

**Neue Sensorbauarten
für
Straßenwetterstationen**

**Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

bast

Bundesanstalt für Straßenwesen



Neue Sensorbauarten für Straßenwetterstationen

Schlussbericht zum AP F1100.6514016

Horst Badelt

Sandra Eimermacher

Juli 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Wichtige Umfeldparameter für den Winterdienst	6
3	Qualitätsanforderungen und –prüfung – Stand der Technik.....	6
3.1	Qualitätsanforderungen.....	6
3.2	Stand der Technik - Sensorik	6
3.3	Prüfverfahren.....	7
4	Testfeld Umfelddaten BAB A4	8
4.1	Allgemeines	8
4.2	Testfeldaufbau	8
4.2.1	Eingesetzte Sensoren	8
4.2.2	Sensorpositionierung im Testfeld	11
4.2.3	Übertragung und Speicherung der Messdaten	12
4.2.4	Anzeige der Messdaten.....	13
5	Bewertung der Sensoren	16
5.1	Allgemeines	16
5.2	Fahrbahnoberflächentemperatur	18
5.2.1	Definition und eingesetzte Sensoren.....	18
5.2.2	Anforderungen und Tests im Labor/in der Praxis.....	19
5.2.3	Testfeldergebnisse.....	23
5.2.4	Sensorbewertungen.....	33
5.2.5	Entwicklungen zur Prüfung von berührungslos arbeitenden Sensoren.....	33
5.2.6	Zusammenfassung und Empfehlungen zur weiteren Nutzung	36
5.3	Fahrbahnzustand und Wasserfilmdicke	37
5.3.1	Definition, Anforderungen und eingesetzte Sensoren	37
5.3.2	Stand der Prüftechnik	38
5.3.3	Stand der Sensortechnik – Ergebnisse von laborartigen Tests.....	41
5.3.4	Testfeldergebnisse – statistische Betrachtungen	42
5.3.5	Testfeldergebnisse – Sensorbewertungen.....	45

5.3.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	49
5.4	Gefriertemperatur	50
5.4.1	Definition, Nutzungsmöglichkeiten, Anforderungen und eingesetzte Sensoren	50
5.4.2	Prüfverfahren	52
5.4.3	Laborprüfergebnisse	53
5.4.4	Ergebnisse vom Testfeld	53
5.4.5	Zusammenfassung und Bewertung	58
5.5	Taustoffmenge in g/m²	58
5.5.1	Definition, Anforderungen und eingesetzte Sensoren	58
5.5.2	Frühere Testergebnisse.....	59
5.5.3	Ergebnisse vom Testfeld	59
5.5.4	Zusammenfassung	59
5.6	Weitere Angaben für Tausalz auf der Fahrbahn.....	60
5.7	Niederschlag	60
5.7.1	Definition, Anforderungen und eingesetzte Sensoren	60
5.7.2	Prüfverfahren	63
5.7.3	Ergebnisse vom Testfeld – statische Auswertungen	65
5.7.4	Einzelbewertungen (nur Niederschlagsart).....	67
5.7.5	Bewertung und Zusammenfassung	72
5.7.6	Überlegungen für weitere Entwicklungen	74
5.8	Lufttemperatur und Luftfeuchte	75
5.9	Weitere Parameter	76
5.10	Stellungnahmen der Firmen	76
5.10.1	Allgemeines	76
5.10.2	Firmen Luft.....	77
5.10.3	Firma Vaisala	77
5.10.4	Firma Boschung	78
6	Nutzung der Daten für den Winterdienst – Plausibilitätsprüfungen.....	80
7	Zukünftige Sensorpositionierungen – Vorgaben zu Messflächen	81
8	Erfahrungen zu Installation und Wartung	82
8.1	Allgemeines – Installationszeitpunkte	82
8.2	Erfahrungen zur Leistungserbringung	82

8.3	Wartung der Sensoren – Gewährleistungsarbeiten.....	83
8.4	Erfahrungen zum Verschleißverhalten	84
9	Zusammengefasste Empfehlungen/offene Fragestellungen zu den Parametermessungen	84
9.1	Allgemeines	84
9.2	Fahrbahnoberflächentemperatur	84
9.3	Fahrbahnzustand – Wasserfilmdicke.....	85
9.4	Niederschlag	86
9.5	Gefriertemperatur – andere Angaben zu Tausalz auf der Fahrbahn.....	87
9.6	Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit	88
9.7	Sonstige Parameter.....	88
10	Allgemeine Zusammenfassung und Aussicht	88

Anhang 1

Bewertung von Sensoren anhand von Einzelfallbetrachtungen

Anhang 2

Beispiel Leistungsbeschreibung für Sensorbeschaffung

Anhang 3

Stellungnahmen der Firmen zu den Fallbewertungen

Anhang 4

Labortestergebnisse

Anhang 5

Verfahrensvorschläge zur Prüfung von Sensoren für Straßenwetterstationen

1 Einleitung

Der Winterdienst steht heute im Spannungsfeld von Verkehrssicherheit/Kapazitätserhaltung, Kosteneffizienz und Umwelteinwirkungen. Er soll Glätte nicht nur schnell beseitigen, sondern möglichst vermeiden. Deshalb soll er bereits vor dem Eintreten einer Glätte aktiv werden. Die entsprechenden Aktivitäten können nicht durch Kontrollfahrten erledigt werden, da aus einem fahrenden Fahrzeug die Entwicklung der maßgebenden Parameter für eine Glätteentwicklung nur unzureichend beobachtet werden kann. Deshalb müssen die Winterdienstverantwortlichen die erforderlichen Daten zum Beginn und dem weiteren Verlauf einer möglichen Glätte aus anderen Quellen erhalten.

Spezielle Straßenzustands- und Wetterinformationssysteme stehen heute für diese Angaben zur Verfügung. Sie stellen für einen situationsgerechten Winterdienst für eine hohe Verkehrssicherheit bei gleichzeitigem geringen Ressourcenverbrauch und geringer Umwelteinwirkung eine unverzichtbare Voraussetzung dar.

Die Verantwortlichen für den Winterdienst müssen anhand der Straßenzustands- und Wetterinformationssysteme in ihren Bereichen folgende Entscheidungen treffen können:

- Festlegung der Personalbereitschaft (anhand längerfristiger Vorhersagen)
- Festlegung eines Einsatzbeginns
- Festlegung der erforderlichen Streudichte

Der technologisch optimale Einsatzbeginn und die erforderlichen Streudichten können nur auf zeitgenauen Glättevorsagen beruhen. Dies ist insbesondere bei präventiven Einsätzen aufgrund der meist kurzen Liegedauer der eingesetzten Tausalze notwendig.

Wetterdienste liefern heute detaillierte Vorhersagen mit entsprechenden Angaben für kleine Regionen, die in kurzen Zeittakten aktualisiert werden. Eine weitere wichtige Informationsquelle für diese Entscheidungen stellen die Messergebnisse der Sensoren von Straßenwetterstationen dar, die glätte-relevante Parameter an festen Standorten erfassen. Sie stellen zunehmend auch die Grundlage für die Vorhersagen dar. Neben den Ist-Daten sind auch Vorhersagen an diesem Standort von Bedeutung. Von diesen Standortvorhersagen sollen nach dem gegenwärtigen Entwicklungsstand ausgehend wiederum Vorhersagen für anliegende kleinteilige Streckenabschnitte abgeleitet werden [Schedler 2020].

Die Qualität der Entscheidungen hängt damit von der Qualität der Vorhersagen ab und deren Qualität wieder von den Messdaten der Straßenwetterstationen. Die Datenqualität müssen die Straßenbauverwaltungen selber gewährleisten. Die Anforderungen an die Sensorik sind in der Europäischen Norm EN 15518-3 beschrieben. Dazu gibt es einen Europäischen Normentwurf CEN/TS 15518-4 für den Nachweis dieser Anforderungen. Beide Normen enthalten keine Aussagen zu berührungslos arbeitenden Sensoren, die zunehmend auf den Markt kommen.

Zur Sicherstellung der Qualität von Straßenwetterstationen hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur die Bundesanstalt für Straßenwesen mit der Bewertung von neuen Sensoren beauftragt. Dabei sollen bestehende mit neuen Bauarten verglichen und bewertet werden. Deren Bewertung soll Grundlage für die zukünftige Beschaffung von Sensoren in den Straßenbauverwaltungen sein. Dafür sind Bewertungsverfahren für neuartige Sensorbauarten zu entwickeln und die neuen aber auch bereits bestehende Verfahren zu verifizieren.

2 Wichtige Umfeldparameter für den Winterdienst

Wichtigster Parameter ist die Fahrbahnoberflächentemperatur. Erst ein Unterschreiten der 0°C-Grenze lässt eine winterliche Glätte jeglicher Art auf der Fahrbahnoberfläche entstehen.

Die zweite Voraussetzung für die Entstehung von winterlicher Glätte ist das Auftreten einer Feuchte. Je nach Glätteart sind hier unterschiedliche Parameter erforderlich:

- Reifglätte: Taupunkt- und Lufttemperatur
- Eisglätte:
Erkennen einer vorhandenen Wassermenge auf der Fahrbahnoberfläche mit der Angabe eines Fahrbahnzustandes mit verschiedenen Feuchte- und Nässestufen oder besser mit konkreter Wasserfilmdicke
- Glatteis und Schneeglätte:
Niederschlagsart (flüssiger oder fester Niederschlag), Lufttemperatur zur Plausibilisierung der Niederschlagsart, Niederschlagsintensität, Windgeschwindigkeit und –richtung (bei Gefahr von Schneeverwehungen)

Bei allen Einschätzungen von möglichen Glättegefahren sollten auch bereits geleistete Winterdienstarbeiten einbezogen werden. Dabei geht es um die Frage, wie viel Salz von vorherigen Streueinsätzen noch vorhanden ist. Für die Einschätzung der Salzmenge sind die Gefriertemperatur einer vorhandenen Lösung (Temperatur, bei der in einer Salzlösung sich erstes Eis bilden kann) oder eine Angabe der vorhandenen Salzmenge in g/m² hilfreich.

Sofern Glätte nicht vermieden werden konnte, sollte diese als möglicher Fahrbahnzustand auch angezeigt werden.

Weitere mögliche Parameter wie z. B. Wind können ebenfalls hilfreich sein, werden aber in Weiteren nicht behandelt.

3 Qualitätsanforderungen und –prüfung – Stand der Technik

3.1 Qualitätsanforderungen

Die richtige Einschätzung der genannten Parameter setzt eine notwendige Messgenauigkeit durch eingesetzte Sensoren voraus. Die Europäische Norm EN 15518-3 [DIN 2011] gibt entsprechende Anforderungen an die Sensoren für den Einsatz im Winterdienst wieder. Für die Überprüfung der Anforderungen sind entsprechende Verfahren entwickelt worden. Die Verfahren sind teilweise in den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen [BASt 2012] und in der Europäischen Vornorm CEN/TS 15518-4 [DIN 2013] beschrieben.

Derzeit bestehen nur wenige Erfahrungen, ob die nach den genannten Prüfverfahren erzielten Laborergebnisse praxisrelevant sind. Deshalb müssen sie in der Praxis verifiziert werden.

3.2 Stand der Technik - Sensorik

Für die Anwendung des Winterdienstes sind neben vorhandenen BASt-Untersuchungen zu Sensorqualitäten nur ältere dokumentierte Untersuchungen aus anderen Ländern bekannt [Zwahlen et al. 2003, Scharsching 1991]. Sie und eine erste umfangreiche BASt-Untersuchung auf der BAB A10 [Badelt et al. 1996] zeigten, dass es sehr schwierig ist, die Sensoren praxisgerecht zu bewerten. Bei allen genannten Untersuchungen zeigten die Sensoren auf Testfeldern teils sehr unplausible Messwerte oder bei gleichen Parametern größere Differenzen bei gleichen Bedingungen an.

In Folge der Praxisuntersuchung auf der BAB A10 in der ersten Hälfte der 90iger Jahre hat die BAST verschiedene Verfahren zur Sensorbewertung entwickelt [Badelt et. al 2007]. Die Anwendung der Verfahren erfolgte fast ausschließlich im Auftrag der Sensorhersteller. Hier wurden überwiegend in die Fahrbahn einzubauenden Bodensonden für die Parameter „Fahrbahnoberflächentemperatur“, „Wasserfilmdicke“, „Gefriertemperatur“ und „Fahrbahnzustand“ geprüft. Die Ergebnisse waren in einer Reihe von Fällen unbefriedigend. Durch die Beauftragung der Prüfungen durch einen Auftraggeber können diese Ergebnisse von der BAST nicht veröffentlicht werden. Positive Ergebnisse bei den Prüfungen ließen sich häufig nur durch Sondermaßnahmen erzielen, die nicht im Prüfverfahren beschrieben sind und auch nicht den Praxisbedingungen entsprechen.

Ein wesentlicher Nachteil der in der Fahrbahn einzubauenden Sensoren ist, dass sie nicht die zu messenden Parameter der Fahrbahn selber messen sondern die der umgebenden Materialien des Sensorträgers. Seit wenigen Jahren werden neben den in der Fahrbahn zu installierenden Sensoren für die Fahrbahnparameter sogenannte berührungslos arbeitende Sensoren angeboten. Sie sollen den Vorteil bieten, dass für die Installation keine längeren Sperrungen des Verkehrs mehr notwendig sind. Ein weiterer großer Vorteil wäre, dass sie die Fahrbahnparameter direkt an der Fahrbahnoberfläche messen.

Die Vorläuferuntersuchungen auf dem BAST-Testfeld BAB A4 in den Jahren 2012-14 mit den berührungslos arbeitenden Sensoren zeigten erhebliche Differenzen bei verschiedenen Parametern [Melero et al 2014]. Die Untersuchungen beruhten nur aus Vergleichen von etwa zeitgleich erfassten Werten für verschiedene Parameter und einigen wenigen Referenzmessungen bzw. Beobachtungen. Neben den Sensoren für die Fahrbahnparameter standen auch Sensoren für atmosphärische Parameter zur Verfügung.

Erhebliche Differenzen von Messwerten unter gleichen Bedingungen traten insbesondere bei folgenden Parametern auf:

- Fahrbahnoberflächentemperatur (bei berührungslos arbeitenden Sensoren)
- Fahrbahnzustand
- Wasserfilmdicke
- Niederschlagsart
- Niederschlagsintensität

Die bei allen Untersuchungen entstandenen Differenzen bei gleichen Bedingungen würden dazu führen, dass mit diesen Messwerten sehr unterschiedliche Entscheidungen zum Winterdienst getroffen werden könnten. Damit sind die Messwerte für eine eingangs geforderte höhere Effizienz des Winterdienstes nicht hilfreich.

3.3 Prüfverfahren

Die genannten Entwicklungen von Prüfverfahren [Badelt et al. 2007] fanden Eingang in den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen TLS [BAST 2012] und in die CEN/TS 15518-4 [DIN 2013]. Daneben werden in der CEN/TS 15518-4 andere Verfahren beschrieben, deren Entwicklungsweg und Anwendung nicht bekannt ist bzw. die im Rahmen der Normungsarbeit erst mal nur theoretisch entwickelt wurden. Die Verfahren beziehen sich auf in die Fahrbahn eingebaute Sensoren für die Fahrbahnparameter und auf Sensoren atmosphärische Parameter.

Die genannten Laborprüfungen nach CEN/TS 15518-4 und TLS können aus Sicht der BAST teilweise noch nicht für eine umfassenden Bewertung genutzt werden. Die Gründe sind in den Abschnitten zu

den einzelnen Parametern beschrieben. Deshalb ist wichtig, die Testergebnisse dieser Sensoren in Praxis zu verifizieren.

Für die berührungslos arbeitenden Sensoren für die Fahrbahnparameter bestanden bislang keine speziellen Prüfverfahren. Sie werden erst jetzt im Rahmen der Fortschreibung der CEN/TS 15518-4 entwickelt. Dazu ist es zunächst wichtig, die prüfungsrelevanten Aspekte zu finden. Dies kann am besten mit den Erfahrungen zur Arbeitsweise der Sensoren in der Praxis erfolgen.

Für Beurteilungen von Sensoren für den Einsatz in Streckenbeeinflussungsanlagen gab es ein Testfeld auf der BAB A94 bei München. Überwiegend anhand von visuellen Beobachtungen vor Ort und mit Hilfe von Fotos wurde die Qualität der Sensoren bewertet [Haug 2016]. Dabei trat immer wieder die Schwierigkeit auf, dass die Firmen negative Ergebnisse aufgrund der subjektiven Bewertungen nicht anerkennen wollten.

Auf den derzeitigen technischen Stand der Prüfverfahren wird in den weiteren Kapiteln zu den jeweiligen Parametern eingegangen.

4 Testfeld Umfelddaten BAB A4

4.1 Allgemeines

Das Testfeld Umfelddaten BAB A4 steht seit 2012 zur Verfügung. Zuvor gab es verschiedenen Überlegungen zur Nutzung dieses vorhandenen Standortes. Die vorliegenden Bedingungen mit einer begründeten Schallschutzwand entsprechen Verhältnissen, die häufiger an Standorten von Straßenwetterstationen in ähnlicher Form anzutreffen ist. Die Oberfläche der Fahrbahn ist in den beiden Fahrstreifen aufgrund der längeren Liegezeit und verschiedenen Belastungen unterschiedlich. Sie stellen allerdings keine Sonderbauarten dar. In Bezug auf eine mögliche unterschiedliche Beschattung der Fahrbahn ist die vorhandene Fahrbahnausrichtung von Ost nach West die beste Option, da die hochstehende Sonne keine Schatten der Masten wirft. Bei einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke von rund 37.000 Fahrzeugen und einem Schwerverkehrsanteil unter 10% stellt der Standort ebenfalls keine Besonderheit in Bezug auf den Verkehr dar.

Für den Testfeldeinsatz hat die BAST bis zum zweiten Halbjahr 2016 verschiedene Sensoren zu Beurteilungszwecken beschafft. Die Beschaffungen dienten hauptsächlich der Betrachtung der Arbeitsweise von berührungslos arbeitenden Sensoren und Bodensonden für Parameter der Fahrbahn sowie von Sensoren für die Niederschlagsart und -intensität. Sensoren für weitere Parameter dienten dagegen mehr der Dokumentation der Testbedingungen.

4.2 Testfeldaufbau

4.2.1 Eingesetzte Sensoren

Im Rahmen der Planungen der Testfeldinstallationen fand eine Marktübersicht statt. Dabei wurden zunächst nur Sensoren betrachtet, die in Deutschland angeboten werden. Schwerpunkt waren Sensoren, die nach den Überlegungen im Abschnitt 2 die wichtigen Parameter für den Winterdienst messen:

- Fahrbahnoberflächentemperatur
- Fahrbahnzustand
- Taupunkttemperatur mit Lufttemperatur und relative Luftfeuchte
- Niederschlagsart
- Gefriertemperatur/ Taustoffmenge je m²

Gleichzeitig wurden auch Fragestellungen zur Qualität von Sensoren betrachtet, die vorrangig für die Schaltung von Streckenbeeinflussungsanlagen benötigt werden. Hier kommen die Parameter Wasserdampfdicke und Niederschlagsintensität hinzu.

Für die Testfeldinstallationen hat die BAST folgende Firmen um Angebote gebeten (die Angaben in Klammern sind die Kurzbezeichnungen im weiteren Text):

- Boschung Mechatronic GmbH (Boschung)
- MickS GmbH (heute Lufft GmbH, im Text wird der Name Lufft verwendet, in Tabellen und Diagrammen wird der Name MickS genutzt)
- Vaisala GmbH (Vaisala)
- Thies GmbH (Thies)

Sensoren für weitere Parameter wurden von den genannten Sensorherstellern angeboten. Dabei handelt es sich zum einen um ältere aber heute weniger gebräuchlichen Parameter, die noch von den Sensorbaugruppen mit ausgegeben werden:

- Restsalz
- Fahrbahnzustand nach TLS DE-Typ FG 70

Zum anderen sind es neue Parameter, die nach Vorstellungen der Sensorhersteller einen möglichen Vorteil für die Winterdienststeuerung bringen sollen:

- Schneefilmdicke
- Eisprozent
- Eisfilmdicke
- Kraftschluss
- Taustoffkonzentration

Weitere Parameter werden in erster Linie dafür gemessen, um die Umfeldbedingungen für die zuvor genannten Parameter bei deren Bewertungen besser einschätzen zu können:

- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit - Mittel der letzten 10 min
- Windspitze in den letzten 10 min
- Luftdruck
- Sichtweite
- Tiefentemperatur ca. 5 cm unter der Fahrbahnoberfläche
- Tiefentemperatur 30 cm unter der Fahrbahnoberfläche

Als weitere Einflussgrößen für die Bewertung der Einflüsse auf Umfeldparameter wurden folgende Verkehrsdaten erfasst:

- Anzahl der PKW je Fahrstreifen
- Anzahl der LKW je Fahrstreifen
- Durchschnittsgeschwindigkeit der PKW je Fahrstreifen
- Durchschnittsgeschwindigkeit der LKW je Fahrstreifen

Die Sensorik für die Verkehrsdatenerfassung war auf dem Testfeld bereits vorhanden (Messung mit Induktionsschleifen).

Gemäß der Leistungsbeschreibung sollten alle Sensoren für die genannten Parameter die Messgenauigkeit gemäß der EN 15518-3 oder, wenn dort nicht vorhanden, gemäß der TLS erfüllen. Eine Ausnahme besteht bei dem Parameter Eisprozent, der bislang in beiden Regelwerken nicht beschrieben ist.

In der Tabelle 1 sind alle für dieses Projekt gemessenen Parameter mit den dabei eingesetzten Sensoren zusammengefasst aufgeführt.

Parametername	Sensorhersteller Sensortyp Abkürzung Parameter nach TLS	TLS DE-Typ	Einheiten oder Inhalte
Fahrbahnoberflächentemperatur	Boschung_IT-Sens-1_FTB	49	°C
	Boschung_IT-Sens-2_FTB		
	Boschung_RCO_FTB		
	MickS_ARS31-1_FTB		
	MickS_IRS31-1_FTB		
	MickS_NIRS31-1_FTB		
	MickS_NIRS31-2_FTB		
	Vaisala_DRS511-1_FTB		
Vaisala_DST111_FTB			
Gefriertemperatur	Boschung_Arctis-1_GT	65	°C
	Boschung_Arctis-2_GT		
	Boschung_IT-Sens-1_GT		
	Boschung_IT-Sens-2_GT		
	MickS_IRS31-1_GT		
	MickS_ARS31-1_GT		
	MickS_NIRS31-1_GT		
	MickS_NIRS31-2_GT		
Vaisala_DRS511-1_GT			
Fahrbahnzustand nach EN 15518-3	Boschung_IT-Sens-1_FZW	79	Codiert nach TLS DE-Typ 79 0=trocken, 16=feucht, 32=nass, 48=extrem nass, 64=glatt nach DIN EN 15518-3
	Boschung_IT-Sens-2_FZW		
	Boschung_RCO_FZW		
	MickS_IRS31-1_FZW		
	MickS_NIRS31-1_FZW		
	MickS_NIRS31-2_FZW		
	Vaisala_DRS511-1_FZW		
Vaisala_DSC111_FZW			
Niederschlagsart	Boschung_NI-SH_NS	71	Codiert nach WMO Code 4680
	Boschung_PWS_NS		
	MickS_WS600_NS		
	Thies_LNM_NS		
	Vaisala_PWD12_NS		
Niederschlagsintensität	Boschung_PWS_NI	53	mm/h
	MickS_WS600_NI		
	Thies_LNM_NI		
	Vaisala_PWD12_NI		
Wasserfilmdicke	Boschung_IT-Sens-1_WFD	72	mm
	Boschung_IT-Sens-2_WFD		
	Boschung_RCO_WFD		
	MickS_IRS31-1_WFD		
	MickS_NIRS31-1_WFD		
	MickS_NIRS31-2_WFD		
	Vaisala_DRS511-1_WFD		
Vaisala_DSC111_WFD			
relative Luftfeuchte	MickS_WS600_RLF	55	%
	Vaisala_HMP155_RLF		
Taupunkttemperatur	MickS_WS600_TPT	66	°C
	Vaisala_HMP155_TPT		
Lufttemperatur	MickS_WS600_LT	48	°C
	Vaisala_HMP155_LT		
Kraftschluss (Griffigkeit)	Boschung_RCO_GR	77	dimensionslos zwischen 0 und 1
	MickS_IRS31-1_GR		
	MickS_NIRS31-1_GR		
	MickS_NIRS31-2_GR		
	Vaisala_DSC111_GR		
Restsalz	MickS_ARS31-1_RS	52	% (wird derzeit nicht bewertet)
	MickS_IRS31-1_RS		
	MickS_NIRS31-1_RS		
	MickS_NIRS31-2_RS		
	Vaisala_DRS511-1_RS		
Taustoffkonzentration	MickS_IRS31-1_TSK	73	%
Taustoffmenge je m ²	MickS_IRS31-1_TSQ	74	g/m ²
	Vaisala_DRS511-1_TSQ		
Eisprozent	MickS_IRS31-1_EP	nicht in TLS definiert	%
	MickS_NIRS31-1_EP		
	MickS_NIRS31-2_EP		
Fahrbahnzustand	MickS_IRS31-1_FBZ	70	Codierung nach TLS DE-Typ 70 (wird derzeit nicht bewertet)
	MickS_NIRS31-1_FBZ		
	MickS_NIRS31-2_FBZ		
	Vaisala_DSC111_FBZ		
Schneefilmdicke	MickS_IRS31-1_SFD	75	mm
	MickS_NIRS31-1_SFD		
	MickS_NIRS31-2_SFD		
	Vaisala_DSC111_SFD		

Eisfilmdicke	MickS_IRS31-1_EFD	76	mm
	MickS_NIRS31-1_EFD		
	MickS_NIRS31-2_EFD		
	Vaisala_DSC111_EFD		
Windrichtung	MickS_WS600_WR	56	°
Windgeschwindigkeit mittel letzten 10 min	MickS_WS600_WGM	57	m/s
Windgeschwindigkeit Spitze in den letzten 10 min	MickS_WS600_WGS	64	m/s
Tiefentemperatur gemessen in der Sonde ca. 5-7 cm	MickS_IRS31-1_TT1	67	°C
	Vaisala_DRS511-1_TT1		
Tiefentemperatur in 30cm	MickS_IRS31-1_TT3	69	°C in der Fahrbahn-Mitte zweiter Fahrstreifen
	Vaisala_UT_TT3		am Mastfundement
Luftdruck	MickS_WS600_LD	54	hPa
Sichtweite	Thies_LNM_SW	60	m
	Vaisala_PWD12_SW		

Tabelle 1: Übersicht der gemessenen Parameter und Sensoren auf dem Testfeld BAB A4 (Oktober 2016 bis März 2018)

Während der Projektlaufzeit haben die Hersteller am 8. Dezember 2017 Sensoren ausgetauscht bzw. zusätzlich installiert (siehe Abschnitt 5).

4.2.2 Sensorpositionierung im Testfeld

Die Sensoren für die atmosphärischen Parameter sind an Masten am Fahrbahnrand montiert (Bild 1). Alle Bodensonden sind in der Mitte des linken Fahrstreifens eingebaut. Dies entspricht den bisherigen Empfehlungen für das Arbeiten mit den Daten für den Winterdienst. Die Position stellt ein Kompromiss dar, um alle Parameter der Bodensonden sinnvoll nutzen zu können [Badelt 1996]. Die gleiche Positionierung wird aktuell für die Anwendung in der Verkehrstelematik empfohlen [FGSV, 2017]. Eine Baugruppe von berührungslos arbeitenden Sensoren ist ausgehend von einem Mast am linken Fahrbahnrand auf den gleichen Querschnitt wie die Bodensonden ausgerichtet.

Drei Baugruppen mit berührungslos arbeitenden Sensoren für die Fahrbahnparameter sind von Masten am rechten Fahrbahnrand auf die Mitte des rechten Fahrstreifens ausgerichtet. Eine Ausrichtung auf den linken Fahrstreifen war aufgrund der Einschränkung bei den Messwinkeln zur Fahrbahn nicht möglich. Zwei Sensoren wurden für das Erreichen der Mitte des rechten Fahrstreifens in einer Höhe von 4 m montiert. Ein Sensor (NIRS31) benötigte für diese Messflächenpositionierung eine Höhe von ca. 6 m.

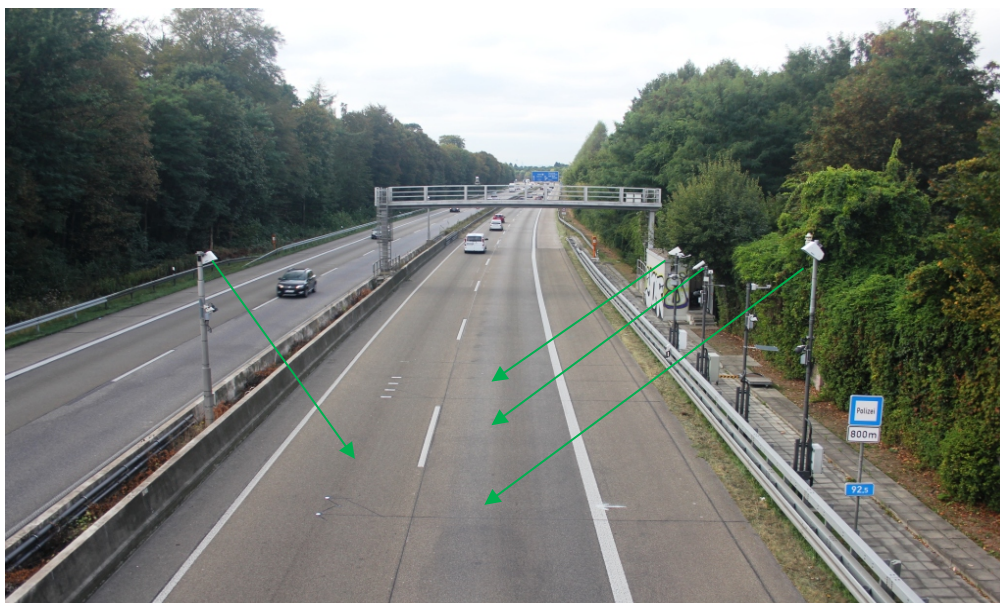


Bild 1: BAST-Testfeld für Umfelddaten an der A4 (Pfeile weisen auf die Mittelpunkte der Messflächen der berührungslos arbeitenden Sensoren)

Im Bild 2 sind die Installationslagen für die Sensoren bzw. die Messflächen für die berührungslos arbeitenden Sensoren in schematischer Form aufgeführt. Weitere Informationen sind in den Abschnitten zu den Sensorbewertungen enthalten.

Neben den Sensoren sind fünf Fotokameras und vier Videokameras zur visuellen Beobachtung der Testfeldbedingungen installiert.

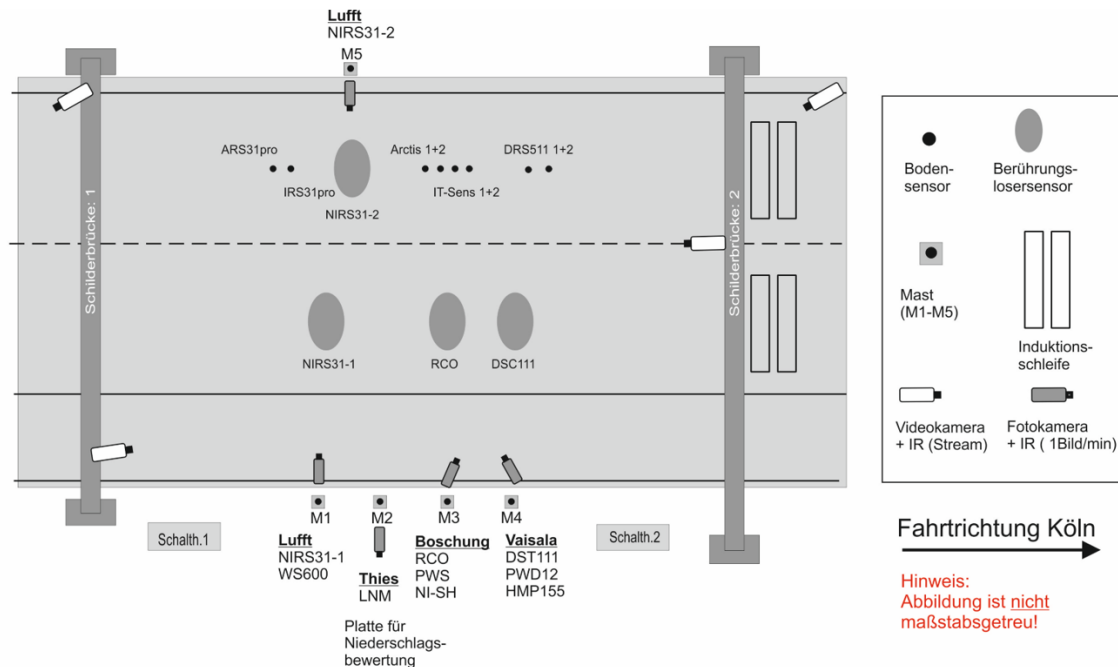


Bild 2: schematische Testfelddarstellung mit Lageangaben zu den Sensoren mit Typenbezeichnung

4.2.3 Übertragung und Speicherung der Messdaten

Das Datenformat für die Datenübertragung inklusive der Messwertauflösung war gemäß TLS gefordert. Für Datenübertragung war mit Beginn dieser Testphase die Einhaltung der TLS-Anforderungen vorgegeben. Für die Datenübertragung und -speicherung ist für das Testfeld zu den Umfelddaten und das formell parallel vorhandene Prüffeld für Sensoren zur Verkehrserfassung ein autarkes Netzwerk entstanden (Bild 3).

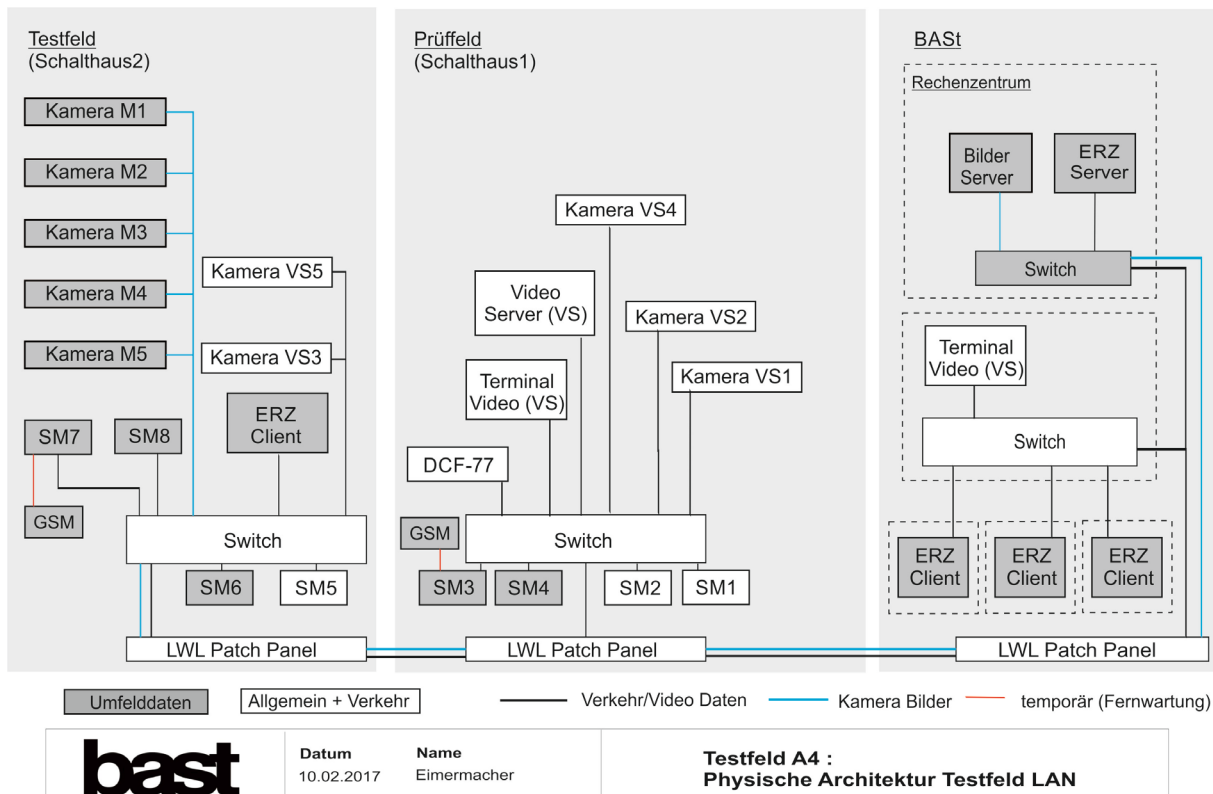


Bild 3: Netzwerkplan für Testfeld Umfelddaten und Prüffeld Verkehrserfassung (Positionen in grau hinterlegten Feldern sind für das hier beschriebene Projekt genutzt worden)

Für die Datenspeicherung wurden Softwaremodule nach den Vorgaben des NERZ e.V. in angepasster Form genutzt. Die Speicherung aller Messdaten erfolgte auf einem Datenserver. Die Fotos der eingesetzten Kameras gingen auf einem weiteren Server (Bildserver). Die Daten jedes Parameters und die Fotos der fünf Kameras wurde jede Minute einmal gespeichert.

Im Netzwerk waren auch Videokameras mit einem eigenen Datenspeicher vorhanden, die aber für die Bewertung der Umfelddatensensoren nicht zum Einsatz kamen. Ihr Einsatz erfolgt hauptsächlich bei der Prüfung der Verkehrserfassungssensoren.

Innerhalb des Netzwerkes befand sich eine Funkuhr, mit der sich alle Komponenten zeitmäßig synchronisieren mussten.

4.2.4 Anzeige der Messdaten

Für die Anzeige der Messdaten war eine speziell erstellte Software im Einsatz. Sie wurde nach Grundsätzen des NERZ e.V. entwickelt und steht für vergleichbare Einsätze zur Verfügung. Sie enthält verschiedene Darstellungen. Eine Darstellung lässt eine online-Datenübersicht zu (Bild 4). Sie dient in erster Linie der Überprüfung der aktuellen Arbeitsfähigkeit aller Sensoren. In der Darstellung sind auch die aktuellen Fotos eingefügt. Da sie in dieser Darstellung sehr klein sind, lassen sie sich in einer weiteren wählbaren Darstellung in einem größeren Format betrachten (Bild 5). Für größere Bildformate können weniger Fotos gewählt werden.

The screenshot displays the 'bast' software interface. On the left, there is a sidebar with a tree view under 'Auswahl' containing various sensor categories like 'Beschreibung', 'Referenz', 'Thies', 'Vaisala', 'Verkehr-MQ1', etc. The main area shows a data table for '19.04.2018 15:11 (letzte Aktualisierung)'. The table has columns for 'Sensor/Wert', 'Beschreibung', 'Mucos', 'Referenz', 'Thies', 'Vaisala', and 'Verkehr-MQ1'. Below the table, there are five camera feeds labeled 'Kamera_1' through 'Kamera_5', each showing a different view of a road or street scene.

Sensor/Wert	Beschreibung	Mucos	Referenz	Thies	Vaisala	Verkehr-MQ1
FST (°C)	40,5	41,4	---	---	41,5	---
FST (°C)	39,9	39,1	---	---	41,3	---
FST (°C)	37,6	35,0	---	---	37,7	---
FST (°C)	---	24,7	---	---	---	---
FST (°C)	---	keine Daten	---	---	---	---
GT (°C)	keine Daten	0,0	---	---	0,0	---
GT (°C)	nicht ermittelt...	keine Daten	---	---	0,0	---
GT (°C)	---	0,0	---	---	---	---
GT (°C)	---	0,0	---	---	---	---
FW ()	(0) trocken	(0) trocken	---	---	(0) trocken	---
FW ()	(0) trocken	(0) trocken	---	---	(0) trocken	---
FW ()	(0) trocken	(0) trocken	---	---	(0) trocken	---
FW ()	(0) trocken	keine Daten	---	---	---	---
FW ()	(0) trocken	---	---	---	---	---
NS ()	(0) kein NS	keine Daten	---	(0) kein NS	(0) kein NS	---
NS ()	(0) kein NS	(0) kein NS	---	---	---	---
NI (mm/h)	0,0	0,0	---	0,0	0,0	---
NI (mm/h)	---	0,0	---	---	---	---
WFD (mm)	0,00	0,00	---	---	0,00	---
WFD (mm)	0,00	0,00	---	---	0,00	---
WFD (mm)	0,00	0,00	---	---	0,00	---
WFD (mm)	---	keine Daten	---	---	---	---
SLF (%)	keine Daten	keine Daten	---	---	19	---
SLF (%)	---	21	keine Daten	---	---	---
TPT (°C)	keine Daten	keine Daten	---	---	0,6	---
TPT (°C)	---	4,3	keine Daten	---	---	---
LT (°C)	keine Daten	28,4	keine Daten	---	29,9	---
LT (°C)	---	---	keine Daten	---	---	---
GR ()	0,70	0,82	---	---	---	---
GR ()	---	0,82	---	---	---	---
GR ()	---	0,82	---	---	---	---
GR ()	---	0,82	---	---	---	---
GR ()	---	keine Daten	---	---	---	---
RS (%)	---	nicht ermittelt...	---	---	0	---

Bild 4: Softwareoberfläche für die online-Betrachtung der Daten und Fotos

The screenshot displays the 'bast' software interface in a different view. The left sidebar shows a tree view under 'Kameras' with options for Kamera_1 through Kamera_6. The main area shows five camera feeds labeled 'Kamera_1' through 'Kamera_5', each showing a different view of a road or street scene. The interface includes a 'bast' logo and an 'inovat' logo at the bottom.

Bild 5: Softwareoberfläche für die online-Betrachtung der Fotos

Für eine nachträgliche Betrachtung der Werte gibt es eine sogenannte Archivdarstellung (Bild 6).

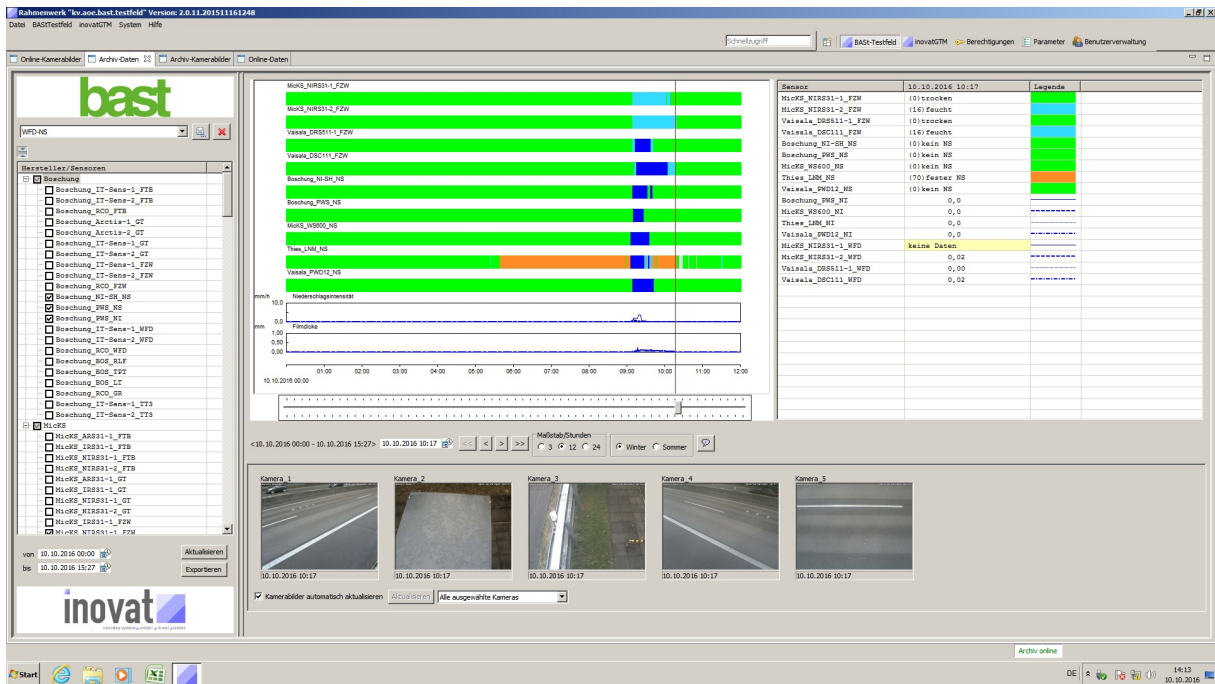


Bild 6: Softwareoberfläche für die Betrachtung von Archivdaten

In einem Verzeichnisbaum können die zu betrachtenden Parameter frei gewählt werden. Ein Diagrammfeld zeigt die gewählten Werte mit verschiedenen Diagrammen an. Dabei kann je nach Betrachtungsaufgabe zwischen Zeitspannen von 3, 12 oder 24 Stunden gewählt werden. Innerhalb des Diagramms kann mit dem Cursor ein Zeitpunkt gewählt werden. Für diesen Zeitpunkt werden die Messdaten tabellarisch und die zeitgleich aufgenommenen Fotos der fünf installierten Kameras angezeigt. Somit lassen sich die Situationen in bestimmten Grenzen nachträglich qualitativ beurteilen.

Zur besseren nachträglichen Betrachtung gibt es eine weitere Softwareoberfläche auf der die Fotos in einem größeren Format angesehen werden können. Weiterhin ist eine Betrachtung von Fotos in auswählbaren Zeiträumen in einem Schnelldurchgang möglich. Das ist für die nachträgliche Suche von interessanten Situationen sehr hilfreich (Bild 7).

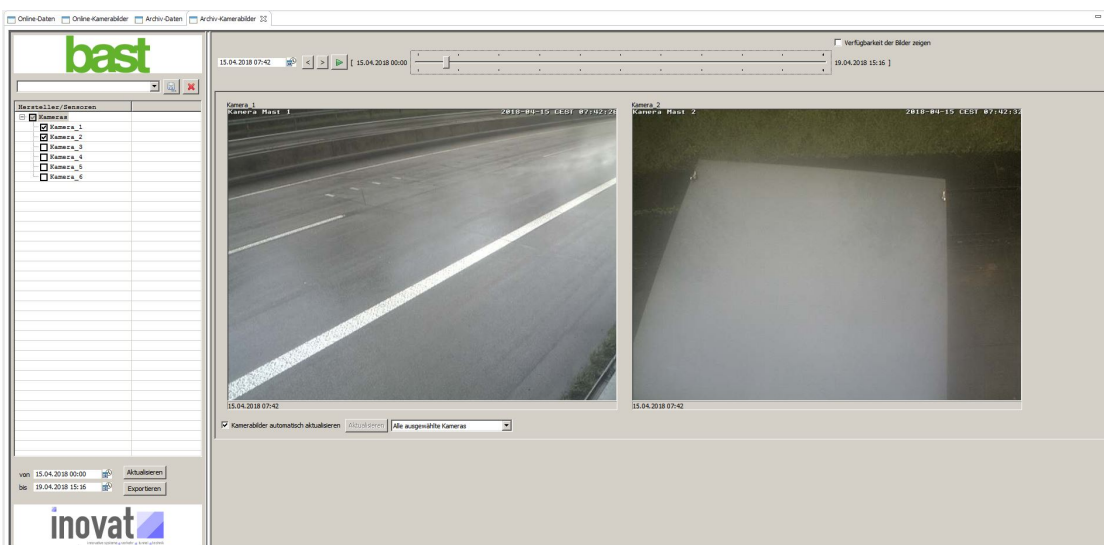


Bild 7: Softwareoberfläche für die Betrachtung von Archivfotos

Die Software hat sich für die Beurteilung sehr bewährt und kann für die Überprüfung von Straßenwetterstationen in einem Verantwortungsbereich empfohlen werden.

5 Bewertung der Sensoren

5.1 Allgemeines

Die Bewertung der verschiedenen Sensoren erfolgte im Rahmen des Projektes teilweise im Labor und auf dem Testfeld. Im Labor kamen weitgehend die bekannten in der CEN/TS 15518-4 sowie den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) beschriebene Prüfverfahren zum Einsatz.

Durch den Testfeldaufbau wird davon ausgegangen, dass für die verschiedene Sensorgruppen gleiche Bedingungen herrschen. Unterschieden wird bei den Parametern für die Fahrbahn zwischen den Zuständen auf dem linken und rechten Fahrstreifen. Hier werden verkehrs- und winterdienstbedingt keine vergleichbaren Bedingungen angenommen. Sonderfälle können durch Staus entstehen. Diese lassen sich aber anhand der Verkehrsdaten und Fotos erkennen.

Anhand der gleichartigen Bedingungen lassen sich zunächst Qualitätseinschätzungen der Sensoren bei einzelnen Parametern anhand von statistischen Vergleichen ableiten. Dabei werden die Häufigkeiten von qualitativen Anzeigen ermittelt. Bei numerischen Angaben können deren Häufigkeiten in definierten Wertebereichen bzw. Häufigkeit von Spannweiten für Sensorangaben in gleichen Zeiträumen betrachtet werden. Weitere Aussagen lassen sich aus Regressionsbetrachtungen ableiten. Bei hohen Bestimmtheitsmaßen in den Regressionen oder gleichartigen Häufigkeiten kann eher auf eine gleiche Qualität aller Sensoren ausgegangen werden. Einzelnen Referenzmessungen reichen dann, um die zu betrachteten Sensoren als anforderungsgerecht zu bewerten.

Große Unterschiede bei Häufigkeitsverteilungen bzw. Regressionen weisen darauf hin, dass die Anforderungen nicht von allen Sensoren gleich erfüllt sein können. Hier müssen weitergehende Untersuchungen für die Bewertung der einzelnen Sensoren erfolgen.

Erste statische Aussagen der Messdaten fanden für den Januar 2017 statt. Aufgrund vieler Differenzen bei verschiedenen Parametern fanden am 8. Dezember 2017 umfangreiche Wartungs-, Kalibrier- oder Austauscharbeiten der Firmen Boschung, Lufft und Vaisala statt. Danach gab es weitere Analysen, deren betrachteter Zeitraum am 09. Dezember 2017 beginnt und am 31. März 2018 endet.

Am 08.12.2017 haben die Hersteller folgende Sensoren ausgetauscht bzw. als nicht mehr richtig arbeitend gemeldet und aus der Datenübertragung herausgenommen.

Lufft:

- Austausch IRS31pro

Gleichzeitig hat der Hersteller die Ableitung des Fahrbahnzustandes im IRS31pro softwaremäßig umgestellt. Statt der Gefriertemperatur der IRS31pro-Sonde selber nutzt der Sensor den Wert der Gefriertemperatur des ARS31pro für die Ableitung. Die Gefriertemperatur des IRS31pro wird ab diesem Zeitpunkt nicht mehr angezeigt.

Vaisala

- Austausch PWD12
- Der zuerst installierte DRS511 wurde von der Firma Vaisala nach dem Winter 2016/17 als defekt erklärt. Dafür hat die Firma neben dem vorhandenen DRS511 im gleichen Fahrbahnquerschnitt zwei baugleiche Sensoren eingebracht. Die Daten eines neuen DRS511 standen sofort, die Daten des zweiten DRS511 erst ab dem 16. März 2018, in der Datenbank zur Verfügung. Daher erfolgt für den zweiten Sensor keine umfassende Auswertung.

Boschung:

Eine ARCTIS-Sonde wurde aufgrund von Feuchtigkeitsschäden für defekt erklärt. Der Sensor hat ab dem 08.12.2017 keine Daten mehr geliefert. Ein Austausch erfolgte nicht.

Bei statistischen Aussagen zu einzelnen Sensoren ist darauf zu achten, dass sie durch eine hohe Zahl von Einzelfällen belegt werden können. Im betrachteten Zeitraum im Winter 2017/18 gab es nur sehr geringe Ausfallzeiten. Sie sind überwiegend durch Wartungsarbeiten an den Anlagen selber oder an der sonstigen Testfeldtechnik entstanden. Sie haben in keinem Fall etwas mit der Arbeitsweise der Anlagen der Hersteller selber zu tun. Die Datenverfügbarkeit liegt bei über 99%. Geringe Unterschiede von Station zu Station können bei den statistischen Auswertungen vernachlässigt werden. Mehr Aussagen zur Zuverlässigkeit der Sensoren enthält Abschnitt 8.4.

Für Einzelbetrachtungen von Sensorwerten dienen Diagramme für kürzere Zeiträume. Sie werden für die direkte Bewertung von Sensoren in sogenannten Bewertungsfällen genutzt (siehe Anhang 1). Zur besseren Übersichtlichkeit werden mehrerer Diagramme erstellt. Dabei werden verschiedene zu beurteilende Parameter von Sensoren einer Firma zusammengefasst. Für die jeweiligen Firmen sind unterschiedliche Diagramme entstanden. Der Grund liegt in der sehr unterschiedlichen Anzahl der Sensoren in den von den Firmen nach BAST-Wunsch gelieferten Straßenwetterstationen.

Eine Besonderheit stellt der Sensor LNM der Firma Thies für die Niederschlagsart dar. Für ihn gibt es keine Einzeldiagramme. Aufgrund der meist positiven Beurteilung im Winter 2016/17 stellte er eine Art Referenz für die Niederschlagsart gemäß CEN/TS 15518-4 dar. Er ist daher bei den Diagrammen zum Niederschlag bei jeder Firmenstation enthalten und aber erhielt für den Winter 2017/18 eine neue Beurteilung. Er kann als genaue Referenz für die Angaben der Niederschlagsart genutzt werden.

Auf dem Testfeld selber fanden nur sehr wenige Referenzmessungen statt. Die Gründe werden in den folgenden Kapiteln beschrieben. Zur Bewertung werden überwiegend die vorliegenden Fotos herangezogen. Weitgehend direkte Bewertungen sind für die qualitativen Parameter „Niederschlagsart“ und „Fahrbahnzustand“ gemäß den Anforderungen der EN 15518-3 möglich. Die numerischen Fahrbahnparameter und die Niederschlagsintensität können nur über die Plausibilität der Werte untereinander beurteilt werden. Damit soll die mögliche Nutzung der quantitativen Angaben betrachtet werden. Im Ergebnis können ebenfalls Aussagen zur Qualität der Sensoren bzw. deren Nutzen abgeleitet werden. Als zusätzliche Parameter für die Bewertungen werden Taupunkt- und Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit einbezogen. Sie stammen vom Sensor HMP155 der Firma Vaisala bzw. Sensor WS600 der Firma Lufft (Windgeschwindigkeit).

Plausibilitäten können in nachfolgend beschriebenen Situationen beurteilt werden:

- Vergleich Fahrbahnzustand mit Fahrbahnoberflächen-/Gefriertemperatur: Fehlende Plausibilität besteht z. B.: Es wird glatt als Fahrbahnzustand angegeben und die Gefriertemperatur ist deutlich unter der Fahrbahnoberflächentemperatur
- Vergleich Gefriertemperatur mit Wasserfilmdicke/Niederschlagsintensität: Fehlende Plausibilität besteht z. B., wenn höhere Änderungen bei der Gefriertemperatur auftreten, ohne dass eine Niederschlagsintensität vorhanden ist oder die Wasserfilmdicke sich um höhere Werte ändern. Dies gilt nicht unmittelbar nach Streueinsätzen, da sich ausgebrachte Salzkörner erst auflösen müssen.
- Vergleich Niederschlag mit Fahrbahnzustand: Fehlende Plausibilität besteht, wenn ein längerer Niederschlag mit höherer Intensität aufgetreten ist und der Fahrbahnzustand wird trocken gemeldet, oder es gibt umgekehrt eine zunehmend nasse Fahrbahn ohne Niederschlag.

Treten beim Vergleich von zwei Messwerten Unplausibilitäten auf, müssen zunächst beide Messwerte als unsicher betrachtet werden. Eine Einschätzung welcher Parameter nicht richtig ist, kann nur über die Fotos versucht werden. Wenn eine sichere Einschätzung nicht möglich ist, gibt es keine Aussagen.

Für die Bewertung wurden konkret 15 Situationen (Bewertungsfälle) im Winter 2017/18 betrachtet. Die Situationen zeichnen sich durch einen längeren Niederschlag (mindestens eine Stunde) aus. Es wurden alle Fälle mit Schneefall und einige Niederschlagsereignisse bei Temperaturen etwas über 0°C einbezogen. Reif- oder Eisglättesituationen konnte nicht erkannt werden. Die Beschreibung der Situationen inklusive der Sensorbewertungen enthält der Anhang 1. Dort sind weitere Hinweise zur Bewertung aufgeführt.

5.2 Fahrbahnoberflächentemperatur

5.2.1 Definition und eingesetzte Sensoren

Als Fahrbahnoberflächentemperatur wird im theoretischen Sinne die Temperatur der unendlich dünnen Grenzschicht zwischen der Fahrbahnoberfläche und der darüber liegenden Luft betrachtet. Da diese Grenzschicht keine Energie aufnehmen kann, muss nach dem Gesetz der Erhaltung der Energie für jede Zeiteinheit die Summe der zu- und abgeführten Energie gleich null sein. In der Literatur wird für die Erdoberfläche nachfolgende Gleichung angegeben, die die verschiedenen Einflüsse auf eine Oberflächentemperatur widerspiegelt:

$$S + B + L + V = 0 \text{ [Geiger, 1950]}$$

- S = Strahlungsbilanz (Differenz aus aufgenommener kurzwelliger Globalstrahlung [Sonnenstrahlung] und abgegebener langwelliger terrestrischer Strahlung)
- B = Bodenwärmestrom (Energietransport in der Fahrbahnkonstruktion von und zur Fahrbahnoberfläche durch molekulare Wärmeleitung)
- L = Wärmeaustausch zwischen Fahrbahnoberfläche und Luft (Reibung der Luft an der Fahrbahnoberfläche und Konvektion)
- V = Verdunstungswärme beim Abtrocknen der Fahrbahnfeuchte

Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur werden in zwei Bauarten unterschieden: Zu einem gibt es die Kontaktsensoren, die zusammen mit anderen Sensoren in den sogenannten Bodensonden eingebaut sind. Eine zweite angebotene Bauart sind Infrarotthermometer, die berührungslos von Masten am Fahrbahnrand oder von Brücken die Fahrbahnoberflächentemperatur messen können.

Die Fahrbahnoberflächentemperatur messen auf dem Testfeld folgende sechs Bodensonden:

- 2x IT-Sens der Firma Boschung
- IRS31pro der Firma Lufft
- ARS31pro der Firma Lufft
- 2x DRS511 der Firma Vaisala (Angaben eines DRS511 erst ab dem 16. März 2018)

Alle Bodensonden sind in der Mitte des linken Fahrstreifens einbaut.

Folgende vier Sensoren messen die Fahrbahnoberflächentemperatur berührungslos:

- 2x NIRS31 der Firma Lufft
- RCO der Firma Boschung
- DST111 der Firma Vaisala

Je ein Infrarotsensor der genannten Typen misst auf dem rechten Fahrstreifen. Ein Sensor vom Typ NIRS31 (Testfeldbezeichnung NIRS31-1) misst im rechten Fahrstreifen. Der NIRS31 im linken Fahrstreifen besitzt die Testfeldbezeichnung NIRS31-2.

Die Messflächen bei den Infrarotthermometern im Testfeld sind soweit bekannt unterschiedlich. Der Messfläche beträgt bei dem NIRS31 nur rund 20 cm Durchmesser. Vaisala gibt für den DST111 eine größere Messfläche mit über 50 cm Durchmesser an. Vom RCO ist keine Messflächengröße bekannt. Die Messflächenangaben variieren je nach Abstand zur Fahrbahnoberfläche.

Weitere Angaben zur Positionierung sind im Abschnitt 4.2.2 enthalten.

5.2.2 Anforderungen und Tests im Labor/in der Praxis

In Bezug auf die Genauigkeit für die Nutzung im Winterdienst muss jedem Winterdiensthandelnden bewusst sein, dass hier ein sehr genau definierter physikalischer Prozess beurteilt werden muss. Das Gefrieren kann bei exakt 0°C beginnen und umgekehrt steigt die Temperatur des Wassers erst wieder über 0°C, wenn die letzte Umwandlung von Eis zu flüssigem Wasser abgeschlossen ist.

Da meist nur kleine Wassermengen vorhanden sind, kann die Fahrbahnoberflächentemperatur weitgehend gleich der Wasser- bzw. Eistemperatur gesetzt werden. Größere Differenzen zwischen beiden Temperaturen kann es bei Niederschlag und Schneebedeckung geben. Letzteres kann besonders bei den berührungslos arbeitenden Sensoren auftreten [Badelt et al. 2006].

Nach der DIN EN 15518-3 sollen die Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur eine Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ\text{C}$ erfüllen. Gemäß der CEN/TS 15518-4 erfolgt diese Prüfung für die Bodensonden in einem Flüssigkeitsbad. Die eigentlichen Sensoren in den Bodensonden erfüllten diese Anforderung bei dieser Prüfungsmethode ohne Probleme. Bei einem Vergleichstest in einem Wasserbad (Bild 8) von drei im Testfeld eingebauten Sensortypen betrug die Differenz untereinander und zusätzlich einem Referenzthermometer nur 0,1 Kelvin. Das Referenzthermometer war ein Tauchthermometer mit einem Pt100, das vorab im Eiswasser auf genau $0,0^\circ\text{C}$ kalibriert wurde. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Sensoren in den Bodensonden nach dem Stand der Technik sehr genau kalibriert werden können.

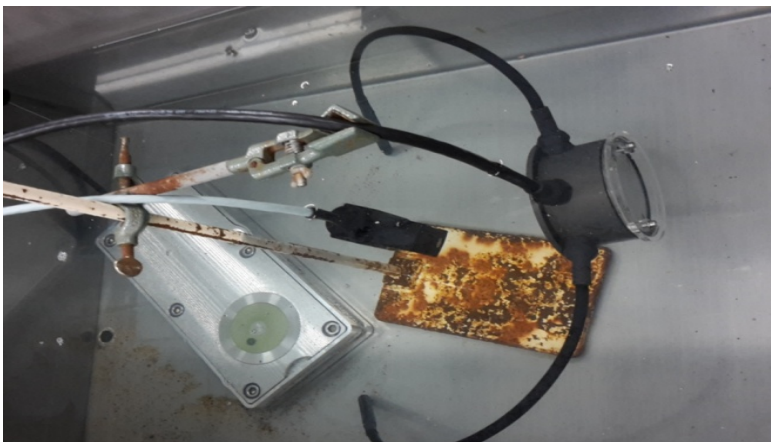


Bild 8: Drei verschiedene Bodensonden im Wasserbad für die Überprüfung der Fahrbahnoberflächentemperatur

Neben der genannten Überprüfung im Flüssigkeitsbad war bislang in der CEN/TS 15518-4 ein sogenannter Strahlungstest vorgesehen. Dabei sollte eine Bodensonde für Fahrbahnparameter in einem Bitumenblock (600x400x200 mm) eingebaut werden. Der Bitumenblock sollte nach der CEN/TS mit zwei Halogenlampen bestrahlt werden. Als Referenzsensoren sollten kleine Temperaturfühler um die Bodensonde eingebaut werden. Ein Hersteller hat den Einbau in einem Asphaltblock vorgenommen und für Tests in die BAST gebracht.

Der Versuch wurde abweichend zur Normvorschrift durchgeführt. Statt der Halogen-Lampen wurden Lampen mit einer ähnlichen Wellenlänge des Sonnenlichts verwendet. Die Referenzsensoren waren zunächst aufgesetzte Kontaktsensoren (siehe Bild 9). Später kamen mit Bitumen aufgeklebte Thermo-elemente zum Einsatz. Auch bei relativer Gleichheit der vom Sensor angegebenen Fahrbahnoberflächentemperatur zu den Referenzsensoren blieben Zweifel, ob der Sensor die richtige Fahrbahnoberflächentemperatur angibt. Es gibt keine Erfahrung, ob die Referenzsensoren richtig anzeigen haben. Der Asphaltblock hat sich bei der Anwendung temperaturmäßig als sehr träge erwiesen. Ein gewünschter Temperaturwechsel von ca. 10 Kelvin hat viele Tage gedauert. Darum soll diese Durchführung der Prüfung in der Norm derzeit nicht weiterverfolgt werden.



Bild 9: Versuchsaufbau in Anlehnung an die CEN/TS 15518-4 (Ausgabe 2013) für die Überprüfung der Fahrbahnoberflächentemperatur unter Strahlungseinfluss

Grundsätzlich wird die Prüfung eines dynamischen Temperaturverhaltens der Sensoren für sinnvoll gehalten. Denkbar wäre eine Prüfung mit unterschiedlichen temperierten Flüssigkeitsbädern. Bei einem Wechsel von einem Bad mit z. B. mit 20°C in ein Bad mit Eiswasser (=0°C) könnte die Zeit bis zum Erreichen der 0°C-Temperatur als Anhaltspunkt für das Reaktionsverhalten bewertet werden. Der Sensor wird in das erste Bad solange eingetaucht, bis er eine stabile Temperatur anzeigt. Anschließend wird er in das Eiswasser umgesetzt. Es wird die Zeit bis zum Erreichen einer stabilen Temperaturanzeige erfasst. Je kürzer die Zeit, umso besser ist das Reaktionsverhalten an der Oberfläche zu bewerten. Das Verfahren bietet den Vorteil, dass ohne großen Aufwand die Temperaturen des Flüssigkeitsbads

mit kleinen Tauchsensoren als Referenz sehr genau bestimmt werden können. Der eigentliche Sensor für die Temperaturmessung ist irgendwo innerhalb der Bodensonde verbaut. Entscheidend ist das Verhalten an der Oberfläche, die nach dem Einbau in der Ebene der Fahrbahnoberfläche liegt. Die material-technischen Gestaltung der Sonde kann so ausgelegt werden, dass sie z. B. durch gute wärmeleitende Metalle besonders schnell auf diesen Versuch reagiert. In der Praxis kann diese SONDENGESTALTUNG auf die im Abschnitt 5.2.1 beschriebenen realen Wärmeströme aber ganz anders als die Fahrbahn selber reagieren.

Trotzdem sollte das Reaktionsverhalten des Sensors auf mögliche Wärmeströme beurteilt werden. Statt des bisherigen dynamischen Strahlungstest in der CEN/TS gibt es in der Normungsgruppe zur EN 15518 einen anderen Vorschlag für einen praxisnäheren Test. Dabei wird die zu prüfende Bodensonde in eine randvoll mit feuchtem Sand gefüllten Kiste eingesetzt. Nur die SONDENoberfläche ist wie in der Fahrbahn frei zu sehen. Die Temperatur des Sandes wird an der Oberfläche mit kleinen Temperaturfühlern gemessen. Auf den ebenen Rand der Kiste wird eine Metallplatte mit einer anderen Temperatur (25 Kelvin abweichend) aufgelegt. Dabei soll kein fester Kontakt zwischen Bodensonde und Platte bestehen. Auf beiden Plattenseiten werden entsprechende Kontaktthermometer angebracht. Das Thermometer auf der dem Sandkasten zugesandten Seite sollte in unmittelbarer Nähe zur Bodensonde aber nicht zwischen Bodensonde und Platte befestigt sein.

Auch dieser Versuch stellt nicht die in der Praxis möglichen Wärmeströme durch Strahlung, meist windbedingten Wärmeaustausch mit der Luft oder Verdunstung zur Oberfläche der Bodensonde dar. Der Vorteil liegt gegenüber dem Flüssigkeitsbad liegt darin, dass nur die fahrbahnseitige SONDENoberseite betrachtet wird.

Der Versuch mit dem Flüssigkeitsbad wurde probeweise in einfacher Form mit zwei Eimern durchgeführt. In einem Eimer befand sich Wasser, das etwa die Umgebungstemperatur des Raumes hatte. Dort wurde eine Bodensonde stabil temperiert. Anschließend wurde die Bodensonde in einen Eimer mit Eiswasser umgesetzt (Bild 10). Nach ca. 30 Minuten hatte die Bodensonde die Temperatur des Referenzthermometers in diesem Eimer erreicht. Die Differenz der Temperaturen zwischen beiden Bädern betrug ca. 21 Kelvin. Die benötigte Zeit zur Anpassung nach diesem Wechsel wird als ausreichend kurz betrachtet, da im Praxisbetrieb der hier vorgenommene schnelle Wechsel nicht auftritt.

Andere Bodensonden konnten in dieser Form nicht getestet werden. Dieser Test - auch nur mit einem Eimer - kann grundsätzlich für Abnahmetests vor dem Einbau der Sensoren genutzt werden.



Bild 10: Möglicher einfacher Test für die Prüfung des Verhaltens von Sensor für die Fahrbahnoberflächentemperatur in Bodensonden

Bei früheren Vergleichsmessungen mit den hier genutzten Infrarotthermometer gab es erhebliche Differenzen zwischen den einzelnen Sensortypen [Melero Corell et al. 2014], die zu unterschiedlichen Winterdienstentscheidungen führen würden. Als eine wesentliche Ursache wird der Einfluss von Reflexionen der Himmelstrahlung bei geringer oder fehlender Bewölkung an der Fahrbahnoberfläche gesehen, die von den Sensoren scheinbar unterschiedlich aufgenommen werden.

Zum Nachweis des Einflusses der Himmelstrahlung diente ein spezieller Versuch. Dabei kam als Referenzmessung ein transportables Infrarotthermometer zum Einsatz, das eine nur sehr kurze Zeit bis zum Erreichen eines stabilen Messwertes benötigt. Die Messungen fanden unter Einbeziehung einer Holzbox statt, die auf einer Seite keine Wand hat. Der fehlenden Wand gegenüber gibt es eine Bohrung, durch die das Objektiv des Infrarotthermometers auf die Fahrbahnoberfläche gerichtet werden kann (Bild 11). Bei dieser Messung werden die Einflüsse der Himmelstrahlung ausgeschlossen. Allerdings geht von der Holzbox auch eine Strahlung aus.

Der Versuch fand gegen 12 Uhr mittags auf dem Testfeld im Bereich der Sensormesspunkte statt. Dabei war ein fast wolkenloser Himmel vorhanden. Die Messungen mit und ohne Box innerhalb von ca. einer halben Minute an einem Punkt wiesen jeweils eine Differenz von ca. zwei Kelvin auf. Im Vergleich zu den festinstallierten Sensoren stimmten zwei Sensortypen mehr mit den Messwerten mit der Holzbox und ein Sensortyp mehr mit den Messwerten ohne Holzbox überein. Der Versuch zeigt den Einfluss der Strahlung auf die Messung. Eine Aussage welcher Messwert richtig ist, lässt sich durch diesen Versuch nicht tätigen.



Bild 11: Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur mit Hilfe einer Holzbox

Die wahre Temperatur ist unbekannt. Im Rahmen der Entwicklung eines Referenzverfahrens gab es bei der BAST verschiedene Versuche [Badelt et al. 2006]. Bei einem längeren Feldversuch ohne Verkehrseinwirkung wurden verschiedene Sensoren (Pt-100, NTC, Thermoelemente) durch kleine Bohrungen in der Fahrbahn von unten an die Oberfläche geführt (Bild 12). Trotz gleichen Einbaus und der kleinen Sensor-Abmessungen von nur 0,5 bis 2 mm Durchmesser traten Differenzen bis 0,5 Kelvin zwischen zwei baugleichen Sensoren auf. Ein gleichartiger Einbau in der Straße mit Verkehr war nicht erfolgreich, da die notwendige Vergussmasse sich schnell löste und die Sensoren dann in der Luft hingen.

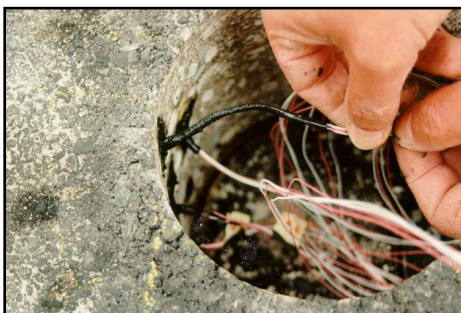


Bild 12: Einführen von kleinsten Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur zur Fahrbahnoberfläche [Badelt et al. 2006]

Als Ursache für die höheren Messdifferenzen konnte bei diesen Versuchen, bei den die Sensoren so nah wie möglich an die Fahrbahnoberfläche herangebracht wurden, die Strahlung ermittelt werden.

Sichere Qualitätsprüfungen, die eine genaue Kontrolle der Fahrbahnoberflächentemperatur nach dem Einbau im Bereich der genannten Genauigkeit ermöglichen, sind bislang nicht bekannt. Eine Kontrolle von Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur kann mit einem auf die Fahrbahnoberfläche aufgesetzten Kontaktthermometer erfolgen. Das Kontaktthermometer beeinflusst allerdings die Wärmeströme zur Fahrbahnoberfläche, und es kommt daher zu Abweichungen zu einer daneben liegenden Fläche ohne diese Einflüsse. Auch die Referenzsensoren selber werden durch Wärmeströme beeinflusst. Deshalb sollten diese Messungen nur bei langanhaltender Bewölkung, ohne Windeinfluss und bei trockener Fahrbahnoberfläche durchgeführt werden. Unter diesen Bedingungen lassen sich Strahlungseinflüsse, der Wärmeaustausch aus Luftbewegungen oder Verdunstungskälte vermeiden, die zu einem anderen Messwert als bei dem zu prüfenden Sensor führen können. Es lässt sich nur die richtige Kalibrierung von in der Fahrbahn installierten Sensoren bei den beschriebenen Bedingungen kontrollieren.

Für Infrarotthermometer fand in der Zeitdauer des Projektes eine Prüfung im Labor statt. Verschiedene Infrarotthermometer waren auf die Oberfläche eines Bohrkerns ausgerichtet. Gleichzeitig wurde die Oberflächentemperatur der Bohrkerns mit mehreren gleichartigen Sensoren, die eigentlich speziell für Messungen der Oberflächentemperatur gestaltet sind, erfasst. Unter diesen Laborbedingungen traten Differenzen zwischen Referenz- und Infrarotthermometer auf. Sie werden zunächst auf leicht schwankende Lufttemperaturen zurückgeführt, die von beiden Thermometerformen unterschiedlich wahrgenommen werden [Eiermacher 2018]. Zur Klärung der Differenzen sollen weitere Versuche folgen. Für die Bewertung der genannten größeren Differenzen bei den berührungslos arbeitenden Infrarotsensoren außerhalb des Labors ist dieses Messverfahren nicht geeignet.

5.2.3 Testfeldergebnisse

Von den Sensoren, die in dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Wasserbadtest beteiligt waren, konnte nur der DRS511 im Testfeld installiert werden. Alle anderen im Labor getesteten Sensoren haben die Hersteller aufgrund von Defekten unmittelbar vor der Testfeldinstallation ausgetauscht bzw. das ARS31pro-Sensorteil für Fahrbahnoberflächentemperatur war vor dem Test im Testfeld eingebaut.

In den nachfolgenden Vergleichen wird davon ausgegangen, dass die Fahrbahnoberflächentemperatur in den beiden Messquerschnitten längs des linken und rechten Fahrstreifens nahezu gleich ist. Diese Annahme wurde durch Messungen mit einem portablen Infrarotthermometer nachgewiesen. Bei unterschiedlichen Bedingungen wurde längs der Querschnitte im Messbereich der Sensoren die Fahrbahnoberflächentemperatur in einem kurzen Zeitraum gemessen. Die Differenzen betragen in diesen Abschnitten nur 0,1 Kelvin. Die Messungen wurden nicht für die Bewertung der Genauigkeit der installierten Sensoren genutzt.

In der Fahrbahn eingebaut zeigen die gleichen Bodensondentypen größere Differenzen als bei dem Wasserbadtest. Für statistische Auswertungen wurden die Ergebnis-Spannweiten als Differenz zwischen dem größten und kleinsten Messwert der fünf genannten Bodensonden (ohne zweiten DRS511) zu jeder Minute ermittelt. Im Bild 13 ist die Häufigkeit dieser Spannweiten bei der Fahrbahnoberflächentemperatur nach Klassen in 0,4 Kelvin-Schritten dargestellt. Darin sind die Daten des Monats Januar 2017 enthalten. In weniger von 15% der Zeitpunkte war die Differenz zwischen den größten und kleinsten Wert $\leq 0,4$ Kelvin. Der größte Anteil der Spannweiten mit über 50% lag in der Klasse zwischen

0,4 und 0,8 Kelvin. In fast 90% der Fälle betragen Differenzen unter 1,2 Kelvin. Die Spannweite der gemessenen Temperaturen von allen Sensoren lag im Januar 2017 nur zwischen rund -10 und +10°C.

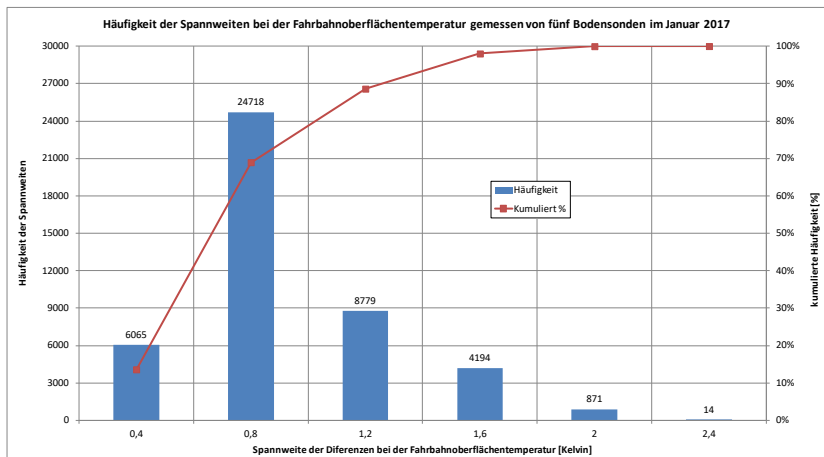


Bild 13: Spannweiten der Fahrbahnoberflächentemperaturen gemessen durch fünf Bodensonden (44641 Datensätze im Januar 2017)

Die gleiche Form der Statistik ist im Bild 14 für den Zeitraum 09. Dezember 2017 bis 31. März 2017 dargestellt. Sie zeigt ein ähnliches Ergebnis. Die Anzahl der Datensätze mit einer Spannweite bis $\leq 0,4^{\circ}\text{C}$ erreicht hier weniger als 5%. Aber auch in diesem Zeitraum übersteigt die Spannweite in rund 90% der Fälle nicht den Wert von $1,2^{\circ}\text{C}$.

Die höchste gemessene Fahrbahnoberflächentemperatur im Zeitraum des Winters 2017/18 betrug knapp 28°C und tiefste Fahrbahnoberflächentemperatur etwas unter -12°C . In dieser Auswertung sind aufgrund der Ausreiser nicht die Werte des RCO mit einbezogen.

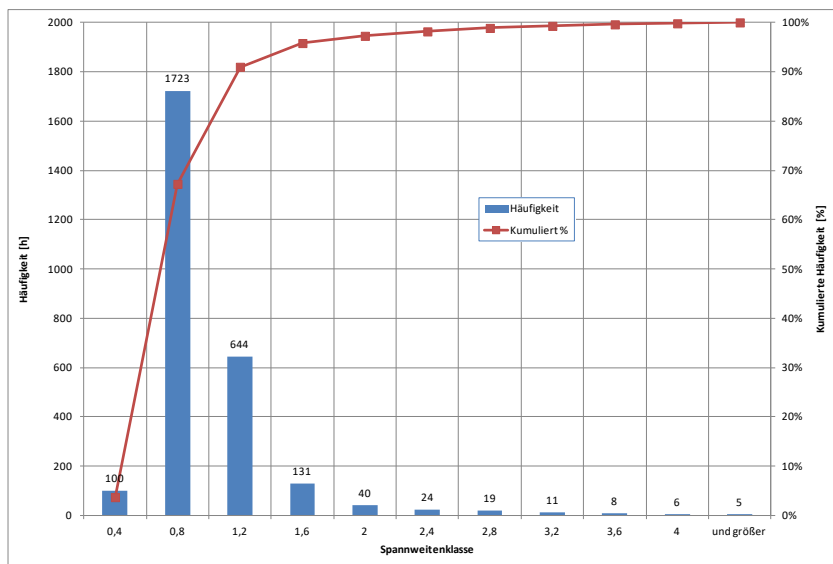


Bild 14: Spannweiten der Fahrbahnoberflächentemperaturen gemessen durch die Bodensonden im linken Fahrstreifen (Zeitraum 09.12.2017-31.03.2018 = ~2711 Stunden)

Wird für den gleichen Zeitraum die gemessene Fahrbahnoberflächentemperatur des einzigen Infrarotthermometers auf dem zweiten Fahrstreifen mit einbezogen, ergibt sich ein vollkommen anderes Ergebnis (Bild 15). Die Spannweite $\leq 1,2^{\circ}\text{K}$ tritt nur in weniger der 50% der Fälle auf. Differenzen über 4°K treten in über 17% der Fälle auf. Mit mehr als vier Kelvin Differenz wäre eine Anwendung der Daten für Winterdienstentscheidungen wenig hilfreich.

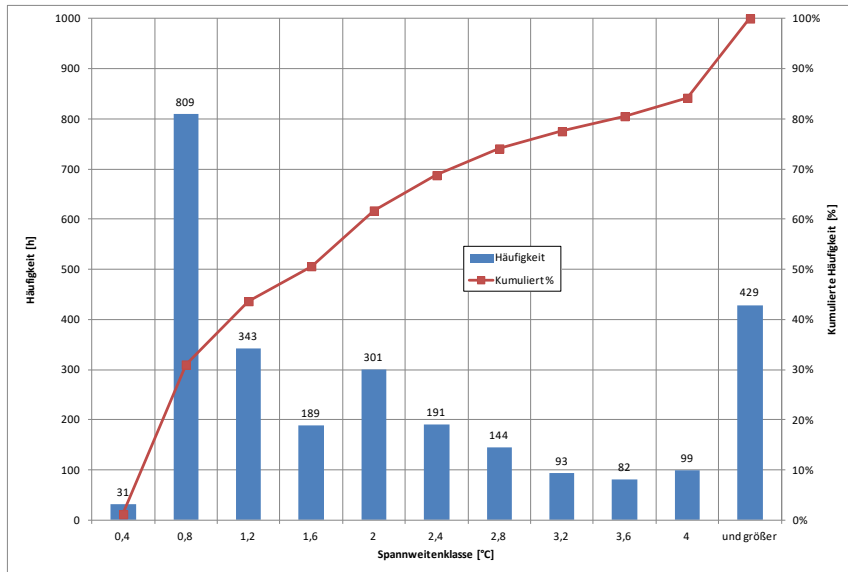


Bild 15: Spannwerten der Fahrbahnoberflächentemperaturen gemessen durch alle Sensoren im linken Fahrstreifen (Zeitraum 09.12.2018-31.12.2018 = ~2711 Stunden)

Bei der Gesamtbetrachtung werden auch Zeiträume einbezogen, in denen keine Glättegefahr besteht. Im Bild 16 sind die Häufigkeiten der Spannwerten zwischen dem kleinsten und größten Wert der Sensoren auf dem linken Fahrstreifen nur für die Zeitpunkte einbezogen, bei denen die Temperatur zwischen -5°C und $+5^{\circ}\text{C}$ betragen. Die Summe der hier genutzten Zeitpunkte entspricht rund 40% des betrachteten Gesamtzeitraumes. Eine wesentliche Änderung im Vergleich zu den Aussagen für den Gesamtzeitraum ergibt sich dadurch aber nicht.

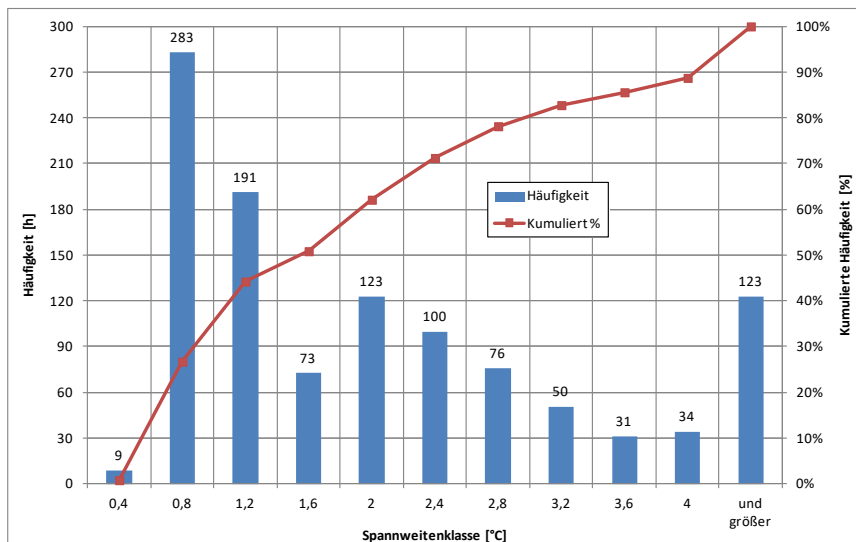


Bild 16: Spannwerten der Fahrbahnoberflächentemperaturen gemessen durch alle Sensoren im linken Fahrstreifen – nur im Temperaturbereich von -5°C bis $+5^{\circ}\text{C}$ (Zeitraum 09.12.2018-31.12.2018 = ~1092 Stunden)

Die Differenzen zwischen den drei Infrarotthermometern auf dem rechten Fahrstreifen führen zu deutlich höheren Spannwerten der Messwerte im Vergleich zu den Spannwerten aller Bodensonden auf dem linken Fahrstreifen (vergleiche Bild 14 mit Bild 17). Eine Erklärung gibt dazu derzeit nicht.

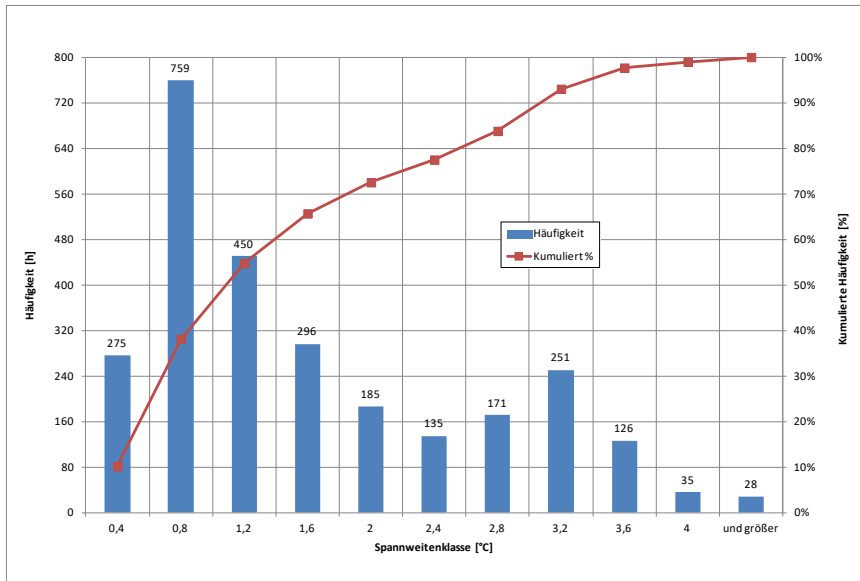


Bild 17: Spanneiten der Fahrbahnoberflächentemperaturen gemessen durch die drei Infrarotthermometer im rechten Fahrstreifen (Zeitraum 09.12.2018-31.12.2018 = ~2711 Stunden)

Werden aus allen Fahrbahnoberflächentemperaturen im Testfeld die Spanneiten berechnet, verschlechtern sich die Aussagen erwartungsgemäß weiter (Bild 18). Die Häufigkeit der Spanneiten bis $\leq 1,2$ Kelvin sinkt unter 35%. Die Festlegung einer festen Position für die Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur sollte auf jedem Fall weiter bestehen bleiben.

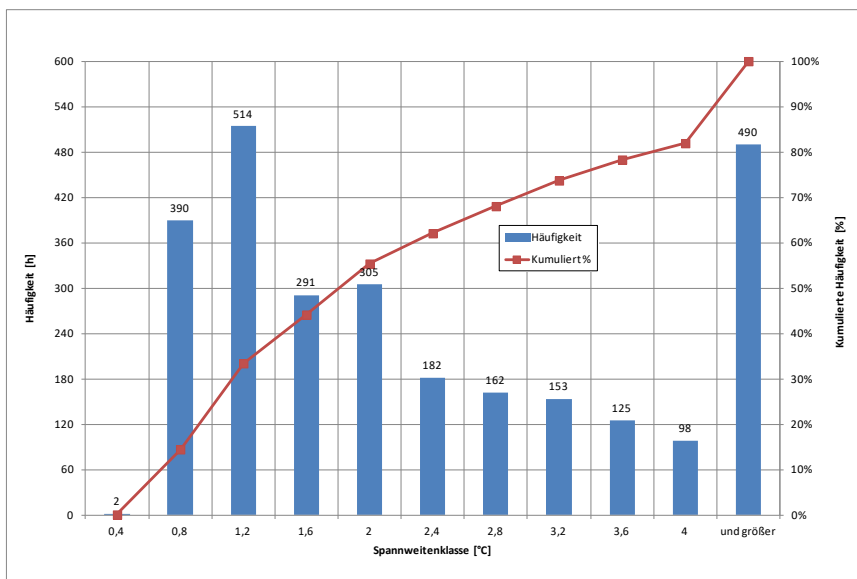


Bild 18: Spanneiten der Fahrbahnoberflächentemperaturen gemessen durch alle Sensoren auf dem Testfeld (Zeitraum 09.12.2018-31.12.2018 = ~2711 Stunden)

Ein wesentlicher Einfluss durch den Verkehr, der insbesondere bei den Infrarotthermometern – Fahrzeuge bewegen sich durch den auszuwertenden Strahlenverlauf - vermutet werden kann, lässt sich teilweise erkennen. Alle Sensoren weisen etwa gleichförmige Verläufe auf. Der Sensor RCO der Firma Boschung zeigt einige deutliche Ausreißer von jeweils einer Minute an (Bild 19). Hier könnte ein Einfluss durch den Verkehr vermutet werden. Allerdings treten diese Ausreißer sowohl in Zeiten mit wenig als auch viel Verkehr auf. Eine Häufung der Ausreißer bei hoher Verkehrsstärke ist nicht zu erkennen. Diese Ausreißer konnten nach Softwareanpassungen im Dezember 2018 unterdrückt werden. Bei den NIRS31 traten vereinzelt Ausreißer auf.

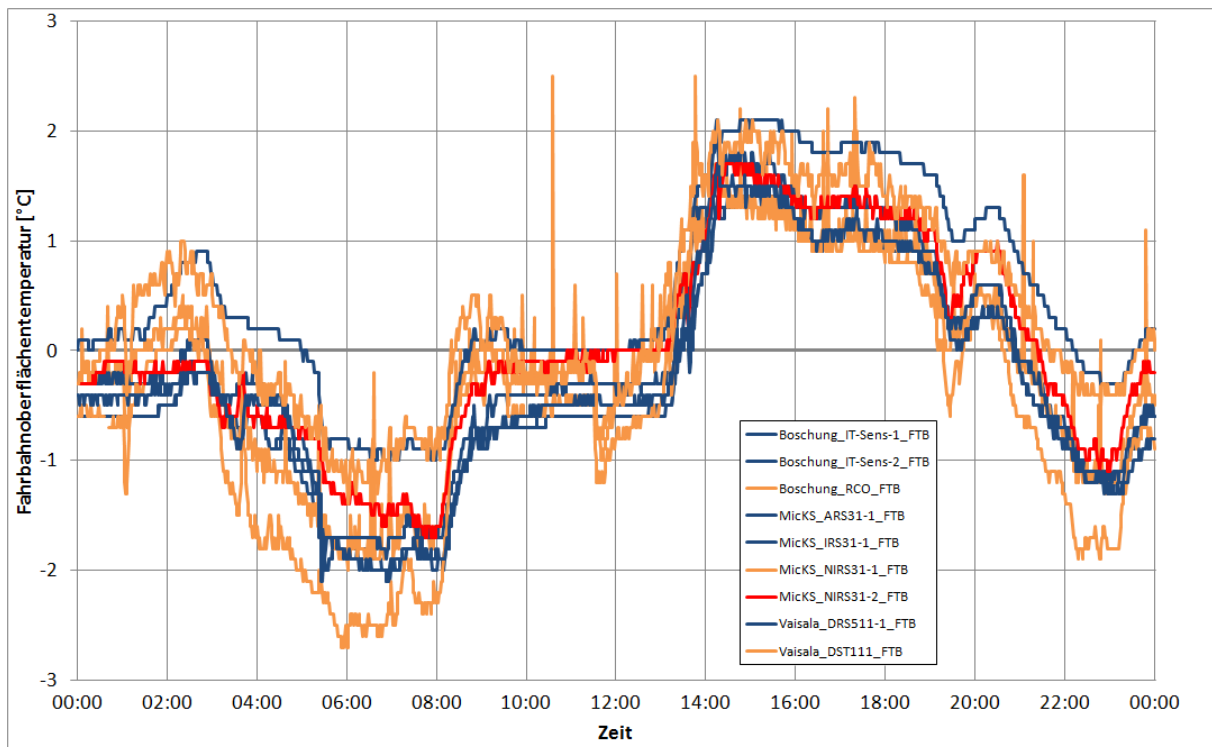


Bild 19: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur am 09.12.2017 (orange: Verläufe der Infrarotthermometer auf dem rechten Fahrstreifen, rot: Verlauf des Infrarotthermometers auf dem linken Fahrstreifen, dunkelblau: Verläufe der Sensoren in den Bodensonden auf dem linken Fahrstreifen, hohe Ausreißer alle im Verlauf des Sensors RCO)

Die genannten Ausreißer führen aber nicht zu der hohen Anzahl der größeren Differenzen. Diese lassen sich bei verschiedenen Verlaufsbeobachtungen feststellen. Weitere Unterschiede zwischen den Verläufen lassen unterschiedliche Reaktionen auf besondere Umfeldbedingungen vermuten.

Ein beispielhaft ausgewählter Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperaturen an einem 02. Januar 2017 gibt Bild 20 wieder. Hier ist der relativ gleichartige Verlauf der fünf gewählten Bodensonden zu erkennen. Der Verlauf einer Bodensonde weist durchgängig eine größere Abweichung zu den Verläufen der anderen Bodensonden auf. Ob hier falsche Kalibrierungen vorgenommen wurden, ließ sich nach der Montage nicht ermitteln. In den Nachtstunden ist die Spannweite der Ergebnisse höher als tagsüber. Dies könnte auf eine unterschiedliche Reaktion der Sensorkörper bei unterschiedlichen Strahlungsverhältnissen hindeuten. Maße und Materialien der Bodensonden sind sehr verschieden. Sie können damit sehr unterschiedlich auf die verschiedenen Wärmeströme zur Sensoroberfläche reagieren. Deshalb wird kein Verhalten mit der gleichen Spannweite erwartet, wie es bei den Laborprüfungen im Wasserbad erzielt werden konnten.

Die Verläufe der Werte aller Sensoren weisen einige höhere Änderungen in kurzer Zeit auf, die teilweise auf Salzstreuung (gegen 4 und 5 Uhr) oder auf Niederschläge (gegen 18 und 23 Uhr) zurückzuführen sind (Bild 20). Keine Gründe sind für weitere höhere Änderungen (gegen 21 und 22 Uhr) erkennbar. Die Fahrbahnoberfläche war durchgängig nicht trocken. Zwischen ca. 3:45 Uhr und 6:50 Uhr war Schneematsch auf der Fahrbahnoberfläche im Bereich der Sensoren erkennbar.

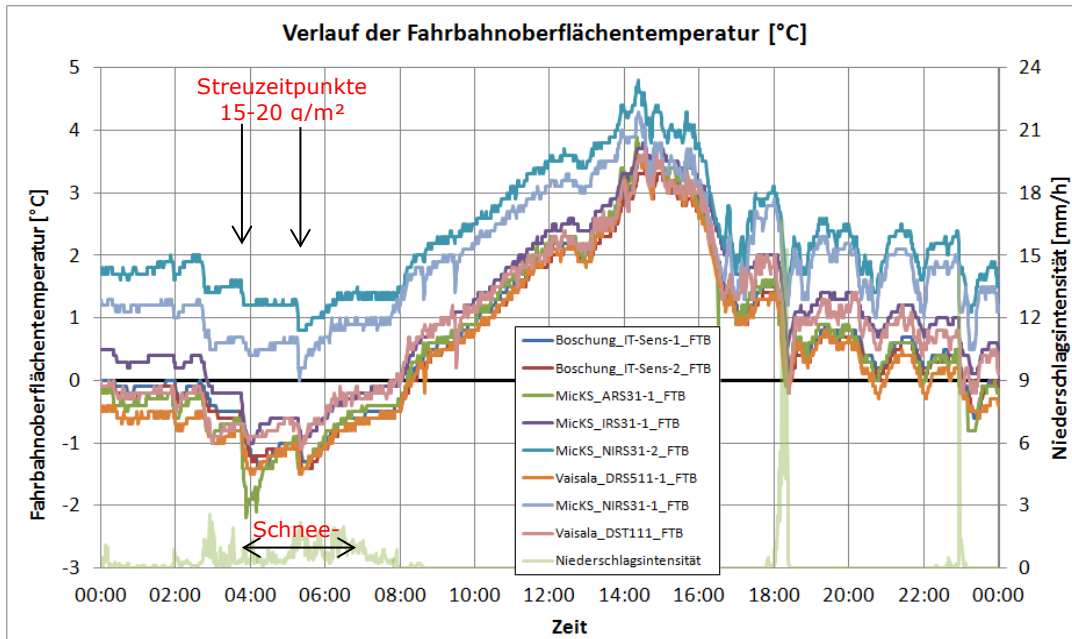


Bild 20: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperaturen der Bodensonden am 02. Januar 2017

Die zuvor genannten Angaben beziehen sich nur auf die Bodensonden. Unter Einbeziehung der Ergebnisse der Infrarotthermometer ergeben sich deutlich höhere Differenzen. Im Bild 21 sind deren Verläufe nochmals deutlicher im Vergleich zu den Bodensonden dargestellt. Die grauen Linien geben die Fahrbahnoberflächentemperatur-Verläufe der Bodensonden wieder. Die Messwertverläufe der Infrarotthermometer sind vom Verlauf ähnlich wie die der Bodensonden. Eine Ausnahme besteht um ca. 4 Uhr. Um diesen Zeitpunkt sinken die Fahrbahnoberflächentemperaturen der Bodensonden deutlich stärker - wahrscheinlich aufgrund der Salzstreuung - als die der Infrarotthermometer. Die Infrarotthermometer erkennen die Salzstreuung in diesem Fall nicht so wie die Bodensonden.

Grundsätzlich muss allerdings beachtet werden, dass nur ein Infrarotthermometer (NIRS31-2) die Fahrbahnoberflächentemperatur im gleichen Querschnitt wie die Bodensonden im linken Fahrstreifen misst. Aber gerade dieses Infrarotthermometer weist die höchsten Abweichungen zu den Bodensonden auf.

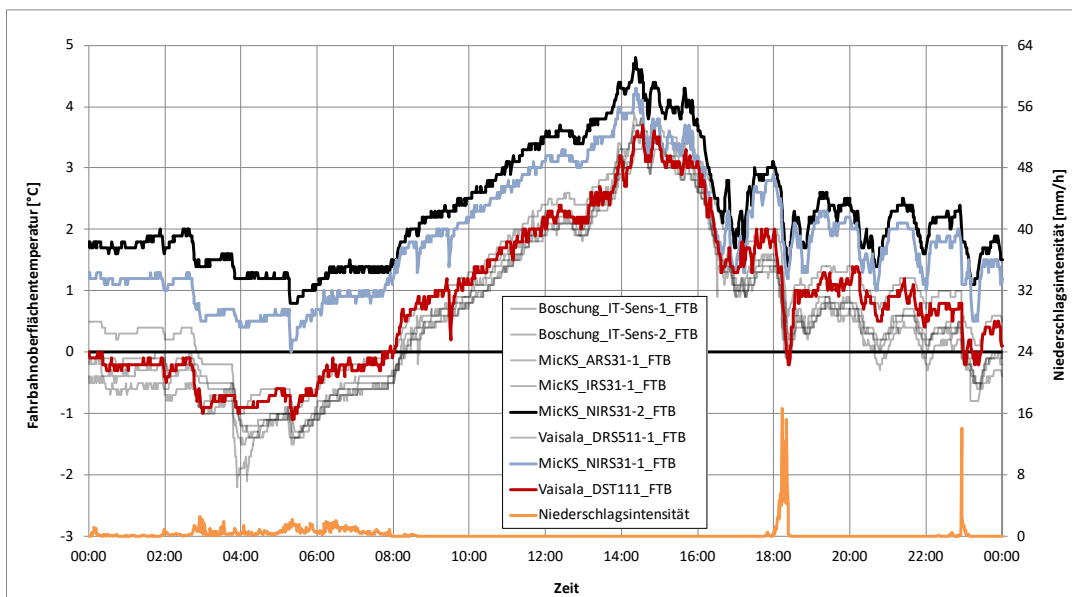


Bild 21: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur auf dem BAST-Testfeld A4 am 02. Januar 2017

Neben der Betrachtung von Verläufen und den Differenzklassen-Betrachtungen lassen sich durch Regressionen zwischen 2 Sensoren weitere statistische Aussagen für die Darstellung möglichen Unterschiede heranziehen. Nachfolgend sind einige Beispiele angeführt. Es sind, wenn nicht anders angegeben, jeweils 32000 Datensätze aus dem Dezember 2017 eingeflossen.

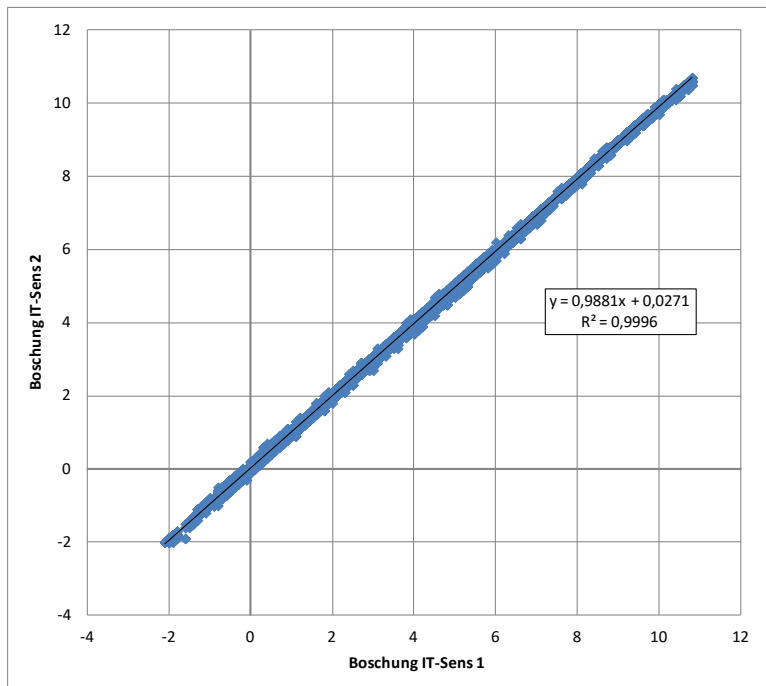


Bild 22: Regression zwischen den Fahrbahnoberflächentemperaturen der Sensoren IT-Sens 1 und IT-Sens 2

Bild 22 enthält die Regression zwischen den beiden baugleichen Sensoren vom Typ IT-Sens der Firma Bosch. Beide Sensoren sind nebeneinander im gleichen Querschnitt installiert. Bei ihnen wird die größte Übereinstimmung zwischen zwei Sensoren erwartet, die sie tatsächlich auch erreichen. Die lineare Regression weist eine sehr hohe Übereinstimmung beider Sensoren auf. Es treten keine Abweichungen über 0,5 Kelvin auf. Diese Differenzen sind im gesamten hier betrachteten Temperaturbereich nahezu gleich.

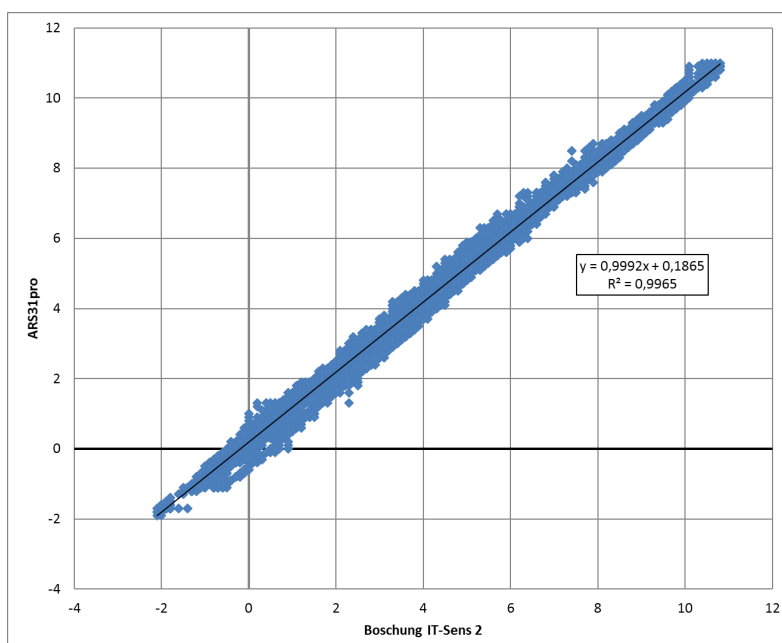


Bild 23: Regression zwischen den Fahrbahnoberflächentemperaturen der Sensoren IT-Sens 2 und ARS31pro

Eine etwa ähnliche Aussage lässt sich zwischen den Sensoren IT-Sens 1 der Firma Boschung und der abgesetzten Temperatursonde des ARS31pro der Firma Lufft treffen (Bild 23). Tendenziell sind die Differenzen etwas größer. Die Formel der errechneten Regressionsgerade zeigt, dass die Werte des IT-Sens im Durchschnitt rund 0,2 Kelvin unter den Werten des ARS31pro liegen.

Ähnliche Regressionen ergeben sich auch bei anderen Bodensondenpaaren. Weitere Untersuchungen zu den Gründen fanden aufgrund der vergleichsweise geringen Differenzen nicht statt.

Besonders auffällig sind die entstandenen hohen Spannweiten zwischen der niedrigsten und höchsten Fahrbahnoberflächentemperatur auf dem linken Streifen, wenn der berührungslos arbeitende Sensor NIRS31 der Firma Lufft in die Berechnung einbezogen wird (siehe Bild 15 und Bild 16). Bei der Betrachtung der Verläufe in verschiedenen Zeiträumen fallen die jeweils unterschiedlichen Verläufe des NIRS31 im Vergleich zu den Werten der Bodensonden auf. Im Januar 2017 lagen die NIRS31-Messwerte häufig über den Werten der Bodensonden. Die Regression der Messreihen des NIRS31 und des ARS31pro an 32000 Zeitpunkten im Januar 2017 zeigt, dass die Messwerte des NIRS31 im Durchschnitt rund 10% und zusätzlich ca. 0,8 Kelvin höher liegen (Bild 24).

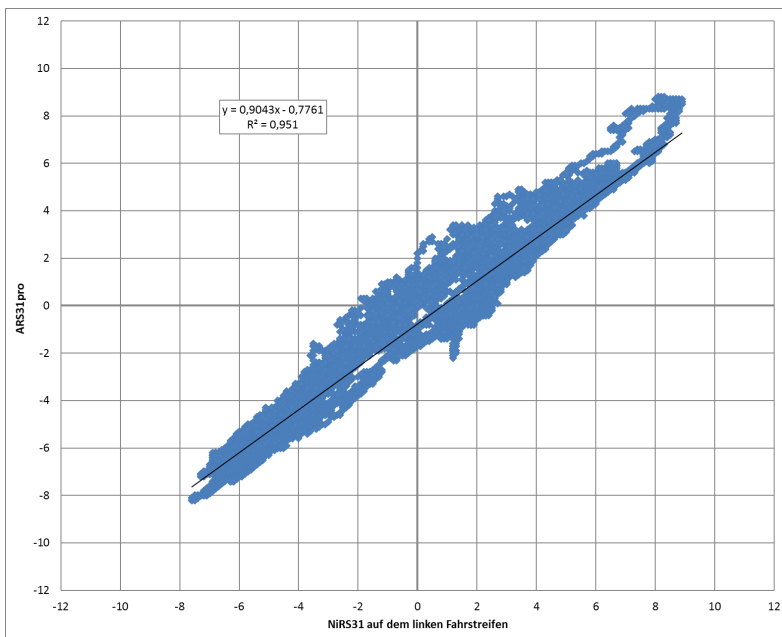


Bild 24: Regression zwischen den Fahrbahnoberflächentemperaturen der Sensoren ARS31pro und NIRS31 auf dem linken Fahrstreifen mit den Daten aus dem Zeitraum 01.-23.01.2017

Im Dezember 2017 erfolgte eine Kalibrierung dieses NIRS31 mit einer Schale Eiswasser im Messbereich. Die Regression der Daten im anschließenden Zeitraum von etwas mehr als 22 Tagen (=32.000 Messzeitpunkte) zeigt statistisch geringere Unterschiede zwischen NIRS31 und ARS31pro im Vergleich zur Regression der Daten im Januar 2017 (vergleiche Bild 24 und Bild 25).

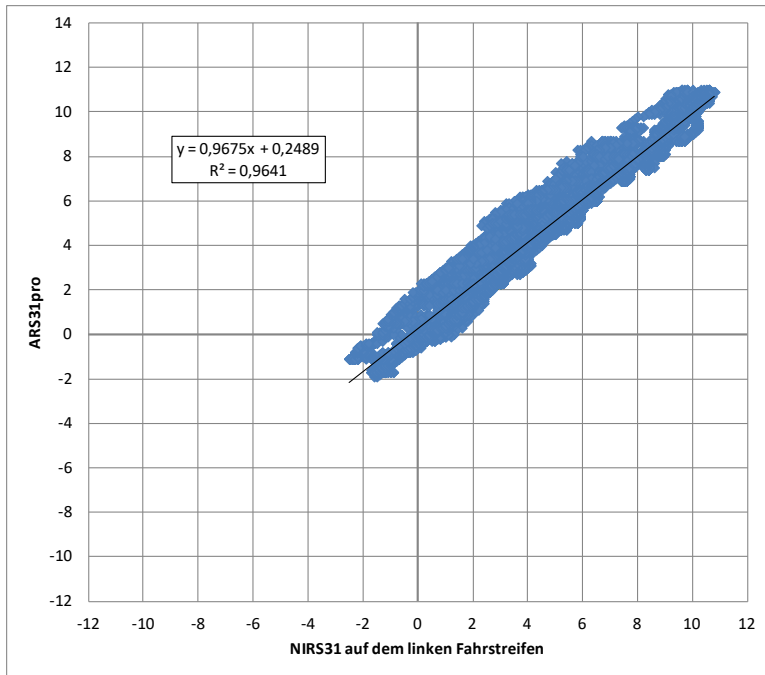


Bild 25: Regression zwischen den Fahrbahnoberflächentemperaturen der Sensoren ARS31pro und NIRS31 auf dem linken Fahrstreifen mit den Daten aus dem Zeitraum 09.-31.12.2017

Anfang Februar 2018 fand am NIRS31 für den linken Fahrstreifen eine weitere Wartung statt. Dabei wurden lichttechnische Verschleißteile ausgetauscht und die Linsen gereinigt. Danach zeigt der Sensor deutlich tiefere Messwerte als der ARS31pro an. Die durchschnittliche Differenz beträgt über 3 Kelvin (Bild 26). Auch wenn bei den betrachteten Zeiträumen unterschiedliche Bedingungen geherrscht haben, kann ein Einfluss von Wartungs- oder Kalibrierarbeiten auf das Messverhalten vermutet werden.

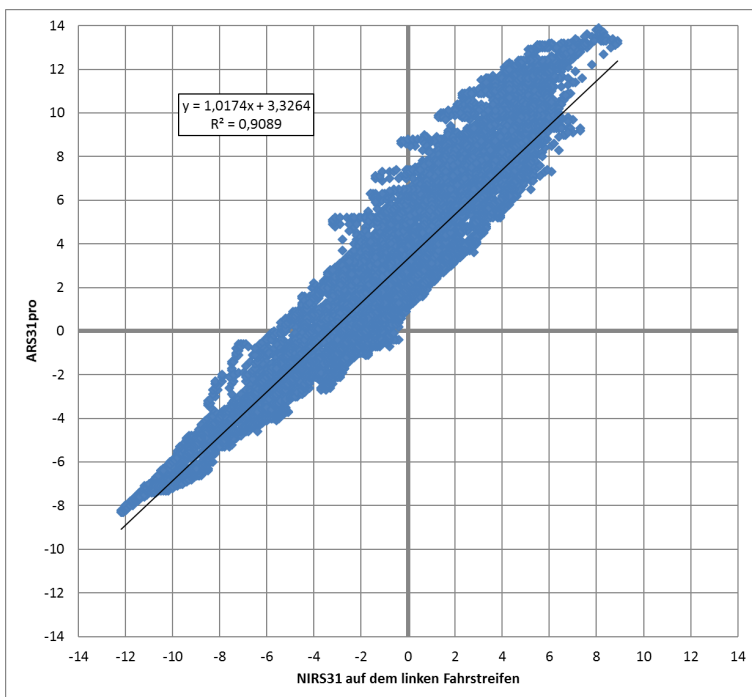


Bild 26: Regression zwischen den Fahrbahnoberflächentemperaturen der Sensoren ARS31pro und NIRS31 auf dem linken Fahrstreifen mit Daten im Zeitraum 10.02.-03.03.2018

Höhere Differenzen weisen auch die Infrarotthermometer auf dem rechten Fahrstreifen auf. Der Vergleich zwischen dem DST111 der Firma Vaisala und der NIRS31 zeigt Differenzen, die bis über 4 Kelvin

gehen (Bild 27). Die hohen Differenzen treten besonders häufig im Temperaturbereich um 0°C auf, bei dem besonders genaue Winterdienstentscheidungen notwendig werden.

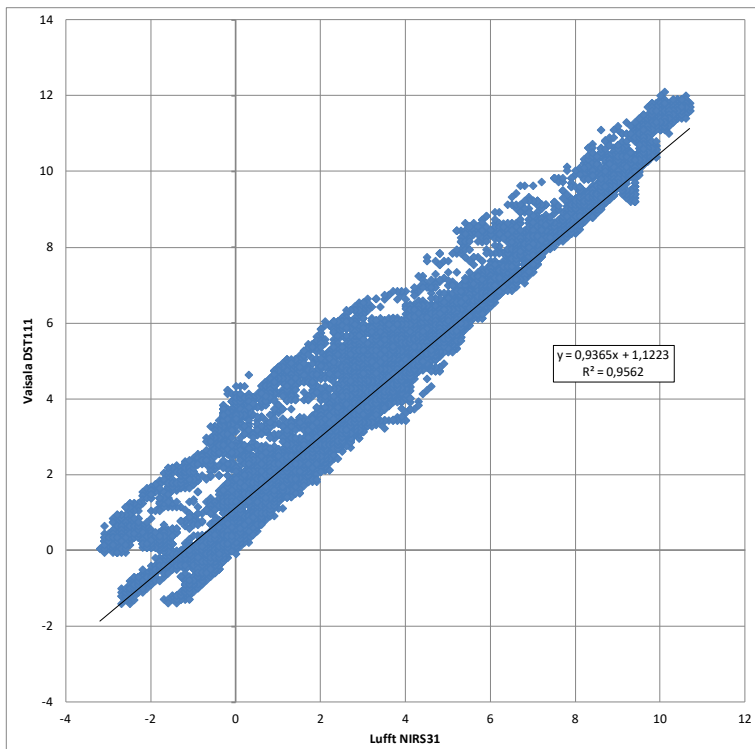


Bild 27: Regression zwischen den Fahrbahnoberflächentemperaturen der Sensoren NIRS31-1 und DST111

Die Regression zwischen dem DST111 und dem RCO mit Werten des Dezember 2017 zeigt deren höherer Übereinstimmung im Vergleich zwischen DST111 und NIRS31 für den gleichen Zeitraum, die durch die Ausreißer im Messverlauf des RCO nicht wesentlich beeinflusst wird (Bild 28).

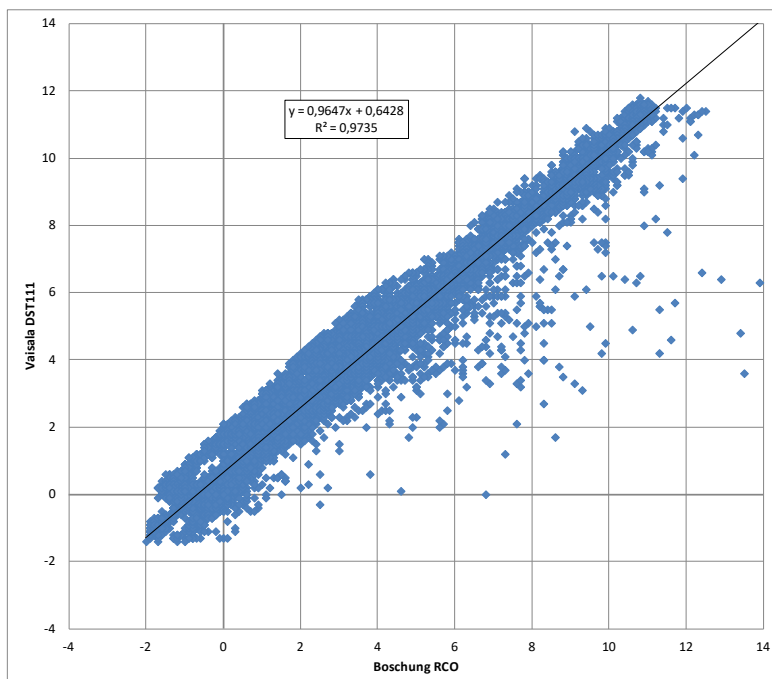


Bild 28: Regression zwischen den Fahrbahnoberflächentemperaturen der Sensoren RCO und DST111

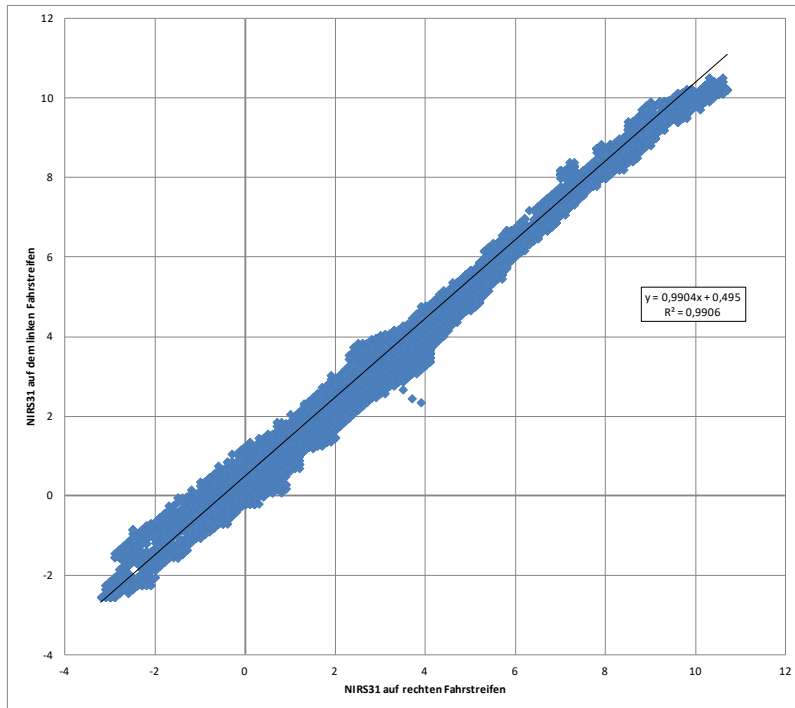


Bild 29: Regression zwischen den Fahrbahnoberflächentemperaturen der Sensoren vom Typ NIRS31

Die Regression zwischen beiden NIRS31 untereinander für den Zeitraum aus dem Dezember 2017 zeigt kaum Differenzen über ein Kelvin und damit wiederum eine recht gute Übereinstimmung (Bild 29). Nicht plausibel ist, dass die Temperatur auf dem rechten Fahrstreifen meist niedriger als auf dem linken Fahrstreifen ist. Alle Messungen auf dem Testfeld mit einem portablen Infrarotthermometer mit einer sehr kleinen Messfläche von der Brücke im Testfeld oder unmittelbar nach Sperrungen eines Fahrstreifens direkt auf dem Testfeld zeigen ein genau umgekehrtes Verhalten. Auch frühere Messungen auf anderen Testfeldern weisen immer eine höhere Fahrbahnoberflächentemperatur auf dem rechten im Vergleich zum linken Fahrstreifen auf [Hausmann 2009, Kutter, Niebrügge 1985]. Die Ursache wird durch die höhere Nutzung des rechten Fahrstreifens insbesondere durch den Schwerlastverkehr gesehen.

5.2.4 Sensorbewertungen

Die Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperaturen können aufgrund der fehlenden Referenz nicht einzeln bewertet werden. Es sind nur grundsätzliche Bewertungen aus dem Verlauf der Messwerte und Vergleiche untereinander möglich, die bereits im Abschnitt 5.2.3 beschreiben sind.

Einzelne Unterschiede können durch kurzfristige Beschattung aufgetreten sein. Eine Ausnahme bildet der Sensor RCO der Firma Boschung. Er weist bei der Fahrbahnoberflächentemperatur häufige Ausreißer im Verlauf auf, die auf im Messbereich fahrende Fahrzeuge zurückgeführt werden. Die Firma Boschung hat dazu vor dem Winter 2018/19 ein Firmware-Update installiert. Seitdem traten diese Ausreißer nicht mehr auf.

5.2.5 Entwicklungen zur Prüfung von berührungslos arbeitenden Sensoren

Messverfahren zur genaueren Bewertung der festgestellten Differenzen zwischen diesen Sensoren befinden sich derzeit erst in der Entwicklung. Die Beschreibung eines möglichen Prüfverfahrens ist für das Europäische Normungsverfahren eingebracht (siehe Anhang 5). Es basiert auf Überlegungen, die die BASt bereits untersucht hat und im Abschnitt 5.2.2 beschrieben sind [Badelt et al. 2006]. Dieser

Versuchsaufbau konnte gegen Ende der Projektlaufzeit teilweise umgesetzt werden (Bild 30). Dabei kamen zwei Asphaltplatten gemäß EN 13197 zum Einsatz, die für die Prüfung von Markierungsfarben verwendet werden. In einer Platte wurden durch senkrechte Bohrungen von unten Thermoelemente an die Oberfläche geführt. Die Bohrungen wurden mit Bitumen und sehr feinen Sand vergossen. Vor dem Einbau wurden die Thermoelemente im Eiswasser kalibriert und in einem Flüssigkeitsbad bei Raumtemperatur auf Gleichheit überprüft. Die eingebauten Thermoelemente messen damit etwa an der gleichen Stelle die Temperatur wie das auf diese Platte ausgerichtete Infrarotthermometer. Sie sollen aufgrund der genauen Kalibrierungsmöglichkeit die Referenz für die Infrarotthermometer-Messung darstellen.

Beide Bitumenplatten wurden auf eine Styroporplatte gelegt und an den Seiten ebenfalls mit Styropor ummantelt. Das oben sichtbare Styropor und ein Teil der über der Messfläche vorhandenen Bauteile wurden mit Gummimatten abgedeckt. Damit sollten untypische Strahlungsquellen im Vergleich zur Straße vermieden werden.



Bild 30: Versuchsstand für die Prüfung von Infrarotthermometer

Mit einem Infrarotthermometertyp, der nicht auf dem Testfeld installiert ist, fanden erste Versuche statt. Die ersten Messdatenaufzeichnungen sind in Bild 31 und Bild 32 dargestellt.

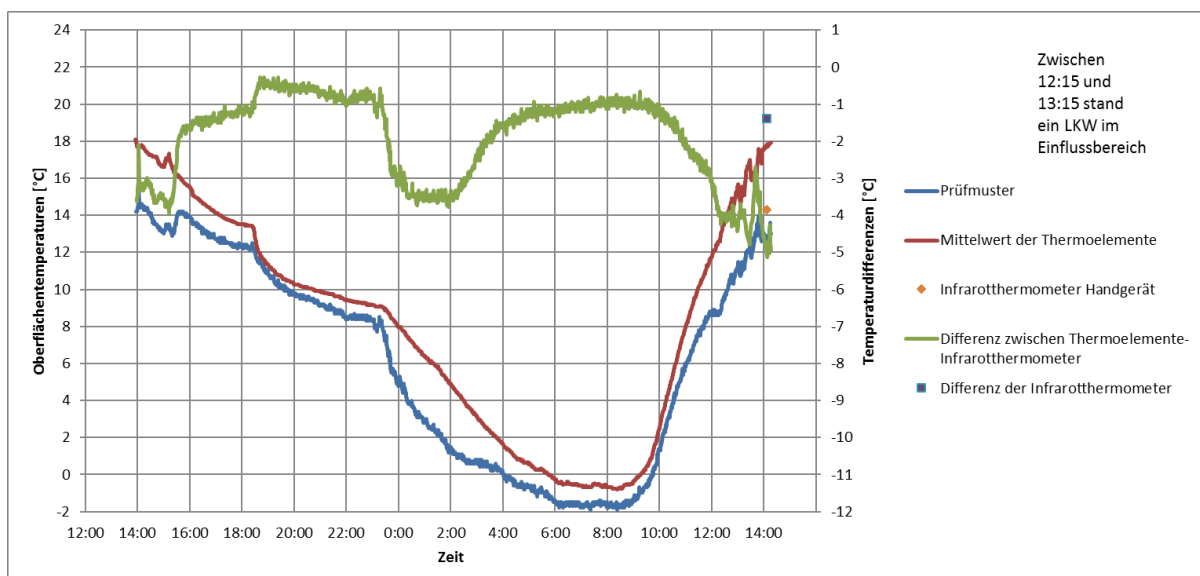


Bild 31: Verläufe der Fahrbahnoberflächentemperaturen auf dem Prüfstand vom 15.-16.01.2020

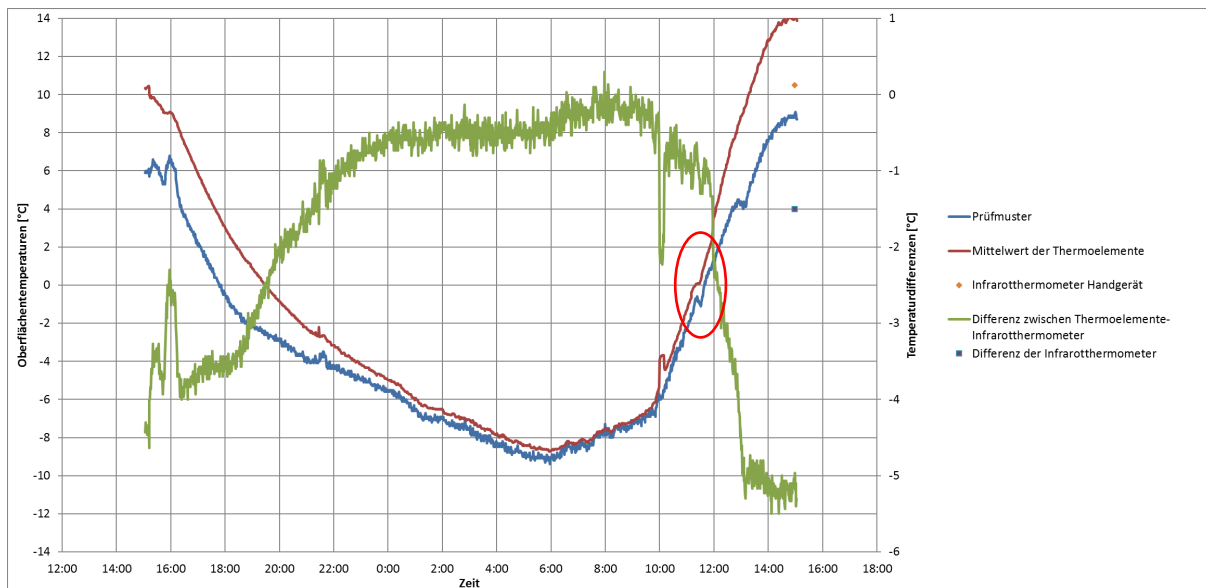


Bild 32: Verläufe der Fahrbahnoberflächentemperaturen auf dem Prüfstand am 20.-21.01.2020

In den Diagrammen sind von den Messwerten der drei Thermoelemente immer der Mittelwert abgebildet. Die Abweichungen zwischen den drei Sensoren betrug in den meisten Fällen 0,3 °C oder weniger. Einzelne größere Ausreißer eines Thermoelementes sind aufgetreten. Sie sind auch Ursache für größere kurzzeitige Differenzänderungen zu dem eingesetzten Infrarotthermometer (im Bild 32 um 21:30 Uhr und 10:00 Uhr). Eine genaue Ursache ist nicht bekannt.

Beide Diagramme (Bild 31 und Bild 32) weisen über den Messzeiträumen sehr unterschiedliche Differenzen zwischen den Thermoelementen und dem Infrarotthermometer auf. Die Differenzen sind immer dann höher, wenn ein größerer zeitlicher Gradient im Messverlauf auftritt. Das ist ein deutlicher Hinweis, dass ein eher wolkenfreier Himmel bestand. Am 21. Januar wurde gegen 15 Uhr bei einer Einzelmessung mit einem höherwertigen Infrarotthermometer (Typ KT19.82 II der Firma Heitronic für Handbetrieb) wolkenlosem Himmel beobachtet. Bei der gleichartigen Einzelmessung am 16. Januar lag nur eine leichte Bewölkung vor.

Aufgrund des Strahlungseinflusses wird an der Oberfläche je nach Ein- oder Ausstrahlung eine wärmere bzw. kühlere Temperatur als im Inneren des Körpers angenommen. Daher wird bei Infrarotmessung eine höhere oder niedrige Temperatur als bei den innerhalb des Bitumenkörpers installierten Thermoelementen erwartet. Bei der Ausstrahlung - fallender Temperatur - ist es auch der Fall. Im Fall der Einstrahlung tritt diese Erwartung allerdings nicht ein. Hier übersteigen die gemessenen Temperaturen der Thermoelemente die gemessene Temperatur des Infrarotthermometers. Weitere Wärmeströme zur Oberfläche kommen auch von außerhalb des Körpers (Wärmeaustausch mit der Luft je nach Luftbewegung und Temperaturdifferenz bzw. Verdunstung von Wasser auf der Oberfläche). Nur der Wärmestrom aus der Bitumenplatte selber könnte höhere Wärme im Bereich der Thermoelemente erzeugen, dieser wird aber im Vergleich zur Energiezufuhr durch die Sonnenstrahlung und durch Energiespeicherung der vergleichsweise dünnen Platte als deutlich geringer angesehen. Genaue Messungen von Parametern zur Einschätzung der Wärmeströme lagen nicht vor, sind aber für die Zukunft geplant.

Eine Besonderheit kann noch im Bild 32 um etwa 11:30 Uhr beobachtet werden. An diesem Tag gab es großräumig viel Nebel, der zur Bereifung der Straßen führte. Es kann daher davon ausgegangen

werden, dass auch der Probekörper stärker bereift war. Durch die Sonneneinstrahlung kam es dann zum Tauprozess, bei dem die Temperatur bis zur vollständigen Umwandlung von Eis in Wasser bei 0°C verhardt. Dieser Effekt könnte hier auch aufgetreten sein. Die Temperaturen verweilen bei dieser Umwandlung längere Zeit um 0°C, obwohl sie vorher und auch danach große zeitliche Gradienten im Verlauf aufweisen. Das wäre ein Hinweis, dass die Thermoelemente auch in dieser Installationsform genau messen.

5.2.6 Zusammenfassung und Empfehlungen zur weiteren Nutzung

Die Messergebnisse vom Testfeld mit den hohen Differenzen zeigen, dass es sich bis heute als besonders schwierig erweist, eine genaue (wahre) Temperatur einer Oberfläche zu messen. Es bleibt die Frage, wie eine Oberflächentemperatur sehr genau gemessen werden kann?

Messunsicherheiten über $\pm 1^\circ\text{C}$ können schnell zu Fehleinschätzungen einer Situation führen. Die Ergebnisse des Testfeldes zeigen entsprechende Fälle. Sie führen zu Zeitverschiebungen bei der Aussage, wann eine Gefrierbildung beginnen kann. Dies können mehrere Stunden sein. Im Einzelfall sind auch Fälle aufgetreten, dass aufgrund zu hoch gemessener Werte für die Fahrbahnoberflächentemperatur eine beobachtete Schneedecke für unplausibel angesehen und damit nicht erkannt wurde (siehe beschriebener Fall am 20.01.2017 mit Bild 20 und Bild 46).

Für die Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur werden nach den vorliegenden Erfahrungen nur die Bodensonden empfohlen. Ihre richtige Kalibrierung kann vor dem Einbau in einem Wasserbad mit Referenzthermometer sehr gut kontrolliert werden. Die hohe Genauigkeit nach DIN EN 15518-3 (DIN 2011) mit $\pm 0,2^\circ\text{C}$ haben alle auf dem Testfeld eingesetzten Bodensonden-Typen im Flüssigkeitsbad erfüllt. Trotzdem muss in der Praxis mit größeren Abweichungen bis zu ± 1 Kelvin von einem wahren Wert gerechnet werden. Diese Toleranzen entstehen durch das unterschiedliche Reaktionsverhalten der Bodensonden auf die in der Praxis vorhandenen Wärmeströme (siehe Absatz 5.2.2). Im Einzelfall können sie je nach Sensorbauart auch größer sein. Kleinere Bodensonden mit fahrbahnähnlichem Material werden als die theoretisch genauere Option gesehen, da die enthaltenen eigentlichen Sensoren für die Temperaturmessung näher an der eigentlichen Fahrbahnoberfläche platziert werden können. Entscheidend ist aber auch, wo der eigentliche Messfühler innerhalb der Sonde liegt. Der genaue Aufbau der Bodensonden ist dem Nutzer nicht bekannt.

Die Infrarotthermometer wiesen dagegen untereinander höhere Differenzen im Vergleich zu den Bodensonden untereinander auf. Dabei wird der Einfluss der unterschiedlichen Sensorlage im Testfeld – Infrarotsensoren auf dem rechten Fahrstreifen und Bodensonden auf dem linken Fahrstreifen – nicht als die Ursache gesehen. Der Vergleich des vorhandenen Infrarotsensors im gleichen Querschnitt wie die Bodensonden weist noch höhere Differenzen als bei den zuvor genannten Vergleichen auf. Es bestand bei den Untersuchungen keine Möglichkeit, diese Bauform hinreichend genau zu bewerten. Aufgrund der möglichen Alternative durch die Sensoren in den Bodensonden werden sie für den Einsatz in den Straßenwetterstationen zurzeit nicht empfohlen.

Das Wissen, dass die Messungen nur Aussagen für kleine Punkten im Vergleich zur umliegende Strecke darstellen, sollte neben den Messunsicherheiten bei Entscheidungen immer mitberücksichtigt werden. Zusätzlich müssen entsprechende Erfahrungen zur Messunsicherheit der vorhandenen Sensoren im zu verantwortenden Streckennetz gesammelt werden. Bei Beginn der Nutzung eines neuen Sensors sollte daher bei angegebenen Temperaturen etwas über 0°C mit Glättegefahren gerechnet werden.

Trotz der festgestellten Toleranzen bei den Bodensonden stellen diese Messwerte eine sehr wertvolle Hilfe für Winterdienstentscheidungen dar, die ohne Messungen nicht getroffen werden könnten. Ein geringere Messunsicherheit könnte aber den Winterdienst noch zielgerichteter durchführen lassen.

5.3 Fahrbahnzustand und Wasserfilmdicke

5.3.1 Definition, Anforderungen und eingesetzte Sensoren

Die derzeitige Europäische Norm EN 15518-3 [DIN 2011] gibt für den Fahrbahnzustand fünf anzugebene Qualitätsstufen vor. Es sind die Stufen „trocken“, „feucht“, „nass“, „fließendes Wasser“ und „glatt“. Der Übergang von „trocken“ zu „feucht“ soll bei einer Wasserfilmdicke von 0,01 mm erfolgen. Eine Wasserfilmdicke von 0,01 mm ist auf einer Fahrbahnoberfläche schon deutlich anhand der Farbänderung sichtbar, wenn beide Zustände nebeneinander liegen. Der Grenzwert zwischen „feucht“ zu „nass“ ist mit 0,2 mm definiert. Ab etwa dieser Höhe muss mit einem Abfließen eines Niederschlages zusammen – sofern vorhanden – mit gelöstem Salz von der Fahrbahn gerechnet werden. Ein Winterdienst sollte beim „nass“ und Temperaturen unter 0°C schnell wiederholt werden. Je nach Neigung und Oberflächenrauigkeit kann das auch bei anderen Wasserfilmdicken beginnen. Der Übergang von „nass“ zu „fließendes Wasser“ ist bei 2 mm Wasserfilmdicke festgelegt. Letztere Angabe spielt für den Winterdienst keine Rolle, da bei derart hohen Wasserfilmen auch kurzfristig kein Salz auf der Fahrbahn verbleibt. Sie treten auch nur extrem selten auf. Die Sensoren sollen „glatt“ anzeigen, wenn Eis, Schnee, Reif auf der Fahrbahn bzw. Sondenoberfläche teilweise oder vollständig vorhanden ist. Schneematsch wäre nach dieser Normanforderung als „glatt“ zu melden. Eine genaue Angabe, welcher Anteil an Schnee oder Eis in der Gesamtmenge vorhanden sein muss, fehlt.

Die Stufung der Fahrbahnzustandsangaben hängt damit überwiegend von der Messung der vorhandenen Wasserfilmdicke ab. Die DIN EN 15518-3 fordert bei der Wasserfilmdickenmessung eine Genauigkeit von +/-30%. Dementsprechend können auch die Angaben bei Fahrbahnzustand variieren. Allerdings wird der Messbereich für die Wasserfilmdicke mit Werten zwischen 0,2 und 3 mm angegeben. Für den Winterdienst sind mehr die Wasserfilmdicken unter 0,2 mm von Interesse. Deshalb bringt die Messung der Wasserfilmdicke mit diesen Anforderungen kaum einen Nutzen für die Winterdienststeuerung. Zum Zeitpunkt der Erstellung der Norm haben die beteiligten Hersteller diese Anforderungen als Stand der Technik für die Bodensonden gesehen.

Den Fahrbahnzustand und die Wasserfilmdicke messen auf dem Testfeld folgende fünf Bodensonden:

- 2x IT-Sens der Firma Boschung
- IRS31pro der Firma Lufft
- 2x DRS511 der Firma Vaisala (Angaben eines DRS511 erst ab dem 16.03.2018)

Alle Bodensonden sind in der Mitte des linken Fahrstreifens einbaut.

Folgende vier Sensoren messen den Fahrbahnzustand und die Wasserfilmdicke berührungslos:

- 2xNIRS31 der Firma Lufft
- RCO der Firma Boschung
- DSC111 der Firma Vaisala

Je ein Sensor der genannten berührungslos arbeiten Typen misst auf dem rechten Fahrstreifen. Der zweite NIRS31 (Testfeldbezeichnung NIRS31-2) misst im linken Fahrstreifen.

Alle Sensoren sollten gemäß der Leistungsbeschreibung die genannten Anforderungen der DIN EN 15518-3 erfüllen.

Die Messflächen bei den berührungslos arbeitenden Sensoren für den Fahrbahnzustand sind, soweit bekannt, unterschiedlich. Sie entsprechen nicht den Messflächen der Infrarotthermometer. Die Messfläche beträgt bei dem NIRS31 rund 70 cm Durchmesser bei der gewählten Anbringung in ca. 6 m Höhe. Vaisala gibt für den DSC111 für die Installationsanordnung im Testfeld mit ca. 20 cm Durchmesser eine kleinere Messfläche an. Vom RCO ist keine Messflächengröße bekannt. Die Messflächenangaben variieren nach Herstellerangaben je nach installierter Höhe und dem Winkel zur Fahrbahnoberfläche.

Weitere Angaben zur Positionierung sind im Abschnitt 4.2.2 enthalten.

5.3.2 Stand der Prüftechnik

Bodensonden mit Sensoren für den Fahrbahnzustand bzw. Wasserfilmdicke können durch definiertes Aufsprühen von Wasser mit einem maschinengeführten Sprühventil getestet werden (Bild 33). Anhand einer Platte mit definierten Abmessungen als Referenzfläche, die innerhalb des Sprühbereichs liegt, lässt sich die aufgesprühte Wasserfilmdicke sehr genau bestimmen (Bild 34). Die Platte wird vor und nach dem Aufsprühen gewogen. Aus der Differenz der Wägung und der definierten Plattengröße von 300 cm² lässt sich die aufgetragene Wasserfilmdicke berechnen. Die Entwicklung des Verfahrens mit den Genauigkeitsuntersuchungen ist in [Badelt et al. 2006] genauer beschrieben. Die Verfahrensbeschreibung ist in die veröffentlichte CEN/TS 15518-4 [DIN 2013] eingeflossen.



Bild 33: Sprühvorrichtung im Labor

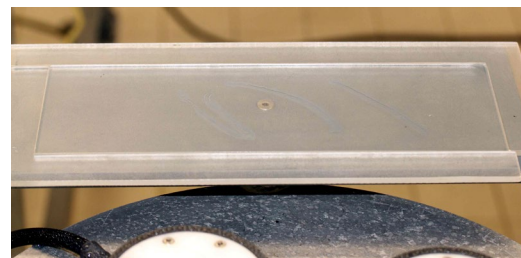


Bild 34: Referenzfläche zur Ermittlung der aufgetragenen Wasserfilmdicke, sichtbare Unterschiede auf der Platte sind durch Wischen mit einem Finger entstanden

Es lassen sich Wasserfilmdicken ab ca. 0,01 mm auftragen. Durch Änderung des Druckes im Zulauf des Wassers zur Düse und der Geschwindigkeit der Sprühventilführung können verschiedene Wasserfilmdicken appliziert werden. Die Aufbringung einer vorgegebenen Wasserfilmdicke ist aufgrund der Abweichungen an den Einstellelementen derzeit mit ca. $\pm 20\%$ möglich. Bei der Bestimmung der aufgetragenen Wasserfilmdicke über die Referenzplatte liegt der größte Fehler zur genauen Einschätzung bei der Wägung. Der Fehler der Waage liegt bei maximal 0,02 g Toleranz im gesamten Messbereich. Bei Auftrag einer Wasserfilmdicke von theoretisch 0,01 mm müssen 0,3 g Wasser auf der Platte sein. Somit liegt der Wägefehler unter 10%. Die Gleichmäßigkeit wird auf der Platte nur visuell bewertet. Bei der Entwicklung des Verfahrens wurden kleinere Flächen mit 1x30 cm betrachtet [Badelt et al. 2006]. Eine genaue Beschreibung zur Bewertung Gleichmäßigkeit ist für die zu überarbeitende CEN/TS 15518-4 erstellt worden (siehe Anhang 5).

Bei dem Auftrag von höheren Wassermengen unter Einsatz von Regenwasser bilden sich auf glatten Flächen Tropfen. Diese sind auch auf den Bodensonden erkennbar. Auf einer vergleichweisen rauen Fahrbahnoberfläche treten diese Tropfenbildungen nicht auf. Die Hersteller setzen für den Nachweis

der richtigen Messung einer Wasserfilmdicke auf den Bodensonden ein Wasserentspannungsmittel ein. Das führt zu einem gleichmäßigen Wasserfilm auf den Bodensonden. Eine andere Methode ist der Einsatz einer Mikrometerschraube auf der Bodensonde im Bereich des eigentlichen Sensors. Das setzt aber eine sehr plane Sensoroberfläche voraus. In der Praxis entstehen diese gleichmäßigen Wasserfilme auf den Bodensonden nicht. Dazu kommt, dass bei den Prüfungen die Bodensonden absolut eben unter der Sprühvorrichtung liegen, sonst würden höhere Wasserfilme abfließen. In der Fahrbahn besitzen sie eine Neigung. Beobachtungen zeigen diese Ungleichmäßigkeiten in der Praxis.

Die bisherige Sprühvorrichtung ist portabel und kam auch schon mehrfach für in die Fahrbahn eingebaute Bodensonden zum Einsatz. Des Weiteren ist sie zur Prüfung von berührungslos arbeitenden Sensoren mit kleineren Messflächen einsetzbar. Für diesen angedachte Einsatz hat die BAST ebenfalls eine Verfahrensbeschreibung für die Einbringung in die CEN/TS 15518-4 erstellt (siehe Anhang 5). Die Anwendung wird derzeit vorbereitet.

Eine einfachere Testmethode ist der sogenannte Tuchtest. Hierbei wird von einer definierten Fläche das Wasser mit ein oder mehreren gut saugfähigen Tüchern aufgesaugt. Die Tücher werden vor und nach der Wasseraufnahme gewogen. Aus der Massedifferenz des Tuches vor und nach dem Aufsaugen wird die Wassermenge ermittelt. Aus diesem Wert lässt sich zusammen mit den Flächenmaßen eine vorhandene Wasserfilmdicke berechnen [FGSV 2017]. Für die Begrenzung der Fläche kann ein Rahmen genutzt werden (Bild 35). Fehler entstehen durch die nicht vollständige Aufnahme von der Fläche. Hier wird nach vorliegenden Erfahrungen durch Vergleich von aufgespritzten mit aufgesaugten Flächen bei etwa 0,03 mm geschätzt. Diese Aussage gilt für Flächen mit einer geringeren Makrorauigkeit. Bei einer größeren Makrorauigkeit können die nicht aufnehmbaren Wassermengen größer sein.



Bild 35: Durchführung eines Tuchtests (hier auf einer speziellen Prüffläche für berührungslos arbeitenden Sensoren)

Die Kontrolle von installierten Sensoren ist für die Aussagen „trocken“ oder „nicht trocken“ oder „glatt“ teilweise durch visuelle Beobachtung vor Ort oder per Fotos möglich. Sehr gut sind abtrocknende Fahrbahnen erkennbar, da die Abtrocknung nicht gleichzeitig erfolgt. Eine feuchtwerdende Fahrbahn ist dagegen selten erkennbar, da der Niederschlag gleichzeitig auf der gesamten Fahrbahn auftritt. Eine Feuchte ist dann erst anhand von Sprühfahnen hinter den Reifen oder anhand des Verschwindens der sichtbaren Fahrbahnrauigkeit erkennbar. Nur große einzelne Regentropfen auf Oberflächen können als Beginn einer Fahrbahnfeuchte auf der Fahrbahnoberfläche erkannt werden. Höhere Wasserfilmdicken sind durch Verschwinden der Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche oder Spiegelungen eindeutig erkennbar. Eine leichte Vereisung lässt sich aus den Fotos nicht ableiten. Schnee zu erkennen, ist durch die eindeutige Färbung wieder einfacher. Eine Verbesserung der Bewertung bei Dunkelheit bringen Infrarotscheinwerfer. Bild 36 bis Bild 41 zeigen verschiedene Beispiele zur möglichen Nutzung von Kameras. Weitere Verbesserungen der Bewertungsmöglichkeit ergeben sich, wenn

Bilderreihen vorliegen. Mit dem vorhandenen Ein-Minuten-Rhythmus bei den Aufnahmen im Testfeld sind gut schnellere Änderungen sichtbar.



Bild 36: Aufnahme bei Tageslicht, eine Feststellung trocken oder feucht ist nicht möglich



Bild 39: Aufnahme bei Dunkelheit, Wasser auf der Fahrbahn ist erkennbar



Bild 37: Aufnahme bei Tageslicht, ein partielles Abtrocknen ist gut erkennbar



Bild 40: Aufnahme bei Tageslicht, eine hohe Feuchte ist erkennbar



Bild 38: Aufnahme bei Dunkelheit, ein partielles Abtrocknen in den Rollspuren auf dem rechten Fahrstreifen ist erkennbar



Bild 41: Aufnahme bei Dunkelheit, Schnee ist gut erkennbar

Als eine weitere Methode für die Beurteilung kommen Plausibilitätsbetrachtungen in Betracht (siehe Abschnitt 5.1). Wenn andere Parameter einen angezeigten Fahrbahnzustand eigentlich nicht zulassen, ist die Angabe zumindest als nicht plausibel einzuschätzen. Allerdings können auch die anderen Parameter fehlerhaft gemessen sein.

Bei allen genannten laborartigen Prüfungen wird ein statisches Verhalten der Fahrbahnzustände und der Wasserfilmdicken betrachtet. Auf der Fahrbahn ergibt sich durch den Verkehr ein sehr dynamisches Verhalten. Für die Prüfung dieses Verhaltens müssen noch entsprechende Verfahren entwickelt werden.

5.3.3 Stand der Sensortechnik – Ergebnisse von laborartigen Tests

Tests von Bodensonden fanden bereits mit der Entwicklung des im Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Verfahrens mit der Sprühvorrichtung statt. Der Übergang von „trocken“ zu „feucht“ wird von eingebauten Sensoren meist problemlos erkannt. Schwierigkeiten traten im Labor auf, wenn eine Bodensonde wieder abgetrocknet werden soll. Wahrscheinlich verhindern subjektiv nicht mehr wahrnehmbare Salzreste bei höherer Luftfeuchte eine vollständige Abtrocknung. Die Sensoren reagieren darauf sehr empfindlich. In der Praxis muss anhand einer Taupunkttemperatur- und Niederschlagsbetrachtung entschieden werden, ob eine Feuchte auf dem Sensor bzw. im umliegenden Fahrbahnbereich durch feuchte Luft oder durch vorhandenes Salz vorhanden sein kann.

Laborprüfungen von Bodensonden zeigen häufig, dass eine höhere Wasserfilmdicke nur richtig angegeben werden kann, wenn eine sehr gleichmäßige Verteilung auf der Sonde gegeben ist. Dies wird in der Regel nur mit wasserentspannenden Mitteln oder geschicktes Verwischen einer aufgetragenen Feuchte und bei horizontaler Lage des Sensors erreicht. Diese Bedingungen sind in der Praxis nicht gegeben. Wird Regenwasser ohne Wasserentspannungsmittel fein aufgesprüht, bilden sich auf den Sensoroberflächen Tropfen. Diese Tropfen lagern sich unterschiedlich ab (siehe Bild 42). Aufgrund dieser Tatsache und den viel kleineren eigentlichen Sensoren innerhalb der Bodensondenoberfläche ergeben sich bei den Tests dieser Art immer wieder sehr unterschiedliche Ergebnisse.

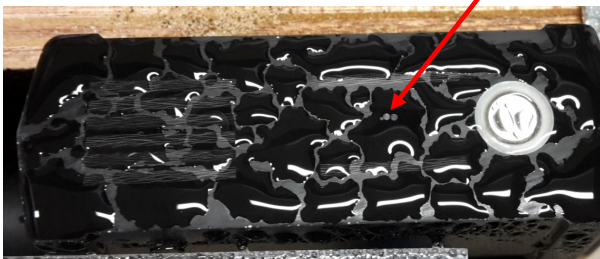


Bild 42: Verteilung von Wasser auf einer Bodensonde, der rote Pfeil weist auf den sehr kleinen - punktförmigen - eigentlichen Sensor

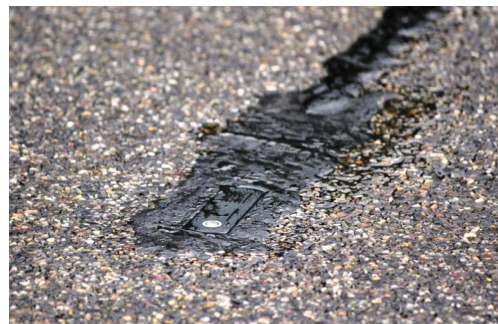


Bild 43: Bedeckung einer in der Fahrbahn eingebauten Bodensonde

Der Testfeldaufbau auf der BAB A4 erlaubt sehr gute Möglichkeiten zur Beobachtung des Verlaufs eines Wasserfilms auf den Bodensonden unter Verkehr. Die Bedeckung stellt sich wesentlich ungleichmäßiger im Vergleich zum Besprühen im Labor dar (Bild 43). Unter Verkehr ändern sich die Bedeckungen auf den Sonden auch sehr schnell. Als Beispiel wird hier die Bodensonde DRS511 gezeigt, bei der dieses Verhalten durch die schwarze Sensoroberfläche sehr gut visualisiert werden kann. Auf den anderen Bodensonden ist ein gleiches Verhalten im Labor und in der Fahrbahn ähnlich erkennbar.

Im Rahmen der Projektarbeit wurden die verschiedenen Bodensonden im Labor untersucht. Die Ergebnisse sind im Anhang 4 dokumentiert. Sie bestätigen die zuvor genannten Aussagen. Teilweise traten sogar Schwierigkeiten bei dem Übergang von trocken zu feucht auf. Nach diesen Ergebnissen können die Sensoren nur als bedingt hilfreich angesehen werden.

Für die berührungslos arbeitenden Sensoren sind bislang nur Ergebnisse von Tuchttests bekannt [Haug 2016]. Sie haben nur teilweise eine Übereinstimmung zu den Sensorwerten ergeben. Aufgrund des geringen Umfangs an Messungen war eine genaue Bewertung dieser Sensorbauart bislang nicht möglich. Bei Vergleichstests dieser Sensoren zeigten sich unter gleichen Praxisbedingungen immer wieder größere Differenzen bei den Angaben zur Wasserfilmdicke und Fahrbahnzustand [z. B. Haug 2016, Schedler 2014].

5.3.4 Testfeldergebnisse – statistische Betrachtungen

Die statistischen Auswertungen der Ergebnisse zur Wasserfilmdicke und zum Fahrbahnzustand zeigen ebenfalls große Unterschiede zwischen den Sensoren auf dem BAST-Testfeld. Bild 44 gibt die Häufigkeit in Stunden der verschiedenen Angaben zum Fahrbahnzustand gemäß EN 15518-3 im Januar 2017 wieder. Die Unterschiede sind extrem hoch. Während die Sensortypen NIRS31 und DRS511 nur bis zu rund 3 Stunden Glätte anzeigten, zeigte ein Sensor vom Typ IT-Sens rund 122 Stunden eine Glätte auf dem linken Fahrstreifen an. Diese Angaben werden als falsch angesehen, da die Beobachtung anhand der Fotos in diesem Beobachtungszeitraum zusammengefasst nur rund fünf Stunden eine sicher erkannte Schneebedeckung in der Mitte des linken Fahrstreifens wiedergibt. Nicht in jedem Fall kann die Glätte durch die Fotobewertung genau erkannt werden. Allerdings wird aufgrund der vorbeugenden Winterdienstmaßnahmen und vorhandenen Witterungsbedingungen im Bewertungszeitraum keine Glättebildung von mehr als 25 Stunden im betrachteten Monat angenommen.

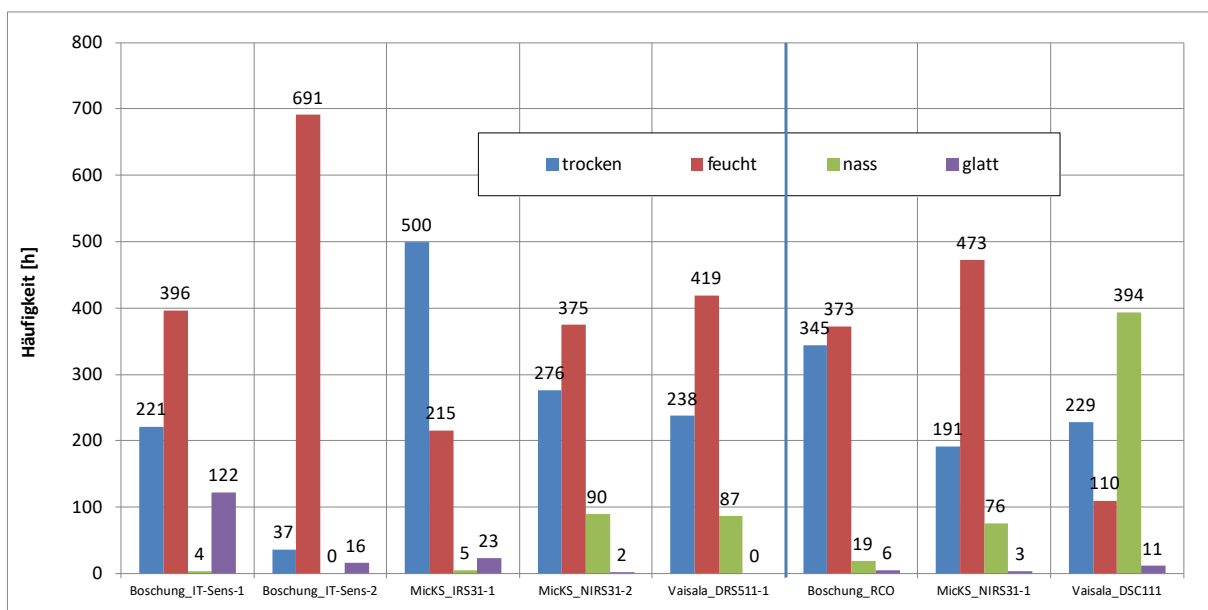


Bild 44: Anzahl der Angaben zu den Fahrbahnzuständen gemäß 15518-3 auf dem Testfeld der BAST im Januar 2017

Die Angabe „trocken“ als wichtiger Hinweis für zunächst nicht notwendige Winterdienstarbeiten schwankte zwischen 37 und 500 Stunden! Ebenfalls hohe Differenzen gab es bei den Angaben „feucht“ und „nass“. Die Sensoren der Firma Vaisala hielten sich nicht an die geforderten und als sinnvoll angesehenen Norm-Vorgaben. Der Angabenwechsel von „feucht“ zu „nass“ erfolgte hier bereits bei einer Wasserfilmdicke von ca. 0,04 mm. Die Sensoren der Firma Vaisala erfüllten damit nicht die gestellten Anforderungen.

Extreme Unterschiede bei fast allen Angaben zeigten die beiden baugleichen Sensoren IT-Sens der Firma Boschung.

Tendenziell ist in diesem Zeitraum zu erkennen, dass die berührungslos arbeitenden Sensoren eine höhere Anzahl des Falles „nass“ meldeten. Diese Tendenz lässt sich deutlicher darstellen, wenn die Angaben für Häufigkeitsbetrachtungen nach Schaltungsgrenzen gemäß den FGSV-Hinweisen zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen betrachtet werden [FGSV 2017]. Die berührungslos arbeitenden Sensoren würden in der Summe zu einer wesentlich höheren Anzahl von Schaltungen beitragen als die Bodensonden (Bild 45). Hier sind besonders die Fälle bei der Klasse von 0,2 bis 0,5 mm zwischen beiden Bauarten gravierend unterschiedlich. Bei den Nässestufen mit höheren Wasserfilmen sind die Unterschiede nicht so extrem. Sie können aber immer noch als hoch bezeichnet werden.

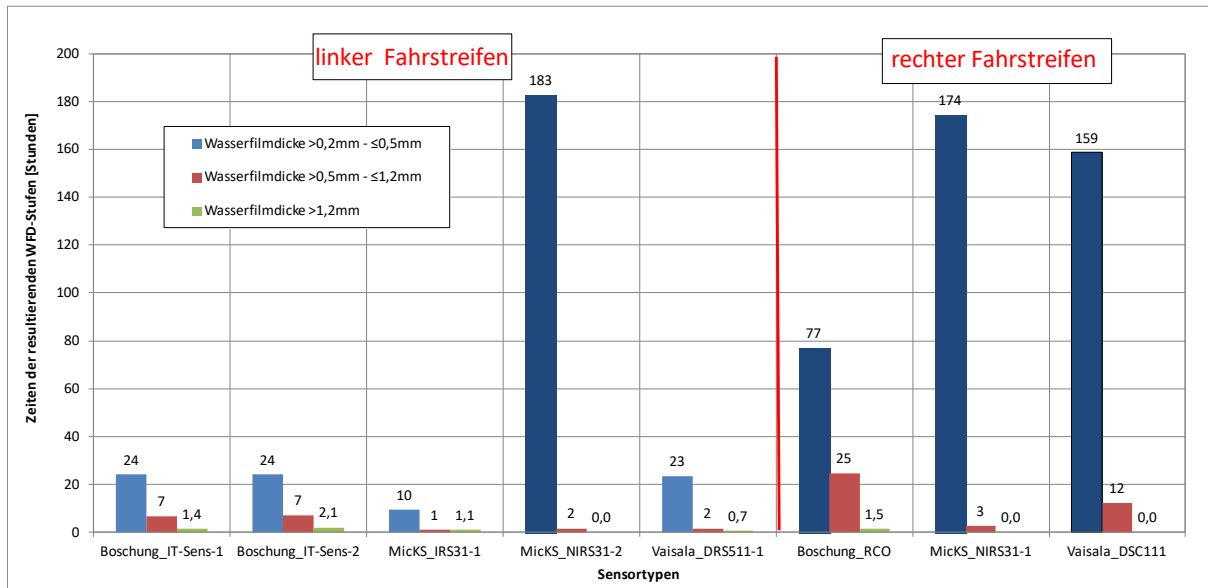


Bild 45: Anteile von Wasserfilmdicken in verschiedenen Klassen im Zeitraum 21. Dezember 2016 bis 7. März 2017 (ca. 1800 h), die blauen Farbstufen bei der Klasse bis 0,5 mm dient der Unterscheidung von Bodensonden (hellblau) und berührungslos arbeitenden Sensoren (dunkelblau)

Grundsätzlich muss wie schon bei der Fahrhahnoberflächentemperatur zwischen den Situationen auf dem linken und rechten Fahrstreifen unterschieden werden. Hier ist vor allem die Fahrhahneigung zu berücksichtigen. Bei fließendem Wasser durch stärkeren Niederschlag kann auf der „unteren“ Hälfte der Fahrhahn im rechten Fahrstreifen eine höhere Wasserfilmdicke vorhanden sein. Andererseits können die Spurrillen auf dem rechten Fahrstreifen ein Fließen auch stoppen. Auf dem rechten Fahrstreifen ließen sich vor den Einbau Rollspur-Vertiefungen bis 4 mm messen. Durch Überfahrten wird es aber immer wieder zu Umverteilungen nicht nur in Längs- sondern auch in Querrichtung kommen. Messtechnisch als richtig anzusehende Unterschiede können auch durch die unterschiedlichen Messflächengrößen entstehen.

Bild 46 gibt ein Beispiel eines Tagesverlaufs der angezeigten Fahrhahnzustände am 2. Januar 2017 an. Zwischen ca. 3 Uhr und 8 Uhr fiel Niederschlag als Schnee. Streueinsätze fanden nach den Aufzeichnungen gegen ca. 0 Uhr, 4 Uhr und 5 Uhr statt. Zwischen 3:45 Uhr und 6:50 Uhr ist auf den Fotos eindeutig Schneematsch in der Mitte des linken Fahrstreifens erkennbar. Für den rechten Fahrstreifen lassen die Fotos keine Aussagen zur Glättebildung zu. Die dort messenden Sensoren geben die Situation überwiegend als „glatt“ an.

Auf dem linken Fahrstreifen zeigt nur der IRS31pro den erkennbaren Schneematsch richtig als „glatt“ an. Alle anderen Sensoren auf diesem Fahrstreifen zeigen entweder nur kurze Zeit oder nie eine Glätte

an. Beim NIRS31 wäre dies auch widersprüchlich zur gemessenen Fahrbahnoberflächentemperatur. Diese sank in diesem Zeitraum nicht unter 0°C (siehe Bild 20).

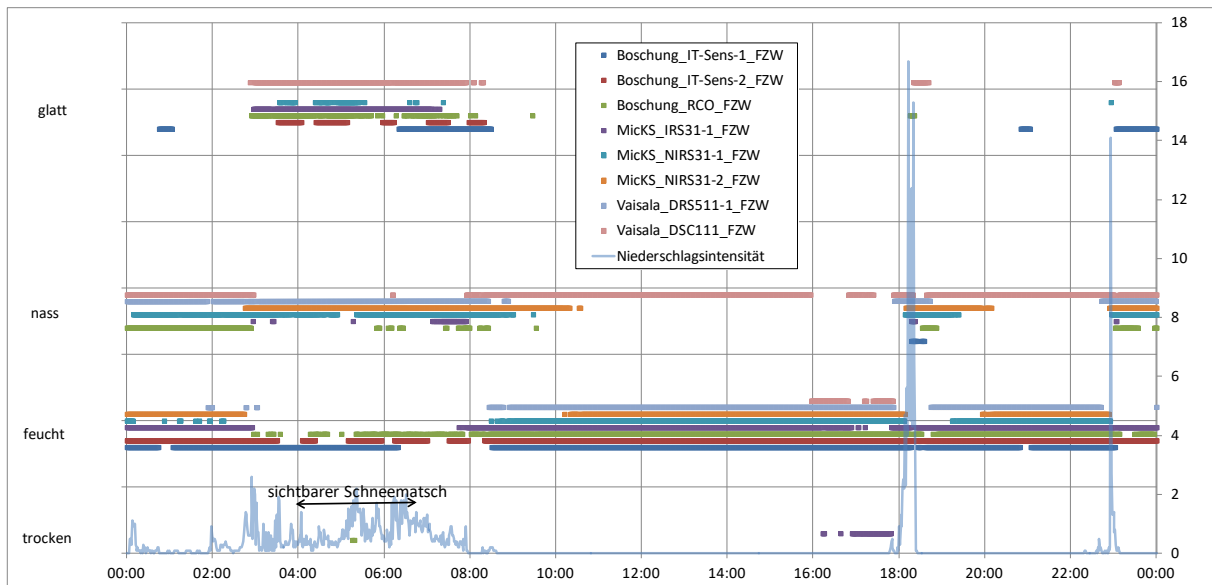


Bild 46: Verlauf der Fahrbahnzustände am 02. Januar 2017

Weitere Bewertungen zu Glättesituationen wurden mit den Daten aus dem Winter 2016/17 auch aufgrund des weniger winterlichen Wetters nicht vorgenommen. Aus den dargestellten Ergebnissen des Januars 2017 lässt sich keine sinnvolle Nutzung des Parameters Fahrbahnzustand ableiten.

Die Ergebnisse wurden mit den Herstellern diskutiert. Nach den Wartungsarbeiten am 08.12.2017 erfolgte eine gleichartige Auswertung für den Zeitraum ab dem 09.12.2017 bis 31.03.2018 wie für den Januar 2017. Im angegebenen Zeitraum gab es mehrere Glättesituationen durch Schneefall. Glättesituationen durch Reif oder Eis konnten anhand der Fotos nicht erkannt werden. Sie werden aufgrund der Witterungsbedingungen und Winterdienstmaßnahmen auch als recht unwahrscheinlich angesehen.

Die statistische Auswertung zur Häufigkeit der gemeldeten Fahrbahnzustände fällt im Winter 2017/18 im Vergleich zum Januar 2017 deutlich besser aus (vergleiche Bild 44 und Bild 47). Trotzdem sind noch teils sehr große Unterschiede von Sensor zu Sensor zu erkennen. Besonders auffällig ist die unterschiedliche Anzahl an Stunden für den Fahrbahnzustand „glatt“. Er wird je Sensor zwischen 7 und 138 Stunden angegeben. Fast alle Sensoren geben mit rund 1500 h etwa die gleiche Zeitlänge den Fahrbahnzustand „trocken“ an. Als Ausnahmen bei diesem Fahrbahnzustand weichen nur ein IT-Sens und der IRS31pro von diesem Wert ab. Die Firma Vaisala hat trotz der wiederholt gestellten Anforderung keine Anpassung an die geforderten Angaben der DIN EN 15518-3 bezüglich des Wechsels von „feucht“ zu „nass“ vorgenommen. Er erfolgt bei einem Wert von etwa 0,05 mm. Deshalb ist bei den Sensoren DRS511 und DSC111 die deutliche höhere Zahl der „Nässefälle“ nicht als Messfehler sondern als falsche interne Messwertinterpretation erklärbar.

Zwischen den berührungslos arbeitenden Sensoren auf dem rechten Fahrstreifen treten nur relative geringe Unterschiede auf. Die Abweichung des Sensors DSC111 der Firma Vaisala bei den Angaben zu „feucht“ und „nass“ ist auf das zuvor genannte Problem beim Übergang „feucht-nass“ zurückzuführen. Ebenfalls deutlich abweichend ist der NIRS31 bei der Meldung des Fahrbahnzustandes „glatt“ mit nur rund 50% der Zeitdauer im Vergleich zum RCO und DSC111.

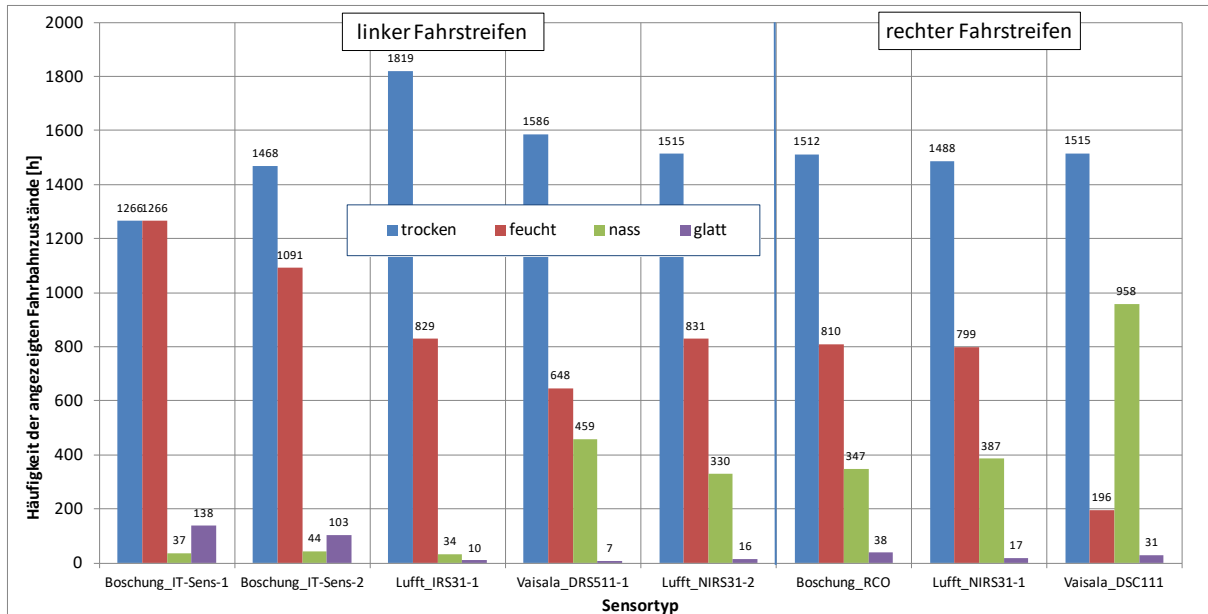


Bild 47: Anzahl der Angaben zu den Fahrbahnzuständen gemäß 15518-3 auf dem Testfeld der BAST im Zeitraum 08. Dezember 2017 bis 31. März 2018

Die im Januar 2017 festgestellte Tendenz, dass die Bodensonden im Vergleich zu den berührungslos arbeitenden Sensoren weniger Nässe anzeigen, bestätigt sich auch im Winter 2017/18. Bild 48 mit den herangezogenen gleichen SBA-Nässestufen führt zu den gleichen Aussagen wie zu Bild 45.

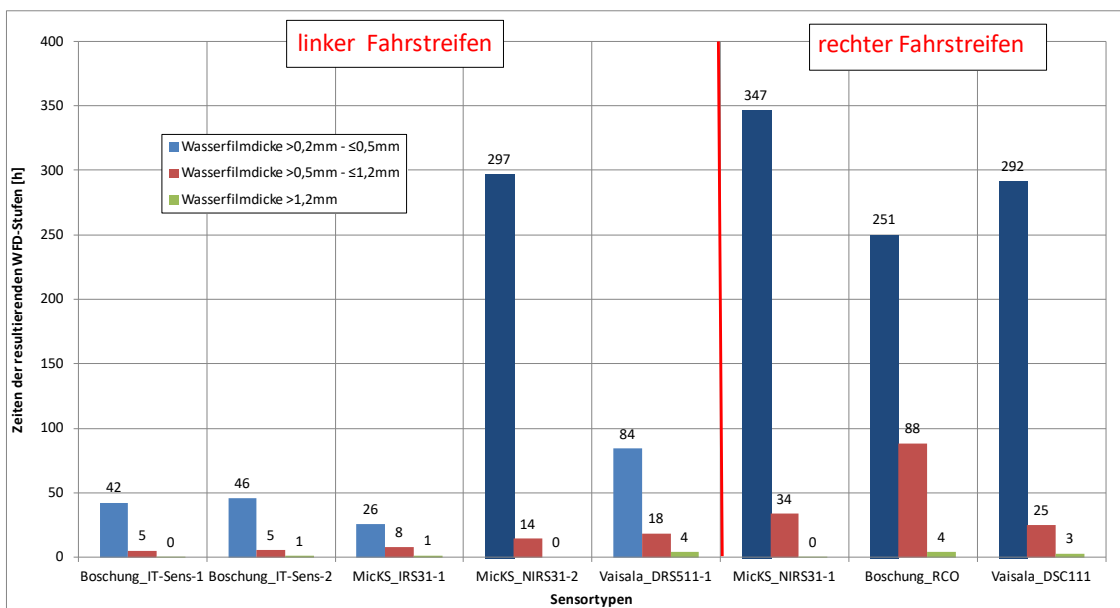


Bild 48: Anteile von Wasserfilmdicken in verschiedenen Klassen im Zeitraum 08. Dezember 2017 bis 31. März 2018 (ca. 2700 h), die blauen Farbstufen bei der Klasse bis 0,5 mm dient der Unterscheidung von Bodensonden (hellblau) und berührungslos arbeitenden Sensoren (dunkelblau)

5.3.5 Testfeldergebnisse – Sensorbewertungen

Für die Testfeldsensoren gab es nach dem Einbau keine Überprüfungen mit laborartigen Tests unter Einsatz der Sprühvorrichtung. Der Test der Bodensonden mit der Sprühvorrichtung wurde aufgrund der beschriebenen Ergebnisse im Labor als wenig hilfreich angesehen. Für den Einsatz der Sprühvorrichtung bei berührungslos arbeitenden Sensoren müssen erst noch Erfahrungen unter Laborbedingungen gesammelt werden.

Der Tuchtest wurde auf dem linken Fahrstreifen probiert. Aufgrund der dort vorhandenen hohen Makrorauigkeit wird er aber als zu ungenau angesehen. Er kam deshalb dort nicht weiter für Bewertungsaussagen zum Einsatz. Auf dem rechten Fahrstreifen bestanden aufgrund fehlender Sperrzeiten bei nassen Fahrbahnoberflächen keine Gelegenheiten zum Einsatz. Die Besprühung einer trockenen Fahrbahn mit einer Handspritze wird als zu ungenau für eine Bewertung gesehen.

Die Statistiken zeigen, dass die Sensoren unter gleichen Bedingungen vielfach nicht das Gleiche angeben haben können. Selbst bei etwa gleichartigem Zeitumfang für die einzelnen Fahrbahnzustände kann anhand nicht gesagt werden, ob die Sensoren immer zu den gleichen Zeitpunkten das Gleiche angeben haben.

Die nachfolgenden Bewertungen der einzelnen Sensortypen basieren auf den Situationsbeobachtungen auf dem Testfeld anhand der aufgenommenen Fotos (sogenannte Einzelfallbetrachtungen). Die Beobachtungen beinhalten alle Situationen mit Schneefall. Situationen von Glatteis, Eis- oder Reifglätte konnten nicht erkannt werden. Jeder Fall verläuft über 24 Stunden (außer Fall 1 über 36 Stunden). Innerhalb dieser je 24 Stunden können mehrere Befeuchtungs- und Abtrocknungsereignisse auftreten. Drei der genutzten Bewertungszeiträume werden in jeweils zwei Bewertungsfälle geteilt, da jeweils durch neuen Niederschlag auch neue Situationen auf der Fahrbahn entstanden. Somit wurden 15 Ereignisse betrachtet. Die Bewertungsentscheidungen (Anforderung erfüllt/nicht erfüllt) sind im Anhang 1 erläutert.

Darüber hinaus wurden die Werte des kompletten Zeitraumes vergleichend betrachtet. Konnten dabei mehrstündige Abweichungen eines Sensors gegenüber den anderen Sensoren festgestellt werden, fand eine Beurteilung dieser Situation statt. Wenn dabei ein Sensor häufiger abweichend zur sicheren Beobachtung auffällig war, ist dies mit in die Bewertung mit eingeflossen (siehe Ende von Anhang 1).

Fall	Datum	Fallart	Boschung		Luftt			Vaisala	
			IT-Sens	RCO	IRS31pro	NIRS31 links	NIRS31 rechts	DRS511	DSC111
1.1	10.12.2017	Schnee auf der Fahrbahn	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
1.2	10.12.2017	Regen bei Temperatur gering über 0°C	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2	12.12.2017	Schneeeregen	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3	13.12.2017	Regen	k.B.	k.B.	k.B.	k.B.	k.B.	k.B.	k.B.
4	18.12.2017	Schnee auf der Fahrbahn	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
5	29.12.2017	Regen	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	k.B.	k.B.	nicht erfüllt	k.B.
6	17.01.2017	Schnee auf der Fahrbahn	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
7.1	11.02.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
7.2	11.02.2018	Regen	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
8.1	12.02.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
8.2	15.02.2018	Regen/Schnee ohne Schneebedeckung mit Temperatur unter 0°C	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
9	15.02.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
10	02.03.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
11	18.03.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt/nicht erfüllt (Sensoren unterschiedlich)	erfüllt
12	20.03.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt

Tabelle 2: Zusammengefasste Bewertungen bei den Einzelfallbetrachtungen im Anhang 1 für die Angaben zum Fahrbahnzustand (k. B. = keine Bewertung)

Firma Boschung

– IT-Sens der Firma Boschung

Die beiden IT-Sens wurden im Oktober 2016 im Testfeld eingebaut. Die zuvor im Labor geprüften Sensoren konnten aufgrund von Defekten nicht eingebaut werden.

Beide IT-Sens melden die Angabe „glatt“ häufig über eine beobachtete Glätte hinaus, bei feuchter Fahrbahnoberfläche sogar vorab. Dabei meldet der IT-Sens gleichzeitig Bedingungen, die auf keine Glätte schließen lassen (Fahrbahnoberflächentemperatur über 0°C oder Gefriertemperatur unter der Fahrbahnoberflächentemperatur). Hier ist davon auszugehen, dass im Hintergrund eine Modellrechnung läuft, die Grenzbereiche mit einbezieht. Die Modellrechnung ist der BAST nicht übermittelt worden.

Die Angabe „feucht“ wird sehr häufig gemeldet, wenn die Fahrbahn schon trocken wirkt. Allerdings kann durch Restsalz auf der Fahrbahn eine Feuchte aus Luft gezogen werden. Eine Gefriertemperatur wird dabei aber nicht ausgegeben. Da andere Bodensonden im gleichen Messbereich diese Meldungen „trocken“ ausgeben, kann hier von einer besonders hohen Empfindlichkeit ausgegangen werden. Um welchen Menge Feuchtigkeit es sich hier handelt, kann derzeit nicht ermittelt werden.

Im Gegensatz zu der häufigen Feuchtemeldung bei einer subjektiv eher „trocken“ eingeschätzten Fahrbahn, haben die IT-Sens umgekehrt außerhalb der beschriebenen Situationen häufig eine „feucht“ beobachtete Fahrbahnoberfläche als „trocken“ gemeldet. Diese Meldungen müssen als kritisch gesehen werden, da sie zu einer Unterschätzung einer möglichen Glättegefahr führen können. Am Ende des Anhangs 1 sind 13 Zeiträume aufgeführt, bei denen diese Situation über eine Länge von etwa einer bis über vier Stunden aufgetreten ist.

Bei den Situationsbetrachtungen zeigen die IT-Sens in rund 79% der Fälle eine Übereinstimmung mit den Beobachtungen. In weiteren Fällen zeigten die IT-Sens keine Übereinstimmung zur Beobachtung und den Werten anderer Sensoren.

Eine Besonderheit der IT-Sens stellen die unterschiedlichen Formen der festgestellten Abweichungen dar. Damit kann sich schlecht auf die Arbeitsweise des Sensortyps eingestellt werden.

– RCO der Firma Boschung

Die Montage des bewerteten RCO fand im Juni 2017 statt.

Bei den Situationsbetrachtungen zeigt der RCO in rund 29% der Fälle eine Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Der RCO stimmt damit wenig mit den Beobachtungen vollständig überein. Häufig gibt er bei Schneebedeckung die Meldung „trocken“ an. Das tritt besonders dann auf, wenn der Schnee noch als sehr weiß beobachtet werden kann. Das wird als besonders kritisch gesehen, da mit diesem Verhalten eine Fehlinterpretation der Situation möglich ist.

Nach Angaben der Firma Boschung wird der RCO nicht mehr angeboten.

Firma Lufft

– IRS31pro

Bei den Situationsbetrachtungen zeigt der IRS31pro nur in rund 14% der Fälle eine Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Sein Hauptproblem stellt die fehlende Erkennung von Schnee oder Schneematsch dar. Er erkennt aber in diesen Fällen eine Feuchte. Eine weitere Eigenart des Sensors ist häufig

deutlich früher angegebene Abtrocknung einer Fahrbahnoberfläche. Dies kann im kritischen Temperaturbereich zu Fehleinschätzungen bei möglicher Glätte aufgrund noch vorhandener Feuchte führen.

– NIRS31

Bei den Situationsbetrachtungen zeigen die NIRS31 in rund 84% der Fälle auf dem rechten und in rund 62% der Fälle auf dem linken Fahrstreifen eine Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Die fehlende Übereinstimmung liegt in der häufigeren fehlenden Schneematsch-Erkennung.

Der NIR31 auf dem rechten Fahrstreifen weist vereinzelte Ausreißer bei hoher Verkehrsdichte auf, was auf eine Beeinflussung der Messungen durch Fahrzeuge hinweist. Diese hohen Verkehrsdichten führten dann dabei häufig zu erheblichen Geschwindigkeitseinbrüchen.

Firma Vaisala

– DRS511

Die beiden DRS511 wurden im Dezember 2017 im Austausch zu einem bereits vorhandenen Sensor installiert. Der zuvor vorhandene DRS511 wurde von der Firma als defekt erklärt. Der im weiteren DRS511-1 genannte Sensor lieferte die Daten unmittelbar nach der Installation. Die Daten des DRS511-2 konnten erst ab Mitte März 2018 nach einer Softwareanpassung des BAST-Servers gespeichert werden. Er bekommt daher keine Bewertung.

Bei den Situationsbetrachtungen zeigt der DRS511-1 in rund 36% der Fälle eine Übereinstimmung mit den Beobachtungen.

Die fehlende Erfüllung der Anforderungen ergibt sich aus der fehlenden Schneeererkennung. Hier zeigt er bei vielen Bewertungssituationen trotz längerer Schnee- oder Schneematsch-Beobachtung nie „glatt“ an. Er erkennt aber in diesen Situationen eine Feuchte.

Den Wechsel des Fahrbahnzustandes von „feucht“ nach „nass“ gibt der DRS511 nicht nach den Vorgaben der DIN EN 15518-3 an. Nach dem Werteverlauf findet er etwa zwischen 0,04 und 0,05 mm statt. Das ist deutlich unter der derzeitigen Anforderung mit 0,2 mm.

Eine Anpassung an die Anforderungen der bestehenden Europäischen Norm hat die Firma Vaisala trotz Aufforderung nicht umsetzen können. Daher sollte der Sensortyp nicht in Messnetzen mit Anforderungen nach EN 15518-3 eingesetzt werden. Bei Vergleichen zu Sensoren mit der entsprechenden Umsetzung der Vorgaben kann es zu unterschiedlichen Interpretationen der Daten kommen. Dieser Fehlinterpretation kann nur umgangen werden, wenn eine eigene Ableitung anhand der Wasserfilmdicke vorgenommen wird.

– DSC111

Bei den Fallbetrachtungen zeigt der DSC111 in rund 85% der bewerteten Fälle eine Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Probleme zeigt er in wenigen Fällen bei Schneematsch, nicht bei reinem Schnee. In einer Stellungnahme zu vorgenommenen Bewertungen weist die Firma Vaisala darauf hin, dass die sensorinternen Schwellwerte für die Aussage von Schneematsch als „glatt“ intern erst bei einem höheren Schneeanteil im Matsch erfolgt.

Der DSC111 gibt wie der DRS511 im Bewertungszeitraum den Wechsel des Fahrbahnzustandes von „feucht“ nach „nass“ nicht nach den Vorgaben der DIN EN 15518-3 an. Nach dem Werteverlauf findet er etwa bei 0,04 mm statt. Das ist deutlich unter der derzeitigen Anforderung mit 0,2 mm. Diese Anforderung hat die Firma nach dem betrachteten Winter durch eine Softwareanpassung erfüllt. Die

während des Bewertungswinters 2017/18 festgestellten Abweichungen zu den Anforderungen werden damit nicht als fehlende Messgenauigkeit des Sensors gewertet.

5.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Dieser Test zeigt wie bei allen bekannten vorherigen Vergleichstests von verschiedenen Sensoren unter Praxisbedingungen größere Differenzen bei den Angaben zur Wasserfilmdicke und zum Fahrbahnzustand [z. B. Badelt et al. 1996, Schedler 2014, Haug 2016].

Bei einer Betrachtung der Daten von verschiedenen Herstellern in einem Messnetz ist für die Vermeidung von Fehlinterpretationen unabdingbar, dass die Sensoren für gleiche Situationen auch gleichartige Angaben eines Fahrbahnzustandes ausgeben. Daher ist die Anzeige nach einheitlichen Vorgaben notwendig. Dies konnte bei diesem Test trotz eindeutig vorgegebenen Anforderungen gemäß der DIN EN 15518-3 nicht vollständig von allen Herstellern umgesetzt werden. Bei dem Parameter „Fahrbahnzustand“ ist dies für die Sensoren der Firma Vaisala in Bezug auf die Umsetzung des Übergangs von „feucht“ auf „nass“ zu nennen. Die Firma hat es nur für den DSC111 nachträglich umsetzen können.

Die Einzelfallbetrachtungen ergeben, dass insbesondere der Zustand „glatt“ oft nicht richtig erkannt wird. Das trifft besonders für die Bodensonden und den Sensor RCO zu. Eine direkte Messung von Schnee und meist auch bei Eis ist nach den bekannten Arbeitsweisen der Bodensonden nicht möglich. Sie verwenden andere Messwerte, um eine Glätte abzuleiten. Dazu nutzen sie scheinbar im Hintergrund Modelle, die bei der Anwendung im Testfeld nicht bekannt waren. Die Hersteller versuchen eher eine Glättestufe anzugeben, die aber nicht gefordert ist. Mit wenigen Ausnahmen lässt sich aus den Parametern Fahrbahnoberflächentemperatur und Fahrbahnzustand eine Glättegefahr ableiten. Aus diesem Grund kann diese Modellrechnung auch außerhalb der Straßenwetterstation erfolgen. Unter Verwendung eines einheitlichen Modells wäre eine gleiche Einschätzung vergleichbarer Situationen möglich. Ein entsprechendes Modell ist von der BASt entwickelt worden und fand Eingang in ein FGSV-Hinweisepapier zu Straßenzustands- und Wetterinformationssystemen [Badelt, Breitenstein 2005; FGSV 2019].

Die berührungslos arbeitenden Sensoren für den Fahrbahnzustand bieten den Vorteil, dass sie den tatsächlichen Zustand der Fahrbahnoberfläche messen und nicht den Zustand auf einer speziellen Sondenfläche. Ihre Messflächen sind deutlich größer im Vergleich zu den Sensoren in den Sonden. Die beiden Sensoren NIRS31 der Firma Lufft und der DSC111 erreichen bei den Situationsbewertungen der Angaben wesentlich bessere Ergebnisse. Sie werden daher als wesentlich geeigneter als die Bodensonden angesehen. Unstimmigkeiten stellen hier nur die Interpretation von Schneematsch dar. Hier sind wahrscheinlich nur Einstellungsänderungen für bessere Übereinstimmung zwischen Messwert und Beobachtung erforderlich.

Bei beiden Bauarten gibt es noch größere Differenzen, die neben der Bauweise mit hoher Wahrscheinlichkeit auch auf Fertigungs- oder Kalibriertoleranzen in den einzelnen Sensoren zurückzuführen sind.

Von der Bodensonden können keine genauen Differenzierungen bei Fahrbahnzustand erwartet werden. Deshalb gibt es bei der Europäischen Normung einen Konsens, dass diese Sensorbauart nur noch zwischen den Zuständen „trocken“ und „nicht trocken“ unterscheiden muss. Weitere Differenzierungen müssen durch Heranziehen von anderen Parametern (Taupunkttemperatur, Fahrbahnoberflächentemperatur, Niederschlag) erfolgen.

Die Ergebnisse des DSC111 und NIRS31 zeigen, dass differenzierte Aussagen zum Fahrbahnzustand mit einem berührungslos arbeitenden Sensor mit dem Stand der Technik möglich sind und damit entsprechende Anforderungen für die Ausstattung einer Straßenwetterstationen gefordert werden können.

Geklärt werden muss, wie zukünftig mit den verschiedenen Arbeitsweisen der Sensorbauarten bei Nutzung in einem Netz umgegangen werden soll.

5.4 Gefriertemperatur

5.4.1 Definition, Nutzungsmöglichkeiten, Anforderungen und eingesetzte Sensoren

Die Gefriertemperatur ist als die Temperatur definiert, bei der sich aus einer vorhandenen TausalzLösung erste Eiskristalle bilden. Diese Temperatur ist abhängig von der Taustoffart und der Konzentration der Lösung. Die in Deutschland genutzten Tausalze sind Natrium-, Calcium- und Magnesiumchlorid. Die Verläufe der Gefriertemperaturen für diese drei Tausalze sind im Bild 49 abgebildet. In der Literatur gibt es etwas unterschiedliche Angaben für die Gefriertemperatur-Kurven. Diese sollen bei der Prüfung von Sensoren berücksichtigt werden [Schedler 2014]

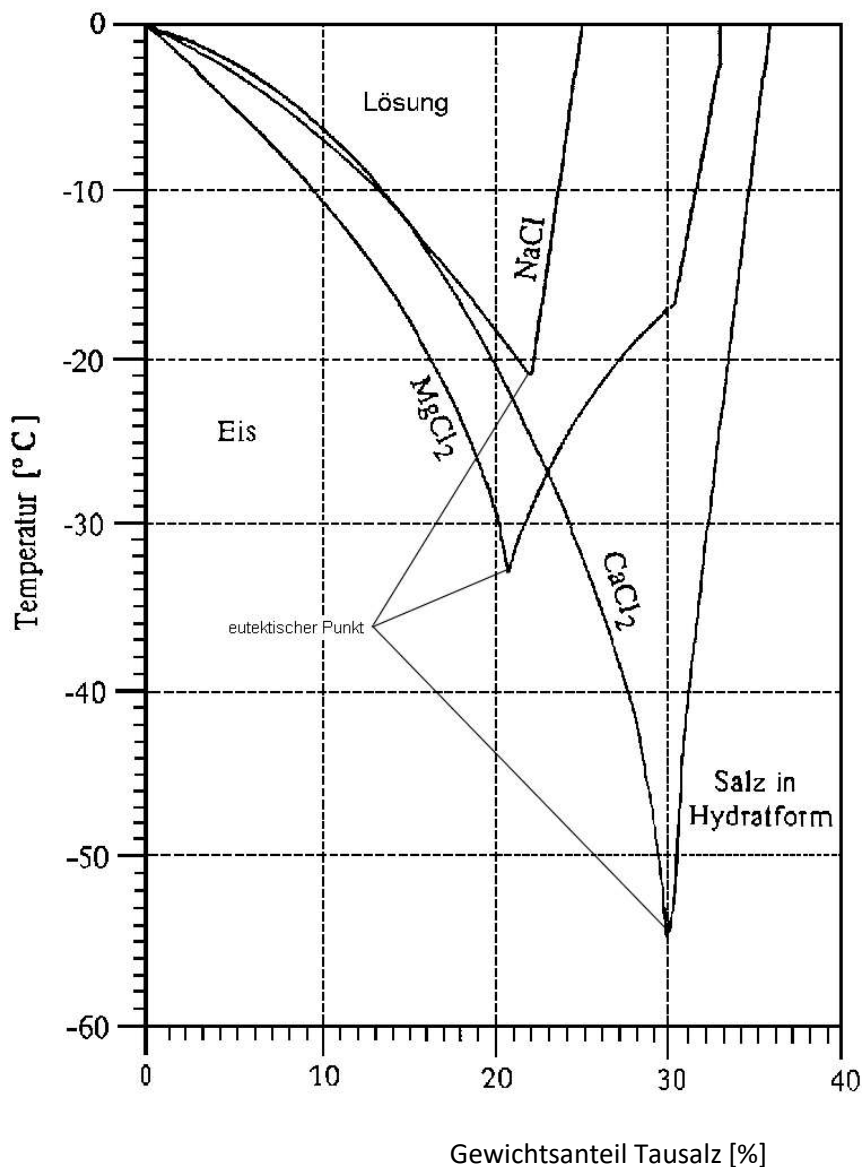


Bild 49: Gefrier- und Lösungskurven für Natrium-, Calcium- und Magnesiumchlorid [TL Streu]

Anhand der Differenz zwischen einer vorhandenen Fahrbahnoberflächentemperatur und der Gefrier-temperatur einer vorhandenen Lösung ließe sich eine Glättegefahr einschätzen. Liegt Gefrier-temperatur deutlich unter der Fahrbahnoberflächentemperatur, könnte von einer ausreichenden Salzmenge auf der Fahrbahn ausgegangen werden. Dabei muss aber auch die Menge der Lösung beachtet werden. Sie könnte über den Parameter Wasserfilmdicke eingeschätzt werden. Wenn nur eine geringe Menge Lösung vorhanden ist, dann ist nur wenig Tausalz auf der Fahrbahn. Aber solange keine Wasserzufuhr vorhergesagt ist, muss mit keiner Verdünnung gerechnet werden. Für diese Fälle könnte die Gefrier-temperatur als wesentlicher Entscheidungsparameter genutzt werden. Ein weiterer Parameter wäre die Salzmenge je Quadratmeter (siehe Abschnitt 5.5).

Messtechnisch wird zwischen zwei Messverfahren mit folgenden Normbegriffen nach EN 15518-3 unterschieden:

- Abgeleitet

Im deutschsprachigen Raum sind Sensoren mit diesem Messverfahren mehr unter dem Begriff „passive Sensoren“ bekannt. Sie messen die Leitfähigkeit einer vorhandenen Lösung, aus der die Gefrier-temperatur berechnet wird. Dabei muss bekannt sein, welches Tausalz zum Einsatz kommt, denn es müssen entsprechende Kalibrierkurven hinterlegt sein. Die Messwerte sind von der bestehenden Lösungsfilmdicke abhängig.

- Gemessen

Die messenden Sensoren sind sprachlich gleichzusetzen mit den sogenannten „aktiven Sensoren“. Deren Sondenkörper werden laufend abgekühlt und erwärmt. Bei einer vorhandenen Lösung bewirkt der Umwandlungsprozess von flüssig zu fest oder umgekehrt eine Änderung der Stetigkeit der dabei mitlaufenden Temperaturmessung. Während des Umwandlungs-verfahrens bleibt die Temperatur weitgehend konstant oder steigt sogar kurzzeitig. Die Sensoren werten die Temperaturverläufe aus und geben danach die Gefrier-temperatur an.

Beide Verfahren lassen sich nur mit Bodensonden umsetzen. Die passiven Sensoren sind in Bodenson- den integriert, die auch andere Parameter messen. Bodensonden mit dem aktiven Messverfahren messen nur die Gefrier-temperatur. Die ständige Heizung und Kühlung würde andere Parametermes- sungen erheblich beeinflussen.

Die DIN EN 15518-3 enthält folgende Anforderungen. Gleiche Anforderungen für beide Messverfahren sind:

Messbereich: -30°C bis 0°C

Auflösung: $0,1^{\circ}\text{C}$

Die Genauigkeiten sind unter folgenden Randbedingungen zu erreichen:

- Lösungsfilmdicke: 0,05 mm bis 0,5 mm
- Gemessen ab $\leq 4^{\circ}\text{C}$ Fahrbahnoberflächentemperatur

An unterschiedlichen Anforderungen für die beiden Bauformen enthält die DIN EN 15518-3 folgenden Angaben:

- Abgeleitet

Fehlergrenze: Messbereich 0°C bis $-2,5^{\circ}\text{C}$: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
 Messbereich $-2,5^{\circ}\text{C}$ bis 30°C : $\pm 20\%$

Bei definierten und gleichbleibenden Taustoff

- Gemessen

Fehlergrenze: Messbereich 0°C bis -15°C: $\pm 0,5^\circ\text{C}$

Messbereich -15°C bis -30°C: $\pm 1,5^\circ\text{C}$

Die Anforderung ist unabhängig vom Taustoff.

Die Gefriertemperatur messen auf dem Testfeld folgende fünf Bodensonden nach dem passiven (abgeleiteten) Messverfahren:

- 2x IT-Sens der Firma Boschung (im Winter 2017/18 nur ein Sensor)
- IRS 31pro der Firma Lufft (nur bis zum 8.12.2017)
- 2x DRS511 der Firma Vaisala (Angaben eines DRS511 erst ab dem 16. März 2018)

Folgende drei Sensoren messen die Gefriertemperatur mit dem aktiven Messverfahren:

- 2x ARCTIS der Firma Boschung
- ARS31pro der Firma Lufft

Alle Bodensonden sind in der Mitte des linken Fahrstreifens einbaut.

Berührungslos arbeitende Sensoren können keinen Salzgehalt direkt erkennen. Sie versuchen anhand des Fahrbahnzustandes und der Fahrbahnoberflächentemperatur, eine Gefriertemperatur abzuleiten. Wenn kein Eis auf der Fahrbahnoberfläche bei Minusgraden vorhanden ist, dann muss auch entsprechend Tausalz auf der Fahrbahn sein. Die angegebene Gefriertemperatur liegt deshalb nie unter der Fahrbahnoberflächentemperatur. Von den im Testfeld installierten berührungslos arbeitenden Sensoren soll der NIRS31 derartige Angaben vornehmen.

5.4.2 Prüfverfahren

Grundsätzlich prüft die BAST die Sensoren für die Gefriertemperatur mit dem gleichen Verfahren, wie die Wasserfilmdicke geprüft wird (siehe Abschnitt 5.3.2). Das Verfahren ist ebenfalls in der DIN CEN/TS 15518-4 beschrieben. Statt reinem Wasser wird eine Tausalzlösung mit einer festgelegten Tausalzart und einer genauen Konzentration aufgesprüht. Aus beiden Angaben lassen sich die Gefriertemperatur gemäß Bild 49 ableiten. Differenzierte Angaben aus verschiedenen Studien zum Zusammenhang von der Konzentration einer Lösung und der Gefriertemperatur werden bei der Prüfung berücksichtigt [Schedler 2014]. Sie würden aber für die praktische Nutzung der Messwerte keine Rolle spielen. Die Auftragungen finden mit unterschiedlichen Lösungsfilmstärken statt. Nach dem Auftrag müssen die Sensoren, die Gefriertemperatur mit der geforderten Genauigkeit angeben.

Die aktiven Bodensonden weisen durch das Heizen und Kühlen ein sehr unterschiedliches Wärmeverhalten auf. Nach der CEN/TS 15518-4 sind die Sensoren für die Prüfung in einem größeren Asphaltblock einzubauen. Dies ist sehr aufwendig. Daher werden die Sonden bei den BAST-Prüfungen in eine Kiste mit Sand eingebracht. Damit soll etwa das Temperaturverhalten der sonst umgebenden Straße weitgehend simuliert werden.

Das genutzte Prüfverfahren beschreibt nur statische Verhältnisse auf den Bodensonden. Verkehrsbedingte Einwirkungen durch Überrollungen und damit verbundene unterschiedlichen Filmstärken werden nicht getestet.

5.4.3 Laborprüfergebnisse

– Passive Sensoren

Einige Bodensondentypen, die auf dem Testfeld installiert sind, wurden im Laufe des Projektes nach den Vorgaben der CEN/TS 15518-4 im Labor geprüft. Die Ergebnisse sind im Anhang 4 aufgeführt.

Wie bei der Wasserfilmdicke geben Sensoren dieser Bauart häufig sehr abweichende Angaben zur aufgetragenen Lösung an. Als Grund geben die Hersteller die ungleiche Verteilung der Lösung auf der Messoberfläche an. Erst eine gleichmäßige Verteilung einer höheren Filmdicke führt zu genauen Ergebnissen. Diese gleichmäßige Verteilung ist wie bei Wasserfilmdicken ohne Salz in der Praxis nicht gegeben.

– Aktive Sensoren

Die aktiven Sensorentypen auf dem Testfeld wurden bereits vor der Projektarbeit in Anlehnung an die DIN CEN/TS 15518-4 getestet. Sie erfüllten dabei alle Anforderungen. Bei den Prüfungen zeigte sich, dass sie die Umgebung erheblich aufheizen. In der im Abschnitt 5.4.2 aufgeführten Sandkiste konnten etwa 10 cm neben den Sonden eine im Vergleich zur umgebenden Lufttemperatur bis zu 10 Kelvin höhere Sandtemperatur gemessen werden.

5.4.4 Ergebnisse vom Testfeld

Die für den Testfeldabschnitt zuständige Meisterei hat ausschließlich mit Natriumchlorid gearbeitet. Dabei kam überwiegend die Feuchtsalz-Technologie zum Einsatz.

Die drei beschriebenen Sensorbauarten arbeiten nicht nur unterschiedlich im Messverfahren, sie geben auch sehr unterschiedliche Werte an. Bild 50 gibt von den einzelnen Sensoren die Häufigkeit der angegebenen Gefriertemperatur in Klassenstufen von jeweils 5 Kelvin wieder. Diese Ergebnisse stammen vom Januar 2017.

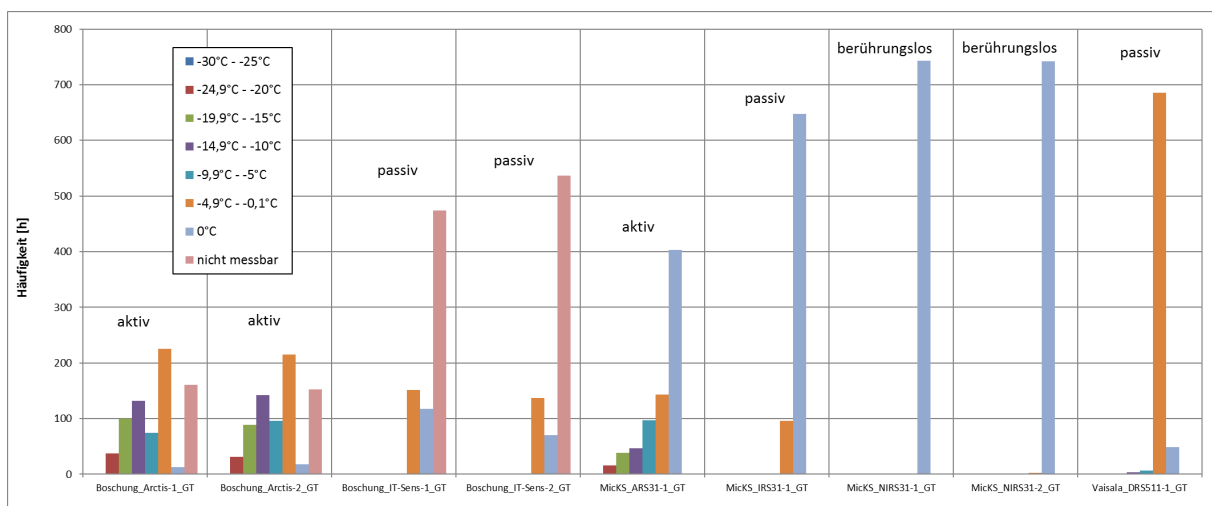


Bild 50: Angabe der Gefriertemperatur der einzelnen Sensoren sortiert nach Klassen im Januar 2017

Im Ergebnis lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den in Absatz 5.4.1 beschriebenen Bauformen erkennen. Die passiven Sensoren zeigen fast nie Gefriertemperaturen unter -5°C an. Aktive Sensoren zeigen dagegen eine breite Spannweite der Gefriertemperatur innerhalb des Messbereichs an. Diese hohe Spannweite wird auch für plausibel angesehen, da es nach Salzausbringungen im Regelfall zu einem Abtrocknungsprozess kommt, bei dem das Wasser der Tausalzlösung verdunstet und damit die

Lösung konzentrierter bis zu einer sichtbaren Kristallisierung des Salzes wird. Dies bedeutet bei gleichem Salzgehalt dann eine tiefere Gefriertemperatur.

Einen großen Unterschied gibt es zwischen den Sensoren der Firma Boschung einerseits und den Firmen Lufft und Vaisala andererseits. Nach den Anforderungen im Absatz 5.4.1 müssen die Sensoren eine Gefriertemperatur erst messen, wenn mindestens 0,05 mm Wasserfilmdicke vorhanden ist. In der Praxis wird es sehr häufig geringere Wasserfilmdicken geben. Die Sensoren der Firma Boschung (IT-Sens und ARCTIS) unterscheiden zwischen 0°C und „Gefriertemperatur nicht ermittelbar“. Die anderen Sensoren zeigen bei der Situation „nicht ermittelbar“ immer 0°C an. Das Problem liegt hier in den Vorgaben der TLS [BASt 2012]. Sie geben die Angabe „0°C“ bei fehlender Messmöglichkeit vor. Für den Anwender wäre es deutlicher hilfreicher, wenn der beschriebene Unterschied besteht. Wenn nach einer Glättegefahr kein weiterer Niederschlag unabhängig von der Form niedergeht, kann die Gefriertemperatur nicht gegen 0°C gehen. Hier ist zum besseren Verständnis der Angaben eine Überarbeitung der TLS notwendig.

Eine gleiche statistische Auswertung erfolgte für fast 4 Monate im Winter 2017/18 (Bild 51). Hier sind die NIRS31 nicht mehr aufgeführt, da sie nur den Wert 0°C angegeben haben. Der im Absatz 5.4.1 beschriebene Vorgang einer Gefriertemperaturangabe kam für sie in diesem Winter praktisch nicht vor. Eine der installierten ARCTIS-Sonden und der IRS31pro haben in diesem Zeitraum aufgrund von Defekten bzw. Abschaltung keine Messwerte mehr ausgegeben.

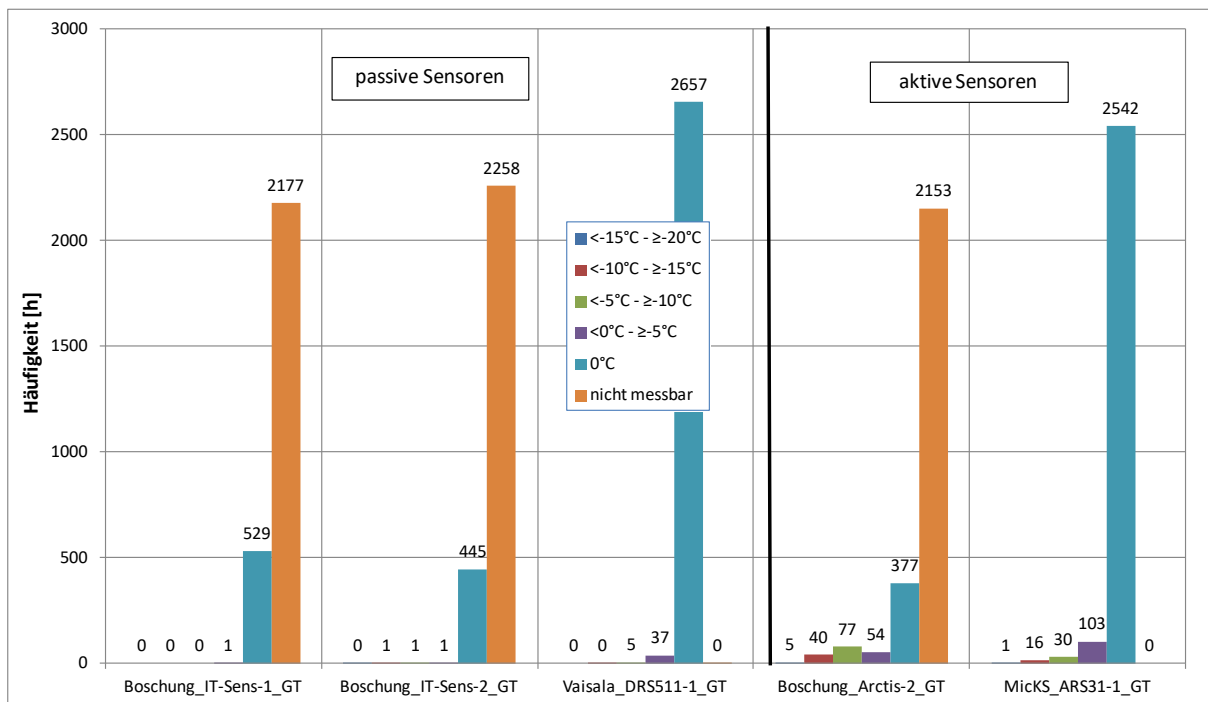


Bild 51: Angabe der Gefriertemperatur der einzelnen Sensoren sortiert nach Klassen im Zeitraum 09.12.2017 bis 31.01.2018

Im Bild 51 ist das gleiche unterschiedliche Verhalten der Sensorbauarten wie im Januar 2017 zu erkennen.

Bei den passiven Sensoren zeigen die IT-Sens-Sensoren der Firma Boschung eine extrem geringe Zeitdauer mit Gefriertemperaturen überhaupt an, die auf kaum winterliche Bedingungen schließen lassen. Das widerspricht den Beobachtungen, bei denen häufiger vollständige Schmelzprozesse zu sehen waren (siehe Anhang 1). Eine statistische Auswertung zeigt, dass in dem gleichen betrachteten Zeitraum

103 Stunden auf dem linken und 93 Stunden auf dem rechten Fahrstreifen ein Wasserfilm von $\geq 0,05$ mm und Temperaturen von 0°C und tiefer angegeben wurde. Diese Angaben stammen von den beiden NIRS31 für die Wasserfilmdicke und vom ARS31pro für die Fahrbahnoberflächentemperatur. Auch die Angaben der Gefriertemperatur des Sensors DRS511 erscheinen noch zu niedrig.

Die aktiven Sensoren zeigen statistisch betrachtet ein anderes Verhalten. Inhaltlich gibt es dennoch bereits statistisch betrachtet relevante Unterschiede. Die ARCTIS-Sonde gibt rund 175 Stunden eine Gefriertemperatur unter 0°C und die ARS31pro 150 Stunden. Die ARS31pro-Sonde gibt aber nur in rund ein Drittel der Fälle eine Gefriertemperatur unter -5°C . Bei der ARCTIS-Sonde sind mehr als zwei Drittel der Fälle die Gefriertemperatur unter -5°C an.

Bei einer Regression beider Messreihen entstehen noch differenziertere Ergebnisse. Unter gleichen Bedingungen treten sehr hohe Differenzen der Aussagen auf (Bild 52).

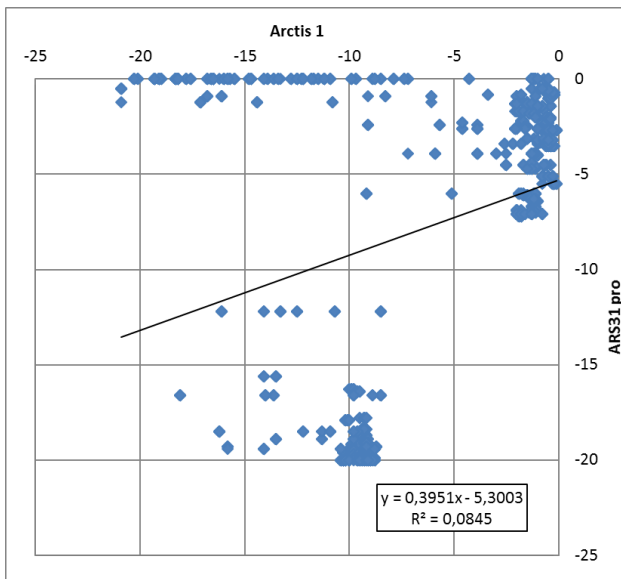


Bild 52: Regression der Gefriertemperatur gemessen von den beiden aktiven Sensoren der Firmen Boschung und Lufft Anfang Januar 2017

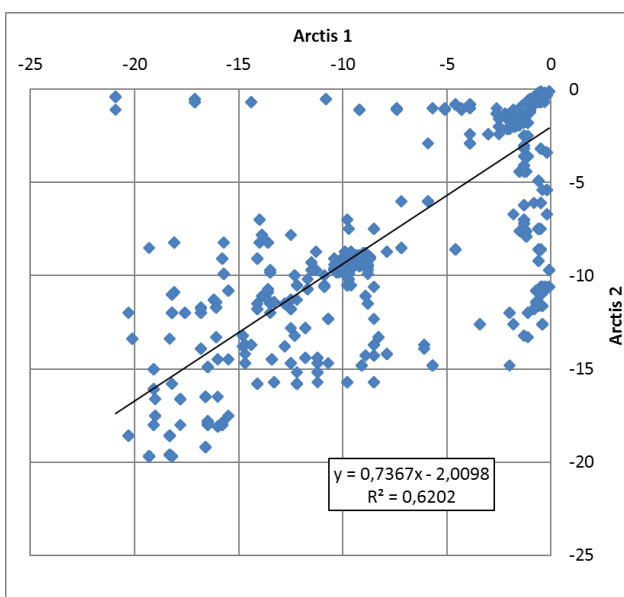


Bild 53: Regression der Gefriertemperatur gemessen von den beiden aktiven Sensoren der Firma Boschung Anfang Januar 2017

Die Regression der Ergebnisse der beiden ARCTIS-Sonden vom Anfang Januar 2017 (Bild 53) zeigt zwar eine deutlich bessere Übereinstimmung als zwischen den beiden unterschiedlichen aktiven Sensortypen ARCTIS und ARS31pro. Allerdings lässt sich bei einem Bestimmtheitsmaß von etwas über 0,6 keine sichere Einschätzung der Salzmenge auf der Fahrbahn ableiten.

Eine wesentliche Ursache der Differenzen wird in der ungleichen Verteilung der Salze auf der Fahrbahn gesehen. Hier entsteht die Frage, ob die Sonden mit Messflächen von nur wenigen Quadratzentimetern einen repräsentativen Messwert für einen größeren Fahrbahnabschnitt angeben können. Als weitere Fehlermöglichkeit werden die Einwirkungen auf den recht langen eigentlichen Messzyklus von ca. 1-2 Minuten durch Überfahrten gesehen. Vereinzelt vorgenommene Störungen der Messzyklen bei Laborprüfungen führten ebenfalls zu fehlerhaften Messwerten. Dazu kommen die langen Zwischenzeiten zwischen zwei Messzyklen von rund 15 min zum Erreichen eines etwas gleichen Ausgangszustandes.

Eine Kontrolle von eingebauten Sensoren ist nur mit dem beschriebenen Verfahren möglich. Die Anwendung des Verfahrens erweist sich auf der Fahrbahn als sehr schwierig. Beurteilungen sind daher nur aus dem Verlauf der Angaben unter Betrachtung anderer Parameter und der Streueinsätze möglich.

Ein Beispiel eines Verlaufs der Gefriertemperaturen aller dafür vorhandenen Sensoren gibt Bild 54 wieder. Zwischen ca. 3 und 8 Uhr fiel der Niederschlag als Schnee. Gleichartige Streueinsätze fanden gegen ca. 0 Uhr, 4 Uhr und 5 Uhr statt. Zwischen 3:45 Uhr und 6:50 Uhr ist auf den Fotos eindeutig Schneematsch in der Mitte des zweiten Fahrstreifens erkennbar. Schneematsch heißt, dass nicht ausreichend Salz auf der Fahrbahn ist. Trotzdem zeigen verschiedene Sensoren eine sehr tiefe Gefriertemperatur an. Damit wird dem Winterdienstverantwortlichen eine Sicherheit vorgezeigt, die in der Praxis nicht gegeben ist.

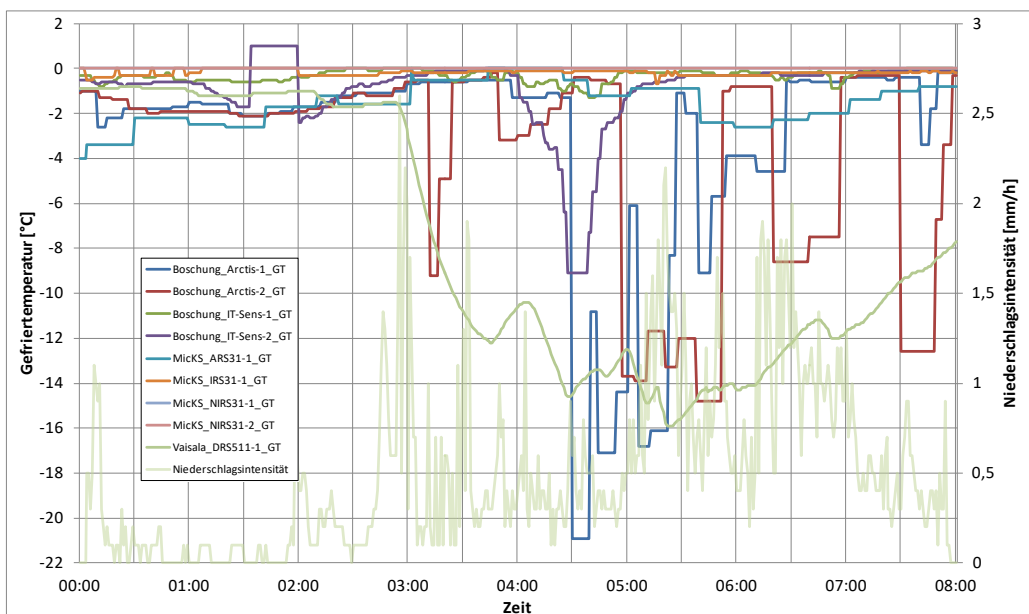


Bild 54: Verlauf der Gefriertemperaturen am 02. Januar 2017

Die Auswertung der verschiedenen Situationen im Anhang 1 zeigen häufig wenig hilfreiche oder sogar irreführende Angaben der Gefriertemperatur. Wenig hilfreich sind Angaben von sehr tiefen Gefriertemperaturen bei einer gleichzeitig angegebenen Wasserfilmdicke von null Millimeter. Damit besteht keine Aussage, ob bei selbst sehr geringer Zufuhr von neuem Niederschlag eine ausreichende Salzmenge vorhanden ist. Sehr irreführend sind angegebene tiefe Gefriertemperaturen, wenn auf der

Fahrbahn deutlich Schnee (kein Schneematsch) beobachtet werden kann. Hier ist praktisch davon auszugehen, dass nicht ausreichend Tausalz auf der Fahrbahn vorliegt. Auch bei Schneematsch muss die Gefriertemperatur gemäß Definition über der Fahrbahnoberflächentemperatur liegen. Bei Schnee war bei fast jeder Schneefallsituation bei den Gefriertemperaturen der ARCTIS-Sonde das Gegenteil zu beobachten (siehe Anhang 1).

Unplausibel sind Gefriertemperaturen auch, wenn sie im Verlauf entgegen allgemeiner erwarteter Verhaltensweisen angegeben werden. Tausalz geht bei vorhandener Feuchte mit ausreichender Wasserfilmdicke recht schnell in Lösung. Die Geschwindigkeit des Lösungsvorgangs hängt von der Wassermenge und der Korngröße ab. Der Prozess der Auflösung dauert im Labor ohne Bewegung kaum länger als eine Stunde. Solange Wasser durch Niederschlag oder Tauen von Schnee hinzukommt, verdünnt sich die Konzentration der Lösung mit vollständig gelöstem Salz. Die Lösung kann durch Fahrzeuge verdrängt werden oder fließt aufgrund der Neigung ab. Beim Abtrocknen (Verdunstung) nicht abfließende Feuchte wird erwartet, dass die Konzentration der restlichen Salzlösung steigt und Gefriertemperatur damit sinkt. Häufig lässt sich das durch auskristallisiertes Salz auf der Fahrbahnoberfläche beobachten. Umgekehrt wird ein neuer Niederschlag dieses Salz wieder auflösen. Eine vorhandene Lösung wird bei neuem Niederschlag wieder verdünnt und die Gefriertemperatur muss wieder ansteigen.

In den Situationsbetrachtungen im Anhang lässt sich aber häufig das Gegenteil von dem hier beschriebenen Verhalten beobachten, was die Angaben der Sensoren sehr in Frage stellt. Wenig plausibel sind häufig festzustellende Sprünge der Gefriertemperatur, ohne dass wesentliche Änderungen der Wasserfilmdicken angegeben werden. Das weist auf sehr unterschiedliche Verhältnisse auf den Sensoren hin.

Fall	Datum	Fallart	Boschung		Lufft	Vaisala
			IT-Sens	ARCTIS	ARS31pro	DRS511
1.1	10.12.2017	Schnee auf der Fahrbahn	unplausibel	unplausibel	unplausibel	unplausibel
1.2	10.12.2017	Regen bei Temperatur gering über 0°C	plausibel	unplausibel	unplausibel	k.A.
2	12.12.2017	Schneeregen	unplausibel	unplausibel	unplausibel	unplausibel
3	13.12.2017	Regen	plausibel	unplausibel	unplausibel	plausibel
4	18.12.2017	Schnee auf der Fahrbahn	plausibel	unplausibel	teils unplausibel	unplausibel
5	29.12.2017	Regen	k. B.	unplausibel	plausibel	unplausibel
6	17.01.2017	Schnee auf der Fahrbahn	plausibel	unplausibel	teils plausibel	unplausibel
7.1	11.02.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	unplausibel	unplausibel	plausibel	unplausibel
7.2	11.02.2018	Regen	k. B.	k.B.	unplausibel	plausibel
8.1	12.02.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	plausibel	unplausibel	überwiegend plausibel	unplausibel
8.2	15.02.2018	Regen/Schnee ohne Schneebedeckung mit Temperatur unter 0°C	plausibel/unplausibel (Sensoren unterschiedlich)	plausibel	überwiegend plausibel	unplausibel
9	15.02.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	unplausibel	unplausibel	überwiegend plausibel	unplausibel
10	02.03.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	plausibel	unplausibel	plausibel	unplausibel
11	18.03.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	plausibel	unplausibel	plausibel	unplausibel
12	20.03.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	plausibel	unplausibel	unplausibel	unplausibel

Tabelle 3: Plausibilitätsbeobachtungen zur Gefriertemperatur bei verschiedenen Fahrbahnsituationen im Winter 2017/18 (nähere Beschreibungen im Anhang 1, k.B. = keine Bewertung möglich, k.A. keine bewertbaren Angaben vorhanden)

Tabelle 3 gibt eine Zusammenfassung der Plausibilitätsbetrachtungen zu den 15 Betrachtungsfällen wider. Nicht in jedem Fall konnte eine Bewertung vorgenommen werden.

Die häufige Plausibilität bei den IT-Sens ergibt sich durch die Angabe von Gefriertemperaturen von genau oder nahe 0°C bei beobachtetem Schnee oder Schneematsch. Da sie zu anderen Zeiten fast nie deutlich unter 0°C gehen, kann auf sie verzichtet werden.

5.4.5 Zusammenfassung und Bewertung

Die aktuellen Ergebnisse aus dem Testfeld lassen keine plausible Nutzung der Gefriertemperatur für sinnvolle Winterdienstentscheidungen erkennen. Da ähnliche Ergebnisse auch bei allen anderen bekannten Untersuchungen zu Gefriertemperaturen [Haug 2016, Scharsching 1991,1995, Badelt 1996, Schedler 2014, Holldorb et al. 2015, Zwahlen et al. 2003] vorliegen, sollte auf den Einsatz von Sensoren für die Gefriertemperatur bis zum Nachweis von plausiblen Messergebnissen verzichtet werden. Von einer Nutzung von vorhandenen Werten muss sogar abgeraten werden, da sie bei einer reinen Datennutzung ohne Erfahrungen oder in einem automatischen System zu gefährlichen Fehlentscheidungen führen kann.

Der Ansatz der berührungslos arbeitenden Sensoren für die Gefriertemperatur hilft in der Praxis auch nicht weiter, da bei nicht festgestellten Eisbildungen bei Minusgraden, zwar für die Temperaturen eine ausreichende Salzmenge vorhanden ist, aber keine Aussage getroffen werden kann, wann eine Eisbildung beginnen kann. Das kann sofort oder gar nicht passieren.

Für eine repräsentative Erfassung der Gefriertemperatur müssten größere Flächen eines Fahrbahnabschnittes betrachtet werden. Gemessene Streustoffverteilungen bei Streumaschinenprüfungen [Badelt et al. 2006, 2007] oder bei Liegedauermessungen [Hausmann 2009 + 2012, Schulz et al. 2016, Hoffmann et al. 2012] weisen sowohl unmittelbar nach der Ausbringung als auch nach mehrstündiger Liegedauer immer wieder große Unterschiede bei der Tausalzverteilung nach. Die dabei betrachteten Flächen waren um vielfaches größer als die von den Bodensonden betrachteten Flächen. Bei den Messungen kamen portable Messgeräte zum Einsatz, die eine Salzmenge von Fahrbahn unter Zusatz von Wasser aufnehmen und diese anschließend direkt oder im Labor über die Leitfähigkeit analysieren. Stationär unter Verkehr arbeitende Sensoren dieser Art sind nicht bekannt.

5.5 Taustoffmenge in g/m²

5.5.1 Definition, Anforderungen und eingesetzte Sensoren

Für eine Optimierung der ausbringenden Tausalzmengen, wäre von Interesse, wie viel Tausalz seit dem letzten Streueinsatz noch auf der Fahrbahn verblieben ist. Bei einer repräsentativen Angabe könnte eine neu aufzubringende Menge um die vorhandene Menge reduziert werden. Dazu wäre eine Angabe in g/m² erforderlich.

Die veröffentlichte DIN EN 15518-3 (DIN 2011) enthält den Parameter Taustoffmenge nicht. Er ist in der überarbeiteten Fassung vorgesehen und gemäß der gewünschten Einheit definiert (Masse Taustoff in Gramm auf einem Quadratmeter). Der Messbereich wird zwischen 0 und 50 g/m² bei einer Auflösung von 1 g/m² gefordert. Als einzuhaltende Genauigkeit wird eine zulässige Abweichung von ±50% angegeben.

Folgende Bodensonden auf dem Testfeld gaben diese Parameter an:

Eine Angabe der Taustoffmenge haben zunächst nur die Firmen Lufft und Vaisala, gemessen durch die passiven Bodensonden IRS31pro und DRS511, angeboten. Aus nicht bekannten Gründen hat der IRS31pro keine verwertbaren Daten ausgegeben. Zu einem späteren Zeitpunkt hat auch die Firma Boschung diesen Parameter, gemessen durch die Sonden IT-Sens und ARCTIS, gemeldet. Die Boschung-Angaben konnten allerdings erst gegen Ende des Winters 2017/18, ab dem 16. März 2018, seitens der BASt entgegengenommen werden.

Vollständig über dem Bewertungszeitraum lagen nur Daten vom DRS511-1 der Firma Vaisala vor. Erst ab dem 16. März 2018 lagen auch die Daten des DRS511-2 vor.

5.5.2 Frühere Testergebnisse

Sensoren für Tausalzmenge wurden im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Liegedauer von Tausalzen im Labor getestet. Bei diesen Tests konnte nur der auch hier im Testfeld eingesetzte DRS511 plausible Ergebnisse erzielen. Die aufgetragenen definierten Lösungen - bestimmt durch Konzentration und Masse - konnte er hinreichend genau angeben. Verwunderlich war bei diesen Tests, dass die Werte für die Wasserfilmdicke und Gefriertemperatur nicht plausibel waren [Hausmann 2009].

Dieser Sensortyp wurde nach den Labortests bei den genannten Untersuchungen in einem Testfeld 12x innerhalb eines Fahrbahnquerschnittes verbaut. Die Ergebnisse zeigten damals, dass die Tausalzmengen nach dem Ausbringen sehr schnell abnehmen.

5.5.3 Ergebnisse vom Testfeld

Die statistische Auswertung der Daten des DRS511 der Firma Vaisala ergibt folgende Aussagen: Von den rund 2700 Stunden im Bewertungszeitraum hat der DRS511-1 nur 90 Stunden eine Tausalzmenge größer 0 g/m^2 angezeigt. Davon betrug der Messwert in 60 Stunden nur 1 g/m^2 und 16 Stunden nur 2 g/m^2 . Als maximaler Wert wurde 6 g/m^2 erreicht. Er wurde zusammenhängend über eine halbe Stunde angezeigt. Es war an dem Tag mit der höchsten notierten Streufahrtenanzahl (mindesten 8 Fahrten in ca. 10 Stunden siehe Fall 9 im Anhang 1).

Die Boschung-Sensoren haben ab dem 16. März keine Salzmenge über 0 g/m^2 angezeigt, obwohl auch in diesem Zeitraum noch Streueinsätze dokumentiert sind. Die beiden Vaisala-Sensoren geben in diesem Zeitraum aber auch nicht mehr als 1 g/m^2 an.

5.5.4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse auf dem Testfeld zeigen vergleichsweise nur eine geringe Tausalzmenge im Vergleich zu den gemeldeten ausgebrachten Streumengen. Dabei muss beachtet werden, dass die Sensoren nur gelöstes Salz analysieren können. Zwischen dem vollständigen Auflösen und dem Messen kann viel Salz von Fahrbahn durch Verkehr und Abfließen verschwinden.

Die Testfeldergebnisse hier geben ein anderes Bild als frühere Untersuchungen zur der Liegedauer von Tausalzen wieder, bei denen Werte mit dem gleichem Sensortyp wie hier über 10 g/m^2 gemessen worden [Hausmann 2009]. Dort können aber auch höhere Streudichten ausgetragen worden sein.

Letztlich können die wenigen Werte über 0 g/m^2 für Entscheidungen im Winterdienst kaum eine Rolle spielen.

Bezüglich der repräsentativen Angaben gelten die gleichen Aussagen wie bei der Gefriertemperatur. Ansätze für eine teilweise sinnvolle Angabe einer Salzmenge lassen sich vielleicht mit Hilfe der im

Abschnitt 5.4.1 beschrieben Möglichkeiten der berührungslos arbeitenden Sensoren erwarten. Dies muss aber erst noch untersucht werden.

5.6 Weitere Angaben für Tausalz auf der Fahrbahn

Eine weitere Angabe für vorhandenes Tausalz auf der Fahrbahn könnte die Konzentration einer Salzlösung in Prozent sein. Eine alte noch weit verbreitete Angabe ist der Parameter „Restsalz“ oder „Restsalzfaktor“. Hierbei werden Konzentrationen einer Salzlösung in Prozent zu einer Sättigung in Relation gesetzt.

Konzentrationsangaben können für eine Beurteilung einer Situation nur schwer in Relationen zu anderen Parametern wie der Fahrbahnoberflächentemperatur oder der notwendigen neuen Streudichte gesetzt werden. Dafür sind die Parameter Gefriertemperatur und Salzmenge g/m^2 für eine direkte Bewertung einer Situation besser geeignet. Deshalb die Verwendung dieser Daten im Winterdienst nicht empfohlen.

Vereinzelte Sensoren auf dem Testfeld haben für die genannten Parameter Messwerte geliefert. Für sie fanden keine Auswertungen statt.

5.7 Niederschlag

5.7.1 Definition, Anforderungen und eingesetzte Sensoren

Für den Winterdienst ist der Parameter Niederschlagsart hauptsächlich von Interesse. Eine gemessene Niederschlagsintensität ist für unmittelbare Winterdienstentscheidungen weniger relevant. Aufgrund der geringen notwendigen Wassermengen für eine kraftschlussenkende Wirkung im Gefrierfall sollte der Winterdienst schon bei ersten Anzeichen von Niederschlag aktiv werden. Die Niederschlagsintensität ist aber für die Betrachtung von Niederschlagsverläufen insbesondere durch Wetterdienste und damit auch für bessere Vorhersagen von hohem Interesse.

Die Niederschlagsintensität ist im Bereich des Straßenwesens auch wichtig für die witterungsabhängige Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA). Für die Nutzung der Daten enthält das FGSV-Papier „Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen“ [FGSV 2017] entsprechende Nutzungsempfehlungen.

Die World Meteorological Organization (WMO) ermöglicht mit den Code 4680 für automatischen Wetterbeobachtungen eine hohe Differenzierung der Angaben [WMO]. Die TLS beschreibt ebenfalls die Differenzierung und lässt die Übertragung gemäß dem WMO CODE 4680 zu.

Gemäß der DIN EN 15518-3 sollen die Sensoren für die Niederschlagsart zwischen keinem, flüssigem und festem Niederschlag unterscheiden. Diese Norm gibt Schwellwerte der Intensität für eine erste Erkennung von Niederschlag vor (10 min bei einer Niederschlagsintensität von $0,1\text{mm}/\text{h}$). Ebenso sind in der Norm Anforderungen für die Messung der Niederschlagsintensität genannt, die je nach Messbereich zwischen $\pm 20\%$ und $\pm 40\%$ liegen.

Die Mindestanforderungen der Niederschlagsart gemäß TLS ist gleich den Anforderungen der DIN EN 15518-3.

Heutige Sensoren für den Niederschlag besitzen sehr unterschiedliche Messverfahren. Genauere Beschreibungen der Messverfahren sind teilweise auf den Homepages der Firmen zu finden. Alle auf dem Testfeld installierten Sensoren erkennen Niederschlagspartikel anhand von Reflektionen oder Unterbrechungen von Strahlungen. Je nach Sensorbauart werden unterschiedliche Wellenlängen genutzt.

Die roten Flächen in den nachfolgenden Sensordarstellungen zeigen etwa die Fläche, in denen die Sensoren den Niederschlag erkennen und bewerten sollen. Bei durch von Sensorbauteilen nicht begrenzten Flächen sind die genauen Flächen nicht bekannt.

Auf dem Testfeld kamen folgende Sensoren zum Einsatz:

- NI/SH der Firma Boschung (Bild 55)

Nach Firmenangabe Unterscheidung in: Kein Niederschlag, Regen und Schneefall in jeweils 3 Intensitäten, die nicht weiter definiert sind.

Dieser Sensor wird nach Firmenaussagen nicht mehr vertrieben. Da er im Autobahnnetz Deutschlands weit verbreitet ist, wird er im Weiteren mit bewertet.

- PWS der Firma Boschung (Bild 55)

keine genaue Differenzierung der Niederschlagsangaben bekannt, der Sensor hat bei den Testfelddaten im Winter 2017/18 den Niederschlag mit der umfangreichsten Differenzierung angegeben. Der Sensortyp wird inzwischen auf der Homepage der Firma nicht mehr angegeben.



Bild 55: Niederschlagssensoren der Firma Boschung (rechts NI/SH, Mitte PWS)

- WS600 der Firma Lufft

Unterscheidung in kein, un spezifizierter, flüssigen und festen Niederschlag [Homepage Lufft 2020]



Bild 56: WS600 der Firma Lufft

- Laser-Niederschlags-Monitor LNM der Firma Thies

Unterscheidung in: kein Niederschlag, Niesel, Regen, Schnee, Hagel und Schneegriesel/Eisnadeln, Graupel/Eiskörner [Homepage Thies 2020]

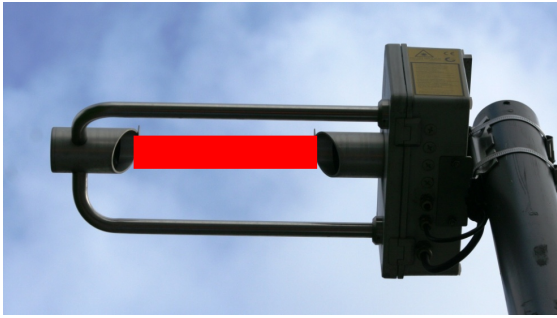


Bild 57: Laser-Niederschlags-Monitor LNM der Firma Thies

- PWD12 der Firma Vaisala

Ausgabe mit 39 verschiedenen Codes nach WMO 4680 Code-Tabelle

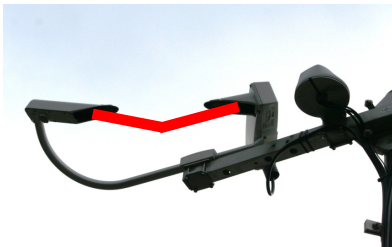


Bild 58: PWD12 der Firma Vaisala

Für die Installation auf dem Testfeld forderte die BAST für die Niederschlagsart nur die Umsetzung der Anforderungen der DIN EN 15518-3. Mit Ausnahme des WS600 haben die anderen Sensoren aber differenziertere Ergebnisse geliefert, die in die weitere Betrachtung einbezogen wurden. Für die Bewertung nach den Anforderungen der DIN EN 15518-3 wurden angezeigten Messwerte, wie nachfolgend aufgeführt, den beiden Niederschlagsarten – flüssig und fest – zugeordnet. Dabei wurde von einer Codierung gemäß WMO-Codetabelle 4680 ausgegangen:

0: kein Niederschlag

30: Nebel = flüssiger Niederschlag

50: Niesel ohne differenzierte Intensität = flüssiger Niederschlag

51, 52, 53: Niesel mit differenzierter Intensität = flüssiger Niederschlag

60: Regen ohne differenzierte Intensität = flüssiger Niederschlag

61, 62, 63: Regen mit differenzierter Intensität = flüssiger Niederschlag

67, 68: Regen/Niesel und Schnee gemixt in verschiedener Intensität = fester Niederschlag

70: fester Niederschlag ohne differenzierte Intensität = fester Niederschlag

71, 72, 73: Schnee mit differenzierter Intensität = fester Niederschlag

75: Eispellets = fester Niederschlag

89: Hagel = fester Niederschlag

5.7.2 Prüfverfahren

– Niederschlagsart

Für die Beurteilung der Niederschlagsart beschreiben die Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen [TLS, BASt 2012] und die DIN CEN/TS 15518-4 [DIN 2013] unterschiedliche Verfahren.

Die TLS verweist für Abnahmeprüfungen nur auf einen Vergleich der Sensormesswerte mit Beobachtungen. Weitere Angaben zur Durchführung des Tests sind nicht enthalten.

Die DIN CEN/TS 15518-4 beschreibt einen Test ausführlicher. Dabei sollen die Messwerte eines zu prüfenden Sensors mit einem Referenzsensor verglichen werden. Als Referenzsensor ist die Bauart Distrometer angegeben. Dabei sind an mindestens 5 Tagen mindestens 10 Niederschlagsereignisse auszuwerten. Die Ereignisse sollen mindestens eine Stunde andauern und einen Abstand von mindestens 6 Stunden aufweisen. Dabei sollen nur die Zeiträume der ersten Stunde nach Niederschlagsbeginn und letzte Stunde vor Niederschlagsende bewertet werden. Wenn 75% der Zeiträume bei keinem, flüssigem und festem Niederschlag eine Übereinstimmung der Messwerte des prüfenden Sensors mit dem Referenzsensor aufweisen, hat er die Anforderung erfüllt. Welche Qualität der Referenzsensor besitzen muss und wie die geprüft werden soll, beschreibt die CEN/TS nicht.

Die Beurteilung der Angaben zur Niederschlagsart kann grundsätzlich durch Beobachtung erfolgen. Den Niederschlag auf eine einfache Grundgröße zurückzuführen, erscheint schwierig. Denkbar wäre eine Wägung. Hier muss die betrachtete Fläche einbezogen werden, auf die der Niederschlag fällt.

Niederschlag ist auf den Fotos teilweise recht gut zu erkennen. Hier kam auf dem Testfeld eine spezielle Kunststoffplatte mit einer Abmessung 50x50 cm zum Einsatz, auf die eine Kamera gerichtet war. Bei Betrachtung der gespeicherten Fotos von Minute zu Minute lässt sich ein Niederschlag ableiten, wenn auf einem Foto im Vergleich zu dem Foto zuvor mehr Regentropfen oder Schneekristalle zu erkennen sind. Diese Erkennung ist insbesondere bei Niederschlagsbeginn möglich. Bild 59 und Bild 60 sowie Bild 61 und Bild 62 zeigen jeweils ein Beispiel für flüssigen und festen Niederschlag. Die Unterscheidung zwischen festen und flüssigen Niederschlag wurde auf die Farbe der Partikel zurückgeführt. Wenn weiße Partikel auf der Platte zu sehen waren, wurde von einem festen Niederschlag ausgegangen. Im Einzelfall kann es sich dabei auch um Schneeregen handeln, der auch sehr schnell taut. In diesen Fällen wurde der Niederschlag als fester Niederschlag gewertet. Eine sichere Aussage zu festem Niederschlag (Schneefall) konnte getroffen werden, wenn auf der Platte, in der Umgebung oder auf der Fahrbahn selber zunehmend weiße Flächen erkannt wurden. Stärkerer Niederschlag lässt sich auch auf den sonstigen Fotos in der Luft gut erkennen. Er ist besonders gut im Infrarotscheinwerferlicht sichtbar. In der Luft ist allerdings nicht eindeutig erkennbar, um welche Niederschlagsart es sich handelt.



Bild 59 und Bild 60: Fotos von der Beobachtungsplatte für Niederschlag Regen im Testfeld – Kennzeichnung rechts zeigt einen Regentropfen, der im Foto eine Minute zuvor nicht vorhanden war

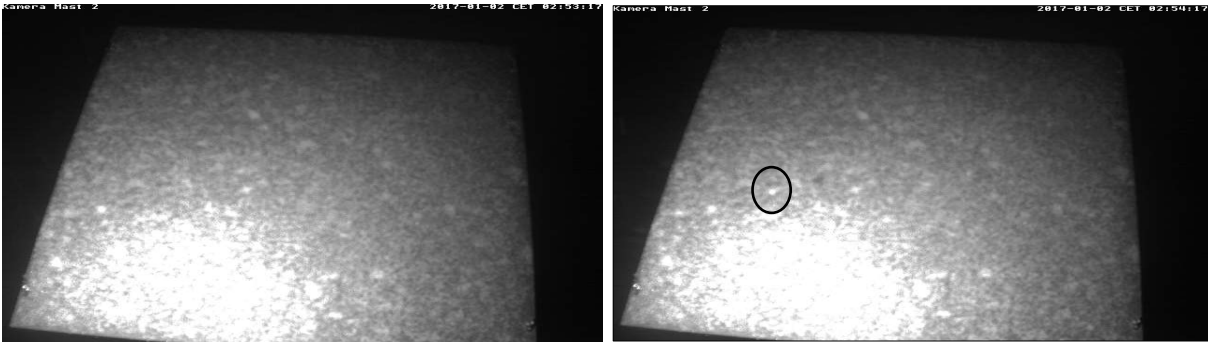


Bild 61 und Bild 62: Fotos von der Beobachtungsplatte für Niederschlag Schneefall im Testfeld – Kennzeichnung rechts zeigt eine Schneeflocke, die im Foto eine Minute zuvor nicht vorhanden war

– Niederschlagsintensität

Eine genauere Beurteilung von Sensoren für die Niederschlagsintensität wäre für kurze Zeiträume mit Hilfe eines von der BAST entwickelten Referenzmessverfahren möglich [Badelt et al. 2006]. Dabei fängt eine Schale mit einer definierten Auffangfläche den Niederschlag in einer festgelegten Zeit auf (siehe Bild 63 bis Bild 65).



Bild 63: Auffangschale mit Stativ



Bild 64: Auffangschale auf dem Testfeld A4 mit 400 cm² Auffangfläche



Bild 65: Messschalen mit 200 und 400 cm² Auffangfläche bei Wägung vor dem Sammeln von Niederschlag (Verbandswatte soll das Herausfliegen von stärkeren Regentropfen verhindern)

Vergleichsmessungen mit zwei Schalen zum gleichen Zeitpunkt zeigen bei geringer Niederschlagsintensität deutliche Differenzen. Sie werden auf eine Unterschiedlichkeit des natürlichen Niederschlags in Bezug auf kleine Flächen zurückgeführt. Die Messschale hat mit 400 cm² aber im Vergleich zu den meisten Sensoren eine deutlich größere Messfläche.

Vergleichsmessungen zu einer Referenz fanden nicht statt, da die Zeitgleichheit zwischen Referenz und zu prüfenden Sensor nicht hergestellt werden konnten. Sie ließ sich im Rahmen der Testfelddatenaufzeichnung nicht umzusetzen. Hierzu müssten gezielte Vergleichsmessungen vorgenommen werden, bei denen Messzeiträume sekundengenau eingestellt werden können.

5.7.3 Ergebnisse vom Testfeld – statische Auswertungen

– Niederschlagsart

Die statistische Auswertung für den Monat Januar 2017 ergibt unter den als gleich anzusehenden Bedingungen sehr unterschiedliche Häufigkeiten der Niederschlagsart (Bild 66). Der PWS von Boschung zeigte nur etwa ein Viertel so oft Regen im Vergleich zum LNM von Thies an. Schneefall zeigt der LNM im Vergleich zu drei Sensoren WS600, PWS und NI/SH doppelt so viel an.

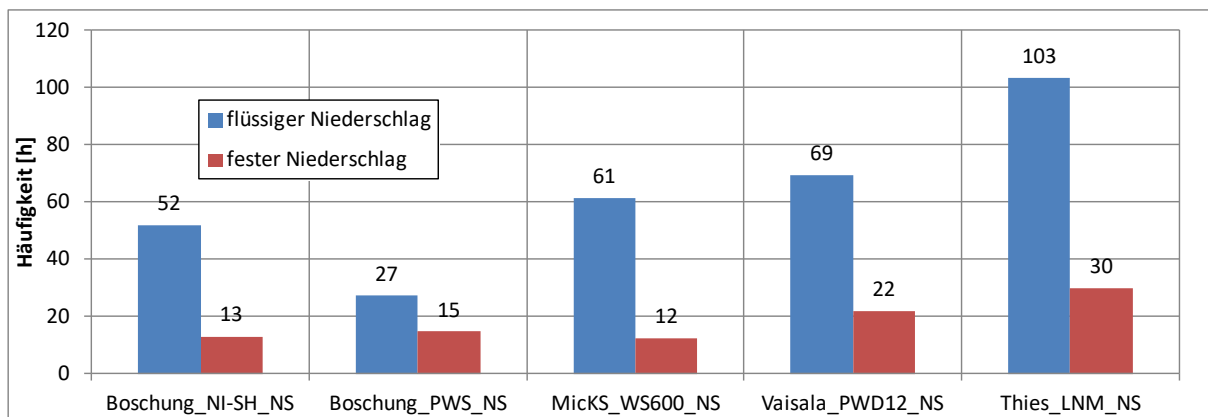


Bild 66: Anteil von Sensorangaben für die Niederschlagsart im Monat Januar 2017 (keine Zeiten ohne Niederschlag)

Zu Beginn des Winters 2017/18 hatten die Firmen Lufft, Boschung und Vaisala die Gelegenheit die Sensoren zu warten. Beim Sensor LNM der Firma Thies fanden keine Arbeiten statt. Von der Firma Vaisala wurde der PWD12 ausgetauscht.

Die Niederschlagsangaben in Stunden nach diesen Arbeiten für den Zeitraum 09.12.2017 bis 31.03.2018 zeigt Bild 67. Die Differenzen sind nicht mehr ganz so extrem wie im Winter zuvor. Trotzdem zeigte der LNM noch fast doppelt so viel Regenstunden im Vergleich zu den beiden Boschung-Sensoren. Ein neuer Sonderfall mit hohen Abweichungen zu allen Sensoren ist die hohe Anzahl von Schneefallstunden des PWS. Der PWD12 kommt den Angaben des LNM recht nahe.

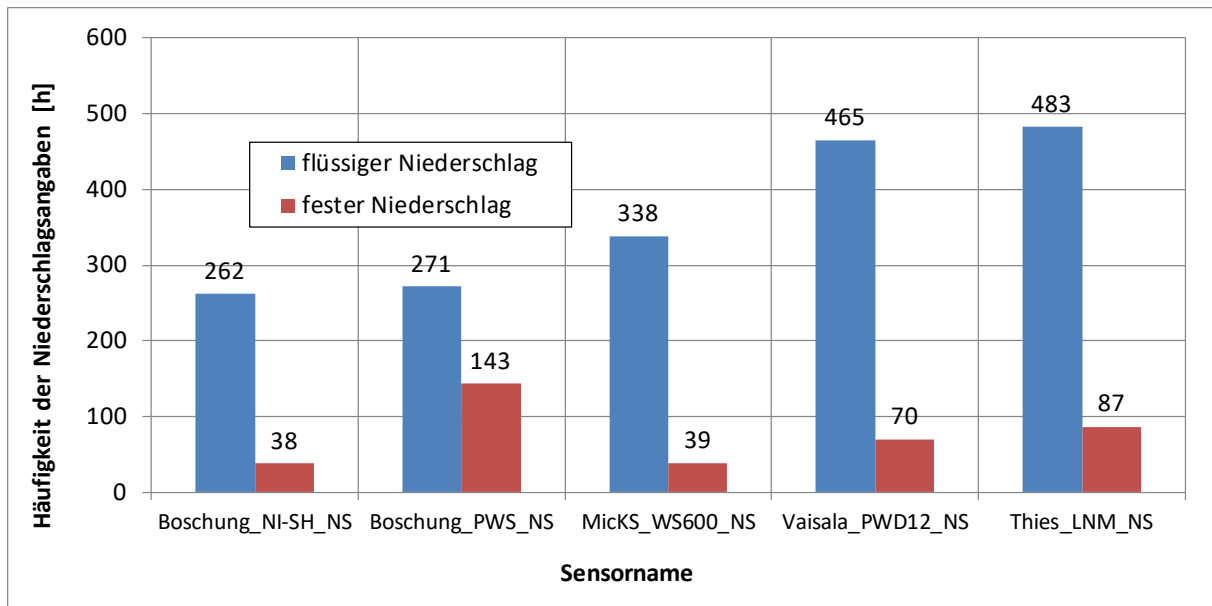


Bild 67: Anteil von Sensorangaben für die Niederschlagsart im Zeitraum 09.12.2017 bis 31.12.2018 (keine Zeiten ohne Niederschlag)

Ein Vergleich der angegebenen Niederschlagsstunden nur nach der Niederschlagsart mit den Stunden der Angaben der Niederschlagsintensität größer 0 mm/h zeigt eine deutliche Differenz. Die Tabelle 4 gibt den Prozentanteil der Niederschlagsangaben (fest und flüssig) bei dem gleichzeitig eine Niederschlagsintensität von 0 mm/h angegeben wurde. Die Angaben schwanken je nach Sensortyp von 24 bis 39%.

Boschung_PWS	Luft WS600	Vaisala_PWD12	Thies_LNM
39	24	31	29

Tabelle 4: Prozentanteil der Niederschlagsangaben (fest und flüssig) bei einer gleichzeitigen Niederschlagsintensität von 0 mm/h

- Niederschlagsintensität

Auch bei dem Vergleich der Niederschlagsintensität lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den Sensoren erkennen. Ein Beispiel zeigt Bild 68. Auffällig sind die sehr unterschiedlichen Verläufe zu verschiedenen Zeiten. Mal zeigt ein Sensor die höchsten Niederschläge an. Zu anderen Zeiten sind es andere Sensoren. Ein Sensor zeigt in einer Zeit (um 3 Uhr) keinen Niederschlag an, während ein anderer Sensor zu dieser Zeit seinen höchsten Wert in dem gesamten betrachteten Zeitabschnitt angibt.

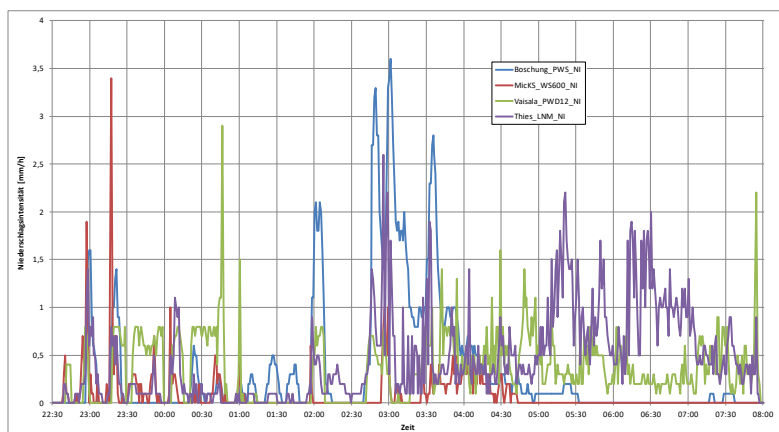


Bild 68: Verlauf der Niederschlagsintensität von den Sensoren auf dem Testfeld der BAST Anfang Januar 2017

Bei den Niederschlagssummen im Bild 68 dargestellten Zeitraum beträgt der niedrigste Wert 0,8 mm und der höchste Wert 4,4 mm. Die Aufsummierungen der gemessenen Niederschlagsintensitäten im gesamten Bewertungszeitraum vom 09.12.2017 bis 31. 03.2018 enthält Tabelle 5. Das Verhältnis zwischen niedrigsten und höchsten Wert beträgt ca. 1:2,5. Allerdings muss bei der Aufsummierung der minutlichen Werte mit höheren Rundungsgenauigkeiten gerechnet werden.

	Summe Niederschlag in mm
Boschung_PWS_NI	550
MicKS_WS600_NI	323
Thies_LNM_NI	389
Vaisala_PWD12_NI	203

Tabelle 5: errechnete Niederschlagssummen im Zeitraum 09.12.2017 bis 31. 03.2018

Für die Testfelddaten im Winter 2017/18 enthält Bild 69 eine weitere statistische Auswertung bezüglich der Niederschlagsintensitätsangaben. Grundlage waren dabei die Grenzwerte für die Erstversorgung zur Klassifizierung der Schaltungsstufen bezüglich einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit in Streckenbeeinflussungsanlagen gemäß dem FGSV-Hinweispapier für Streckenbeeinflussungsanlagen [FGSV 2017]

Die Unterschiede wirken zunächst groß. Eine statische Auswertung, welche Unterschiede je Minute entstanden sind und wie sie sich auf die Schaltungen konkret auswirken, erfolgte nicht.

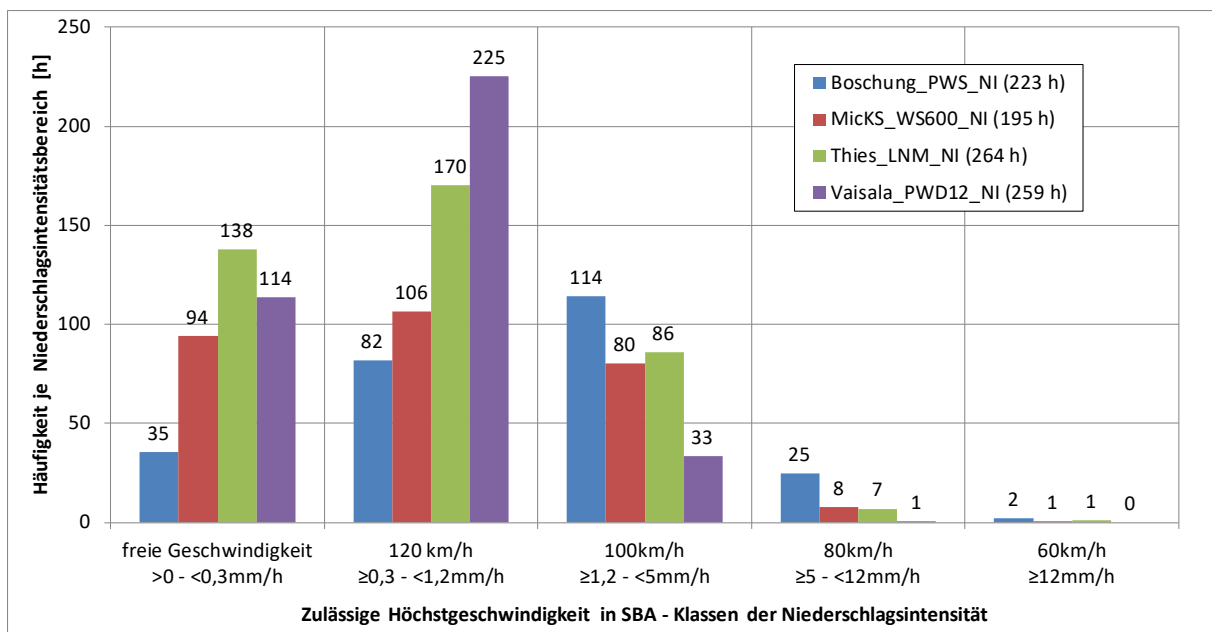


Bild 69: Häufigkeit der Niederschlagsintensität in verschiedenen Klassen im Zeitraum 09.12.2107 bis 31.03.2018 (Klammerwerte in der Legende geben die Zeitlängen an, in denen eine Geschwindigkeitsbeschränkung vorgegeben wäre)

5.7.4 Einzelbewertungen (nur Niederschlagsart)

Aufgrund der fehlenden genauen Beschreibung einer Bewertungsmethode (siehe 5.7.2) insbesondere der fehlenden Qualität eines Referenzsensors ist nachfolgende Bewertung umgesetzt worden. Hierbei wird das im Abschnitt 5.7.2 beschriebenen Verfahren unter Verwendung der Fotos von einer

Beobachtungsplatte genutzt. Es soll auch der Bewertung der Prüfvorschrift der CEN/TS 15518-4 dienen, von der bislang keine praktische Umsetzung bekannt ist.

Für eine Bewertung der Sensoren auf dem Testfeld worden in 12 verschiedenen Zeiträumen mit mindestens 24 Stunden betrachtet. Die 12 Zeiträume enthalten alle erkannten Schneefallereignisse im Winter 2017/18, die auch Schnee oder Schneematsch auf der Fahrbahn zur Folge hatten. Sie beinhalten aber auch reine Regenereignisse unterschiedlicher Intensität. Innerhalb von drei Zeiträumen wird nochmals zwischen zwei Ereignissen unterschieden, zwischen denen eine weitgehende Abtrocknung der Fahrbahn sichtbar war. Bei den Situationsbetrachtungen wurde eine Einschätzung vorgenommen, ob der Sensor ein beobachtetes Ereignis richtig wiedergegeben hat oder nicht. Bei der Einschätzung der Sensorqualität wurden nur Messwerte herangezogen, die auf den Fotos eindeutig bewertet werden konnten. Unsichere Aussagen fanden keinen Eingang in die Bewertung. Erkannte kurze Ereignisse unter 10 Minuten sind im Einzelfall aufgeführt, gehen aber nicht in die Bewertung ein.

Ein Sensor hat bei der hier vorgenommenen Bewertung die Anforderungen in Bezug auf die Unterscheidung von keinen, flüssigen oder festen Niederschlag erfüllt, wenn Beobachtungen und Messwerte weitgehend übereinstimmen. Weitgehend heißt, dass der Sensor nicht absolut zu jeder Minute die Beobachtung wiedergeben muss. Differenzen über eine Länge von weniger als 10 Minuten zwischen Beobachtung und Messwert werden für den Winterdienst noch nicht als entscheidungsbeeinflussend gesehen und müssen nicht negativ für eine Bewertung gesehen werden. Es wurden abweichend zur CEN/TS die vollen Zeiträume eines Niederschlagsereignisses betrachtet. Der Anhang 1 enthält eine differenziertere Bewertung der Sensoren anhand der Fotobeobachtungen. Zusammengefasst sind Ergebnisse in der Tabelle 6.

Fall	Datum	Fallart	Boschung		Lufft	Vaisala
			PWS	NI/SH	WS600	PWD12
1.1	10.12.2017	Schneefall mit Schneebedeckung	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
1.2	10.12.2017	Regen bei Temperatur gering über 0°C	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2	12.12.2017	Schneeregen	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3	13.12.2017	Regen	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
4	18.12.2017	Schneefall mit Schneebedeckung	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
5	29.12.2017	Regen	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
6	17.01.2017	Schneefall mit Schneebedeckung	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
7.1	11.02.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
7.2	11.02.2018	Regen	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt
8.1	12.02.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
8.2	15.02.2018	Regen/Schnee ohne Schneebedeckung mit Temperatur unter 0°C	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	erfüllt
9	15.02.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
10	02.03.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
11	18.03.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt
12	20.03.2018	Schneefall mit Schneebedeckung	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt

Tabelle 6: Erfüllung der Anforderungen nach DIN EN 15518-3 bei 15 Ereignisbetrachtungen zur Niederschlagsart im Winter 2017/2018

Darüber hinaus wurden die Messwerte aller Sensoren im kompletten Zeitraum vom 09.12. 2017 bis 31.03.2018 betrachtet. Gab es in weiteren Zeiträumen zwischen den Sensoren größere Abweichungen, wurden diese Zeiträume anhand der Fotos bewertet. Wenn einzelne Sensoren hier abweichende Angabe zur Fotobewertung auftraten, wurde dies im Anhang 1 mit aufgeführt. Die Zeit der Abweichung musste mindestens eine Stunde auftreten.

Die nachfolgenden Ausführungen führen weitere Einschätzungen der einzelnen Sensoren für die Niederschlagsart auf. Die zusammengefasste Bewertung am Ende mit einer teilweisen Einsatzempfehlung für den Winterdienst erfolgt in Anlehnung an die CEN/TS 15518-4. Sie bezieht sich auf die Aussagen in der Tabelle 6.

– Laser-Niederschlagsmonitor LNM

Der Sensor wurde im Dezember 2015 installiert. Im Ergebnis hat der LNM der Firma Thies die höchste Übereinstimmung zu den Beobachtungen gezeigt. Innerhalb der Betrachtungen sind nahezu keine Abweichungen zu den Beobachtungen erkennbar. Es gibt nur wenige Einzelfälle, bei den er in kurzen Zeitabschnitten unter 10 Minuten nicht ganz mit der Beobachtung übereinstimmt. Sehr kurze betrachtete Niederschläge – insbesondere Schneefall oder mehr hagelartiger Niederschlag – hat er häufig als einziger Sensor angezeigt. Der Sensor könnte als Referenzsensor für die Bewertung genutzt werden. Praktisch kam er dafür bei der Auswahl der bewerteten Situationen zum Einsatz.

Falsche Angaben (Schneefall) hat er im Oktober 2017 über mehrere Stunden ausgegeben. Hier könnten Spinnen ein Problem gewesen sein. Das Problem hat sich aber ohne Wartung wieder aufgelöst. Ende 2018 konnten mehrere falsche Anzeigen festgestellt werden. Bis zu diesem Zeitpunkt hat der Sensor keinerlei Wartung erfahren. Er lief damit rund drei Jahre ohne größere Probleme. Der Zustand im Januar 2019 ist im Bild 70 dokumentiert. Danach wurde er nur mit einem Tuch gereinigt. Weitere Auswertungen erfolgten nicht.



Bild 70: Zustand des LNM-Sensors der Firma Thies, aufgenommen am 10. Januar 2019

Der LNM-Sensor der Firma Thies erfüllte die Anforderungen für den Winterdienst gemäß den Vorgaben der CEN/TS 15518-4 mit 100% und kann damit für den Einsatz im Winterdienst empfohlen werden.

– PWD12 der Firma Vaisala

Den betrachteten Sensor PWD12 hat die Firma Vaisala am 8. Dezember 2017 im Rahmen eines Austausches im Testfeld installiert (Firmware-Version 2.05). Grund für den Austausch war die im Vergleich zu anderen Sensoren extrem niedrige und damit auch unplausible Niederschlagsintensität des vorher installierten PWD12.

Der PWD 12 hat eine weitgehende Übereinstimmung der Niederschlagsereignisse sowohl von der Zeit als auch in Bezug auf die Niederschlagsart im Vergleich zur Beobachtung erreicht. Auffällig bei diesem Sensor war häufig die bis zu 10 Minuten spätere Anzeige eines Ereignisses. Für eine Nutzung im Winterdienst wird dies noch für vertretbar gehalten.

Der PWD12-Sensor der Firma Vaisala erfüllte die Anforderungen für den Winterdienst gemäß den Vorgaben den Beobachtungen mit 86%. Damit erfüllt er die Anforderungen der CEN/TS 15518-4 und wird für die Anwendung im Winterdienst empfohlen.

Die Firma Vaisala hat in ihrer Stellungnahme auf die Beobachtungsergebnisse darauf verwiesen, dass es keine eindeutige Definition für die Ausgabe von Schneeregen gibt. Bei Mischniederschlägen wie Schneeregen wird nicht in jedem Fall das Messsignal auf einen festen Niederschlag abgeleitet. Dies begründet häufig die Abweichungen zwischen Bewerter und Sensor und muss als Argumentation akzeptiert werden. Das Ergebnis würde sich bei einer anderen Messsignalverarbeitung wahrscheinlich verbessern.

– WS600 der Firma Lufft

Der WS600 war zum Zeitpunkt der Auswertungen schon länger installiert (seit 2012). Am 08.12.2017 wurde er gewartet.

Bei den Fallbetrachtungen (siehe Anhang 1) weist er teilweise ein sehr unterschiedliches Verhalten im Vergleich zu den Beobachtungen auf. Teils gibt er gar keinen Niederschlag, teils gibt er die falsche Niederschlagsart an. In 11 der 15 betrachteten Fälle erfüllt er die Anforderungen gemäß den Beurteilungsvorgaben nicht.

Im Januar 2019 konnte beobachtet werden, wie die eigentlichen Messeinrichtungen zugeschnitten waren. Bei einer Überprüfung des Sensors hat die Firma Lufft festgestellt, dass die Heizung im Sensor nicht angeschlossen war. Gemäß Tabelle 6 hat er den Niederschlag immer dann nicht erkannt, wenn Schnee oder Schneeregen beobachtet wurde. Allerdings trat das Problem der fehlerhaften Anzeigen nach der Installation der Heizung weiter auf. Der Sensor ist inzwischen ausgetauscht. Den Ersatzsensor hat die BAST noch nicht systematisch bewertet.



Bild 71: Sensor WS600 am 31. Januar 2019

Der WS600-Sensor der Firma Lufft erfüllte die Anforderungen für den Winterdienst gemäß den Vorgaben der CEN/TS 15518-4 mit rund 27 %. Aufgrund der fehlerhaften Installation erfolgt keine Bewertung.

- NI/SH der Firma Boschung

Der NI/SH hat häufig bei beobachtetem Schneefall als Niederschlagsart nur einen flüssigen Niederschlag angezeigt.

Bei ihm konnte im Januar 2019 beobachtet werden, wie Teile der eigentlichen Messeinrichtungen – die Infrarotsender oder -empfänger – nahezu zugeschnitten waren (Bild 72). Im Sensor sind laut Firmenangaben Widerstände zur Erwärmung in der Nähe der IR-Strahler vorhanden.



Bild 72: Sensor NI/SH nach einem Schneefall am 31. 01.2019

Der NI/SH-Sensor der Firma Boschung erfüllte die Anforderungen für den Winterdienst gemäß den Vorgaben der CEN/TS 15518-4 mit rund 53 %.

– PWS der Firma Boschung

Der bewertete Sensor PWS ist seit dem Juni 2017 im Testfeld installiert. Er kam im Tausch für einen zuvor installierten Sensor, der häufig fehlerhafte Meldungen ausgegeben hatte.

Der PWS stimmte bei den Situationsbetrachtungen im Anhang 1 oft nicht mit den Beobachtungen überein. Dabei weist er zwei besondere Auffälligkeiten auf. Insbesondere Schneefallereignisse zeigte er häufig deutlich kürzer als beobachtet an. Umgekehrt gab er Schneefall an, bei dem kein Schneefall beobachtet werden konnte. Dabei handelte es sich häufig um mehrere Stunden. Beide Auffälligkeiten ermöglichen keine richtigen Einsatzentscheidungen. Bei fehlenden Angaben kann eine tatsächlich kritische Situation unterschätzt werden.

Bei dem Sensor PWS konnte im Januar 2019 beobachtet werden, wie seine eigentliche Messeinrichtung – der Laserausgang - zugeschnitten war (Bild 73). Im Sensor ist laut Firmenangaben keine Heizung vorhanden.



Bild 73: PWS nach Schneefall am 31.01.2019

Seitens der Firma Boschung wurden Störungen im Sichtfeld des Laserstrahls vermutet. Er wurde daher mehrmals in seiner Position geändert.

Der PWS-Sensor der Firma Boschung erfüllte die Anforderungen für den Winterdienst gemäß den Vorgaben der CEN/TS 15518-4 mit rund 53 %.

5.7.5 Bewertung und Zusammenfassung

Angaben zum Niederschlag sind wesentliche Parameter für Entscheidungen zum Winterdienst. Insbesondere die Nichterkennung von Niederschlag kann zu einer hohen Wahrscheinlichkeit von Fehlentscheidungen in Bezug auf eine Einsatzauslösung führen.

Die richtige Angabe der Niederschlagsart ist für die Entscheidung der Einsatztechnik von großer Bedeutung. Bei Regen und Eisregen bei Temperaturen um 0°C oder tiefer, ist in der Regel ein Tausalzeinsatz mit hohen Streudichten erforderlich. Bei Schneefall ist dagegen das Mitführen von Schneepflügen notwendig. Die Definition der Anforderungen in der EN 15518-3 lässt eine Unterscheidung zwischen Eisregen und Schneefall nicht zu.

Die Ergebnisse der einzelnen Sensoren fallen bei beiden betrachteten Niederschlagsangaben – Art und Intensität – teilweise sehr unterschiedlich aus.

Die hier vorgenommene Bewertung entspricht den derzeitigen Prüfvorgaben der DIN CEN/TS 15518-4 und der TLS. Die vorgenommenen Aussagen könnten damit als Ergebnisse von Qualifikationsprüfungen nach standardisierten Prüfungen gewertet werden. Dabei haben die Sensortypen LNM der Firma Thies und der PWD12 der Firma Vaisala bei den Tests die Anforderungen an die CEN/TS 15518-4 erfüllt, die anderen Typen nicht. Allerdings werden die Anforderungen mit 75% Übereinstimmung zu einem Referenzsensor oder einer visuellen Beurteilung als sehr niedrig angesehen. Das nur 3 von 4 Ereignissen für sichere Entscheidungen dienen sollen, erscheint besonders für eine automatisierte Verarbeitung der Daten wenig hilfreich. Die moderne Distrometerbauart als Stand der Technik ließe höhere Anforderungen zu. Sie ist allerdings etwas teurer als andere Sensoren.

Eine von den Herstellern angesprochene Problematik stellt die Beurteilung von Mischniederschlägen wie Schneeregen dar. Die DIN EN 15518-3 geht nicht auf diese Problematik ein. Die BAST hat in der hier geführten Bewertung erkannte weiße Partikel auf einer Oberfläche als festen Niederschlag bewertet. Beobachtungen, ob auch flüssiger Niederschlag zusätzlich erkennbar war, erfolgten nicht. Eine andere Bewertung erfolgte auch nicht, wenn ein Schneekristall binnen kurzer Zeit geschmolzen war. Die Bewertung erfolgte unter dem Aspekt, dass bei erkennbaren Schneekristallen eine gewisse Glättegefahr durch Niederschlag bestehen kann. Deshalb sollte diese Form der Beobachtung auch als Anforderung für die Ausgabe eines festen Niederschlags beschrieben werden.

Die Angaben zur Niederschlagsintensität wurden nur statistisch ausgewertet. Sie weisen sehr große Unterschiede auf. Die ermittelten Gesamtsummen des Niederschlags im Bewertungszeitraum des Winters 2017/18 weisen ein Verhältnis von 1:2,5 zwischen dem kleinsten und größten Wert auf. Für betrachtete kürzere Zeitperioden waren sie deutlich größer. Für Überprüfungen muss eine genaue Zeitgleichheit bei der Messwerterfassung hergestellt werden. Dies konnte auf dem Testfeld noch nicht realisiert werden.

Eine erste Niederschlagserkennung nach der DIN EN 15518-3 ist erst bei Werten 0,1 mm/h gefordert. 0,03 mm gefrorene Wasserfilmdicke bedeuten aber schon meist eine extreme Glätte. Das kann eine hohe Unsicherheit bei Datennutzer bringen, wenn Messwerte der Niederschlags- und Fahrbahnzustandsangaben mit unterschiedlichen Aussagen zur Verfügung stehen.

Vor einer Anwendung der Sensoren für den Niederschlag ist zu klären, unter welchen räumlichen Umgebungsbedingungen die Sensoren für zuverlässige Angaben an der Straße nutzbar sind. Dazu zählt das Vorhandensein von Vegetation oder Bauwerke wie Schallschutzwände, die wiederum die Windverhältnisse beeinflussen. Für zuverlässige Niederschlagsangaben sollten die Messbedingungen an den vorgesehenen Messorten den möglichen Lieferanten bereits im Vorfeld genannt werden. Nur so können weitere Diskussionen über nichtplausible Messergebnisse nach einer Installation vermieden werden. Vorhandene Normen geben derzeit keine gesonderten Bedingungen an. Der räumlichen Testfeldbedingungen sind mit anderen häufig vorkommenden Standortbedingungen vergleichbar.

Nach der Installation sind sie durch Beobachtungen genau zu kontrollieren.

Vorrichtungen zur Schneefreihaltung der eigentlichen Messvorrichtungen sollten vorhanden sein und gegebenenfalls geprüft werden.

Die Messungen können durch das Umfeld und damit insbesondere durch Wind beeinflusst werden. Sensoren könnten Windfaktoren insbesondere bei der Messung der Niederschlagsintensität mit einbeziehen. Dies ist bei den Testfeldsensoren nicht bekannt und war teilweise aufgrund fehlender Windsensoren auch nicht möglich.

5.7.6 Überlegungen für weitere Entwicklungen

Eine laborartige Prüfung der Sensoren für den Niederschlag wird derzeit als nicht zielführend angesehen. Die in der Natur auftretenden vielfältigen Niederschlagsformen können nicht dargestellt werden. Die Art der Beurteilung durch Beobachtung, wie hier im Projekt durchgeführt, sollte weitergeführt werden. Eine genaue Beurteilung über eine Winterperiode mit mindesten fünf Schneefallereignissen sollte als Mindestanforderung für Qualitätsprüfungen bestehen bleiben. Die Überprüfung von Eisregen als Niederschlag kann aufgrund des sehr seltenen Auftretens in Deutschland nur zufällig erfolgen. Neben Betrachtungen von einzelnen Niederschlagsituationen sollten weitere Prüfzeiträume auch bei nicht vorhandenem Niederschlag bei unterschiedlichen Bedingungen bewertet werden.

Als nicht zielführend wird die derzeitige Prüfvorschrift in der CEN/TS 15518-4 angesehen. Danach ist nur jeweils einer Stunde nach Niederschlagsbeginn und vor Niederschlagsende zu betrachten. Eine Einbeziehung des kompletten Niederschlagszeitraumes erscheint sinnvoll, da auch hier, wie die Testfeldergebnisse zeigen, noch sehr häufig Differenzen zwischen Messwerten und Beobachtung auftreten können. Sie können unter Verwendung eines Referenzsensors schnell gefunden werden. Diese Mehrbetrachtungen stellen somit keinen wesentlich erhöhten Prüfungsaufwand dar. Definiert müssen noch die jeweiligen Übereinstimmungen innerhalb eines Ereignisses. Eine entsprechende Prüfvorschrift für die Fortschreibung der CEN/TS 15518-4 ist im Anhang 5 enthalten.

Für die Beurteilung der Niederschlagsintensität ist eine genaue Zeitsynchronisation von Bedeutung. Dazu wurde ebenfalls eine genaue Verfahrensbeschreibung erstellt (siehe Anhang 5). Eine Umsetzung der Zeitsynchronisation muss durch die Hersteller noch erfolgen.

Eine erste Niederschlagserkennung ist nach der DIN EN 15518-3 erst bei Werten von 0,1 mm/h gefordert. 0,03 mm gefrorene Wasserfilmdicke bedeuten aber schon meist eine extreme Glätte. Das kann eine hohe Unsicherheit bei Datennutzer bringen, wenn Messwerte der Niederschlags- und Fahrbahnzustandsangaben mit unterschiedlichen Aussagen zur Verfügung stehen. Daher sollte die Messwertauflösung von derzeit 0,1 mm/h auf 0,01 mm/h erhöht werden. Im Rahmen der Überarbeitung der EN 15518-3 ist dies vorgesehen. Für dessen Datenübertragung wäre ein neuer TLS-DE-Typ zu definieren. Hohe Messgenauigkeit sind bei den geringen Intensitäten allerdings nicht zu erwarten.

Die Angaben zur Niederschlagsintensität werden heute vielfach mit der Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen in Verbindung gebracht. Bei diesem Anwendungszweck müssen intensive Niederschläge sehr zeitgenau gemessen und ausgegeben werden, wenn eine sinnvolle Warnung der Verkehrsteilnehmer im betroffenen Bereich erfolgen soll. Daher wird bei dieser Anwendung eine Messung jede Minute mit Angabe mm/h gefordert. Damit können aufgrund von Rundungen höhere Ungenauigkeiten entstehen, die sich auf genauere Aussagen bei der Erfassung von Niederschlagsmengen über einen größeren Zeitraum auswirken können. Grundsätzlich wäre zu überlegen, für den Winterdienst eine Angabe der Niederschlagsmenge je Stunde zu fordern, die auch über eine Stunde zusammenhängend gesammelt wird. Je nach Datenübertragung kann der Wert auch unterschiedlich aktualisiert werden.

Aufgrund der fehlenden Qualitätsbewertungen bei der Niederschlagsintensität können die derzeitigen Genauigkeitsanforderungen nur unzureichend eingeschätzt werden. Die Ergebnisse des Testfeldes weisen auf hohe Messunsicherheiten hin. Es wäre zu überlegen, welche Anforderungen zukünftig im Bereich des Straßenwesens benötigt werden.

Im Bereich der Nutzung in Streckenbeeinflussungsanlagen gibt es derzeit bei der Niederschlagsintensität zwischen den Schwellwerte für Schaltungen sehr hohe Abstände. Eine Messunsicherheit von

$\pm 50\%$ würde sich maximal nur um eine Stufe bei den derzeitigen Schaltungsalgorithmen auswirken. Aufgrund der hohen Spannweite innerhalb einer Schaltungsstufe könnten bei dieser Betrachtung die bisherigen Anforderungen sowohl in der TLS als auch in der DIN EN 15518-3 größer als bislang vorgegeben sein.

Für den Winterdienst sind höhere Messunsicherheiten bei der Intensität von Bedeutung. Eine Toleranz bei von $\pm 50\%$ muss bei einer punktuellen Betrachtung als Stand der Technik angesehen werden. Wichtig ist, dass geringe Niederschläge überhaupt angezeigt werden. Für die genaue Streudichteberechnungen spielt die genaue Vorhersage der Niederschlagsmenge eine wichtige Rolle [Hausmann 2019].

5.8 Lufttemperatur und Luftfeuchte

Bisherige bekannten Tests von Sensoren für die Lufttemperatur und Luftfeuchte für Straßenwetterstationen ergaben kaum Anlass zur Kritik bezüglich der Messgenauigkeit. In einem Fall konnte ein Wegdriften der Messwerte eines Sensors wahrscheinlich aufgrund von Feuchtigkeit beobachtet werden [Melero Corell et al. 2014].

Daher fanden auf Testfeld im hier beschriebenen Betrachtungszeitraum keine umfangreichen Auswertungen der verschiedenen Sensoren für die Lufttemperatur und Luftfeuchte statt. Die eingesetzten Sensoren dienten eher der Betrachtung der Umgebungsbedingungen bei der Bewertung der Sensoren für die Fahrbahnparameter.

Für die Bewertung der Luftfeuchte wird gemäß Abschnitt 2 hauptsächlich die Taupunkttemperatur empfohlen. Sie kann mathematisch direkt in Bezug zur Lufttemperatur gesetzt werden [Badelt, Breitenstein 2005]. Wenn die Taupunkttemperatur die Lufttemperatur erreicht, ist die Luft mit Wasser gesättigt und es muss mit einem Ausfall von Wasser aus der Luft und damit mit Tau bzw. Reif gerechnet werden.

Die Taupunkttemperatur wird bei den bekannten Straßenwetterstationen meist aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte berechnet (nach DIN 15518-3 = abgeleitete Taupunkttemperatur). Eine Berechnungsformel enthält das FGSV-Wissenspapier H PEB SWIS [FGSV 2019]. Die eigentlichen Sensoren für die Luftfeuchte und Lufttemperatur müssen für die richtige Messung strahlengeschützt und ausreichend belüftet sein.

Die nachfolgenden statistischen Auswertungen über die Differenzen der beiden im Testfeld vorhandenen Sensoren für die relative Luftfeuchte und Taupunkttemperatur zeigen kaum Abweichungen, die nur selten über den Normanforderungen bezüglich der Genauigkeit gehen. In der DIN EN 15518-3 werden für die relative Luftfeuchte eine Genauigkeit von $\pm 3\%$ bei Werten über 85% (sonst $\pm 5\%$) und $\pm 1,5^\circ\text{C}$ für eine abgeleitete Taupunkttemperatur gefordert.

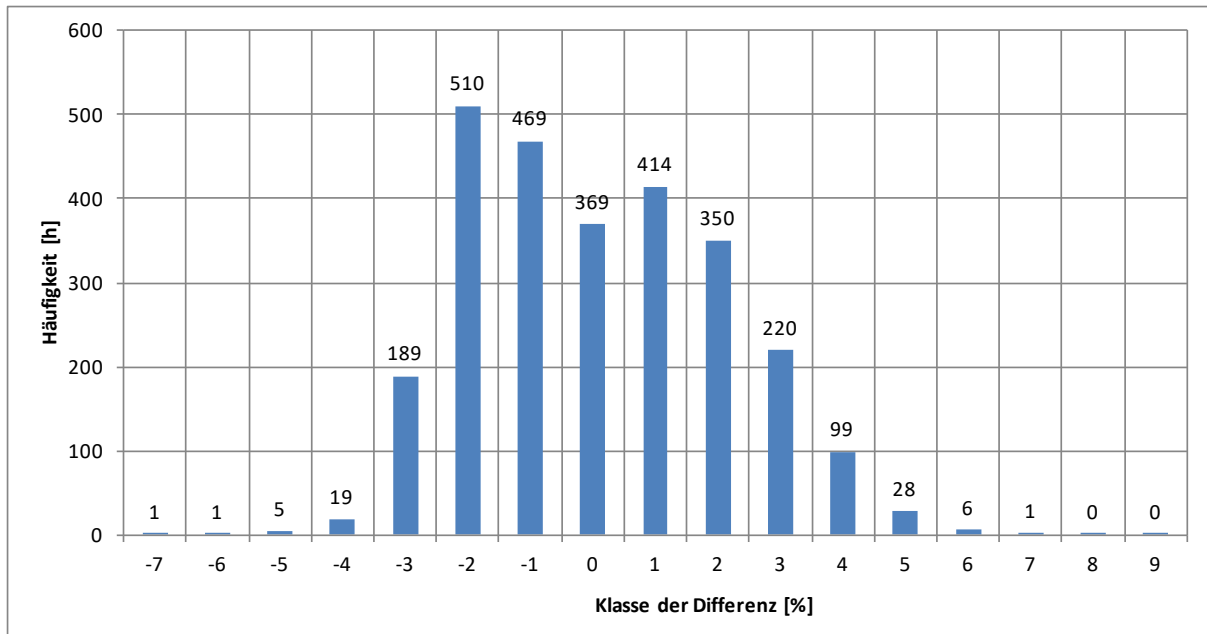


Bild 74: Häufigkeit der Differenz zwischen den Sensoren WS600 und HMP155 für die relative Luftfeuchte im Zeitraum 09.12.2017 bis 31.03.2018

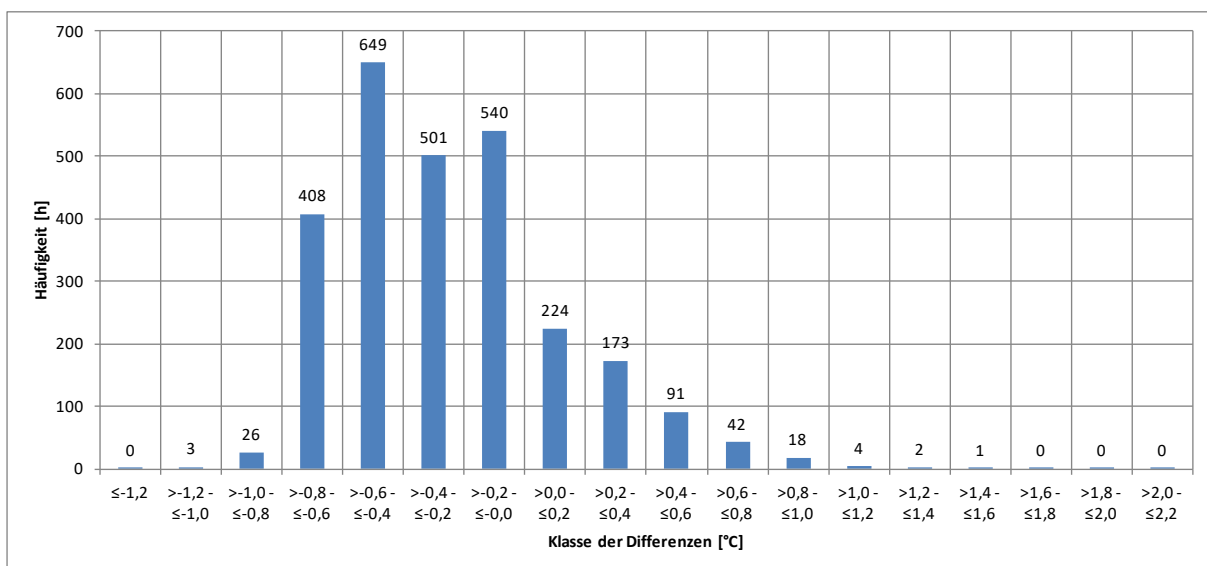


Bild 75: Häufigkeit der Differenz zwischen den Sensoren WS600 und HMP155 für die Taupunkttemperatur im Zeitraum 09.12.2017 bis 31.03.2018

Als Referenz bei der Überprüfung nutzte die BAST ein Aspirations-Psychrometer nach Assmann.

5.9 Weitere Parameter

Sensoren für weitere, im Abschnitt 4.2.1 genannte, Parameter zur Anwendung im Winterdienst sind nicht geprüft worden.

5.10 Stellungnahmen der Firmen

5.10.1 Allgemeines

Die Bewertungen der Sensoren gemäß dem Anhang 1 wurden den Firmen Lufft, Boschung und Vaisala mit der Bitte um eine schriftliche Stellungnahme zugesandt. Die Firmen Vaisala und Lufft haben zu den

Ausführungen schriftlich Stellung genommen. Die Firma Boschung hat nur mündlich ihre nicht abgegebene Stellungnahme zu den Fallbewertungen begründet. Diese ist in einer Gesprächsnotiz der BAST festgehalten.

Seitens der BAST wurde eine falsche Bewertung bei der Firma Vaisala korrigiert. Die Mehrzahl der Kommentare der Firma Lufft und Vaisala beziehen sich auf Begründungen bemängelter Sensorangaben. Dabei geht es häufig um grenzwertige Beurteilungen bei Schneematsch und Schneeregen. Die Kommentare sind teilweise in den zusammengefassten Ergebnisdiskussionen zu den einzelnen Parametern behandelt. In den nachfolgenden Kapiteln sind die Standpunkte der BAST zusammengefasst. Die vollständigen Stellungnahmen und die vollständige Gesprächsnotiz sind im Anhang 3 enthalten.

5.10.2 Firmen Lufft

- zum Niederschlagssensor WS600

In ihrer Stellungnahme verweist die Firma Lufft auf die nicht korrekt angeschlossene Heizung beim WS600. Auch wenn eine statistische Aussage zur Übereinstimmung der Messwerte mit den Beobachtungen vorliegt, wird der Sensor nicht bewertet. Die Firma weist auf Probleme bei Erkennung von Mischzuständen hin. Diese Problematik muss aus Sicht der BAST in den Normungsgremien und mit den Anwendern weiter diskutiert werden.

- zum Sensor ARS31pro für die Gefriertemperatur

Die von der BAST als unplausibel gewerteten Gefriertemperaturmesswerte werden in der Form erklärt, wie es auch seitens der BAST erfolgt. Die von der BAST vorgenommene Empfehlung, die Gefriertemperatur nicht mehr zu nutzen, wird damit nicht widersprochen.

- zum IRS31pro und NIRS31 für den Fahrbahnzustand

Die Firma Lufft weist auf die kleinen Messbereiche der Sensoren - insbesondere für den IRS31pro – hin. Damit sind aus ihrer Sicht die Messwerte schwierig mit der mehr globalen Bildbetrachtung zu vergleichen. Grundsätzlich ist es richtig, dass deutliche Unterschiede im Fahrbahnquerschnitt vorhanden sind und nicht immer der Sensorbereich repräsentativ für eine Gesamtaussage ist. Die Bewertung der BAST ist allerdings immer für die jeweiligen Abschnitte im Fahrbahnquerschnitt erfolgt, in denen die Sensoren gemessen haben. Das von der Firma Lufft genannte Problem der fehlenden Referenzmessung ist Aufgabe der weiteren Forschung. Aus Sicht der BAST ist nach dem Stand der Technik das menschliche Auge derzeit die Referenz, das unter Hinzuziehung von Fotos hinreichend genau eine Situation bewerten und dokumentieren kann.

Der Hersteller sollte darüber hinaus vorab benennen können, was von einem von ihm gelieferten Sensor erwartet werden kann und wie mögliche Grenzbereiche bewertet werden sollen. Grundsätzlich sollten die Möglichkeiten eines Sensors standardisierten Anforderungen entsprechen. Ansonsten entsprechen die Sensorangaben nicht den Erwartungshaltungen der Nutzer.

5.10.3 Firma Vaisala

Die Firma Vaisala ist nur auf die Bewertungen der Sensoren DSC111 für den Fahrbahnzustand und PWD12 für den Niederschlag eingegangen. Dabei geht sie auf die Grenzwerte bei der Beurteilung ein, die sich mit den Fällen Schneematsch und Schneeregen befasst, und dass die Sensoren nicht den Vorstellungen des Beobachters bzw. Bewerter eingestellt sind.

Die unterschiedlichen Ansichten ergeben sich aus den unterschiedlichen Interpretationen der gegenwärtigen Anforderungen. Zur Vermeidung dieser Unterschiede sind weitere Detaillierungen bei den Anforderungen und deren Prüfungen vorzunehmen. Hier gilt auch die gleiche Aussage wie bei der Firma Lufft, dass der Hersteller genauer erklären muss, was der Datennutzer von den Sensormesswerte bei den doch häufig auftretenden Situationen mit Schneematsch erwartet kann. Weitergehende Diskussionen sind in den Abschnitten zu den beiden Parametern aufgeführt.

5.10.4 Firma Boschung

Die Firma Boschung hat keine Kommentierung der eigentlichen Bewertungen abgegeben. Bei einem Gespräch begründeten Vertreter der Firma, warum sie keine Stellungnahme zu den Bewertungen abgegeben haben. Da diese Begründung nicht schriftlich vorgelegt wurde, hat die BAST eine Gesprächsnotiz verfasst (siehe Anhang 3). Wesentlichen Äußerungen werden nachfolgend kommentiert:

„Das Testfeld, in dessen Rahmen die Sensoren beurteilt wurden, entspricht einer eher zufälligen Gestaltung der BAST, die keiner Norm entspricht. Die Ergebnisse können nur in Bezug für diesen Standort beurteilt werden und dürften nicht verallgemeinert werden.“

Standpunkt der BAST:

Es gibt bislang für keinen der beurteilten Parameter Vorgaben für ein Testfeld. Es sind keine Vorgaben an die Sensoren bekannt, aus denen sich Einschränkungen für einen Installationsort herleiten lassen. Eine Ausnahme ist die Dicke der Bodensonden bei der Installation auf Brücken. Mit Einschränkungen muss aufgrund der Oberflächenstruktur sicherlich bei offenporigen Fahrbahnbelägen gesehen werden, die bislang aber nicht beschrieben sind.

Der Testfeldabschnitt besitzt keine besonderen Herausforderungen (Beschreibung siehe Abschnitt 4.1). Er entspricht häufig gewählten Standortbedingungen entlang der Straßen und Autobahnen. Ausnahmen stellen teilweise die Niederschlags- und Windsensoren dar. Hier gibt es von den einigen Herstellern Umfeldvorgaben für die Gewährleistung einer genauen Messaussage für das nähere Umfeld.

Allen angeschriebenen Firmen waren die Bedingungen bekannt, da vor den hier betrachteten Zeiträumen Tests mit deren Sensoren stattfanden. Auf die Bewertungsabsicht hat die BAST in ihrer Leistungsbeschreibung zur Lieferung der Sensoren hingewiesen (siehe Anhang 2). Die Firma Boschung hat weder vor noch während der Untersuchungen darauf hingewiesen, dass ihre Sensoren nicht für den Testfeldstandort geeignet sind.

Aus diesem Grund geht die BAST davon aus, dass die Ergebnisse verallgemeinert werden können. Dürften die erzielten Ergebnisse nur auf das Testfeld bezogen werden, müssten heute für jeden Installationsort genaue Eignungsüberprüfungen stattfinden. Das wäre praktisch nicht realisierbar und entspricht auch nicht der Praxis bei der Installation und im Betrieb der Straßenwetterstationen. Das BMVI als Straßenbaulastträger hat die BAST mit den entsprechenden Qualitätsbewertungen beauftragt. Nach den derzeitigen Erkenntnissen ist es auch nicht notwendig, Einschränkungen vorzunehmen, da es geeignete Sensoren für jeden Parameter unter den hier genutzten Testfeldbedingungen gibt.

„Auf dem Testfeld werden nur Messwerte von Sensoren beurteilt. Das entspricht nicht der firmeneigenen Philosophie zur Verwendung der Daten. Diese werden durch firmeneigene Software (Borrma-Web) in entsprechende Warnmeldungen verarbeitet, die bei vorhandenen Kunden zur Zufriedenheit entsprechend genutzt werden. Die auf dem Testfeld untersuchten Messwerte können somit nicht als allgemeine Bewertung der Boschung-Sensoren betrachtet werden.“

Standpunkt der BASt:

Eine wesentliche Grundlage einer richtigen Glättevorhersage ist die genaue Kenntnis der glätte-relevanten Parameter entlang der Straße. Durch die Entwicklung des Straßenzustands- und Wetterinformationssystem SWIS des Deutschen Wetterdienstes und der Straßenbauverwaltungen der Länder werden heute anhand globaler Wettermodelle genaue punktbezogene Vorhersagen erstellt. Zukünftig sollen dazu die Daten der Straßenwetterstationen in die Vorhersagemodelle direkt einfließen. Genaue Vorhersagen setzen genaue Ausgangswerte voraus. Die hier durchgeführten Untersuchungen zu den einzelnen Parametern dienen damit der zukünftigen Qualität dieser Vorhersage.

Die Firma Boschung gibt an, dass sie ihre Sensordaten in einer von ihr gelieferten kompletten Wetterstation zu einem höheren Mehrwert verarbeitet. Das können anlageinterne Plausibilitätsprüfungen sein. Aus den Werten können auch entsprechende Warnungen abgeleitet werden. Dies bietet die Firma Boschung mit ihrem System Borrma-Web an.

Die Installation auf dem Testfeld diene allerdings der Sensorbeurteilung, die wie beschrieben allen angefragten Firmen bekannt war.

Plausibilitätsprüfungen können grundsätzlich die Einschätzung der Qualität von Sensorwerten verbessern (siehe Abschnitt 0). Ob die hier festgestellten Unplausibilitäten bei den Einzelsensoren der Firma Boschung durch eine Datenverarbeitung erkannt und ausgeschlossen werden können, wurde aufgrund der Aufgabenstellung BASt-seitig nicht untersucht. Empfohlene Plausibilitätsprüfungen [FGSV 2019] hätten hier nur auf fehlerhafte Werte hingewiesen.

Die Verarbeitung von Messdaten zu Glättewarnungen war nicht Aufgabe dieser Untersuchungen. Eine frühere Untersuchung der BASt [Badelt 1996] hat gezeigt, dass die Warnungen von den Firmen, die Straßenwetterstationen anbieten, unterschiedlich angegeben werden. Teilweise waren die Algorithmen nicht bekannt. Letzteres traf damals für die Firma Boschung allerdings nicht zu. Die Warnungen eines Systemanbieters bauen in der Regel auf die Arbeitsweise der eigenen Sensoren auf. Bei der Nutzung eines Systems ist man bei späteren Erweiterungen an einer Firma gebunden. Aus diesen Erfahrungen hat die BASt ein Warnmodell entwickelt, das herstellerneutral standardisierte Messdaten verarbeitet. Die Hintergründe und Nutzungsmöglichkeiten des Modells sind in einem BASt-Bericht beschrieben [Badelt, Breitenstein 2005]. Das Modell ist im FGSV-Wissenspapier zu Straßenzustands- und Wetterinformationssystem [FGSV 2019] als Empfehlung veröffentlicht.

Grundsätzlich können Glätteentwicklungen allein anhand von Daten einer Straßenwetterstation nicht sicher vorhergesagt werden. Hierzu sind globale Betrachtungen notwendig. Warnmodelle dienen nur der Vereinfachung einer Einschätzung einer Glättegefahr mit den Daten einer Straßenwetterstation an ihrem Standort zum Betrachtungszeitpunkt. Es sind bei Warnmeldungen in jedem Fall weitere Informationen zur Wetterentwicklung einzuholen. Entsprechende Hinweise enthält ebenfalls das FGSV-Hinweispapier.

Aus den genannten Gründen werden firmenspezifische Datenverarbeitungen in einem offenen System, in dem Straßenwetterstationen unterschiedlicher Hersteller arbeiten sollen, als wenig hilfreich angesehen.

6 Nutzung der Daten für den Winterdienst – Plausibilitätsprüfungen

Bislang sind nur die Daten der Sensoren für die einzelnen Parameter beschrieben. Eine weitere Frage besteht darin, ob die Gesamtheit der Daten die richtigen Einsatzentscheidungen zulassen würden.

Für die einzelnen 15 bewerteten Situationen (siehe Anhang 1) wurde für die gelieferten Anlagen (erweiterte Straßenwetterstationen) der Firmen Boschung, Lufft und Vaisala eine kurze zusammenfassende Bewertung der Nutzungsmöglichkeit unter Berücksichtigung aller Daten vorgenommen. Im Ergebnis lässt sich ableiten, dass es keinen Fall gab, bei dem der Beginn eine anhand der Fotos beobachteten kritischen Situation anhand der gemessenen Parameter als völlig unkritisch eingeschätzt werden konnte. Einzelne Daten weisen immer auf die beobachtete Glätte (Fahrbahntemperatur bei oder unter 0°C und gleichzeitig Feuchtigkeit auf der Fahrbahn oder Niederschlag vorhanden) hin. Dies kann mit ein paar Minuten Differenz erfolgen. Kritisch wird die Nutzung der Gefriertemperatur gesehen. Eine häufig vorhandene Gefriertemperatur weit unter der Fahrbahnoberflächentemperatur führte zu einer Verringerung der Gefahreinschätzungen, die aber nach den Beobachtungen vorlagen.

Bei der Vielzahl der Daten und den bestehenden Messunsicherheiten sind nicht alle Daten untereinander plausibel. Allein die Situationsbewertungen im Anhang 1 weisen auf eine Vielzahl von Unplausibilitäten hin, wenn Daten, sofern möglich, logisch verknüpft würden. Nicht plausible Daten können durch Plausibilitätsprüfungen herausgefunden werden. Plausibilitätsprüfungen sind in dem Hinweis-Papier zur Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen [FGSV 2017] beschrieben. Sie wurden vom Deutschen Wetterdienst inzwischen überarbeitet. Dabei flossen auch Auswertungen mit den Daten des Testfeldes BAB A4 ein. Die überarbeitete Plausibilitätsprüfungen stehen mit dem bereits veröffentlichten FGSV-Wissenspapier zu Straßenzustands- und Wetterinformationssystem [FGSV 2019] zur Verfügung. Eine umfassende Anwendung von Plausibilitätsprüfungen mit den Testfelddaten für statistische Auswertungen erfolgte nicht.

Wenn unplausible Daten aufgrund von Plausibilitätsprüfungen vorliegen, wäre bei reiner Datenbetrachtung eine visuelle Einschätzung notwendig. Früher wäre eine teure Kontrollfahrt notwendig gewesen. Heute kann ein Blick auf ein Online-Foto einfach helfen. Es stellt schnell eine unplausible Datenlage insbesondere für den Niederschlag und für den Fahrbahnzustand klar. Kameras stellen somit eine wesentliche Hilfe für die Nutzung der Daten dar. Sie lassen allerdings nicht für jede Situation eine sichere Einschätzung zu. Eine geringe Feuchte oder ein geringer Niederschlag/Niesel können nicht erkannt werden.

Kameras sollten für den Einsatz bei Dunkelheit mit einem Infrarotscheinwerfer kombiniert werden. Hohe Auflösungen bei den Kameras sind nicht unbedingt notwendig. Aus Datenschutzgründen durfte auf dem Testfeld A4 keine höhere Auflösung als 640x480 Pixel genutzt werden. Sie hat für die Bewertungen in den meisten Fällen ausgereicht.

Auf dem Testfeld standen für den besonderen Fall 5 Kameras zur Verfügung, die jede Minuten ein Foto geliefert haben. Grundsätzlich reicht eine Kamera für eine Einschätzung der Situation aus. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass bei Dunkelheit Scheinwerferlicht der Fahrzeuge häufiger ein Foto überblenden kann und keine Einschätzung der Situation möglich ist. Bei Straßen mit etwas höherem Verkehr sollten zur Vermeidung von längeren Zeitspannen mit nicht einschätzbaren Situationen häufiger Fotos erstellt werden. Über fünf Minuten sollte die Zeitspanne zwischen zwei Fotos nicht sein.

7 Zukünftige Sensorpositionierungen – Vorgaben zu Messflächen

Die berührungslos arbeitenden Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur, der Wasserfilmdicke und den Fahrbahnzustand stellen eine neue Bauart zu den bisherigen Bodensonden dar. Neben dem messtechnischen Vorteil, eine Eigenschaft der Fahrbahnoberfläche direkt zu messen, entfällt auch die Notwendigkeit des recht aufwendigen Einbaus in die Fahrbahn. Somit könnten derzeit längere Sperrzeiten beim Einbau oder auch Wartung deutlich reduziert werden, die immer wieder zu Staus führen. Bei den berührungslos arbeitenden Sensoren wären kurzzeitige Sperrungen nur noch bei Überprüfungen und Kalibrierungen notwendig.

Allerdings lassen sich die berührungslos arbeitenden Sensoren vom rechten Fahrbahnrand aus nicht beliebig auf jeden Punkt im Fahrbahnquerschnitt ausrichten, ohne dass Qualitätsverluste bei der Messung entstehen. Werden die derzeitigen Messpunkte für die Bodensonden weiterverfolgt, hätte das bei mehrbahnigen Straßen eine Positionierung der Masten im Mittelstreifen zur Folge. Damit reduzieren sich die notwendigen Sperraufwände nicht, sondern steigen sogar. Grund ist die Sperrung der auf beiden Richtungsfahrbahnen am Mittelstreifen anliegenden Fahrstreifen für die Sicherheit des Verkehrs und des Personals bei Montagearbeiten.

Die derzeitige Positionierungsvorgabe in der Mitte des linken Fahrstreifens einer Richtungsfahrbahn stellt einen Kompromiss für die von den Bodensonden gemessenen Parameter dar. Dort werden eine kühlere Fahrbahnoberflächentemperatur und eine höhere Feuchte erwartet als in den Rollstreifen. Am Rand eines Fahrstreifens sind die Messwerte meist noch ungünstiger und würden die Entscheidungen noch etwas mehr sensibilisieren. Allerdings wird dort mehr Tausalz erwartet [Hausmann 2009, Hausmann 2012], so dass die Werte für die Gefriertemperatur Aussagen auf eine mögliche Gefahr reduzieren würden.

Wenn die Gefriertemperatur aufgrund der überwiegend unplausiblen Messwerte zukünftig wegfällt (siehe Abschnitt 5.4), könnte eine andere allgemeine Positionierung für beide Sensorbauarten überlegt werden. Für die Vereinfachung des Einbaus bzw. der Ausrichtung könnte am rechten Rand des Hauptfahrstreifens vor der Leitlinie die Messung erfolgen. Damit könnte der Winkel der berührungslos arbeitenden Sensoren im Vergleich auf die Mitte dieses Fahrstreifens, wie auf dem Testfeld A4 derzeit praktiziert, etwas reduziert werden.

Bei den berührungslos arbeitenden Sensoren muss zusätzlich die Größe von deren Messflächen beachtet werden. Kleinere Messflächen können gut auf kritische Querschnitte ausgerichtet werden. Es besteht allerdings die Gefahr, dass sich diese Querschnitte durch eine Verlagerung der Rollspuren – wie bei schneebedeckter Fahrbahn öfter sichtbar – zu einer unkritischeren Situation verschieben können. Letzteres konnte allerdings auch auf dem linken Fahrstreifen in der bisher vorgegebenen Position bei Schneebedeckung beobachtet werden.

Grundsätzlich können Mittelwerte über eine größere Messfläche eine geringere Gefahr ausgeben, als sie in kleinen Querschnitten tatsächlich vorhanden ist. Größere Messflächen können außerdem nicht beliebig ausgerichtet werden, ohne dass sie Markierungsflächen einbeziehen. Für diese Markierungen müssten sie abweichend zur unmarkierten Fahrbahnfläche kalibriert werden. Dies ist mit den derzeitigen Sensoren nicht möglich. In diesem Fall wäre die Messfläche ausgehend von der Leitlinie in Richtung Fahrstreifenmitte auszurichten. Unter diesen Aspekten können die derzeit angebotenen berührungslos arbeitenden Sensoren mit ihren Messflächen mit Maßen von ca. 20 bis 100 cm in Längsseite der meist ellipsenförmigen Ausprägung als sinnvoll und noch vergleichbar angesehen werden. Bei deutlich größeren Messflächen sind wieder andere Betrachtungen notwendig.

Es werden zwar bereits Sensoren mit Messflächen angeboten, die über eine fast volle zweistreifige Fahrbahn messen können. Dabei beeinflussen dann Markierungen sicherlich nur in einer untergeordneten Form die Messung. Diese Sensoren sind allerdings derzeit vergleichsweise sehr teuer [Metsense 2020].

8 Erfahrungen zu Installation und Wartung

8.1 Allgemeines – Installationszeitpunkte

Der Testfeldaufbau sowie der weitere Betrieb sollten neben der Bewertung der Messgenauigkeiten auch der Erfahrungssammlung zur Einrichtung und Wartung von Straßenwetterstationen dienen.

Die BAST hat fast alle beschriebenen Sensoren für die dargestellte Bewertung käuflich erworben. Für die Beschaffung wurden entsprechende Leistungsbeschreibungen erstellt. Ein Beispiel ist im Anhang 2 aufgeführt. Die Masten zur Installation der Sensoren wurden seitens der BAST zur Verfügung gestellt. Sie stammen von der Firma Siemens und haben sich bislang sehr bewährt. Die Bauart ist im FGSV-Hinweispapier zur Umfelddatenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen beschrieben [FGSV 2017].

Die berührungslos arbeitenden Sensoren waren bereits bei einem Vorprojekt ab dem Jahr 2012 im Testfeld installiert worden [Melero et al. 2014]. Die Niederschlagssensoren und andere Sensoren für atmosphärische Parameter kamen zu unterschiedlichen Zeitpunkten ab 2012 auf das Testfeld. Die Bodensonden wurden im letzten Quartal 2016 installiert. Die Übertragung der Messdaten zum zentralen Datenserver war ab Ende 2016 vollständig umgesetzt und hat die Bewertungsarbeit (siehe Abschnitt 4.2) wesentlich vereinfacht.

8.2 Erfahrungen zur Leistungserbringung

– Installationserfahrungen

Bei den Installationen aller Sensoren gab es keine größeren Probleme. Die Bodensonden waren innerhalb von ca. 6 Stunden eingebaut. Für die Hauptarbeiten des eigentlichen Sensoreinbau im linken Fahrstreifen konnte der Verkehr über den rechten Fahrstreifen und Seitenstreifen geleitet werden. Nur beim Einbringen der Sensorzuleitungen war nur ein Fahrstreifen befahrbar. Längere Trocknungsphasen für die Vergussmassen war nicht nötig. Alle Bodensonden wurden sehr plan zur Fahrbahnoberfläche eingebaut.

Teilweise Schwierigkeiten bereitete die Ausrichtung der berührungslosen Sensoren auf die geforderten Mittelpunkte der Messflächen. Hier war nicht bei allen Sensoren durch Fixierhilfsmittel die Ausrichtung sicher bestimmbar. Ein Hilfsmittel können Laser oder Peilvorrichtungen sein, die während der Montage oder dauerhaft am Sensor definiert befestigt bzw. integriert sind. Ausgehend von ihrem sichtbaren Punkt auf der Fahrbahn können die Messflächen für die einzelnen Parameter abgeleitet werden. Auf dem Testfeld wurde sich teilweise der recht umständlichen Methode durch Verschieben von abweichenden Materialien im vermuteten Messbereich beholfen. Bei Dunkelheit konnte mit den Infraroteigenschaften der Kameras die Messflächen teilweise sichtbar gemacht werden.

– Dokumentation

Die Dokumentation der Anlage ist heute für den Nachweis der Arbeits- und IT-Sicherheit eine zwingende Voraussetzung und sollte auch ohne direkte Anforderungen in der Leistungsbeschreibung zu einem Produkt mitgeliefert werden. Sie ist auch eine Voraussetzung für die zügige Abwicklung von Service- und Wartungsarbeiten.

Ohne eine vollständige Dokumentation sollte keine vollständige Bezahlung der Leistungen erfolgen. Hier sollte im Vorfeld klar bekanntgeben werden, welche Inhalte zur Verfügung gestellt werden sollen.

Zur Dokumentation sollten mindestens gehören:

- Bedienungsanleitungen mit Sicherheitshinweisen
- Vorgaben zur Installation an einem Standort
- Kabelpläne mit Angabe der verbauten Komponenten (z. B. Sensoren, Netzteil, Modem, Kabelpläne, Kabeltypen usw.)
- Angabe der Firm- und Softwareversionen
- Statiknachweise für Montagen an Masten oder Brücken, für Befestigungsteile

Sie sollten vor der Installation vorliegen und später bei Änderungen fortgeschrieben werden. Verzögerungen auf baldige Lieferung nach einer Installation führten häufig zu einem langwierigen Nachfordern. Zu manchen Anlagen sind im Berichtszeitraum keine vollständigen Dokumentationen erstellt worden. Das hat im Einzelfall auch dazu geführt, dass die Firmen selber nicht mehr wussten, was sie wie verbaut haben. Das macht Wartungs- oder Instandhaltungsarbeiten aufwändiger.

Ein besonders negatives Beispiel für fehlende Dokumentationen zur Arbeitssicherheit war die Installation eines Sensors mit der Laserklasse 3, zu dem es zunächst keine Sicherheitshinweise gab.

- Abnahme

Kurzfristige Kontrollen der Sensoren nach dem Einbau erfolgten durch die BAST nicht, da die Installation für die hier dargestellten längerfristigen Prüfungen vorgesehen war. Maßgeblich für die Abnahme war die Bereitstellung der Daten, der Online-Visualisierung auf dem Testfeld anhand eines Messnetzclients mit der im Abschnitt 4.2.4 beschriebenen Software möglich war.

Vor dem Einbau der Bodensonden war deren Prüfung im Labor vorgenommen worden (Anhang 4). Mit Ausnahme des Vaisala-Sensors DRS511 hat keine geprüfte Bodensonde die Installation in das Testfeld geschafft. Der Austausch erfolgte unmittelbar vor dem Einbau durch die Hersteller aufgrund von nicht weiter genannten technischen Problemen bei den geprüften Sensoren. Damit war die geplante Beurteilungsmöglichkeit mit dem direkten Vergleich von Labor- und Praxisergebnisse verloren gegangen.

8.3 Wartung der Sensoren – Gewährleistungsarbeiten

Für die Anlagen auf dem Testfeld A4 gab es bis zum Ende des Bewertungszeitraumes keine festen Wartungsverträge. Die häufige Betrachtung der Messwerte für die Bewertungen ließ unplausible Messwerte schnell erkennen. Erkannte Fehler bzw. Unplausibilitäten wurden den Firmen meist sehr zeitnah mitgeteilt, die die Firmen ohne zeitliche Beschränkungen beheben konnten.

Vor dem vorgenommenen Bewertungszeitraum Winter 2017/18 haben alle Firmen mit Ausnahme der Firma Thies ihre Anlagen am 8. Dezember 2017 gewartet. Diese Arbeiten führten dann zu einem stabilen Betrieb aller Anlagen, die in der Zeit bis Ende März 2018 zu keinen unplanmäßigen Ausfällen der Anlagen führte. Dieser vollständige Betrieb ohne Aussetzer über Monate konnte nach Erweiterungs- oder Wartungsarbeiten später nicht mehr bei allen Straßenwetterstationen beobachtet werden.

Die Reaktionsdauer auf die Behebung von offensichtlichen Fehlern oder Ausfällen war sehr unterschiedlich. Sie dauerte öfters mal mehrere Monate und hat im Extremfall rund ein Jahr betragen. Auch wenn heute in Deutschland teilweise eine hohe Dichte der Straßenwetterstationen besteht, und der Ausfall einer Station oder eines Sensors kompensiert werden kann, sollte ein Wartungsvertrag

kurzfristige Reaktionszeiten auf Ausfall- und Fehlermeldungen enthalten. Kurze Reaktionszeiten heißt, dass die Firmen entsprechendes Personal vorhalten müssen. Dadurch können höhere Kosten entstehen. Grundsätzlich sollte Angaben zur Wartung mit deren Kosten und dem geplanten Umfang inklusive wichtiger Verschleißteilpreise bereits bei der Beschaffung angefordert werden und mit in eine Wirtschaftlichkeitsbewertung einfließen. Darüber hinaus gehende Wartungsarbeiten sollten dann die Lieferanten selber tragen. Ausgenommen sind natürlich Einwirkungen von Dritten oder bauliche Änderungen.

8.4 Erfahrungen zum Verschleißverhalten

Die Ergebnisse zum Verschleißverhalten fallen bereits nach drei Jahren Betrieb unterschiedlich aus.

Von den Ende 2016 installierten sieben Bodensonden lieferten Mitte 2019 nur noch zwei Sonden (ARS31pro und eine ARCTIS-Sonde) Daten. Damit könnten die Bodensonden als Ganzes bereits als Verschleißteil bezeichnet werden. Probleme bereitet bei den Sonden mit wechselbaren Messeinrichtungen von Boschung und Luft die Dichtigkeit gegen Feuchte. Diese Probleme sind teilweise bereits bei den Laborprüfungen ohne Verkehrseinwirkungen zustande gekommen. Da aber der DRS511 der Firma Vaisala aufgrund der vorgelegenen Messdaten bereits nach einem Jahr als defekt gemeldet wurde, kann hier kein Vorteil der fest eingebauten Sonden abgeleitet werden. Die Haltbarkeitsdauer sollte bei einem notwendigen weiteren Festhalten an die Bodensonden bei weiteren Untersuchungen ein Prüfkriterium sein. Die Sonden sollten mit Ausnahme durch Wartung behebbaren Verschmutzungen oder nicht normalen Einwirkungen (z. B. Unfälle) mehrere Jahre störungsfrei arbeiten.

Bei allen weiteren Sensoren konnten bislang keine verschleißbedingten Ausfälle festgestellt werden. An den NIRS31 wurden planmäßig im Rahmen der Wartung Linsen getauscht, was bereits vor der Installation bekannt war. Die Sensortypen PWD12 und WS600 wurden aufgrund unplausibler Werte von Beginn an und nicht verschleißbedingt getauscht.

9 Zusammengefasste Empfehlungen/offene Fragestellungen zu den Parametermessungen

9.1 Allgemeines

Die nachfolgenden Empfehlungen stellen eine Zusammenfassung der Labor- und Testfeldergebnisse dar. Sie wurden inzwischen in das FGSV-Wissenspapier „Hinweise für die Planung, Einrichtung und Betrieb von Straßenzustands- und Wetterinformationssystem“ [FGSV 2019] eingebracht.

Grundlage sind die Anforderungen und möglichen Prüfverfahren nach:

- DIN EN 15518-3 (mit Anforderungen für Sensoren für Straßenwetterstationen)
- DIN CEN/TS 15518-4 (mit Prüfverfahren für Sensoren für Straßenwetterstationen)
- Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS – mit Anforderungen und Prüfverfahren für Sensoren in Straßenwetterstationen mit dem Schwerpunkt der Anwendung in Streckenbeeinflussungsanlagen)

Die Zusammenfassung ist nach den einzelnen Parametern geordnet.

9.2 Fahrbahnoberflächentemperatur

Alle auf dem Testfeld A4 eingesetzten Bodensonden erfüllten bei Genauigkeitstests in Flüssigkeitsbad die hohen Anforderungen der DIN EN 15518-3. Diese Tests wären vor einer Installation auch einfach

möglich. In der Fahrbahn eingebaut, wiesen die gleichen Typen, aber nicht gleich den im Labor getesteten Sensoren, unter gleichen Testfeldbedingungen größere Differenzen als bei den Laborprüfungen aus. Diese Differenzen sind unter den gleichen Bedingungen aber wesentlich geringer als die Differenzen zwischen verschiedenen berührungslos arbeitenden Sensoren – den Infrarotthermometern. Diese konnten bislang nicht labormäßig geprüft werden. Bei deren hohen Messunsicherheiten lassen sich Winterdienstentscheidungen weniger zeitgenau treffen.

Bei einzelnen Infrarotthermometertypen traten nach vorgenommenen Kalibrier- und Wartungsarbeiten ein unterschiedliches Verhalten zu anderen Sensoren auf, für das es bislang keine Erklärungen gibt.

Für die Prüfung beider Sensorbauformen sind die Prüfverfahren für eine praxisgerechte Bewertung insbesondere nach dem Einbau zu entwickeln. Entsprechende Arbeiten laufen im Normungsverfahren zu der EN 15518 Normenreihe.

Bis zum Einsatz praxisgerechter Prüfverfahren für die Eignungs- und Abnahmetests für die berührungslos arbeitenden Sensoren wird derzeit der Einsatz von Bodensonden empfohlen.

9.3 Fahrbahnzustand – Wasserfilmdicke

Bodensonden können nicht alle Laborprüfungen erfüllen. Sie erkennen alle weitgehend sicher den Wechsel von „trocken“ zu „feucht“ bei geringer Feuchte. Dies konnte auch bei Praxisbeobachtungen auf dem Testfeld A4 bei den beiden Bodensondentypen DRS511 (Firma Vaisala) und IRS31pro (Firma Lufft) beobachtet werden. Den Wechsel von „feucht“ zu „trocken“ zeigten sie dagegen häufiger früher als er beobachtet werden konnte.

Die Bodensonden können Glätte (Schnee, Eis, Schneematsch) bis auf wenige Ausnahmen nicht als Aggregatzustand direkt erkennen. Die Hersteller leiten unter Nutzung anderer Daten eine Meldung ab, die eher einer Glättewarnung entspricht. Jeder Hersteller nutzt erkennbar etwas andere Algorithmen, die nicht in jedem Fall bekannt sind. Für große Messnetze mit Straßenwetterstationen von verschiedenen Herstellern sollte eine Vorgabe für die Form einer Glättewarnung erfolgen. Eine Möglichkeit für die Datenverarbeitung, die auch weitere Messwerte einer Straßenwetterstation einbezieht, ist im FGSV-Wissenspapier zu Straßenzustands- und Wetterinformationssystemen [FGSV 2019] aufgeführt.

Differenzierte Angaben zur Wasserfilmdicke können die Bodensonden im Labor nicht darstellen. Eine richtige Angabe ist nur möglich, wenn ein homogener Wasserfilm auf die Sonde mit Hilfsmitteln aufgetragen wird. Ein homogener Wasserfilm ist unter Verkehr auf einer in der Fahrbahn installierten Bodensonde meist nicht vorhanden. Daher sollte bei der Nutzung von Bodensonden auf die Angabe von differenzierte Feuchteangaben und der Wasserfilmdicke eher verzichtet werden. Die Fortschreibung der EN 15518-3 sieht aus diesem Grund bei Bodensonden zukünftig nur die Unterscheidung zwischen „trocken“ und „nicht trocken“ vor.

Berührungslos arbeitenden Sensoren bieten grundsätzlich im Vergleich zu den Bodensonden den Vorteil, dass sie die vorhandene Überdeckung einer eigentlichen Fahrbahnoberfläche bewerten können. Die Bodensonden analysieren einen Zustand auf ihrer eigenen Oberfläche, die eine andere Struktur als die Fahrbahnoberfläche aufweist.

Die seit wenigen Jahren erhältlichen berührungslos arbeitenden Sensoren zeigen je nach Typ differenzierte Angaben des Fahrbahnzustandes. Der DSC111 der Firma Vaisala und einer der beiden NIRS31 der Firma Lufft entsprach auf dem Testfeld A4 weitgehend den Beobachtungen. Andere Sensoren hatten Schwierigkeiten vor allem bei der Erkennung von Schneematsch oder Schnee. Auch bei den beiden genannten Sensortypen traten bei der Bewertung von Schneematsch unterschiedliche Auffassungen

zwischen Bewerter und Sensor auf. Hier sind genauere Definitionen notwendig, nach denen sich Nutzer und Sensorentwickler richten sollten.

Zwischen beiden Bauarten Bodensonden und berührungslos arbeitenden Sensoren bestehen große Unterschiede bei der Wasserfilmdicke. Die berührungslos arbeitenden Sensoren geben deutliche höhere Wasserfilmdicke an, die nach subjektiven Beobachtungen plausibler erscheinen. Für die berührungslos arbeitenden Sensoren müssen noch genaue Prüfverfahren erprobt werden.

Für beide Bauarten wird der Übergang zwischen den Zuständen „trocken“ und „feucht“ bzw. „nicht trocken“ innerhalb der CEN-Arbeitsgruppe zu den EN 15518 diskutiert. Nach den Vorstellungen vieler Hersteller und Nutzer wird mit 0,015 mm ein höherer Wert als der bisherige Wert 0,01 mm für sinnvoll angesehen. Die Testfeldversuche zeigen, dass häufig „feucht“ mit Wasserfilmdicke-Werten von 0,01 mm gemeldet werden, obwohl diese visuell kaum erkennbar ist und es keine meteorologische Ursache für die Feuchte besteht. Im Regelfall wird hier vorhandenes Restsalz die Ursache sein, das Wasser aus der Luft anzieht. Dadurch kann keine Glättegefahr entstehen. Anhand der Testfeldergebnisse kann die geplante Änderung des Schwellwertes unterstützt werden. Die neue Festlegung dieses Grenzwertes auf angezeigte 0,02 mm sollte bei der Einführung möglichst einheitlich umgesetzt werden. Die Zusammenhänge zwischen der dann möglichen Kombination einer Meldung „trocken“ und einer vorhandenen Wasserfilmdicke von 0,01 mm müssen entsprechend geschult werden.

Für die berührungslos arbeitenden Sensoren wird in der CEN-Arbeitsgruppe auch der Übergang von „feucht“ zu „nass“ als wenig geeignet gesehen. Der bisherige Schwellwert von 0,2 mm stellt für viele Gruppenmitglieder schon eine sehr hohe Nässe dar. Hier besteht der Wunsch, den Schwellwert auf 0,05 mm zu legen. Der Nutzer der Daten kann damit auch unter Berücksichtigung von Messunsicherheiten ableiten, dass eine Wassermenge vorhanden ist, die im Gefrierfall zu einer deutlichen Kraftschlussminderung führt. Bei dieser Wasserfilmdicke bleiben Salzkörner auch auf der Fahrbahn sicher etwas besser haften. Genaue Erfahrungen liegen aber dazu noch nicht vor. Grundsätzlich sollten sich beliebige Schwellwerte für Nässestufen aus der Wasserfilmdicke ableiten lassen. Auf dem Testfeld konnte allerdings die Firma Vaisala bis zum Ende des Projektzeitraumes für die Bodensonde DRS511 die von der BAST geforderte bereits seit 2006 bestehende Anforderung der EN 15518 für den Fahrbahnzustand nicht umsetzen.

Eine einheitliche Umsetzung der Definitionen der verschiedenen Fahrbahnzuständen ist für die Nutzung verschiedener Sensoren in einem Messnetz unabdingbar. Straßenwetterstationen allgemein und die Angaben für Fahrbahnzustände im Speziellen werden zukünftig erweiterten Nutzungen insbesondere für automatische Systeme dienen. Verschiedene Inhalte können dort nur mit Mehraufwand verarbeitet werden.

Beobachtungen über Fotos lassen eine hinreichende Beurteilung von Fahrbahnzuständen zu. Damit können Kameras insbesondere als Ergänzung zu den Bodensonden eine wertvolle Unterstützung sein. Für die Beobachtung bei Dunkelheit sind Infrarotscheinrichtungen notwendig. Nur bei geringer Feuchte wird eine Bewertung anhand von Fotos schwierig bis unmöglich.

9.4 Niederschlag

Beim Niederschlag sind unterschiedliche Angaben möglich. Für die Winterdienststeuerung ist die Niederschlagsart mit der Unterscheidung kein, fester oder flüssiger Niederschlag und die Niederschlagsmenge über einen längeren Zeitraum (z. B. einer Stunde) von Bedeutung. Die Niederschlagsmenge wird erst mit der Fortschreibung der EN 15518-3 als zu messenden Parameter aufgenommen. Die

Niederschlagsintensität hat mehr Bedeutung für den telematische Verkehrsbeeinflussung oder das automatisierte Fahren.

Die im Testfeld A4 eingesetzten Sensoren haben anhand von Beobachtungen basierenden Bewertungen sehr unterschiedliche Ergebnisse geliefert. Im Projekt wurden für die Niederschlagsart mit einem größeren Umfang im Vergleich zu den in der CEN/TS 15518-4 und TLS beschriebenen Prüfverfahren Sensorbewertungen durchgeführt.

Der Sensor PWD12 der Firma Vaisala und der Sensor Laser-Niederschlags-Monitor LNM der Firma Thies haben dabei weitgehend bzw. nahezu vollständig mit den Beobachtungen übereingestimmt. Andere insbesondere einfachere Sensoren haben die vergleichsweise einfachen Anforderungen nicht erfüllt.

Die ermittelten Niederschlagsmengen über den gesamten Winter 2017/18 haben eine hohe Spannweite. Die höchste angegebene Niederschlagsmenge eines Sensors betrug das 2,5-fache der Summe von dem Sensor mit der am niedrigsten angegebenen Menge. Dieser Vergleich basiert auf die Aufsummierung der gemessenen Niederschlagsintensitäten, die je Minute ermittelt wurden. Abweichungen können auch durch Rundungsfehler entstanden sein. Niederschlagsmengenerfassungen über längere zusammenhängende Zeiträume sollten zukünftig genauere Angaben ermöglichen.

Für die Überprüfung der Niederschlagsangaben sind neue bzw. erweiterte Prüfverfahren erforderlich. Das Problem besteht in der Zeitsynchronisation der Angaben vom zu prüfenden Sensor und der Referenz. Vorschläge für diese Prüfungen liegen vor (siehe Anhang 5) und sollten nach Aufnahme in dieser oder ähnlicher Form zeitnah von Herstellern und Prüfinstituten umgesetzt werden. Aufgrund der fehlenden Möglichkeiten Niederschlag künstlich darzustellen, müssen die Prüfungen weiterhin unter Praxisbedingungen erfolgen.

9.5 Gefriertemperatur – andere Angaben zu Tausalz auf der Fahrbahn

Die Sensoren für die Gefriertemperatur unterscheiden nach den beiden Messverfahren – berechnend (passiv) und messend (aktiv).

Die berechnenden Sensoren nutzen dafür die Leitfähigkeit einer Lösung auf der Bodensonde, aus der je nach dort gemessener Lösungsfilmstärke eine Gefriertemperatur berechnet wird. Die Berechnung gibt nur bei einem gleichmäßigen Lösungsfilm auf der Bodensonde richtige Werte aus. Bei durchgeführten Labortests nach CEN/TS 15518-4 können die Sensoren von einer aufgespritzten definierten Salzlösung die Gefriertemperatur meist nicht richtig berechnen. Hier bestehen die gleichen Probleme wie bei der Messung der Wasserfilmstärke. Auf dem Testfeld A4 haben sie trotz umfangreicher Streuungsbildungen fast keine Gefriertemperaturen unter -5°C angezeigt. Damit sind sie für Winterdienstentscheidungen bedeutungslos.

Die messenden Sensoren haben im Labor alle Prüfungen gemäß CEN/TS 15518-4 erfüllt. Auf dem Testfeld A4 entstanden dagegen sehr große Unterschiede zwischen den messenden Sensoren für die Gefriertemperatur. Ursache könnte die ungleiche Verteilung von Tausalz auf der Fahrbahn sein. Allerdings waren Sensorangaben in vielen Fällen nicht plausibel zu den Beobachtungen. Bei Schnee oder Schneematsch kann die Gefriertemperatur nicht deutlich unter der Fahrbahnoberflächentemperatur sein. Hier wird die Gefriertemperatur sogar als Ursache für mögliche Fehlentscheidungen gesehen.

Mehrere Sensoren haben die Salzmenge in Gramm je Quadratmeter ausgegeben. Die angegebenen sehr niedrigen Werte sind für mögliche differenzierte Winterdienstentscheidungen meist bedeutungslos.

Die Ergebnisse vom Testfeld führen zu den gleichen Aussagen wie andere wissenschaftliche Untersuchungen zu Salzmessungen auf der Fahrbahn. Alle bekannten Studien weisen auf die hier wieder aufgezeigte Problematik der ungleichen Anzeigen hin, die auf die ungleiche Verteilung von Salz auf der Fahrbahn zurückzuführen ist. Daher sollten Sensoren mit den bisherigen Messverfahren für die Gefriertemperatur oder andere Tausalangaben zukünftig mehr nicht beschafft werden. Auch die derzeitige Nutzung vorhandener Sensoren wäre durch die Nutzer zu hinterfragen.

Die Bodensonden könnten ohne Integration der Messtechnik für die Gefriertemperatur andere Bauweisen bekommen, die im Preis günstiger und auch für Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur und des Fahrbahnzustandes besser gestaltet werden könnten.

9.6 Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit

Die eingesetzten Sensoren auf dem Testfeld A4 für die Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Taupunkttemperatur wiesen keine Auffälligkeiten bezüglich Abweichungen untereinander und im Vergleich zu Referenzmessungen auf. Die Referenzmessungen sind für die Überprüfung vor Ort mit geringem Aufwand möglich. Die Messung der genannten Parameter ist für die Winterdienststeinsatzsteuerung sinnvoll. Bei der Berechnung der Taupunkttemperatur wird auf die Nutzung einheitlicher Berechnungsformeln verwiesen. Eine Berechnungsformel ist im FGSV-Wissenspapier H PEB SWIS [FGSV 2019] aufgeführt.

9.7 Sonstige Parameter

Zu weiteren im Abschnitt 4.2.1 genannten Parametern fanden aufgrund fehlender Möglichkeiten und ihrer geringeren Bedeutung für die Winterdienststeuerung keine Untersuchungen statt.

Für die Einschätzung zum Winterdienst können noch Angaben zum Wind oder der Eis- und Schneehöhe auf der Fahrbahn sinnvoll sein. Die angeführten Höhenangaben sollen nach der zukünftigen EN 15518-3 in Zukunft neben der Angabe der Wasserfilmdicke möglich sein. Dabei ist zu beachten, dass je nach Konsistenz der Bedeckung immer nur eine der drei genannten Parameter angegeben werden kann. Dabei sind die anderen Werte immer gleich Null. Das muss bei der Datenverarbeitung beachtet werden. Eine Umwandlung der Schnee- und Eismengen in ein Wasseräquivalent stellt sich nach den derzeitigen Möglichkeiten als schwierig dar. Hier muss mit großen Ungenauigkeiten gerechnet werden.

10 Allgemeine Zusammenfassung und Aussicht

Die zielgerichtete Winterdienststeuerung setzt genaue Vorhersagen für Parameter der Fahrbahn und des Wetters an der Fahrbahn voraus. Wetterdienste können diese Vorhersagen zur Verfügung stellen, benötigen aber dafür genaue Eingangsdaten von den Straßen selber. Dazu ist ein möglichst dichtes Netz von Straßenwetterstationen erforderlich, die die notwendigen Ist-Daten der Parameter messen.

Heutige Straßenwetterstationen können die wichtigsten Parameter (Fahrbahnoberflächentemperatur, Taupunkttemperatur, Feuchte auf der Fahrbahn, Niederschlag) mit einer hinreichenden Genauigkeit automatisch messen. Bei den Entscheidungen sind auftretende Toleranzen bei den Messungen für die einzelnen Parameter zu berücksichtigen.

Weitere hilfreiche quantitative Angaben insbesondere zur Wasserfilmdicke, Gefriertemperatur oder zur Niederschlagsintensität weisen bei Vergleichstests unter gleichen Bedingungen immer wieder hohe Differenzen auf. Das gilt auch für berührungslos messende Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur. Unter Praxisbedingungen und teilweise selbst unter Laborbedingungen ist es derzeit schwierig die Genauigkeit der Sensoren ausreichend genau zu beurteilen. Hier sind in Zukunft noch

entsprechende Entwicklungen sowohl für die Sensoren selber als auch für deren Prüfung unter Praxisbedingungen dringend erforderlich. Erste entwickelte Überlegungen für die Prüfverfahren befinden sich in der Umsetzung. Nur nach einem umfassenden Nachweis der Funktionen bringen diese Sensoren bei Winterdienstentscheidungen einen erweiterten Nutzen. Sie sollten bis zum Nachweis einer zuverlässigen Arbeitsweise nicht zum Einsatz kommen oder nur unter Berücksichtigung der hohen möglichen Messunsicherheiten genutzt werden.

Die häufig erlebte Praxis der Hersteller, fehlerhafte oder unplausible Ergebnisse bei Tests auf veraltete Firmware oder Defekte der Sensoren zurückzuführen, sollte durch sichere Typprüfungsergebnisse mit Festschreibung eines abgeschlossenen Entwicklungsstandes für einen Sensor beendet werden. Aufgrund der schwierigen Realisierung von praxisnahen Prüfmethode n bleiben Bewertungen von Sensoren anhand von Beobachtungen und Plausibilitätsprüfungen im Praxiseinsatz sinnvoll und derzeit notwendig. Die Entwicklung von praxisnahen Prüfungen ist weiter voranzutreiben.

Für eine Gewährleistung der gewünschten Genauigkeit ist eine genaue Kontrolle aller Sensoren nach einer Installation nötig. Auch im laufenden Betrieb ist eine ständige Kontrolle notwendig. Einfache Referenzmessungen sind allerdings heute für die meisten Parameter nicht vorhanden. Unterstützung können hier automatische Plausibilitätsprüfungen leisten, die auf mögliche Messfehler einzelner Sensoren hinweisen können [FGSV 2019].

Zur Vorbeugung gegen hohe Messtoleranzen sind die Straßenwetterstationen regelmäßig zu warten. Dafür sollte ein Wartungsvertrag bestehen. Die Wartung sollte möglichst vor Beginn einer Wintersaison erfolgen. Aufwendungen für die Wartung von Straßenwetterstationen sollten bereits bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Straßenwetterstationen einbezogen werden. Die festgestellte hohe Ausfallrate insbesondere bei den Bodensonden ist nicht akzeptabel. Hierzu sollte umgehend eine Weiterentwicklung in Bezug auf eine längere Haltbarkeit erfolgen.

Für ein Kontroll- und Wartungsmanagement für die Straßenwetterstationen sollte seitens des Nutzers ausreichend und geschultes Personal zur Verfügung stehen. Nur so ist eine hohe Qualität der darauf aufbauenden Glättevorhersagen für einen zielgerichteten Winterdienst mit hohem Nutzen für die Verkehrssicherheit/-kapazität bei möglichst geringen Kosten gewährleistet.

Straßenwetterstationen können nach den vorliegenden Erkenntnissen heute unter Verwendung mit den hinreichend genauen Sensoren und Kameras für sichere Entscheidungen von Winterdiensteinsätzen einen hohen Nutzen bringen. Effektive automatisierte Entscheidungen sowohl im Winterdienst als auch bei verkehrstelematischen Anwendungen sind mit ihnen allerdings noch nicht möglich. Die Messgenauigkeit und die Betriebsfestigkeit sind dafür weiter zu untersuchen.

Neben den stationären Sensoren sind auch mobile Sensoren für streckenbezogene Bewertungen erforderlich. Deren Vermarktung beginnt derzeit. Beide zusammen werden als eine Grundvoraussetzung für die notwendige streckenbezogene Glätte- oder Reibwertprognose gesehen, die für die automatisierte Streudichteberechnung aber auch für die automatisierte Verkehrssteuerung und das automatisierte Fahren benötigt werden. Umsetzungsmöglichkeiten für den Winterdienst sind inzwischen beschrieben [Hausmann 2019, Schedler 2020]. Beide Arbeiten weisen auf die Notwendigkeit genauer Sensoren für die sinnvolle Nutzung hin. Für die zuverlässige Reibwertprognose müssen darüber hinaus Zusammenhänge zwischen der Struktur der Fahrbahnoberfläche und deren meteorologisch- und winterdienstbedingten Überdeckung einerseits und den Eigenschaften von Reifen/Fahrzeug andererseits erforscht werden.

Literaturverzeichnis

- Badelt, H. Praxisgerechte Anforderungen an Glättemeldeanlagen (GMA), Bundesanstalt für Straßenwesen, unveröffentlicht (1996)
- Badelt, H.; Breitenstein, J. Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst, Schriftreihe „Verkehrstechnik“ der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band 129 (2005)
- Badelt, H. et al.c Prüfung von Sensoren für Glättemeldeanlagen, Schriftreihe „Verkehrstechnik“ der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band 146 (2006)
- Badelt, H. et al. Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen, Schriftreihe „Verkehrstechnik“ der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band 156 (2007)
- Badelt, H.; Moritz, K. Beurteilung der Streustoffverteilung im Winterdienst; Schriftreihe „Verkehrstechnik“ der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band 186 (2009)
- BAST Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS), 2012
Download unter: http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Publikationen/Regelwerke/Unterseiten/V5-tls-2012.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- DIN DIN EN 15518-3 „Winterdienstausrüstung – Straßenzustands- und Wetterinformationssysteme – Teil 3: Anforderungen an gemessene Werte der stationären Anlagen (2011)
- DIN DIN CEN/TS 15518-4 „Winterdienstausrüstung – Straßenzustands- und Wetterinformationssysteme – Teil 4: Prüfverfahren bei stationären Einrichtungen (2013)
- Eimermacher, S. ThermoMAT – Infrarot Strahlungsthermometer CT11.KW der Firma KÜPPER-WEISSER GmbH, Testbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, unveröffentlicht (2018)
- FGSV Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen, FGSV 306, FGSV-Verlag (2017)
- FGSV Technische Lieferbedingungen für Streustoffe des Straßenwinterdienstes (TL Streu), FGSV 379, FGSV-Verlag (2003), zurückgezogen
- FGSV Hinweise für Planung, Einrichtung und Betrieb von Straßenzustands- und Wetterinformationssystem – H PEB SWIS (2019)
- Geiger, R. Das Klima der bodennahen Luftschicht, Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig (1950)
- Haug, A. Umfelddatenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen, Testfeld „Eching Ost“ des Bundes, 11. Testphase November 2014 bis Oktober 2015, TU München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik (2016) Download unter: <http://www.vt.bgu.tum.de>
- Hausmann, G. Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn, Schriftreihe „Verkehrstechnik“ der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band 180, (2009)
- Hausmann, G. Empfehlungen zum richtigen Aufbringen von Tausalzlösungen, Schriftreihe „Verkehrstechnik“ der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band 218, (2012)

- Hausmann, G. Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren, Schriftreihe „Verkehrstechnik“ der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band 322, (2019)
- Hoffman, M.; Blab, R.; Nutz, P. Optimierung der Feuchtsalzstreuung, Forschungsbericht TU Wien – Institut für Verkehrswissenschaften, Download bei BMVIT (2012)
- Holldorb, Ch. et al. Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten, Schriftreihe „Verkehrstechnik“ der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band 258 (2015)
- Kutter, M.; Niebrügge, L. Erfahrungen mit Glätteismeldegeräte beim Landschaftsverband Westfalen-Lippe, Straße und Autobahn, Heft 12/85, S. 498-503
- Lufft Bedienungsanleitung Intelligente Wetter-Sensoren – Download: <https://www.lufft.com/de-de/produkte/download-de/bedienanleitung-lufft-wsxxx-umb-wettersensoren-de/>
- Melero Corell, J.; Badelt, H.; Eimermacher, S. Einfache Sensoren für Glättemeldeanlagen, Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, unveröffentlicht (2014)
- Metsense Download 03/2020 <https://www.metsense.com/products/detail/2droad/>
- Scharsching, H. Glättefrühwarnsysteme Test 1990/91, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten (1991)
- Scharsching, H. Optoelektronisches Verfahren zur Feststellung der quantitativen Verteilung von Taumitteln auf der Fahrbahn, Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung Heft 434 (1995)
- Schedler, K. GMA Testfeld BAB A6 AK Altdorf, Vergleichende Auswertung ausgewählter Messdaten von Glättemeldeanlagen, KS-Consulting, unveröffentlicht (2014)
- Schedler, K. Verifizierung der Gefriertemperatur von Testlösungen - Abschätzung der Unsicherheiten des Prüfverfahrens zur Ermittlung der zulässigen Abweichungen für die Gefriertemperatur, unveröffentlicht (2014)
- Schedler, K. Entwicklungen für eine streckenbezogene Glättevorhersage, Schriftreihe „Verkehrstechnik“ der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band 329 (2020)
- Thies Produktbeschreibung Laser Niederschlags-Monitor Download unter: <https://www.thiesclima.com/pdf/de/Produkte/Niederschlag-Elektrische-Geraete/?art=774> (2020)
- Vaisala Wetter- und Sichtweitensensoren PWD10, PWD12, PWD20 und PWD22 <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/B210385DE-E-Datasheet.pdf> (2020)
- WMO WMO-Codetabelle 4680 “Present weather reported from an automatic weather station”, Download unter: https://www.wmo.int/pages/prog/www/WMOCodes/WMO306_v11/Publications/2017update/Sel9.pdf (2020)
- Zwahlen, H. et al. Evaluation of ODOT Roadway/Weather Sensor Systems for Snow and Ice Removal Operations, Part II: RWIS Pavement Sensor Bench Test, Ohio University (2003)