_01 Wischerfrequenz auf der Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 28.04.2023

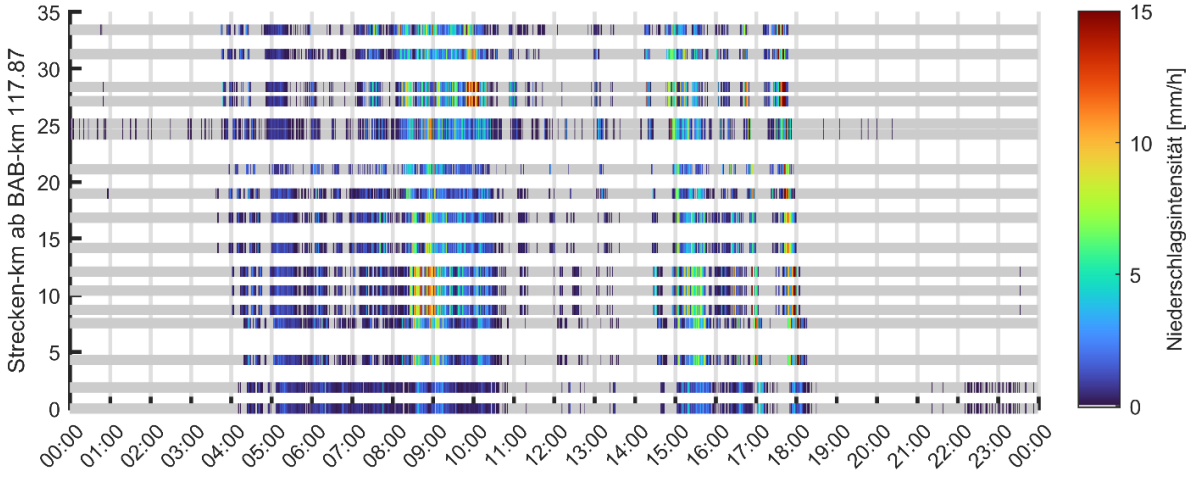

Bild 30: FG3 Niederschlagsintensität auf der Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 28.04.2023

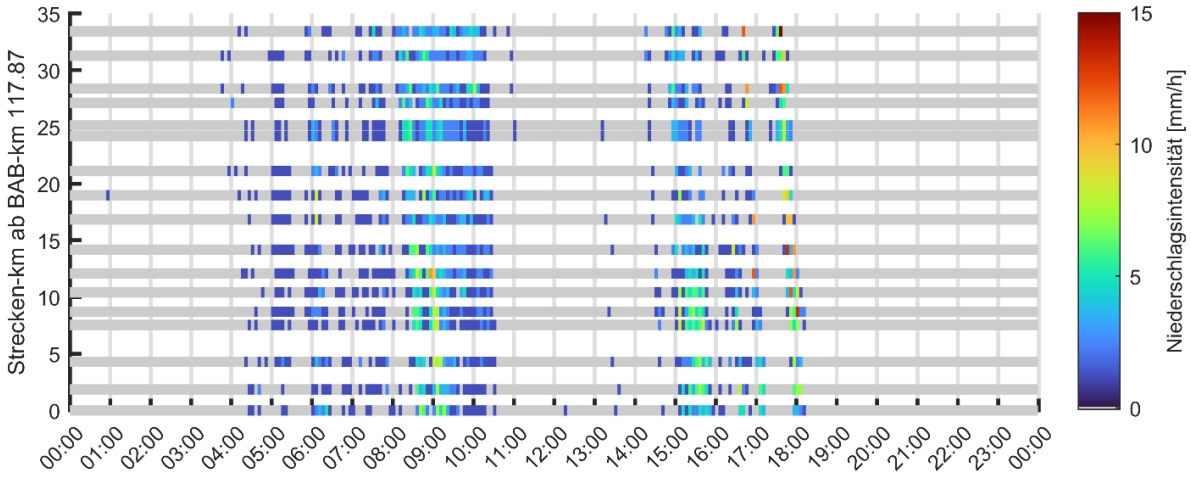

Bild 31: DWD Niederschlagsintensität auf der Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 28.04.2023

Bild 32 bis Bild 35 zeigen ein Starkregenereignis am 11.07.2023 ab 20:00 Uhr auf der Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung Karlsruhe. Die bereits aus den vorherigen Weg-Zeit-Diagrammen gewonnenen Erkenntnisse werden bestätigt:

- Eine grundsätzliche Übereinstimmung bei der Erkennung von Niederschlag durch FG3 und DWD ist gegeben, wobei Unterschiede in den erfassten Intensitäten bestehen.
- Die FG3-Wasserfilmdicke kann kurzfristig ausfallen und zeigt in einzelnen Intervallen keine Werte.
- Scheibenwischeraktivität tritt teilweise auch dann auf, wenn keine andere Datenquelle auf Niederschlag hindeutet. Dies bestätigt, dass Scheibenwischer auch bei Verschmutzung oder zur Scheibenreinigung eingesetzt werden.

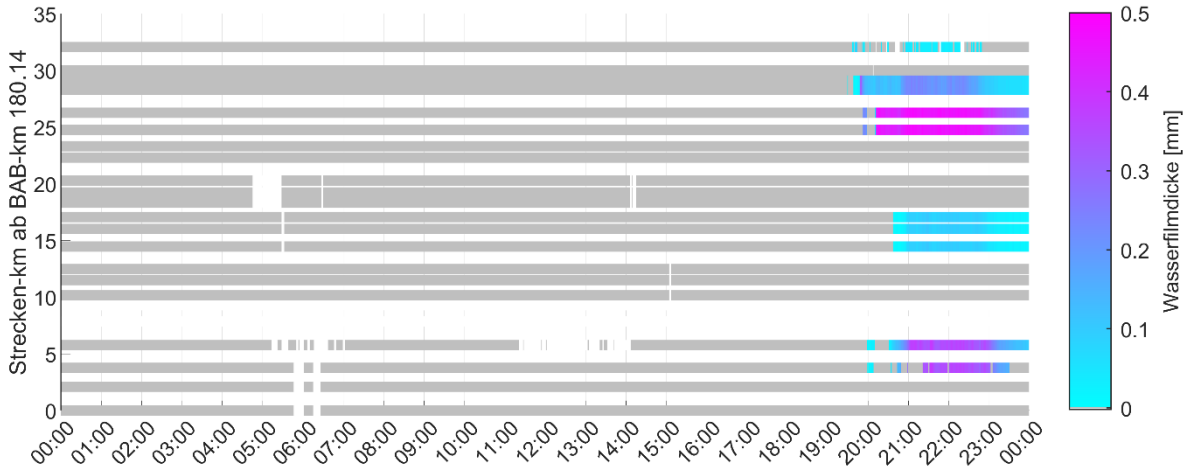

Bild 32: FG3 Wasserfilmdicke auf der Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung Karlsruhe am 11.07.2023

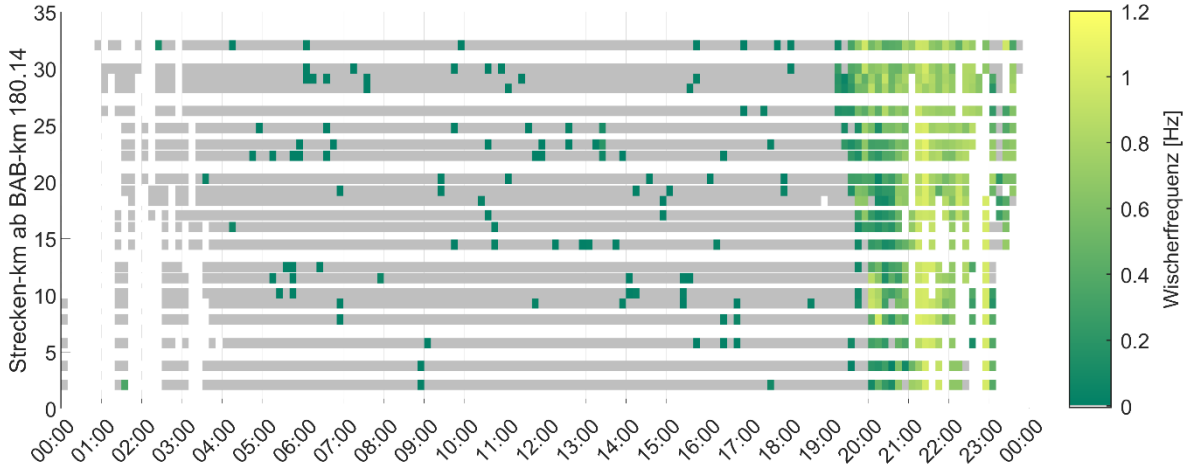

Bild 33: FGD_01 Wischerfrequenz auf der Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung Karlsruhe am 11.07.2023

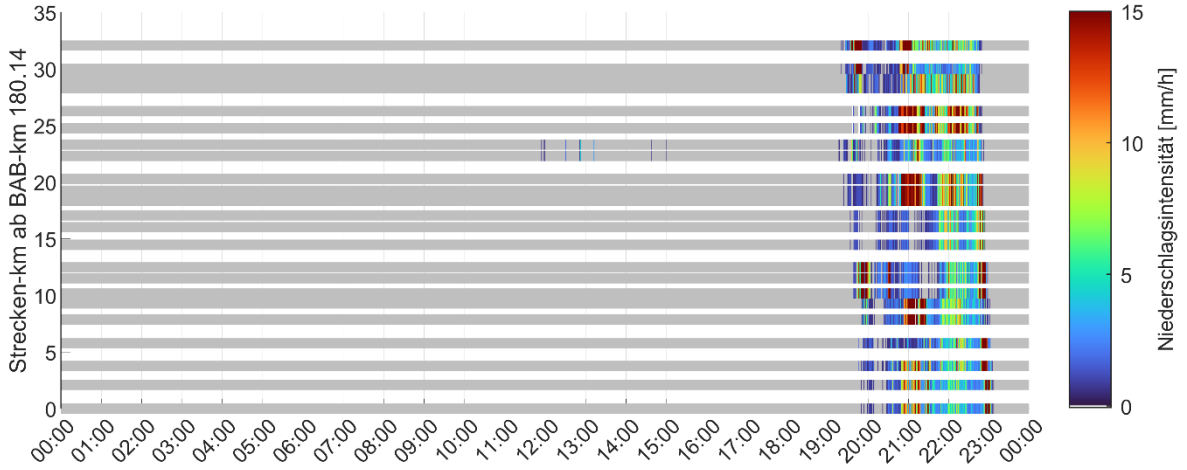

Bild 34: FG3 Niederschlagsintensität auf der Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung Karlsruhe am 11.07.2023

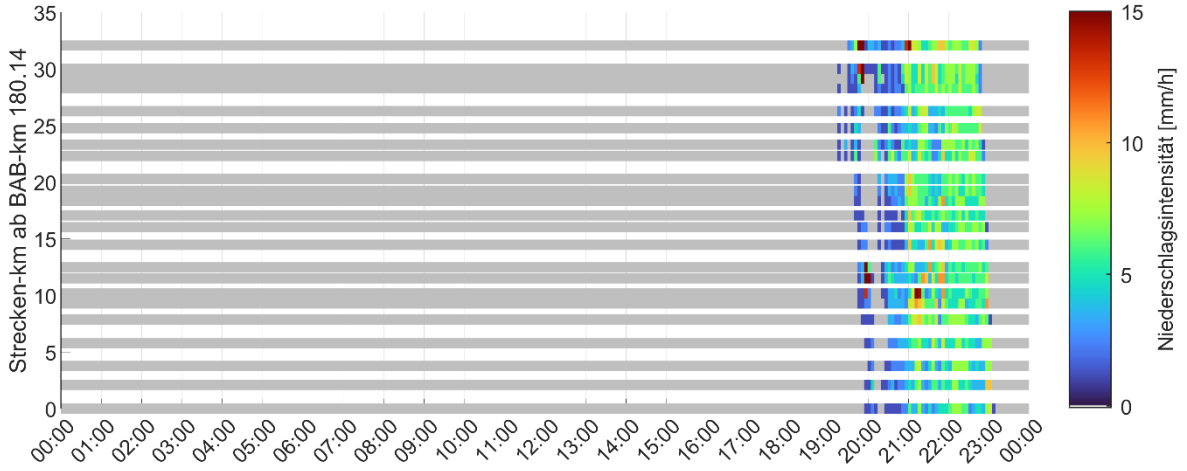

Bild 35: DWD Niederschlagsintensität auf der Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung Karlsruhe am 11.07.2023

5.4 Fahrzeugseitig erfasster Reibbeiwert

Bild 36 zeigt, dass FGD_01 Reibung nicht zur Ermittlung der Fahrbahnzustände und in späterer Folge zur Generierung hypothetischer Schaltungen verwendet werden sollte. Es ist keine klare Unterscheidung möglich, bei welcher FGD_01 Reibung der FG3 Fahrbahnzustand trocken bzw. nass ist. Auch bei der Analyse aller weiteren Boxplots ist keine Unterscheidung möglich.

In Bild 36 ist auch zu sehen, dass bei den FG3 Fahrbahnzuständen im Wesentlichen nur zwischen nass und trocken unterschieden wird. Aktuell ist es laut Autobahn GmbH möglich – bis auf wenige Ausnahmen – die Autobahn durch den Winterdienst komplett eisfrei zu halten, wodurch keine Eis-Messwerte vorhanden sind.

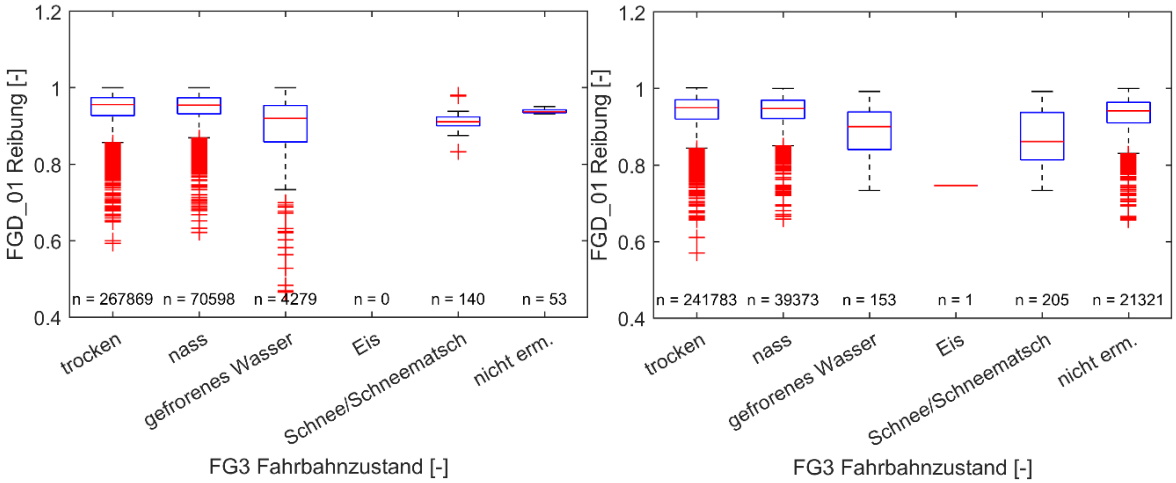

Bild 36: Boxplot FGD_01 Reibung für verschiedene FG3 Fahrbahnzustände von AQ S14 auf der Untersuchungsstrecke NWA (links) und AQ M02 auf der Untersuchungsstrecke SBA (rechts)

Es wurde auch untersucht, ob die Wertepaare von FGD_01 Reibung und FGD_01 Wischerfrequenz einen Zusammenhang zu den Nässestufen (Nass 1, Nass 2, Nass 3 und Nass 4) haben. In Bild 37 sind die Datenpunkte nach den vier verschiedenen Nässebedingungen kategorisiert. Dabei wird deutlich, dass die vier Kategorien keinem Muster unterliegen. So kann die Nässestufe bei einer hohen FGD_01 Reibung und einer niedrigen FGD_01 Wischerfrequenz Nass 1, aber auch Nass 2 oder Nass 3 sein.

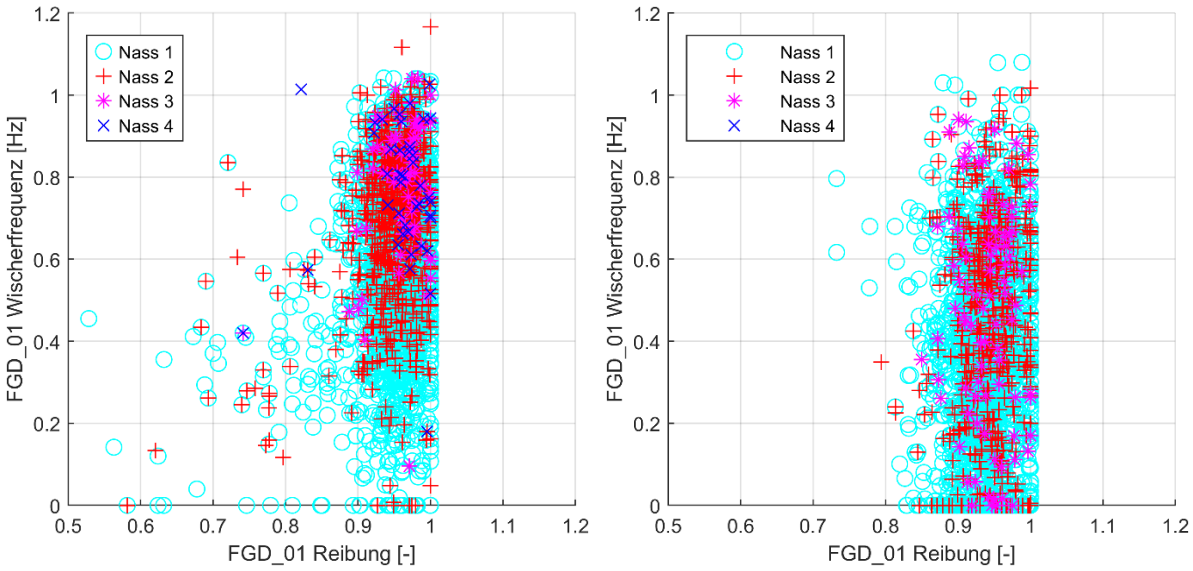

Bild 37: Scatterplot FGD_01 Reibung vs. FGD_01 Wischerfrequenz bezogen auf Nässestufe für AQ S14 auf der Untersuchungsstrecke NWA (links) und AQ M02 auf der Untersuchungsstrecke SBA (rechts)

5.5 Fahrzeugseitig erfasster Fahrbahnzustand

Diese Auswertungen liegen nur für die Untersuchungsstrecke SBA vor, da es auf der Untersuchungsstrecke NWA keine FGD_02 gibt. Tab. 17 bzw. Tab. 18 zeigen in welchem Verhältnis FGD_02 Fahrbahnzustand und FG3 Fahrbahnzustand für die AQs M02 bzw. KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA verschiedene Zustände melden. Bei beiden Kreuztabellen wird ersichtlich, dass FGD_02 Fahrbahnzustand größtenteils Dry meldet – nur bei 323 bzw. 687 Meldungen waren der FGD_02 Fahrbahnzustand Wet. FG3 Fahrbahnzustand wurde hingegen 4274- bzw. 7563-mal gemeldet. Die Spalte Mixed bei FGD_02 Fahrbahnzustand beschreibt Fälle, wo die Strings der Meldungen nicht eindeutig waren (bspw. „DRY DRY WET“). Tab. 19 bzw. Tab. 20 zeigen die berechneten bedingten Wahrscheinlichkeiten P(FG3|FGD_02), basierend auf den relativen Häufigkeiten der FG3-Fahrbahnzustände unter der Bedingung eines gegebenen FGD_02-Zustands – für die AQs M02 bzw. KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA. Bei AQ M02 wird in nur 56,66 % der Fälle, in denen FGD_02 den Zustand Wet meldet, auch von FG3 der Zustand nass gemeldet. Bei AQ KA04 liegt dieser Wert deutlich höher bei 89,96 %. Ähnliche schwankende Ergebnisse liefern auch die übrigen Kreuztabellen. Es ist somit schwierig, aus dem FGD_02 Fahrbahnzustand verlässlich auf einen FG3 Fahrbahnzustand nass zu schließen.

		FGD_02 Fahrbahnzustand				
		Dry	**Wet**	**SlipperyWet**	**SlipperyIce**	**Mixed**
FG3 Fahrbahnzustand	**trocken**	30121	140	0	0	404
	feucht	0	0	0	0	0
	nass	4091	183	0	6	432
	gefrorenes Wasser	0	0	0	0	0
	Eis	0	0	0	0	0

Tab. 17: Kreuztabelle FGD_02 Fahrbahnzustand und FG3 Fahrbahnzustand für AQ M02 auf der Untersuchungsstrecke SBA

		FGD_02 Fahrbahnzustand				
		Dry	Wet	SlipperyWet	SlipperyIce	Mixed
FG3 Fahr-bahnzustand	trocken	34914	69	0	7	402
	feucht	0	0	0	0	0
	nass	6945	618	0	0	1599
	gefrorenes Wasser	57	0	0	0	1
	Eis	0	0	0	0	0

Tab. 18: Kreuztabelle FGD_02 Fahrbahnzustand und FG3 Fahrbahnzustand für AQ KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA

		FGD_02 Fahrbahnzustand				
		Dry	Wet	SlipperyWet	SlipperyIce	Mixed
FG3 Fahr-bahnzustand	trocken	0,8804	0,4334	NaN	0	0,4833
	feucht	0	0	NaN	0	0
	nass	0,1196	0,5666	NaN	1	0,5167
	gefrorenes Wasser	0	0	NaN	0	0
	Eis	0	0	NaN	0	0

Tab. 19: Bedingte Wahrscheinlichkeiten P(FG3 | FGD_02), berechnet als relative Häufigkeiten der FG3-Fahrbahnzustände unter der Bedingung eines gegebenen FGD_02-Fahrbahnzustands für AQ M02 auf der Untersuchungsstrecke SBA

		FGD_02 Fahrbahnzustand				
		Dry	Wet	SlipperyWet	SlipperyIce	Mixed
FG3 Fahr-bahnzustand	trocken	0,8330	0,1004	NaN	1	0,2008
	feucht	0	0	NaN	0	0
	nass	0,1657	0,8996	NaN	0	0,7987
	gefrorenes Wasser	0,0014	0	NaN	0	0,0005
	Eis	0	0	NaN	0	0

Tab. 20: Bedingte Wahrscheinlichkeiten P(FG3 | FGD_02), berechnet als relative Häufigkeiten der FG3-Fahrbahnzustände unter der Bedingung eines gegebenen FGD_02-Fahrbahnzustands für AQ KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA

5.6 Fahrzeugseitig erfasste Niederschlagsintensitäts-Stufe

Auch diese Auswertungen liegen nur für die Untersuchungsstrecke SBA vor. In Tab. 21 bzw. Tab. 22 zeigt sich, dass NI-Stufe 0 in 83,49 % (19843-mal) bzw. 87,46 % (27146-mal) der Fälle in FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe None mündet. Für die weiteren Niederschlagsintensität-Stufen zeigt sich kein klares Bild mehr, in welchem Muster die verschiedenen Werte von FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe auftreten. Geschuldet ist dies auch der deutlich geringeren Anzahl an Meldungen mit Low, Medium oder High im Vergleich zu None. Folglich lässt sich nur schwer von der FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe auf die FG3 Niederschlagsintensität-Stufe gemäß einer klaren Logik schließen.

		FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe				
		None	Low	Medium	High	Mixed
FG3 Nieder-schlagsinten-sitäts-Stufe	NI-Stufe 0	0,8804	0,4334	NaN	0	0,4833
	NI-Stufe 1	0	0	NaN	0	0
	NI-Stufe 2	0,1196	0,5666	NaN	1	0,5167
	NI-Stufe 3	0	0	NaN	0	0
	NI-Stufe 4	0	0	NaN	0	0

Tab. 21: Kreuztabelle FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe und FG3 Niederschlagsintensität-Stufe für AQ M02 auf der Untersuchungsstrecke SBA

		FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe				
		Dry	Wet	SlipperyWet	SlipperyIce	Mixed
FG3 Nieder-schlagsinten-sitäts-Stufe	NI-Stufe 0	0,8330	0,1004	NaN	1	0,2008
	NI-Stufe 1	0	0	NaN	0	0
	NI-Stufe 2	0,1657	0,8996	NaN	0	0,7987
	NI-Stufe 3	0,0014	0	NaN	0	0,0005
	NI-Stufe 4	0	0	NaN	0	0

Tab. 22: Kreuztabelle FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe und FG3 Niederschlagsintensität-Stufe für AQ KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA

5.7 Fazit

Der Vergleich der räumlich-zeitlichen Muster von DWD Niederschlagsintensitäten und FGD_01 Wischerfrequenzen miteinander und mit den lokal erfassten FG3 Niederschlagsintensitäten zeigt grundsätzliches Potenzial für deren Nutzung zur Ermittlung der Nässestufen:

- **DWD Niederschlagsintensitäten**
  Die Weg-Zeit-Diagramme zeigen makroskopisch eine weitgehende Übereinstimmung zwischen den DWD Niederschlagsintensitäten und den durch FG3 erfassten Niederschlagsintensitäten. Lokale oder kurzzeitige Niederschlagsereignisse, die in den FG3-Daten detektiert werden, erscheinen in den DWD-Daten mitunter nicht, was sich durch Unterschiede in der Erfassungsmethode (datengestützte großflächige Modellrechnung vs. punktuelle Erfassung) erklären lässt. Insgesamt erweisen sich die DWD-Daten als robust und plausibel. Ein schwellenwertbasierter Einsatz zur Schaltvorschlagsermittlung erscheint grundsätzlich möglich, jedoch ist die zeitliche Latenz aufgrund der 5-Minuten-Aggregation zu berücksichtigen.
- **FGD_01 Wischerfrequenz**
  Die Aktivität der Scheibenwischer (Frequenz > 0) tritt räumlich und zeitlich deutlich häufiger auf als Niederschlagsereignisse in den FG3- oder DWD-Daten. Neben dem Nachwirken von Niederschlag (Restnässe auf der Fahrbahn) können auch fahrzeugintern motivierte Einzelwischvorgänge (z. B. Scheibenreinigung) ursächlich sein. Daraus ergibt sich eine gewisse „Nervosität“ der Daten, die zusammen mit der 10-Minuten-Aggregation den Einsatz schwellenwertbasierter Schaltstrategien erschwert. Darüber hinaus fehlt Information über die Anzahl der meldenden Fahrzeuge und deren individuelle Wischfrequenz, so dass eine Interpretation/Filterung nicht möglich ist.

Die augenscheinlich gute makroskopische Übereinstimmung in den Zeit-Weg-Diagrammen bestätigte sich beim direkten Vergleich der Wertepaaren nicht: Sowohl visuell (Scatterplots, Zeitreihen) als auch statistisch (Korrelation) zeigen sich keine deutlichen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Daten. Mögliche Erklärungen hierfür sind:

- **DWD Niederschlagsintensitäten**
  Die DWD-Daten weichen deutlich von den punktuell erfassten FG3-Messwerten ab. Die Kombination aus aggregiertem Zeitintervall (5 Minuten) und räumlicher Glättung reduziert die Aussagekraft für lokale Ereignisse.
- **FGD_01 Wischerfrequenz**
  Hier handelt es sich um eine indirekte Größe, die Einflüsse sowohl von Niederschlagsintensität als auch von Wasserfilmdicke beinhaltet. Eine hohe Korrelation mit nur einer dieser Kenngrößen ist daher nicht zu erwarten. Hinzu kommt das individuelle Verhalten der Fahrenden (z. B. manuelles Scheibenreinigen), die individuelle Geschwindigkeit und der Abstand zum Vorderfahrzeug (Sprühfahnen), die die Daten zusätzlich beeinflussen. Zudem ist nicht bekannt, wie viele Fahrzeuge jeweils zu einer übermittelten Meldung beitragen.
- **Methodische Einschränkungen**
  Die verwendeten 5- bzw. 10-Minuten-Aggregate sowie die fehlenden Einzelmeldungen mit präzisem Orts- und Zeitbezug erschweren eine differenzierte Analyse.

Für die anderen Größen gibt es folgenden Erkenntnisse:

- **FGD_01 Reibung**
  In ihrer aktuellen Form sind diese primär auf winterliche Fahrbahnzustände (z. B. Eis, Schnee) ausgelegt. Eine Verwendung zur nässebasierten Steuerung erscheint derzeit nicht zielführend, jedoch ist ein potenzieller Einsatz im Winterdienst denkbar.
- **FGD_02 Fahrbahnzustand**
  Ein belastbarer Zusammenhang mit dem lokal erfassten Fahrbahnzustand konnte nicht festgestellt werden. Die Datenlage ist von einer starken Dominanz der Zustandskategorie „Dry“ geprägt, während Meldungen zu nassen oder feuchten Fahrbahnen kaum vorhanden sind.
- **FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe**
  Auch hier zeigt sich eine geringe Sensitivität. Die meisten Werte entfallen auf die Kategorie „None“. In Kombination mit der begrenzten Datenverfügbarkeit ergibt sich derzeit kein praktikabler Ansatz zur Ableitung von Nässestufen auf Basis dieser Datenquelle.

Die vorliegenden Analysen zeigen, dass bestimmte Datenquellen – insbesondere DWD Niederschlagsintensitäten – grundsätzlich zur Nässestufenbestimmung nutzbar sind. Einschränkungen ergeben sich jedoch durch Aggregationsprozesse, unzureichende Sensitivität, fehlende Kontextinformationen (z. B. Verkehrsaufkommen, Geschwindigkeit) und nicht nachvollziehbare Beitragsgrößen einzelner Fahrzeuge.

In Kapitel 6 wird untersucht, inwieweit sich mit einem methodischen Ansatz, der sich an der MARZ-Systematik orientiert, trotz dieser Einschränkungen belastbare Nässestufen und daraus abgeleitete Schaltvorschläge ermitteln lassen.

6 Ermittlung und Analyse von Nässestufen

Die fahrzeuggenerierten Daten und die DWD-Daten enthalten – wie in den Kapiteln 4 und 5 beschrieben – neben der Lufttemperatur auch Kenngrößen zum Niederschlag und zum Fahrbahnzustand. Im Folgenden liegt der Fokus auf der Entwicklung von Ansätzen zur Ermittlung der Nässestufe auf Basis der neuen Datenquellen. Die resultierenden Nässestufen dienen anschließend unmittelbar als Grundlage für die Schaltvorschläge.

6.1 Ermittlung der Nässestufe

6.1.1 Datenvorverarbeitung (Glättung)

Die FG3 Niederschlagsintensität und Wasserfilmdicke wurden von der Autobahn GmbH zur Ermittlung der Niederschlagsintensitätsstufe bzw. Wasserfilmdickenstufe entsprechend dem Vorgehen nach MARZ (A 2.3.2) mit den Standardparametern geglättet. Aus diesen Stufen wird nach MARZ (3.3.3.3) die Nässestufe ermittelt.

Die DWD Niederschlagsintensitäten wurden nicht geglättet, da es sich um zeitlich aggregierte (5 Minuten) und im Rahmen der Radar-Online-Aneichung über ein Modell räumlich interpolierte Daten handelt.

Ebenso erfolgte bei den FGD_01 keine Glättung der Daten, da es sich bei den vorliegenden Daten bereits um ordinalskalierte Daten aus einem längeren Intervall (8 bis 23 Minuten) handelt. Dasselbe gilt für die FGD_02, welche auch durch Datenlieferanten räumlich und zeitlich aggregiert (10 Minuten) wurden.

6.1.2 Grundsätzliche Überlegungen und Anforderungen zur Zusammenführung unterschiedlicher Daten (Datenfusion)

Die Zusammenführung von unterschiedlichen Daten zum Zweck einer verbesserten Informationsgrundlage, hier zur Ermittlung der Nässestufe für die SBA-Steuerung, wird als Datenfusion bezeichnet. Dabei gibt es unterschiedliche Ausprägungen und Ansätze. Grundsätzlich kann bei der Datenfusion zwischen folgenden Strategien unterschieden werden:

- Fusion früh im Ablauf, d.h. möglichst nah an den einzelnen Sensoren (sog. „Early Fusion“, „High-Level Fusion“)
- Fusion spät im Ablauf, d.h. möglichst nah am konsolidierten Ergebnis (sog. „Late Fusion“, „Low-Level Fusion“)

Details finden sich in der einschlägigen Fachliteratur (z. B. PAWLOWSKI ET AL. 2023). Eine eindeutige Zuordnung „Early Fusion“ / „Late Fusion“ ist nicht immer möglich und für eine Umsetzung auch nicht erforderlich. Bei einer Zusammenführung der Daten in einer Zentrale (im Kontext von SBA: Unterzentrale) kann grundsätzlich eher von „Late Fusion“ gesprochen werden.

Das bestehende MARZ-Verfahren zur Ermittlung der Nässestufe kann bereits als Datenfusion bezeichnet werden, da unterschiedliche Daten (Niederschlagsintensität und Wasserfilmdicke) zusammengeführt werden. Hierbei handelt es sich eindeutig um einen „Late Fusion"-Ansatz, da die Messwerte zunächst jeweils für sich weiterverarbeitet werden und erst spät (auf Basis einer NI-Stufe und einer WFD-Stufe) zur Nässestufe zusammengeführt werden.

Für die Anwendung in der SBA-Steuerung ergeben sich aus technischer und systemischer Sicht spezifische Anforderungen an geeignete Verfahren zur Datenfusion:

- Transparenz und Nachvollziehbarkeit: Die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen soll klar erkennbar und erklärbar sein. Unerwartete oder nicht interpretierbare Systemreaktionen sind zu vermeiden.
- Robustheit gegenüber fehlerhaften oder fehlenden Daten: Verfahren müssen auch dann verlässlich arbeiten, wenn Daten planmäßig nicht erfasst werden (z. B. nachts), Sensorsignale ausfallen oder Messwerte unplausibel sind.
- Flexibilität in der Datenintegration: Das Verfahren sollte in der Lage sein, mehrere unterschiedliche Datenquellen zu einem gemeinsamen Output, der Nässestufe, zusammenzuführen.
- Systemkompatibilität: Die entwickelten Ansätze sollen sich nahtlos in die bestehende MARZ-Systematik integrieren lassen.
- Unabhängigkeit von Trainingsdaten: Die Verfahren sollen auch ohne umfangreiche Trainingsdatensätze funktionieren (stattdessen: manuelles Input/Output Mapping).

Regelbasierte Ansätze erfüllen diese Anforderungen in hohem Maße. Insbesondere MARZ-ähnliche Verfahren mit klar definierten Stufenmodellen sowie Fuzzy-Expertensysteme, die mit Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten in den Eingangsdaten flexibel umgehen können, bieten hier großes Potenzial. Gerade Fuzzy-Expertensysteme erscheinen für den vorliegenden Fall der Fusion unterschiedlich skalierter Eingangsgrößen zu einer Aussage besonders geeignet, da über die Schritte Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung komplexe Zusammenhänge recht einfach beschrieben werden können und nachvollziehbar bleiben (MENDEL 1995, ZIMMERMANN 2001). Konkrete Umsetzungen dieser Ansätze werden im Kapitel 6.1.3 vorgestellt.

6.1.3 Regelbasierte Ansätze zur Ermittlung der Nässestufe

Es werden insgesamt 14 Ansätze zur Ermittlung der Nässestufe untersucht (siehe Tab. 23). Die Ansätze 1, 3, 6, 9 und 12 nutzen ausschließlich fahrzeuggenerierte Daten und/oder DWD Niederschlagsintensitäten, beispielsweise für den Fall, dass gar keine stationäre Umfeldsensorik vorhanden oder diese vollständig ausgefallen ist. In den Ansätzen 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13 und 14 werden FG3-Daten (NI oder WFD) mit fahrzeuggenerierten Daten und/oder DWD Niederschlagsintensitäten kombiniert.

Ansatz	ID	DWD Niederschlagsintensität	FGD_01 Wischerfrequenz	FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe	FG3 Niederschlagsintensität-Stufe	FG3 Wasserfilmdicke-Stufe	Output	Methode
FG3-Nässestufe	0				x	x	Referenz aus VZ	
MARZ DWD	1	x					Nässestufe	MARZ
MARZ DWD FG3 WFD	2	x				x	Nässestufe	MARZ
Fuzzy DWD	3	x					Nässestufe	Fuzzy-Logik
Fuzzy DWD FG3 NI	4	x			x		Nässestufe	Fuzzy-Logik
Fuzzy DWD FG3 WFD	5	x				x	Nässestufe	Fuzzy-Logik
Fuzzy FGD_01 Wischerfrequenz	6		x				Nässestufe	Fuzzy-Logik
Fuzzy FGD_01 Wischerfrequenz FG3 NI	7		x		x		Nässestufe	Fuzzy-Logik
Fuzzy FGD_01 Wischerfrequenz FG3 WFD	8		x			x	Nässestufe	Fuzzy-Logik
Fuzzy DWD FGD_01 Wischerfrequenz	9	x	x				Nässestufe	Fuzzy-Logik
Fuzzy DWD FGD_01 Wischerfrequenz FG3 NI	10	x	x		x		Nässestufe	Fuzzy-Logik
Fuzzy DWD FGD_01 Wischerfrequenz FG3 WFD	11	x	x			x	Nässestufe	Fuzzy-Logik
Fuzzy FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe	12			x			Nässestufe	Fuzzy-Logik
Fuzzy FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe FG3 NI	13			x	x		Nässestufe	Fuzzy-Logik
Fuzzy FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe FG3 WFD	14			x		x	Nässestufe	Fuzzy-Logik

Tab. 23: Ansätze zur Ermittlung von Nässestufen auf Basis der verfügbaren Datenquellen

In den ersten beiden Ansätzen ersetzt die DWD Niederschlagsintensität die lokal erfasste Niederschlagsintensität im schwellenwertbasierten Verfahren nach dem MARZ. Beim Ansatz mit ID 1 wird aus der DWD Niederschlagsintensität zunächst eine Niederschlagsintensitäts-Stufe abgeleitet, aus der anschließend direkt die Nässestufe bestimmt wird. Beim Ansatz mit ID 2 wird ebenfalls zunächst die Niederschlagsintensitäts-Stufe aus der DWD Niederschlagsintensität ermittelt. Diese wird dann zusammen mit der Wasserfilmdicke-Stufe aus der lokalen Datenerfassung (FG3) entsprechend der MARZ Matrix in Tab. 3 zu einer Nässestufe zusammengeführt. Das Ablaufschema für den Ansatz mit ID 2 ist in Bild 38 dargestellt. Der Ablauf für ID 1 ist

grundsätzlich analog, jedoch entfällt hier die Einbindung der Wasserfilmdicke, da kein FG3-WFD zur Verfügung steht und somit auch keine WFD-Stufe gebildet werden kann.

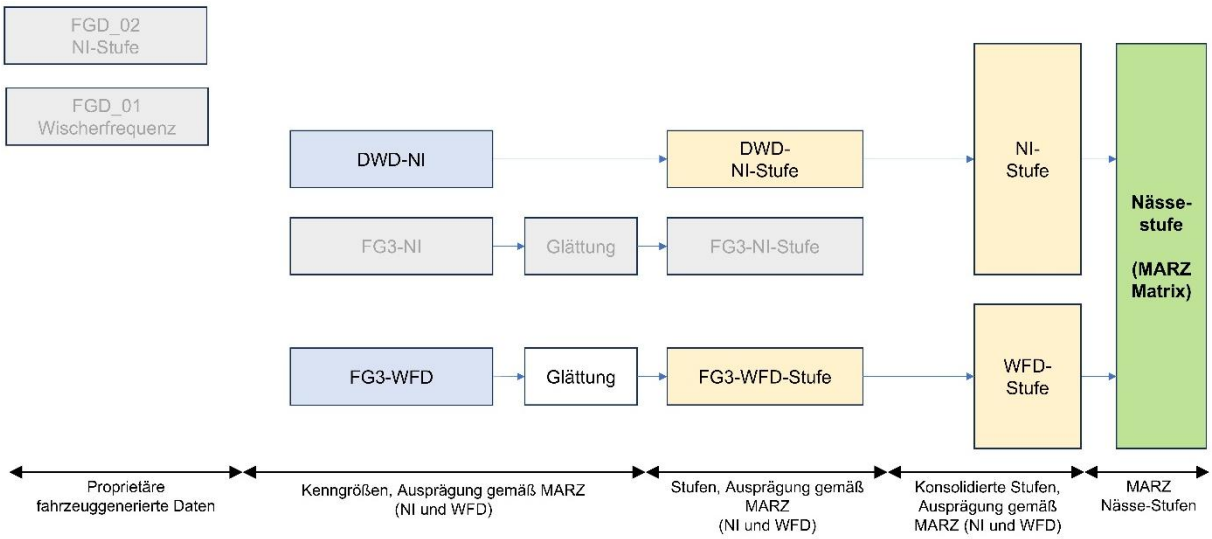

Bild 38: Ablaufschema für Ansatz mit ID 2 (DWD Niederschlagsintensität und FG3 Wasserfilmdicke)

In den Ansätzen ID 3 bis 14 wird jeweils aus einer oder mehreren Kenngrößen über ein Fuzzy-Inferenz-System eine Nässestufe ermittelt. Der grundsätzliche Aufbau eines Fuzzy-Inferenz-Systems ist in Bild 39 dargestellt. Die Fuzzy-Eingangswerte werden bei der Fuzzifizierung linguistischen Kategorien wie niedrig, mittel oder hoch zugeordnet. Zusätzlich wird eine Regelbasis (z.B.: Wenn DWD Niederschlagsintensität ist hoch und FGD_01 Wischerfrequenz ist hoch, dann ist die Nässestufe gleich 4 (nass 4)) definiert. Anschließend werden die Ergebnisse der einzelnen Regeln im Aggregationsschritt zusammengeführt. Die anschließende Defuzzifizierung erfolgt mithilfe der Flächenschwerpunktmethode. Dabei wird aus der aggregierten Fuzzy-Ausgabemenge ein skalarer Nässestufenwert berechnet. Dieser wird abschließend auf die nächstgelegene definierte Nässestufe gerundet – beispielsweise wird ein berechneter Wert von 1,69 auf nass 2 aufgerundet. Die Nässestufen reichen von 0 (trocken) bis 4 (nass 4). Weiterführende Informationen zur Fuzzy-Logik und zum Aufbau solcher Systeme finden sich bei ZIMMERMANN (2001).

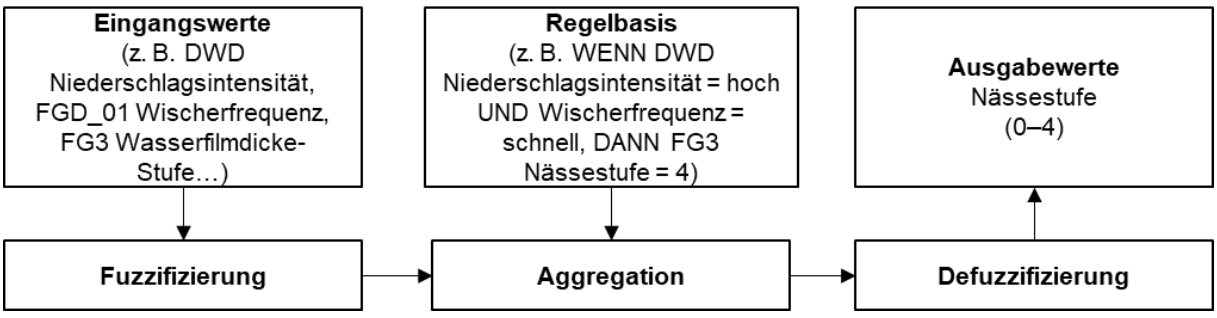

Bild 39: Aufbau des Fuzzy-Inferenz-Systems zur Berechnung der Nässestufe aus Eingangswerten

Nachfolgend wird der Aufbau eines Fuzzy-Inferenz-Systems zur Ermittlung der Nässestufen exemplarisch am Beispiel des Ansatzes mit ID9 beschrieben. Die weiteren Ansätze auf Basis der Fuzzy-Logik Methode (Ansätze mit IDs 3 bis 14) folgen demselben Grundschema. Details zu den verwendeten Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangs- und Ausgangsvariab-

len sowie zur Regelbasis sind im Anhang dokumentiert. Als Eingangsgrößen dienen durchgängig die Kenngrößen gemäß Tab. 24, Spalte 3 bis 9. Für den Ansatz mit der ID 9 werden die DWD Niederschlagsintensität und die FGD_01 Wischerfrequenz verwendet, wie im Ablaufdiagramm in Bild 40 dargestellt.

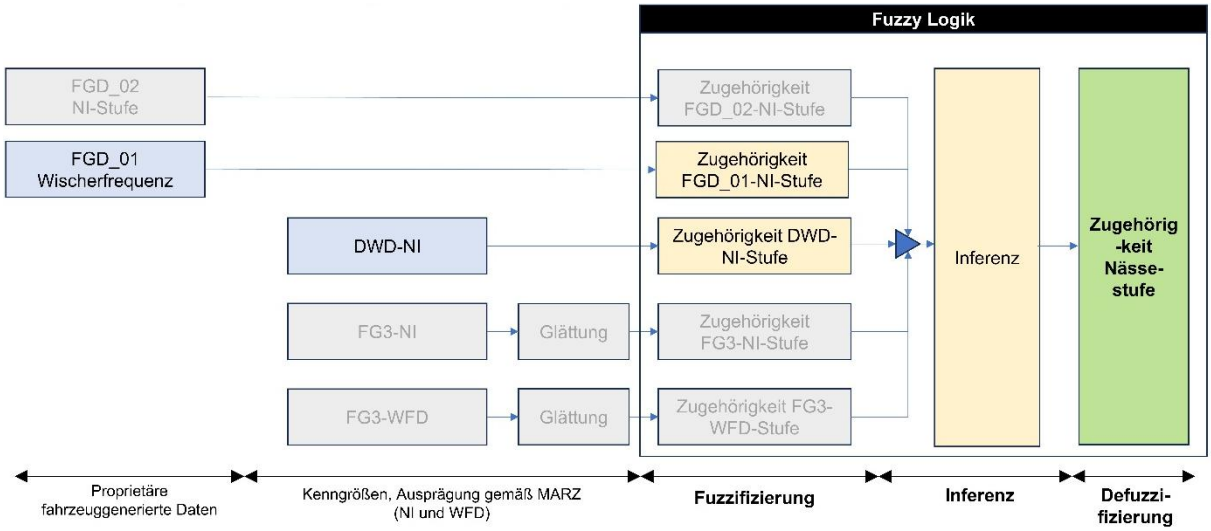

Bild 40: Ablaufschema für Ansatz mit ID 9 (FGD_01 Wischerfrequenz und DWD Niederschlagsintensität)

Im ersten Schritt der Fuzzy-Logik werden die Eingangsgrößen über definierte Zugehörigkeitsfunktionen „fuzzifiziert“ (siehe linker Teil Fuzzy-Logik Block in Bild 40). Dabei wird für jede Eingangsgröße der Grad der Zugehörigkeit zu verschiedenen linguistischen Kategorien bestimmt. Zur robusten Verarbeitung unvollständiger Datensätze wurde für jede Eingangsvariable zusätzlich die Kategorie „fehlend“ eingeführt. Die entsprechenden Werte wurden systematisch auf -1 gesetzt, um diese explizit in der Regelbasis berücksichtigen zu können. Zum Einsatz kommen Zugehörigkeitsfunktionen, die eine weiche Übergangslogik (dreiecksförmige und trapezförmige) zwischen den Kategorien ermöglichen. Die numerischen Parametergrenzen dieser Funktionen wurden nicht fest vorgegeben, sondern im Rahmen iterativer Tests bestimmt. Dabei wurden unterschiedliche Grenzwertkombinationen variiert und anhand ihrer Plausibilität sowie der Trennschärfe der resultierenden Klassifikation bewertet. Ziel war es, realitätsnahe Übergänge zwischen den Kategorien zu gewährleisten und gleichzeitig eine rechnerisch stabile Umsetzung zu sichern. Die genaue Ausprägung dieser Kategorien und deren numerische Umsetzung erfolgt wie folgt:

Definierte Kategorien für die DWD-Niederschlagsintensität (siehe Bild 41 links):

- fehlend: Zur Behandlung fehlender oder ungültiger Werte wurde die Kategorie fehlend eingeführt. Sie wird durch eine dreiecksförmige Funktion trimf([-1, -1, -1]) beschrieben, wobei nur beim Wert –1 die Zugehörigkeit ($\mu = 1$) vorliegt. Dieser Wert dient im System als technischer Platzhalter für fehlende Informationen im Fuzzy-System.
- kein: Das völlige Ausbleiben von Niederschlag wird durch trimf([0, 0, 0]) modelliert. Nur beim Wert 0 liegt Zugehörigkeit zur Kategorie kein vor.
- niedrig: Niedrige Niederschlagsintensitäten werden mit der Funktion trimf([0, 0.01, 1.6]) abgebildet. Die maximale Zugehörigkeit liegt bei 0.01, mit einem linearen Abfall zu den Rändern 0 und 1.6.

- mittel: Die Funktion trimf([1.2, 3.1, 5]) repräsentiert mittlere Intensitäten. Der Wert 3.1 bildet das Zentrum (μ = 1), während bei 1.2 und 5 keine Zugehörigkeit mehr besteht.
- hoch: Starke Niederschläge werden über eine trapezförmige Funktion trapmf([4.6, 5.4, 18, 18]) beschrieben. Ab 5.4 ist die Zugehörigkeit konstant bei μ = 1, beginnend mit einem Anstieg ab 4.6.

Definierte Kategorien für die FGD_01-Wischerfrequenz (siehe Bild 41 rechts):

- fehlend: Analog zur DWD-Intensität wird fehlend durch trimf([-1, -1, -1]) dargestellt, um unvollständige Daten eindeutig zu erfassen.
- kein: Eine inaktive Wischerstellung (Frequenz = 0) wird über trimf([0, 0, 0]) abgebildet.
- langsam: Langsame Wischfrequenzen werden durch trimf([0, 0.01, 0.6]) beschrieben, mit dem Zentrum bei 0.01.
- mittel: Die Funktion trimf([0.5, 0.7, 0.9]) stellt mittlere Wischintensitäten dar, mit maximaler Zugehörigkeit bei 0.7.
- schnell: Hohe Frequenzen werden durch trapmf([0.8, 1, 1.2, 1.2]) abgebildet, mit vollständiger Zugehörigkeit ab 1.

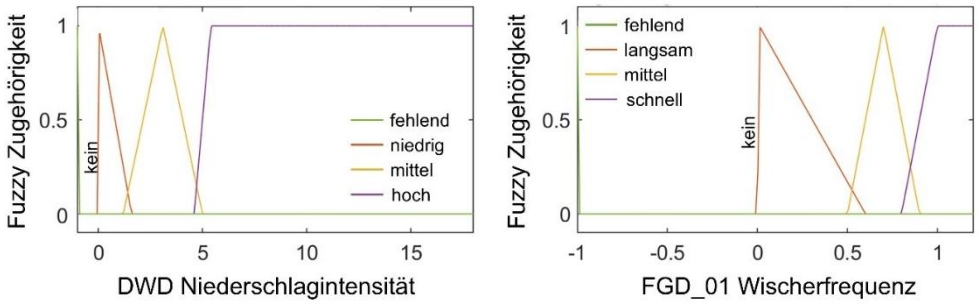

Bild 41: Fuzzy Zugehörigkeitsfunktionen für Eingangsvariablen DWD Niederschlagsintensität und FGD_01 Wischerfrequenz

Die konkrete Umsetzung in MATLAB ist im nachfolgenden Quellcode dargestellt. Zunächst wird das Fuzzy-Inferenz-System erstellt, anschließend werden mit den Befehlen addInput und addMF die Eingangs- sowie die Ausgangsvariablen inklusive ihrer Zugehörigkeitsfunktionen hinzugefügt.

```
    % Fuzzy-Inferenz-System (FIS) für DWD Niederschlagsintensität und FGD_01 Wischerfrequenz
erstellen
    fis_dwd_wf = mamfis('Name', 'Niederschlag_Fuzzy');

    % Eingangsvariable 1: DWD (in mm)
    fis_dwd_wf = addInput(fis_dwd_wf, [-1 18], 'Name', 'DWD');
    fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'DWD', 'trimf', [0 0 0], 'Name', 'kein');
    fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'DWD', 'trimf', [0 0.01 1.6], 'Name', 'niedrig');
    fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'DWD', 'trimf', [1.2 3.1 5], 'Name', 'mittel');
    fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'DWD', 'trapmf', [4.6 5.4 18 18], 'Name', 'hoch');
    fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'DWD', 'trimf', [-1 -1 -1], 'Name', 'fehlend');

    % Eingangsvariable 2: FGD_01 Wischerfrequenz mit zusätzlicher "fehlend"-Kategorie
    fis_dwd_wf = addInput(fis_dwd_wf, [-1 1.2], 'Name', 'FGD_01 Wischerfrequenz');
    fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'FGD_01 Wischerfrequenz', 'trimf', [0 0 0], 'Name', 'kein');
    fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'FGD_01 Wischerfrequenz', 'trimf', [0 0.01 0.6], 'Name',
'langsam');
    fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'FGD_01 Wischerfrequenz', 'trimf', [0.5 0.7 0.9], 'Name',
'mittel');
    fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'FGD_01 Wischerfrequenz', 'trapmf', [0.8 1 1.2 1.2], 'Name',
'schnell');
    fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'FGD_01 Wischerfrequenz', 'trimf', [-1 -1 -1], 'Name', 'feh-
lend');
```

Im zweiten Schritt erfolgt die Fuzzy-Inferenz (siehe Mittelteil Fuzzy-Logik Block in Bild 40). Die fuzzifizierten Eingangsgrößen werden über insgesamt 25 Fuzzy-Regeln mithilfe logischer Operatoren miteinander verknüpft (siehe Tab. 24). Jede Regel beschreibt eine Kombination von Eingabekategorien und deren resultierende Ausgabe in Form einer Nässestufe (Beispielregel: Wenn die DWD Niederschlagsintensität niedrig und die FGD_01 Wischerfrequenz schnell ist, dann ist die Nässestufe nass_2). Die vollständige Regelbasis ist in Tab. 24 dargestellt.

Regel-Nr.	DWD Niederschlagsintensität	Logischer Operator	FGD_01 Wischerfrequenz	Nässestufe	Regel-Nr.	DWD Niederschlagsintensität	Logischer Operator	FGD_01 Wischerfrequenz	Nässestufe
1	kein	UND	kein	trocken	14	mittel	UND	schnell	nass_3
2	kein	UND	langsam	trocken	15	mittel	UND	fehlend	nass_2
3	kein	UND	mittel	trocken	16	hoch	UND	kein	nass_1
4	kein	UND	schnell	nass_1	17	hoch	UND	langsam	nass_2
5	kein	UND	fehlend	trocken	18	hoch	UND	mittel	nass_3
6	niedrig	UND	kein	trocken	19	hoch	UND	schnell	nass_4
7	niedrig	UND	langsam	nass_1	20	hoch	UND	fehlend	nass_3
8	niedrig	UND	mittel	nass_1	21	fehlend	UND	kein	trocken
9	niedrig	UND	schnell	nass_2	22	fehlend	UND	langsam	trocken
10	niedrig	UND	fehlend	nass_1	23	fehlend	UND	mittel	nass_1
11	mittel	UND	kein	nass_1	24	fehlend	UND	schnell	nass_2
12	mittel	UND	langsam	nass_1	25	fehlend	UND	fehlend	trocken
13	mittel	UND	mittel	nass_2					

Tab. 24: Fuzzy Regeln für Ansatz 9

Die Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen für die Ausgangsvariable Nässestufe sind in Bild 42 dargestellt. Die Nässestufe ist in fünf Kategorien unterteilt: trocken, nass 1, nass 2, nass 3 und nass 4. Jede dieser Kategorien wird durch eine dreiecksförmige Zugehörigkeitsfunktion (Typ trimf) dargestellt. Der horizontale Achsenbereich reicht von 0 bis 4 und repräsentiert den numerischen Wertebereich der Nässestufen. Die zugehörigen Parameterwerte sowie die konkrete Implementierung für die Ausgangsvariable Nässestufe finden sich im MATLAB-Code unterhalb.

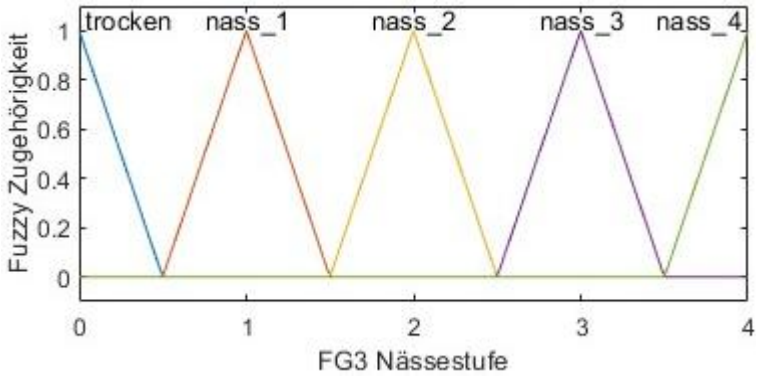

Bild 42: Fuzzy Zugehörigkeitsfunktionen für Ausgangsvariable FG3 Nässestufe

```
% Ausgangsvariable: FG3 Nässestufe (trocken, nass 1, nass 2, nass 3, nass 4)
fis_dwd_wf = addOutput(fis_dwd_wf, [0 4], 'Name', 'FG3 Naessestufe');
fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'FG3 Naessestufe', 'trimf', [0 0 0.5], 'Name', 'trocken');
fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'FG3 Naessestufe', 'trimf', [0.5 1 1.5], 'Name', 'nass_1');
fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'FG3 Naessestufe', 'trimf', [1.5 2 2.5], 'Name', 'nass_2');
fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'FG3 Naessestufe', 'trimf', [2.5 3 3.5], 'Name', 'nass_3');
fis_dwd_wf = addMF(fis_dwd_wf, 'FG3 Naessestufe', 'trimf', [3.5 4 4], 'Name', 'nass_4');
```

Nach der Fuzzifizierung und Anwendung der Regelbasis erfolgt die Defuzzifizierung, bei der aus den aggregierten Fuzzy-Ausgaben ein konkreter numerischer Wert für die Nässestufe berechnet wird. Bild 43 zeigt die ermittelte Nässestufe für die möglichen Ausprägungen der DWD Niederschlagsintensität und der FGD_01 Wischerfrequenz.

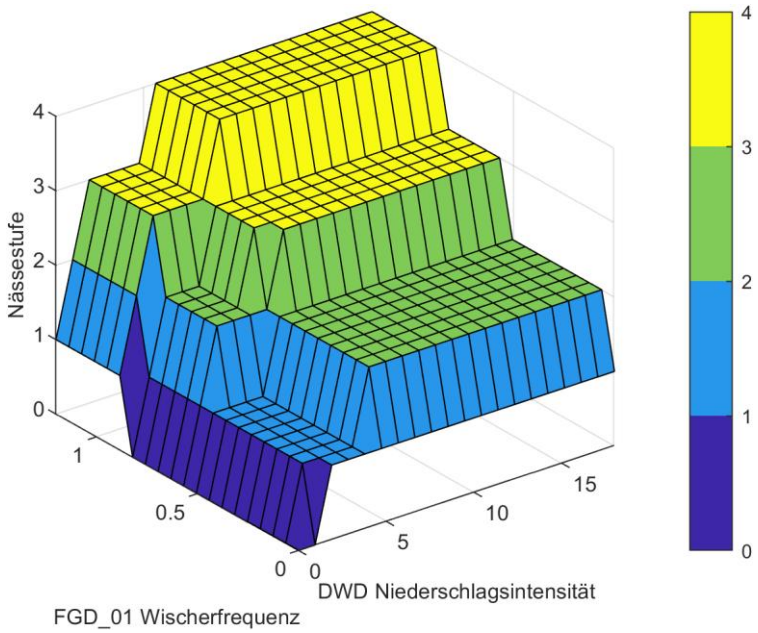

Bild 43: Visualisierung der Fuzzy-Logik für Ansatz 9 (DWD Niederschlagsintensität und FGD_01 Wischerfrequenz)

6.2 Latenzen

Die Latenzzeiten der eingesetzten Datenquellen stellen einen zentralen Parameter bei der Bewertung der Echtzeitfähigkeit und Prognosegüte von Verkehrszustands- und Wettermodellen dar. Im Rahmen dieses Projekts wurden meteorologische sowie fahrzeuggenerierte

Daten analysiert, deren Latenzeigenschaften im Folgenden differenziert dargestellt werden. Unter Latenz wird in diesem Zusammenhang die Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt der Messung und der tatsächlichen Verfügbarkeit der Daten in der Verkehrszentrale verstanden. Diese Definition ist wichtig, um die Vergleichbarkeit der verschiedenen Datenquellen zu gewährleisten.

Zur besseren Einordnung der nachfolgend aufgeführten Werte wird zunächst die Latenz der bislang eingesetzten FG3-Daten beschrieben. Diese liegen als über 1 Minute gemittelte Werte vor, wobei der anschließende Datentransfer bis zu 30 Sekunden in Anspruch nehmen kann. Daraus ergibt sich eine typische Latenz von etwa 60 Sekunden. Zusätzlich werden die FG3-Daten in der Verkehrszentrale geglättet, um kurzfristige Schwankungen zu reduzieren. Daraus können weitere Latenzen entstehen. Bei den neu eingeführten Datenquellen hingegen erfolgt eine vergleichbare Aggregation und Glättung bereits durch die jeweiligen Anbieter, sodass auf eine nachgelagerte Glättung in der Zentrale verzichtet werden kann. Dies ermöglicht eine unmittelbarere Weiterverarbeitung, ohne dabei auf die Vorteile geglätteter Zeitreihen verzichten zu müssen.

Aufgrund der identifizierten Latenzen ergibt sich eine zentrale Herausforderung für die unmittelbare Nutzung dieser Datenquellen zur Steuerung einer SBA. Die teils erhebliche Zeitverzögerung zwischen Datenerhebung und -verfügbarkeit limitiert die Eignung für reaktive Steuerentscheidungen im Sinne eines dynamischen Verkehrsmanagements.

6.2.1 RADOLAN-Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD)

Die RADOLAN-Daten des Deutschen Wetterdienstes liefern flächendeckende (1kmx1km Raster), hochaufgelöste Niederschlagsinformationen im 5-Minuten-Raster. Die Latenz beträgt ebenfalls etwa fünf Minuten, das heißt, die jeweiligen Datensätze stehen rund fünf Minuten nach dem Erfassungszeitpunkt zur Verfügung. Diese vergleichsweise geringe Verzögerung macht die DWD-Daten grundsätzlich geeignet für die wetterbedingte Bewertung großräumiger Witterungszustände. Für eine kurzfristige, situative Steuerung, wie sie bei SBA-Schaltungen erforderlich ist, stellt jedoch bereits diese Latenz einen limitierenden Faktor dar – insbesondere in dynamisch wechselnden Wettersituationen.

6.2.2 Fahrzeuggenerierte Datenquelle FGD_01

Die fahrzeuggenerierte Datenquelle FGD_01 basiert auf einem rollierenden Aggregationsverfahren:

1. **Aggregationsmechanismus:** Die Verkehrszustandsdaten eines Liniensegments werden aus Fahrzeugdaten berechnet, die innerhalb eines gleitenden 60-Minuten-Fensters erfasst wurden. Diese Aggregation wird alle zehn Minuten aktualisiert.
2. **Datenverfügbarkeit und Latenz:** Die Verzögerung zwischen dem letzten erfassten Fahrzeugwert eines 10-Minuten-Intervalls und der Bereitstellung der aggregierten Daten liegt typischerweise zwischen 30 Sekunden und 3 Minuten. Trotz dieser relativ geringen Latenz ist zu berücksichtigen, dass die zugrundeliegende Mittelung über eine Stunde erfolgt und somit kurzfristige Veränderungen im Verkehrszustand nur verzögert abgebildet werden.
3. **Limitationen für SBA-Anwendungen:** Aufgrund der zeitlichen Glättung und der rollierenden Mittelung über einen langen Zeitraum eignet sich FGD_01 nur eingeschränkt für eine direkte, zeitkritische Steuerung von Streckenbeeinflussungsan-

lagen. Kritische Ereignisse oder rasch auftretende Verschlechterungen der Fahrbahnverhältnisse können durch die Aggregationslogik verzögert oder stark geglättet erscheinen, sodass Extremwerte in der Regel nicht auftreten.

6.2.3 Fahrzeuggenerierte Datenquelle FGD_02

Die Datenquelle FGD_02 basiert auf einer aggregierten, adaptiven Auswertung von Fahrzeugmesswerten in festgelegten Zeitfenstern:

1. **Aggregationsmechanismus:** Die Standardaggregation erfolgt über ein 15-Minuten-Zeitfenster, wobei mindestens drei Fahrzeuge im jeweiligen Intervall Daten liefern müssen. Bei unzureichender Datenbasis wird das Zeitfenster adaptiv verlängert, um eine ausreichende Datenbasis sicherzustellen.
2. **Datenverfügbarkeit und Latenz:** Die Daten werden mit einem festen Zeitversatz von acht Minuten nach Ende des Aggregationsfensters bereitgestellt. Daraus ergibt sich eine maximale Latenz von 23 Minuten (wenn der früheste Messwert zu Beginn des Fensters lag) sowie eine minimale Latenz von 8 Minuten. Die tatsächliche Aussagekraft eines aggregierten Datenpunkts hängt dabei wesentlich von der zeitlich-räumlichen Dichte der einbezogenen Fahrzeugdaten ab. Eine große Streuung innerhalb des Aggregationszeitraums kann die Qualität und Verlässlichkeit des Mittelwertes deutlich mindern.
3. **Limitationen für SBA-Anwendungen:** Für eine situative und räumlich eng begrenzte Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen ist diese Datenquelle aufgrund der aktuellen Latenzen nur bedingt geeignet. Die flexible Aggregation erhöht zwar die Datenverfügbarkeit, führt jedoch gleichzeitig zu nicht unerheblichen Latenzen. Eine Reduktion des Aggregationsintervalls auf 5 oder 1 Minute wäre theoretisch möglich, ist jedoch laut Datenlieferanten aufgrund technischer, datenschutzrechtlicher und betrieblicher Hürden derzeit nicht umsetzbar.

6.2.4 Schlussfolgerung Latenzen

Die analysierten Datenquellen weisen unterschiedliche Latenzcharakteristika auf, die unmittelbar durch Aggregationsmethodik, räumlich-zeitliche Datenverfügbarkeit sowie Datenübertragungsmechanismen bestimmt werden. Während die DWD-Daten mit einer konstanten Latenz von etwa fünf Minuten grundsätzlich für operationale Anwendungen in Betracht gezogen werden können, stellen die fahrzeuggenerierten Datenquellen FGD_01 und FGD_02 durch ihre auf Mittelwertbildung beruhenden Aggregationslogiken und die damit verbundenen Verzögerungen eine signifikante Einschränkung für reaktive, zeitkritische Steuerungsaufgaben dar.

Insbesondere im Kontext der Schaltung von SBA, die eine zeitnahe Reaktion auf dynamische Änderungen der Fahrbahnzustände erfordert, zeigt sich die Limitierung der vorliegenden Datenquellen. Die Latenzen – sowohl durch Aggregation als auch durch technische Übertragungsverzögerungen – können dazu führen, dass kritische Zustände entweder verzögert erkannt oder aufgrund zeitlicher Glättung nicht mit ausreichender Sensitivität abgebildet werden.

Ausgehend von dieser Problematik wurde für die nachfolgenden Analysen ein zweistufiges Vorgehen gewählt, um die Auswirkungen der Latenz auf die Verfügbarkeit und Verwertbarkeit der Daten systematisch zu untersuchen. Dabei wurde unterschieden zwischen:

1. Analyse unter realitätsnahen Bedingungen: Hierbei wurden Nässestufen und daraus abgeleitete Schaltvorschläge jeweils ab dem frühestmöglichen Zeitpunkt ermittelt, zu dem die entsprechenden Daten unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Aggregations- und Latenzstrukturen verfügbar sind. Diese Analyse spiegelt somit die tatsächliche Nutzbarkeit der Datenquellen im aktuellen Zustand wider.
2. Hypothetisches Ideal-Szenario: Ergänzend wurde eine Analyse unter der Annahme durchgeführt, dass alle Datenquellen minütlich verfügbar sind. Da die DWD- und FGD-Daten jedoch aktuell in 5- bzw. 10-Minuten-Intervallen bereitgestellt wurden, konnte dieses Szenario lediglich näherungsweise simuliert werden. Aussagen über zusätzliche technische Latenzen, z. B. infolge von Verarbeitung, Schnittstellen oder Übertragung, konnten im Rahmen dieser Untersuchung nicht generalisiert getroffen werden, da diese stark von konkreten Implementierungen abhängen und somit nur situativ bewertbar wären.

Die Ergebnisse dieser beiden Analyseansätze bilden die Grundlage für das im Folgenden dargestellte Kapitel. In Kapitel 6.3 werden die ermittelten Nässestufen im statistischen Vergleich ausgewertet und auf Konsistenz, Robustheit und Abweichung von aggregierten Referenzwerten hin untersucht. Aufbauend darauf werden zudem potenzielle Schaltungen abgeleitet, die sich auf die jeweiligen Nässestufen stützen und in Relation zu tatsächlich realisierten Steuerungsentscheidungen auf Basis von FG3-Daten gesetzt werden. Diese mehrschichtige Herangehensweise erlaubt eine fundierte Bewertung der potenziellen Eignung der verwendeten Datenquellen für eine zukünftige SBA-Steuerung unter Echtzeitbedingungen.

6.3 Ermittelte Nässestufen und potenzielle Schaltungen im Vergleich realer und idealisierter Szenarien

6.3.1 Szenarien und methodisches Vorgehen

Aufgrund der in Kapitel 6.2 dargestellten Latenzen der untersuchten Datenquellen wurde die Analyse entlang zweier Szenarien durchgeführt, um sowohl die tatsächliche Datenverfügbarkeit als auch das Potenzial einer idealisierten Datengrundlage zu untersuchen:

1. **Realitätsnahe Bedingungen:** Ermittlung der Nässestufen auf Grundlage der aktuell vorliegenden Latenzen (5 min für DWD, 10–15 min für FGD).
2. **Hypothetisches Ideal-Szenario:** Ermittlung der Nässestufen unter der Annahme, dass alle Datenquellen minütlich verfügbar sind und keine weiteren (technischen) Latenzen vorliegen.

Für beide Szenarien wurde zunächst eine statistische Auswertung der ermittelten Nässestufen durchgeführt. Hierzu wurden für jeden der ausgewählten Ereignistage und jeden AQ der beiden Untersuchungsstrecken (SBA, NWA) die Mittelwerte, Medianwerte sowie die Häufigkeitsverteilungen der Nässestufen bestimmt. Anschließend wurde für jeden Fusionsansatz die Differenz zu diesen aggregierten Vergleichswerten berechnet.

Dieser Ansatz wurde gewählt, da keine objektive Referenz für die „korrekte“ Nässestufe vorliegt. Ziel war daher, mit einem konsensbasierten Vergleichsmaßstab (Mittelwert/Median/Häufigkeitsverteilung der vorhandenen Nässestufen) zu überprüfen, wie stark die

einzelnen Fusionsansätze von diesem Konsens abweichen. In die Berechnung flossen dabei nur solche Fusionsansätze ein, die tatsächlich Daten für die jeweilige Minute geliefert haben, um Verzerrungen durch unvollständige Daten zu vermeiden.

6.3.2 Statistische Auswertung und Modellvergleich (Konsistenzanalyse)

Beispielhafte Darstellung der Auswertungsmethodik

Zur Illustration wurde ein bewusst vereinfachtes, beispielhaft konstruiertes Zahlenbeispiel (Tab. 25) herangezogen, das exemplarisch die Berechnung von Mittelwert und Abweichung für vier ausgewählte Datenquellen zeigt. Die in der Tabelle dargestellten Werte sind nicht real, sondern wurden synthetisch gewählt, um das Vorgehen verständlich darzustellen. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da die tatsächlichen Berechnungstabellen für alle Fusionierungen (vgl. Tab. 23) – aufgrund der Vielzahl an Kombinationen und Auswertungsmetriken (u. a. Mittelwert, Standardabweichung, Datenverfügbarkeit) nur sehr schwer lesbar und interpretierbar wären. Hinzu kommt, dass in den realen Datensätzen häufig Ausfälle oder Lücken auftreten, wodurch viele Einträge leer bleiben und eine konsistente Darstellung zusätzlich erschwert wird. Das synthetische Beispiel ermöglicht eine übersichtliche und nachvollziehbare Erläuterung der methodischen Herangehensweise. In der tatsächlichen Auswertung (ab Abschnitt „Bewertung der Modellstabilität und Auswirkungen auf die SBA-Steuerung“) wurden alle 14 betrachteten Fusionierungen (vgl. Tab. 23) systematisch analysiert.

Eine Rundung auf ganze Nässestufen wurde bewusst vermieden, da sie feine Unterschiede innerhalb benachbarter Stufen nivelliert hätte. Durch den Verzicht auf Rundung konnte die tatsächliche Streuung präzise abgebildet werden.

Anhand der Summen der absoluten Abweichungen vom Mittelwert wird ersichtlich, welche Quelle konsistentere Nässestufen liefert. Je geringer die Abweichung, desto konsistenter verhält sich die Quelle über verschiedene Szenarien hinweg. Im fiktiven Beispiel aus Tab. 25 zeigen die Daten der Quelle 3 die geringsten Abweichungen, während Quelle 2die größten aufweist. Diese Darstellung dient ausschließlich der Veranschaulichung der Methodik und erhebt keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Ab den folgenden Abschnitten „Bewertung der Modellstabilität und Auswirkungen auf die SBA-Steuerung“ werden ausschließlich reelle Daten verwendet.

Quelle 1	Quelle 2	Quelle 3	Quelle 4	Mittelwert (über alle Quellen)	Abweichung vom Mittelwert von Quelle 1	Abweichung vom Mittelwert von Quelle 2	Abweichung vom Mittelwert von Quelle 3	Abweichung vom Mittelwert von Quelle 4
3	2	1	3	2,25	0,25	1,25	0,75	3
2	2	1	1	1,5	0,5	0,5	0,5	2
2	2	1	1	1,5	0,5	0,5	0,5	2
2	2	1	1	1,5	0,5	0,5	0,5	2
2	2	1	1	1,5	0,5	0,5	0,5	2
3	2	2	2	2,25	0,25	0,25	0,25	3
2	2	2	2	2	0	0	0	2
2	0	2	2	1,5	1,5	0,5	0,5	2
1	0	2	2	1,25	1,25	0,75	0,75	1
1	0	2	2	1,25	1,25	0,75	0,75	1
				Summe	6,5	5,5	5	

Tab. 25: Synthetische Berechnung der Mittelwerte und Abweichungen zur Veranschaulichung der Methode

Bewertung der Modellstabilität und Auswirkungen auf die SBA-Steuerung

Das zuvor dargestellte synthetische Beispiel (Tab. 25) dient ausschließlich der Veranschaulichung der Berechnungsmethodik und basiert auf fiktiven Werten. Es stellt kein reales Ergebnis der Modellanalyse dar. Die nachfolgende grafische Auswertung (Bild 44) hingegen basiert auf Berechnungen unter realitätsnahen Bedingungen (vgl. Definition Kapitel 6.3.1) auf Basis der FGD_01, … und bezieht alle relevanten Ereignistage und Modellvarianten ein. Die Ergebnisse des Ansatzes wurden grafisch aufbereitet. Die Auswertung (vgl. Bild 44) zeigt die durchschnittliche Abweichung jedes Modells vom Mittelwert der jeweiligen Minute, aggregiert über alle analysierten Zeitpunkte und Ereignistage. Die horizontale Achse gibt die mittlere Abweichung vom Mittelwert an (niedrigere Werte sind besser), während die vertikale Achse die Bezeichnung der einzelnen Modelle bzw. Fusionsansätze darstellt. Die gestrichelte rote Linie markiert das Modell mit der geringsten durchschnittlichen Abweichung – und somit mit der höchsten Konsistenz in Bezug auf die anderen Verfahren.

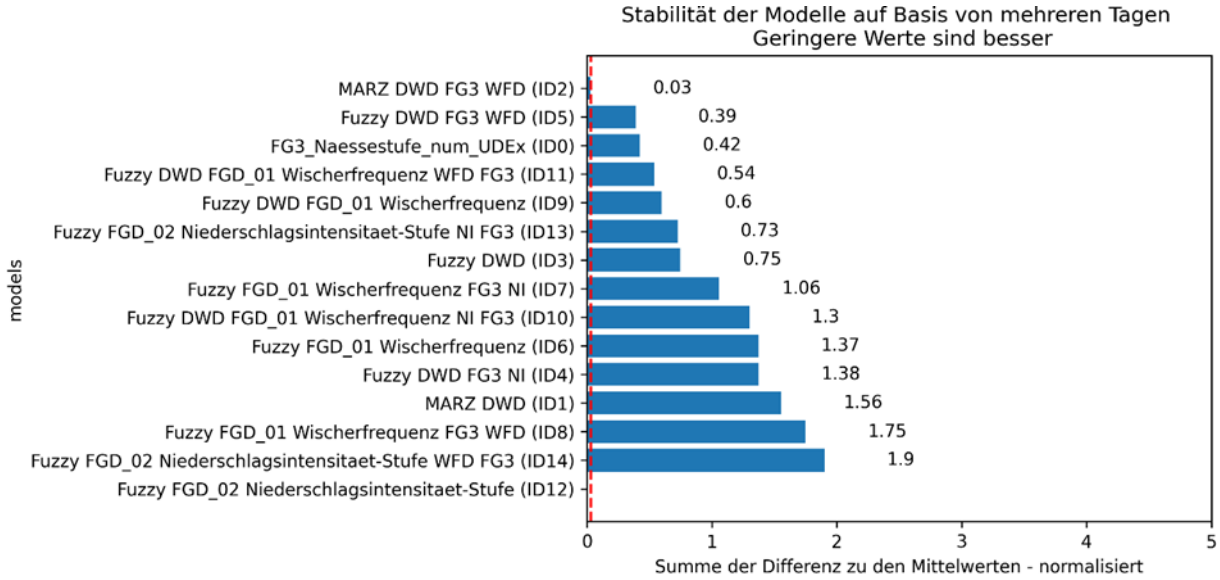

Bild 44: Stabilität der Modelle anhand der durchschnittlichen Abweichung vom Mittelwert über alle Ereignistage (SBA; Realitätsnahe Bedingungen)

Aus Bild 44 wird deutlich, dass einige Modelle durch vergleichsweise geringe durchschnittliche Abweichungen vom Mittelwert auffallen und somit ein hohes Maß an interner Konsistenz aufweisen. Besonders hervorzuheben sind hier die Fusionsansätze:

1. MARZ DWD FG3 WFD (ID2)
2. Fuzzy DWD FG3 WFD (ID5)
3. FG3_Naessestufe_num_UDEx (ID0)

Diese zeigen über alle betrachteten Zeiträume hinweg eine auffallend geringe Streuung gegenüber dem Konsensmittelwert und deuten auf eine robuste und gleichmäßige Verarbeitung der Eingangsdaten unter realitätsnahen Bedingungen (SBA) hin. Das Modell ID12 wurde in dieser Auswertung nicht berücksichtigt, da aufgrund zahlreicher Datenlücken eine Vergleichbarkeit nicht möglich gewesen wäre.

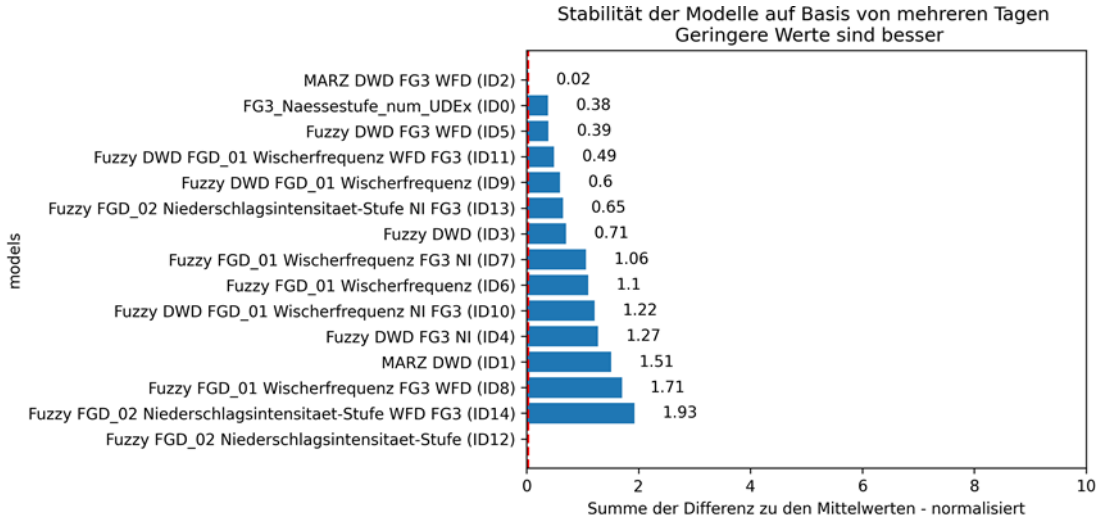

Bild 45: Stabilität der Modelle anhand der durchschnittlichen Abweichung vom Mittelwert über alle Ereignistage (SBA; Hypothethisches Ideal-Szenario)

Bild 45 zeigt die Stabilität der Modelle anhand der durchschnittlichen Abweichung vom Mittelwert über alle Ereignistage unter hypothetischen idealisierten Bedingungen (vgl. Definition Kapitel 6.3.1) für die SBA (minütliche Datenerfassung aller Quellen, keine weiteren Latenzen). Im Vergleich zu den realitätsnahen Bedingungen (vgl. Bild 44) bleibt die Reihenfolge der stabilsten Modelle weitgehend erhalten: MARZ DWD FG3 WFD (ID2), FG3_Naessestufe_num_UDEx (ID0) und Fuzzy DWD FG3 WFD (ID5) belegen erneut die vorderen Plätze und weisen nur sehr geringe Abweichungen auf. Am anderen Ende der Skala steht weiterhin Fuzzy FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe WFD FG3 (ID14), das mit der höchsten Abweichung das Schlusslicht bildet. Besonders hervorzuheben ist, dass Modellfusionierungen mit Daten des Deutschen Wetterdienstes dabei durchweg sehr gute Ergebnisse erzielen.

Neben der Analyse der Mittelwerte wurden die Auswertungen wie zuvor beschrieben ebenfalls für den Median sowie die Häufigkeitsverteilung der erkannten Nässestufen durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass unabhängig von der gewählten Kenngröße – ob arithmetisches Mittel, Median oder Verteilung – die Reihenfolge der Modelle unverändert bleibt.

Für die Nebelwarnanlage (NWA) zeigen sich vergleichbare Ergebnisse wie bei der SBA-Auswertung. Die Modelle mit DWD-Fusionierung sind insgesamt am besten ab. Sie weisen auch hier die geringsten durchschnittlichen Abweichungen auf. Für die Modelle mit den IDs 12 bis 14 konnten keine Ergebnisse ausgewertet werden, da für die NWA keine Eingangsdaten aus dem FGD_02 vorlagen. Die Differenzen zwischen den Modellabweichungen bewegen sich insgesamt in ähnlicher Größenordnung wie bei der SBA. Bei näherer Betrachtung der Tag-für-Tag-Ergebnisse zeigte sich, dass diese Modelle vor allem dann gute Übereinstimmungen mit dem Mittelwert und Median sowie der Häufigkeitsverteilung liefern, wenn die verwendeten Eingangsdaten vollständig vorlagen. Dies betraf insbesondere die Zeiträume, in denen alle drei zentralen Datenquellen – FG3, DWD sowie FGD_01 (Wiperspeed) – durchgängig Daten lieferten. In diesen Fällen konnten die Fusionsverfahren ihr Potenzial vollständig entfalten und führten zu Nässestufenbewertungen mit nur geringen Abweichungen vom konsensbasierten Vergleichswert.

Einfluss der Datenverfügbarkeit und methodische Abgrenzung

Gleichzeitig wurde jedoch deutlich, dass die Datenverfügbarkeit eine entscheidende Rolle für die Vergleichbarkeit und Qualität der Analyse spielt. Insbesondere bei der Datenquelle FGD_02 traten wiederholt Probleme auf: In zahlreichen Fällen lagen keine oder nur stark fragmentierte Werte vor. Teilweise mussten einzelne Datensätze (entsprechende Zeitstempelzeilen) vollständig aus der Analyse ausgeschlossen werden, da nicht alle für die jeweilige Fusion notwendigen Eingangsdaten verfügbar waren. Diese Vorgehensweise betrifft sowohl das realitätsnahe als auch das hypothetische idealisierte Szenario.

Die Entscheidung, einzelne Datensätze aus der Analyse auszuschließen, wurde getroffen, um die methodische Vergleichbarkeit sicherzustellen: Um die Ausgaben der verschiedenen Modelle konsistent und belastbar gegenüberstellen zu können, wurden ausschließlich Zeitpunkte berücksichtigt, an denen alle relevanten Eingangsdaten vollständig vorlagen. Zwar sind die betrachteten Fusionsansätze grundsätzlich so konzipiert, dass sie auch bei Ausfall einzelner Eingangsdatenquellen weiterhin plausible Ergebnisse liefern können – etwa durch Gewichtungsverfahren, Substitutionsstrategien oder die Nutzung historischer Verläufe. Für die vorliegende Analyse wurde jedoch bewusst auf solche gemischten Eingangsdatenkonstellationen verzichtet, um eine fundierte Bewertung der Modellstabilität

unter kontrollierten und vergleichbaren Randbedingungen zu ermöglichen. Dies gewährleistet eine differenzierte Aussage über das Verhalten der Modelle bei vollständiger Datenverfügbarkeit und verhindert eine Verzerrung der Bewertung durch uneinheitliche Eingangsdatenlagen.

Als Konsequenz dieser eingeschränkten Datenlage wurde entschieden, die weiteren quantitativen Analysen – insbesondere die Berechnung von Medianwerten, Mittelwerten und Häufigkeitsverteilungen sowie die Ganglinienanalyse und hypothetischen Schaltungen – auf die drei robustesten und konsistent verfügbaren Datenquellen zu beschränken: FG3, DWD und FGD_01 (Wiperspeed). Für diese Auswahl wurden, wie zuvor beschrieben, zwei Analysen durchgeführt – eine unter realitätsnahen Bedingungen mit den tatsächlichen Aggregations- und Latenzstrukturen sowie eine unter idealisierten Bedingungen mit angenommener minütlicher Datenverfügbarkeit.

Vergleich der Modellstabilität für die drei verfügbaren Datenquellen (FG3, DWD und FGD_01 (Wiperspeed)) unter realen und idealisierten Bedingungen

Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, lagen erste Fusionsmodelle bereits vor, sodass es nahelag, die Analyse zunächst mit diesen zu beginnen. Methodisch wäre es nachvollziehbarer gewesen, zunächst nur die Datenquellen einzeln zu bewerten und erst anschließend die Fusionsmodelle zu analysieren. Aufgrund der bereits vorliegenden Ergebnisse wurde dieser Schritt jedoch vorgezogen. Da dabei teils uneindeutige Resultate auftraten, wurde ergänzend untersucht, ob einzelne Eingangsdatenquellen systematische Auffälligkeiten aufweisen. Die nun folgende Einzelbewertung der drei robustesten und konsistent verfügbaren Datenquellen dient der Klärung möglicher Ursachen und schafft eine belastbare Grundlage für die weitere Modellbewertung.

Wissenschaftlich bedeutsam ist der Hinweis, dass in dieser Auswertung nicht sämtliche verfügbaren Fusionierungsansätze, sondern ausschließlich drei ausgewählte Datenquellen betrachtet wurden. Es handelt sich hierbei um jeweils einzeln bewertete Modellvarianten (Datenquellen), nicht um fusionierte Modelle.

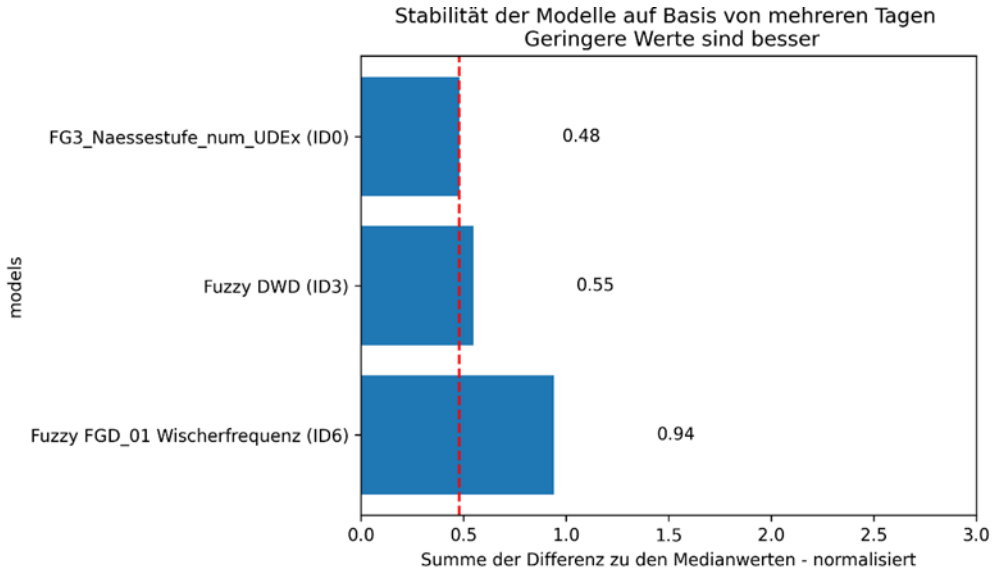

Bild 46: Summierte Abweichung vom Medianwert über alle Ereignistage (NWA; Realitätsnahe Bedingungen)

In Bild 46 ist die normierte Summe der Abweichungen vom Medianwert für alle betrachteten Tage unter realitätsnahen Bedingungen auf der Untersuchungsstrecke NWA dargestellt. Das FG3-Modell („FG3_Naessestufe_num_UDEx“, ID0) weist mit einem Wert von 0.48 die geringste Abweichung auf und zeigt damit die höchste Stabilität. Fuzzy DWD (ID3) folgt mit 0.55 nur knapp dahinter, sodass hier kaum ein Unterschied in der Medianstabilität gegenüber ID0 festzustellen ist. Das Fuzzy-Modell FGD_01 Wischerfrequenz (ID6) weist mit 0.94 die höchste Abweichung auf und ist somit als am wenigsten stabil zu bewerten.

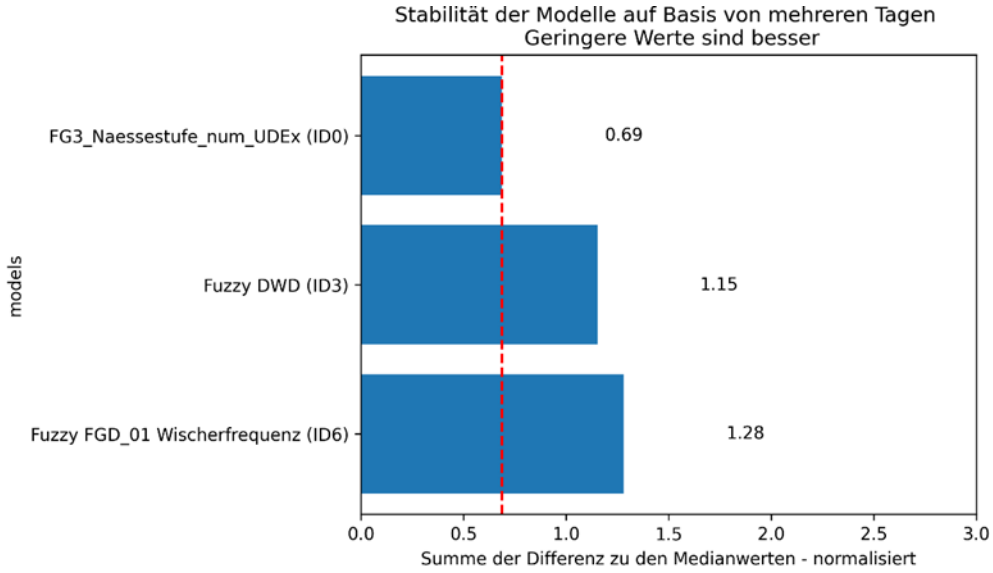

Bild 47: Summierte Abweichung vom Medianwert über alle Ereignistage (NWA; idealisierte Bedingungen)

In Bild 47 ist ergänzend die normierte Summe der Abweichungen vom Medianwert für alle Ereignistage der Untersuchungsstrecke NWA unter idealisierten Bedingungen dargestellt. Ein Vergleich der beiden Abbildungen zeigt, dass die Reihenfolge der Modelle hinsichtlich ihrer Stabilität in beiden Fällen identisch ist: FG3_Naessestufe_num_UDEx (ID0) weist die höchste Stabilität auf, gefolgt von Fuzzy DWD (ID3) und schließlich Fuzzy FGD_01 Wischerfrequenz (ID6) mit der geringsten Stabilität. Zudem ist auffällig, dass sich der Unterschied zwischen den Modellen ID3 und ID6 unter idealisierten Bedingungen verringert.

Diese Ergebnisse bestätigen die zuvor gemachten Beobachtungen: Die DWD-Modelle – insbesondere in Kombination mit weiteren Quellen – liefern Nässestufenermittlungen, die eng am Median der Gesamtheit aller Modelle liegen. Die höhere Abweichung des Wischermodells weist dagegen auf eine gewisse Systematik hin, die entweder aus einer konservativen Schwellenwertsetzung oder einer reduzierten Sensitivität bei mittleren bis starken Niederschlagsereignissen aufgrund der starken Glättung der Datei resultieren könnte. Gleichzeitig lassen sich daraus Rückschlüsse auf die mögliche Notwendigkeit einer feineren Kalibrierung der Fuzzy-Zuordnung zwischen Wischergeschwindigkeit und Nässestufe ziehen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser quantitativen Auswertungen, dass bei vollständiger Datenverfügbarkeit insbesondere die DWD-basierten Verfahren eine zuverlässige und konsistente Basis für die Erkennung von Nässesituationen darstellen. Sie liefern in den untersuchten Fällen stabile Nässestufenermittlungen mit geringen Abweichungen vom Median und sind daher besonders geeignet für eine kontinuierliche Analyse des Fahrbahnzu-

stands. Es ist jedoch zu beachten, dass auch bei diesen Verfahren eine systematische Einschränkung durch die zugrundeliegende Datenlatenz von fünf Minuten besteht. Diese Latenz bedeutet, dass aktuelle Niederschlagsinformationen stets mit einem gewissen Zeitversatz in die Bewertung einfließen. Für Echtzeit-Anwendungen – etwa die kurzfristige Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen – ist dies ein limitierender Faktor, da damit akute Ereignisse mit zeitkritischer Relevanz möglicherweise verspätet erkannt werden.

Die FG3-Daten hingegen verfügen über eine vergleichsweise geringe Systemlatenz und bieten dadurch einen unmittelbaren Bezug zur tatsächlichen Situation auf der Fahrbahn. Sie sind daher keineswegs als unzureichend zu bewerten, sondern bilden nach wie vor eine essenzielle Grundlage für die zeitnahe und punktuelle Steuerung im Rahmen der SBA. Die vorliegenden Ergebnisse legen nahe, dass flächendeckende Datenquellen wie DWD oder FGD_01 zu einer verbesserten Qualitätssicherung der räumlichen Erfassung beitragen können, insbesondere in Regionen mit großen Messpunktabständen der FG3-MQ. Zudem können alternative Datenquellen schon jetzt zur Ausfallsicherheit beitragen. Diese Schlussfolgerungen basieren auf der hohen lokalen Übereinstimmung zwischen den betrachteten Datensätzen. Eine gezielte Analyse der Erfassungsqualität bei kleinräumigen Ereignissen konnte hierbei nicht durchgeführt werden.

Vor diesem Hintergrund erscheint es – aus fachlicher Perspektive und im Sinne zukünftiger Forschung – sinnvoll, die potenzielle Integration sehr kurzfristiger Wetterprognosen (z. B. Nowcasting-Verfahren) zu prüfen. Zwar wurde ein solcher Ansatz in dieser Untersuchung nicht systematisch evaluiert, doch könnten entsprechende Verfahren perspektivisch helfen, die Latenzgrenzen flächenbasierter Quellen wie DWD zu überbrücken. Eine Kombination aus punktuellen Echtzeitmessdaten (z. B. FG3) und modellbasierten Kurzfrist-prognosen stellt insofern einen vielversprechenden Ansatz dar, der – vorbehaltlich weiterer Analysen – eine Grundlage für zukünftige Entwicklungen im Verkehrsmanagement bieten könnte.

Ganglinienvergleich der Nässestufenbildung

In den nachfolgenden Analysen wurden für die drei zentralen weiter betrachteten Eingangsdatenquellen – FG3, DWD und FGD_01 – Ganglinien mit den entsprechenden Nässestufen erstellt. Die Farben in der Ganglinie sind wie folgt zu deuten: dunkelgrün = trocken (Nässestufe 0), hellgrün = leichter Regen (Nässestufe 1), gelb = mittlerer Regen (Nässestufe 2), orange = Starkregen (Nässestufe 3) und rot = Platzregen (Nässestufe 4). Bild 48 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der erkannten Nässesituation für den AQ KA20 am Ereignistag (2023-07-11). In der Darstellung sind sowohl realitätsnahe Bedingungen – unter Berücksichtigung bestehender Latenzen und Aggregationsintervalle – als auch ein hypothetisches Ideal-Szenario mit minütlicher Datenverfügbarkeit integriert dargestellt. Dies erlaubt eine direkte visuelle Gegenüberstellung der Reaktionen der verschiedenen Datenquellen auf das gleiche Niederschlagsereignis unter beiden Rahmenbedingungen.

Ein Sonderfall stellt hierbei FG3 dar: Da die zugrundeliegenden Daten bereits im 1-Minuten-Takt vorliegen, ist keine Unterscheidung zwischen realitätsnahen und idealisierten Bedingungen erforderlich. FG3 liefert somit über beide Szenarien hinweg identische Ganglinien.

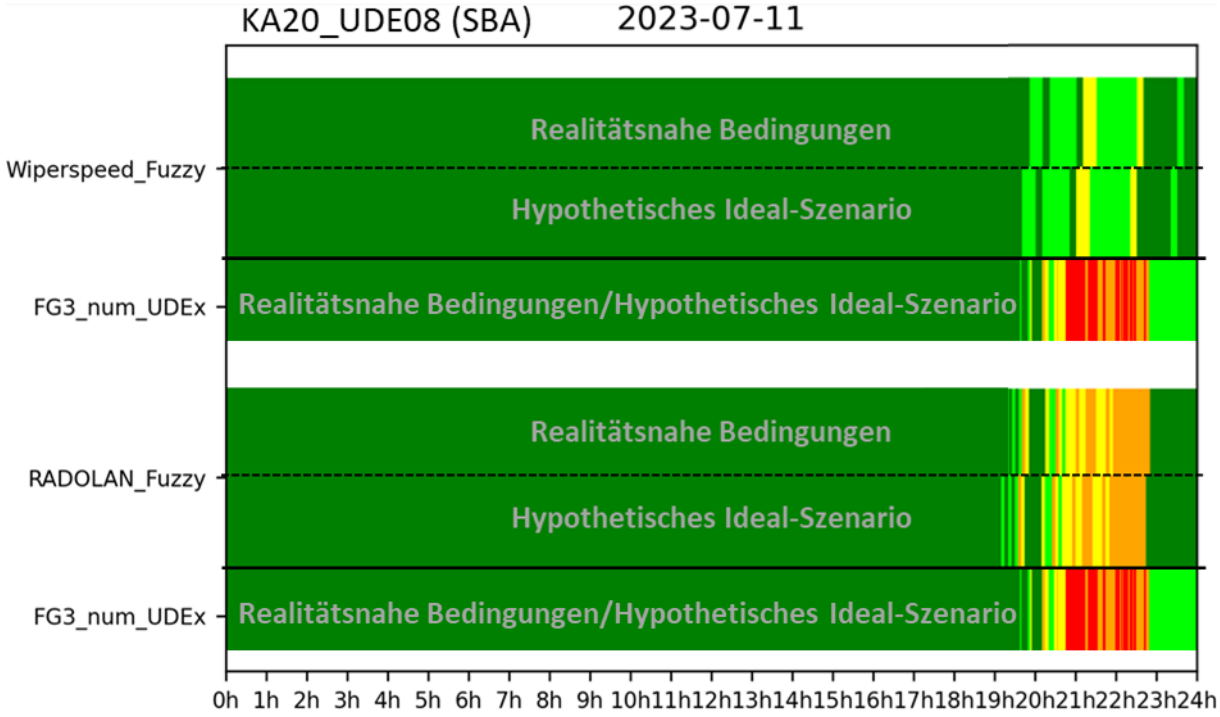

Bild 48: Ganglinie der Nässestufen – Kombination aus realitätsnahen Bedingungen und hypothetischem Ideal-Szenario (SBA: KA20_UDE08_2023-07-11)

Die kombinierte Visualisierung macht deutlich, dass alle drei Datenquellen im Grundsatz in der Lage sind, Regenereignisse korrekt zu identifizieren. Insbesondere FG3 und DWD zeigen nahezu synchronisierte Reaktionen auf einsetzende Niederschläge. Diese beiden Quellen liefern über den betrachteten Zeitraum ähnliche Nässestufenverläufe, die sowohl die Dauer als auch die Intensität der Ereignisse adäquat abbilden.

Demgegenüber weist die Ganglinie der FGD_01-Daten (Wiperspeed_Fuzzy) systematisch niedrigere Nässestufen auf. Dies äußert sich sowohl in einer verzögerten Reaktion auf den Beginn des Regenereignisses als auch in einer insgesamt abgeschwächten Bewertung der Nässeintensität. Während FG3 und DWD in einem bestimmten Zeitfenster Nässestufen der Kategorien 2 bis 4 anzeigen, bleibt FGD_01 häufig bei Stufe 1 und 2 oder sogar bei Stufe 0. Eine mögliche Ursache hierfür liegt in der methodischen Umsetzung der Fuzzy-Klassifikation, bei der die Wischergeschwindigkeit in Hertz gemessen und anschließend einem Nässestufenbereich zugeordnet wird. Eine systematische Nachjustierung der Matching-Parameter wäre erforderlich, um die Sensitivität des Verfahrens insbesondere bei mittleren und hohen Niederschlagsintensitäten zu erhöhen.

Die Gegenüberstellung von realitätsnahen und idealisierten Bedingungen zeigt zudem, dass die grundsätzliche Struktur der Ganglinien erhalten bleibt, jedoch deutliche Unterschiede in der zeitlichen Auflösung und Reaktionsgeschwindigkeit bestehen. Die idealisierte Variante erlaubt eine frühere und detailliertere Erkennung der Dynamik des Regenereignisses, was für eine potenziell verbesserte Reaktionsfähigkeit in praxisnahen Schaltungsszenarien spricht.

6.3.3 Ableitung hypothetischer Schaltungen und Fazit

Auf Basis der analysierten Ganglinien und berechneten Nässestufen wurde untersucht, welche hypothetischen Schaltungen sich im Fall einer Echtzeitverarbeitung durch eine SBA

ergeben würden. Hierzu wurde ein standardisiertes Zuordnungsschema verwendet (vgl. Kapitel 2.4), das jeder Nässestufe ein fest definiertes Schaltbild des Regenprogramms zuordnet. Diese Methodik ermöglicht eine vergleichbare Bewertung der Schaltrelevanz unterschiedlicher Datenquellen.

Die Zuordnung erfolgte minutengenau. Dabei wurde berücksichtigt, ob die Eingangsdatenquellen (FG3, DWD, FGD_01/02) vollständig verfügbar waren und welche Nässestufen sich daraus ableiten ließen. Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. FG3 stellt aktuell die verlässlichste Datenquelle dar. Trotz der bekannten Einschränkungen in der räumlichen Auflösung liefern die stationären Messquerschnitte konsistente und schaltrelevante Informationen im Minutentakt. Die niedrige Latenz und die langjährig erprobte Erfassung meteorologischer Einflussgrößen direkt an der Strecke ermöglichen eine sehr zeitnahe und belastbare Detektion kritischer Fahrbahnverhältnisse.
2. Die DWD-Daten überzeugen durch flächendeckende Abdeckung und zeitliche Regelmäßigkeit. Die Daten weisen eine hohe Konsistenz und räumliche Stabilität auf, was sie zu einer geeigneten Ergänzungs- und Validierungsquelle macht – insbesondere bei Ausfall stationärer Sensorik.
3. Die Datenquellen FGD_01 und FGD_02 zeigen bislang nur eingeschränkt nutzbare Ergebnisse. Die Aussagekraft ist aufgrund hoher Latenzen, aggregierter Messwerte und uneinheitlicher Datenqualität limitiert. Insbesondere bei FGD_02 traten wiederholt Lücken und Ausfälle auf.
4. Ein direkter Vergleich der Datenquellen – konkret zwischen FG3 sowie den Fahrzeugdaten (FGD_01 und FGD_02) – verdeutlicht, dass die Echtzeitfähigkeit für reaktive SBA-Schaltungen derzeit nicht gegeben ist. Die untersuchten Quellen liefern unter Idealbedingungen (z. B. vollständige Datenverfügbarkeit, hohe Flottenabdeckung) plausible Nässestufen, doch fehlt es an Stabilität und Präzision unter realen Bedingungen.
5. FG3 kann derzeit nicht durch neue Datenquellen ersetzt werden. Fahrzeuggenerierte Daten und DWD-Daten liefern wertvolle Zusatzinformationen, sind aber (noch) nicht in der Lage, alleinige Entscheidungsgrundlagen für eine SBA-Steuerung bereitzustellen.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass FG3-Daten derzeit die zuverlässigste und operationell belastbarste Grundlage für eine zeitnahe Steuerung von SBA darstellen. Die untersuchten neuartigen Datenquellen eröffnen zwar vielversprechende Perspektiven für eine zukünftige Erweiterung der Datengrundlage, erreichen jedoch aktuell weder die erforderliche zeitliche Verfügbarkeit noch die operative Robustheit, um FG3 vollständig zu ersetzen. Ihr Nutzen liegt derzeit primär in einer unterstützenden Funktion.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden im folgenden Kapitel zentrale Schlussfolgerungen aus dem Projekt gezogen. Zudem werden technologische Weiterentwicklungsbedarfe identifiziert und Handlungsempfehlungen für eine künftige Integration neuer Datenquellen in die SBA-Steuerung abgeleitet.

7 Ausblick und Schlussfolgerungen aus dem Projekt

Die im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Analysen sollen ergründen, ob der Einsatz neuer, insbesondere fahrzeuggenerierter Daten (xFCD) sowie externer Wetterdaten (RADOLAN) Potenziale für eine wetteradaptive Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen bietet. Es wurden technische und systemische Grenzen identifiziert, die aktuell noch einem operationellen Einsatz im Wege stehen. Die nachfolgenden Schlussfolgerungen und der Ausblick fassen zentrale Erkenntnisse des Projekts zusammen und leiten daraus weiterführende Entwicklungsschritte ab.

7.1 Schlussfolgerungen

Operationelle Nutzung von fahrzeuggenerierten Daten (xFCD/C2X)

In der aktuellen bzw. in diesem Projekt vorliegenden Form sind fahrzeuggenerierte Daten noch nicht für eine echtzeitfähige, vollautomatische SBA-Steuerung geeignet. Wesentliche Limitierungen sind die **Aggregierung** über größere Zeitintervalle mit unbekannter Anzahl beitragender Fahrzeuge (damit einhergehend **hohe Latenzen**) sowie eine vermutlich **geringe Flottendurchdringung**. Die Flottendurchdringung lässt sich auf Basis aggregierter Daten nicht ermitteln. Jedoch lassen Lücken in den räumlich-zeitlichen Verläufen der aggregierten Daten in Schwachverkehrszeiten vermuten, dass eine durchgängige Erfassung derzeit nicht möglich ist.

Aktuell werden von den Flottenbetreibern aggregierte und teilweise bereits zu Niederschlagsstufen oder Fahrbahnzuständen aufbereitete Daten zur Verfügung gestellt.

Daten von Einzelfahrzeugen, wie sie zukünftig mit C2X zu erwarten sind, bieten in mehrerlei Hinsicht ein größeres Potenzial:

1. Die Daten unterliegen keinen unbekannten Verarbeitungsschritten zu einem aggregierten Wert.
2. Die Latenz ohne Verarbeitung durch Datenanbieter ist bei hinreichendem Datenumfang gering.
3. Es besteht die Möglichkeit, die Daten an geeigneter Stelle (z.B. in der Streckenstation oder der Unterzentrale) mit eigener Algorithmik zu plausibilisieren und zielorientiert aufzubereiten.

Bei der stationären Sensorik (FG3) wird großer Wert daraufgelegt, dass die Daten möglichst „roh“ in der Unterzentrale ankommen. Die Glättung, Plausibilisierung und Interpretation (z.B. Nässestufe) erfolgt erst dort und soll nicht bereits vom Sensorhersteller vorgenommen werden. Sinngemäße Anforderungen sind auch an fahrzeuggenerierte Daten zu stellen. Dies erfordert zwar entsprechende Überlegungen und auch Entwicklungen/Implementierungen in der Unterzentrale, bietet aber den Vorteil der Transparenz und Flexibilität.

Unabhängig von der Art der Daten und der weiteren Verarbeitung hängt die Aussagekraft von fahrzeuggenerierten Daten maßgeblich von der Ausstattungsrate und der daraus resultierenden räumlich-zeitlichen Verfügbarkeit und Möglichkeit zur Plausibilisierung/Konsolidierung über möglichst kurze Zeitintervalle ab. Nur bei ausreichend hoher Fahrzeuganzahl und verlässlicher, direkter Kommunikation, beispielsweise über RSU, lassen sich geringe Latenzen und systemrelevante Aussagen erzielen.

Fahrzeuggenerierte Daten (xFCD/C2X) – erforderliche Ausstattungsraten

Eine Aussage zu für die Nutzung in der Streckenbeeinflussung erforderlichen Ausstattungsraten (Anzahl/Anteil meldender Fahrzeuge) auf Basis empirischer Erkenntnisse kann nicht getroffen werden, da keine Einzelfahrzeugdaten vorlagen, die eine derartige Analyse ermöglicht hätten.

Möglich sind theoretisch-statistische Betrachtungen: Zur Analyse der erforderlichen Ausstattungsrate/Flottendurchdringung (für definierte Eintreffenswahrscheinlichkeiten, Zeitintervalle und Verkehrsstärken) bzw. die Abschätzung der Eintreffenswahrscheinlichkeiten (für definierte Ausstattungsraten, Zeitintervalle und Verkehrsstärken) werden häufig Poisson-verteilte Fahrzeugankünfte angenommen (siehe beispielsweise STEINAUER et al. 2006). Eine Herleitung zur Modellierung von Fahrzeugankünften als Poisson-Prozess findet sich in der verkehrstechnischen Grundlagenliteratur (z. B. SCHNABEL UND LOHSE 2011). Alternativ können (mikroskopische) Verkehrssimulationen verwendet werden.

Für Poisson-verteilte Fahrzeugankünfte ist die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb eines gegebenen Zeitintervalls T mindestens n Fahrzeuge an einem Querschnitt eintreffen:

$$P(X \geq n) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda)^k \cdot e^{(-\lambda)}}{k!}$$

λ ist die erwartete Anzahl eintreffender Fahrzeuge im Zeitintervall T:

$$\lambda = q_{FCD} \cdot T = a \cdot q \cdot T$$

q_{FCD} ist die erwartete Anzahl ausgestatteter/meldender Fahrzeuge pro Stunde (Ausstattungsrate a multipliziert mit der Verkehrsstärke q), T ist das betrachtete Zeitintervall bezogen auf eine Stunde (beispielsweise T = 3/60 für ein drei Minuten-Intervall).

Der Betrachtung von Fahrzeugankünften liegt die Annahme zugrunde, dass die Fahrzeuge eine gewisse Strecke durchfahren und ihre Meldung an einem definierten Querschnitt (z.B. an einer RSU) abliefern.

Wie viele Fahrzeuge zur Ermittlung einer zuverlässigen Witterungsinformation erforderlich sind, konnte aufgrund fehlender Einzelfahrzeugdaten nicht eruiert werden. Sinnvoll erscheint, dass es mehr als ein Fahrzeug sein sollte, um Fehldetektionen zu vermeiden. Wünschenswert erscheinen mindestens zwei oder drei Fahrzeuge, so dass beispielsweise die Wischeraktivität zur Scheibenreinigung nicht fälschlicherweise als Nässeereignis interpretiert und eine Mittelung zur Berücksichtigung individueller Fahrsituationen und Präferenzen möglich wird.

Wenn ausschließlich auf Basis von fahrzeuggenierten Daten gesteuert werden sollte, müsste eine Ankunftswahrscheinlichkeit gleich oder nahe 100 % gegeben sein.

Das Zeitintervall sollte möglichst klein sein (eine bis fünf Minuten).

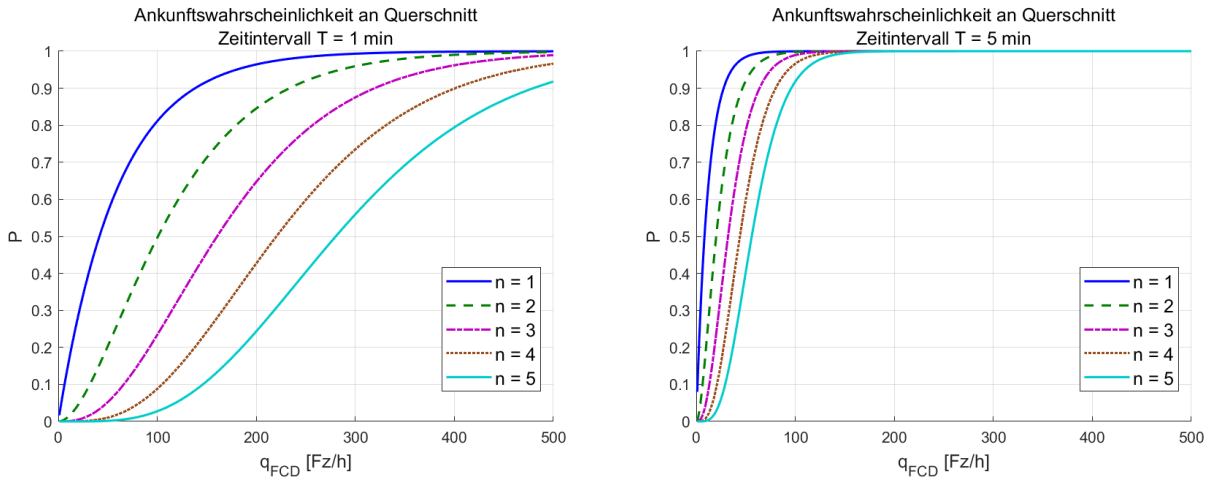

Bild 49: Wahrscheinlichkeiten für die Ankunft von mindestens n Fahrzeugen an einem Querschnitt für Zeitintervalle von 1 Minute (links) und 5 Minuten (rechts) in Abhängigkeit der erwarteten Anzahl meldender Fahrzeuge pro Stunde q_{FCD}

Beispielsweise wäre ein Erwartungswert von 64 Floating Cars pro Stunde erforderlich, um mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % mindestens drei Ankünfte in einem 5-Minuten-Intervall zu haben.

In Tabelle 26 sind exemplarisch die erforderlichen Ausstattungsraten a aufgeführt, um mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % bzw. 95 % mindestens zwei bzw. drei Floating Car Ankünfte für Zeitintervalle von einer, drei, fünf und zehn Minuten zu haben.

Wahrscheinlichkeit p	Mindestanzahl FCD n	Gesamtverkehrsstärke q	Erforderliche Ausstattungsrate a			
			T = 1 min	T = 3 min	T = 5 min	T = 10 min
90 %	2	1000 Fz/h	23,4 %	7,8 %	4,7 %	2,4 %
90 %	2	2000 Fz/h	11,7 %	3,9 %	2,4 %	1,2 %
90 %	2	3000 Fz/h	7,8 %	2,6 %	1,6 %	0,8 %
90 %	2	4000 Fz/h	5,9 %	2,0 %	1,2 %	0,6 %
90 %	2	5000 Fz/h	4,7 %	1,6 %	0,9 %	0,5 %
95 %	2	1000 Fz/h	28,5 %	9,5 %	5,7 %	2,9 %
95 %	2	2000 Fz/h	14,3 %	4,8 %	2,9 %	1,5 %
95 %	2	3000 Fz/h	9,5 %	3,2 %	1,9 %	1,0 %
95 %	2	4000 Fz/h	7,1 %	2,4 %	1,4 %	0,7 %
95 %	2	5000 Fz/h	5,7 %	1,9 %	1,1 %	0,6 %
90 %	3	1000 Fz/h	32,0 %	10,7 %	6,4 %	3,2 %
90 %	3	2000 Fz/h	16,0 %	5,4 %	3,2 %	1,6 %
90 %	3	3000 Fz/h	10,7 %	3,6 %	2,1 %	1,1 %
90 %	3	4000 Fz/h	8,0 %	2,7 %	1,6 %	0,8 %
90 %	3	5000 Fz/h	6,4 %	2,1 %	1,3 %	0,6 %
95 %	3	1000 Fz/h	37,8 %	12,6 %	7,6 %	3,8 %
95 %	3	2000 Fz/h	18,9 %	6,3 %	3,8 %	1,9 %
95 %	3	3000 Fz/h	12,6 %	4,2 %	2,5 %	1,3 %
95 %	3	4000 Fz/h	9,5 %	3,2 %	1,9 %	1,0 %
95 %	3	5000 Fz/h	7,6 %	2,5 %	1,5 %	0,8 %

Tabelle 26: Erforderliche Ausstattungsraten, um mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % bzw. 95 % mindestens zwei bzw. drei Floating Car Ankünfte für Zeitintervalle von einer, drei, fünf und zehn Minuten zu haben

Wenn beispielsweise für die SBA-Steuerung mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % mindestens zwei Floating Cars in einem 3-Minuten-Intervall an einem Querschnitt ankommen sollen, dann würden 78 Floating Cars pro Stunde benötigt werden. Dieser Wert ist für Spitzenstunden in der Regel zu erreichen, eine zuverlässige Witterungsdetektion muss allerdings durchgängig funktionieren, also auch zu Schwachlastzeiten in der Nacht. Bei einem in der Verkehrssteuerung üblichen 1-Minuten-Intervall steigt die Anzahl der benötigten Floating Cars somit noch einmal deutlich.

Die hierfür benötigte Ausstattungsrate ist abhängig von der Verkehrsstärke und variiert damit deutlich über den Tag.

Bild 50 zeigt eine typische stündliche Verkehrsmenge (Summe beider Richtungen, unter der Annahme, dass Witterungsbedingungen auf beiden Fahrtrichtungen vergleichbar sind) und die zugehörige Ausstattungsraten a für n = 2, T = 3 min und p = 90 % an einem Wochentag auf einer hochbelasteten Autobahn (DTV = 150'000 Kfz/24h) am Beispiel der Dauerzählstelle Stuttgart-Vaihingen auf der A8. Ab etwa 7 Uhr bis 20 Uhr liegt die erforderliche Ausstattungsrate um 1 %. In den Nachtstunden steigt sie deutlich an, in der Spitze 8 %. Bei geringeren Verkehrsbelastungen, oder wenn die Fahrtrichtungen separat betrachtet werden sollen, erhöhen sich die erforderlichen Ausstattungsraten; ebenso, wenn höhere

Wahrscheinlichkeiten und/oder mehr Floating Cars benötigt werden, oder wenn das Zeitintervall verkürzt wird.

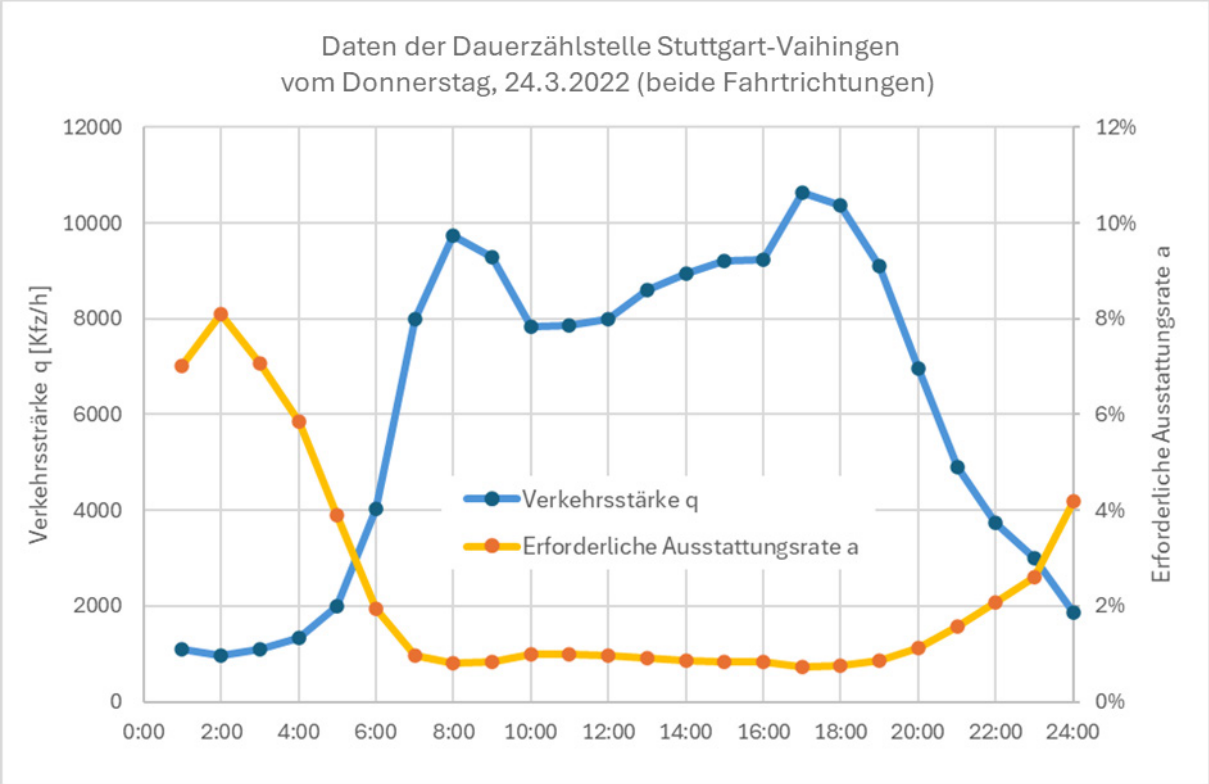

Bild 50: Typische stündliche Verkehrsmenge und erforderliche Ausstattungrate für n = 2, T = 3 min und p = 90 % an einem Wochentag (Summe beider Richtungen) auf einer hochbelasteten Autobahn (DTV = 150'000 Kfz/24h) am Beispiel der Dauerzählstelle Stuttgart-Vaihingen auf der A8 (Daten von https://www.bast.de/, Abrufdatum 01.07.2025)

Wie viele Fahrzeuge bezogen auf welches Zeitintervall für eine robuste witterungsbezogene SBA-Steuerung benötigt werden, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Wenn hierzu aus zukünftigen Untersuchungen Informationen vorliegen, können erforderliche Ausstattungsraten (oder, wenn diese als Eingangsgröße verwendet werden: Erreichbare Wahrscheinlichkeiten für das Eintreffen definierter Mindestanzahlen von Floating Cars) mit den oben dargestellten Formeln leicht berechnet werden.

RADOLAN – Ergänzende Informationsquellen mit hohem Potenzial

Die RADOLAN-Daten des Deutschen Wetterdienstes haben sich als flächendeckend verfügbare und systematisch bereitgestellte Informationsquelle mit hohem Potenzial erwiesen. Aufgrund ihrer zeitlichen Verzögerung von etwa fünf Minuten eignen sie sich primär als Backup-Lösung bei zeitweisem Ausfall oder sehr großen Abständen der MQ der FG3-Infrastruktur oder zur Validierung von Schaltvorschlägen. Für eine direkte, zeitkritische Steuerung sind sie hingegen nur eingeschränkt geeignet. Dennoch können sie durch ihre räumliche Abdeckung und Verfügbarkeit einen Beitrag zur Absicherung regelbasierter Schaltungen leisten.

Das Potenzial der DWD-Daten für die SBA-Steuerung würde sich durch kleinere Aggregierungs-/Aktualisierungsintervalle, beispielsweise von drei Minuten oder einer Minute, weiter erhöhen. Die räumliche Auflösung von derzeit 1 km^2 kann für die SBA-Steuerung, mit AQ-Abständen von etwa 1,5 bis 2 km, als zweckmäßig erachtet werden.

FG3-Daten bleiben unverzichtbar

Neben den beschriebenen, aktuellen Einschränkungen der Datenverfügbarkeit von fahrzeugseitigen Daten sowie der derzeit zeitlich hohen Auflösung der DWD-Daten von 5min hat die Analyse im Projekt verdeutlicht, dass die lokal erhobenen Umfelddaten der FG3-Infrastruktur weiterhin das zentrale Rückgrat der Schaltlogiken darstellen. Einerseits werden zur Qualitätssicherung immer mehrere Datenquellen benötigt. Andererseits kann durch eine entsprechende Redundanz die Ausfallsicherheit gesteigert werden. Zudem ist es aus strategischer Sicht notwendig, zumindest eine Datenquelle betreiberintern zu erfassen, um Transparenz bzgl. der Datenqualität zu erhalten. Somit ist ein vollständiger Ersatz durch neue Datenquellen nicht anzustreben. Vielmehr ergibt sich der Mehrwert aus einer zielgerichteten Ergänzung bestehender Verfahren, z.B. mittels Datenfusion als Alternative zu Ersatzwertverfahren oder zur Qualitätssicherung. In diese Richtung sollten zukünftige Projekte ausgerichtet werden.

Datenfusion als Weg zu robusterer Steuerung

Eine der wesentlichen Erkenntnisse des Projekts liegt in der hohen Robustheit und Flexibilität, die durch die gezielte Fusion unterschiedlicher Datenquellen erreicht werden kann. Einzelne Kenngrößen, sowohl in der stationären Erfassung als auch bei der fahrzeugseitigen Erfassung, können allein betrachtet zur Fehleinschätzung der Situation führen. Daher basieren beispielsweise Plausibilitätsprüfungen von FG3-erfassten Daten auf logisch-physikalischen Tests (s. z.B. FGSV, 2017). Offensichtlich wird es bei bloßer Betrachtung der Wischerfrequenz aus fahrzeugseitiger Erfassung zu Fehleinschätzungen der Witterungslage führen, da die Wahl der Wischerfrequenz von weiteren Faktoren wie gefahrene Geschwindigkeit, Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, Fahrzeugart des vorausfahrenden Fahrzeugs sowie persönlichen Präferenzen abhängig ist, die bei geringen Durchdringungsraten fahrzeugseitiger Daten zu großen Abweichungen führen kann.

Durch Kombination von fahrzeugseitigen Daten, RADOLAN-Daten des DWD und FG3 lassen sich potenzielle Schwächen einzelner Quellen kompensieren und die Ausfallsicherheit erhöhen. Dadurch kann die Belastbarkeit der Schaltlogiken gesteigert und auf unvorhergesehene Situationen besser reagiert werden. Allerdings zeigt sich auch, dass insbesondere durch die aktuell vorhandene zeitliche Verzögerung der Daten Einschränkungen für eine unmittelbare Nutzung bestehen. Die Datenfusion bietet somit ein hohes Potenzial, ist jedoch nur bedingt für zeitkritische Schaltungen geeignet und sollte mit Blick auf Latenzen sorgfältig konzipiert werden. Daher sollten sich künftige Projekte vertiefend mit dem Thema Datenfusion beschäftigen. Als Ausgangsbasis dient die systematische Analyse möglicher Kombinationen sowie Fusionsmodelle in diesem Projekt (s. Kapitel 6.1).

Datenschutz und IT-Sicherheit

Die Verarbeitung nicht aggregierter, fahrzeuggenerierter Einzelfahrzeugdaten (z.B. über RSU) erfordert erhöhte Anforderungen an die DSGVO-Konformität, Anonymisierung und rechtskonforme Weiterverarbeitung. Dies betrifft insbesondere C2X-Daten, deren Verknüpfung mit Fahrzeugidentitäten technisch möglich ist. Im Rahmen künftiger Implementierungen sind diese Anforderungen systematisch zu adressieren, wobei dieser Aspekt

durch den bereits laufenden Betrieb von RSU der Autobahn GmbH grundsätzlich geklärt ist.

7.2 Vorschlag zur Erweiterung des Regelwerks (MARZ 2018 / FGSV 306)

Ergänzung der Datenquellen in MARZ 2018:
Im MARZ 2018 sollte ergänzt werden, dass neben den bisher standardmäßig verwendeten FG3-Daten künftig auch *fahrzeuggenerierte Daten (xFCD/C2X)* sowie *Niederschlagsradardaten (z. B. RADOLAN)* zur Bewertung witterungsbedingter Einflussfaktoren herangezogen werden können. Hierbei ist eine konsolidierte Datenaufbereitung zu definieren, die durch räumliche und zeitliche Aggregation interpretierbare Steuergrößen erzeugt. Zu diesem Thema besteht Forschungsbedarf.

Einführung eines neuen Abschnitts zur „Datenfusion und ergänzenden Datenquellen“:
Im MARZ 2018 ist ein neuer Unterabschnitt vorzusehen, der die Bedingungen und Verfahren zur Fusion von FG3-Daten mit fahrzeuggenerierten Daten beschreibt. Dieser Abschnitt sollte u. a. folgende Aspekte beinhalten, die im Rahmen weiterführender Forschung zu konkretisieren sind:

1. Mindestdurchdringung der Fahrzeugflotte für die Nutzung von xFCD/C2X-Daten bzw. Niederschlagsradardaten
2. Aktualität der Daten sowie Frequenz der Kenngrößenermittlung
3. Qualitätsanforderungen an die fusionierten Daten (z. B. Zuverlässigkeit, Plausibilisierung)
4. Methodik zur Aggregation und Einbindung in die bestehende Logik (z. B. über Nässestufen-Matrix)
5. Zunächst Nutzung der neuen Datenquellen als ergänzende Informationsbasis zur Plausibilisierung und Absicherung bestehender Steuerungsverfahren, anschließend ggf. eigene Situationserkennung.

Überarbeitung der Nässestufen-Bewertung:
Die bestehende Kombination aus NI- und WFD-Stufen könnte um alternative Ermittlungsmethoden auf Basis

1. Scheibenwischerfrequenz,
2. Reibwertschätzungen,
3. Statusmeldungen von Fahrerassistenzsystemen (ABS/ASR/ESC) und
4. optischen Sensorwerten (z. B. von Regensensoren)

im Rahmen von Datenfusionsansätzen ergänzt werden. Eine zusätzliche Bewertungsmatrix für xFCD-Daten sollte eingeführt werden, welche die bestehenden Schwellenwerte ergänzt und in einer übergeordneten Entscheidungslogik (z. B. durch Priorisierung oder Plausibilitätsgewichtung) berücksichtigt wird. Auch bei diesem Thema besteht Forschungsbedarf.

Ergänzung von FGSV 306 „Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten“:
Im Kapitel zur Sensorik sollte ein eigenständiger Abschnitt „Fahrzeuggenerierte Daten“ aufgenommen werden, der

1. die neuen Datenquellen systematisch beschreibt,
2. Mindestanforderungen an deren Validierung festlegt,
3. Anwendungsszenarien für die Steuerung von SBA aufführt (z. B. Nebel, Nässe, Glätte) und
4. Kriterien für die Integration in bestehende Steuerungsmodelle werden aufzeigt.

Aktuell ist hier seitens des zuständigen FGSV-Arbeitskreises bereits eine Erarbeitung eines ergänzenden Hinweispapiers zu diesem Thema in Arbeit.

Definition eines Referenzprozesses zur Datenintegration:
In einem Anhang des MARZ 2018 bzw. FGSV 306 könnte ein schematischer Ablaufprozess beschrieben werden, wie neue Datenquellen in die Steuerung eingespeist werden können – inklusive:

1. Datenannahme
2. Synchronisation (räumlich/zeitlich)
3. Qualitätsprüfung
4. Datenaufbereitung
5. Fusion mit lokalen Daten
6. Generierung von Schaltungen

7.3 Weiterer Forschungsbedarf

Neben den in Kapitel 7.2 bereits erläuterten Forschungsthemen zur Aktualisierung des Regelwerks sind für eine künftige Nutzung der fahrzeuggenerierten Daten in der SBA-Steuerung mehrere technologische und konzeptionelle Weiterentwicklungen erforderlich. Als Basis zur weiteren Analyse unterschiedlicher Datenquellen, die systematische Unterschiede in der zeitlichen und räumlichen Definition der Daten aufweisen, sollte zur Bewertung eine verlässliche Referenzdatenquelle vorliegen. Diese könnte durch zeitlich und räumlich begrenzte Detailmessungen, z.B. in einem Referenzdatenmessfeld, erzeugt werden. Im Gegensatz zu den aktuell im Einsatz befindlichen Referenzdatenmessfeldern müssten diese aber mindestens eine Abdeckung von >10 km² aufweisen, um mindestens 3 Zellen des RADOLAN-Systems (teilweise) abzudecken und eine ausreichende Strecke zur Analyse fahrzeuggenerierter Daten abzudecken. Die zeitliche Auflösung sollte mindestens 1 Minute betragen. Eine dauerhafte Referenzmessung ist auch aus Kostengründen nicht erforderlich, allerdings sollten im Betrachtungszeitraum ausreichend viele Ereignisse auftreten, die analysiert werden können. Bei der Wahl des Betrachtungszeitraums sind die zu analysierenden Anwendungsfälle zu betrachten, da diese ggf. jahreszeitliche Einschränkungen erforderlich machen. Bei der Festlegung des Betrachtungszeitraums kann auf die Erkenntnisse aus den Umfelddatentestfeldern zurückgegriffen werden.

Die Ergebnisse des Projekts haben gezeigt, dass der Zeitraum zwischen der fahrzeugseitigen Erfassung bis zur Bereitstellung aggregierter Informationen durch einen Flottenbetreiber (im Projekt als Latenz definiert) aktuell zu groß ist, um die Daten in SBA-Steuerungen einzusetzen. Alternativ können fahrzeuggenerierte Witterungsdaten als Rohdaten direkt über RSU erfasst werden. In diesem Fall müssten die Daten zentralenseitig aufbereitet und aggregiert werden, damit sie in SBA-Steuerung verwendet werden können. Konkrete Schritte, für die Lösungen erarbeitet werden müssen, sind die Plausibilisierung der Daten

(z.B. „hat ein einzelnes Fahrzeug Scheibenwischeraktivität gemeldet oder gibt es ausreichend viele Detektionen in zeitlicher und räumlicher Nähe?“), die Datenaufbereitung von Rohdaten zu zeitlich und räumlich aggregierten Nässestufen sowie die Einführung von Nowcasting-Modellen zur Echtzeitabschätzung lokaler Wetterereignisse auf Basis von Sensor- und Radardaten.

Mit zunehmender Anzahl von RSU sowie der mit diesen kommunizierenden Fahrzeugflotte steht für diese Fragestellung künftig ausreichendes Datenmaterial zur Verfügung. Um sicherzustellen, dass die künftig verfügbaren, fahrzeugseitigen Daten für die Beantwortung von Forschungsfragen ausreichend sind, müssen allerdings weitere Vorüberlegungen angestellt werden. Die über RSU empfangenen fahrzeuggenerierten Daten erfordern, dass der Fahrzeugführer für die Nutzung der C2X-Dienste seine explizite Zustimmung erteilen muss. Aktuell ist der mit den RSU kommunizierende Flottenanteil am Gesamtkollektiv noch recht gering. Belastbare Zahlen existieren nicht. Zur Abschätzung des Nutzens dieser Daten mit sehr geringen Latenzen könnten größere Kollektive durch mikroskopische Verkehrsflusssimulation analysiert werden. Als Ergebnis könnte ein erforderlicher Flottenanteil definiert werden, um durchgängig qualitativ ausreichende Informationen für eine SBA-Witterungssteuerung sicherzustellen.

Die Fahrzeuge generieren eine ganze Reihe von Informationen, die für die Analyse von Witterungszuständen von Belang sein können. Neben den offensichtlichen Daten wie Scheibenwischerfrequenz oder dem Betriebszustand der Nebelschlussleuchte können Fahrzeuggeschwindigkeit, Abstandsverhalten, Temperaturen oder der Betriebszustand des Abblendlichts wertvolle Zusatzinformationen zur Validierung des Witterungszustands liefern. Ausgehend von fahrzeuggenerierten Rohdaten, die über RSU übermittelt werden, könnte untersucht werden, aus welcher Kombination von Daten möglichst zuverlässige Witterungsinformationen für die SBA-Steuerung generiert werden können. Im Rahmen weiterführender Forschung sollte untersucht werden, welche Daten im Rahmen von Plausibilitätsprüfungen und Datenfusionsansätzen zur Steigerung der Qualität der Aussage zu kritischen Witterungszuständen verwendet werden müssen.

Darüber hinaus können Fahrzeuge, die mit der C2X Technologie ausgestattet sind, selbst generierte Gefahrenwarnungen absetzen und beispielsweise vor stehenden Fahrzeugen, Pannenfahrzeugen, Unfällen, kritischen Fahrsituationen, Stauenden, Baustellen, Einsatzfahrzeugen, Hindernissen auf der Fahrbahn, Starkwind, rutschiger Fahrbahn, Sichteinschränkung, sowie vor falsch bzw. langsam fahrenden Fahrzeugen warnen. Diese Ereignismeldungen können sowohl durch andere Fahrzeuge als auch durch die RSU empfangen werden. Im Weiteren wäre zu untersuchen, wie Meldungen mit Umfeldbezug in die SBA-Steuerung mit aufgenommen werden können. Bisher liegen hierzu noch keine weitergehenden Erkenntnisse vor.

Durch die feinere räumliche Auflösung von Witterungsdaten im Vergleich zu den lokal erfassten Daten von SBA können sich Optimierungen in der Steuerung ergeben, insbesondere in Regionen mit großen Messpunktabständen der FG3-MQ. Eine mögliche Vorgehensweise besteht darin, die kritischste im Fahrtverlauf bis zum nächsten AQ vorliegende Information zur Steuerung am Eingangs-AQ zu nutzen. Das kann im Extremfall dazu führen, dass am Standort des AQ noch keine kritischen Witterungsbedingungen vorliegen und damit die angezeigte Schaltung für Verkehrsteilnehmer unplausibel wirkt. Dieser Aspekt könnte durch verkehrspsychologische Untersuchungen mit Unterstützung eines Fahrsimulators untersucht werden.

7.4 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen das Potenzial, aber auch die zumindest derzeitigen Einschränkungen im Hinblick auf die Verwendung von erweiterten Umfelddaten in SBA auf. Bereits kurzfristig sind durch die Integration von Daten des DWD Verbesserungen der Verkehrssteuerung hinsichtlich der Ausfallsicherheit (Nutzung der DWD-Daten bei Nichtverfügbarkeit der eigenen FG3-Daten) sowie der Qualitätssicherung zu erzielen. Entsprechende Projekte wurden bereits von der Autobahn GmbH initiiert und werden voraussichtlich 2027 abgeschlossen sein und in Betrieb gehen.

Auch in der Integration fahrzeugseitiger Daten in die Verkehrssteuerung wird grundsätzlich großes Potenzial gesehen. Hierzu wird empfohlen, zunächst Vorüberlegungen anzustellen, ab welcher Datenverfügbarkeit die Integration fahrzeugseitiger Daten einen Mehrwert bieten kann. Zur Untersuchung der Fragestellung können Simulationen genutzt werden, Details zu diesem Untersuchungsaspekt sind in Kapitel 7.3 erläutert. Das Ergebnis dieser Untersuchung kann auch dazu dienen, Anforderungen hinsichtlich der Datenverfügbarkeit an externe Quellen zu formulieren.

Zu dem Zeitpunkt, ab dem zu erwarten ist, dass eine ausreichende Datenbasis aus fahrzeugseitigen Daten erfasst werden kann, sollte dann vertieft untersucht werden, inwiefern fahrzeugseitige Daten mittels geeigneter Fusionsansätze in die Datenvervollständigung, Qualitätssicherung und Verkehrssteuerung einfließen können. Bei dieser Fragestellung kann auf die hier gewonnenen Erkenntnisse aufgesetzt werden.

Literatur

Regelwerke

Bundesdatenschutzgesetz vom 30. Juni 2017 (BGBl. I S. 2097), zuletzt geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 6. Mai 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 149).

Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI-Gesetz) vom 14. August 2009 (BGBl. I S. 2821), zuletzt geändert durch Artikel 12 des Gesetzes vom 23. Juni 2021 (BGBl. I S. 1982).

Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-Kritisverordnung - BSI-KritisV) v. 22.04.2016, BGBl. I S. 958.

Delegierte Verordnung (EU) 2015/962 der Kommission vom 18. Dezember 2014 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Bereitstellung EU-weiter Echtzeit-Verkehrsinformationsdienste.

Delegierte Verordnung (EU) Nr. 886/2013 der Kommission vom 15. Mai 2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf Daten und Verfahren für die möglichst unentgeltliche Bereitstellung eines Mindestniveaus allgemeiner für die Straßenverkehrssicherheit relevanter Verkehrsinformationen für die Nutzer.

Verordnung (EU) 2016/679 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG (Datenschutz-Grundverordnung).

ETSI EN 302 637-2: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service.

ETSI EN 302 637-3: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service.

ETSI EN 302 636-5-1: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol.

ETSI EN 302 636-6-1: Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 1: Requirements European Standard.

ETSI EN 302 663: Intelligent Transport Systems (ITS); ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band.

FGSV (1992): Hinweise für Steuerungsmodelle von Wechselverkehrszeichenanlagen in Außerortsbereichen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV Verlag, Köln.

FGSV (2000): Hinweise für neue Verfahren zur Verkehrsbeeinflussung auf Außerortsstraßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV-Verlag, Köln.

FGSV (2002): Merkblatt für die Nässeerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV Verlag, Köln.

FGSV (2010) Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV-Verlag, Köln.

FGSV (2012): Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV-Verlag, Köln.

FGSV (Hrsg.) (2015): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS); Köln.

FGSV (2017): Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV-Verlag, Köln.

FGSV (2019): Hinweise für das Qualitätsmanagement in der Verkehrsbeeinflussung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV-Verlag, Köln.

FGSV; Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement; Arbeitsausschuss Winterdienst (2019a): Hinweise für Planung, Einrichtung und Betrieb von Straßenzustands- und Wetterinformationssystemen. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.

FGSV (2019b): Arbeitspapier Data Mining im Verkehrsmanagement und in der Verkehrsplanung: Anwendungen und Verfahren; Köln.

HCM (2000): Highway Capacity Manual; Transportation Research Board, Washington D.C. (USA).

ISO TS 19321: Intelligent transport systems – Cooperative ITS – Dictionary of in-vehicle information (IVI) data structures (ISO/TS 19321:2020).

Zweites Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme vom Mai 2021, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 25 ausgegeben in Bonn am 27.Mai 2021

Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.) (1989): Hinweise für den Aufbau und die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ), Bergisch Gladbach.

Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.) (1999): Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 1999), Bergisch Gladbach.

Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.) (2018): Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 2018), Bergisch Gladbach.

Richtlinie (EU) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2022 über Maßnahmen für ein hohes gemeinsames Cybersicherheitsniveau in der Union, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 910/2014 und der Richtlinie (EU) 2018/1972 sowie zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2016/1148 (NIS-2-Richtlinie).

Richtlinie 95/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. Oktober 1995 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten und zum freien Datenverkehr (ABl. L 281 vom 23.11.1995, S. 31).

Richtlinie 2002/58/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2002 über die Verarbeitung personenbezogener Daten und den Schutz der Privatsphäre in der elektronischen Kommunikation (ABl. L 201 vom 31.7.2002, S. 37).

Richtlinie 2010/40/EU (IVS-RL) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 07. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern.

Richtlinie 2016/680/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten durch die zuständigen Behörden zum Zwecke der Verhütung, Ermittlung, Aufdeckung oder Verfolgung von Straftaten oder der Straf-vollstreckung sowie zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung des Rahmenbeschlusses 2008/977/JI des Rates.

Richtlinie 2018/1972/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über den europäischen Kodex für die elektronische Kommunikation.

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 1997. Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen (RWVZ), Verkehrsblatt 1997.

Bundesministerium für Verkehr: Richtlinien für Wechselverkehrszeichen-Anlagen an Bundesfernstraßen (RWVA), Verkehrsblattverlag, Dortmund, 1997.

SAE J2735: Surface vehicle standard, V2X Communications Message Set Dictionary, 07/2020.

Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) in der Fassung des Inkrafttretens vom 30.10.2014. Letzte Änderung durch: Neunundvierzigste Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften vom 22. Oktober 2014 (Bundesgesetzblatt Jahrgang 2014 Teil I Nr. 48, S. 1635 Art. 1, ausgegeben zu Bonn am 29. Oktober 2014).

Bundesanstalt für Straßenwesen BASt (Hrsg.) (2002): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen. Bundesanstalt für Straßenwesen BASt (Hrsg.), Bergisch Gladbach.

Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.) (2012): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS 2012), Bergisch Gladbach.

Literatur

Arief, B.; von Arnim, A. (2008): TRACKSS Approach to Improving Road Safety through Sensors Collaboration on Vehicle and in Infrastructure. Projektbericht https://www.cs.kent.ac.uk/people/staff/ba284/Papers/WiVeC08.pdf. Zuletzt abgerufen: 27.06.2024.

Bogren, J.; Gustavsson, T.; Nordin, L. (2008): SRIS - Slippery Road Information System. Sirwec 2008, Prague, 14 - 16 May, https://sirwec.org/wp-content/uploads/2022/04/Prague-D-35.pdf. Zuletzt abgerufen: 27.06.2024.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030 (Entwurfsfassung), FE-Projekt-Nr.: 97.358/2015, März 2016

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Mobilität in Deutschland MiD, Ergebnisbericht 2017, FE 70.904/15

Busch, F.; Weinrich, O. (2005): REACT Deliverable 4.2. Environmental Monitoring System, München

Busch, F., Rascher, A., Grosanic, S. (2014): Umfelddatenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen Testfeld „Eching Ost“ des Bundes; Abschlussbericht 9. Testphase, TU München, München.

CAR 2 CAR Communication Consortium: Triggering Conditions and Data Quality - Adverse Weather Conditions, 31/07/2020.

CAR 2 CAR Communication Consortium: Our Mission and Objectives, https://www.car-2-car.org/membership/car-2-car-members. Zuletzt abgerufen: 27.06.2024.

Collen, S.; Casselgren, J. (2023): Correlation between floating car data and road weather information implemented for winter road maintenance follow-up by monitoring the road friction. Presentation at the TRB International Conference on Road Weather and Winter Maintenance. 9-10 May 2023, Washington DC.

Dinkel, A. (2013): Nutzung fahrzeuggenerierter Daten zur Ermittlung des witterungsbedingten Fahrbahnzustands in Streckenbeeinflussungsanlagen. Dissertation, Technische Universität München.

DWD RADOLAN:
https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radarniederschlagsprodukte/radolankurzbeschreibung_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=8, letzter Zugriff: 30.06.25

DWD RADOLAN Daten:
https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan.html, letzter Zugriff: 16.8.2023

DWD RADOLAN Komposit:
https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/wasserwirtschaft/unsere_leistungen/radarniederschlagsprodukte/radolan/RADOLAN_RADVOR_OP_Komposit_format_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3, letzter Zugriff: 30.06.25

Fiedler, I. (2007): Environmental and Road Condition Prediction. COM2REACT Deliverable 1.2, München.

Grošanic, S.; Piszczek, S. (2011): Umfelddatenerfassung in Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Straßenverkehrstechnik 2/2011.

Huber, W. (2001): Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von Verkehrsinformationen. Dissertation, Technische Universität München, 2001.

Mayer G., Lehan; A. (2021): Kooperative Systeme in Straßentunneln – Potentiale aus der Nutzung der C2X-Kommunikation für die Tunnelüberwachung, 1. Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, expert Verlag GmbH, ISBN 978-3-8169-3530-8, 2021.

Mayer, G. (2022): Cooperative Systems in Road Tunnels – Potentials from the Use of C2X Communication for Tunnel Monitoring. PIARC, 2nd International Conference on Road Tunnel Operations and Safety, Granada, Spain, 2022, ISBN 978-84-95641-48-9.

Mendel, J.M. (1995): Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial, Proceedings of the IEEE, ISSN: 00189219

SVZ-BW (2023): https://www.svz-bw.de/verkehrsbeeinflussungsanlagen/streckenbeeinflussung/anlagen. Zuletzt abgerufen: 27.06.2024.

Myllylä, J. (2003): Floating Car Road Weather Monitoring, Summary of the Development Work between 1996-2003. Finnish Road Administration, Helsinki, Finnland.

Pawłowski, M.; Wróblewska, A.; Sysko-Romanczuk, S. (2023): Effective Techniques for Multimodal Data Fusion: A Comparative Analysis. Sensors 2023, 23, 2381. https://doi.org/10.3390/s23052381. Zuletzt abgerufen: 27.06.2024.

Rabiei, E.; Haberlandt, U.; Sester, M.; Fitzner, D. (2013): Rainfall estimation using moving cars as rain gauges – laboratory experiments. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 4701–4712, 2013. www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/4701/2013/doi:10.5194/hess-17-4701-2013. Zuletzt abgerufen: 27.06.2024.

Rabiei, E.; Haberlandt, U.; Sester, M.; Fitzner, D., Wallner, M. (2016): Areal rainfall estimation using moving cars – computer experiments including hydrological modeling. Hydrol. Earth Syst. Sci., 20, 3907–3922, 2016. www.hydrol-earth-syst-sci.net/20/3907/2016/doi:10.5194/hess-20-3907-2016. Zuletzt abgerufen: 27.06.2024.

Riegelhuth, G., Glatz, M. (2015): Zuverlässiger Betrieb von Streckenbeeinflussungsanlagen auf Basis einer antizipierenden, regelbasierten Steuerung. Straßenverkehrstechnik 04/2015, Kirschbaum Verlag, Bonn.

Rudin, C. (2019): Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead, Nat Mach Intell, Nature Machine Intelligence, ISSN: 2522-5839.

SAFESPOT: https://docbox.etsi.org/workshop/2010/201002_ITSWORKSHOP/GLOBAL%20STANDARDIZATION%20AND%20RESEARCH%20ON%20ITS/VIVO_SAFESPOT.pdf. Zuletzt abgerufen: 27.06.2024.

Schnabel, W.; Lohse, D. (2011): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 1 Straßenverkehrstechnik. DIN Media; ISBN-10: 9783410203995

SIM-TD: Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland (BMWi, BMBF, BMVBS 2008 -2013)

Schwietering, C. (2010): Verfahren zur Bestimmung der Einbruchswahrscheinlichkeit des Verkehrsablaufs auf Autobahnen und Anwendung in der Verkehrssteuerung. Dissertation, RWTH Aachen.

Schwietering, C; Löbbering, D.; Spangler, N.; Gabloner, S.; Busch, F.; Roszak, C.; Dobmeier, S.; Neumann, T. (2021): Chancen in der Verkehrsbeeinflussung durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation. BASt Verkehrstechnik Heft V 146. ISBN 978-3-95606-602-3.

Schwietering, C.; Füg, J.; Kretschmann, F.; Trupat, S.; Rump, J. (2022): Optimierte Nutzung von Umfelddaten in der Verkehrsbeeinflussung. Bericht an die Bundesanstalt für Straßenwesen zu FE 03.0567; veröffentlicht als: Fachveröffentlichung FV-V1 der Bundesanstalt für Straßenwesen (2024). https://doi.org/10.60850/fv-v1

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.

Technische Universität München, Lehrstuhl Verkehrstechnik (2016), Hrsg.: Umfelddatenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen Testfeld „Eching Ost“ des Bundes (2003 bis 2015).

TRIMIS (2022): EU Transport Research & Innovation Status Assessment Report 2022: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC139891/JRC139891_01.pdf Zuletzt abgerufen: 27.06.2024.

WILLWARN (2007): https://fgvt.htwsaar.de/site/prevent-willwarn-2004-2007/. Zuletzt abgerufen: 27.06.2024.

Zimmermann, H.-J. (2001): Fuzzy Set Theory—and Its Applications, Springer Netherlands, ISBN 978-94-010-3870-6 978-94-010-0646-0.

Zhuanglin, M. et al: Analyzing drivers‘ perceived service quality of variable message signs (VMS): https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33085674/. Zuletzt abgerufen: 26.09.2024.

Bilder

Bild 1: Methodische Vorgehensweise – Arbeitsprogramm

Bild 2: Grundsätzliche Technologien zur Datenübertragung per Funk (MAYER, LEHAN 2021)

Bild 3: Flächendeckende Information zur Niederschlagshöhe (RADOLAN, Quelle: DWD)

Bild 4: Fachliche Abläufe und Datenfluss der Datenaufbereitung (Quelle: MARZ 2018, S. 25)

Bild 5: Untersuchungsstrecke NWA auf der BAB A8 zwischen Hohenstadt und Riedheim. Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

Bild 6: Untersuchungsstrecke SBA auf der BAB A8 zwischen Leonberg und Wendlingen. Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

Bild 7: Tools und Datenfluss im Projekt

Bild 8: FGD_01-Geokoordinatenfolge (blaue Punkte). Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

Bild 9: Positionen aller FGD_02 Meldungen in Fahrtrichtung Karlsruhe vom 1. April 2023 (grüne Punkte). Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

Bild 10: DWD Niederschlagsintensitäten (türkise Quadrate), Standorte der Anzeigequerschnitte in Fahrtrichtung Karlsruhe (rote Punkte) und nächster DWD-Rasterpunkt zu jedem Anzeigequerschnitt (blaue Rauten). Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

Bild 11: Aggregationsintervalle, Latenzen und Auflösung der Datenarten

Bild 12: Positionen der ausgewählten AQs für die Untersuchungsstrecke SBA (oben links) und für die Untersuchungsstrecke NWA (unten rechts) für die Auswertungen. Kartengrundlage: OSM (Zugriff 01.07.2025)

Bild 13: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperaturen für SBA KA04 für die ausgewählten Tage

Bild 14: Scatterplot aller Lufttemperaturgegenüberstellungen von AQ SBA KA04

Bild 15: Regression FG3 Niederschlagsintensität vs. DWD Niederschlagsintensität auf der Untersuchungsstrecke NWA bei AQ S14

Bild 16: Bestimmtheitsmaß R^2 der Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke NWA

Bild 17: Bestimmtheitsmaß R^2 der Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke SBA

Bild 18: FG3 Niederschlagsintensität und DWD Niederschlagsintensität über 24 Stunden auf der Untersuchungsstrecke NWA bei AQ S14

Bild 19: FG3 Niederschlagsintensität und DWD Niederschlagsintensität über 2 Stunden auf der Untersuchungsstrecke bei AQ NWA S14

Bild 20: FG3 Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 21.06.2023

Bild 21: DWD Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 21.06.2023

Bild 22: FG3 Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung München am 14.03.2023

Bild 23: DWD Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung München am 14.03.2023

Bild 24: Scatterplot FG3 Niederschlagsintensität (oben) bzw. FG3 Wasserfilmdicke (unten) vs. FGD_01 Wischerfrequenz von AQ S14 auf der Untersuchungsstrecke NWA

Bild 25: Scatterplot FG3 Niederschlagsintensität (oben) bzw. FG3 Wasserfilmdicke (unten) vs. FGD_01 Wischerfrequenz von AQ KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA

Bild 26: Bestimmtheitsmaß R^2 der FGD_01 Wischerfrequenz vs. FG3 Wasserfilmdicke bzw. Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke NWA

Bild 27: Bestimmtheitsmaß R^2 der FGD_01 Wischerfrequenz vs. FG3 Wasserfilmdicke bzw. Niederschlagsintensität auf Untersuchungsstrecke SBA

Bild 28: FG3 Wasserfilmdicke auf der Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 28.04.2023

Bild 29: FGD_01 Wischerfrequenz auf der Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 28.04.2023

Bild 30: FG3 Niederschlagsintensität auf der Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 28.04.2023

Bild 31: DWD Niederschlagsintensität auf der Untersuchungsstrecke NWA Fahrtrichtung Stuttgart am 28.04.2023

Bild 32: FG3 Wasserfilmdicke auf der Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung Karlsruhe am 11.07.2023

Bild 33: FGD_01 Wischerfrequenz auf der Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung Karlsruhe am 11.07.2023

Bild 34: FG3 Niederschlagsintensität auf der Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung Karlsruhe am 11.07.2023

Bild 35: DWD Niederschlagsintensität auf der Untersuchungsstrecke SBA Fahrtrichtung Karlsruhe am 11.07.2023

Bild 36: Boxplot FGD_01 Reibung für verschiedene FG3 Fahrbahnzustände von AQ S14 auf der Untersuchungsstrecke NWA (links) und AQ M02 auf der Untersuchungsstrecke SBA (rechts)

Bild 37: Scatterplot FGD_01 Reibung vs. FGD_01 Wischerfrequenz bezogen auf Nässestufe für AQ S14 auf der Untersuchungsstrecke NWA (links) und AQ M02 auf der Untersuchungsstrecke SBA (rechts)

Bild 38: Ablaufschema für Ansatz mit ID 2 (DWD Niederschlagsintensität und FG3 Wasserfilmdicke)

Bild 39: Aufbau des Fuzzy-Inferenz-Systems zur Berechnung der Nässestufe aus Eingangswerten

Bild 40: Ablaufschema für Ansatz mit ID 9 (FGD_01 Wischerfrequenz und DWD Niederschlagsintensität)

Bild 41: Fuzzy Zugehörigkeitsfunktionen für Eingangsvariablen DWD Niederschlagsintensität und FGD_01 Wischerfrequenz

Bild 42: Fuzzy Zugehörigkeitsfunktionen für Ausgangsvariable FG3 Nässestufe

Bild 43: Visualisierung der Fuzzy-Logik für Ansatz 9 (DWD Niederschlagsintensität und FGD_01 Wischerfrequenz)

Bild 44: Stabilität der Modelle anhand der durchschnittlichen Abweichung vom Mittelwert über alle Ereignistage (SBA; Realitätsnahe Bedingungen)

Bild 45: Stabilität der Modelle anhand der durchschnittlichen Abweichung vom Mittelwert über alle Ereignistage (SBA; Hypothethisches Ideal-Szenario)

Bild 46: Summierte Abweichung vom Medianwert über alle Ereignistage (NWA; Realitätsnahe Bedingungen)

Bild 47: Summierte Abweichung vom Medianwert über alle Ereignistage (NWA; idealisierte Bedingungen)

Bild 48: Ganglinie der Nässestufen – Kombination aus realitätsnahen Bedingungen und hypothetischem Ideal-Szenario (SBA: KA20_UDE08_2023-07-11)

Bild 49: Wahrscheinlichkeiten für die Ankunft von mindestens n Fahrzeugen an einem Querschnitt für Zeitintervalle von 1 Minute (links) und 5 Minuten (rechts) in Abhängigkeit der erwarteten Anzahl meldender Fahrzeuge pro Stunde q_{FCD}

Bild 50: Typische stündliche Verkehrsmenge und erforderliche Ausstattungrate für n = 2, T = 3 min und p = 90 % an einem Wochentag (Summe beider Richtungen) auf einer hochbelasteten Autobahn (DTV = 150'000 Kfz/24h) am Beispiel der Dauerzählstelle Stuttgart-Vaihingen auf der A8 (Daten von https://www.bast.de/, Abrufdatum 01.07.2025)

Bild 51: Ablaufschema für Ansatz mit ID 4 (DWD Niederschlagsintensität und FG3 Niederschlagsintenistät)

Bild 52: Ablaufschema für Ansatz mit ID 5 (DWD Niederschlagsintensität und FG3 Wasserfilmdicke)

Bild 53: Ablaufschema für Ansatz mit ID 7 (FGD_01 Wischerfrequenz und FG3 Niederschlagsintensität)

Bild 54: Ablaufschema für Ansatz mit ID 8 (FGD_01 Wischerfrequenz und FG3 Wasserfilmdicke)

Bild 55: Ablaufschema für Ansatz mit ID 10 (DWD Niederschlagsintensität, FGD_01 Wischerfrequenz und FG3 Niederschlagsintensität)

Bild 56: Ablaufschema für Ansatz mit ID 11 (DWD Niederschlagsintensität, FGD_01 Wischerfrequenz und FG3 Wasserfilmdicke)

Bild 57: Ablaufschema für Ansatz mit ID 12 (FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe)

Bild 58: Ablaufschema für Ansatz mit ID 13 (FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe und FG3 Niederschlagsintensität)

Bild 59: Ablaufschema für Ansatz mit ID 14 (FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe und FG3 Wasserfilmdicke)

Tabellen

Tab. 1: C-ITS Protokollstapel im Vergleich zum ISO/OSI-Modell (MAYER, 2022)

Tab. 2: Ereignismeldungen (DENM) nach ETSI EN 302 637-3 Standard

Tab. 3: Ermittlung NI-Stufe, WFD-Stufe und Nässestufe nach dem MARZ (Quelle für die dargestellten Tabellen: MARZ 2018, S. 29f)

Tab. 4: Zuordnung Messquerschnitt zu Anzeigequerschnitt beim Ersatzquerschnittverfahren (Quelle: MARZ 2018, Tab. 5, S. 24)

Tab. 5: exemplarische Zuordnung der Nässestufen zu SBA-Schaltbildern

Tab. 6: Gegenüberstellung konventioneller und C-ITS Methoden zur Gefahrenwarnung

Tab. 7: Umfeldsensoren auf Untersuchungsstrecke NWA mit zu speisenden Anzeigequerschnitten

Tab. 8: Umfeldsensoren auf Untersuchungsstrecke SBA mit zu speisenden Anzeigequerschnitten

Tab. 9: Überblick über die Datenarten der verschiedenen Datenlieferanten

Tab. 10: Übersicht über aller Kenngrößen

Tab. 11: Auszug der Rohdaten für die Wischerfrequenz aus den FGD_01

Tab. 12: Auszug von der Autobahn GmbH übergebenen FGD_02 für den 01.04.2023

Tab. 13: Niederschlagsintensität in 5-Minuten-Intervallen (Zeilen) pro Anzeigequerschnitt (Spalten)

Tab. 14: Zusammenfassung von FGD_02-Meldungen

Tab. 15: Auszug aus Jahrestabelle am 31.03.2023 mit allen Datenquellen für Anzeigequerschnitt KA04

Tab. 16: Datenverfügbarkeit auf der Untersuchungsstrecke SBA bzw. NWA für ausgewählte AQs

Tab. 17: Kreuztabelle FGD_02 Fahrbahnzustand und FG3 Fahrbahnzustand für AQ M02 auf der Untersuchungsstrecke SBA

Tab. 18: Kreuztabelle FGD_02 Fahrbahnzustand und FG3 Fahrbahnzustand für AQ KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA

Tab. 19: Bedingte Wahrscheinlichkeiten P(FG3 | FGD_02), berechnet als relative Häufigkeiten der FG3-Fahrbahnzustände unter der Bedingung eines gegebenen FGD_02-Fahrbahnzustands für AQ M02 auf der Untersuchungsstrecke SBA

Tab. 20: Bedingte Wahrscheinlichkeiten P(FG3 | FGD_02), berechnet als relative Häufigkeiten der FG3-Fahrbahnzustände unter der Bedingung eines gegebenen FGD_02-Fahrbahnzustands für AQ KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA

Tab. 21: Kreuztabelle FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe und FG3 Niederschlagsintensität-Stufe für AQ M02 auf der Untersuchungsstrecke SBA

Tab. 22: Kreuztabelle FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe und FG3 Niederschlagsintensität-Stufe für AQ KA04 auf der Untersuchungsstrecke SBA

Tab. 23: Ansätze zur Ermittlung von Nässestufen auf Basis der verfügbaren Datenquellen

Tab. 24: Fuzzy Regeln für Ansatz 9

Tab. 25: Synthetische Berechnung der Mittelwerte und Abweichungen zur Veranschaulichung der Methode

Tabelle 26: Erforderliche Ausstattungsraten, um mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % bzw. 95 % mindestens zwei bzw. drei Floating Car Ankünfte für Zeitintervalle von einer, drei, fünf und zehn Minuten zu haben

Anhang

Beschreibung der Ansätze

ID 3: Fuzzy DWD

Das Vorgehen ist identisch zum Ansatz mit ID 9 (Beschreibung in Kapitel 6.1.3). Lediglich die FGD_01 Wischerfrequenz wird immer auf ‚fehlend' (-1) gestellt.

ID 4: Fuzzy DWD FG3 NI

Basierend auf dem Fuzzy-Schema wie in Bild dargestellt, wird aus der DWD-Niederschlagsintensität mittels Fuzzy-Logik eine WFD-Stufe berechnet. Diese WFD-Stufe dient im nächsten Schritt – gemeinsam mit der vorhandenen FG3-NI-Stufe – als Grundlage für die Bestimmung der FG3-Nässestufe. Die Zuordnung der Kombinationen von WFD- und NI-Stufen zur Nässestufe erfolgt dabei gemäß der MARZ-Zuordnungsmatrix (siehe Quellcode unten).

```
% Tabelle der Zuordnungen gemäß MARZ
   table_ermittlung_naessestufe = [0 0 1 2 2 0;       %     'trocken', 'trocken', 'nass 1',
'nass 2', 'nass 2', 'trocken';
                                   1 1 2 3 4 1;       %     'nass 1', 'nass 1', 'nass 2',
'nass 3', 'nass 4', 'nass 1';
                                   2 2 2 3 4 2;       %     'nass 2', 'nass 2', 'nass 2',
'nass 3', 'nass 4', 'nass 2';
                                   2 2 3 3 4 3;       %     'nass 2', 'nass 2', 'nass 3',
'nass 3', 'nass 4', 'nass 3';
                                   0 0 1 2 3 NaN];    %     'trocken', 'trocken', 'nass 1',
'nass 2', 'nass 3', '-';
```

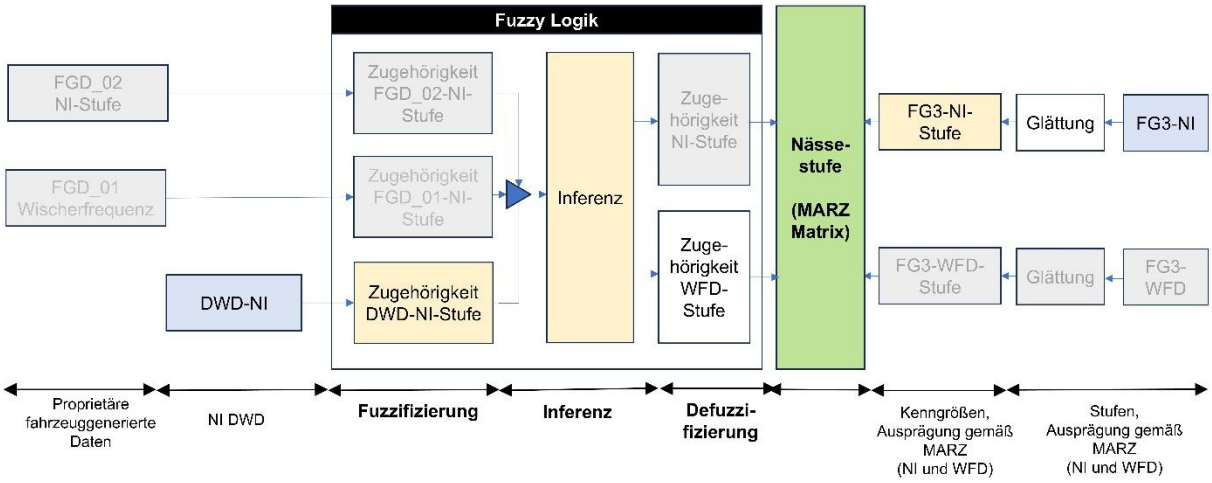

Bild 51: Ablaufschema für Ansatz mit ID 4 (DWD Niederschlagsintensität und FG3 Niederschlagsintenistät)

ID 5: Fuzzy DWD FG3 WFD

Basierend auf dem Fuzzy-Schema wie in Bild 52 dargestellt, wird zunächst aus der DWD-Niederschlagsintensität eine NI-Stufe berechnet. Diese berechnete NI-Stufe

wird anschließend zusammen mit der vorhandenen FG3-WFD-Stufe zur Ableitung der FG3-Nässestufe herangezogen. Die Zuordnung erfolgt gemäß der MARZ-Zuordnungsmatrix.

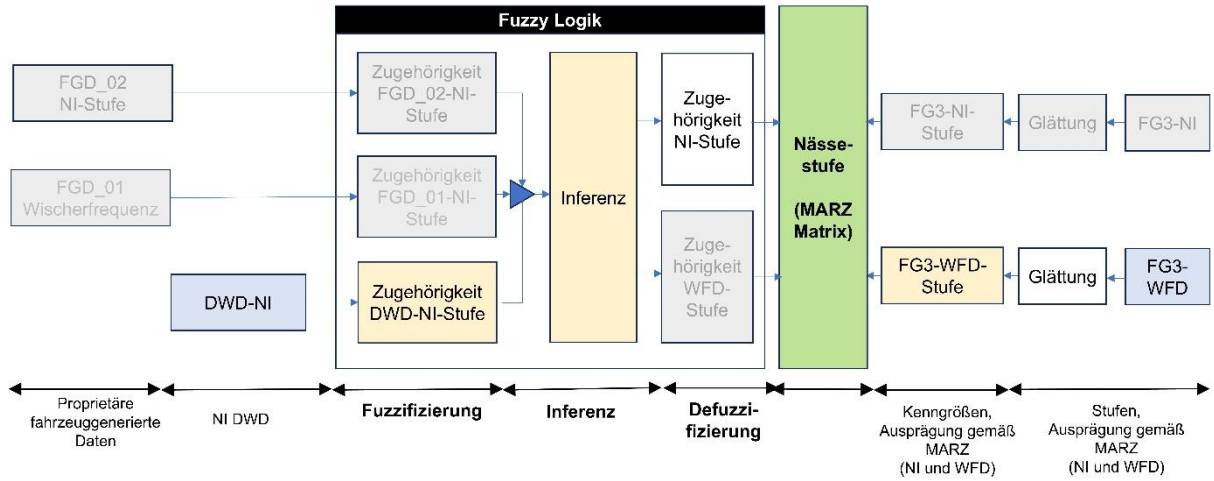

Bild 52: Ablaufschema für Ansatz mit ID 5 (DWD Niederschlagsintensität und FG3 Wasserfilmdicke)

ID 6: Fuzzy FGD_01 Wischerfrequenz

Das Vorgehen ist identisch zum Ansatz mit ID 9 (Beschreibung in Kapitel 6.2.3). Lediglich die DWD Niederschlagsintensität wird immer auf ‚fehlend' (also -1) gestellt.

ID 7: Fuzzy FGD_01 Wischerfrequenz FG3 NI

Basierend auf dem Schema aus Bild 53 aus der FGD_01-Wischerfrequenz eine WFD-Stufe ermittelt. Diese wird anschließend gemeinsam mit der vorhandenen FG3-NI-Stufe verwendet, um die FG3-Nässestufe zu bestimmen. Die Zuordnung erfolgt gemäß der MARZ-Zuordnungsmatrix.

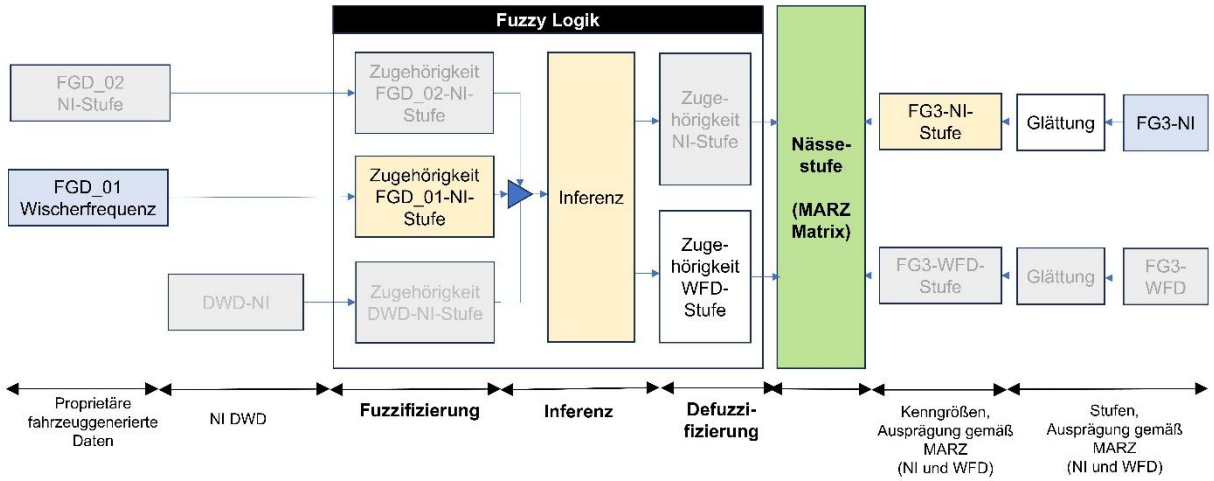

Bild 53: Ablaufschema für Ansatz mit ID 7 (FGD_01 Wischerfrequenz und FG3 Niederschlagsintensität)

ID 8: Fuzzy FGD_01 Wischerfrequenz FG3 WFD

Gemäß dem Ablaufschema in Bild 54wird aus der FGD_01-Wischerfrequenz eine NI-Stufe über Fuzzy-Logik berechnet. In Kombination mit der vorhandenen FG3-WFD-Stufe erfolgt anschließend die Ermittlung der FG3-Nässestufe anhand der MARZ-Zuordnungsmatrix.

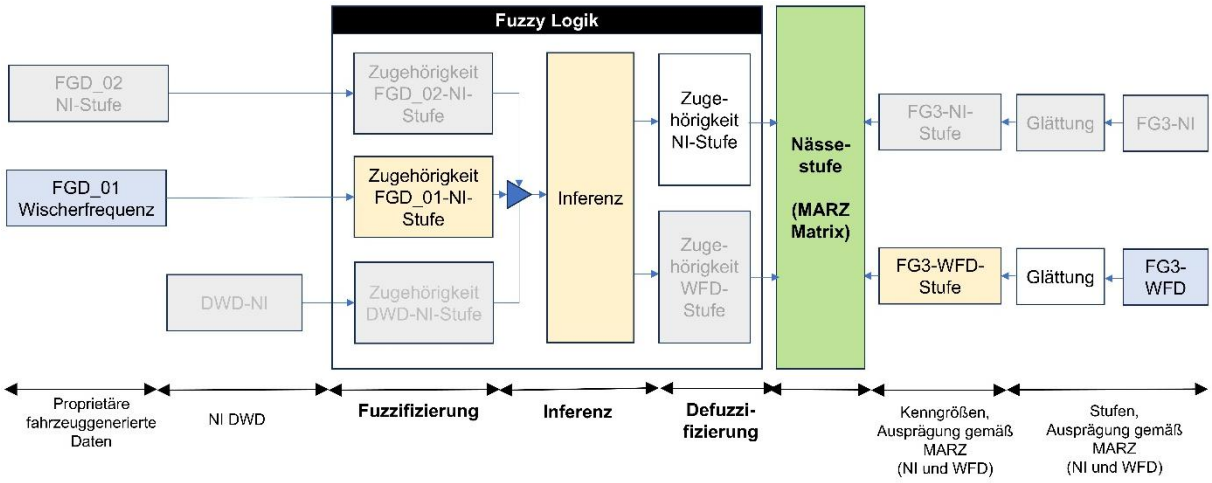

Bild 54: Ablaufschema für Ansatz mit ID 8 (FGD_01 Wischerfrequenz und FG3 Wasserfilmdicke)

ID 10: Fuzzy DWD FGD_01 Wischerfrequenz FG3 NI

Auf Grundlage des erweiterten Fuzzy-Schemas aus ID 9 wird zunächst eine WFD-Stufe aus der Kombination von DWD-Niederschlagsintensität und FGD_01-Wischerfrequenz berechnet (siehe Bild 55). Diese wird im Anschluss zusammen mit der vorhandenen FG3-NI-Stufe zur Ableitung der FG3-Nässestufe verwendet. Die Zuordnung basiert auf der MARZ-Zuordnungsmatrix.

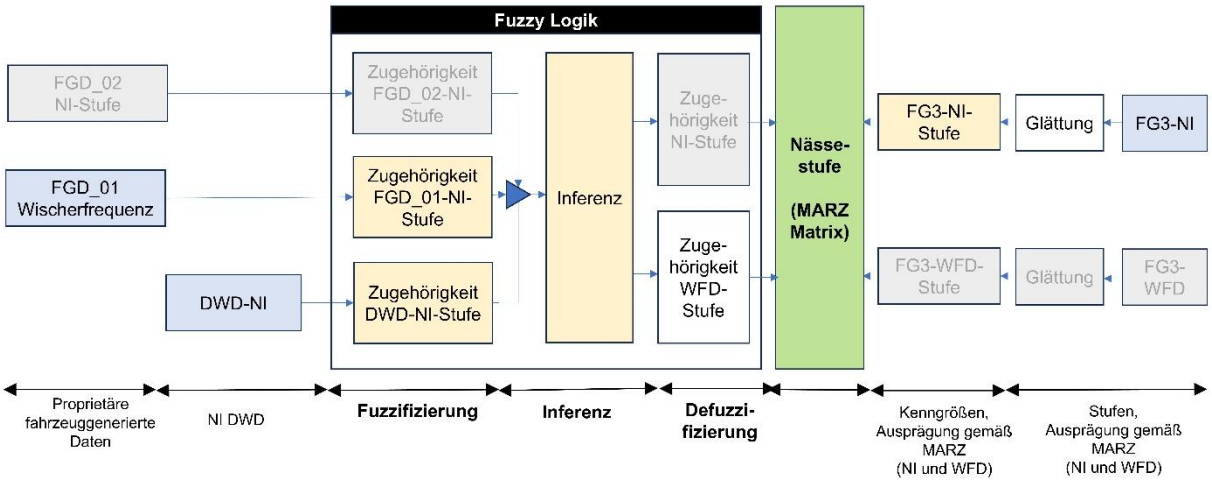

Bild 55: Ablaufschema für Ansatz mit ID 10 (DWD Niederschlagsintensität, FGD_01 Wischerfrequenz und FG3 Niederschlagsintensität)

ID 11: Fuzzy DWD FGD_01 Wischerfrequenz WFD FG3

Gemäß dem Schema in Bild 56 wird zunächst eine NI-Stufe aus der DWD-Niederschlagsintensität und der FGD_01-Wischerfrequenz abgeleitet. Zusammen mit der vorhandenen FG3-WFD-Stufe erfolgt anschließend die Klassifikation der FG3-Nässestufe mithilfe der MARZ-Zuordnungsmatrix (siehe Quellcode bei ID 4).

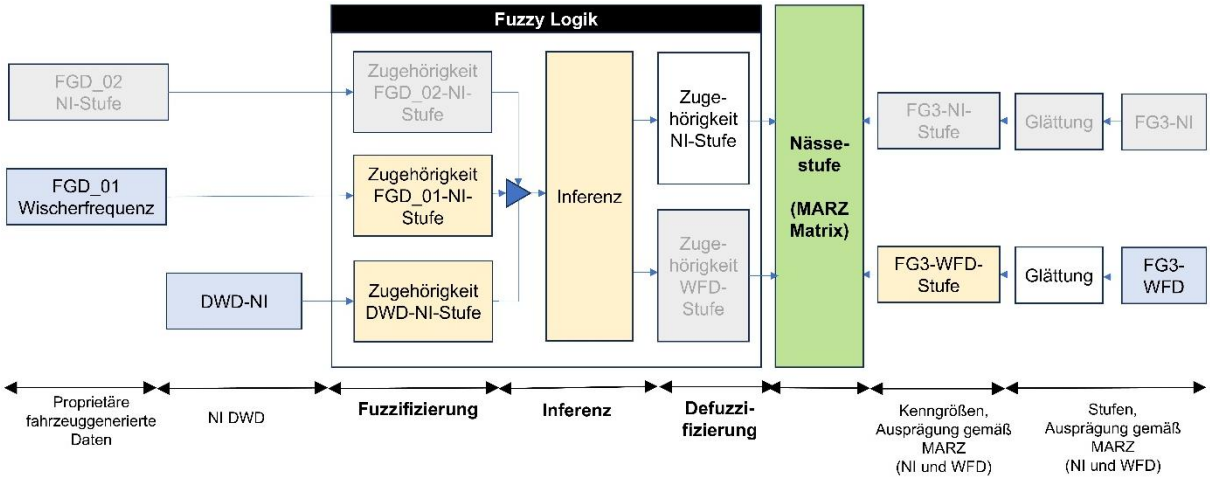

Bild 56: Ablaufschema für Ansatz mit ID 11 (DWD Niederschlagsintensität, FGD_01 Wischerfrequenz und FG3 Wasserfilmdicke)

ID 12: Fuzzy FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe

In diesem Ansatz wird ein Fuzzy-Inferenzsystem verwendet, um auf Basis der FGD_02-Niederschlagsintensität direkt die FG3-Nässestufe zu klassifizieren (siehe Bild 57).

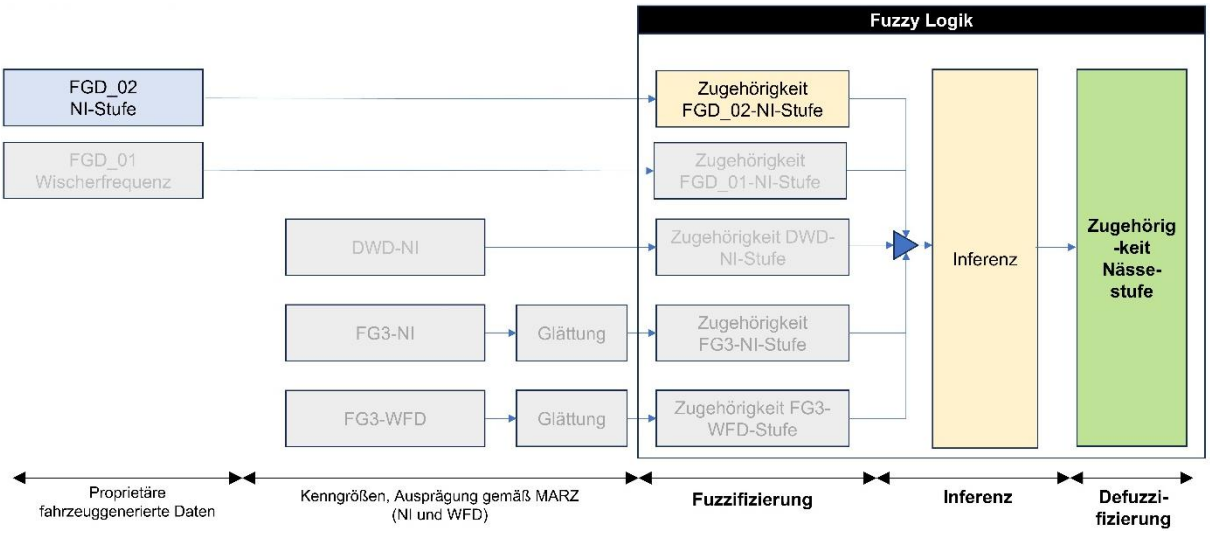

Bild 57: Ablaufschema für Ansatz mit ID 12 (FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe)

Als Eingangsgrößen dienen vier Merkmalsanteile, die jeweils den relativen Anteil bestimmter Niederschlagsintensitätsklassen beschreiben: none, low, medium und high.

Jede dieser Eingangsvariablen ist durch drei linguistische Kategorien beschrieben: niedrig, hoch und fehlend. Für niedrig und hoch werden trapezförmige Zugehörigkeitsfunktionen (trapmf) verwendet, fehlend wird mit einer speziellen Funktion (trimf([-1 -1 -1])) als technischer Platzhalter modelliert, um mit fehlenden Daten umgehen zu können.

Die Ausgangsvariable ist die FG3-Nässestufe, die fünf linguistische Kategorien umfasst: trocken, nass 1, nass 2, nass 3 und nass 4, zusätzlich ergänzt um die Kategorie nicht ermittelbar. Für jede dieser Stufen kommt eine dreiecksförmige Zugehörigkeitsfunktion (trimf) zum Einsatz.

Die Inferenz erfolgt anhand von 17 fest definierten Fuzzy-Regeln, welche die Kombinationen der vier Eingangsvariablen auswerten und eine entsprechende Nässestufe zuweisen. Die Regeln wurden manuell er-stellt und basieren auf logischen Verknüpfungen zwischen den Anteilen der Intensitätsklassen.

```
    % Fuzzy-Inferenzsystem erstellen
    fis_rainintensity = mamfis('Name', 'RainClassification');

    % Eingangsvariable 1
    fis_rainintensity = addInput(fis_rainintensity, [-1 1], 'Name', 'none');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'none', 'trapmf', [0 0 0.2 0.6], 'Name', 'nie-
drig');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'none', 'trapmf', [0.4 0.8 1 1], 'Name',
'hoch');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'none', 'trimf', [-1 -1 -1], 'Name', 'feh-
lend');

    % Eingangsvariable 2
    fis_rainintensity = addInput(fis_rainintensity, [-1 1], 'Name', 'low');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'low', 'trapmf', [0 0 0.2 0.6], 'Name', 'nie-
drig');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'low', 'trapmf', [0.4 0.8 1 1], 'Name',
'hoch');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'low', 'trimf', [-1 -1 -1], 'Name', 'feh-
lend');

    % Eingangsvariable 3
    fis_rainintensity = addInput(fis_rainintensity, [-1 1], 'Name', 'medium');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'medium', 'trapmf', [0 0 0.2 0.6], 'Name',
'niedrig');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'medium', 'trapmf', [0.4 0.8 1 1], 'Name',
'hoch');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'medium', 'trimf', [-1 -1 -1], 'Name', 'feh-
lend');

    % Eingangsvariable 4
    fis_rainintensity = addInput(fis_rainintensity, [-1 1], 'Name', 'high');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'high', 'trapmf', [0 0 0.2 0.6], 'Name', 'nie-
drig');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'high', 'trapmf', [0.4 0.8 1 1], 'Name',
'hoch');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'high', 'trimf', [-1 -1 -1], 'Name', 'feh-
lend');

     % Ausgangsvariable: Nässestufe (trocken, nass 1, nass 2, nass 3, nass 4)
    fis_rainintensity = addOutput(fis_rainintensity, [-1 4], 'Name', 'Naessestufe');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'Naessestufe', 'trimf', [0 0 0.5], 'Name',
'trocken');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'Naessestufe', 'trimf', [0.5 1 1.5], 'Name',
'nass_1');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'Naessestufe', 'trimf', [1.5 2 2.5], 'Name',
'nass_2');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'Naessestufe', 'trimf', [2.5 3 3.5], 'Name',
'nass_3');
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'Naessestufe', 'trimf', [3.5 4 4], 'Name',
'nass_4');
```

```
    fis_rainintensity = addMF(fis_rainintensity, 'Naessestufe', 'trimf', [-1 -1 -1], 'Name',
'nicht_ermittelbar');

    % Fuzzy-Regeln definieren
    rule1 = "If none is hoch and low is niedrig and medium is niedrig and high is niedrig then
Naessestufe is trocken";
    rule2 = "If none is niedrig and low is hoch and medium is niedrig and high is niedrig then
Naessestufe is nass_1";
    rule3 = "If none is niedrig and low is niedrig and medium is hoch and high is niedrig then
Naessestufe is nass_2";
    rule4 = "If none is niedrig and low is niedrig and medium is niedrig and high is hoch then
Naessestufe is nass_4";
    rule5 = "If none is hoch and low is hoch and medium is niedrig and high is niedrig then
Naessestufe is nass_1";
    rule6 = "If none is hoch and low is niedrig and medium is hoch and high is niedrig then
Naessestufe is nass_2";
    rule7 = "If none is hoch and low is niedrig and medium is niedrig and high is hoch then
Naessestufe is nass_4";
    rule8 = "If none is niedrig and low is hoch and medium is hoch and high is niedrig then
Naessestufe is nass_2";
    rule9 = "If none is niedrig and low is hoch and medium is niedrig and high is hoch then
Naessestufe is nass_3";
    rule10 = "If none is niedrig and low is niedrig and medium is hoch and high is hoch then
Naessestufe is nass_4";
    rule11 = "If none is hoch and low is hoch and medium is hoch and high is niedrig then Naes-
sestufe is nass_2";
    rule12 = "If none is hoch and low is hoch and medium is niedrig and high is hoch then Naes-
sestufe is nass_3";
    rule13 = "If none is hoch and low is niedrig and medium is hoch and high is hoch then Naes-
sestufe is nass_4";
    rule14 = "If none is niedrig and low is hoch and medium is hoch and high is hoch then Naes-
sestufe is nass_4";
    rule15 = "If none is hoch and low is hoch and medium is hoch and high is hoch then Naesse-
stufe is nass_4";
    rule16 = "If none is hoch and low is niedrig and medium is niedrig and high is niedrig then
Naessestufe is trocken";
    rule17 = "If none is fehlend and low is fehlend and medium is fehlend and high is fehlend
then Naessestufe is nicht_ermittelbar";
```

ID 13: Fuzzy FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe NI FG3

Gemäß dem Ablaufschema in Bild Bild 58 wird zunächst aus der FGD_02-Niederschlagsintensität die WFD-Stufe abgeleitet. Im Anschluss wird diese berechnete WFD-Stufe gemeinsam mit der vorhandenen FG3-NI-Stufe verwendet, um die FG3-Nässestufe zu bestimmen. Die Zuordnung erfolgt auf Basis der MARZ-Zuordnungsmatrix.

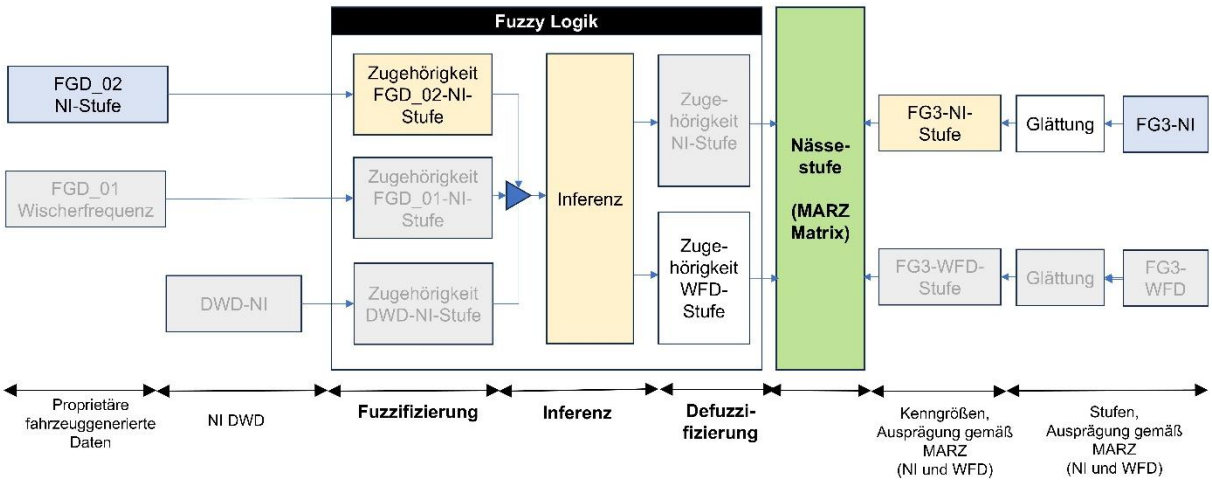

Bild 58: Ablaufschema für Ansatz mit ID 13 (FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe und FG3 Niederschlagsintensität)

ID 14: Fuzzy FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe WFD FG3

Analog zu ID 13 wird auch hier zunächst nicht die Nässestufe direkt bestimmt, sondern eine NI-Stufe aus der FGD_02-Niederschlagsintensität berechnet (siehe Bild 59). Diese NI-Stufe wird anschließend gemeinsam mit der vorhandenen FG3-WFD-Stufe genutzt, um die FG3-Nässestufe mithilfe der MARZ-Zuordnungsmatrix zu bestimmen.

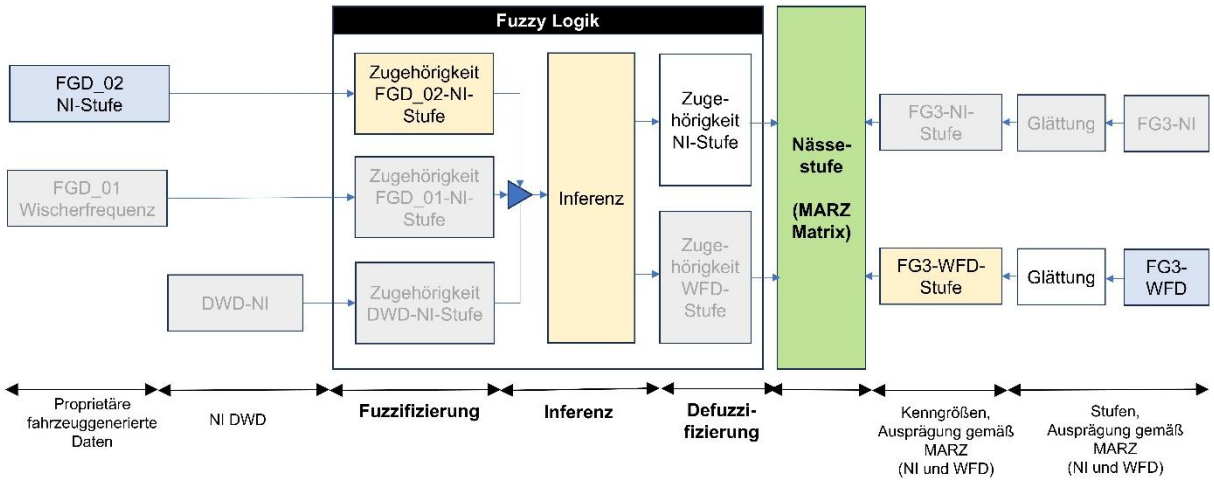

Bild 59: Ablaufschema für Ansatz mit ID 14 (FGD_02 Niederschlagsintensität-Stufe und FG3 Wasserfilmdicke)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Verkehrstechnik“

2026

V 417: Straßenverkehrszählung 2021 – Ergebnisse
Schneider, Pelzer, Dick, Gallus, Lensing
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 418: Entwicklung eines Mess- und Beurteilungsverfahrens zur Bewertung der akustischen Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen
Schulze, Ruhnau, Thies, Hübelt, Putzger
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 419: Sicherheitsuntersuchung an Turbokreisverkehren in Deutschland
Kollascheck, Bärwolff, Schmitz, Geistefeldt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 420: Internationale „Safety Review Tools“ - Wie können die vorliegenden internationalen Erkenntnisse für Deutschland genutzt oder nutzbar gemacht werden?
Schüller, Sütterlin, Spingler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 421: Neue Schulungsunterlagen für Planende und Auditierende
Gerlach, Hasenburg, Bark, Kesting, Leven, Leven
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 422: Entwicklung eines Safety Performance Indicators (SPI) für das Monitoring der Straßeninfrastruktursicherheit
Schüller, Butz, Bärwolff, Medicus
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 423: Nachhaltige Planung und Gestaltung von Meistereigehöften
T. Cypra, S. Cypra, Holldorb, Schmidt, Wieker, Adorff, Staub, Luzaic
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 424: Breite Einführung der FS100-Technologie auf Bundesfernstraßen
Götzfried, Bunoza
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 425: Qualitätssicherung der Beleuchtung bei artenschutzrechtlich gebotener Um- und Nachrüstung
Diakite-Kortlever, Hansen, Rao, Schumacher, Völker
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 426: Akustische Wirkung absorbierender Lärmschutzwälle
Hänisch, Heidebrunn, Köper, Fuchs, Haider
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 427: Fortentwicklung der Grünpflege im Straßenbetriebsdienst unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten
Holldorb, Sorn, Skublics, Ćurčin, Wern, Weiler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 428: Proaktive Sicherheitsbewertung von Ortsdurchfahrten und anderen innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen
Schüller, Butz, Knörr, Bärwolff, Berger
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 429: Entwicklung von Straßenbeleuchtungskonzepten mittels LED-Technik zur Verbesserung der visuellen Wahrnehmung von Radverkehr
Hansen, Schumacher, Völker
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 430: Regionale Analyse des Potenzials zum verkehrsträgerübergreifenden Austausch erneuerbarer Energien
Roloff, Schmitz, Rüther, Frehlich, Gemmer, Mosor, Leprich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 431: Entwicklung eines digitalen Instrumentes zur Erstellung eines bundesweiten Wildunfallscreenings (WILUS)
Kathmann, Hermes, Roggendorf, Haas, Brieger, Deis, Märtz, Strein
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 432: Optimierung von Verhalten, Regelung und baulicher Situation in Kreuzungssituationen zwischen Rad- und motorisiertem Verkehr
Gerlach, Gerlach, Leven, Tix, Schwedler, Sternkopf, Scheid
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 433: Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung von Mautverlagerungen im gesamten Straßennetz
Holthaus, Radant, Leerkamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 434: Methodik zur Auswahl eines neuen H-Messreifens für das CPX-Verfahren
Altreuther, Schreiter, Schubert, Kluth, Schulze, Buscham, Haider
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 435: Erhebung des Abfallaufkommens und Konzepte zur nachhaltigen Vermeidung von Littering an Straßen
Günther, Strues, Wagner, Weier, Bennung, Kloke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 436: Sicherheitswirkung nachgerüsteter Schutzeinrichtungen an Landstraßen im Bestand
Kathmann, Pušica, Wyrich, Saleh, Hula
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 437: Fahrstreifenweise unterschiedliche Stauausbreitung auf Autobahnen
Geistefeldt, Marnach, Schwietering, Löbbering
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 438: Sicherheit und mögliche Einsatzbereiche von „geschützten Kreuzungen“ (Protected Intersections)
Schröter, Gerike, Hantschel, Medicus, Nout, Ooms, van der Griend, Kurz, Köhler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 439: Akustischer Zustand neuer Lärmschutzwände
Thies, Schulze, Helmer, Ruhnau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 440: Verhältnis zwischen Gesamtlänge, Längsneigung und Abstand der Zwischenpodeste von barrierefrei nutzbaren Wegen
Leonhardt, Perlewitz, Schneider, Huemer, Nassereddine, Niemann, Bohmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

V 441: Grundlagen witterungsabhängiger Steuerungskonzepte für Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) auf Basis von fahrzeugbasierten Daten (FCD)
Mayer, Diehl, Großmann, Schwietering, Weinreis, Leonhardt, Leu
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
www.schuenemann-verlag.de
Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-963-5
https://doi.org/10.60850/bericht-v441

www.bast.de