

# Prüfung von Sensoren für Glättemeldeanlagen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 146

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

# Prüfung von Sensoren für Glättemeldeanlagen

von

Horst Badelt  
Jürgen Breitenstein  
Jürgen Fleisch  
Gerd Häusler  
Simon Scheurl  
Alfons Wendl

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 146

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

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

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

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

Bericht zu den Projekten 96653, 99655, 01670, 99653 und 01652 des Arbeitsprogramms der Bundesanstalt für Straßenwesen

### Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

### Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 3-86509-539-9

Bergisch Gladbach, Juli 2006

## Kurzfassung – Abstract

### Prüfung von Sensoren für Glättemeldeanlagen

Die Kenntnis des Straßenzustandes und des Wetters ist eine Voraussetzung für die Steuerung des Winterdienstes. Je genauer der Zeitpunkt eines Glättebeginns vorhergesagt werden kann, desto zielgerichteter kann ein Winterdiensteinsatz begonnen werden. Ziel ist es, eine Glätte mit möglichst geringen Mitteln zu vermeiden bzw. schnell zu beseitigen.

Glättemeldeanlagen stellen ein wesentliches Hilfsmittel für diese Informationen dar. Mit ihren Sensoren in und an der Fahrbahn liefern sie Messwerte für die Vorhersage einer winterlichen Glätte.

Vergleiche zwischen Anlagen von unterschiedlichen Herstellern unter gleichen Bedingungen erbrachten teilweise erhebliche Unterschiede bei den Messwerten der Sensoren. Hieraus resultierten unterschiedliche zeitliche Vorhersagen für einen möglichen Glättebeginn, die nicht alle für einen zielgerichteten Winterdienst nutzbar waren. Eine Bewertung der Sensorqualität war in vielen Fällen aufgrund fehlender Prüfverfahren nicht möglich.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat daraufhin eine Reihe von Prüfverfahren entwickelt. Dabei wurden nach Möglichkeit Verfahren gewählt, die den Praxisbedingungen weitgehend entsprechen. Anhand neuer Erkenntnisse bei diesen Entwicklungsarbeiten konnten auch Anforderungen an die Sensorik genauer spezifiziert werden. Für die folgenden Messgrößen sind die beschriebenen Verfahren entstanden.

- Fahrbahnoberflächentemperatur

Für diesen wichtigen Parameter bei der Glättevorsage wurde ein Referenzmessverfahren erarbeitet, mit dem zu prüfende Sensoren unter meteorologischen Praxiseinflüssen geprüft werden können. Direkt an der Fahrbahnoberfläche eingebaute Sensoren dienen als Referenz zu in der Fahrbahn parallel eingebauten Sensoren von Glättemeldeanlagen für die Fahrbahnoberflächentemperatur.

- Niederschlagsintensität

Die Prüfung erfolgt hier ebenfalls durch ein Referenzmessverfahren, das bei den unterschiedlichsten Arten von Niederschlag eingesetzt wer-

den kann. Mit Hilfe einer normierten Schale wird ein Niederschlag in einer vorgegebenen Zeit neben einem zu prüfenden Sensor aufgefangen und gewogen. Anschließend wird aus der aufgefangenen Menge die Intensität errechnet und mit den Angaben des Sensors verglichen.

- Wasserfilmdicke

Für die Prüfung dieser Sensoren wurde eine Vorrichtung entwickelt, die in Lage ist, definierte dünne Wasserfilme auf die Fahrbahnoberfläche oder zu prüfende Sensoren aufzutragen.

- Gefriertemperatur

Für die Prüfung von Sensoren für die Gefriertemperatur kommt das gleiche Verfahren wie für die Wasserfilmdicke zum Einsatz. Statt Wasser lassen sich dafür Taustofflösungen auf die Fahrbahnoberfläche bzw. Sensoren aufsprühen.

Die Prüfverfahren wurden verfahrenstechnisch erprobt und mögliche Messfehler abgeleitet. Für alle Verfahren wurden Beschreibungen erstellt, die für nationale Regelwerke oder für die europäische Normung von Prüfverfahren für Glättemeldeanlagen genutzt werden können. Eine Nutzung für die Prüfung von Sensoren für die Umfelddatenerfassung in Verkehrsbeeinflussungsanlagen ist ebenfalls grundsätzlich möglich.

### Testing sensors for units reporting slippery conditions

Knowledge of road conditions and the weather are a prerequisite for controlling winter maintenance services. The more precise the time of the beginning of slippery conditions is forecast, the more specific the winter maintenance used can be initiated. The aim is to avoid slippery conditions with as little means as possible, that is, to get rid of them as quickly as possible.

Units reporting slippery conditions are an important aid in obtaining this information. They provide measurement values for forecasting slippery conditions in winter with their sensors on the carriageway.

Comparisons between units of different manufacturers under the same conditions resulted

in partly considerable differences in the measurement values of the sensors. This resulted in different time-related forecasts for a possible beginning of slippery conditions, which were not all useful for a goal-oriented winter maintenance service. An evaluation of the sensor quality was not possible in many cases due to a lack of testing procedures.

Following this, the Federal Highway Research Institute developed a series of test procedures. Possible procedures were selected in the process, which largely corresponded to practical conditions. Based on new findings during this development work, requirements to the sensors could also be specified more precisely. The described processes were formulated for the following measurement parameters.

- Carriageway surface temperature

A process for reference measurement was worked out for this important parameter in predicting slippery conditions, with which sensors to be tested can be checked under practical meteorological influences. Sensors installed directly on the carriageway surface serve as a reference to the sensors installed parallel to them for units reporting slippery conditions on carriageway surface temperature.

- Intensity of rainfall

Testing also takes place in this case using a process for reference measurement applied to the different types of rainfall. Using a standardised collection device, together with a sensor to be tested, rainfall is collected and weighed. The intensity is then calculated from the amount collected and is compared to the specifications of the sensor.

- Thickness of the film of water

A device was developed for testing these sensors that can apply thin films of water to the carriageway surface on the sensors to be tested.

- Freezing point

The same process that is used for the thickness of the film of water is also used for testing sensors for freezing point. Instead of water, de-icing solutions can be sprayed on to the carriageway surface or on to the sensors for this purpose.

The test procedure was tried out in a technical process and possible errors in measurement were deduced. Descriptions were compiled for all processes that can be used in national bodies of rules and regulations or for the European standards for test procedures for units reporting slippery conditions. Use of the test for sensors for the acquisition of environmental data in traffic influencing units is also possible, in principle.

## Inhalt

<b>Teil 1: Verhalten von Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur</b>		<b>7</b>	<b>Messfeldversuche mit eingebauten Sensoren im Winter 1999/2000</b> . . . . .	34
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> . . . . .			11
<b>2</b>	<b>Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zur Fahrbahnoberflächentemperatur für Glättemeldeanlagen</b> . . . . .			11
<b>3</b>	<b>Ziel des Projektes</b> . . . . .			13
<b>4</b>	<b>Einflüsse auf das Verhalten der Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur</b> . . . . .			13
<b>5</b>	<b>Versuchsprogramm</b> . . . . .			14
<b>6</b>	<b>Messfeldversuche mit eingebauten Sensoren im Winter 1997/98</b> . . . . .			15
6.1	Sensorauswahl . . . . .			15
6.1.1	Sensoren für Referenzmessungen bei Eignungsprüfungen . . . . .			15
6.1.2	Messung zusätzlicher Parameter . . . . .			16
6.2	Messfeldaufbau . . . . .			17
6.3	Kalibrierung der Temperatursensoren für die Fahrbahn . . . . .			18
6.4	Einbau der Sensoren für Eignungsmessungen . . . . .			18
6.5	Zeiträume der Messwerterfassungen – Witterungssituationen . . . . .			20
6.6	Ergebnisse der eingebauten Sensoren . . . . .			20
6.6.1	Auswertungsmethoden . . . . .			20
6.6.2	Allgemeine Ergebnisübersicht . . . . .			21
6.6.3	Vergleich von Sensoren gleicher Bauart . . . . .			23
6.6.4	Vergleich der eingebauten Sensoren verschiedener Bauarten . . . . .			26
6.7	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse . . . . .			32
		<b>7.1</b>	Auswahl und Einbau neuer Sensoren . . . . .	34
		<b>7.2</b>	Messwerterfassung – Witterungsbedingungen . . . . .	35
		<b>7.3</b>	Auswertung der Messergebnisse . . . . .	36
		7.3.1	Allgemeine Ergebnisübersicht . . . . .	36
		7.3.2	Vergleich von Sensoren gleicher Bauart . . . . .	36
		7.3.3	Vergleich von Sensoren verschiedener Bauart . . . . .	40
		<b>7.4</b>	Zusammenfassung der Ergebnisse des Winters 1999/2000 . . . . .	46
		<b>8</b>	<b>Haltbarkeit der Sensoren unter Verkehr</b> . . . . .	47
		8.1	Einbau der Sensoren . . . . .	47
		8.2	Messergebnisse . . . . .	48
		8.2.1	Beobachtungen auf dem Messfeld . . . . .	48
		8.2.2	Statistische Auswertungen . . . . .	49
		8.2.3	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	52
		<b>9</b>	<b>Vergleich zwischen Pyrometer und eingebauten Sensoren</b> . . . . .	52
		<b>10</b>	<b>Messungen mit Sensoren für Abnahme- und Kontrollprüfungen</b> . . . . .	53
		10.1	Sensorauswahl . . . . .	53
		10.2	Ergebnisse von Messungen über einen längeren Zeitraum . . . . .	54
		10.3	Kurzzeitige Messungen . . . . .	55
		<b>11</b>	<b>Empfehlungen für Prüfverfahren</b> . . . . .	56
		11.1	Verfahren für Eignungsprüfungen . . . . .	56
		11.2	Verfahren für Abnahme- und Kontrollprüfungen . . . . .	57
		<b>12</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> . . . . .	57
			<b>Literatur</b> . . . . .	59

## Teil 2: Referenzmessverfahren für die Prüfung von Niederschlagssensoren

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	63
<b>2</b>	<b>Bisherige Anforderungen an Niederschlagssensoren</b> .....	63
<b>3</b>	<b>Technischer Stand der Sensorik für die Niederschlagsintensität</b> .....	64
<b>4</b>	<b>Problemstellung und Entwicklungsziel</b> .....	66
<b>5</b>	<b>Referenzmessung für die Niederschlagsintensität</b> .....	67
5.1	Verfahrensauswahl .....	67
5.2	Verfahrensdurchführung .....	67
5.3	Messergebnisse .....	68
5.3.1	Auswerteverfahren .....	68
5.3.2	Vergleich der Messwerte zwischen zwei Auffangschalen mit 200 cm <sup>2</sup> Fläche .....	69
5.3.3	Vergleich der Messwerte zwischen zwei Auffangschalen mit 400 cm <sup>2</sup> Fläche .....	71
5.4	Vergleich der Ergebnisse mit 200 cm <sup>2</sup> und 400 cm <sup>2</sup> Auffangfläche .....	72
<b>6</b>	<b>Referenzmessungen zu Sensoren für die Niederschlagsintensität</b> ....	74
<b>7</b>	<b>Anforderungen an die Sensoren für die Niederschlagsintensität</b> ....	76
<b>8</b>	<b>Prüfung von Sensoren für die Niederschlagsintensität</b> .....	77
8.1	Anwendungsbereich und Kurzbeschreibung .....	77
8.2	Einrichtungen, Geräte und Hilfsmittel .....	77
8.3	Versuchsdurchführung .....	77
8.3.1	Vorbereitung der Messungen .....	77
8.3.2	Durchführung der Messung .....	77
8.4	Anzahl der Messungen und Ergebnisbewertungen .....	79
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> ...	79
<b>Literatur</b> .....		80

## Teil 3: Entwicklung von Prüf- und Kalibriermethoden für Fahrbahnfeuchtesensoren

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	85
<b>2</b>	<b>Fahrbahnfeuchte bei der Glättebildung – Kenntnisstand</b> ....	85
2.1	Definitionen zur Fahrbahnfeuchte ...	85
2.2	Definition der kritischen Wasserfilmdicke bei der Glättebildung .....	86
2.3	Einflüsse auf die Fahrbahnfeuchte ...	86
<b>3</b>	<b>Technischer Stand der Sensorik für die Fahrbahnfeuchte</b> .....	87
<b>4</b>	<b>Entwicklungsziel</b> .....	89
<b>5</b>	<b>Kritische Wasserfilmdicken für die Glättebildung</b> .....	89
5.1	Vorliegende kritische Wasserfilmdicken für die Glättebildung ....	89
5.2	Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der kritischen Wasserfilmdicke .....	89
5.2.1	Versuchsdurchführung .....	89
5.2.2	Auswahl der Probestücke .....	90
5.2.3	SRT-Pendelverfahren bei tiefen Temperaturen .....	90
5.2.4	Messergebnisse .....	91
<b>6</b>	<b>Auftragen einer gleichmäßigen Wasserfilmdicke</b> .....	93
6.1	Beschreibung Prüfvorrichtung .....	93
6.2	Gleichmäßigkeit der Wasserfilmauftragung .....	94
6.3	Wiederholbarkeit der Auftragungen .	95
<b>7</b>	<b>Anwendung des Messverfahrens im Labor und auf der Fahrbahn</b> ...	96
7.1	Beschreibung der Testdurchführung .....	96
7.2	Ergebnisse und Beobachtungen bei Tests der Spritzvorrichtung .....	96
<b>8</b>	<b>Anforderungen an die Sensoren für die Fahrbahnfeuchte</b> .....	98
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	99
<b>Literatur</b> .....		101

<b>Teil 4: Verfahren zur Prüfung von Sensoren für die Gefriertemperatur</b>		8.3.2 Durchführung der Sensorprüfung . . . . .	124
1	<b>Einleitung</b> . . . . .	105	
2	<b>Problem, Ziel, Nutzen</b> . . . . .	105	
3	<b>Technischer Stand der Sensorik für die Gefriertemperatur</b> . . . . .	107	
4	<b>Anforderungen an die Sensoren für die Gefriertemperatur</b> . . . . .	108	
5	<b>Anforderungen an die Prüfvorrichtung</b> . . . . .	109	
6	<b>Auftragen eines gleichmäßigen dünnen Lösungsfilmes</b> . . . . .	109	
6.1	Beschreibung Prüfvorrichtung . . . . .	109	
6.2	Nachweis der Gleichmäßigkeit der Auftragung . . . . .	110	
6.2.1	Verfahrensbeschreibung . . . . .	110	
6.2.2	Gleichmäßigkeit von Wasserfilmen . . . . .	111	
6.2.3	Gleichmäßigkeit von Lösungsfilmen . . . . .	114	
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	117	
7	<b>Erfahrungen aus dem Einsatz der Prüfvorrichtung auf Straßen</b> . . . . .	118	
7.1.1	Beschreibung der Versuchsdurchführung . . . . .	118	
7.1.2	Ergebnisse und Bewertung zu den einzelnen Sensoren . . . . .	118	
7.2	Zusammenfassende Ergebnisbewertung . . . . .	121	
7.3	Vergleich der Messergebnisse mit anderen Messungen . . . . .	121	
7.4	Sonstige Einsätze der Prüfvorrichtung . . . . .	123	
8	<b>Aufstellung eines Prüfverfahrens</b> . . . . .	123	
8.1	Anwendungsbereich und Kurzbeschreibung . . . . .	123	
8.2	Einrichtungen, Geräte und Hilfsmittel . . . . .	124	
8.3	Versuchsdurchführung . . . . .	124	
8.3.1	Vorbereitung der Messungen (Kalibrierung im Labor) . . . . .	124	
8.3.2	Durchführung der Sensorprüfung . . . . .	124	
8.4	Anzahl der Messungen und Ergebnisbewertungen . . . . .	124	
9	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> . . . . .	125	
	<b>Literatur</b> . . . . .	125	





## **Teil 1**

### **Verhalten von Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur**

Horst Badelt

Jürgen Breitenstein

Jürgen Fleisch

Gerd Häusler



## 1 Einleitung

Die Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Straßennetzes und die Gewährleistung der Verkehrssicherheit im Winter sind wichtige Aufgabengebiete des Unterhaltungs- und Betriebsdienstes. Winterliche Straßenverhältnisse führen im Vergleich mit sommerlichen Straßenverhältnissen zu erheblichen volkswirtschaftlichen Mehrkosten [11]. Vorrangiges Ziel des Winterdienstes ist deshalb, winterliche Glätte durch vorbeugende Maßnahmen zu vermeiden oder entstandene Glätte schnell zu beseitigen.

Unter dem Druck von knappen Haushaltsmitteln müssen aber auch die Kosten für den Winterdienst verringert werden. Neue organisatorische Maßnahmen und der verstärkte Einsatz von moderner Technik sollen den Winterdienst rationeller und damit wirtschaftlicher gestalten. Gleichzeitig führt die Optimierung der Maßnahmen zu einem geringeren Einsatz von Streustoffen. Damit werden auch Umweltbelastungen verringert, die bei umfangreicher Verwendung von Streustoffen unter extremen winterlichen Verhältnissen auftreten können [8], [13].

Eine wesentliche Rationalisierung des Winterdienstes stellt die genauere Vorhersage einer möglichen winterlichen Glättebildung dar. Dafür ist das bundesweite Straßenzustands- und Wetterinformationssystem (SWIS) vorhanden [1]. Ein Bestandteil des SWIS sind die Glättemeldeanlagen (GMA), mit deren Sensorik die Parameter der Glättebildung (Fahrbahnoberflächentemperatur, Fahrbahnfeuchte, Luftfeuchte, Niederschlag u. a.) unmittelbar auf, in und an der Fahrbahn erfasst werden.

Die Messergebnisse von Glättemeldeanlagen sind einerseits eine Grundlage für längerfristige Vorhersagen einer möglichen Glättebildung durch meteorologische Dienste im Rahmen des SWIS zur besseren Planung von Winterdienstmaßnahmen und dienen andererseits unmittelbar als Entscheidungshilfe für den gezielten Beginn einer Winterdienstmaßnahme durch die Straßenmeisterei. Mit Hilfe der Glättemeldeanlagen konnten erste wesentliche Verbesserungen der bisherigen Winterdienstpraxis erreicht werden [5], [12].

Der wichtigste Parameter für die Glättevorsage ist die Fahrbahnoberflächentemperatur. Ihr Verlauf zeigt in erster Linie an, ob und wann auf der Fahrbahn Glätte entstehen kann. Eine abgeschlossene BAST-Untersuchung auf der A 10 (Berliner Ring) führte zu dem Ergebnis, dass sich die Fahrbahn-

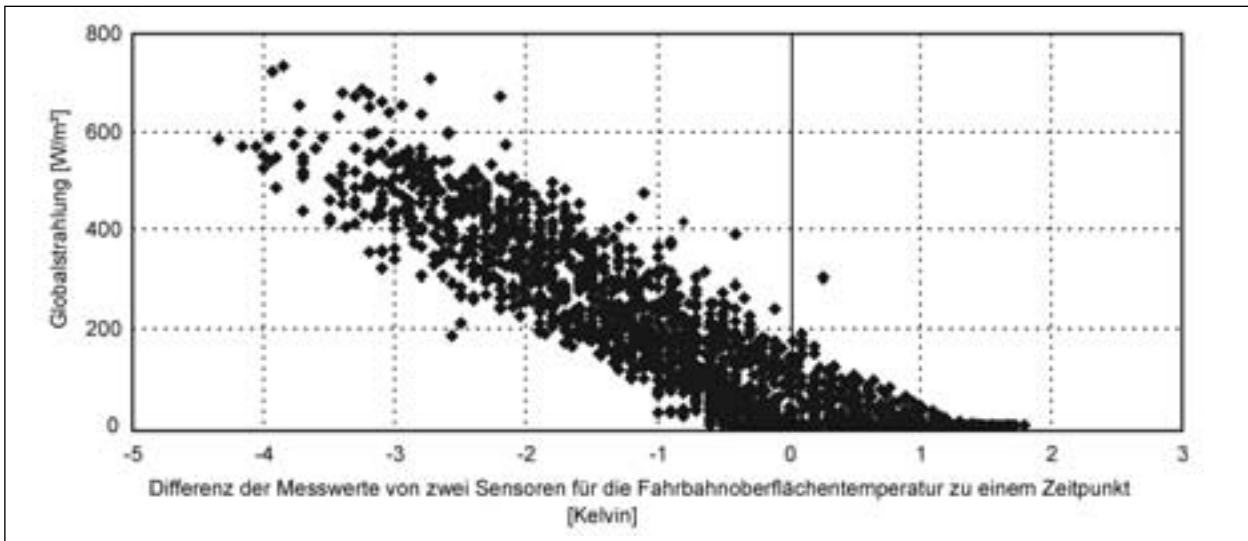
oberflächentemperatur nur langsam änderte (in 65 von 100 Fällen weniger als 1 Kelvin innerhalb 90 Min.) [6]. Daraus abgeleitet, bedeutet ein relativ geringer Fehler bei der Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur eine falsche Einschätzung des optimalen Streuzeitpunktes.

Bei Untersuchungen an Glättemeldeanlagen über einen längeren Zeitraum [6], [14] traten zwischen den Messwerten von Sensoren unterschiedlicher Glättemeldeanlagen für die verschiedenen Parameter der Glättebildung unter gleichen Bedingungen teilweise erhebliche Differenzen auf. Die verschiedenen Angaben der Anlagen hätten bei deren alleiniger Anwendung als Entscheidungsgrundlage für den Winterdienst zu sehr unterschiedlichen Maßnahmen geführt. Eine genaue Bestimmung der Abweichungen der verschiedenen Sensormesswerte von der tatsächlichen Fahrbahnoberflächentemperatur war bei den genannten Untersuchungen aufgrund fehlender Referenzmessverfahren nicht möglich.

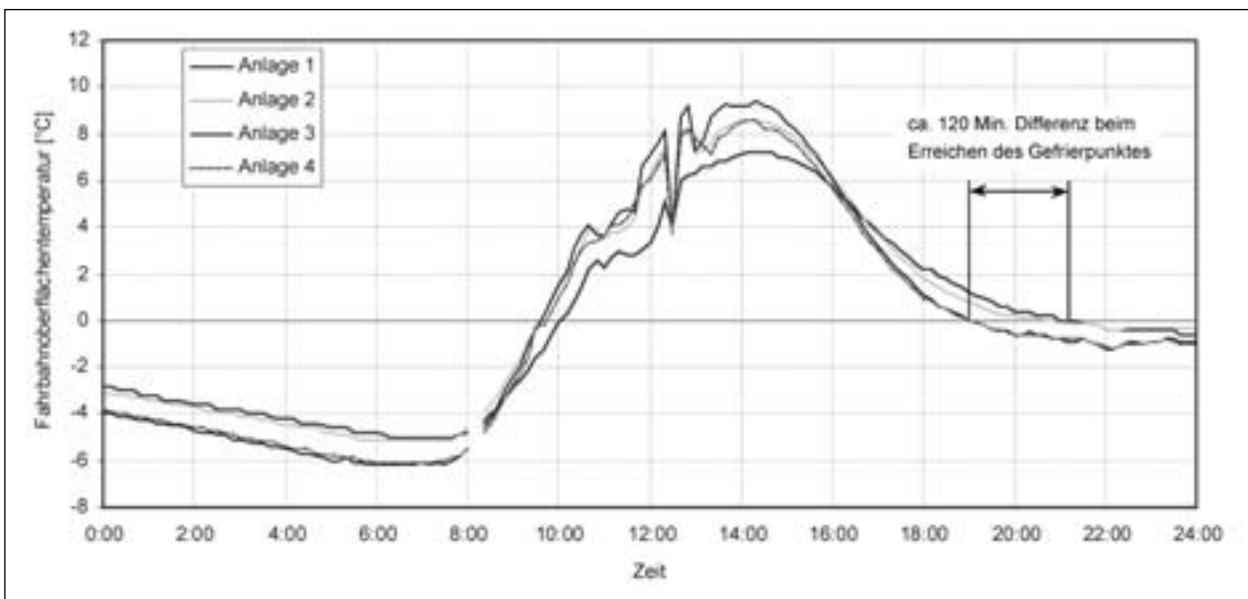
Das BMVBW beabsichtigt, Technische Lieferbedingungen für Glättemeldeanlagen einzuführen. Die Lieferbedingungen sollen neben den Anforderungen an die Anlagen auch Vorschriften für Eichungs-, Abnahme- und Kontrollprüfungen enthalten. Mit den Lieferbedingungen sollen die Kompatibilität von Sensoren und Anlagen verschiedener Hersteller als auch deren Qualität verbessert werden. Dafür sind u. a. Verfahren für die Prüfungen von Sensoren insbesondere für die Glätteparameter zu erarbeiten.

## 2 Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zur Fahrbahnoberflächentemperatur für Glättemeldeanlagen

In der genannten BAST-Untersuchung wurden auf einem Autobahnabschnitt von 10 Meter Länge vier Glättemeldeanlagen verschiedener Hersteller jeweils mit Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur nebeneinander auf dem ersten und dritten Fahrstreifen eingebaut und unter vergleichbaren Praxisbedingungen untersucht. Die Messwerte dieser Sensoren wiesen trotz gleicher Einbaulage und gleicher Einflüsse Unterschiede bis über 4 Kelvin auf. Diese hohen Differenzen traten an Tagen mit intensiver Sonneneinstrahlung auf, an denen aber die Fahrbahnoberflächentemperatur trotzdem unter 0 °C sank (Bild 1).



**Bild 1:** Korrelation zwischen der Differenz der Messwerte zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (eingebaut in der Mitte des 3. Fahrstreifens auf der A 10, Längsabstand ca. 4 m) und der Globalstrahlung [6]



**Bild 2:** Verlauf von Fahrbahnoberflächentemperaturen, gemessen von 4 verschiedenen Glättemeldeanlagen in der Mitte des 3. Fahrstreifens auf der A 8 unter gleichen Umfeldbedingungen

Allein die nächtlichen Differenzen bei der Fahrbahnoberflächentemperatur der 4 Anlagen hätte dazu geführt, dass Winterdienstmaßnahmen bei gleichen anderen Entscheidungsparametern zeitlich mit bis rund 120 Minuten Unterschied eingeleitet worden wären. Bild 2 zeigt ein Beispiel der Temperaturverläufe der 4 Anlagen im gleichen Messquerschnitt auf dem genannten Messfeld, wie sie auch auf jedem anderen Temperaturniveau möglich sind. Die Ergebnisse der Untersuchung führten dazu, dass die bislang hohe Anforderung an die Sensorgenauigkeit für die Fahrbahnoberflächentemperatur von  $\pm 0,2$  Kelvin in den Betriebstechnischen Anforderungen an Glättemeldeanlagen [2] beibehalten

wurde. Diese Genauigkeitsforderung stellt unter den handelsüblichen Temperatursensoren eine hohe Qualität dar.

Als wesentliche Ursache für die aufgetretenen Differenzen sind auf die verschiedenen Einbauarten der Sensoren in der Fahrbahn anzunehmen. Die Sensoren selber stellen in den meisten Fällen nur sehr dünne Drähte mit wenigen Millimetern Länge dar. Sie waren bei allen Anlagen zusammen mit anderen Sensoren (Gefriertemperatur, Fahrbahfeuchte) in mehr oder weniger großen Materialblöcken eingesetzt, deren Materialien nicht denen der Fahrbahnkonstruktion entsprechen.

Diese Technologie wird bisher vor allem wegen der erforderlichen mechanischen Festigkeit gegenüber dem Verkehr als notwendig angesehen. In den Sensorblöcken entstehen aber andere Energieströme (siehe Kapitel 4) im unmittelbaren Bereich des Sensors für die Fahrhahnoberflächentemperatur, die nicht den Energieströmen der eigentlichen Fahrhahkonstruktion entsprechen.

Als ein Untersuchungsergebnis wurde deshalb empfohlen, Sensoren für die Fahrhahnoberflächentemperatur nicht mit den anderen Sensoren in einem Block unterzubringen, sondern sie gesondert in der Fahrhah einzubauen. Diese Empfehlung wurde bisher von den GMA-Herstellern nicht umgesetzt. Es werden gegenwärtig immer noch die Sensoren für die Fahrhahnoberflächentemperatur in vergleichsweise sehr großen Blöcken in gleichen und ähnlichen Formen wie zur Zeit der BAST-Untersuchung in den Wintern 1992/93 und 1993/94 angeboten.

Eine Untersuchung von GMA in Österreich [14] zeigte ebenfalls größere Differenzen zwischen verschiedenen Sensoren für die Fahrhahnoberflächentemperatur. Diese waren zwar ebenfalls auf einem sehr kurzen Fahrhahabschnitt installiert, allerdings nicht im gleichen Querschnitt. Auf mögliche Ursachen der Abweichungen wurde im Bericht nicht eingegangen.

### 3 Ziel des Projektes

Aufgrund der Erfahrungen der BAST und der österreichischen Untersuchungen ergibt sich die Notwendigkeit, angebotene Sensoren grundsätzlich einer Eignungsprüfung zu unterziehen. Die herstellerseitige Kalibrierung der Sensoren für die Fahrhahnoberflächentemperatur kann problemlos im Labor überprüft werden. Dazu sind die Sensoren in ein Flüssigkeitsbad mit einer definierten Temperatur zu tauchen. Mit dem Eintauchen in eine Flüssigkeit werden allerdings die meisten Einflüsse (siehe Kapitel 4) eliminiert, die in der Praxis auf der Fahrhah auftreten können.

Die Eignungsprüfung muss daher unter den verschiedenen Praxisbedingungen erfolgen. Dafür muss eine genaue Referenztemperatur verfügbar sein. Bisher sind keine eingeführten Referenzmessverfahren für die Prüfung von Sensoren für die Fahrhahnoberflächentemperatur im eingebauten Zustand mit der geforderten Genauigkeit bekannt. Bei den bisherigen BAST-Untersuchungen wurden

Kontaktthermometer für die Referenzmessung eingesetzt [6], die aber größere Differenzen zu den eingebauten Sensoren aufwiesen. Diese sind außerdem nicht bei laufendem Verkehr einsetzbar. Ihr Einsatz als Referenzmessmittel für längere Zeitschnitte würde zu unzumutbaren Sperrungen führen.

Weiterhin muss es Möglichkeiten geben, Sensoren unmittelbar nach ihrem Einbau zu prüfen (Abnahmeprüfung) und zu späteren Zeitpunkten zuverlässig zu kontrollieren.

Aufgabe des Projektes ist es, Grundlagen für genaue Referenzmessverfahren zu erarbeiten. Dabei sind die verschiedenen Einflüsse auf die Messungen der Fahrhahnoberflächentemperatur mit verschiedenen Sensoren zu analysieren. Das ausgewählte Referenzmessverfahren bei Eignungsprüfungen soll möglichst unter praxisnahen Verhältnissen einsetzbar sein.

## 4 Einflüsse auf das Verhalten der Sensoren für die Fahrhahnoberflächentemperatur

Temperaturmessverfahren beruhen in der Regel darauf, dass das definierte Verhalten von Materialien einer bestimmten Temperatur gleichgesetzt wird, die dann als die gleiche für die Umgebung gilt, deren Temperatur eigentlich gemessen werden soll. Beispiele sind die Volumenausdehnung eines Stoffes (z. B. Quecksilberthermometer), Widerstand gegenüber elektrischen Spannungen (z. B. Pt-100) oder die Aufnahme einer Strahlung (Pyrometer). Für eine genaue Temperaturmessung sind der enge thermische Kontakt und ein thermisches Gleichgewicht zwischen Sensor und Medium notwendig [4].

Das thermische Gleichgewicht wird durch eine Vielzahl von Einflüssen ständig gestört, die unter atmosphärischen Bedingungen an der Oberfläche eines Körpers außerdem sehr verschieden sein können.

Im Fall der Fahrhahnoberflächentemperatur wird im theoretischen Sinne die Temperatur der unendlich dünnen Grenzschicht zwischen der Fahrhahnoberfläche und der darüberliegenden 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:

$$S + B + L + V = 0 \quad [10]$$

- 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.

Weitere Einflüsse auf die Fahrbahnoberflächentemperatur sind der Verkehr infolge Reibung und Luftverwirbelung [7] sowie die Temperaturänderung durch die Einwirkung von Taustoffen.

## 5 Versuchsprogramm

Eignungsprüfungen von Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur im Einsatz von Glättemeldeanlagen müssen unter den verschiedenen Praxisbedingungen entsprechend Kapitel 4 über einen längeren Zeitraum erfolgen. Ein geeignetes Referenzmessverfahren für die Fahrbahnoberflächentemperatur gibt es nicht. Die Beurteilung verschiedener Sensoren ist daher nur im Vergleich unter gleichen Bedingungen möglich, bei denen durch theoretische Ableitungen aus den auftretenden Messdifferenzen und den Umfeldeinflüssen auf die genaueste gemessene Temperatur geschlossen werden kann.

Ein Vergleich auf einer befahrenen Fahrbahn wird bei den vorgesehenen Untersuchungen ausgeschlossen, da mit erheblichen Einwirkungen durch Taustoffe gerechnet wird. Da Taustoffe in der Praxis nach ihrem Auftragen zunächst auf sehr kleinen Flächen von wenigen Quadratmillimetern thermisch wirken (Schmelz- und Lösungswärme) [3], muss dieser Einfluss bei einer vergleichenden Grundsatzbeurteilung vermieden werden. Aus diesem Grund ist ein erster Vergleich auf einer speziell geschaffenen Versuchsfläche vorgesehen.

Für eine längere Messung einer Referenztemperatur kommen nach Kapitel 3 nur in die Fahrbahn eingebaute Sensoren, die unmittelbar an der Fahrbahnoberfläche sitzen, oder berührungsfreie Messverfahren in Frage. Aus diesem Grund sollen Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien in theoretisch günstigen Ausführungen sowie ein Pyrometer getestet werden. Da die Sensoren thermodynamisch nicht den Stoffen der Fahrbahnkonstruktion entsprechen, müssen sie vor allem extrem klein ausgeführt sein. Somit lassen sich Wärmeübergänge zwischen Sensor und Fahrbahnkonstruktion bzw. eine andere Wärmeleitung innerhalb des Sensors im Vergleich zur Wärmeleitung der Fahrbahnkonstruktion weitestgehend vernachlässigen. Trotzdem müssen sie den mechanischen Anforderungen beim Einbau und im späteren Betrieb entsprechen.

Eine weitere Forderung an das Messverfahren besteht darin, dass die tatsächliche Temperatur der Fahrbahnoberfläche gemessen wird. Wenige Millimeter unterhalb der Fahrbahnoberfläche werden bereits andere Temperaturen erwartet. Bei Untersuchungen an Betondecken wurden in Waldlagen im Sommer Temperaturgradienten bis 0,3 K/mm in den oberen 20 mm der Fahrbahndecke gemessen [9]. Durch minimal unterschiedliche Positionen innerhalb der Makrorauheit der Oberfläche oder durch unterschiedliche Überdeckung können Differenzen entstehen, die für einen optimalen Streuzeitpunkt maßgeblich sein können. Um eventuelle Differenzen beim Einbau der Sensoren feststellen zu können, sollen mehrere Sensoren einer Bauart gleichartig installiert werden.

Um die Vielfalt der Einflüsse auf die Temperaturmessungen zu erfassen, sind mit den eingebauten Sensoren Messdaten über eine Winterperiode zu sammeln und auszuwerten.

Bei einer betriebssicheren Arbeitsweise auf dem Messfeld ist danach ein Einbau der geeignet erscheinenden Sensoren auf der Autobahn vorgesehen, bei der neben den Einflüssen des Verkehrs auf die Messergebnisse vor allem die Haltbarkeit der Sensoren getestet werden soll.

GMA-Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur lassen sich nach dem Einbau in die Fahrbahn unter den gegenwärtigen Vorstellungen nur mit kurzzeitig auf der Fahrbahnoberfläche aufgesetzten Sensoren überprüfen. Hierzu sollen ebenfalls Sensoren verschiedener Bauarten im Vergleich mit den eingebauten Sensoren unter verschiedenen Einflüssen beurteilt werden.

## 6 Messfeldversuche mit eingebauten Sensoren im Winter 1997/98

### 6.1 Sensorauswahl

#### 6.1.1 Sensoren für Referenzmessungen bei Eignungsprüfungen

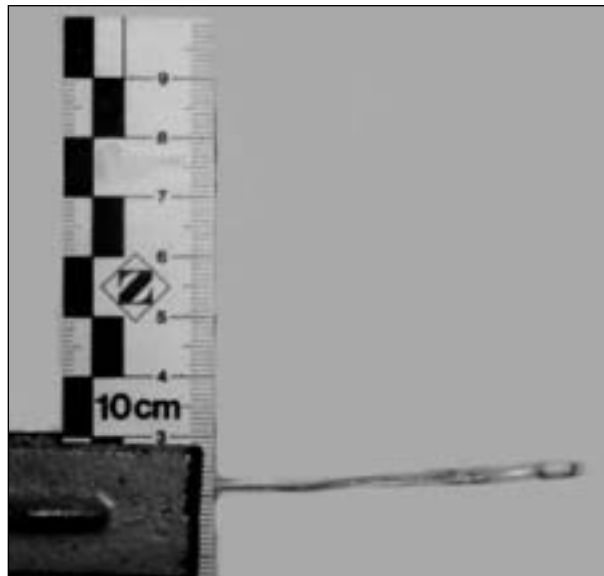
Für die einzubauenden Sensoren kamen nach den Überlegungen im Kapitel 5 drei Sensorarten mit folgenden gängigen Messprinzipien zum Einsatz:

- Pt-100-Widerstandssensoren (Bilder 3 und 4)  
Messprinzip: Der elektrische Widerstand eines Platindrahtes ändert sich entsprechend der Temperatur.
- NTC-Widerstandssensoren (Bild 5)  
Messprinzip: Der elektrische Widerstand eines Halbleiters ändert sich entsprechend der Temperatur.
- Thermoelemente (Bild 6)  
Messprinzip: Zwei Metalldrähte unterschiedlichen Materials sind durch zwei Lötstellen verbunden, in denen durch Erwärmung ein elektrischer Strom fließt. Die Größe der in einer solchen Vorrichtung erzeugten Thermospannung hängt vom Material der verlöteten Drähte und von der Temperaturdifferenz der beiden Lötstellen ab. Wird eine Lötstelle auf eine bekannte Temperatur konstant gehalten und befindet sich

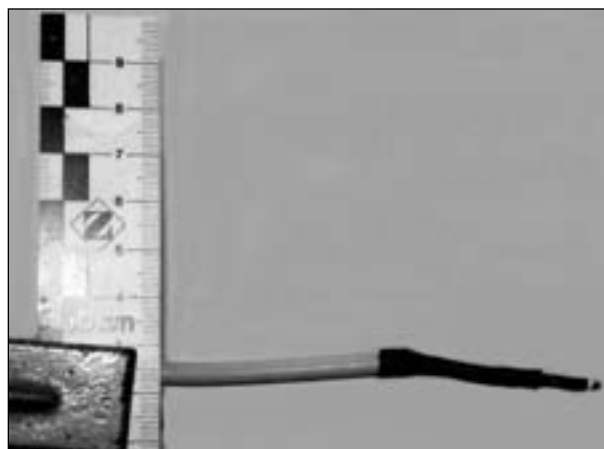
die andere Lötstelle im thermischen Gleichgewicht mit der Temperatur der Umgebung, so



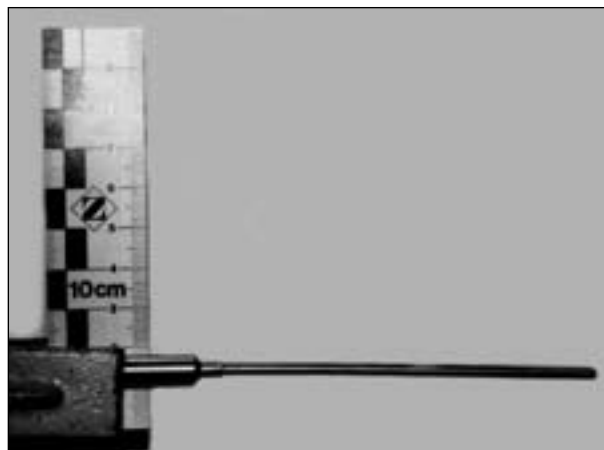
**Bild 3:** Pt-100 auf einem Plastikplättchen



**Bild 4:** Pt-100 in Glas



**Bild 5:** NTC



**Bild 6:** Thermoelement mit 3 mm Fühlerdurchmesser



lässt sich letztere aus der entstehenden Thermospannung ermitteln.

Die Messprinzipien beruhen bei allen Sensoren auf der Änderung elektrischer Kennwerte in Abhängigkeit von der Temperatur. Deshalb müssen sie vor dem Einfluss durch Feuchte geschützt sein. Die elektrischen Leiter selber sind in ihrer Bauform so klein, dass sie für die genannten Prüfzwecke bereits für den Einbau eine ungenügende mechanische Stabilität besitzen. Darum sind sie auf ein Trägermaterial aufgebracht bzw. von diesem umgeben. Dabei gibt es die verschiedensten Ausführungsmöglichkeiten. Die Stabilität gegenüber mechanischen Einflüssen durch Verkehr war in Hinblick auf die zunächst festzustellende messtechnische Eignung keine Bedingung.

Für die Untersuchungen wurden Pt-100-Widerstandssensoren in zwei verschiedenen Bauformen ausgewählt, um auch den Einfluss der verschiedenen Sensorträgermaterialien einschätzen zu können. Bei einer Bauform befanden sich die Pt-100-Widerstände auf kleinen Plastikplättchen (ca. 2 x 2 mm), die mit einer dünnen Plastikhülle gegen Feuchtigkeit überzogen waren. In der zweiten Ausführung waren die Widerstände in einer zylinderartigen Glasform mit ca. 4 mm Länge und ca. 2 mm Durchmesser eingelassen, die mit einem Lacküberzug vor allem an den Anschlussdrähten versehen war.

Die Anschlüsse für die Widerstandssensoren sind in Vier-Leiter-Technik ausgeführt, um Einflüsse durch die Verbindungsleitungen zwischen Sensor und Auswerteelektronik zu vermeiden.

Die verwendeten Thermoelemente entsprachen nicht den aufgestellten Anforderungen. Statt der gelieferten Stahlmantelüberzüge mit ca. 3 mm Durchmesser sollten die Thermodrähte nur einen Lacküberzug oder einen Stahlmantel unter 0,5 mm Durchmesser besitzen. Der Generalauftragnehmer für die gesamte Messtechnik konnte diese Form nicht liefern. Eine Beschaffung und Erprobung der gewünschten Bauformen von einem anderen Hersteller waren aus Zeitgründen nicht mehr möglich.

Für alle einzubauenden Sensoren wurde eine Grundgenauigkeit (Messung im Flüssigkeitsbad) gefordert, die Werte von  $\pm 0,15$  Kelvin nicht überschreitet.

Für die weitere Frage, wie weit es technologisch möglich ist, Sensoren gleicher Bauart an der Fahrbahnoberfläche möglichst gleichartig zu platzieren,

wurden von jeder Sensorbauart 3 Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur im Messfeld eingebaut.

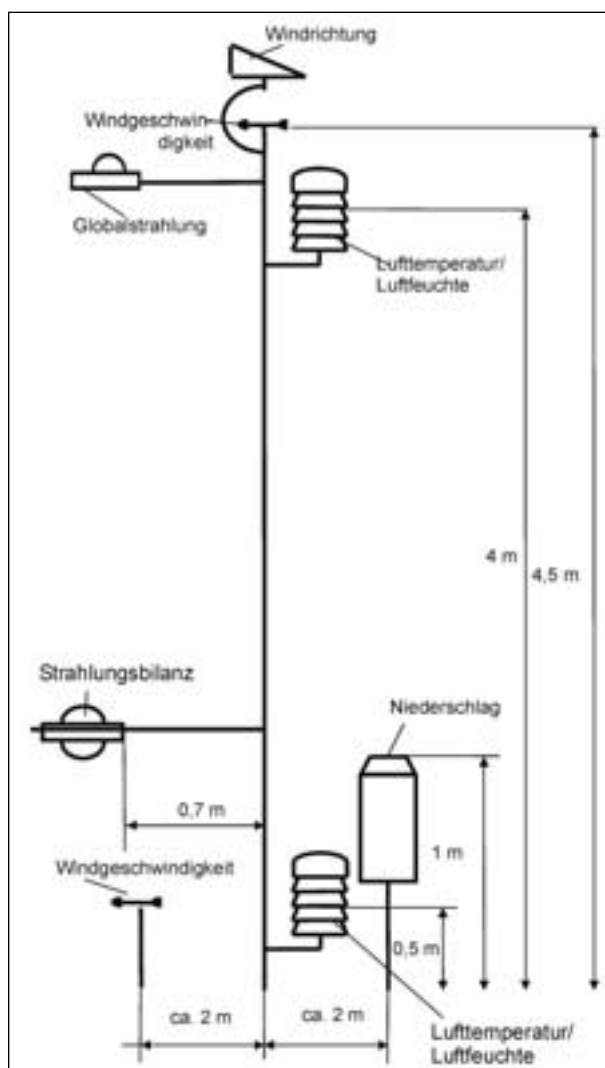
Für das berührungslose Messen der Fahrbahnoberflächentemperatur kam ein Pyrometer (Infrarotthermometer) der Firma Heitronic zum Einsatz. Für den speziellen Einsatzfall war die Kamera mit einer Heizung ausgeführt. Sie besaß ein Objektiv, mit dem aus einer Entfernung von rund 2 Metern nur ein kreisförmiger Messfleck mit ca. 1-2 cm Durchmesser betrachtet wurde.

### 6.1.2 Messung zusätzlicher Parameter

Im Ergebnis der Untersuchung wurden unterschiedliche Messwerte zwischen den einzelnen Sensoren erwartet. Zur Beurteilung der Differenzen sollen die im Kapitel 4 genannten Energieströme herangezogen werden. Daher war mit Beginn der Messreihen die Messung nachfolgender Parameter für die Einschätzung der Energieströme vorgesehen (Kürzel in den Klammern geben die zu betrachtenden Energieströme nach Kapitel 4 an):

- Globalstrahlung in  $W/m^2$  (S),
- Strahlungsbilanz zwischen kurzwelliger und langwelliger Strahlung von der Fahrbahnoberfläche und Strahlung aus dem Weltall bzw. reflektierter Strahlung entsprechend der Bewölkung in  $W/m^2$  (S),
- Temperatur in der Asphaltdeck- und Tragschicht in  $^{\circ}C$ , je Bohrkern nach Kapitel 6.4 eine Temperaturmessung in 15, 50 und 100 mm unterhalb der Fahrbahnoberfläche, jeweils mit der gleichen Sensorart, wie die Fahrbahnoberflächentemperatur gemessen wird (B),
- Lufttemperatur in  $^{\circ}C$ , jeweils in 0,5 und 4 m Höhe über der Fahrbahnoberfläche (L),
- Windgeschwindigkeit und -richtung in m/s bzw.  $^{\circ}$  in 4 m Höhe, die Windgeschwindigkeit zusätzlich in 0,5 m Höhe (L),
- relative Luftfeuchte in % in 0,5 und 4 m Höhe über der Fahrbahnoberfläche (V),
- Niederschlagsmenge in mm/10 Min. (V).

Alle meteorologischen Sensoren mit Ausnahme des Niederschlagssensors und des Sensors für die Windgeschwindigkeit in 0,5 m Höhe waren an einem Mast unmittelbar neben der Messfläche befestigt (schematischer Aufbau siehe Bild 7).



**Bild 7:** Schematische Darstellung der Anordnung von Sensoren für die meteorologischen Parameter

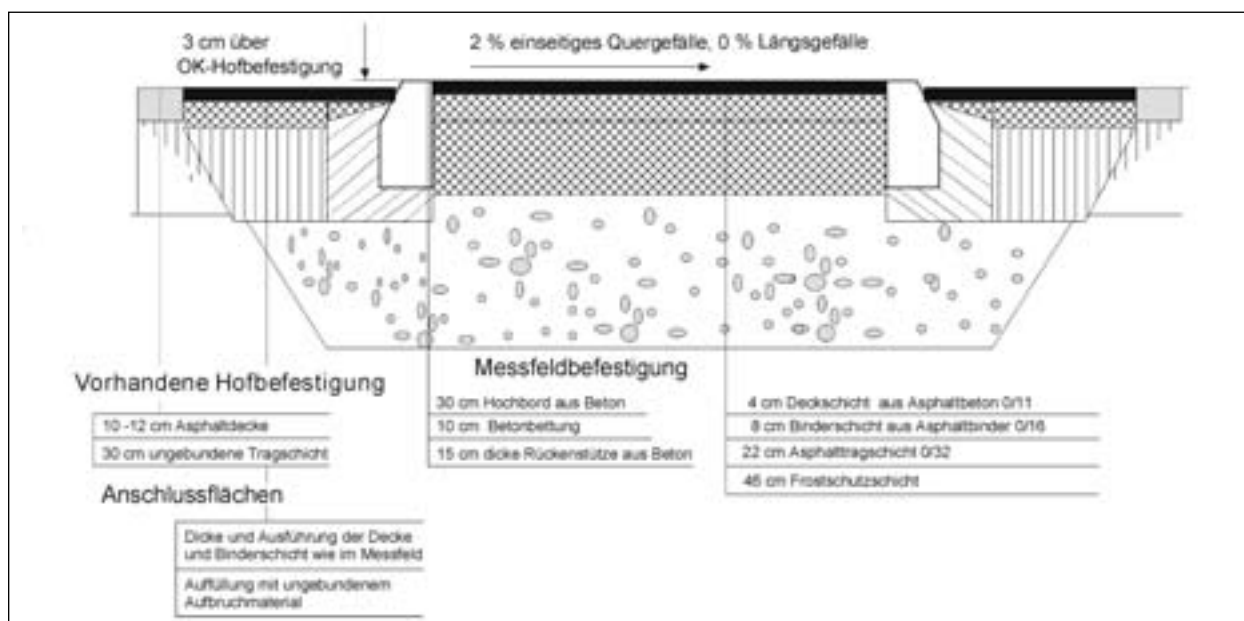
## 6.2 Messfeldaufbau

Für die Realisierung der Zielsetzung, alle eingesetzten Sensoren unter möglichst gleichen Einflüssen vergleichen zu können, wurde entschieden, ein spezielles Messfeld zu bauen. Damit der Beobachtungsaufwand gering bleibt, wurde das Messfeld auf dem Hofgelände der BAST, Außenstelle Inzell, eingerichtet (Bild 8).

Die gewählte Messfeldbefestigung in Asphaltbauweise und in der Bauklasse SV ist repräsentativ für einen großen Teil von Straßenverkehrsflächen, die höchsten Verkehrsbelastungen unterliegen (Bild 9). Nach thermodynamischen Gesichtspunkten sind somit Vergleichsbedingungen mit in Autobahnfahrbahnen eingebauten GMA-Sensoren gegeben. Die Messfläche wurde mit Betonborden umgeben, um eine Beeinflussung durch den Zufluss von Ober-



**Bild 8:** Lage des Messfeldes in der Bundesanstalt für Straßenwesen, Außenstelle Inzell



**Bild 9:** Bauweise des Messfeldes (nach RStO 86/89: Bauklasse SV, Dicke des frostsicheren Oberbaus: 80 cm)

flächenwasser aus umliegenden Flächen zu vermeiden. Vom Messfeld wird das anfallende Oberflächenwasser durch eine einseitige 2%ige Querneigung abgeleitet.

### 6.3 Kalibrierung der Temperatursensoren für die Fahrbahn

Vor dem Einbau wurden alle Sensoren für die Temperaturen an der Fahrbahnoberfläche und in der Deck- und Tragschicht (zusätzliche Sensoren nach Kapitel 6.1.2) bezüglich ihrer Genauigkeit geprüft. Der Lieferant hat nach eigenen Angaben an den Sensoren selber keine Prüfungen vorgenommen, sondern auf die Genauigkeitsangaben der Hersteller vertraut. Die Prüfungen fanden mehrfach in einem Alkohol- bzw. Wasserbad bei Temperaturen von 0 °C (Eis-Wasser-Gemisch), ca. -10 °C und ca. 20 °C statt. Als Referenz für die Flüssigkeitstemperatur diente ein Quecksilberthermometer. Die Tabelle 1 gibt die ermittelten Korrekturwerte wieder, wie sie im Eis-Wasser-Gemisch ermittelt und in der Software der Ausgabeelektronik eingegeben wurden. Bei den anderen genannten Temperaturen fanden Überprüfungen der geänderten Werte statt.

Mit Ausnahme eines Sensors haben alle Pt-100- und NTC-Sensoren die vorgegebenen Genauigkeitsanforderungen von  $\pm 0,15$  Kelvin erfüllt. Größere Abweichungen gab es bei fast allen Thermoelementen.

Die Überprüfung des Pyrometers vor dem Einbau im Messfeld erfolgte mit Hilfe eines Asphalt-Bohrkernes, dessen Temperatur unter Laborbedingungen mit der Kamera und im Vergleich mit einem kalibrierten Pt-100-Kontaktthermometer gemessen wurde. Die Messungen fanden jeweils bei Temperaturen von ca. -10 °C bis ca. +20 °C in einem Raum statt, der durch eine Klimaanlage über mehrere Tage gleichmäßig temperiert war. Da die Unterschiede zwischen beiden Sensoren unter 0,1 Kelvin

Sensor Nr.	Pt-100 auf Plastikplättchen	Pt-100 in Glas	NTC-Sensor	Thermoelement
1 (FT)	0,00	-0,08	-0,09	-0,4
2 (FT)	0,07	-0,08	0,00	-0,4
3 (FT)	-0,04	-0,50	-0,03	0,1
4 (UT 15 mm)	0,00	-0,15	0,02	-0,4
5 (UT 50 mm)	0,06	-0,13	-0,05	-0,4
6 (UT 100 mm)	0,00	-0,10	-0,10	-0,9

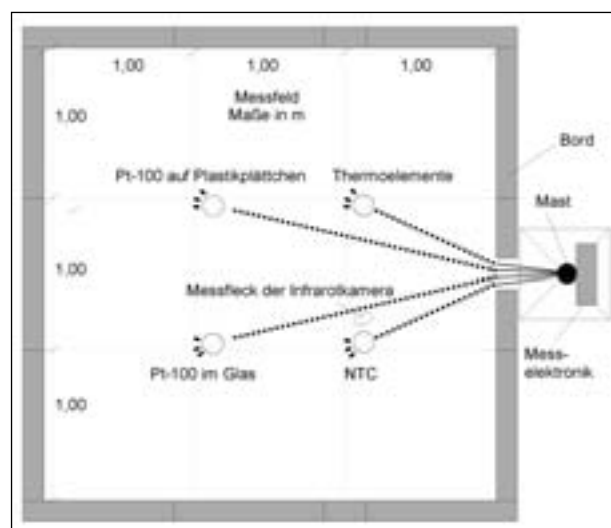
**Tab. 1:** Korrekturwerte in °C für die 1997 im Messfeld eingebauten Temperatursensoren infolge der Kalibrierung im Eis-Wasser-Gemisch

lagen, wurde an den Einstellungen der Kamera keine Änderungen vorgenommen. Der vom Hersteller vorgegebene Emissionsgrad 1 blieb eingestellt.

### 6.4 Einbau der Sensoren für Eignungsmessungen

Jede der 4 ausgewählten auf dem Messfeld einzubauenden Sensorarten nach Kapitel 6.1.1 kam dreifach für die Fahrbahnoberflächentemperatur zum Einsatz. Der Einbau wurde so gleichmäßig wie möglich ausgeführt. Damit alle vier Sensorgruppen durch den Bodenwärmestrom möglichst gleichmäßig beeinflusst sind, lagen die Einbaupunkte für eine Sensorgruppe jeweils 1 m untereinander und vom Messfeldrand entfernt (Bild 10).

Die Sensoren wurden ausgehend von einer doppelten Kernbohrung (Durchmesser 15 cm, 12 cm tief) in einer schrägen Bohrung (ca. 45°) so nahe wie möglich an die Oberfläche herangeführt (Bild 12) und anschließend mit einem feinen Asphaltmörtel in einer Dicke < 1 mm abgedeckt. Die Bohrungsdurchmesser waren nur unwesentlich größer als der Sensor selber. Die Sensoren wurden vor dem Einführen in die Bohrungen mit dem Asphaltmörtel umgeben, um möglichst keine Hohlräume und damit Wärmebrücken in den Bohrungen entstehen zu lassen. Der Abstand zwischen den Sensoren einer Bauart betrug ca. 50 mm. Die Leitungszuführungen von der Messelektronik am Mast für die meteorologischen Sensoren (Kapitel 6.1.2) erfolgten über flexible Stahlrohre, die auf der bituminösen Tragschicht vor dem Einbau der Asphaltbinderschicht eingesetzt wurden (Bild 11).



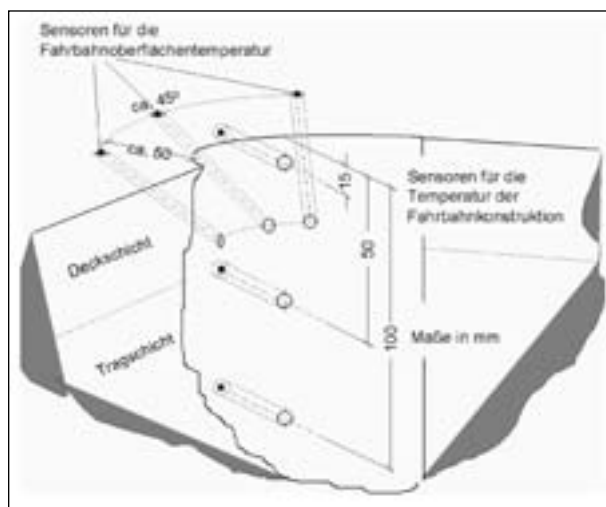
**Bild 10:** Anordnung der Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur im Messfeld

Innerhalb der Sensorgruppe erhielten die drei Sensoren an der Oberfläche die Nummern 1, 2, 3 (jeweils in Draufsicht nach Bild 10 von links beginnend).

Nach dem Einsetzen der Sensoren wurden die Bohrkerns wieder in die Bohrlöcher eingesetzt und alle entstandenen Hohlräume mit einem feinen Asphaltmörtel verfüllt. Die Enden der flexiblen Stahlrohre wurden ebenso verschlossen.



**Bild 11:** Einbau der Kabelkanäle auf der Tragschicht



**Bild 12:** Lage der Temperatursensoren gleicher Bauart in der Deck- und Tragschicht



**Bild 13:** Einschleiben eines Pt-100 für die Fahrbahnoberflächentemperatur mit Bitumenmörtel in eine Bohrung

Die Bilder 13 bis 16 zeigen Details vom Einbau der Sensoren.

Die Infrarotkamera war am Mast neben dem Messfeld befestigt. Der Oberflächentemperatur (Messfleck) wurde nahe der NTC-Sensorgruppe erfasst (siehe Bild 8).



**Bild 14:** Einbau der Thermoelemente von Pt-100 im Bohrloch



**Bild 15:** Befestigung der Anschlussleitungen



Bild 16: Einsetzen eines Bohrkernes

## 6.5 Zeiträume der Messwert- fassungen – Witterungssituationen

Der Einbau der Sensoren in die Fahrbahn erfolgte Ende Oktober 1997, ebenso die Installation der Sensoren für die meteorologischen Parameter. Ausnahmen waren die Infrarot-Kamera sowie der Niederschlagssensor, die wegen Installationsproblemen erst Ende November in Betrieb gingen.

Die Messwertfassung für die Auswertung zum Projekt begann am 1. November 1997 und endete am 30. März 1998. Im November/Dezember 1997 musste sie für zwei Wochen wegen Problemen mit der Erfassungselektronik vollständig unterbrochen werden. Aufgrund eines Softwarefehlers gab es ständig Unterbrechungen bei der Speicherung der Messwerte von allen Thermoelementen und zwei Glas-Pt-100. Den Fehler konnte der Hersteller erst Anfang März 1998 vollständig beheben. Von 84 Tagen liegen auswertbare Datensätze vor.

Bis Mitte Dezember erfolgte die Messwertaufzeichnung im Minutentakt, danach im Zwei-Minutentakt. Zum Jahreswechsel speicherte die Anlage die Messwerte alle 10 Minuten.

Die aufgesetzten Kontaktsensoren für Abnahme- und Kontrollprüfungen kamen erst von Februar bis März 1998 zum Einsatz. Anfangs wurden diese Sensoren als Gruppe für einen Vergleich untereinander und später ein Teil dieser Sensoren im Nahbereich (ca. 50 bis 100 mm Abstand) der eingebauten Sensoren aufgesetzt. Ein direktes Aufsetzen auf einen eingebauten Sensor erfolgte in keinem Fall, da dies als eine Beeinträchtigung der Umfeldeinflüsse für die eingebauten Sensoren angesehen wurde.

Zusätzlich erfolgten tagsüber visuelle Beobachtungen des Messfeldes. Dabei wurden insbesondere

der Zustand der Messfeldoberfläche, die Niederschlagsaktivität und die Bewölkung in Protokollvorlagen bzw. mit Fotos dokumentiert.

Im Erfassungszeitraum herrschten die verschiedensten Wetterlagen vor. Über längere Zeiträume war das Messfeld schneebedeckt. Vereisungen konnten nur im sehr geringen Umfang festgestellt werden. Die meisten Tage (ca. 2/3) waren Frosttage mit Lufttemperaturen teilweise unter 0 °C. An 14 Tagen stieg die Lufttemperatur nicht über 0 °C (Eistage). Die tiefste Lufttemperatur wurde mit -17,6 °C gemessen. Für den Standort war es ein milder und schneearmer Winter, für die meisten Regionen in Deutschland dürfte dieser Winter als eher durchschnittlich gelten. Allerdings herrschten nur an wenigen Tagen sehr tiefe Temperaturen < -10 °C vor. Eine Einwirkung von Taustoffen auf dem Messfeld wurde nicht beobachtet und wird bei den Auswertungen ausgeschlossen.

## 6.6 Ergebnisse der eingebauten Sensoren

### 6.6.1 Auswertungsmethoden

Die Eignung der Sensoren wird in erster Linie durch eine Differenzbetrachtung zwischen den Messergebnissen der einzelnen Sensoren gleicher und unterschiedlicher Bauart zu gleichen Zeitpunkten bewertet. Eine eindeutige Referenz, welche der Sensoren die wahre Temperatur anzeigt, ist in den allermeisten Fällen nicht gegeben.

Als ein Anhaltspunkt für die wahre Temperatur der Fahrbahnoberfläche ist nur die Situation wertbar, bei der sich auf der Messfläche ein Eis-Schnee-Gemisch beobachten ließ. In diesem Fall wird unter der Voraussetzung, dass kein Taustoff vorhanden ist, die Temperatur mit 0 °C angenommen.

Ein weiterer Anhaltspunkt für eine Referenzbetrachtung lag vor, wenn eine dickere Schneedecke auf dem Messfeld vorhanden war. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Schnees und des hohen Reflexionsverhaltens gegenüber kurzwelliger Strahlung wirkt die Schneedecke isolierend [10]. Die Temperatur von 0 °C bleibt bei der beginnenden Ausbildung einer Schneedecke unter dieser bestehen, sofern der Niederschlag von Regen in Schnee im Bereich des Gefrierpunktes übergeht.

Frühere Auswertungen zu Fahrbahnoberflächentemperaturen zeigen, dass eine Berechnung von mittleren Abweichungen über längere Zeiträume

nicht sinnvoll ist. Der Grund liegt in den unterschiedlichen Einflüssen bei den verschiedenen Witterungsarten und Zuständen der Fahrbahnoberfläche [6], [7]. Bei den Auswertungen werden daher die Messwerte der Sensoren einer Bauart oder die Sensoren verschiedener Bauarten unter jeweils etwa gleichen Bedingungen verglichen und interpretiert.

Ein erheblicher Anteil der aufgetretenen größeren Differenzen wird auf technische Unzulänglichkeiten der Messelektronik zurückgeführt. So traten an verschiedenen Tagen immer in etwa gleichen Zeiträumen Abweichungen einzelner Sensoren auf, die sich auf keine meteorologischen Begebenheiten zurückführen lassen.

Eine weitere Ursache für größere Abweichungen stellt kurzzeitige unterschiedliche Beschattung am frühen Vormittag bzw. am späten Nachmittag dar. Diese Zeiträume und die genannten Zeiträume mit technisch begründeten Abweichungen kamen, soweit sie als solche erkannt wurden, nicht in die Auswertung.

Ein Zusammenführen aller Daten in einen Datenpool war aufgrund der großen Menge rechen-technisch nicht möglich. Deshalb werden die Daten hauptsächlich tageweise betrachtet und die Tagesauswertungen nur für allgemeine Übersichtsstatistiken zusammengeführt. Auf die Messwerte nach dem 9. März 1998 wird bei den Vergleichen zwi-

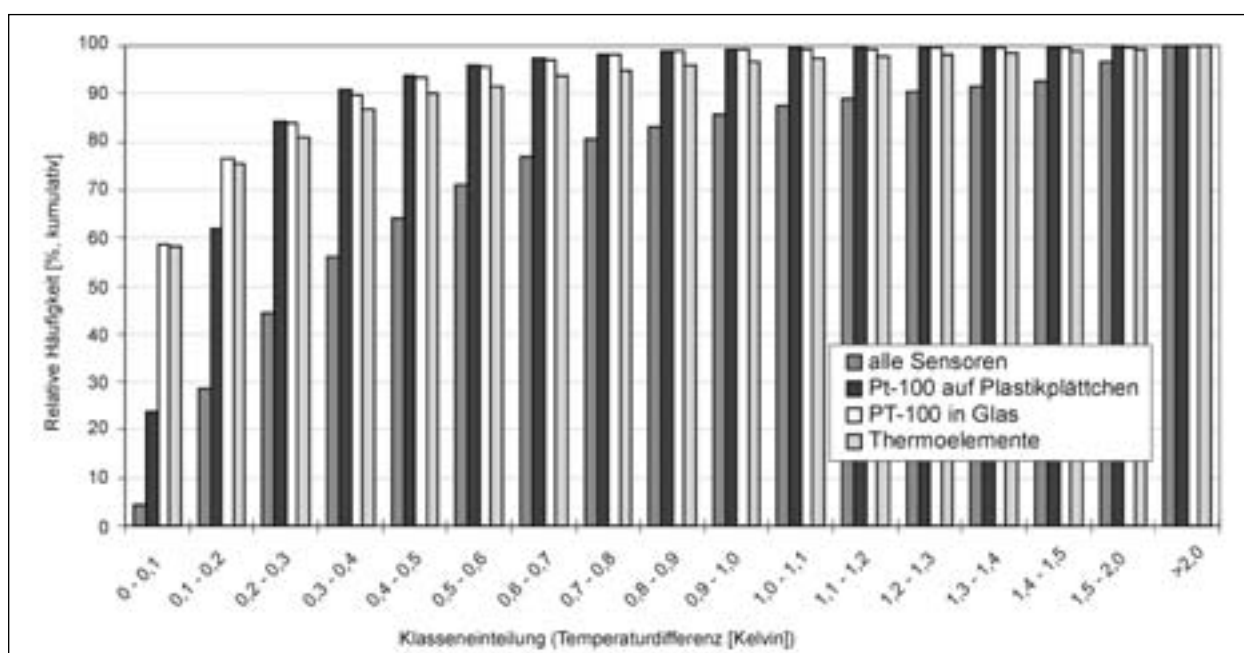
schen Sensoren verschiedener Bauarten verzichtet, da durch die Stative für die aufgesetzten Sensoren vermehrt Beschattungen der Felder einzelner Sensorbauarten auftraten.

### 6.6.2 Allgemeine Ergebnisübersicht

Für die betrachteten Zeiträume gilt allgemein, dass alle eingebauten Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur in den strahlungsarmen Zeiträumen (mit hohem Wolkenbedeckungsgrad) und unter Schnee oder Schneematsch annähernd gleiche Temperaturen angegeben haben. Unter Schnee und Schneematsch wurde immer eine Temperatur von 0 °C mit Differenzen zwischen allen Sensoren bis rund  $\pm 0,2$  Kelvin gemessen.

In diesen Zeiträumen, die auch über mehrere Tage andauerten, kann ein weitgehendes thermisches Gleichgewicht zwischen dem Sensor und dem zu messenden Medium vorausgesetzt werden. Die unter diesen Bedingungen gemessenen geringen Differenzen zeigen, dass die Genauigkeit aller eingebauten Sensoren nach der eingangs vorgenommenen Kalibrierung den Anforderungen an Glättemelddanlagen entspricht.

In Bild 17 sind die Häufigkeiten der aufgetretenen Differenzen zwischen Sensoren gleicher Bauart (ohne NTC, da 2 Sensoren dieser Bauart für die Fahrbahnoberflächentemperatur ausfielen) und der Differenzen zwischen dem größten und kleinsten



**Bild 17:** Relative Häufigkeiten (kumulativ) der Differenzen zwischen den Sensoren gleicher Bauart bzw. zwischen allen Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Messwerte von 6.1. bis 30.3.1998, über 50.000 Messzeitpunkte)

Messwert aller eingebauten Sensoren untereinander aufgeführt. Grundlage dieser Auswertung sind alle Messwerte vom 6. Januar bis 30. März 1998 mit einer Datenerfassung im Zwei-Minuten-Takt. Die Differenzen bei den Sensoren gleicher Bauart wurden aus den Messwerten der beiden Sensoren gebildet, die in den meisten Fällen am weitesten auseinanderlagen. In den Vergleich aller Sensoren ist auch der einzige verbliebene NTC-Sensor einbezogen.

Die Auswertung zeigt, dass in ca. 60 % aller bewerteten Fälle die Differenz zwischen zwei Pt-100 auf Plastikplättchen unter dem vorgegebenen zulässigen Toleranzwert für Fahrhahnoberflächen-temperatur bei Glättemeldeanlagen von  $\pm 0,2$  Kelvin bleibt. Die Pt-100 in Glas und die Thermoelemente unterschreiten jeweils im Vergleich untereinander diese Grenze in über 75 % aller Fälle. Unter der Betrachtung, dass ein Messwert um  $-0,2$  Kelvin und der zweite Messwert um  $+0,2$  Kelvin vom wahren (unbekannten) Wert abweicht, ist noch eine zulässige Toleranz von  $0,4$  Kelvin möglich. Diese Toleranz wird von den Pt-100 beider eingesetzten Bauarten in rund 90 % der Fälle nicht überschritten.

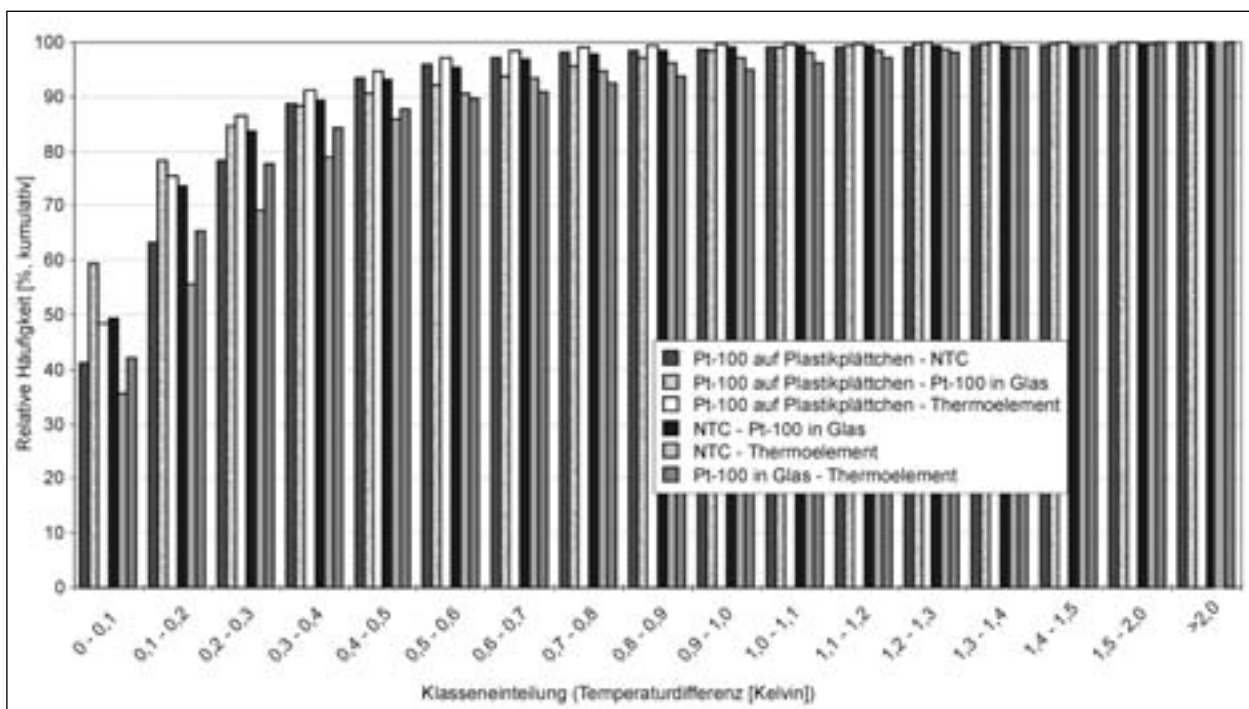
Ähnliche Ergebnisse ergeben die Differenzen zwischen jeweils zwei Sensoren unterschiedlicher Bauarten (Bild 18). Für diese Differenzbildung wurden jeweils die Messwerte des Sensors einer Bau-

art herangezogen, dessen Messwerte die wenigsten Extreme der drei Sensoren innerhalb der Bauart anzeigten. Für die NTC-Bauart standen nur die Messwerte des verbliebenen Sensors zu Verfügung. Die optimale Toleranzgrenze von  $\pm 0,2$  Kelvin wird mit Ausnahme eines Sensorpaares in 60 % der Fälle unterschritten. Bei zwei Sensorpaaren liegt sie über 75%. Unter der Toleranzgrenze von  $\pm 0,4$  Kelvin bleiben je nach Sensorpaar zwischen rund 80 und 90 % der betrachteten Fälle.

Beim Vergleich aller Sensoren untereinander treten wesentlich größere Differenzen auf. Unter  $0,4$  Kelvin Differenz zwischen den Messwerten aller Sensoren liegen nur etwa rund 55 % aller Fälle (Bild 17).

Nach der bisherigen Betrachtung stellt sich die Frage, in welchen Zeiträumen die höheren Differenzen zwischen den Sensoren aufgetreten sind. Die Durchsicht der Messwertverläufe von allen Sensoren zeigte schon in einer groben Abschätzung, dass die Differenzen tagsüber bei höheren Globalstrahlungswerten auftraten.

Den Messreihen ist in allen Fällen zu entnehmen, dass die hohen Differenzen (über  $0,4$  Kelvin) fast ausschließlich an Tagen mit hohen Werten der Globalstrahlung auftraten. Daher wird bei den nachfolgenden Betrachtungen die Höhe der Differenzen zwischen jeweils zwei Sensoren in Bezug auf die



**Bild 18:** Relative Häufigkeiten (kumulativ) von Differenzen zwischen den Sensoren verschiedener Bauarten für die Fahrhahnoberflächen-temperatur (Messwerte von 6.1. bis 9.3.1998, jeweils über 30.000 Messzeitpunkte)

Höhe zur Strahlungsbilanz, die auch Aussagen über die nächtlichen Strahlungsverhältnisse zulässt, untersucht.

### 6.6.3 Vergleich von Sensoren gleicher Bauart

#### 6.6.3.1 Pt-100 auf Plastikplättchen

Die Messwerte der Sensoren dieser Baugruppe für die Fahrbahnoberflächentemperatur weichen in den meisten Zeitanteilen (90 %) bis 0,4 Kelvin voneinander ab. Abweichungen über 0,4 Kelvin kamen vor allem bei lang andauernden Zeiten mit hoher Strahlungsintensität vor.

Bei Spitzenwerten der Globalstrahlung mit über 700 W/m<sup>2</sup> kam es auch zu Abweichungen etwas über einem Kelvin. Bei diesen Strahlungswerten traten Fahrbahnoberflächentemperaturen über 20 °C auf.

Bei vorhandener Globalstrahlung steigen die Differenzen vor allem zwischen den Sensoren 2 und 3 mit dem Anstieg der Globalstrahlung. Nach Erreichen des höchsten Strahlungswertes sinken die Differenzen sehr schnell. Dass nicht am Tag mit den höchsten Strahlungswerten (21.2.98) die höchsten Differenzen auftraten, kann daran liegen, dass an diesem Tag die Globalstrahlung infolge anderer Wolkenverhältnisse weniger schnell anstieg als an den betrachteten Tagen im Januar (Bild 19).

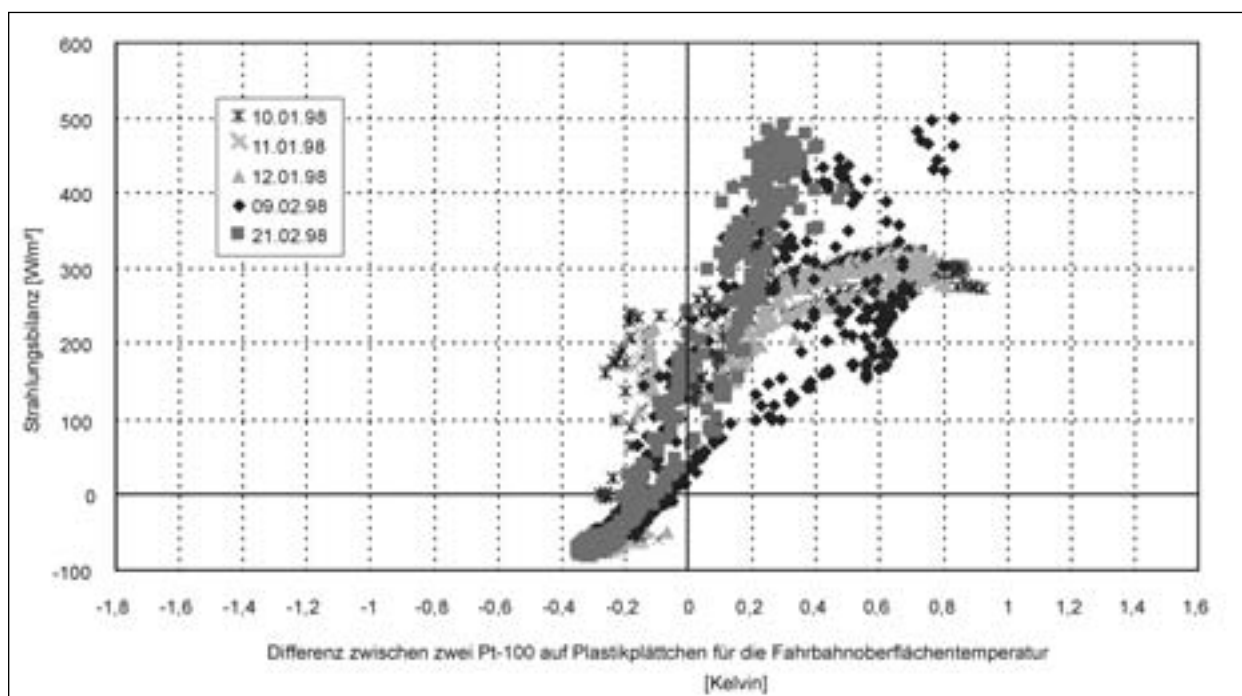
In den Zeiten ohne Globalstrahlung ergab sich nur eine geringe Abhängigkeit zwischen Strahlungsbilanz und der Differenz zwischen den beiden Sensoren.

Da innerhalb der betrachteten Tage etwa gleiche Windverhältnisse mit den geringen Werten zwischen 0 und etwa 1 m/s vorlagen, lässt sich keine Windabhängigkeit der Differenzen bei der Fahrbahnoberflächentemperatur nachweisen. Ebenso ließ sich keine direkte Abhängigkeit der Differenzhöhe zur Lufttemperatur, zur Temperatur in der Fahrbahnkonstruktion, zur tatsächlichen Fahrbahnoberflächentemperatur, zum Fahrbahnzustand (trocken, feucht oder nass) oder zur Luftfeuchte nachweisen.

#### 6.6.3.2 Pt-100 in Glas

Die Sensoren dieser Baugruppe weichen bei rund 75 % der Fälle im betrachteten Auswertzeitraum weniger als 0,2 Kelvin voneinander ab. Die Verteilung der größeren Differenzen war zwischen den drei Sensoren über den Erfassungszeitraum nicht konstant. Anfangs lagen die Messwerte der Sensoren 1 und 3 dichter beieinander, später die Messwerte der Sensoren 1 und 2. Eine Ursache war dazu nicht erkennbar.

Alle drei Sensoren sind in den Zeiträumen ohne Globalstrahlung mit Differenzen unter 0,2 Kelvin



**Bild 19:** Korrelation zwischen der Differenz von 2 Pt-100 auf Plastikplättchen für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Sensor 2 - Sensor 3) und der Strahlungsbilanz (2.738 Werte)



annähernd gleich. Anders sieht es in den Zeiträumen mit Globalstrahlung aus. An den meisten betrachteten Tagen traten kaum größere Differenzen über 0,3 Kelvin zwischen den Sensoren 1 und 2 als bei Sensoren mit den größten Differenzen auf. Dabei entsteht aber keine lineare Abhängigkeit zwischen Temperaturdifferenz und Globalstrahlung wie bei den Pt-100 auf den Plastikplättchen. In den Zeiträumen mit einem schnellen Anstieg oder Abfall bleiben die Messwerte relativ gleich, wobei beim Ansteigen negative Differenzen entstehen, während sie in Zeiträumen mit annähernd gleich bleibend hoher Globalstrahlung zu positiven Differenzen mit nur geringer Höhe übergehen. Beim Abfall der Globalstrahlung streben die Differenzen wieder gegen 0 Kelvin (Bild 20).

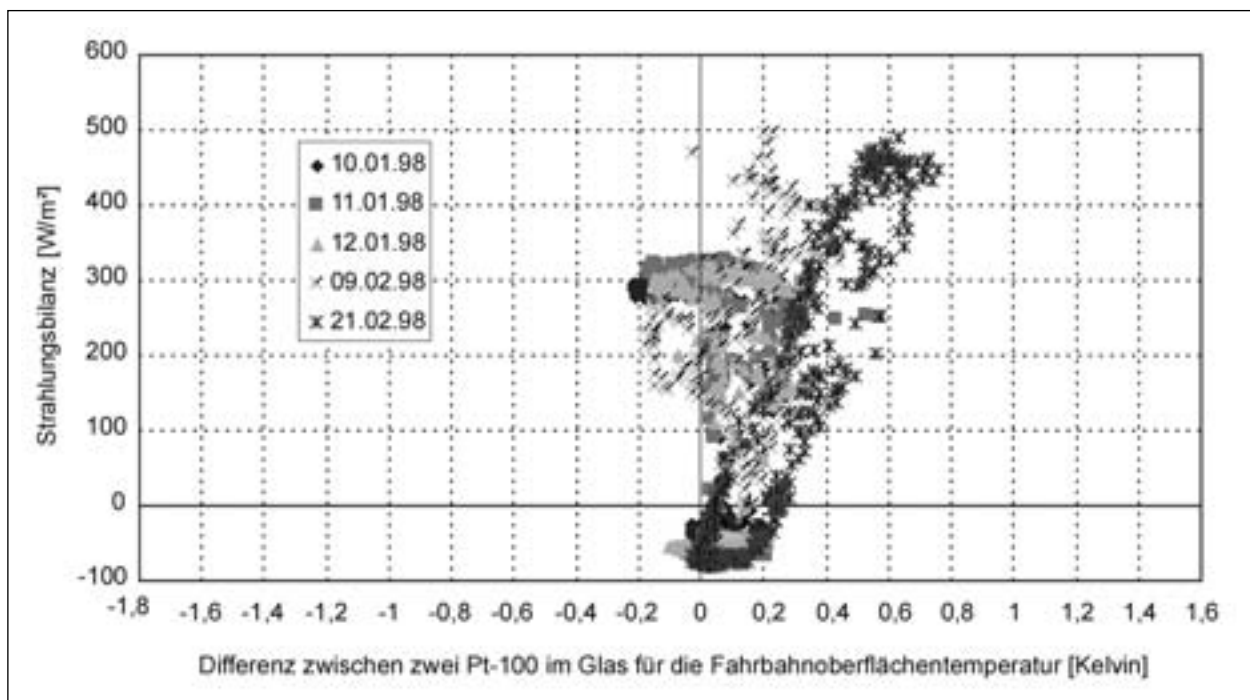
Am Beispiel des 21.02.98 lassen sich diese Aussagen allerdings nicht ablesen. Hier steigen die Differenzen gleichmäßiger mit dem Anstieg der Globalstrahlung.

Bei der Bewertung der Sensoren dieser Baugruppe muss berücksichtigt werden, dass es in den frühen Vor- und Nachmittagsstunden zu Beeinflussungen durch kurzzeitige Beschattungen einzelner Sensoren dieser Baugruppe kam, die die Messergebnisse bzw. Differenzen beeinträchtigt haben können.

### 6.6.3.3 NTC-Sensoren

Die NTC-Sensoren haben sich in der ausgeführten Bauart nicht bewährt. Von den 6 Sensoren (3 an der Oberfläche und 3 in der Fahrbahnkonstruktion nach Kapitel 6.1.2) fielen bis zum Ende der Messwertaufnahme 5 Sensoren aus. Der Ausfall eines Sensors trat nicht schlagartig auf, sondern die Messwerte eines defekten Sensors drifteten langsam von den Messwerten der anderen Sensoren ab. Daraus ergibt sich das Problem, dass der genaue Zeitpunkt des Beginns der Falschanzeige nicht ermittelt werden kann. Als Ursache wird ein nicht dauerhafter Schutz gegen Feuchtigkeit angenommen. Somit muss nicht die Qualität des Messverfahrens, sondern die Anpassung für den Einsatzzweck bemängelt werden.

Bis Anfang Dezember gab es zwischen den Messwerten der 3 Oberflächensensoren im Vergleich zu den anderen Sensorenbauarten nur geringe Differenzen. Zwei Sensoren (1 und 2) der Gruppe wichen unter allen auftretenden Verhältnissen nicht mehr als 0,2 Kelvin ab. Der Sensor 3 weist gegenüber den beiden genannten Sensoren größere Abweichungen auf, die je nach Strahlungseinfluss unterschiedlich sind. Während unter steigender Globalstrahlung die Messwerte des dritten Sensors

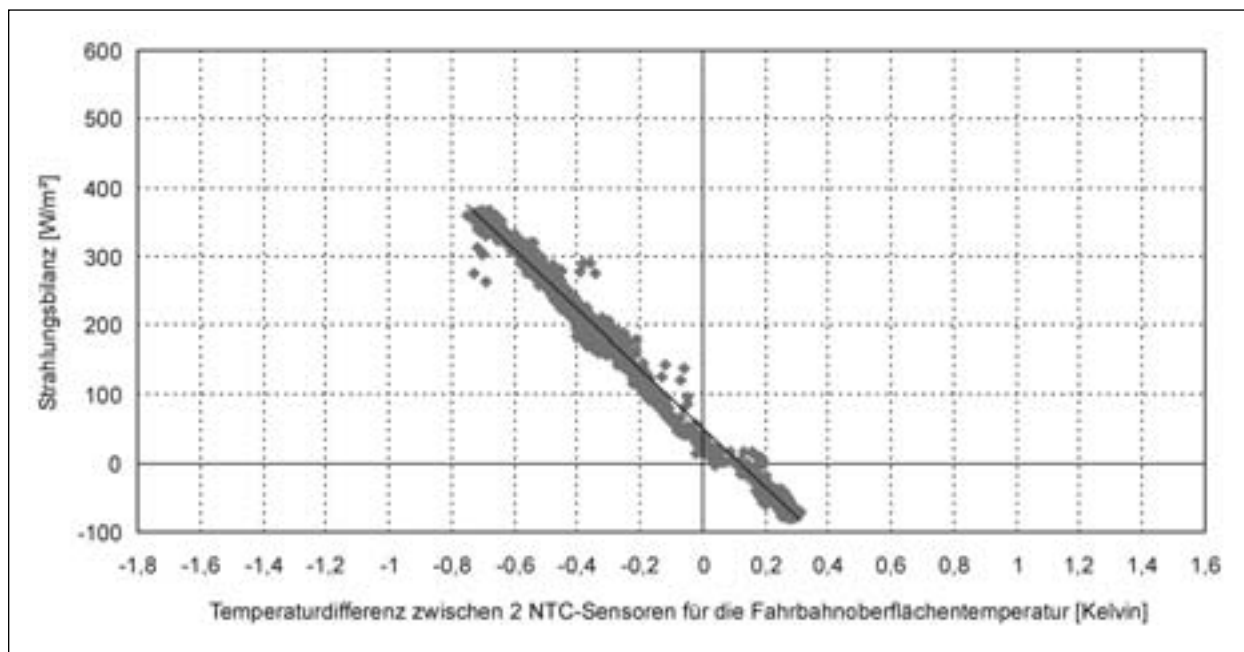


**Bild 20:** Korrelation zwischen der Differenz von 2 Pt-100 in Glas für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Sensor 1 – Sensor 2) und der Strahlungsbilanz (2.561 Werte)

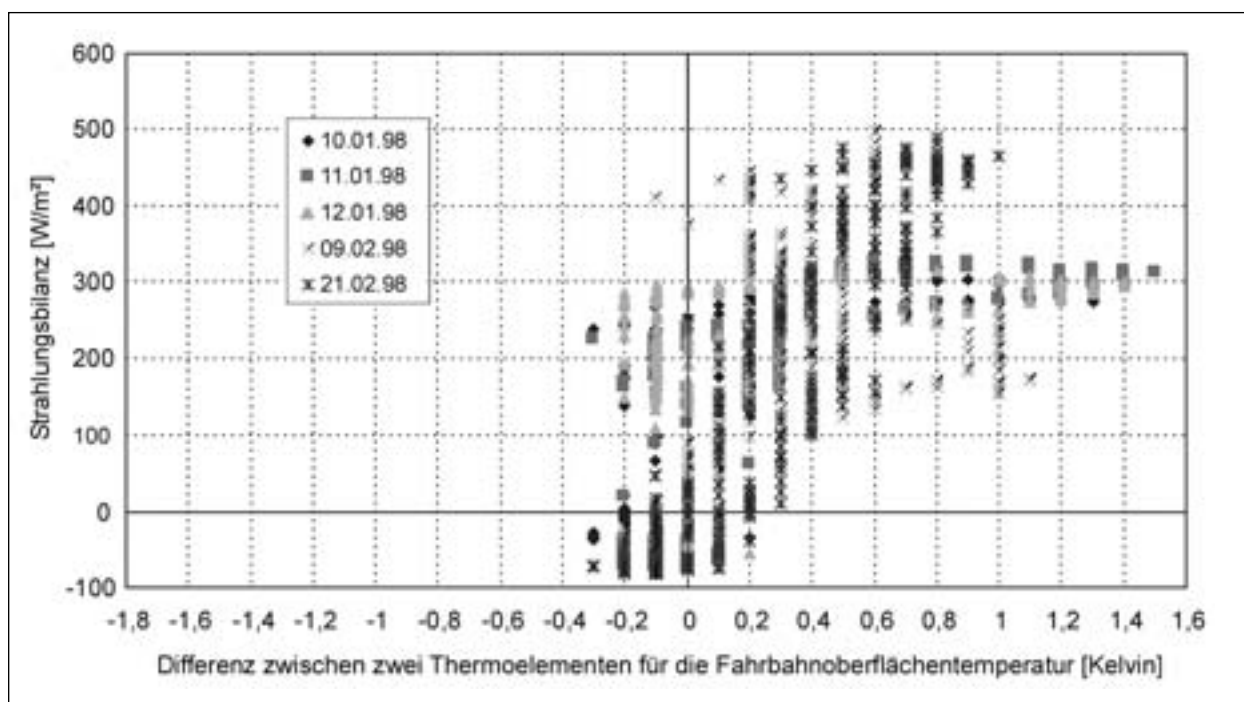
weniger anstiegen als die der beiden anderen Sensoren, blieb er nachts über deren Werten. Bild 21 zeigt die Abhängigkeit der Differenz zur Strahlungsbilanz. Da die Abweichung sehr linear ist, werden wesentliche andere Einflüsse ausgeschlossen.

#### 6.6.3.4 Thermoelemente

Auch bei den Thermoelementen ergaben sich in rund 75 % der betrachteten Fälle Differenzen unter 0,2 Kelvin. Als die beiden Sensoren mit den größten Differenzen untereinander treten hier die Sensoren 1 und 3 in Erscheinung (Bild 22). Bei nächtlicher Ausstrahlung sind die Differenzen grundsätz-



**Bild 21:** Korrelation zwischen der Differenz von 2 NTC-Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Sensor 1 – Sensor 3) und der Strahlungsbilanz (2.835 Werte von 3 verschiedenen Tagen)



**Bild 22:** Korrelation zwischen der Differenz von 2 Thermoelementen für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Sensor 1 – Sensor 3) und der Strahlungsbilanz (2.462 Werte)

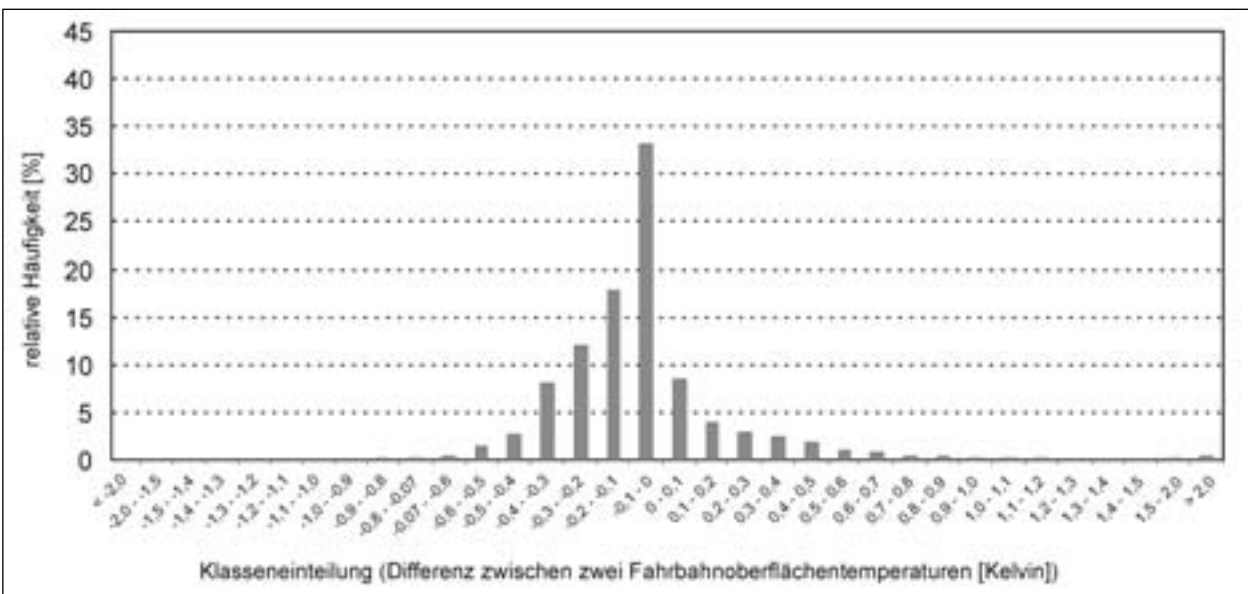
lich gering. Die größten Differenzen in den Zeiträumen mit Globalstrahlung treten immer dann auf, wenn die Globalstrahlung schnell ansteigt. Das geschieht in der Regel in den Vormittagsstunden. Deshalb kommt es nicht bei den höchsten Strahlungswerten zu den größten Differenzen zwischen den Thermoelementen, sondern bei Strahlungswerten um rund  $300 \text{ W/m}^2$ . Bei abfallender Globalstrahlung sind die Differenzen dann wieder vergleichsweise gering.

**6.6.4 Vergleich der eingebauten Sensoren verschiedener Bauarten**

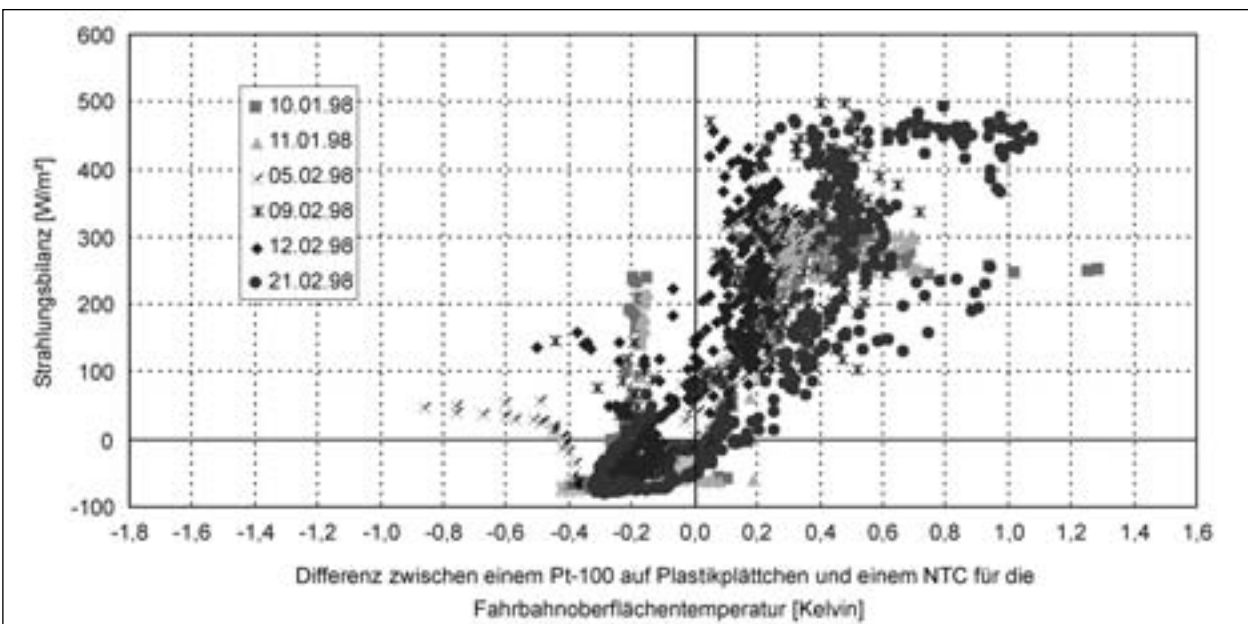
**6.6.4.1 Vergleich zwischen Pt-100 auf Plastikplättchen und NTC**

Zwischen den gewählten Sensoren beider Bauarten treten positive und negative Differenzen  $> 0,3$  Kelvin in etwa ähnlichem Umfang auf (Bild 23), wobei wiederum die größeren Differenzen ( $> 1$ ) fast ausschließlich positiv sind, d. h., der Pt-100 zeigt höhere Werte an.

Bei Betrachtung der Strahlungsabhängigkeit (Bild 24) wird deutlich, dass die überwiegenden positi-



**Bild 23:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem Pt-100 auf Plastikplättchen und einem NTC (43.304 Fälle)



**Bild 24:** Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Pt-100 auf Plastikplättchen und NTC) und der Strahlungsbilanz

ven Differenzen in den Zeiten mit Globalstrahlung entstehen. Umgekehrt treten die negativen Differenzen hauptsächlich in den Zeiten ohne Globalstrahlung auf.

Die Differenz zwischen den Messwerten beider Sensoren steigt allgemein mit der Zunahme der Globalstrahlung, allerdings ist die Zunahme an den verschiedenen Tagen unterschiedlich. Als ein auffälliger Grund ist dafür der Verlauf der Globalstrahlung erkennbar. Der 12.2. mit dem geringsten Anstieg der Differenzen war ein Tag mit oft und schnell wechselnder Bewölkung, bei der nur kurzzeitige hohe Strahlungsspitzen gemessen wurden. Ähnlich, aber weniger ausgeprägt, verlief der 9.2.

Der 5.2. und der 21.2. waren zwei Tage, an denen die Globalstrahlung bei fast ständig wolkenlosem Himmel recht gleichmäßig verlief. Am 5.2. waren die Differenzen bei gleichen Werten der Globalstrahlung allerdings wesentlich geringer als am 21.2. Das wird darauf zurückgeführt, dass am 5.2. ein vergleichsweise höheres Temperaturgefälle zwischen der Luft- und der Fahrbahnoberflächentemperatur bestand als am 21.2. Dadurch wurde ein größerer Teil der durch Globalstrahlung an die Fahrbahnoberfläche zugeführten Wärme an die darüberliegende Luft abgegeben und die Wärmeleitung in die Fahrbahndecke geringer.

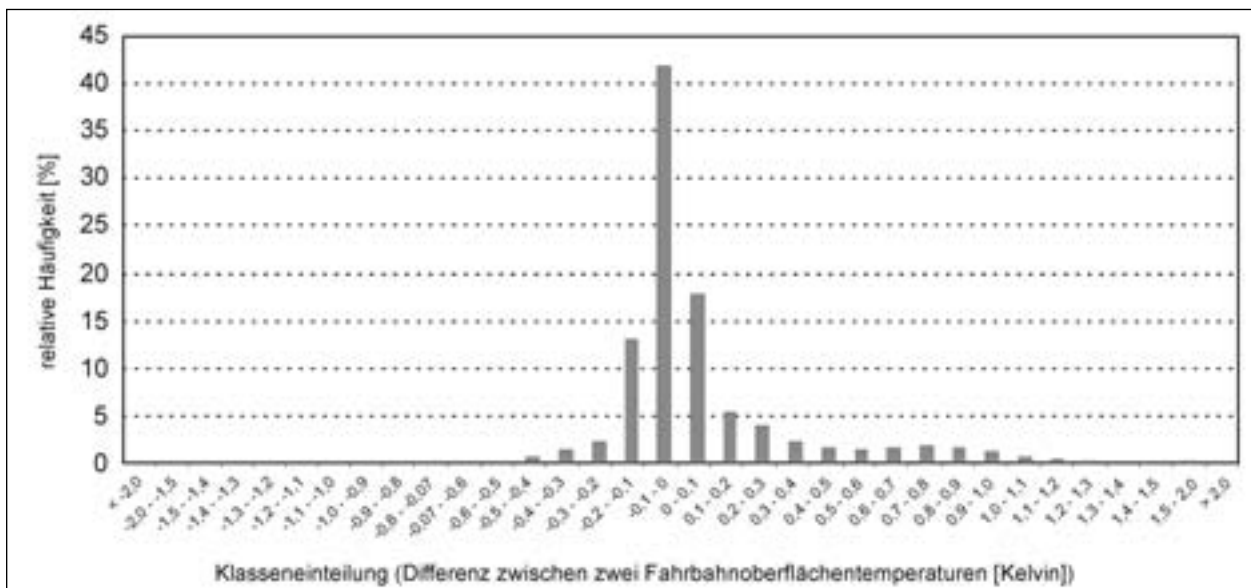
Die hohen negativen Differenzen am 5.2. bei einer vorhandenen Globalstrahlung sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine kurzzeitige teilweise Beschattung des Messfeldes zurückzuführen.

#### 6.6.4.2 Vergleich zwischen Pt-100 auf Plastikplättchen und Pt-100 in Glas

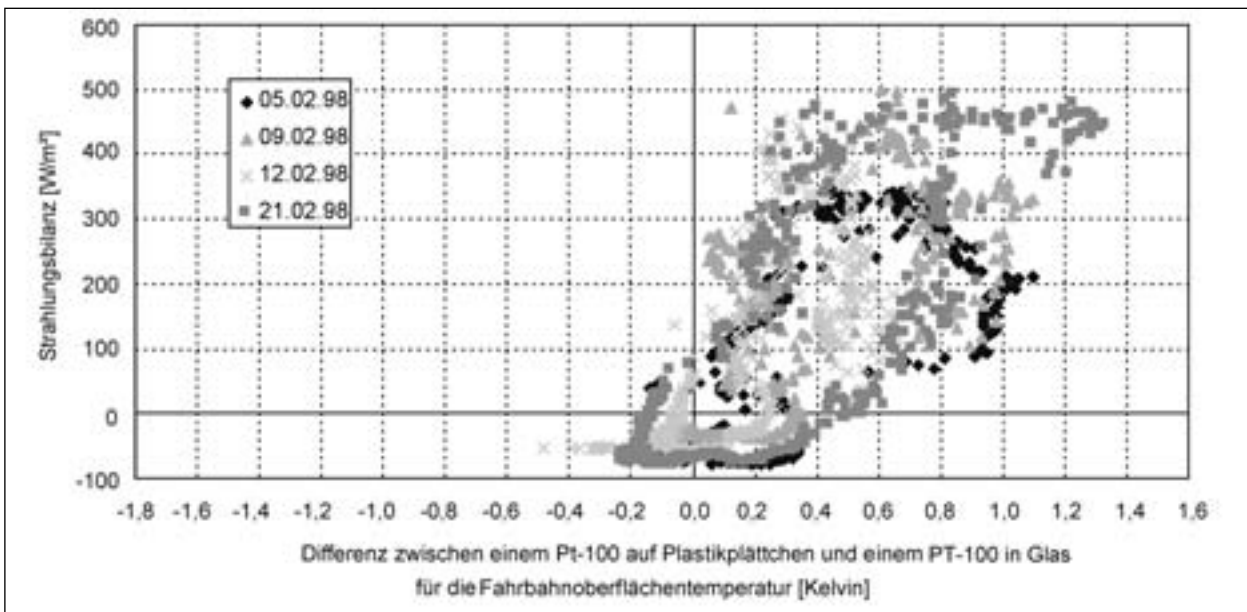
Hohe Abweichungen ( $> 0,5$  Kelvin) sind im Vergleich zwischen beiden Bauarten positiv, d. h., die Messwerte des Pt-100 auf dem Plastikplättchen liegen über den Messwerten des Pt-100 in Glas (Bild 25).

Grundsätzlich gilt auch zwischen diesen beiden Sensorarten: Je höher die Globalstrahlung, umso höher sind die maximalen Differenzen an einem Tag. Wesentliche Unterschiede im Vergleich zum Kapitel 7.4.1 gibt es allerdings in Bezug zum Verlauf der Globalstrahlung. Beim Anstieg der vormittäglichen Globalstrahlung blieben die Messwerte beider Pt-100 dicht beieinander. Dagegen drifteten sie dann in der Mittagszeit trotz annähernd gleich bleibender Globalstrahlung am weitesten auseinander (Bild 26).

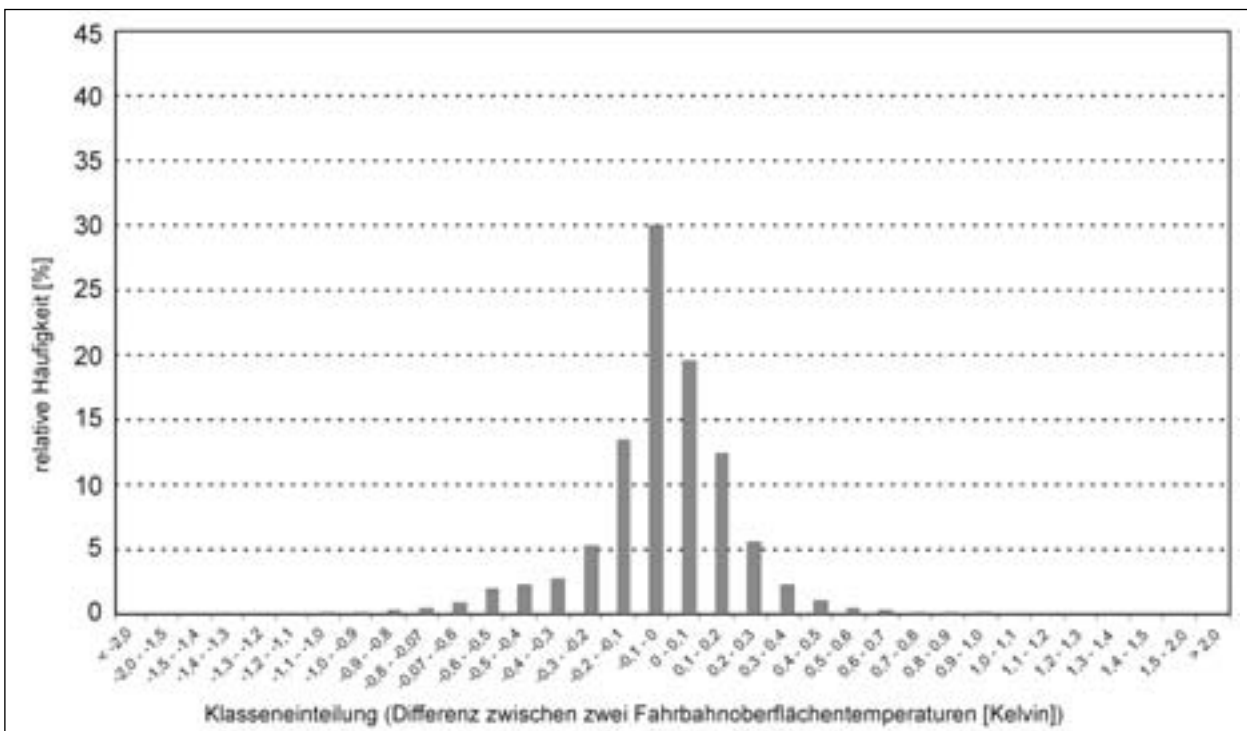
Die Messwerte des Pt-100 in Glas steigen bei einem geringeren Anstieg, aber hohen Wert der Globalstrahlung langsamer als die Messwerte des Pt-100 auf dem Plastikplättchen. In der Zeit der abfallenden Globalstrahlung glichen sich die Messwerte beider Sensoren nur sehr langsam an. Die Angleichung lief bis in die Zeiträume hinein, bei denen keine Globalstrahlung mehr auftrat, sodass in den Abendstunden noch Differenzen über  $0,4$  Kelvin möglich waren.



**Bild 25:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem Pt-100 auf einem Plastikplättchen und einem Pt-100 in Glas (36.381 Werte)



**Bild 26:** Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Pt-100 auf Plastikplättchen und Pt-100 in Glas) und der Strahlungsbilanz

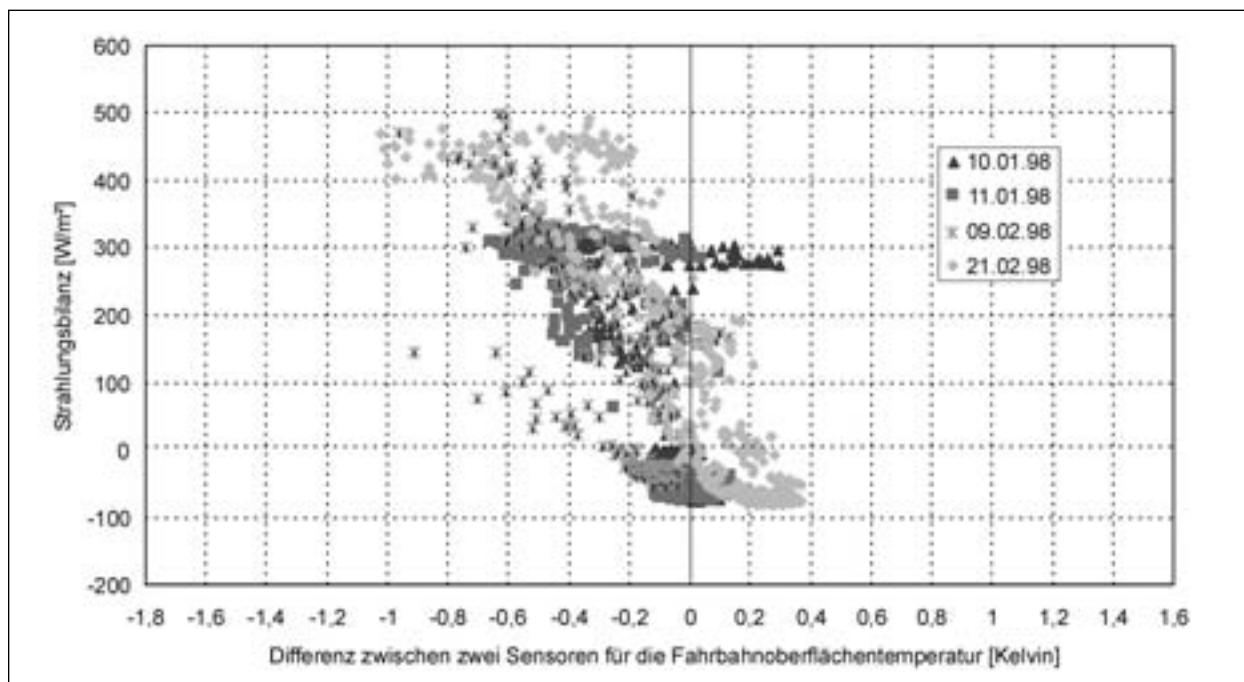


**Bild 27:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem Pt-100 auf einem Plastikplättchen und einem Thermoelement (30.765 Werte)

#### 6.6.4.3 Vergleich zwischen Pt-100 auf Plastikplättchen und Thermoelement

Differenzen  $> 0,4$  Kelvin zwischen den gewählten Sensoren dieser beiden Baugruppen sind in der überwiegenden Mehrzahl negativ. D. h., das Thermoelement zeigt häufiger die höhere Temperatur an (Bild 27).

In den Zeiten mit negativer Strahlungsbilanz ergeben sich im Bild 28 je Tag verschiedene Punktwolken. Die Differenzen sind mit Zahlenwerten bis  $0,4$  Kelvin allgemein gering. Die Höhe der Differenz hängt einerseits von der Höhe der langwelligen Ausstrahlung ab, wie es sich aus dem Vergleich zwischen den Werten vom 9. und 21. Februar ableiten lässt.



**Bild 28:** Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Pt-100 auf Plastikplättchen und Thermoelement) und der Strahlungsbilanz

Dagegen gibt es auch bei etwa gleichen Ausstrahlungswerten Unterschiede, die sich mit den verschiedenen erreichten Differenzen der Fahrbahnoberflächentemperatur tagsüber erklären lassen. Je höher diese Temperaturen infolge der höheren Globalstrahlung sind, mit umso größeren Differenzen infolge unterschiedlichen Wärmeaustausches der Sensoren mit der Fahrbahnkonstruktion ist zu rechnen. Das zeigt beispielsweise der Vergleich zwischen dem 11. Januar und dem 21. Februar.

Tagsüber sind die Unterschiede zwischen den Messwerten beider Sensoren bei steigender oder fallender Globalstrahlung geringer als im Kapitel 7.4.2. In diesem Fall sind bei steigender Globalstrahlung die Differenzen etwas höher als bei fallender Globalstrahlung.

Die auffälligen positiven Differenzen bei hohen Strahlungswerten am 10.1.98 traten bei einem kurzzeitigen einmalig hohen Abfall der Globalstrahlung auf, der möglicherweise durch eine ungleichmäßige Beschattung des Messfeldes entstanden ist.

#### 6.6.4.4 Vergleich zwischen NTC und Pt-100 in Glas

Die Verteilung der Differenzen nach dem Histogramm (Bild 29) zeigen, dass die hohen Differenzen

> 0,4 Kelvin einseitig auftreten. In den meisten Fällen zeigt der NTC die höheren Temperaturen an.

Bei Betrachtung der Abhängigkeit der Messwertdifferenzen von Strahlungsbilanz bilden die Differenzen eines Tages im x-y-Diagramm mehr oder weniger klar umzeichnete ebene Flächen (Bild 30), d. h., dass sie nicht nur von der Höhe der Globalstrahlung abhängen, sondern auch von deren Verlauf. Beim Ansteigen sind an den meisten betrachteten Tagen nur geringe Differenzen zu erkennen. Die hohen negativen Differenzen am 21.2.98 traten in den frühen Vormittagsstunden auf und werden daher auf eine teilweise Beschattung des Messfeldes zurückgeführt.

In den Nachmittagsstunden bei fallender Globalstrahlung traten die höchsten Differenzen auf. Die Differenzen blieben während des Absinkens der Globalstrahlung nahezu bestehen. Dabei sind die Messwerte des NTC-Sensors höher als die Messwerte des Pt-100 in Glas. Ein langsames Angleichen der Messwerte erfolgte erst in den Zeiten ohne Globalstrahlung.

In den Nachtstunden bestanden zwischen den Messwerten beider Sensoren auch bei hohen Ausstrahlungswerten nur geringe Unterschiede, die im Rahmen der zulässigen Toleranzen blieben.

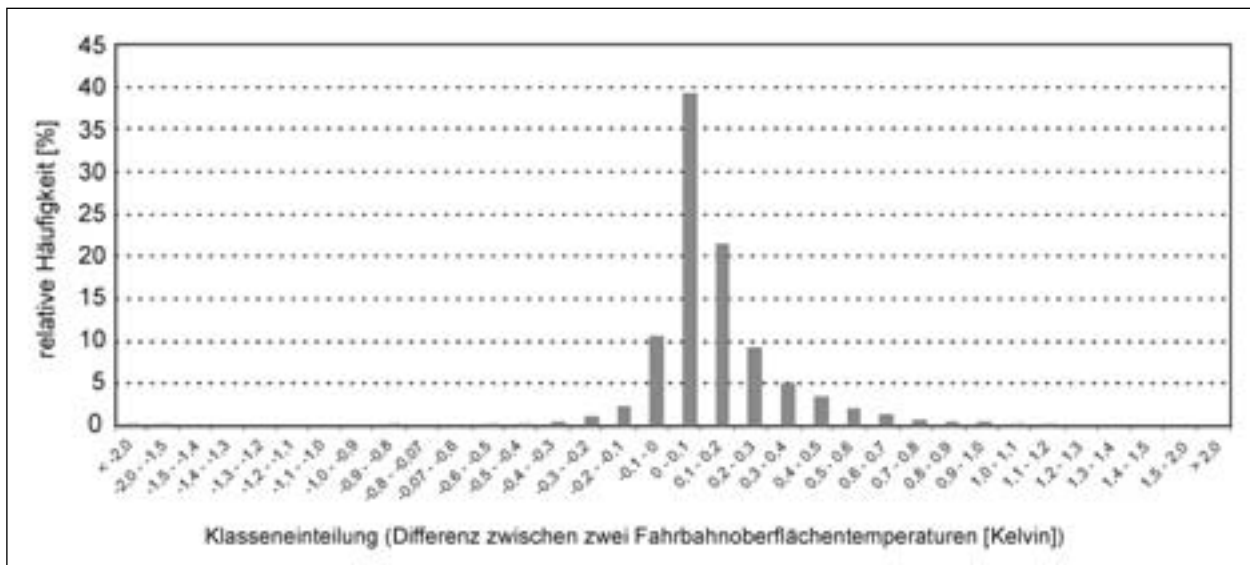


Bild 29: Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem NTC und einem Pt-100 in Glas (36.309 Werte)

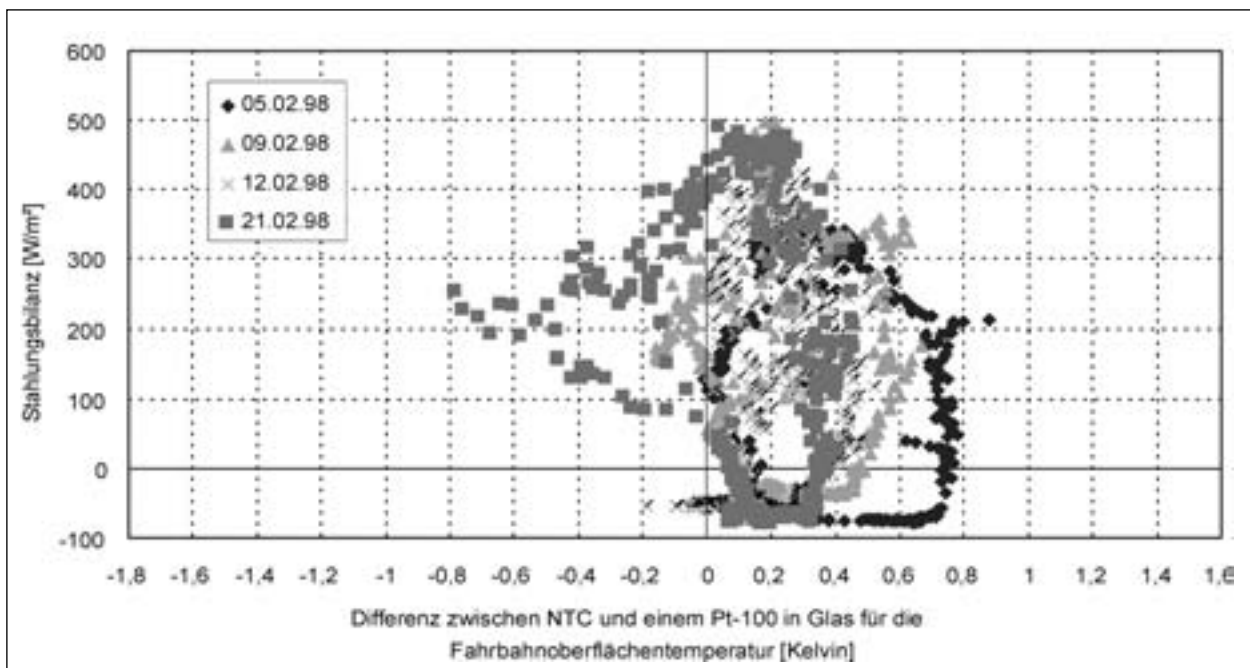


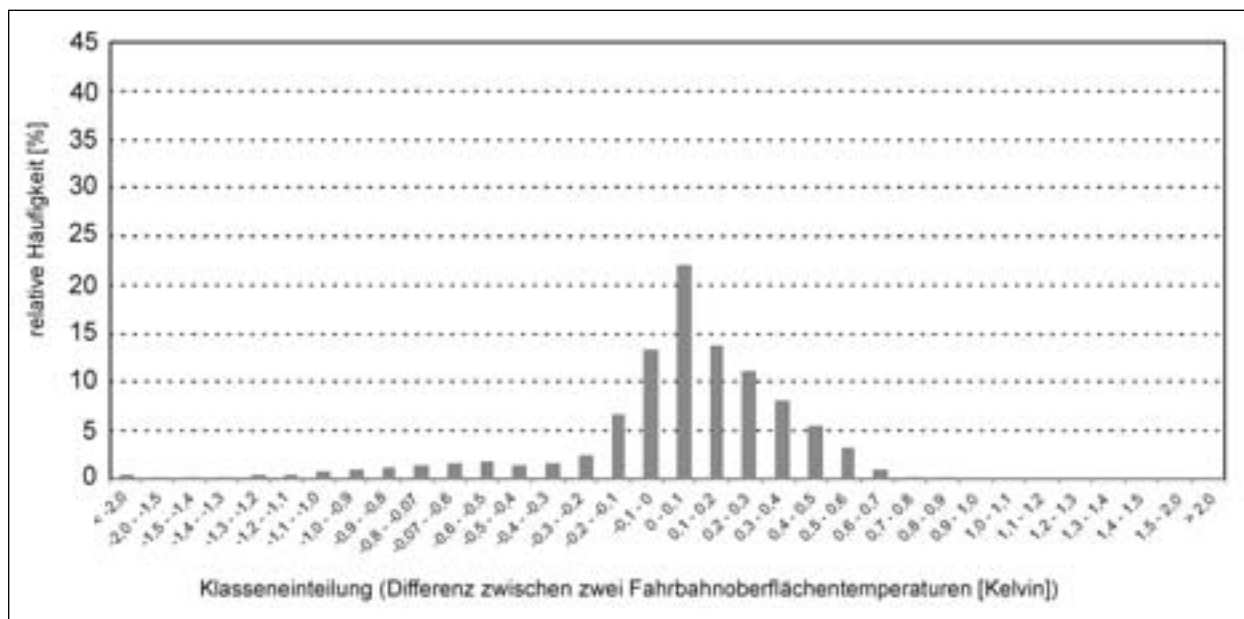
Bild 30: Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (NTC und Pt-100 in Glas) und der Strahlungsbilanz

#### 6.6.4.5 Vergleich zwischen NTC und Thermoelement

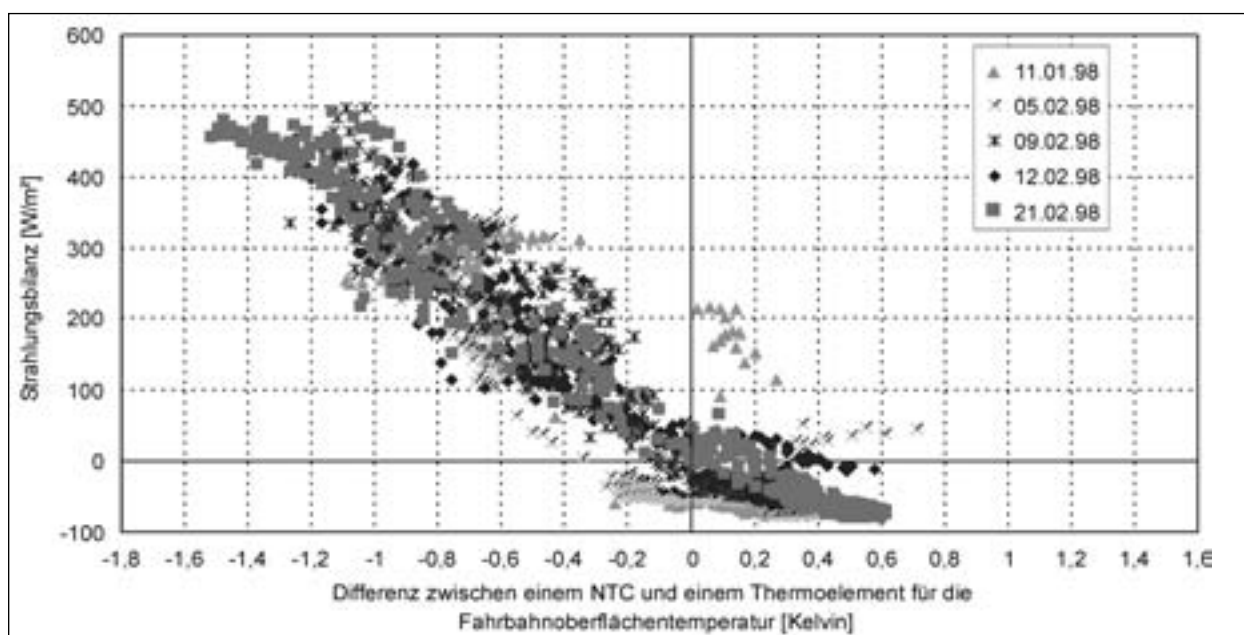
Bei hohen Differenzen ( $> 0,6$  Kelvin) zeigte das Thermoelement die höheren Messwerte an, während dagegen der NTC-Sensor bei den Differenzen bis  $0,6$  Kelvin in einer wesentlich größeren Zahl der Fälle die höheren Messwerte angab (Bild 31).

Bild 32 zeigt eine recht lineare Abhängigkeit der Differenzhöhe vom Wert der Strahlungsbilanz. Bei

hoher Globalstrahlung steigen die Messwerte des Thermoelements wesentlich über die Messwerte des NTC. Dagegen fallen die Messwerte des Thermoelements bei steigender Ausstrahlung unter die Messwerte des NTC. Allerdings erreichen die Differenzen in diesem Fall nicht die Höhe wie in den Zeiträumen mit Globalstrahlung.



**Bild 31:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem NTC und einem Thermoelement (36.313 Werte)



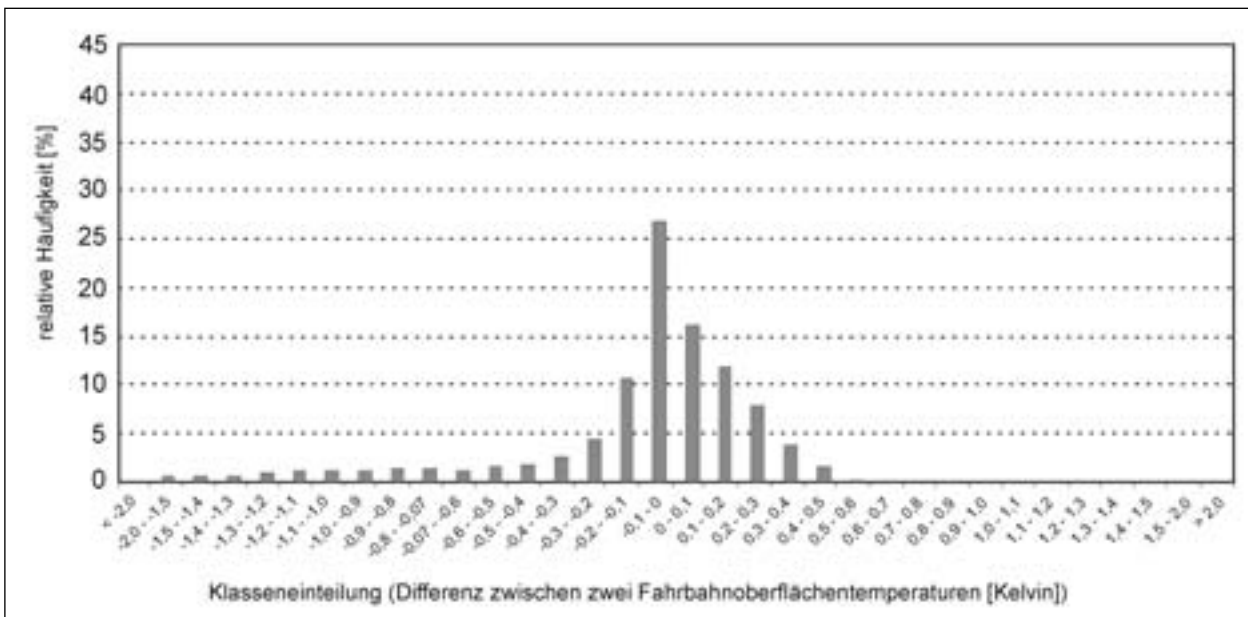
**Bild 32:** Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbohnoberflächentemperatur (NTC und Thermoelement) und der Strahlungsblanz

#### 6.6.4.6 Vergleich zwischen Pt-100 in Glas und Thermoelement

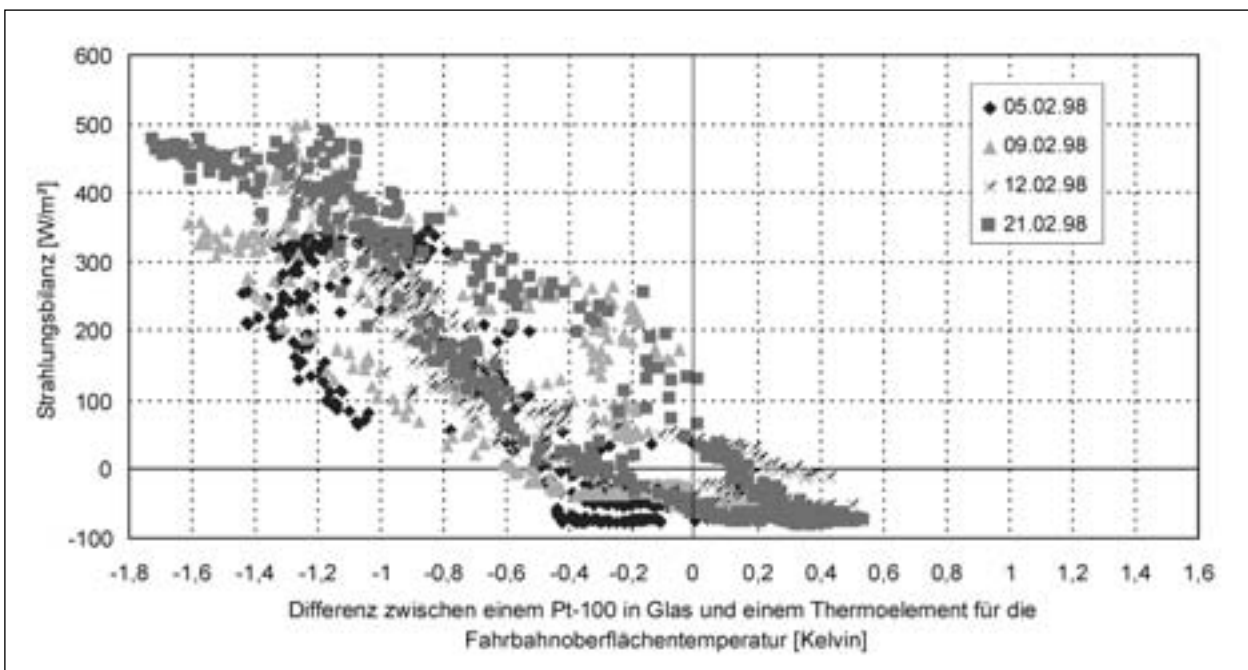
Dieses Sensorenpaar zeigt bei der Differenzbetrachtung ein ähnliches Verhalten wie zwischen NTC und Thermoelement (nach Kapitel 6.6.4.5). Bei hohen Differenzen ( $> 0,6$  Kelvin) gibt auch in diesem Vergleich das Thermoelement bei hoher Globalstrahlung die höheren Messwerte an. In den meisten Fällen bis 0,6 Kelvin Differenz lagen die Messwerte des Pt-100 in Glas über den Messwerten des Thermoelementes (Bild 33).

Im Gegensatz zum vorherigen Abschnitt gibt es Unterschiede zwischen fallender und steigender Globalstrahlung. Bei steigender Globalstrahlung waren die Differenzen niedriger als bei fallender Globalstrahlung. Der Pt-100 in Glas gab dabei die niedrigeren Messwerte an als das Thermoelement. In den Zeiträumen ohne Globalstrahlung waren die Messwerte der Pt-100 in Glas höher als die Messwerte des Thermoelementes (Bild 34).





**Bild 33:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem NTC und einem Thermoelement (36.313 Werte)



**Bild 34:** Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Pt-100 in Glas und Thermoelement) und der Strahlungsbilanz

## 6.7 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Alle auf dem Messfeld eingebauten Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur gaben in strahlungsarmen Zeiträumen (Strahlungsbilanz nahe  $0 \text{ W/m}^2$ ) und unter Schnee Messwerte an, deren Differenzen unter der bisher vorgegebenen zulässigen Toleranz für Glättemeldealanlagen [2] von  $\pm 0,2$  Kelvin blieben. Differenzen über  $0,5$  Kelvin traten dagegen fast ausschließlich tagsüber in den

Zeiträumen ohne Bewölkung oder mit nur geringem Wolkenbedeckungsgrad auf. Die intensive Globalstrahlung ist der Wärmestrom, der das thermische Gleichgewicht zwischen einem Sensor und der Fahrbahnoberfläche im größten Umfang stört. Dabei entstanden Messwertdifferenzen bis rund  $2$  Kelvin. Der nach dem Rückgang der Globalstrahlung relativ lang andauernde thermodynamische Ausgleich führte häufig dazu, dass auch in strahlungsarmen Zeiten noch Differenzen über  $0,2$  Kelvin vorkamen. Bei einigen Vergleichen ließen sich

zwischen den Sensoren bei einer hohen nächtlichen langwelligen Ausstrahlung Differenzen bis etwa 0,6 Kelvin nachweisen.

Differenzen traten nicht nur zwischen Sensoren unterschiedlicher Bauart auf, sondern auch in teilweise nahezu gleicher Höhe zwischen Sensoren gleicher Bauart. Daraus ist zu schlussfolgern, dass die Lage eines Sensors zur idealen Fahrbahnoberfläche ein entscheidender Faktor für die Genauigkeit ist. Die unterschiedlichen Lagen können folgende Ursachen haben:

- Der Einbau der Sensoren ist trotz aller Sorgfalt mit Toleranzen behaftet. Zu nennen sind die unterschiedlichen Positionen des Sensors im Makroprofil an der Oberfläche und/oder die zum Schutz eingebaute unterschiedliche Überdeckung mit Bitumenmörtel. Die Lagetoleranzen werden unter 2 mm geschätzt.
- Beim Einsetzen der Sensoren können Luftporen entstanden sein. Dadurch können Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit und im Wärmeübergangsverhalten um bzw. zu den gebauten Sensoren entstehen. Ihr Einfluss auf die Messwertdifferenzen wird, sofern sie überhaupt aufgetreten sind, nur relativ gering eingeschätzt.
- Unterschiede kann es durch Fertigungstoleranzen der eingesetzten Sensoren selber geben, die auch verschiedene Abstände zur Fahrbahnoberfläche ausmachen können.

Die Anordnungen der Platinwiderstände, der eigentlichen Messeinrichtungen der Pt-100, auf bzw. in den Trägermaterialien sind mit dem Auge aufgrund ihrer geringen Größe nicht zu kontrollieren. Bei beiden gewählten Bauarten erscheinen unterschiedliche Abstände zur Fahrbahnoberfläche aufgrund von Fertigungstoleranzen von 1 bis 1,5 mm möglich.

Die NTC-Sensoren waren nur mit einer geringen Schutzschicht überzogen. Rein subjektiv bewertet, ließen sie sich von den vier Bauarten am nächsten und gleichmäßigsten an der Fahrbahnoberfläche anbringen. Allerdings hat sich die Bauart nicht bewährt, da die Mehrzahl dieser Sensoren nach wenigen Wochen Einsatzzeit ausgefallen ist.

Bei den Thermoelementen kann die Lage der Lötstelle des Thermopaars in der Schutzhülle, die für die Messung der Temperatur verantwortlich ist, nicht beurteilt werden. Außerdem ist

nicht bekannt, ob die Hülle mit der Lötstelle fest verbunden ist oder sich zwischen beiden noch ein kleiner Luftraum befinden kann.

Eine nachträgliche Beurteilung der aufgeführten möglichen Toleranzen bei der Lage der Sensoren mit einem zerstörungsfreien Messverfahren war nicht möglich.

Die Differenzen zwischen Sensoren gleicher Bauart führen zu dem Problem, dass die Sensoren bezüglich der unterschiedlichen Bauart nicht umfassend bewertet werden können. Unter der Berücksichtigung der Herstellungs- und Einbautoleranzen sind folgende Wertungen und Schlussfolgerungen möglich:

- Bei fast allen Vergleichen ist auffällig, dass die Messwerte der Thermoelemente im Vergleich zu den anderen Sensorbauarten und im Vergleich untereinander immer zu den höchsten Differenzen führten. Die Differenzen zeigen dabei eine hohe lineare Abhängigkeit von der Höhe der Strahlungsbilanz.
- Eine vergleichsweise geringe lineare Abhängigkeit der Differenzen zur Strahlungsbilanz ergaben dagegen die Vergleiche der Pt-100 in Glas mit anderen Sensoren. Hier gibt es Unterschiede bei den Differenzen unter steigender und fallender Globalstrahlung, die auf die thermodynamischen Materialeigenschaften der Sensorummantelungen zurückgeführt werden. Die Metallhülle des Thermoelements besitzt z. B. eine vergleichsweise höhere Wärmeleitfähigkeit als das Glas des Pt-100. Gegenüber den beiden anderen Bauarten werden die Materialeigenschaften der Schutzummantelung des Pt-100 in Glas bezüglich der Wärmeleitung als ähnlich angesehen. Dagegen wird die Dicke des Glases um den Pt-100 mindestens 10-mal höher als die Dicke der Materialien um den NTC oder den Pt-100 auf dem Plastikplättchen eingeschätzt.
- Ebenso ergeben sich allein durch die Bauart Unterschiede bezüglich des Abstandes der eigentlichen Sensoren (Widerstandsdraht oder Lötstelle) zur Fahrbahnoberfläche. Die Trägermaterialien, die Feuchteschutzvorrichtungen und die Anbindungen der Anschlussleitungen besonders der Pt-100 müssen im Ergebnis der Untersuchungen als ungünstig bewertet werden. Sie sind nicht so geschaffen, dass sie parallel und damit nah genug an die Fahrbahnoberfläche herangeführt werden können.

- Zusammenfassend zeigen die Messwerte der verschiedenen eingesetzten Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur trotz hoher Sorgfalt beim Einbau im Vergleich noch erhebliche Differenzen, die auch weiterhin eine erhebliche Messungenauigkeit in Bezug zu den eingangs aufgestellten Anforderungen darstellen. In dieser Höhe wurden sie vor den Untersuchungen nicht erwartet. Im Vergleich zu den hohen Differenzen bei den vorangegangenen Untersuchungen [6], [14] wurde eine Halbierung der Differenzen zwischen Messwerten von verschiedenen Sensoren erreicht.

## 7 Messfeldversuche mit eingebauten Sensoren im Winter 1999/2000

### 7.1 Auswahl und Einbau neuer Sensoren

Ausgehend von den Ergebnissen der Untersuchungen im Winter 1997/98 erschienen noch Verbesserungen der Sensorbauarten möglich. Bei den Widerstandssensoren kann vor allem durch eine andere Lage des Messdrahtes auf dem Trägermaterial und eine bessere Führung der Anschlussleitungen eine nähere Lage zur Fahrbahnoberfläche erreicht werden. Auf Ummantelungen und Trägermaterialien der eigentlichen Messeinrichtungen, die nicht den thermodynamischen Eigenschaften der Fahrbahndecke entsprechen, muss bei den geforderten Genauigkeiten weitgehend verzichtet werden. Bei den Thermoelementen gibt es bereits entsprechende Sensoren, die aber für die ersten Versuche noch nicht geliefert werden konnten.

Im Winter 1999/2000 wurden die zwei folgenden Sensorbauarten in einer optimierten Bauart getestet:

- Pt-100 mit einem senkrechten Leitungsanschluss (siehe auch Bild 64) an das Trägerplättchen mit einer Größe ca. 1,5 x 1,5 mm Die ummantelte Anschlussleitung und das Plättchen mit dem Platinwiderstandsdrähtchen sind für den besseren Schutz vor Feuchte mit einem Lack überzogen (Bild 35).
- Thermoelement mit einer Fühlerspitze mit einem Durchmesser von 0,5 mm und 30 mm Länge Der Anschluss zur Ausgleichsleitung besitzt einen Durchmesser von ca. 5 mm (Bild 36).

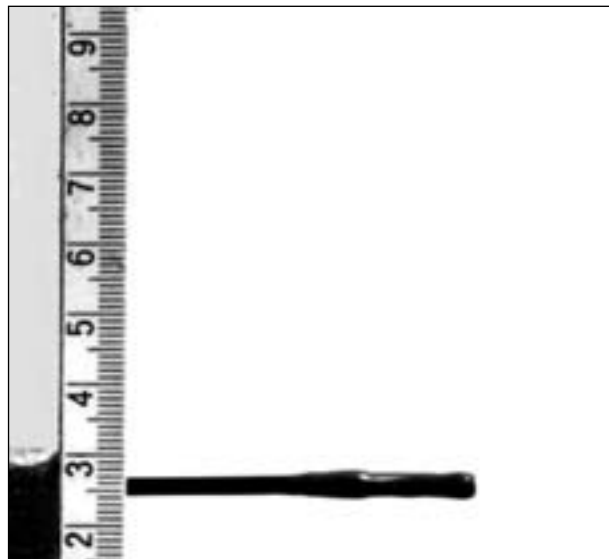


Bild 35: Pt-100 mit einem senkrechten Leitungsanschluss

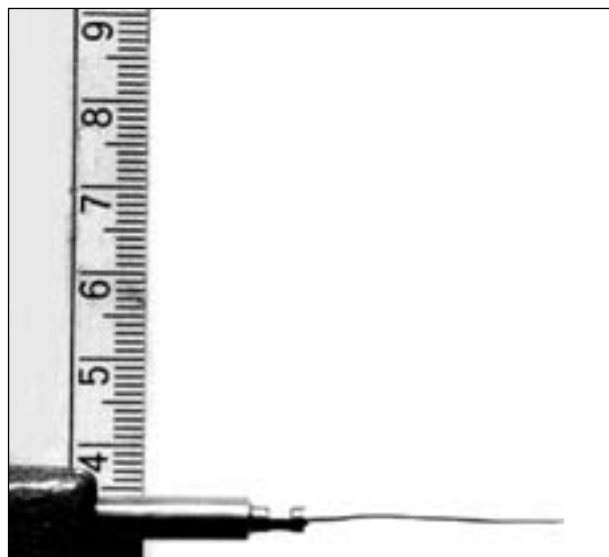


Bild 36: Thermoelement mit Fühlerspitze mit einem Durchmesser von 0,5 mm und 30 mm Länge

Beide Sensorenbauarten wurden im Herbst 1999 in der gleichen Weise wie bei den vorhergehenden Untersuchungen in der Mitte des vorhandenen Messfeldes eingebaut (siehe Bild 10). Die Bohrkern für den Einbau wurden für beide Sensorbauarten unmittelbar nebeneinander gezogen. Es kamen wieder jeweils 3 Sensoren an der Oberfläche (Sensoren 1 bis 3) und je ein Sensor pro Baugruppe in 15, 50 und 100 mm Tiefe zum Einsatz (siehe Bild 12).

Für die Messwerterfassung kamen die vorhandenen Datenlogger zum Einsatz. Dafür wurden die vorher genutzten Thermoelemente und Pt-100-Elemente in der Glasummantelung außer Betrieb genommen. Bei beiden Bauarten waren zu diesem Zeitpunkt noch alle Sensoren voll funktionstüchtig.

Sensor Nr.	Pt-100 auf Plastikplättchen	Thermoelement
1 (FT)	-0,03	-0,4
2 (FT)	-0,11	-0,3
3 (FT)	0,00	0,2
4 (UT 15 mm)	-0,03	-0,4
5 (UT 50 mm)	-0,07	0,0
6 (UT 100 mm)	-0,07	-0,3

**Tab. 2:** Korrekturwerte in °C für die 1999 im Messfeld eingebauten Sensoren infolge der Kalibrierung im Eis-Wasser-Gemisch

Vor dem Einbau fand eine Kalibrierung der Sensoren im Eiswasser statt. Die gelieferten Sensoren wurden um die in Tabelle 2 dargestellten Werte korrigiert. Sie liegen damit innerhalb der geforderten Genauigkeiten.

## 7.2 Messwernerfassung – Witterungsbedingungen

Für die Auswertung werden die Messwerte vom 1. November 1999 bis 31. März 2000 genutzt. Die Messwertaufzeichnung erfolgte im Gegensatz zu den vorhergehenden Untersuchungen diesmal ausschließlich im Zehn-Minuten-Zyklus. Neben den Fahrbahnoberflächentemperaturen der neu eingebauten Sensoren wurden die Messwerte aller Sensoren für die zusätzlichen Parameter, wie im Kapitel 6.1.2 beschrieben, aufgezeichnet. Zusätzlich lieferten noch alle früher eingesetzten Sensoren der Baugruppe mit den Pt-100 auf dem Plastikplättchen und ein NTC-Sensor an der Fahrbahnoberfläche Messwerte.

Im Auswertez Zeitraum fielen 5 der 6 neu eingesetzten Pt-100 zu verschiedenen Zeitpunkten aus, in der zweiten Hälfte des Messzeitraumes auch der NTC. Die Ausfälle erfolgten in den meisten Fällen „schleichend“, d. h., die Messwerte drifteten langsam von den Werten der anderen Sensoren ab. Diese Abweichungen waren anfänglich nur im Vergleich zu den anderen Sensoren erkennbar. Als Ursache werden undichte Isolierungen der Messdrähte vermutet, wodurch eine geringe Feuchte die Messergebnisse beeinflusste. Zeitweise arbeiteten die Sensoren wieder exakt.

Fehlerhafte Ergebnisse wurden eliminiert. Ebenso wurden Datensätze mit erheblichen Differenzen gestrichen, die aufgrund von unterschiedlichen Gegebenheiten auf dem Messfeld entstanden sind. Unterschiedliche Schneebedeckung oder Be-

feuchtung konnten anhand von Messfeldbeobachtungen festgestellt werden. Allerdings fanden die Beobachtungen nicht rund um die Uhr statt, sodass in die Auswertung einbezogene Differenzen zwischen den Messwerten durch ungleiche Bedingungen entstanden sein können. Bei bestimmten Sonnenständen in den frühen Vormittags- oder späten Nachmittagsstunden traten kurzzeitig unterschiedliche Beschattungen auf.

Im Erfassungszeitraum herrschten die verschiedensten Wetterlagen vor. Die meisten Tage (111) waren Frosttage mit Lufttemperaturen teilweise unter 0 °C. An 12 Tagen stieg die Lufttemperatur nicht über 0 °C (Eistage). Die tiefste Lufttemperatur wurde mit -24,6 °C gemessen. Die tiefste gemessene Fahrbahnoberflächentemperatur betrug -13,1 °C. Zu diesem Zeitpunkt hatte die Luft eine Temperatur von -21 °C.

Für den Standort war es ein in Bezug auf die Temperaturen eher durchschnittlicher Winter mit viel Schnee. Über längere Zeiträume war das Messfeld schneebedeckt (davon volle 61 Tage). Eine vollständige Schneebedeckung bewirkt ein hohes thermisches Gleichgewicht auf der gesamten Messfeldfläche. Unter der Schneebedeckung traten deshalb nur sehr geringe Differenzen zwischen allen Sensoren auf. Eine statische Auswertung mit den Zeiten, in denen das Messfeld schneebedeckt war, würde ein deutlich anderes Ergebnis ergeben als eine Auswertung ohne Zeiten mit einer vollständigen Schneebedeckung. Um einen besseren Vergleich zu der vorhergehenden Messperiode zu erhalten, wurden die Tage mit einer 24-stündigen Schneebedeckung in den Statistiken nicht berücksichtigt.

Vereisungen konnten nur im sehr geringen Umfang festgestellt werden. Taustoffe haben auf dem Messfeld nicht gewirkt.

Insgesamt hätten im angegebenen Erfassungszeitraum rund 21.600 Datensätze zur Verfügung stehen müssen. Rund 600 Datensätze lagen durch Ausfälle der Datenerfassungsanlage nicht vor. Durch Eliminierung der Zeiten mit unterschiedlichen Bedingungen auf dem Messfeld und den Tagen mit einer vollständigen Schneebedeckung auf dem Messfeld reduziert sich die Zahl der genutzten Datensätze auf rund 12.200. Die nachfolgend unterschiedlich angegebene Anzahl der Messzeitpunkte zwischen rund 4.500 und 12.200 ergibt sich aus den Ausfällen der Sensoren selber.

Für die nachfolgenden Messwertdarstellungen von einzelnen Tagen wurden nur Tage mit hohen Differenzen zwischen den Sensoren genutzt.

### 7.3 Auswertung der Messergebnisse

#### 7.3.1 Allgemeine Ergebnisübersicht

Alle Sensoren zeigten wieder bei sehr strahlungsarmen und gleich bleibenden Witterungsbedingungen nahezu gleiche Temperaturen an. Unter einer geschlossenen Schneedecke wurden Temperaturen von 0 °C mit einer Differenz < 0,2 Kelvin zwischen allen Sensoren angegeben. Somit können die vorgenommenen Kalibrierungen als richtig angesehen werden. Die vorhandenen Sensoren aus der ersten Untersuchungsreihe funktionierten auch nach 3 Jahren Betrieb noch exakt.

Die höchsten Differenzen traten wieder bei intensiver Globalstrahlung bzw. vor allem bei wechselnder Bewölkung auf. In wenigen Fällen entstanden auch bei anderen erheblich wechselnden Parametern größere Differenzen. Beispiele werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

Im Bild 37 sind die relativen Häufigkeiten der Differenzen zwischen allen Sensoren und der Differenzen zwischen den Sensoren einer Bauart aufgeführt. Die Anzahl der zugrunde liegenden Datensätze

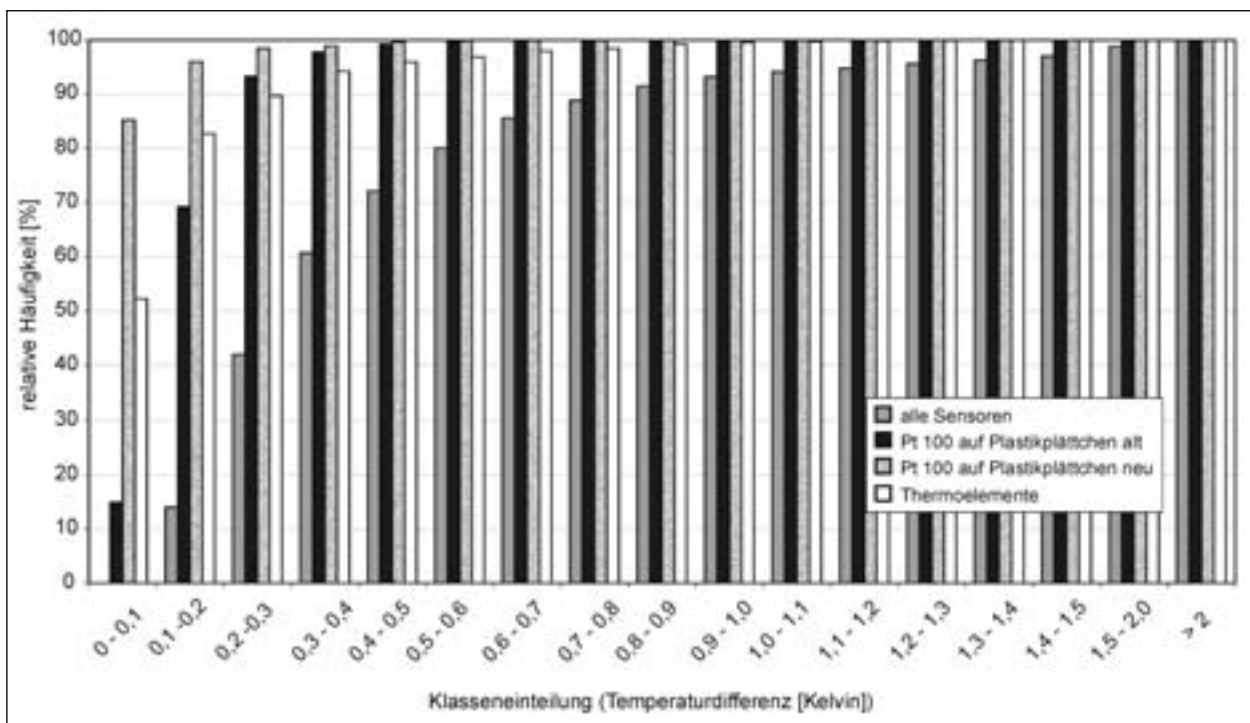
richtet sich nach den Ausfallzeitpunkten von Sensoren und nicht berücksichtigter Zeiten ungleicher Messbedingungen. Die Differenzbildung zwischen allen Sensoren erfolgte bis zum Ausfallzeitpunkt des NTC. Die Histogrammreihe zu den Pt-100 mit senkrechtem Kabelanschluss enthält nach dem ersten Ausfall eines Sensors Differenzbildungen von nur noch zwei Sensoren.

Die Thermoelemente erreichen innerhalb der Baugruppe geringere Übereinstimmungen als die neuen Pt-100 mit dem senkrechten Kabelanschluss untereinander. Bei einer überwiegenden Anzahl der Datensätze ergibt sich bei den Thermoelementen im Vergleich zu den alten Pt-100 mit dem parallelen Kabelanschluss eine bessere Übereinstimmung, allerdings differiert eine Anzahl von Datensätzen auch vergleichsweise höher. Der ermittelte Höchstwert der Differenzen zwischen allen Sensoren beträgt 3,15 Kelvin.

#### 7.3.2 Vergleich von Sensoren gleicher Bauart

##### 7.3.2.1 Pt-100 auf Plastikplättchen mit parallelem Kabelanschluss

Im Vergleich zum Winter 1997/98 stimmten die Pt-100 mit dem zum Plättchen parallelen Kabelanschluss im Winter 1999/2000 untereinander etwas besser überein (Bild 38). Drei Jahre Einsatzzeit



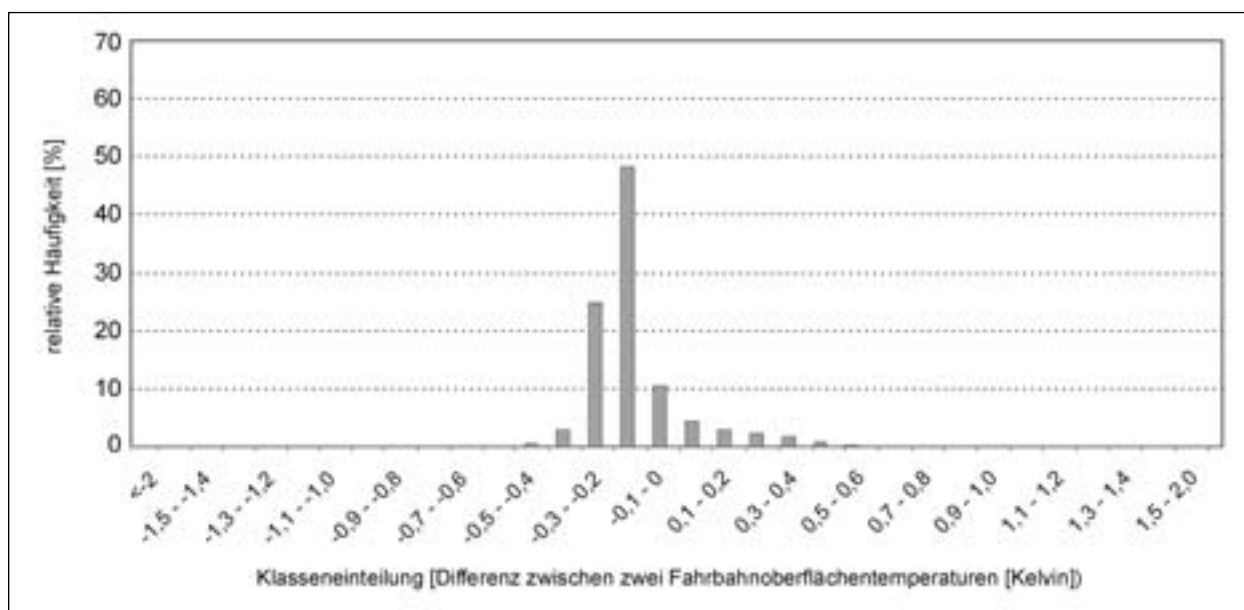
**Bild 37:** Relative Häufigkeiten (kumulativ) der Differenzen zwischen den Sensoren gleicher Bauart bzw. zwischen allen Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (im Winter 1999/2000, zwischen ca. 4.500 und 12.200 Messzeitpunkte)

fürten nicht zu höheren Differenzen, die u. a. durch eine geringe Änderung der Oberflächenstruktur des Messfeldes oder Undichtheiten an den Sensoren entstehen könnten.

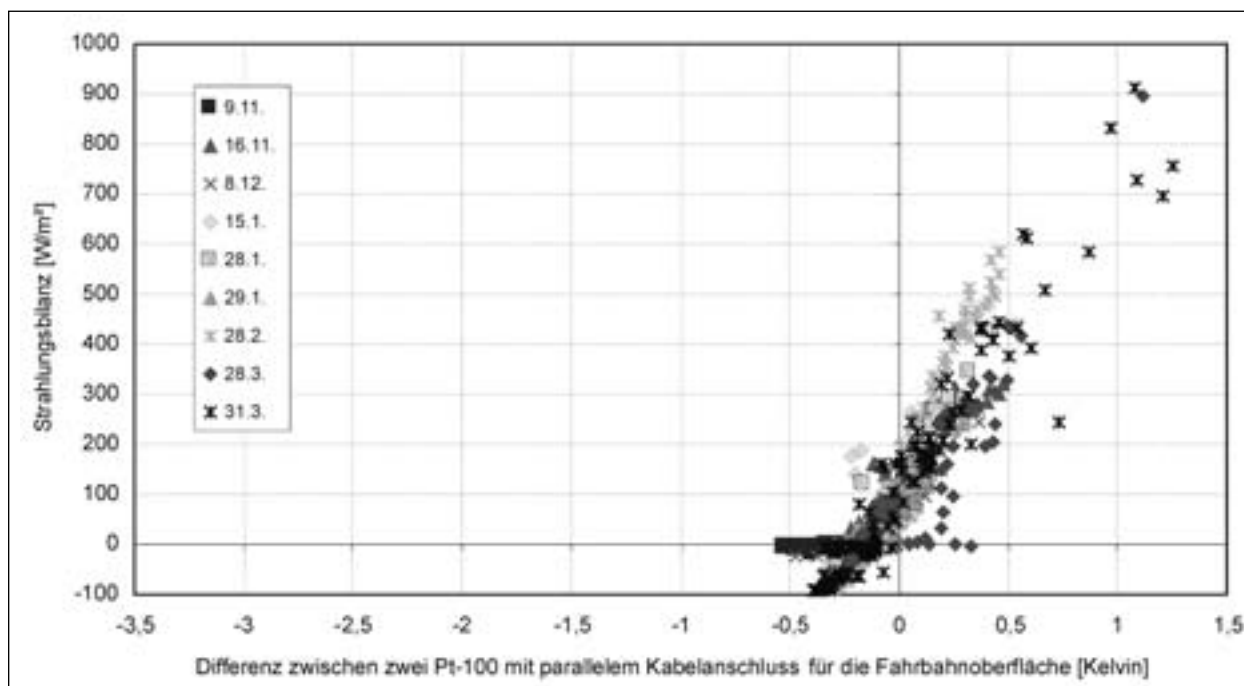
Auch in diesem Auswertez Zeitraum lagen die Sensoren 2 und 3 im überwiegenden Teil der Fälle am weitesten auseinander. Zwischen den Differenzen der Messwerte beider Sensoren und der Strahlungsbilanz bestand bei einem relativ gleichmäßi-

gen Anstieg und Abfall der Strahlungsbilanz eine recht eindeutige Korrelation (Bild 39).

Die negativen Differenzen am 9.11.1999 traten in den frühen Morgen- und frühen Abendstunden bei einem schnellen Temperaturabfall (ca. 3 Kelvin/h) und teilweise intensivem Niederschlag auf. Mit Werten zwischen  $-20$  und  $0 \text{ W/m}^2$  schwankte die Strahlungsbilanz allerdings nur gering. Aufgrund der Temperaturen knapp über  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  können unter-



**Bild 38:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen zwei Pt-100 auf Plastikplättchen mit parallelem Kabelanschluss (Sensor 2 – Sensor 3) für die Fahrbahnoberflächentemperatur (12.203 Werte)



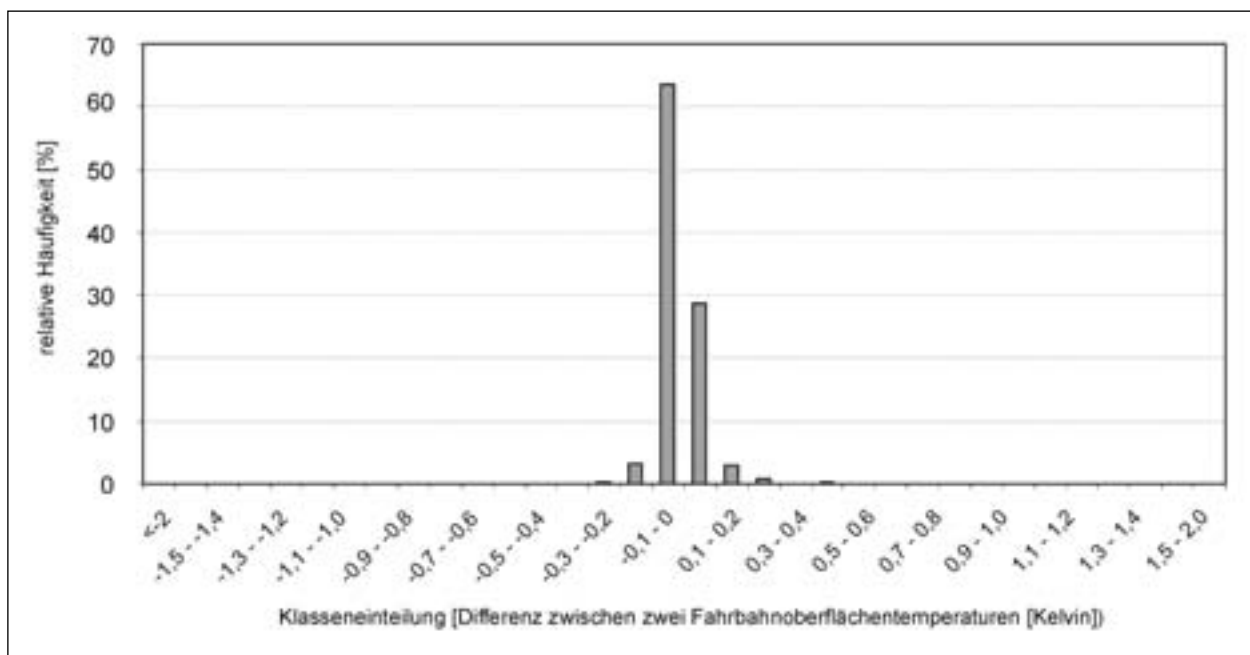
**Bild 39:** Korrelation zwischen der Differenz von 2 Pt-100 auf Plastikplättchen mit parallelem Kabelanschluss (Sensor 2 – Sensor 3) und der Strahlungsbilanz

schiedliche Verhältnisse durch ungleiche Schneematschverteilungen entstanden sein. Beobachtungsaufzeichnungen liegen zu diesen Zeiten nicht vor.

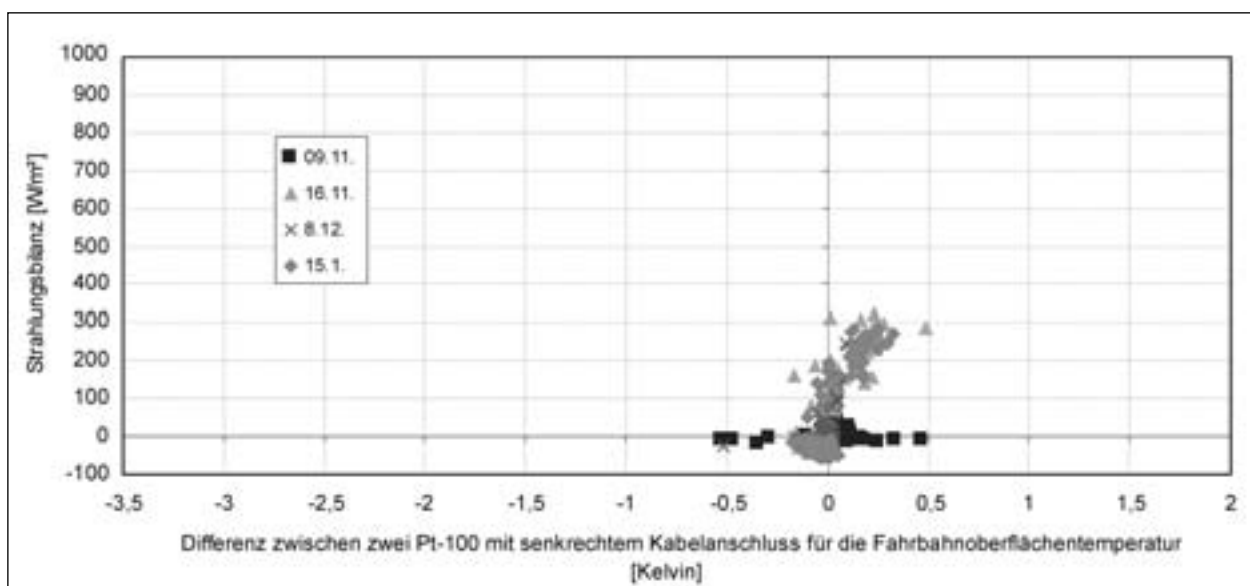
Am 31.3.2000 traten durch wechselnde Bewölkung erhebliche Schwankungen bei der Strahlungsbilanz auf, die zu einer weniger homogenen Korrelation zwischen Temperaturdifferenz und Strahlungsbilanz führen.

### 7.3.2.2 Pt-100 auf Plastikplättchen mit senkrechtem Kabelanschluss

Die neuen Pt-100 mit dem senkrechten Kabelanschluss erreichen die mit Abstand beste Übereinstimmung bei den Messwerten einer Sensorbauart. Fast 94 % aller Differenzen zwischen dem größten und kleinsten Wert sind kleiner 0,1 Kelvin. Der Anteil der Differenzen unter 0,4 Kelvin liegt bei fast 99,6 % (Bild 40). Messergebnisse bei hohen Strahlungsbilanzen liegen aber nicht vor.



**Bild 40:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen zwei Pt-100 auf Plastikplättchen mit senkrechtem Kabelanschluss (4.536 Werte)

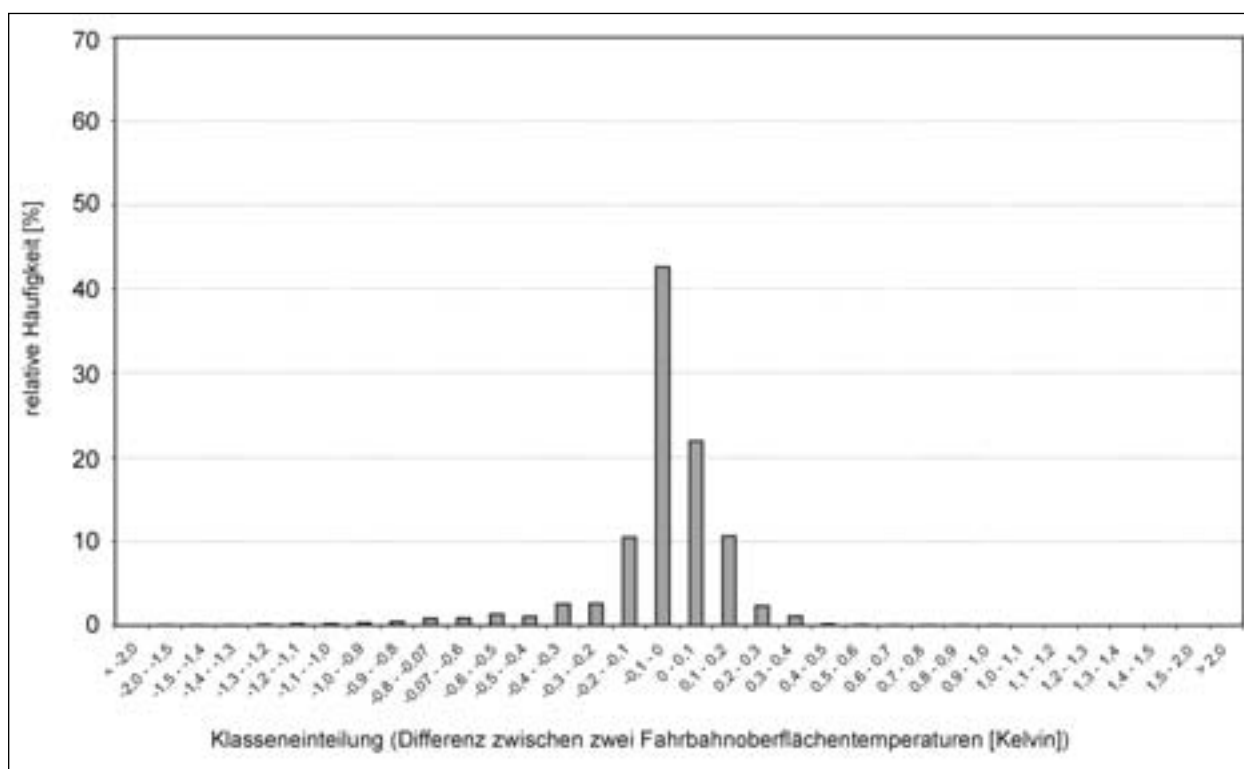


**Bild 41:** Korrelation zwischen der Differenz von 2 Pt-100 auf Plastikplättchen mit senkrechtem Kabelanschluss (Sensor 1 – Sensor 2) und der Strahlungsbilanz

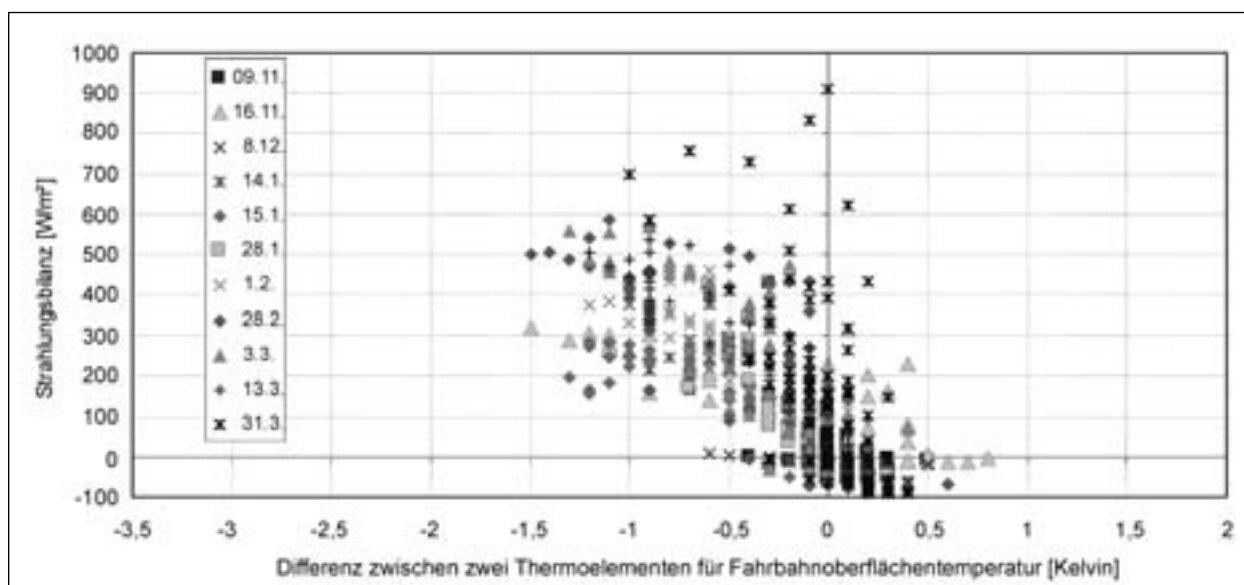
Aufgrund der geringen Differenzen ist eine Bewertung der Abhängigkeiten von anderen Parametern überflüssig. Die vereinzelt größeren Abweichungen können als Ausreißer ohne Bedeutung für die Glättewarnung gesehen werden (Bild 41). Die hohe Ausfallrate schon nach wenigen Wochen Einsatzzeit ist dagegen unbefriedigend.

### 7.3.2.3 Thermoelemente mit 0,5 mm Durchmesser

Im Vergleich zu den zuvor eingesetzten Thermoelementen mit 3 mm Fühlerdurchmesser ergeben sich geringe Verbesserungen (Bild 42). Differenzen über 0,4 Kelvin treten nur noch in 6 % der Fälle statt vorher 12 % der Fälle auf. Die Anzahl der Differenzen über 1 Kelvin verringert sich von etwas über 2 % auf deutlich unter 1 %.



**Bild 42:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen zwei Thermoelementen mit 0,5 mm Manteldurchmesser (12.203 Werte)



**Bild 43:** Korrelation zwischen der Differenz von zwei Thermoelementen (Sensor 1 – Sensor 3) und der Strahlungsblanz



Die Differenzen hängen recht eindeutig von der Strahlungsbilanz ab. Der Sensor 3 zeigte bei höher werdenden Strahlungsbilanzwerten auch die höheren Werte an (Bild 43), umgekehrt bei Strahlungsbilanzwerten unter  $0 \text{ W/m}^2$  in den meisten Fällen die tiefere Temperatur. Bei größeren kurzzeitigen Schwankungen treten keine deutlichen Korrelationen auf (z. B. 16.11.1999, 31.3.2000).

### 7.3.3 Vergleich von Sensoren verschiedener Bauart

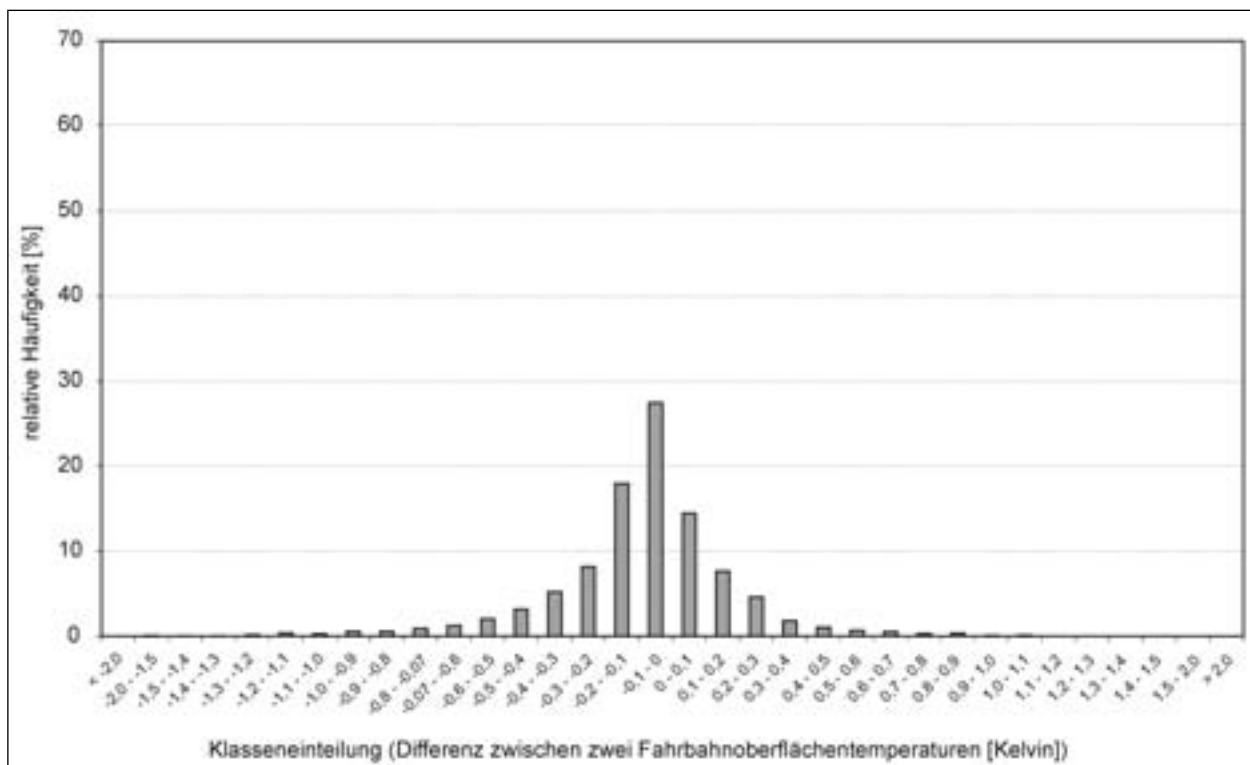
#### 7.3.3.1 Vergleich zwischen Pt-100 auf Plastikplättchen mit parallelem und senkrechtem Kabelanschluss

Zwischen beiden Sensorenbauarten gibt es Abweichungen, die zu ähnlichen Anteilen positiv und negativ ausfallen (Bild 44). Die verschiedenen Differenzen lassen sich unterschiedlichen Bedingungen zuordnen. Dabei bestehen kaum Korrelationen zwischen Temperaturdifferenz und Strahlungsbilanzwerten (Bild 45).

Bei ansteigender Strahlungsbilanz sind die Differenzwerte meist negativ, der Pt-100 mit senkrechtem Kabelanschluss gibt die höhere Temperatur

an. Die Differenz steigt mit ansteigender Strahlungsbilanz. Bei fallender Strahlungsbilanz werden die Differenzen sehr schnell kleiner und gehen teilweise dazu über, dass der Pt-100 mit dem parallelen Kabelanschluss die höheren Temperaturen angibt. Erst in der Nacht gleichen sich die Werte beider Sensoren an. Bei keinem anderen Sensorpaar ist dieses Verhalten in diesem Maße ausgeprägt.

Bei negativer Strahlungsbilanz treten erhebliche Unterschiede zwischen beiden Sensoren auf, die sich teils auf Unregelmäßigkeiten zurückführen lassen. Den hohen negativen Differenzen in der Nacht am 15.1.2000 gingen Niederschläge voran, sodass beim Abtrocknen ungleiche Bedingungen geherrscht haben können. Die kurzzeitigen hohen negativen Differenzen am 28.3.2000 entstanden bei aufsteigender Sonne. Auch vor diesem Zeitraum traten Niederschläge auf, die beim Abtrocknen infolge unterschiedlicher Abtrocknungsabläufe zu Ungleichmäßigkeiten auf dem Messfeld geführt haben können. Zusätzlich können Beschattungen einschließlich des Strahlungsbilanz-Sensors die Ergebnisse beeinflusst haben.

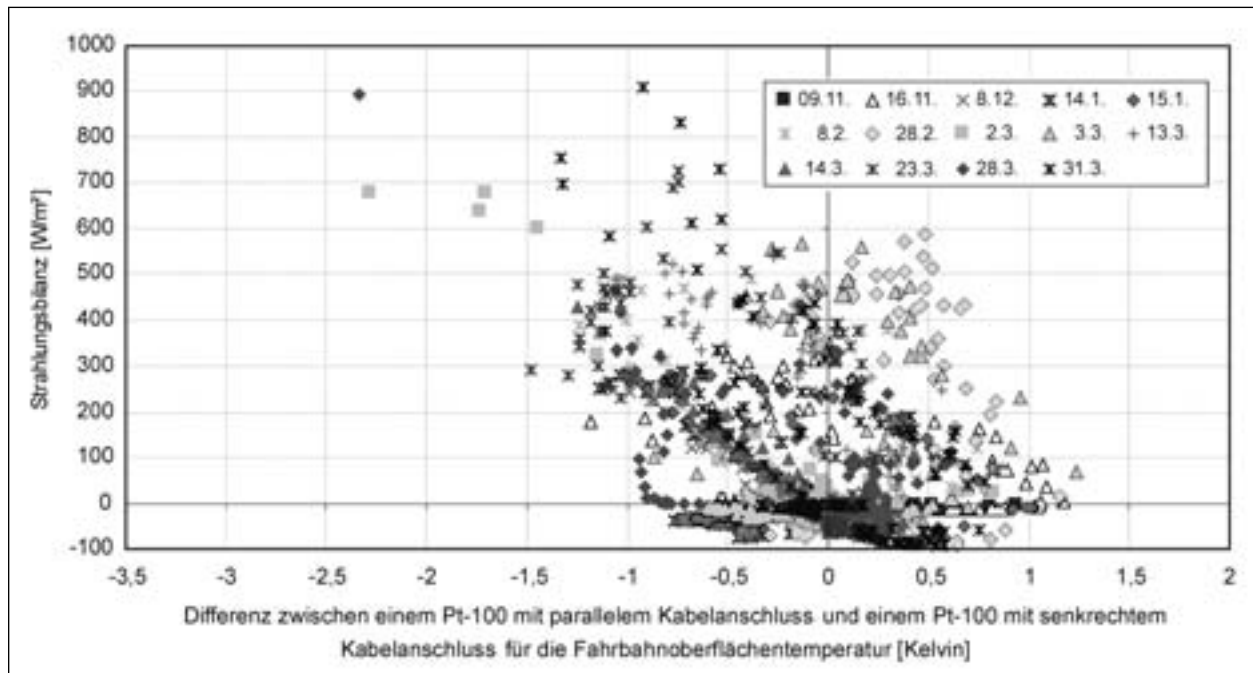


**Bild 44:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem Pt-100 auf Plastikplättchen mit parallelem und einem Pt-100 auf Plastikplättchen mit senkrechtem Kabelanschluss (12.202 Werte)

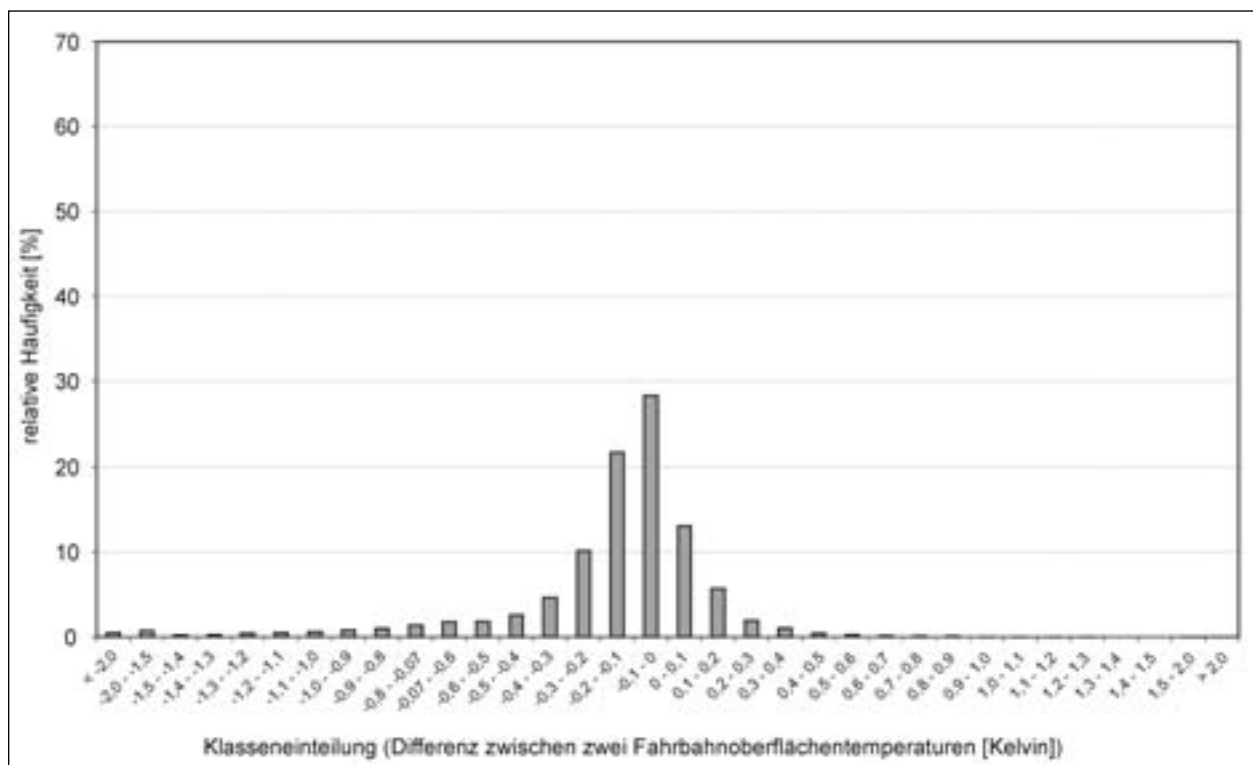
### 7.3.3.2 Vergleich zwischen Pt-100 auf Plastikplättchen mit parallelem Kabelanschluss und Thermoelement

Zwischen beiden Sensoren bestehen im Vergleich zu allen anderen Sensorpaaren die größten Diffe-

renzen. Im Vergleich zu den zuvor untersuchten Thermoelementen mit 3 mm Durchmesser treten mit den neu eingesetzten kleineren Thermoelementen ebenfalls größere Differenzen auf (vergleiche Bilder 27 und 46).



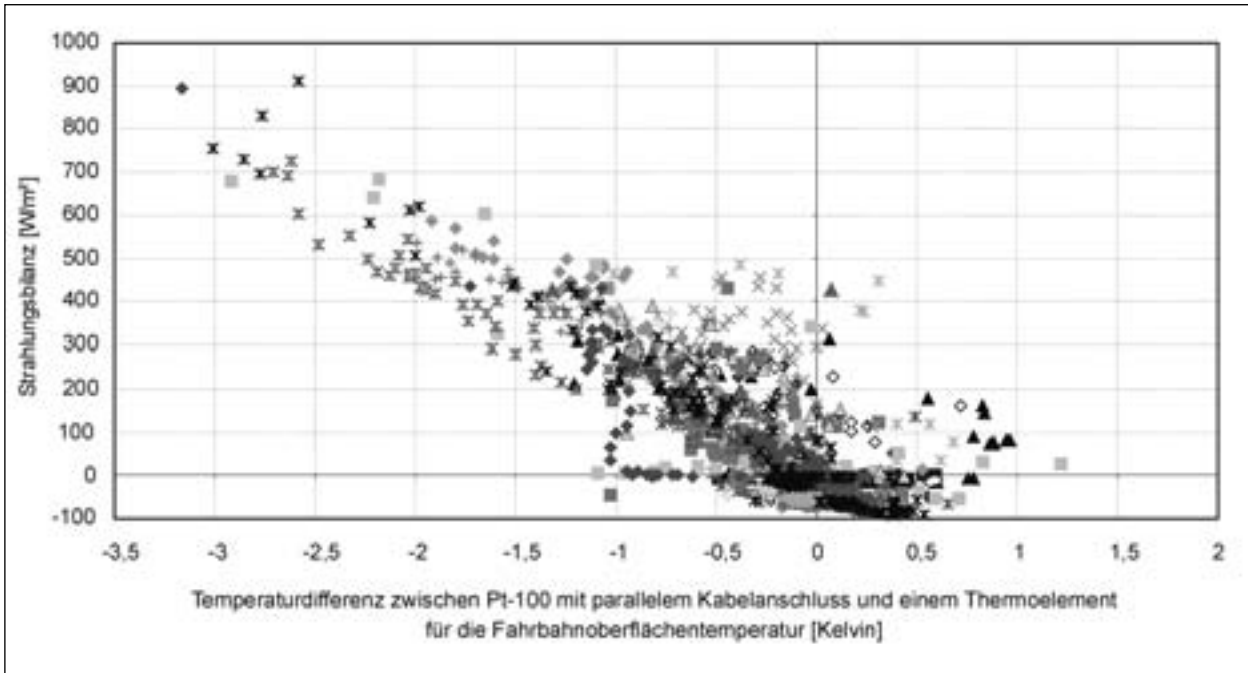
**Bild 45:** Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Pt-100 mit parallelem Kabelanschluss und senkrechtem Kabelanschluss) und der Strahlungsbilanz



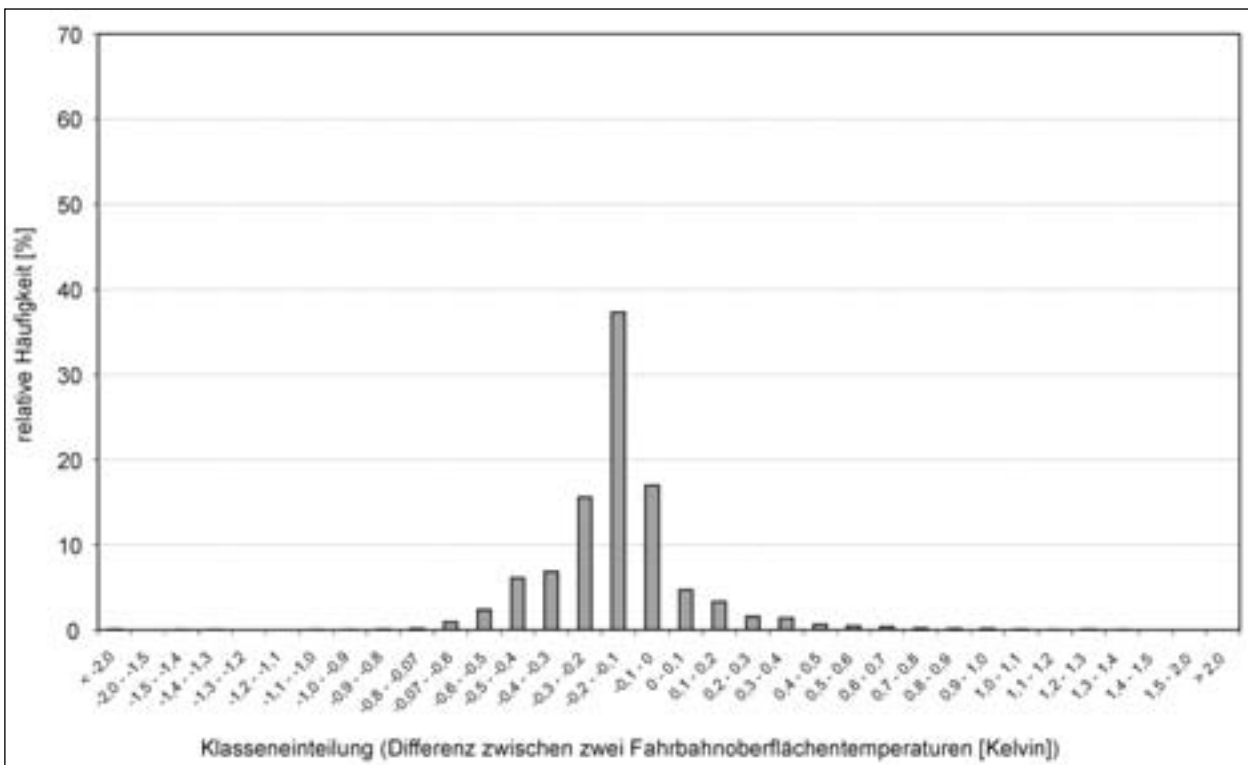
**Bild 46:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem Pt-100 auf Plastikplättchen mit parallelem Kabelanschluss und einem Thermoelement (12.203 Werte)

Bild 47 zeigt tendenziell eine recht eindeutige Korrelation zwischen Strahlungsbilanz und Temperaturdifferenz. Das Thermoelement zeigte tagsüber bei positiver Strahlungsbilanz die höhere Temperatur an und nachts bei negativer Strahlungsbilanz

die niedrigere Temperatur. An Tagen mit weniger eindeutiger Korrelation herrschten wechselnde Bewölkungsverhältnisse, bei denen sich die Strahlungsbilanz teilweise um mehr als 400 W/m<sup>2</sup> innerhalb von 10 Min. änderte.



**Bild 47:** Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Pt-100 mit parallelem Kabelanschluss und Thermoelement) und der Strahlungsbilanz

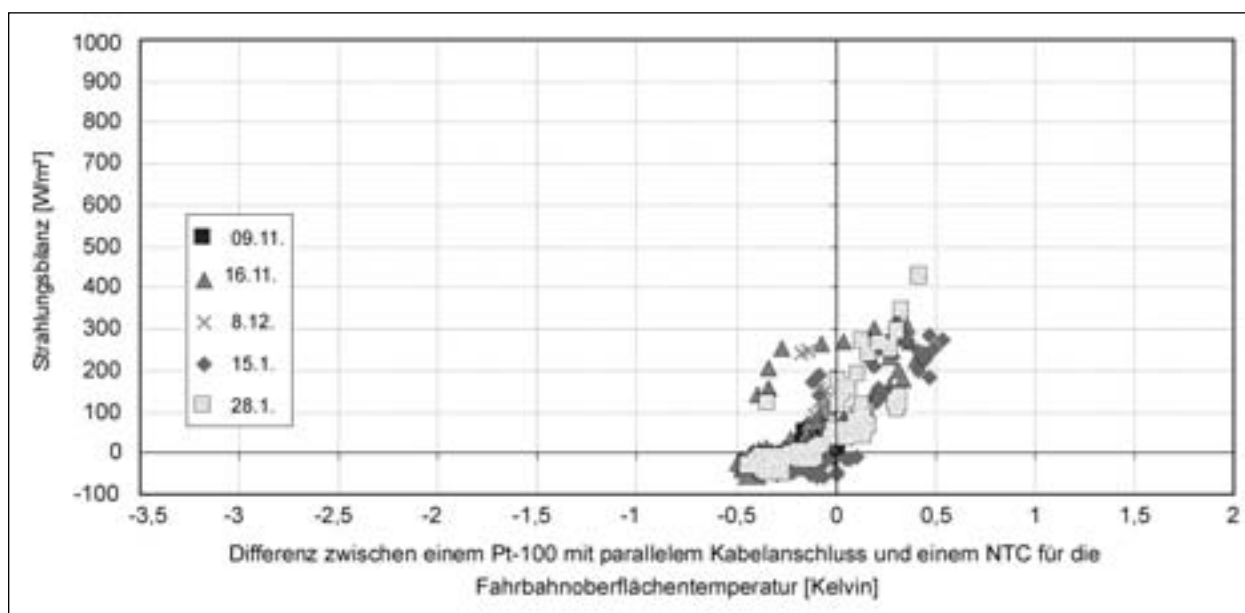


**Bild 48:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem Pt-100 auf Plastikplättchen mit parallelem Kabelanschluss und einem NTC (8.140 Werte)

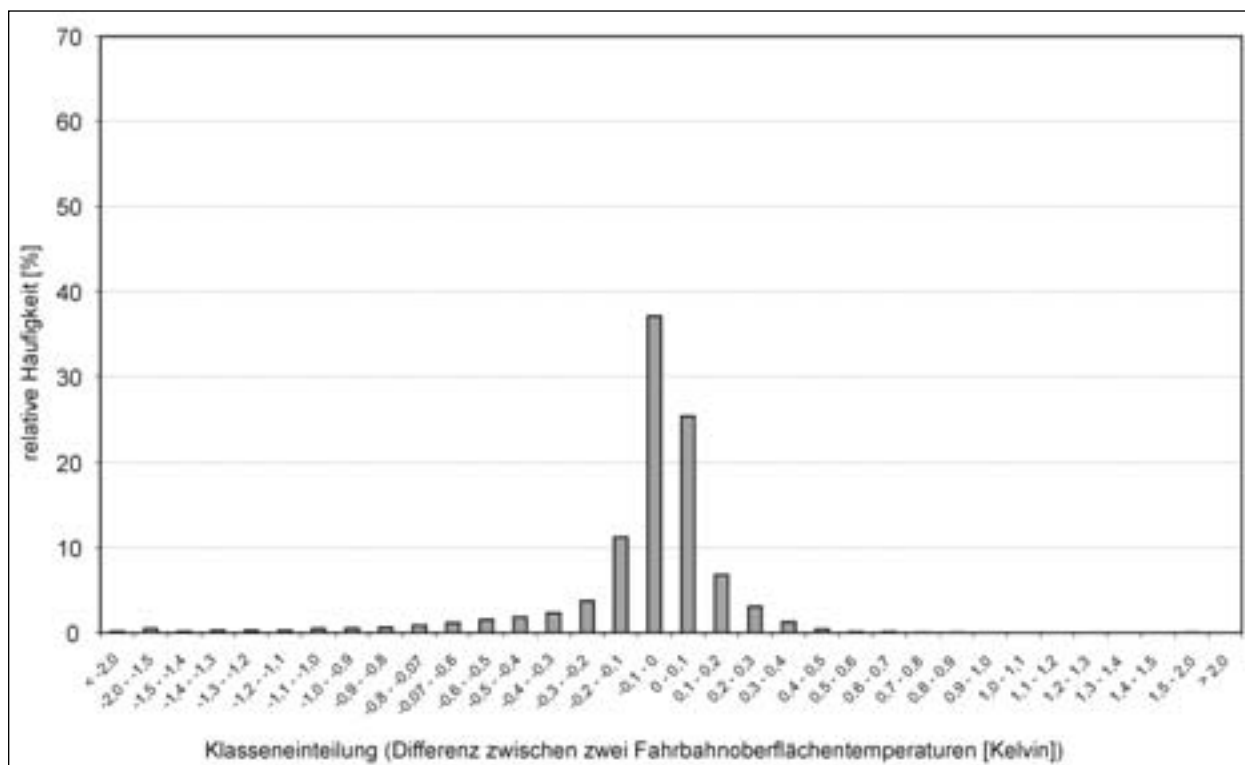
### 7.3.3.3 Vergleich zwischen Pt-100 auf Plastikplättchen mit parallelem Kabelanschluss und NTC

Zwischen beiden Sensoren haben sich im Vergleich zu dem vorherigen Untersuchungszeitraum kaum Änderungen ergeben (vergleiche Bilder 23 und 48). Durch den Ausfall des NTC liegen kaum Datensät-

ze mit hohen Strahlungsbilanzwerten vor. Tendenziell übersteigen bei hohen Globalstrahlungswerten die Messwerte des Pt-100 zunehmend die Messwerte des NTC. Umgekehrt sind die NTC-Werte bei größeren Ausstrahlungswerten geringer. Bei großen Schwankungen der Strahlungsbilanz wird die recht gute lineare Korrelation gestört (Bild 49).



**Bild 49:** Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Pt-100 mit parallelem Kabelanschluss und NTC) und der Strahlungsbilanz

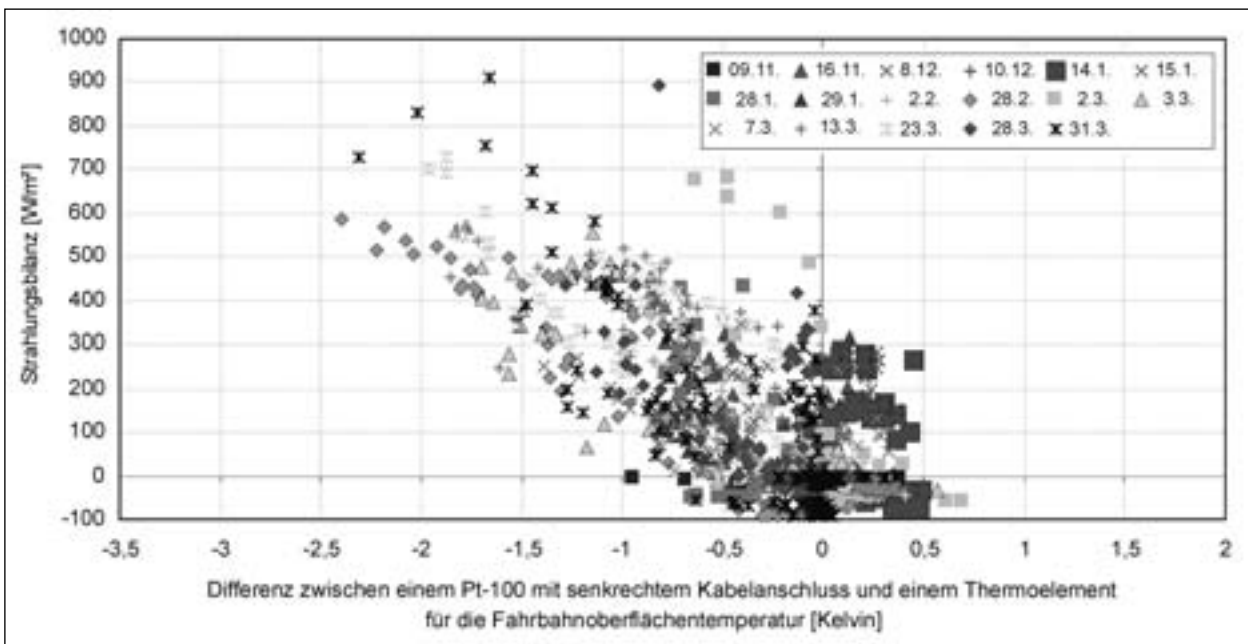


**Bild 50:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem Pt-100 auf Plastikplättchen mit senkrechtem Kabelanschluss und einem Thermoelement (12.202 Werte)

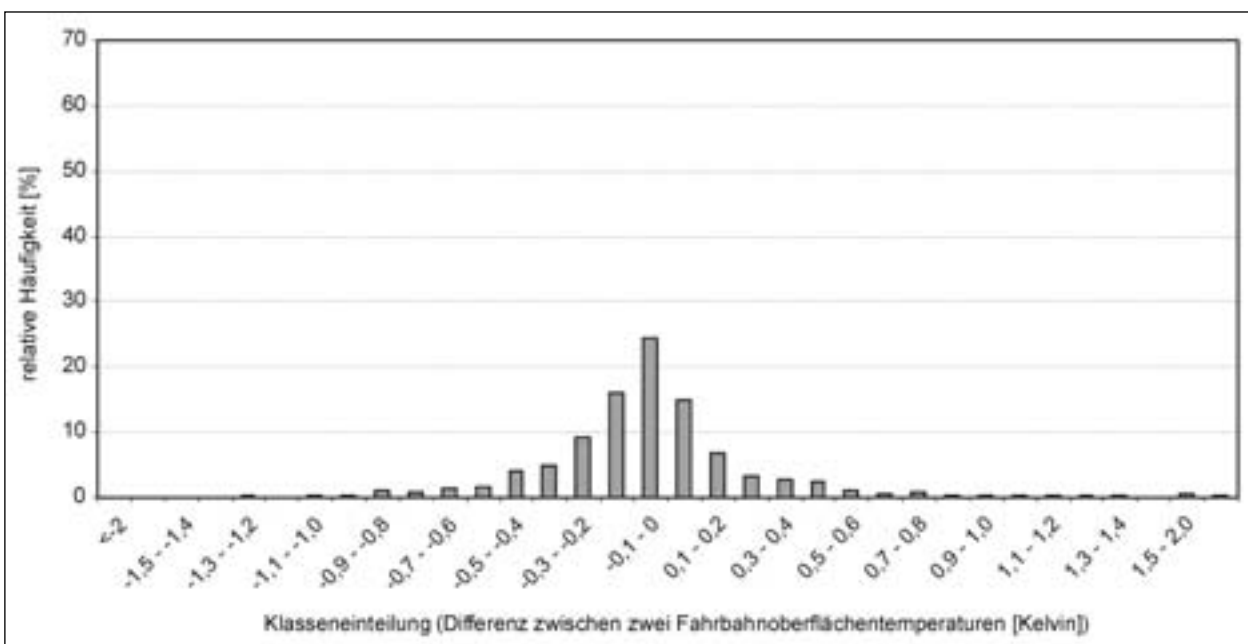
**7.3.3.4 Vergleich zwischen Pt-100 auf Plastikplättchen mit senkrechtem Kabelanschluss und Thermoelement**

Zwischen diesen beiden neuen Sensorbauarten bestehen im Vergleich zu den anderen Sensorkombinationen ebenfalls große Differenzen (Bild 50). Sie sind weitestgehend von der Strahlungsbilanz abhängig, wobei Unterschiede zwischen fallender und steigender Strahlungsbilanz bestehen. Bei steigender

Strahlungsbilanz sind die Differenzen geringer als bei fallender Strahlungsbilanz. Das Thermoelement zeigt dabei immer die höhere Temperatur an. Die hohen Abweichungen bei negativer Strahlungsbilanz fallen immer bei Sonnenuntergang an. Nachts gleichen sich die Werte beider Sensorarten an. Auch bei hoher Ausstrahlung steigen die Differenzen wenig über 0,3 Kelvin (Bild 51).



**Bild 51:** Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Pt-100 mit senkrechtem Kabelanschluss und Thermoelement) und der Strahlungsbilanz



**Bild 52:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem Pt-100 auf Plastikplättchen mit senkrechtem Kabelanschluss und einem NTC (8.139 Werte)

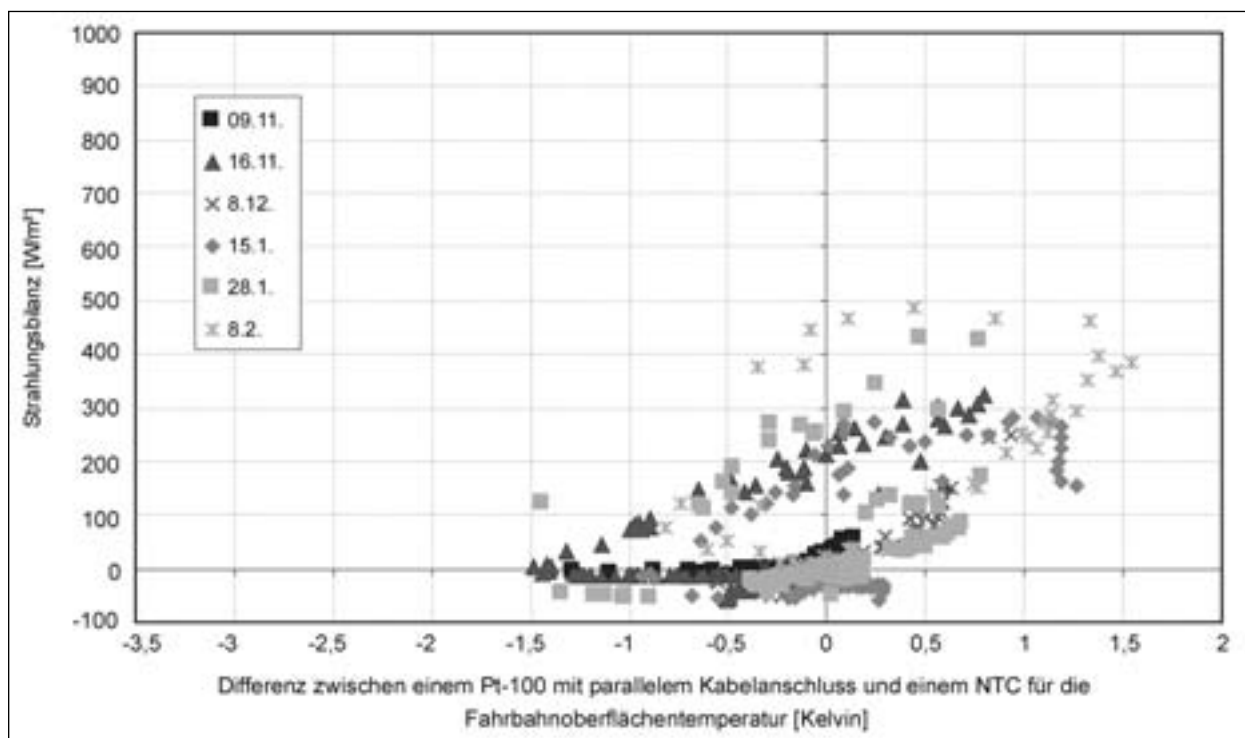
### 7.3.3.5 Vergleich zwischen Pt-100 auf Plastikplättchen mit senkrechtem Kabelanschluss und NTC

Zwischen beiden Sensorbauarten traten im Vergleich zu den anderen Sensorpaaren bei Strahlungsbilanz um  $0 \text{ W/m}^2$  große Differenzen auf. Diese sind bei steil abfallender Globalstrahlung am Nachmittag entstanden. Erst in der Nacht glichen sich

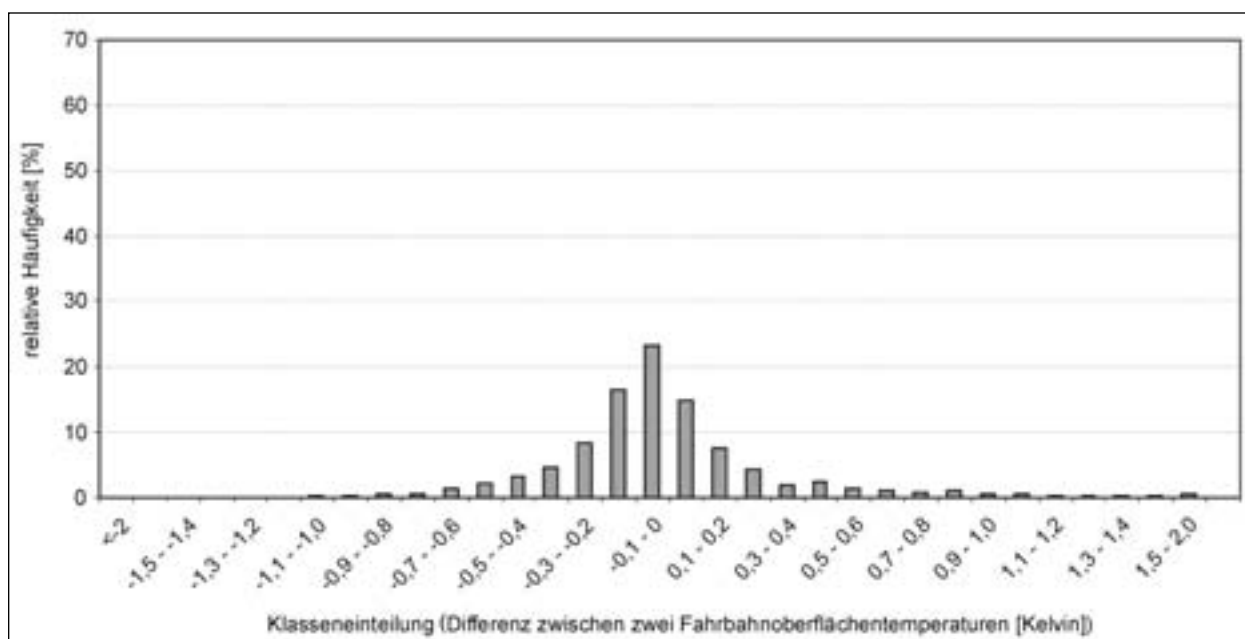
die Werte wieder an. Bei steigender Globalstrahlung gibt der Pt-100 größere Werte an (Bild 53).

### 7.3.3.6 Vergleich zwischen Thermoelement und NTC

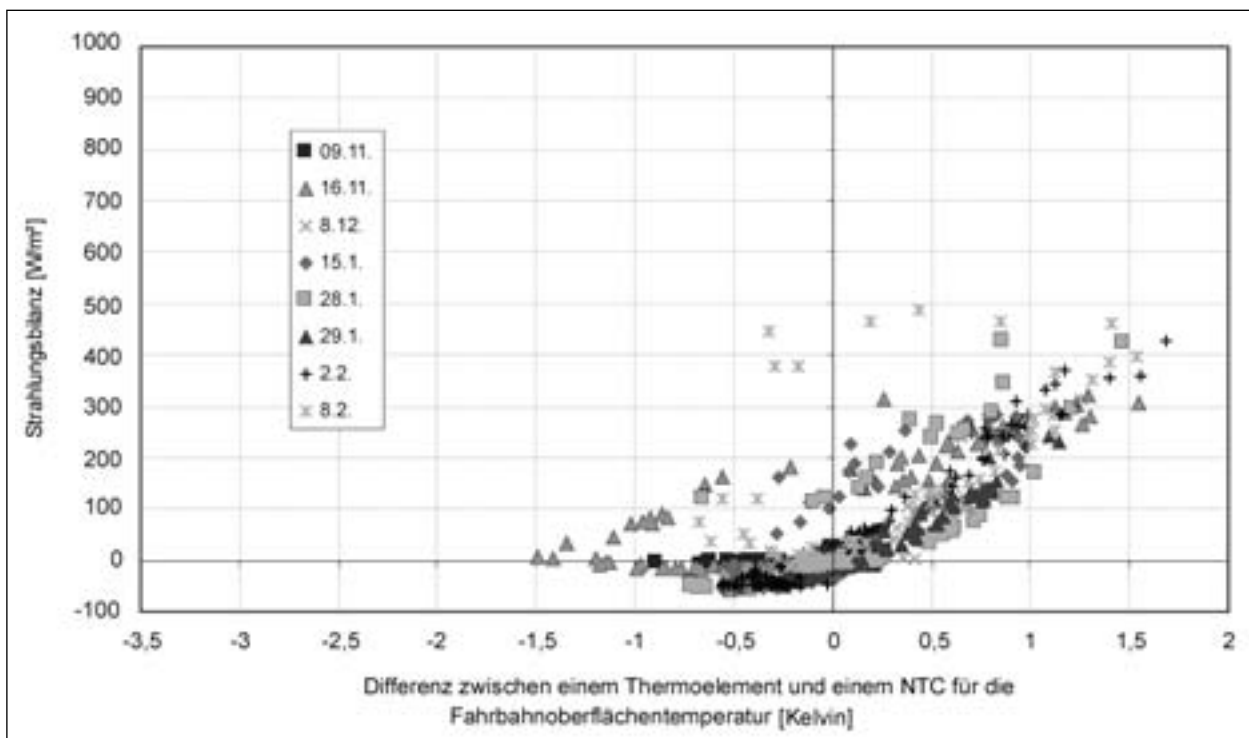
Zwischen diesen beiden Sensoren besteht ein ähnliches Verhalten wie zwischen dem Pt-100 mit



**Bild 53:** Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Pt-100 auf Plastikplättchen mit senkrechtem Kabelanschluss und NTC) und der Strahlungsbilanz



**Bild 54:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen einem Thermoelement und einem NTC (8.140 Werte)



**Bild 55:** Korrelation zwischen der Differenz zweier Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur (Thermoelement und NTC) und der Strahlungsbilanz

senkrechtem Kabelanschluss und dem NTC. Bei hohen Strahlungsbilanz-Werten sind die Differenzen größer (Bild 55).

## 7.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des Winters 1999/2000

Die mit einem senkrechten Kabelanschluss ausgeführten Pt-100 führten zu einer deutlichen Verbesserung der Wiederholbarkeit der Messwerte von Sensoren gleicher Bauart. Allerdings waren diese Sensoren nicht funktionssicher. Bereits nach wenigen Wochen fielen 5 von 6 Sensoren ganz oder zeitweise aus.

Die zweite untersuchte neue Bauart, die Thermoelemente mit einer Messspitze von 0,5 mm Durchmesser, erreichte im Vergleich zu den neuen Pt-100 eine geringere Wiederholbarkeit der Ergebnisse. Wie bei den Untersuchungen von 1997/98 sind die Differenzen zwischen den Thermoelementen gleicher Bauart höher als die bisher gestellten Anforderungen an die Genauigkeit der Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur. Diese Differenzen sind vor allem abhängig von der Strahlungsbilanz an der Fahrbahnoberfläche. Je nach Strahlungsbilanz treten Differenzen bis 1,5 Kelvin zwischen den dünnen Thermoelementen auf. Diese werden auf geringe Lagedifferenzen im Bezug zur Fahrbahn-

oberfläche zurückgeführt, die beim Einbau der Sensoren nicht zu vermeiden sind. Sie müssen als technische Unzulänglichkeit bei der Bewertung der Messwerte berücksichtigt werden.

Im Vergleich zwischen den vorhandenen Sensoren aus der Untersuchung 1997/98 und den neuen Sensoren ergaben sich teilweise höhere Abweichungen als zwischen den Messwerten von allen Sensoren bei der Untersuchung 1997/98.

Nach den Verläufen der Temperaturwerte können die neuen Sensoren aufgrund theoretischer Überlegungen als genauer angesehen werden. Sie reagieren auf die Energieströme an der Fahrbahnoberfläche schneller. Bei einer hohen Energiezufuhr durch die Sonne erwärmt sich die Fahrbahnoberfläche mehr als die darunterliegenden Schichten. Der Pt-100 mit senkrechtem Kabelanschluss und die dünnen Thermoelemente geben unter diesen Bedingungen die höheren Temperaturen an. Die Thermoelemente zeigen im Vergleich zu den neuen Pt-100 nochmals etwas höhere Temperaturen an. Da eine direkte Bestrahlung der Sensoren ausgeschlossen wird, sollte der Sensor mit der höchsten Temperatur der wahren Temperatur am nächsten kommen.

Umgekehrt ist die Fahrbahnoberfläche nach theoretischen Überlegungen bei nächtlicher Ausstrah-

lung in den meisten Fällen die kälteste Schicht der Fahrbahnkonstruktion. In den Messwertverläufen zeigen die neuen Sensoren die Umkehr des Temperaturgradienten in der Fahrbahnkonstruktion bei fallender Strahlungsbilanz eher an als die Sensoren der Bauarten, die bereits 1997 im Messfeld eingebaut wurden.

Je nach Luft- oder Untergrundtemperatur, Windgeschwindigkeit oder Niederschlag werden die Strahlungsprozesse überlagert. Die daraus abzuleitenden Ergebnisdifferenzen werden mit etwa  $\pm 0,5$  Kelvin eingeschätzt. In den Zeiten geringer Strahlungsbilanzen müssen diese Toleranzen als unvermeidliche Messfehler infolge geringer Differenzen bei der Einbaulage hingenommen werden.

Möglichkeiten zur weiteren Optimierung der Messgenauigkeiten mit dem Ziel einer Verringerung eines eigenen Wärmeverhaltens des Sensors im Vergleich zur Fahrbahnoberfläche werden nicht gesehen. Sie würden nur zu mechanischen Instabilitäten führen, die einen Einbau erschweren. Ebenso werden durch andere Einbaumethoden keine besseren Positionierungsmöglichkeiten zur Fahrbahnoberfläche erwartet, um die Unterschiede zwischen Sensoren gleicher Bauart zu verkleinern.

## 8 Haltbarkeit der Sensoren unter Verkehr

### 8.1 Einbau der Sensoren

Ausgehend von den Ergebnissen im Kapitel 7 wurden in einer weiteren Messreihe die Thermolemente mit einem Messfühler-Durchmesser von 0,5 mm unter Verkehr getestet. Hierbei ging es in erster Linie um ihre Stabilität unter Verkehr, mit dem Ziel, sie später gegebenenfalls als Referenzsensoren auf einer befahrenen Fahrbahn oder sogar generell als Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur einsetzen zu können.

Der Einbau der Sensoren fand auf der A 8, km 103, unmittelbar neben einer vorhandenen GMA-Messstelle statt. Dadurch war der Aufwand für die Installation der Sensoren und der Datenlogger gering (Spannungsversorgung) und es stand ein sicherer Fahrzeugstellplatz bei der Messfeldbeobachtung und Datenabnahme zur Verfügung.

Vor dem Einbau wurden die Sensoren in Flüssigkeitsbädern unterschiedlicher Temperatur kalibriert. Trotz einer Leitungslänge von 12 m waren



**Bild 56:** Einbau von 6 Thermolementen in die Fahrbahn (ohne Vergussmasse)

bei keinem Thermolement Korrekturwerte über 1 Kelvin notwendig.

Da an der unmittelbaren Oberfläche erhebliche mechanische Einwirkungen erwartet wurden, sollten die Thermolemente neben dem möglichst direkten Einbau an der Oberfläche auch in den Tiefen 1, 2 und 3 Millimeter unter der Oberfläche eingebaut werden. Um die Wiederholbarkeit der Messwerte zu testen, waren je Einbautiefe drei Sensoren vorgesehen.

Die Sensoren wurden gemäß den „Betriebstechnischen Anforderungen an Glättemeldealanlagen“ in der Mitte des Überholfahrstreifens unmittelbar neben der GMA-Bodensonde eingebaut. Quer zur Fahrbahn wurden zwei Fugen für die Kabelanbindung geschnitten. Diese Fugen endeten in zwei breiten Ausschnitten, von denen aus jeweils 6 Sensoren durch Bohrungen mit einem Durchmesser von 5 mm an die Fahrbahnoberfläche bzw. wenige Millimeter darunter geführt wurden (siehe Bild 56). Der Abstand zwischen den Bohrungen betrug rund 70 mm.

In den nachfolgenden Auswertungen sind an der Fahrbahnoberfläche liegende Sensoren mit den Nummern 1, 2 und 3 benannt. Die Sensoren in ein Millimeter Tiefe haben die Nummern 4, 5 und 6, in zwei Millimeter Tiefe die Nummern 7, 8 und 9 sowie die Sensoren in drei Millimeter Tiefe die Nummern 10, 11 und 12.

Die Fixierung der Sensoren ließ sich nur ungenau bewerkstelligen. Trotz Anwendung von Knetmasse und Sekundenkleber verrutschten die Sensoren etwas, sodass die vorgesehenen Abstände zur Fahrbahnoberfläche nur eine Schätzung darstellen.

Die Bohrungen für die Sensoren wurden wie auf dem Messfeld in Inzell wieder mit Bitumen gefüllt, dem ein sehr feiner Splitt beigefügt wurde. Mit diesem Stoffgemisch soll dem Material der Fahrbahnkonstruktion weitestgehend entsprochen werden.



Für das Schließen der Fugen und der Freischnitte für den Sensoreinbau wurde eine Zweikomponenten-Vergussmasse eingesetzt.

Der Einbau der Sensoren erfolgte Ende September 2000. Die Messwerterfassung erfolgte unmittelbar nach dem Einbau im 10-Minuten-Zyklus. Einer der beiden eingesetzten Datenlogger musste kurze Zeit später wegen Ausfalls der Zeitanzeige repariert werden. Einwirkungen auf die Sensorkalibrierungen durch die Reparatur waren nicht ersichtlich.

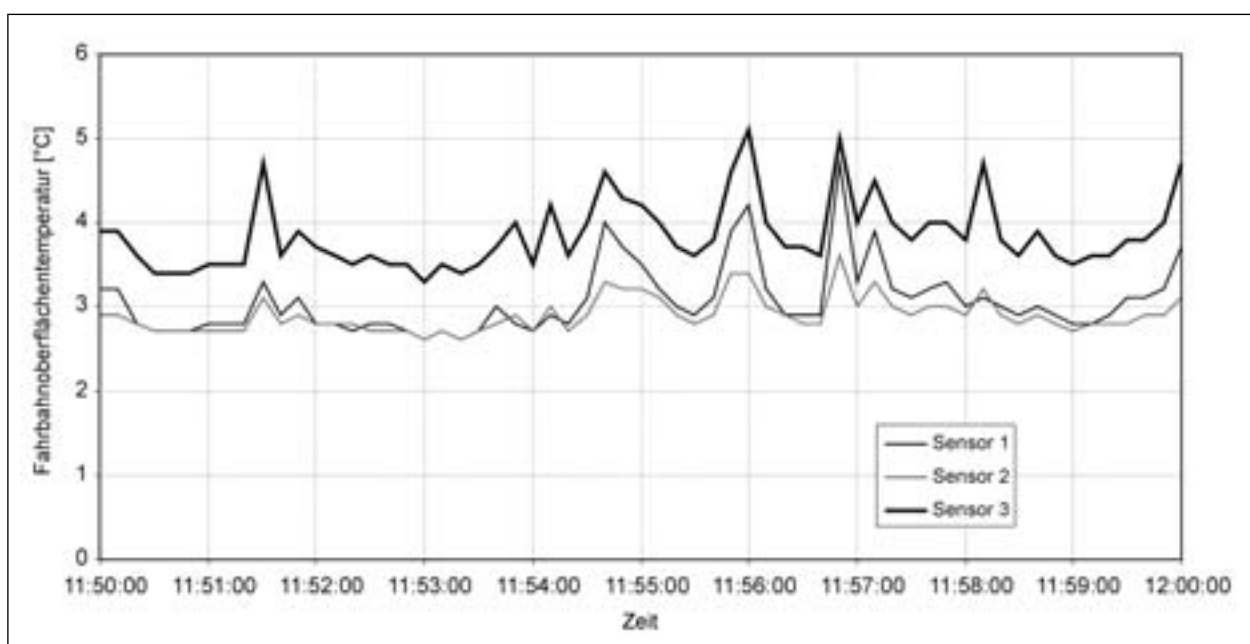
## 8.2 Messergebnisse

### 8.2.1 Beobachtungen auf dem Messfeld

Die Messwerte wurden etwa wöchentlich von den Datenloggern ausgelesen, wobei gleichzeitig eine Funktionskontrolle der Sensoren erfolgte. Bei diesen kurzzeitigen Beobachtungen waren nur geringe Messwertdifferenzen zwischen allen Sensoren erkennbar, in den meisten Fällen betragen die höchsten Differenzen nur etwa 0,7 Kelvin. Das Messfeld liegt im Winter aufgrund des umliegenden Waldes je nach Sonnenstand ganztägig im Schatten bzw. es scheint die Sonne nur kurze Zeit auf das Messfeld. Dadurch herrscht zwischen der Fahrbahnkonstruktion und den Sensoren ein hohes thermisches Gleichgewicht, das wiederum nur geringe Anzeigeunterschiede zwischen den Sensoren erwarten lässt.

Eine visuelle Kontrolle auf der Fahrbahn rund 3 Monate nach dem Einbau ergab, dass bei zwei der zwölf Sensoren die Sensorspitzen nicht mehr von der Vergussmasse umgeben waren. Die Sensorspitzen lagen etwa 2-3 mm in der Luft. Beides waren Sensoren, die unmittelbar an der Fahrbahnoberfläche platziert waren. Bei Messwertbeobachtungen fiel bei diesen beiden Sensoren eine deutliche Reaktion auf den fahrenden Verkehr auf. Bei der Überfahrt eines Fahrzeuges änderte sich die gemessene Temperatur innerhalb von 1-2 Sekunden sichtbar, um anschließend innerhalb von 5-10 Sekunden etwa den vorhergehenden Wert wieder einzunehmen. Im Februar 2001 wurden die Messwerte der 3 Sensoren an der Fahrbahnoberfläche über ca. 60 Stunden im 10-Sekunden-Intervall aufgenommen. Dabei trat eine maximale Temperaturänderung von 1,8 Kelvin innerhalb von 10 Sekunden auf (Bild 57). Diese Temperaturänderung ist wahrscheinlich bei wenig Verkehr entstanden.

Die Höhe dieser kurzzeitigen Änderungen wird sich hauptsächlich aus der Differenz zwischen Fahrbahnoberflächen- und Lufttemperatur ergeben haben. Letztere lag bei den Beobachtungen nicht vor. Ebenso werden die Geschwindigkeit der Fahrzeuge und der Abstand der Fahrzeugüberrollungen zu unterschiedlichen Verwirbelungen der Luft führen und damit unterschiedliche Änderungen der gemessenen Temperaturen bewirken. Diese Schwankungen bewirken auch größere Messwertdifferenzen zwischen allen Sensoren.



**Bild 57:** Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur gemessen in 10-Sekundenintervallen, alle Sensoren liegen etwa an der Oberfläche, Sensoren 1 und 3 mit frei liegenden Messfühlerspitzen

Bei einem tiefer liegenden Sensor war nach 3 Monaten die darüber liegende Vergussmasse herausgebrochen. Hier waren Schwankungen der Messwerte bei Fahrzeugüberfahrten nicht erkennbar. Dieser Sensor war nach rund 4 Monaten defekt.

Nach einem halben Jahr fehlte bei allen Sensoren die obere Vergussmasse. Die Sensorspitzen lagen je nach Einbautiefe mehr oder weniger frei. Bei den tiefer liegenden Sensoren waren keine deutlichen Reaktionen auf überfahrende Fahrzeuge erkennbar. Scheinbar werden sie in den kleinen Bohrungen von rund 5 mm noch vor Luftzug geschützt und es muss eine größere Sensorlänge in der Bohrung frei liegen.

Bei einer Messfeldbeobachtung im April 2001 lagen alle Sensoren am Schattenrand der nebenstehenden Waldkante mit teilweiser Sonnenbestrahlung. Unter diesen Verhältnissen waren Differenzen zwischen den Sensoren von über 3 Kelvin erkennbar. Diese Beobachtung zeigt die Schwierigkeit der Bewertung eines Messwertes an einem Messpunkt in Bezug zu der weiteren und näheren Umgebung, wenn diese durch eine andere Beschattung oder Bewölkung beeinflusst wird.

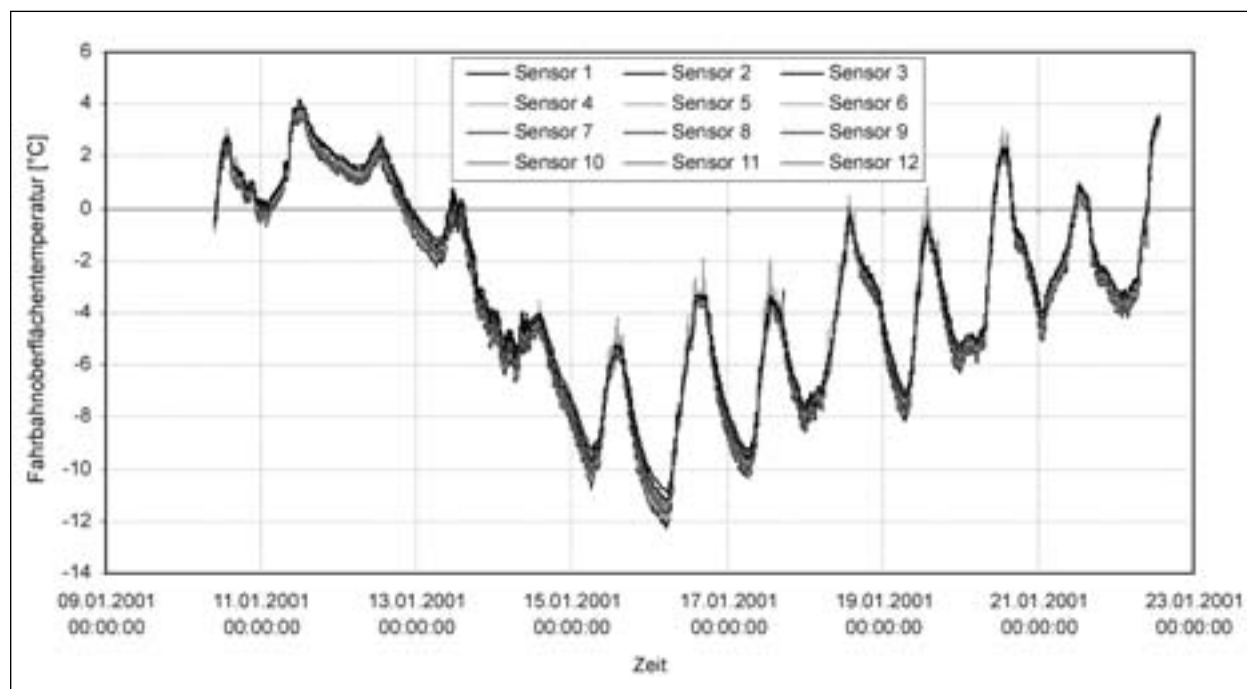
Nach 9 Monaten war ein weiterer Sensor defekt. Die anderen Sensoren wiesen bei einer vormittäglichen Beobachtung in Schattenlage im Juni 2001 nach wie vor nur geringe Differenzen auf ( $< 0,8$  Kel-

vin). Im Januar 2002 gaben 3 der 12 Sensoren keine Messwerte mehr an.

### 8.2.2 Statistische Auswertungen

Bei der Betrachtung der Messdatenaufzeichnungen fällt auf, dass die größeren Differenzen zwischen den Sensoren (etwa 1 Kelvin) vor allem nachts bei tiefen Temperaturen auftraten (Bild 58). Dabei gaben die frei liegenden Sensoren im Vergleich zu den etwas tiefer unter Fahrbahnoberfläche liegenden Sensoren die tieferen Temperaturen an (Bild 59). Tagsüber sind Differenzen geringer, aber nur selten messen die frei liegenden Sensoren höhere Temperaturen als die tiefer liegenden Sensoren.

Dieses Verhalten lässt sich anhand der unterschiedlichen Energieströme an den frei liegenden und an den in der Fahrbahnoberfläche eingegossenen Sensoren erklären. Die Metalloberfläche eines frei liegenden Sensors, auch wenn sie vergleichsweise sehr klein ist, gibt bei nächtlicher Ausstrahlung mehr Wärme ab als die Fahrbahnoberfläche. Die in der Fahrbahnoberfläche eingegossenen Sensoren reagieren nicht auf die Strahlung direkt, sondern können nur auf über die Fahrbahnmaterialien aufgenommene bzw. abgegebene Wärme reagieren. Durch die Lage in der Luft tauschen die frei liegenden Sensoren mehr Wärme mit der Luft als mit den Fahrbahnmaterialien aus. Die frei liegenden



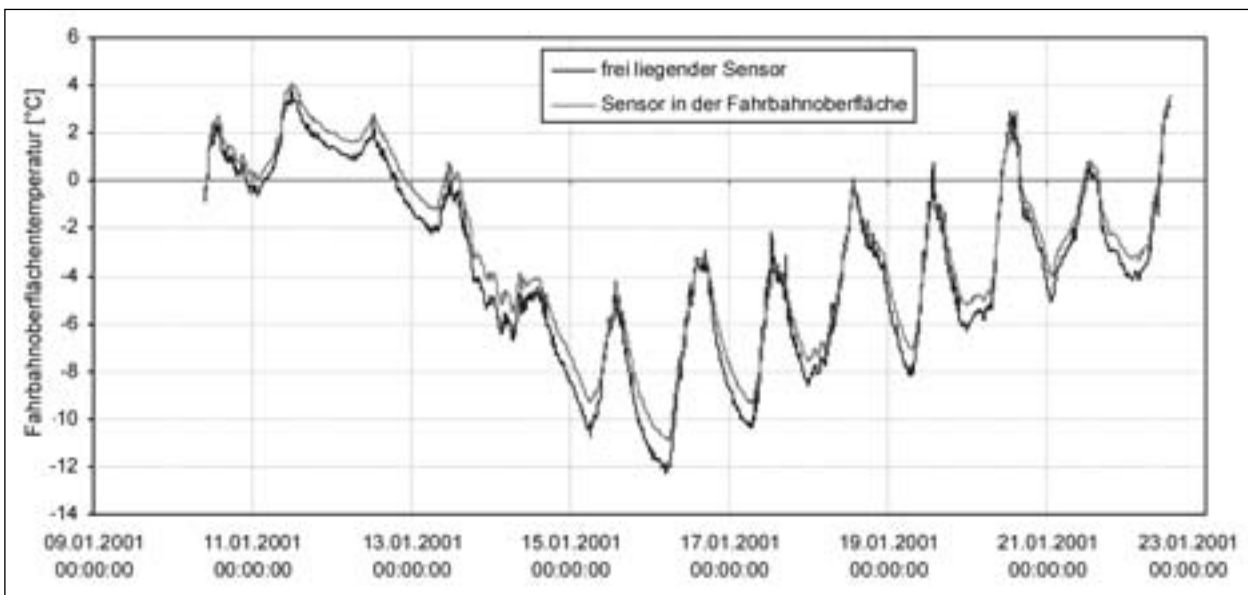
**Bild 58:** Messwertverlauf aller 12 Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur über mehrere Tage (1.751 Messzeitpunkte im 10-Min.-Intervall aufgenommen)

Sensoren messen eigentlich nicht die Temperatur der Fahrbahnoberfläche, sondern eher der Luftschicht darüber.

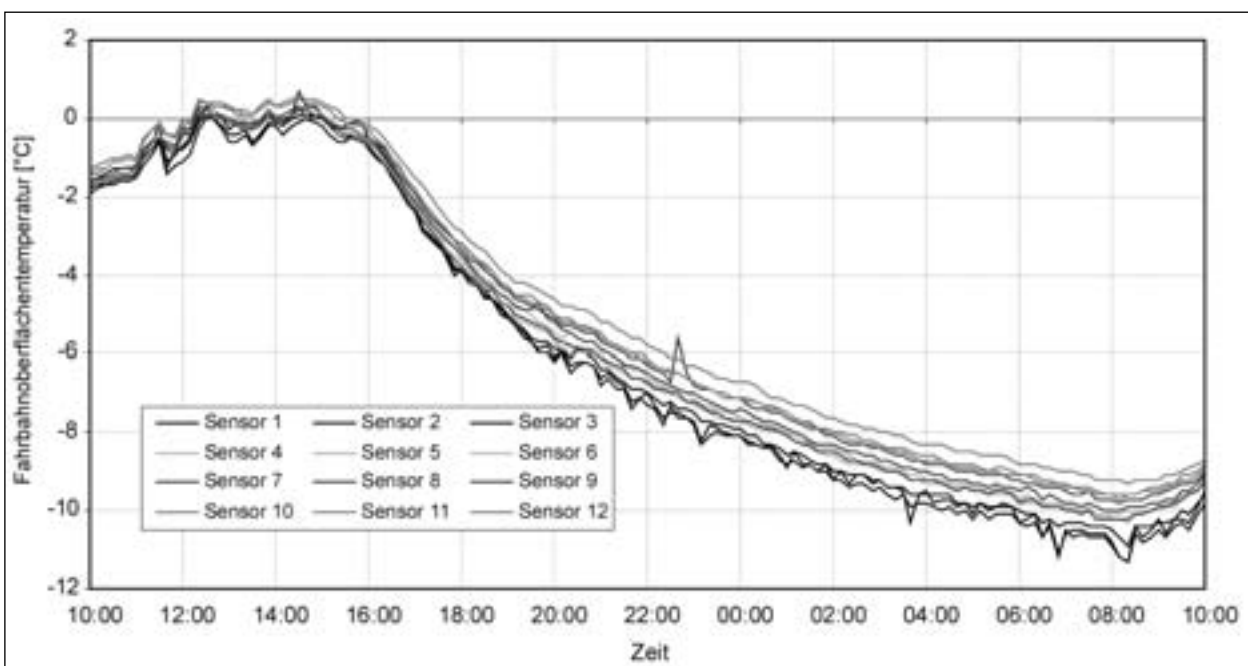
In der Sylvesternacht 2000 traten besonders hohe Differenzen zwischen allen Sensoren auf. Der Messwertverlauf (Bild 60) zeigt mit 10 Kelvin einen extremen nächtlichen Temperatursturz, der wahrscheinlich auf eine sehr klare Nacht zurückzuführen ist, die einem bedeckten Tag mit nur einem geringen Temperaturgefälle folgte. Zusätzlich können ein sehr geringes Verkehrsaufkommen und damit

ein geringer Windeinfluss durch den Verkehr in dieser Nacht angenommen werden.

Zwischen den 12 Sensoren ist in dieser Nacht ein deutliches Gefälle in Abhängigkeit zur Einbautiefe sichtbar. Die Sensoren an der Oberfläche, von denen zwei zu diesem Zeitpunkt auch frei gelegen haben können, zeigten die tiefsten Temperaturen an. Im Vergleich zu allen anderen Sensoren gaben die Sensoren mit einer Einbautiefe von 3 mm unter der Fahrbahnoberfläche die höchsten Temperaturen an. Die Sensoren mit den Einbautiefen 1 und 2



**Bild 59:** Verlauf der gemessenen Fahrbahnoberflächentemperaturen von einem frei liegenden und einem in der Fahrbahnoberfläche liegenden Sensor (1.751 Messzeitpunkte im 10-Min.-Intervall aufgenommen)



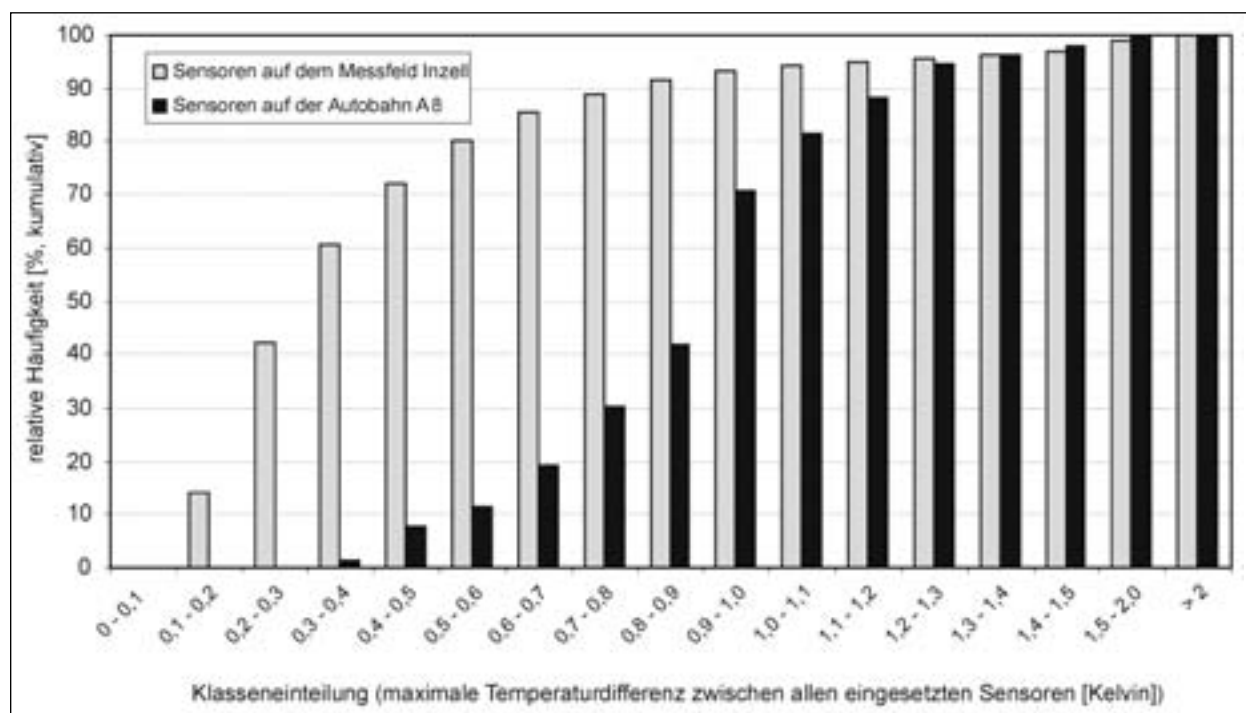
**Bild 60:** Gemessener Temperaturverlauf von allen 12 Sensoren in der Nacht vom 31.12.2000 zum 01.01.2001

mm unter der Fahrbahnoberfläche liegen dazwischen. Mit Ausnahme eines Sensors mit 2 mm Einbautiefe, messen die Sensoren mit 1 mm Einbautiefe die tieferen Temperaturen. Der Temperaturgradient auf den ersten 3 mm unterhalb der Fahrbahnoberfläche beträgt in den frühen Morgenstunden mit Ausnahme einiger verkehrsbedingter Spitzen etwa 1,6 Kelvin.

Dieses Messverhalten tritt zu anderen Zeitpunkten nicht mit dieser Deutlichkeit auf. Auch die Messergebnisse der tiefer liegenden Sensoren unterliegen häufig bei 10-Minuten-Mess-Intervallen unterschiedlichen Schwankungen, die sich im Nachhinein ohne die Kenntnis der genauen Verhältnisse zum Zeitpunkt der Messungen nicht erklären lassen.

Auffällig ist, dass die direkt an der Oberfläche eingebauten Sensoren tagsüber in den meisten Fällen eine tiefere Temperatur anzeigen als die unter der Fahrbahnoberfläche eingebauten Sensoren. Dieses Verhalten widerspricht den physikalischen Erkenntnissen bei Vorhandensein einer positiven Strahlungsbilanz tagsüber. Durch Zufuhr von Sonnenstrahlung erwärmt sich die Fahrbahnoberfläche. Dabei nimmt die oberste Schicht die Energie auf und gibt sie in die darunterliegenden Schichten weiter. Dies erfolgt auch, wenn nur ein Wärmeaustausch von über der Fahrbahn liegenden wärmeren Luftschichten zur Fahrbahnkonstruktion stattfindet.

Weil eine Wärmeübertragung von einem kalten zu einem warmen Körper unter normalen Bedingungen nicht erfolgen kann, muss die oberste Schicht der Fahrbahnkonstruktion in diesen Fällen die höchste Temperatur besitzen. Dass die Sensoren an der oberen Schicht oftmals tagsüber nicht die höchsten Temperaturen anzeigen, wird mit der fehlenden Ummantelung der oberen Sensoren begründet. Auffällig ist, dass die an der Oberfläche direkt liegenden Sensoren tagsüber nur sehr selten höhere Temperaturen erreichen als die tiefer liegenden Sensoren. Danach müsste eine ständige Abkühlung der Fahrbahnkonstruktion erfolgen. Bei einer Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Oberfläche zuerst. Die darunter liegenden Schichten sind kälter. Dass dieses Verhalten die vorliegenden Messwerten meistent nicht wiedergeben, wird durch die herausgebrochene Ummantelung der Sensoren zurückgeführt. Die Sensoren sind von der Luft umgeben und messen damit nicht die Temperatur der Fahrbahnoberfläche, sondern der Luft. Die Luft kann nicht soviel Strahlungsenergie aufnehmen wie die Fahrbahnoberfläche. Die Lufttemperatur ist tagsüber im Regelfall geringer als die Fahrbahnoberflächentemperatur. Die Differenzen zwischen den auf der Autobahn eingebauten Sensoren sind deutlich höher als zwischen den auf dem unbefahrenen Messfeld in Inzell eingebauten Sensoren (Bild 61). Entstanden auf dem Inzeller Messfeld bei über 60 % der Messzeitpunkte



**Bild 61:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen dem größten und kleinsten Messwert für die Fahrbahnoberflächentemperatur, gemessen von 12 Sensoren (4.805 Messzeitpunkte) im Vergleich mit den Differenzen der Sensoren aus der Untersuchung im Winter 1999/2000 auf dem Messfeld in der Außenstelle Inzell (vergleiche mit Bild 37)

Differenzen unter 0,4 Kelvin zwischen allen Sensoren, so waren es auf der Autobahn weniger als 2 %.

### 8.2.3 Bewertung der Ergebnisse

Als Ergebnis der Untersuchungen auf der Fahrbahn zeigt sich, dass die verwendete Vergussmasse für den Einbau der Sensoren und deren Nutzung unter Verkehrseinwirkung nicht geeignet ist. Die dadurch teilweise mehr oder weniger in die Luft über der Fahrbahnoberfläche ragenden Sensorspitzen lassen durch die undefinierte Position keine genauen Aussagen über das Verhalten der Sensoren zu.

Für einen direkten Einbau der sehr kleinen Sensoren an der unmittelbaren Fahrbahnoberfläche muss zunächst ein besserer Vergussstoff gefunden werden. Die mit einem geeigneten Vergussstoff eingebauten Sensoren müssen dann wieder im Verhalten gegenüber den Materialien der Fahrbahnkonstruktion und in der Wiederholgenauigkeit der Messergebnisse untersucht werden.

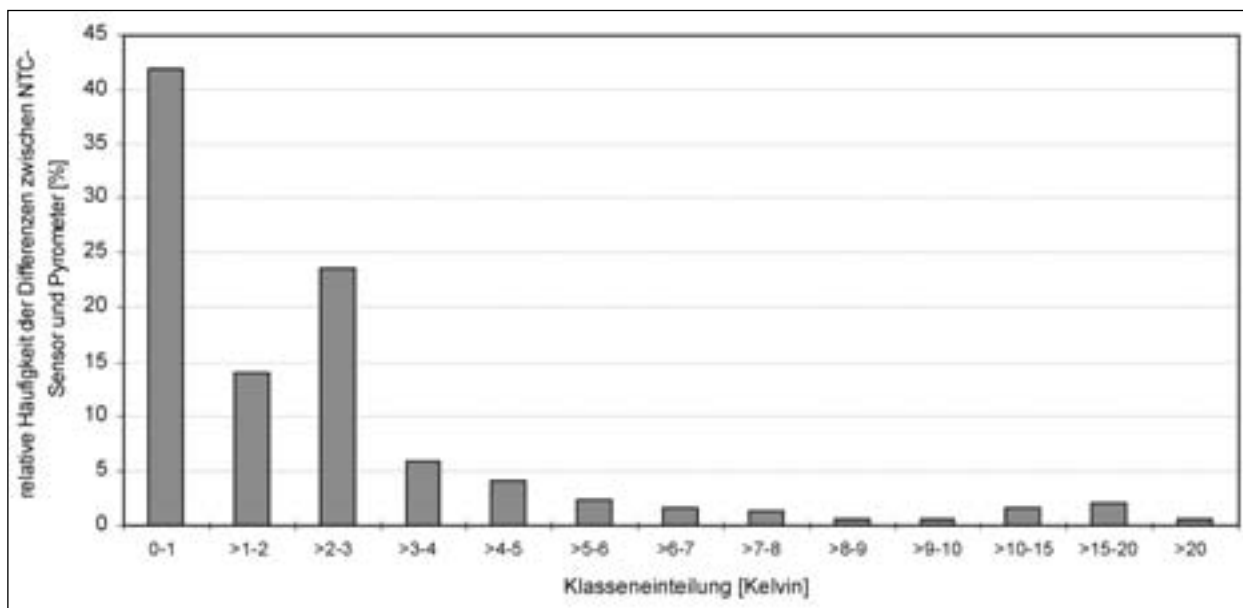
## 9 Vergleich zwischen Pyrometer und eingebauten Sensoren

Im Messzeitraum Winter 1997/98 war der Messfleck eines Pyrometers auf das Messfeld im Bereich unmittelbar neben der NTC-Sensorgruppe gerichtet. Bild 62 zeigt die Häufigkeitsverteilung der entstandenen Differenzen der Messwerte des Pyrometers und des einzigen noch intakten NTC-

Sensors. Im Vergleich zu den Differenzen zwischen allen eingebauten Sensoren sind diese wesentlich höher. Die angegebenen Temperaturen des Pyrometers sind in nahezu allen Fällen tiefer.

Die Verteilung der Differenzen ist wie bei den eingebauten Sensoren stark abhängig von den jeweiligen Witterungsbedingungen. Die höchsten Differenzen traten in Zeiträumen auf, in denen das Messfeld schneebedeckt war. Unter diesen Bedingungen wird allerdings nicht mehr die gleiche Temperatur gemessen. Während die eingebauten Sensoren unterhalb der Schneedecke messen, erfasst das Pyrometer die Temperatur auf der Schneedecke. Die Größe der Differenzen war von der Strahlung abhängig. Je wolkenfreier der Himmel nachts war, desto höhere Differenzen entstanden. Unter diesen Bedingungen wurden Differenzen zwischen beiden Sensoren bis über 20 Kelvin erreicht, die durch die hohe Reflexion (ca. 90 %) der Himmelsstrahlung an der Schneeoberfläche entstehen. Im Winter ist der unbedeckte Himmel sehr kalt (ca.  $-40\text{ °C}$ ). Bei der relativ freien Lage des Messfeldes wird ein hoher Anteil der gesamten Strahlungen auf die Messfläche durch die Himmelsstrahlung bestimmt.

Auf dem schneefreien Messfeld hat das Pyrometer auch bei hoher kurzweiliger Einstrahlung kleinere Messwerte angezeigt als die eingebauten Sensoren. Unter diesen Bedingungen wurde eigentlich der umgekehrte Fall erwartet, da die einfallende Strahlung die Oberfläche mehr erwärmt als die un-



**Bild 62:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen Pyrometer und NTC-Sensor an der Fahrbahnoberfläche (Messwerte vom 6. Januar bis 30. März 1998, 59.008 Werte)

mittelbare Asphaltsschicht darunter, in der die eingebauten Sensoren messen. Nach Auskunft des Herstellers sind aber die niedrigeren Messwerte des Pyrometers als richtig anzusehen. Dieses Messverhalten erklärt sich ebenfalls durch die Himmelsstrahlung. Die trockene Fahrbahnoberfläche reflektiert nach Angaben des Pyrometerherstellers ca. 10 % der „kalten“ Himmelsstrahlung und bewirkt somit die niedrigeren Werte des Pyrometers.

In den nächtlichen Zeiträumen mit einem geringen Wolkenbedeckungsgrad wichen die Messwerte des Pyrometers mit großer Häufigkeit rund 1 Kelvin und mehr von den Messwerten aller anderen Sensoren ab. Die hohen Differenzen werden auch in diesem Fall auf die „kalte“ Himmelsstrahlung zurückgeführt, wobei in diesem Fall die unmittelbare Fahrbahnoberfläche infolge der langwelligen Ausstrahlung tatsächlich eine etwas geringere Temperatur besitzen wird als die darunterliegenden Schichten. Die Differenzen werden aber wesentlich niedriger eingeschätzt.

Vom Hersteller wird das Pyrometer aufgrund der vorliegenden Ergebnisse für den vorgesehenen Einsatzzweck mit den sehr hohen Genauigkeitsanforderungen nicht empfohlen. Auf detaillierte Auswertungen wurde daher verzichtet.

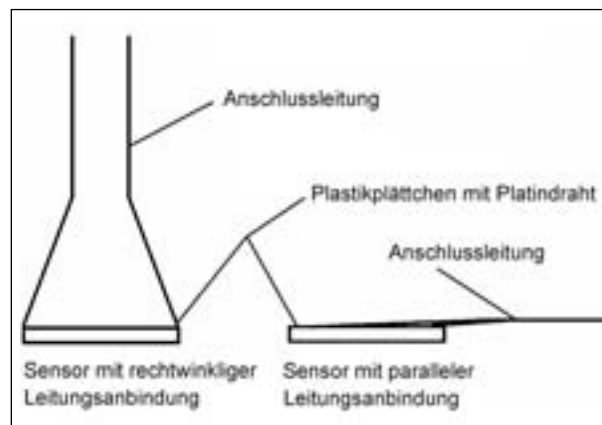
## 10 Messungen mit Sensoren für Abnahme- und Kontrollprüfungen

### 10.1 Sensorauswahl

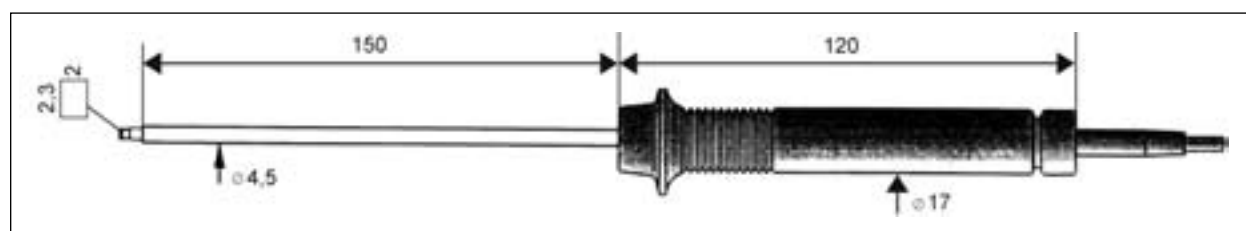
Messverfahren für die Abnahme- und Kontrollprüfungen von eingebauten GMA-Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur müssen ebenfalls den eingangs genannten Forderungen entsprechen. Hierzu soll zunächst auf die Erfahrungen zurückgegriffen werden, die bereits bei früheren Untersuchungen zu GMA gewonnen wurden [6], [7]. Bei diesen Untersuchungen kamen so genann-

te Handfühler zum Einsatz. Die Fühler arbeiten mit Pt-100-Sensoren (Bild 63), die auf einem kleinen Plastikplättchen (2,3 x 2 mm) aufgebracht sind und direkt auf die Fahrbahnoberfläche gesetzt werden können. Zwischen Sensor mit Plättchen und der Halterung sitzt eine Feder, die den Andruck des Sensors auf die Fahrbahn gewährleistet, wenn die Messung mit Hilfe eines Stativs durchgeführt wird.

Die bei den genannten früheren Untersuchungen aufgetretenen Messwertdifferenzen zwischen den aufgesetzten und eingebauten Sensoren führten zu der Vermutung, dass die Sensorhalterung (Hüllrohr) die Messergebnisse verfälscht. Deshalb kamen neben den genannten Handfühlern Pt-100-Sensoren in anderen Bauformen zum Einsatz. Diese waren ebenso auf einem kleinen Plastikplättchen befestigt, die Leitungen zur Auswerteelektronik waren ohne weitere Haltevorrichtungen ausgeführt. Dabei gab es zwei Versionen, die sich in der Anbindung der Leitung an das Plastikplättchen unterschieden. Sie war entweder rechtwinklig oder parallel zum Plättchen angeschlossen (Bild 64). Beide Versionen waren jeweils mit und ohne einer sehr dünnen Lackschutzschicht überzogen. Die Schutzschicht sollte eventuelle Einwirkungen von Feuchte vermeiden.



**Bild 64:** Schematische Darstellung von Pt-100-Sensoren auf Plastikplättchen mit unterschiedlichen Anbindungen der Anschlussleitungen



**Bild 63:** Pt-100-Handfühler (Hersteller: Service für Messtechnik Geraberg)

## 10.2 Ergebnisse von Messungen über einen längeren Zeitraum

Die aufsetzbaren Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur kamen erst ab Februar 1998 nur vereinzelt und ab März 1998 über mehrere Tage zum Einsatz, da die Vergleichsmessungen der eingebauten Sensoren nicht beeinträchtigt werden sollten. Diese Einsätze dienten für eine grundsätzliche Beurteilung der gewählten Sensorarten.

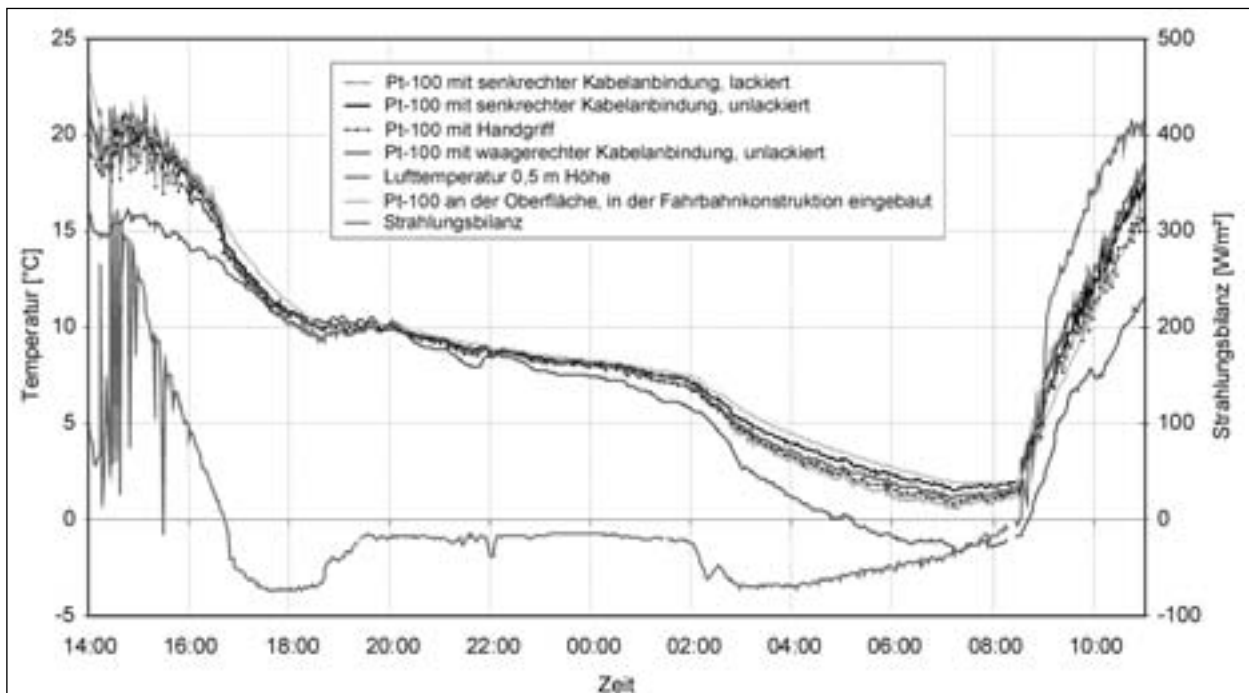
Für einen ersten Vergleich aller aufsetzbaren Sensoren nach Kapitel 10.1 wurden diese im geringen Abstand nebeneinander (ca. 5-10 cm) in einer Reihe auf die Fahrbahnoberfläche gesetzt, sodass sie sich durch Beschattung möglichst wenig beeinflussten. Als Haltevorrichtung dienten für die meisten Sensoren Stative. Die Sensoren mit einer rechtwinkligen Kabelanbindung zum Sensorplättchen (siehe Bild 64) besaßen einen guten Kontakt zur Fahrbahnoberfläche.

Im Gegensatz dazu war es bei den Sensoren mit einer parallelen Kabelanbindung sehr schwierig, einen sicheren Kontakt mit der Fahrbahnoberfläche herzustellen, ohne dass die Haltevorrichtung, z. B. ein Klebeband, die Temperaturmessung thermodynamisch beeinflusst. Es kam immer wieder vor, dass der Kontakt zur Fahrbahnoberfläche verloren ging. Hängt der Sensor auch nur wenige Zehntel Millimeter über der Oberfläche, wird bereits eine

Lufttemperatur gemessen, die sofort mehrere Zehntel Kelvin von der Fahrbahnoberflächentemperatur abweichen kann, sofern nicht ein thermisches Gleichgewicht zwischen Fahrbahnoberfläche und Luft besteht. Aus diesem Grund kamen diese Sensorbauarten nicht weiter zum Einsatz.

Die Messwerte der Sensoren mit senkrechter Kabelanbindung wichen im größeren Umfang als die eingebauten Sensoren voneinander ab, ebenso gaben sie andere Messwerte an als die eingebauten Sensoren. Bild 65 zeigt den Verlauf der Messwerte der verschiedenen Sensorbauarten über 21 Stunden im Vergleich. Die Messwerte in den strahlungsintensiven Zeiten führten zu wesentlich höheren Differenzen als in den Zeiten mit Werten der Strahlungsbilanz nahe null (20 bis 2 Uhr). Bei den dargestellten Verläufen ergeben sich in den häufig kritischen Morgenstunden (vor Sonnenaufgang!) Differenzen zwischen den aufgesetzten Sensoren mit über 1 Kelvin. Dieser Wert ist ein Vielfaches der geforderten zulässigen Toleranz von  $\pm 0,2$  Kelvin.

Versuche an anderen Tagen zeigten ähnliche Ergebnisse. Die Schlussfolgerung dieser Versuche ist, dass Referenzmessungen in dieser Form unter intensiven Strahlungsverhältnissen nicht möglich sind. Das gilt sowohl für kurz- als auch für langwellige Strahlung. Die Ursache für das Messverhalten wird im Aufsetzen der Sensoren gesehen, das eine zwangsläufige Beschattung mit erheblichen Aus-



**Bild 65:** Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur gemessen mit verschiedenen Sensorarten sowie der Lufttemperatur und Strahlungsbilanz über mehrere Stunden (19./20.2.1998)

wirkungen auf die Messung auch auf einen kleinen Messfleck von wenigen Millimetern Durchmesser, wie im vorliegenden Fall, bewirkt.

### 10.3 Kurzzeitige Messungen

Im Zeitraum Oktober bis Dezember 1998 fand eine weitere Reihe von Messungen mit aufsetzbaren Sensoren statt, bei denen ähnlich vorgegangen wurde wie später bei der Prüfung auf der Fahrbahn vorgesehen. Dabei wurden zwei Sensoren mit Handgriffen (siehe Bild 56, Kapitel 10.1) nicht wie in der Winterperiode zuvor über längere Zeit auf einen Messpunkt gesetzt, sondern nur kurz für eine einmalige Messung. Die Sensoren einschließlich der Auswertelektronik befanden sich bei allen Versuchen mehrere Stunden vor der Messung auf dem Messfeld, sodass eine Anpassung an die dort herrschenden thermischen Verhältnisse möglich war. Zum besseren Herstellen eines Kontaktes zwischen Sensor und Fahrbahnoberflächentemperatur wurde eine geringe Menge Wärmeleitpaste genutzt. Größere Verschmierungen mit der Paste, die über die eigentliche Kontaktfläche zwischen der Fahrbahnoberfläche und dem Sensor hinausgehen, wurden dabei vermieden.

Für den Vergleich zwischen aufgesetzten und eingebauten Sensoren kamen die Ergebnisse der eingebauten Pt-100 in Glas in die Auswertung, da in deren Bereich die Messungen mit den aufgesetz-

ten Sensoren erfolgten. Auf einen direkten Kontakt des aufgesetzten Sensors im unmittelbaren Bereich des eingebauten Sensors wurde verzichtet. Bei den Kontroll- oder Abnahmeprüfungen soll später ebenfalls ein Vergleich zwischen dem Messwert eines eingebauten Sensors, der meist in einem größeren Block untergebracht ist, und der eigentlichen Fahrbahnoberflächentemperatur erfolgen.

Um die genannten Fehler in den Zeiträumen der Globalstrahlung von vornherein zu vermeiden, fanden die meisten Messungen in Zeiträumen statt, in denen keine direkte Globalstrahlung auftrat. Dies war in den meisten Fällen in den frühen Morgenstunden gegeben.

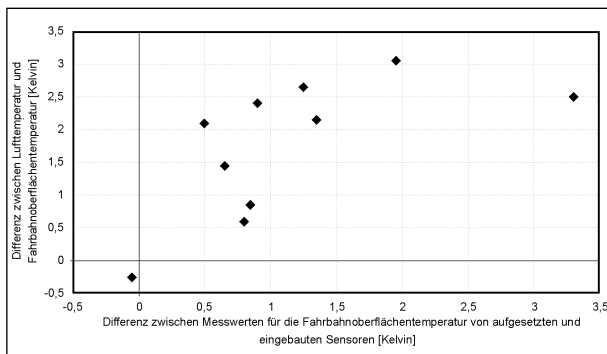
Die Messergebnisse in der Tabelle 3 zeigen wiederum erhebliche Differenzen zwischen den aufgesetzten und eingebauten Sensoren. Dabei wird die Tendenz erkennbar, dass die Höhe der Differenzen zwischen den Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur mit der Höhe der Differenz zwischen Luft- und Fahrbahnoberflächentemperatur steigt (siehe auch Bild 66).

Nur am 30.10.1998 herrschte eine Situation mit einem weitgehend thermischen Gleichgewicht im gesamten Umfeld (Fahrbahnoberflächen- und Lufttemperatur), bei der die verglichenen Sensoren auch gleiche Temperaturen für die Fahrbahnoberflächentemperatur gemessen haben. In den sonsti-

Datum	Zeit	Fahrbahnoberflächentemperatur Handfühler (Pt-100) [°C]	Eingebauter Pt-100 in Glas für die Fahrbahnoberflächentemperatur [°C]	Differenz zwischen eingebautem und aufgesetztem Sensor [Kelvin]	Lufttemperatur in 0,5 m Höhe [°C]	Differenz zwischen Luft- und Fahrbahnoberflächentemperatur [Kelvin]	Bewölkung [Achtel]
20.10.98	17:33	6,7	7,9	-1,2			
21.10.98	08:13	2,0	2,6	-0,6			0/8
22.10.98	08:18	3,5	3,9	-0,4			
23.10.98	08:13	3,8	4,3	-0,5	1,7	2,1	
23.10.98	08:20	3,5	4,5	-1,0			
30.10.98	08:00	5,6	5,6	0,0	5,9	-0,3	8/8
24.11.98	09:13	-2,0	1,3	-3,3	-4,5	2,5	5/8
25.11.98	09:13	-7,5	-5,6	-1,9	-10,6	3,1	1/8
26.11.98	07:20	-2,2	-1,3	-0,9	-3,0	0,9	8/8
27.11.98	07:20	-2,1	-1,3	-0,8	-2,7	0,6	8/8
30.11.98	07:25	-3,8	-2,4	-1,4	-5,9	2,2	8/8
01.12.98	07:50	-1,1	-0,4	-0,7	-2,5	1,5	8/8
02.12.98	07:43	-2,9	-2,0	-0,9	-5,3	2,4	9/8 Nebel
03.12.98	07:38	-5,0	-3,9	-1,1	-7,8	2,7	9/8 Nebel

**Tab. 3:** Ergebnisse bei Messungen mit aufgesetzten Sensoren auf dem Messfeld im Vergleich zu eingebauten Pt-100 in Glas für die Fahrbahnoberflächentemperatur





**Bild 66:** Korrelation zwischen Differenzen der Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur und der Differenz zwischen Lufttemperatur und Fahrbahnoberflächentemperatur in Zeiträumen mit hohem Wolkenbedeckungsgrad

gen Fällen treten Differenzen zwischen den Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur mit meist über ein Kelvin auf.

Die thermodynamischen Eigenschaften der Luft unmittelbar an der Fahrbahnoberfläche und am aufgesetzten Sensor beeinflussen den Messwert anscheinend erheblich. Ein weiterer Einfluss auf das ungleiche Ergebnis kann auch dadurch entstehen, dass die eingebauten Sensoren nicht die Temperatur unmittelbar an der Fahrbahnoberfläche messen und deshalb andere thermodynamische Einflüsse wirken als beim aufgesetzten Sensor.

Nach diesen Ergebnissen ist die Überprüfung eines eingebauten Sensors für die Fahrbahnoberflächentemperatur nur dann möglich, wenn ein weitgehendes thermisches Gleichgewicht im Umfeld des zu prüfenden Sensors herrscht. Eine eventuelle Eignungsprüfung für alle auftretenden Verhältnisse ist mit einem solchen Verfahren ausgeschlossen. Es ist nur eine Überprüfung der Kalibrierung möglich.

Ebenfalls können nach einem längeren Betrieb entstandene Abweichungen nachgewiesen werden, wie sie auch bei den Untersuchungen innerhalb dieses Projektes entstanden sind. Von den 12 Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur zeigten nach ca. 14 Monaten Betriebszeit zwei NTC-Sensoren falsche Werte. Von den 12 in der Messfläche eingebauten Sensoren für Temperatur in der Fahrbahnkonstruktion fielen 4 Sensoren aus (3 NTC und 1 Thermoelement). In nur einem Fall lag die Abweichung außerhalb des vorgegebenen geforderten Messbereichs (-25 °C bis +60 °C) [2] und wurde somit als Fehler dargestellt. In allen Fällen drifteten die Messwerte langsam von den anderen Messwerten ab. Die Abweichungen waren anfangs nur im Vergleich mit den anderen Messwerten erkennbar.

## 11 Empfehlungen für Prüfverfahren

### 11.1 Verfahren für Eignungsprüfungen

Die nachfolgenden Forderungen können aufgrund der ausstehenden Praxisuntersuchungen nur vorläufig aufgestellt werden. Nach der gängigen Praxis, dass die Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur in einem Sensorblock gemeinsam mit anderen Sensoren untergebracht sind, werden die möglichen zulässigen Differenzen zwischen dem zu prüfenden Sensor und dem Referenzsensor etwas größer als die aufgetretenen Differenzen der genannten Untersuchungen gewählt.

Bei Eignungsprüfungen ist der zu prüfende Sensor für die Fahrbahnoberflächentemperatur (bei Integration mehrerer Sensoren in einer Einheit der Sensorblock) in ein Messfeld durch den Anbieter einzubauen. Die Fahrbahnkonstruktion muss im Radius von 1 m um die Einbaustelle gleichmäßig aufgebaut sein. Ca. 50 cm neben der Einbaustelle sind 3 Thermoelemente mit einem Fühlerdrahtdurchmesser von 0,5 mm und 30 mm Länge als Referenzmesssystem an der Fahrbahnoberfläche gemäß Bild 9 einzusetzen.

Die Referenzthermoelemente müssen vor dem Einbau bei -15, 0 und +20 °C auf eine Genauigkeit von  $\pm 0,1$  Kelvin kalibriert sein.

Über eine Winterperiode vom 1. November bis 31. März sind mit den Sensoren im 2-Minuten-Takt zeitgleich die Fahrbahnoberflächentemperaturen zu erfassen. Zusätzlich müssen zeitgleich die Parameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Niederschlag, Strahlungsbilanz, Globalstrahlung, Untergrundtemperatur in 10 cm Tiefe und die Windgeschwindigkeit aufgezeichnet werden.

Von den drei Referenzsensoren ist der Sensor mit den plausibelsten Messwerten (höchster Wert bei steigender Strahlungsbilanz bzw. niedrigster Wert bei tiefer oder fallender Strahlungsbilanz) zu nutzen. Für die Bewertung ist die Differenz zwischen dem gewählten Referenzsensor und dem zu prüfenden Sensor zu bilden. Differenzen, die durch unterschiedliche Bedeckungen durch Feuchte, Schnee oder Eis bzw. durch Beschattungen entstanden sein können, sind zu eliminieren. Für die Auswertung sollten über 10.000 Messzeitpunkte von mindestens 20 Tagen zur Verfügung stehen, an denen die Fahrbahnoberflächentemperatur um den Gefrierpunkt pendelt.

Für eine bestandene Eignungsprüfung sollten die zu prüfenden Sensoren folgende maximalen Abweichungen zu dem Referenzsensor aufweisen:

- In den Zeiten ohne Globalstrahlung dürfen keine Differenzen über  $\pm 0,5$  Kelvin entstehen. Ausnahmen sind nur bei größeren Änderungen der Fahrbahnoberflächentemperatur ( $> 2$  Kelvin/h) zulässig. Sie dürfen nur bis 30 Min. nach den hohen Temperaturänderungen auftreten und  $\pm 1$  Kelvin nicht überschreiten.
- In den Zeiten mit Globalstrahlung größer  $0 \text{ W/m}^2$  sind je nach Höhe der Globalstrahlung und der Fahrbahnoberflächentemperatur folgende Differenzen zulässig:
  - Bei Globalstrahlungen bis  $300 \text{ W/m}^2$  dürfen die Differenzen  $\pm 1$  Kelvin nicht überschreiten. Ausnahmen sind nur bei größeren Änderungen der Fahrbahnoberflächentemperatur ( $> 2$  Kelvin/h) zulässig. Sie dürfen nur bis 30 Min. nach den hohen Temperaturänderungen auftreten und  $\pm 1,5$  Kelvin nicht überschreiten.
  - Bei Globalstrahlungen über  $300 \text{ W/m}^2$  und Fahrbahnoberflächentemperaturen unter und einschließlich  $+6 \text{ }^\circ\text{C}$  dürfen die Differenzen  $\pm 1,5$  Kelvin nicht überschreiten. Ausnahmen sind nur bei größeren Änderungen der Fahrbahnoberflächentemperatur ( $> 2$  Kelvin/h) zulässig. Sie dürfen nur bis 30 Min. nach den hohen Temperaturänderungen auftreten und  $\pm 2$  Kelvin nicht überschreiten.
  - Bei einer Fahrbahnoberflächentemperatur über  $+6 \text{ }^\circ\text{C}$  dürfen die Differenzen maximal  $\pm 3$  Kelvin betragen.

## 11.2 Verfahren für Abnahme- und Kontrollprüfungen

Für die Abnahme- und Kontrollprüfungen ist ein Handfühler entsprechend dem Bild 63 (Kapitel 10.1) zu nutzen. Dieser ist senkrecht auf die Fahrbahnoberfläche aufzusetzen. Für die bessere Wärmeübertragung muss zwischen Sensor und Fahrbahnoberfläche eine dünne durchgehende Schicht Wärmleitpaste vorhanden sein.

Bei den Messungen muss zwischen Fahrbahnkonstruktion, zu prüfendem Sensor und Handfühler ein thermisches Gleichgewicht bestehen. Die Messungen dürfen nur unwesentlich durch Strahlung be-

einflusst werden. Günstige Voraussetzungen dafür bestehen, wenn zu Zeiten des Sonnenaufganges bei vollständig bedecktem Himmel gemessen wird. Die Bedeckung sollte möglichst schon 4-6 Stunden vor dem Messzeitpunkt bestehen.

Die Differenz zwischen Referenzsensor und zu prüfendem Sensor sollte unter diesen Bedingungen nicht über  $\pm 0,5$  Kelvin betragen.

## 12 Zusammenfassung und Ausblick

Die Fahrbahnoberflächentemperatur ist bei vorhandener Feuchte bzw. vorhergesagtem Niederschlag der wichtigste Parameter, der für eine Glättewarung oder Glättavorhersage benötigt wird. Aufgrund der langen vor allem nächtlichen Zeiträume, in denen sich die Fahrbahnoberflächentemperatur nur sehr wenig ändert, müssen an Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur hohe Genauigkeitsanforderungen gestellt werden, um eine zeitgenaue Glättavorhersage erreichen zu können.

Frühere Messungen mit verschiedenen in Betrieb befindlichen Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur ergaben, dass die unter vergleichbaren Bedingungen entstandenen Differenzen der gemessenen Temperaturen für die zeitgenaue Vorhersage zu hoch sind [6]. Ein Nachweis, welcher der untersuchten Sensoren der wahren Temperatur am nächsten kam, konnte aufgrund fehlender Referenzmessverfahren nicht geführt werden.

Im Rahmen dieser Untersuchung war das Verhalten von möglichen Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur unter Einfluss der verschiedenen durch Witterungsverhältnisse bestimmten Energieströme an der Fahrbahnoberfläche zu beurteilen. Als Ziel sollten Festlegungen für genaue Referenzmessverfahren getroffen werden, mit denen Eignungsprüfungen unter allen meteorologischen Praxisbedingungen an neu entwickelten Sensoren bzw. Abnahme- und Kontrollprüfungen an eingebauten Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur vorgenommen werden können.

Da kein eingeführtes Messverfahren bekannt ist, mit dem die Temperatur an der vergleichsweise sehr rauen Fahrbahnoberfläche unter den vielfältigen meteorologischen Einflüssen mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,2$  Kelvin gemessen werden kann, soll-

te zunächst das Verhalten von Sensoren verschiedener handelsüblicher Bauarten unter gleichen meteorologischen Bedingungen beurteilt werden.

Dafür wurde ein spezielles Messfeld auf dem Hof der Bundesanstalt für Straßenwesen, Außenstelle Inzell, geschaffen, dessen Konstruktion thermodynamisch der Befestigung von Autobahnen in Asphaltbauweise entspricht. Dieser Ort wurde gewählt, um Einflüsse auf dem Messfeld durch Verkehr und Taustoffe zu vermeiden.

Auf der Messfläche wurden im Herbst 1997 jeweils drei Sensoren vier verschiedener Bauarten möglichst nahe an der Fahrbahnoberfläche eingesetzt, die für spätere Eignungsprüfungen geeignet erschienen. Der Vergleich von Messwerten baugleicher Sensoren sollte zur Beurteilung möglicher einbaubedingter Unterschiede dienen. Die Anordnung der Sensoren im Messfeld wurde so gewählt, dass alle möglichst gleichen Einflüssen der verschiedenen Energieströme an der Fahrbahnoberfläche unterlagen.

Für die Abnahme- und Kontrollprüfungen fanden Messungen mit verschiedenen aufsetzbaren Sensoren auf dem Messfeld statt. Zusätzlich kam ein Pyrometer für die Erprobung eines berührungsfreien Messverfahrens zum Erfassen der Fahrbahnoberflächentemperatur zum Einsatz. Mit einer Wetterstation wurden verschiedene Parameter gemessen, mit denen sich die Energieströme zur Fahrbahnoberflächentemperatur einschätzen ließen (Strahlung, Lufttemperatur, Wind, Niederschlag u. a.).

Eine erste Messreihe mit den fest in der Fahrbahnkonstruktion installierten Sensoren fand in der gesamten Winterperiode 1997/98 statt. Die aufsetzbaren Sensoren kamen nur zeitweise zum Einsatz. Tagsüber wurden Aufzeichnungen über visuelle Beobachtungen des Messfeldzustandes (u. a. trocken, feucht, schneebedeckt) geführt. Aufgrund der umliegenden Berge gab es teilweise kurzfristige unterschiedliche Beschattungen.

Entgegen den Erwartungen traten zwischen allen eingebauten Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur Messwertdifferenzen bis ca. 2 Kelvin auf, die damit wesentlich über die vorgesehenen Genauigkeitsanforderungen für Glättemeldeanlagen hinausgehen. Die hohen Differenzen ( $> 0,5$  Kelvin) entstehen vor allem bei hohen Werten der Globalstrahlung. Insgesamt sind diese Differenzen aber um die Hälfte geringer als die Differen-

zen zwischen Sensoren von Glättemeldeanlagen bei den vorherigen Vergleichsuntersuchungen [6].

Da bereits die Messwerte von eingebauten Sensoren gleicher Bauart in nahezu gleicher Höhe differieren wie von Sensoren unterschiedlicher Bauart, hat nicht nur die Bauart, sondern auch die Lage der Sensoren zur Fahrbahnoberfläche die Ergebnisse maßgebend beeinflusst. Der unterschiedliche Abstand zur Fahrbahnoberfläche ist durch Fertigungstoleranzen bei der Herstellung der Sensoren und toleranzbehafteten Einbau bedingt.

Ausgehend von den Ergebnissen der Winterperiode 1997/98 wurden im Herbst 1999 jeweils 3 Pt-100 und Thermoelemente im Messfeld eingebaut, die aufgrund einer anderen Kabelanbindung bzw. einer kleineren Schutzummantelung näher an der Fahrbahnoberfläche gesetzt werden konnten. Mit diesen Sensoren und einigen noch vorhandenen Sensoren von 1997 wurden im Winter 1999/2000 Messreihen aufgenommen.

Die Pt-100 haben nicht zuverlässig gearbeitet. 5 von 6 Sensoren fielen ganz oder zeitweilig aus. Die Ursache lag wahrscheinlich an undichten Isolierungen der Sensoren, wodurch Feuchte die Messwerte beeinflusst hat. Die Thermoelemente zeigten im Vergleich zu den 1997 im Messfeld Inzell eingebauten Sensoren etwas abweichende Messwerte an. Bei steigender Globalstrahlung geben sie im Regelfall die höheren und bei fallender Globalstrahlung bzw. nächtlicher Ausstrahlung die niedrigeren Werte an. Diese entsprechen nach theoretischen Überlegungen eher den wahren Temperaturen.

Zwischen den Thermoelementen traten durch ungleiche Lage weiterhin Differenzen bei erhöhter Globalstrahlung auf, die über das Maß der bisherigen Genauigkeitsanforderung für Glättemeldeanlagen hinausgehen.

12 Thermoelemente mit einem Messfühler-Durchmesser von 0,5 mm wurden im Herbst 2000 für eine Haltbarkeitserprobung auf einem befahrenen Autobahnabschnitt eingebaut. Das Einbauverfahren war das gleiche wie auf dem Messfeld in der Außenstelle Inzell, nur dass jeweils 3 Sensoren in unterschiedlichen Positionen zur Fahrbahnoberfläche (unmittelbar an der Oberfläche sowie etwa 1, 2 und 3 mm darunter) eingesetzt waren. Nach etwa 6 Monaten hatte sich die Vergussmasse an den Spitzen der Sensoren gelöst, sodass sie keinen Kontakt mehr zu dem Fahrbahnmaterial hatten und nur in der Luft standen. Unter diesen Bedingungen

ist mit ungenauen Messwerten für die Fahrbahnoberflächentemperatur zu rechnen. Für einen Einsatz dieser Sensoren unter Verkehrseinwirkung muss ein anderes Einbauverfahren gefunden werden.

Das eingesetzte Pyrometer hat sich auf dem Messfeld nach den vorliegenden Ergebnissen als Referenzmesssystem nicht bewährt. Bei einem weitgehend freien Umfeld beeinflussen andere Strahlungsquellen (z. B. Himmel) infolge Reflexionen an der Messfeldoberfläche die Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur negativ.

Versuche mit aufgesetzten Sensoren, wie sie im Rahmen von Abnahme- und Kontrollprüfungen eingesetzt werden sollen, zeigen ebenfalls Differenzen bei der Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur, die über die geforderten Anforderungen hinausgehen. Nach den vorliegenden Ergebnissen sind genaue Messungen für den vorgesehenen Zweck bei einem weitgehenden thermischen Gleichgewicht im Umfeld des Messpunktes möglich. Für Abnahme- und Kontrollprüfungen wurde somit ein genaues, aber nur eingeschränkt nutzbares Messverfahren gefunden.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass auch mit speziellen Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur die bisher gestellten Anforderungen mit  $\pm 0,2$  Kelvin unter Praxisbedingungen nicht realisierbar sind. Diese waren unter dem Gesichtspunkt einer genauen Glättevorhersage gewählt worden, ohne die messtechnischen Möglichkeiten einzubeziehen.

In Zeiten ohne Globalstrahlung mit geringen Temperaturänderungen sind  $\pm 0,5$  Kelvin Genauigkeit möglich. Je nach Höhe der Globalstrahlung und schnellem Temperaturwechsel werden die Messwerte ungenauer. Im Bereich der kritischen Temperaturbereiche für die Glättebildung müssen bis zu  $\pm 2$  Kelvin Abweichungen zwischen verschiedenen Sensoren hingenommen werden.

Für die Prüfung von Sensoren für die Fahrbahnoberflächentemperatur wurden Vorschläge erarbeitet, die in den Technischen Lieferbedingungen oder Normen für Glättemeldeanlagen eingearbeitet werden können.

Mit den gefundenen Prüfungsverfahren ist eine bessere Qualitätskontrolle neu entwickelter bzw. vorhandener Bodensonden für Glättemeldeanlagen möglich, mit denen sich wiederum die Glätte zeitgenauer als bisher vorhersagen lässt. Damit

können die Kosten für den Winterdienst gesenkt sowie die Leistungsfähigkeit und Sicherheit der Straßen unter winterlichen Verhältnissen erhöht werden.

## Literatur

- [1] Deutscher Wetterdienst: Konzept eines Straßenzustands- und Wetterinformationssystems (SWIS), Offenbach, Oktober 1991
- [2] Betriebstechnische Anforderungen an Glättemeldeanlagen, Entwurf November 1996
- [3] ALBRECHT, H., CROCE, K., KOHLER, A.: Handbuch für den Winterdienst, Kirschbaumverlag 1978
- [4] Autorenkollektiv: Meyers kleines Lexikon „Meteorologie“, Meyers Lexikonverlag, Mannheim 1987
- [5] BACH, V.: Verbesserung der Straßenwetterprognose durch Einbeziehung der Messwerte von Glättefrühwarnsystemen, Abschlussbericht zum Forschungsauftrag FA 03.205R89H des Bundesministers für Verkehr, TH Darmstadt 1991
- [6] BADEL, H.: Praxisgerechte Anforderungen an Glättemeldeanlagen, Abschlussbericht zum BAST-Projekt 92715, Inzell 03/1996
- [7] BADEL, H.: Straßenbauliche und verkehrsbedingte Einflüsse auf die Fahrbahnoberflächentemperatur in Bezug auf die winterliche Glättebildung, Abschlussbericht zum BAST-Projekt 92714, Inzell 09/1996
- [8] BLASER, P., LINK, P., LÜDIN, P., RYF, W.: Einfluss der Ausbringung von Streusalz auf das benachbarte und entferntere Grundwasser, Forschungsbericht Nr. 386, Peter Link AG, Dr. Heinrich Jäckli AG, 1998
- [9] FLEISCH, J., ULITZSCH, M., GREGOR, P.: Fugenöffnungsweiten und Temperaturverteilung an dicken Betondecken über Tragschichten ohne Bindemittel, Abschlussbericht zum BAST-Projekt 93741, Inzell/Berlin März 1997
- [10] GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht, Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig 1950

- [11] HANKE, H., LEVIN, C.: Wirksamkeit des Straßenwinterdienstes auf die Verkehrssicherheit und die Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufes, Abschlussbericht zum Forschungsauftrag FA 03.174G85H des Bundesministers für Verkehr, TH Darmstadt 1987
- [12] KUTTER, M., NIEBRÜGGE, L.: Erfahrungen mit Glatteismeldegeräten beim Landschaftsverband Westfalen-Lippe, Straße und Autobahn, Heft 12/85, S. 498–503
- [13] RUESS, B.: Salz- oder Splittstreuung im Winterdienst, Forschungsauftrag 4/95 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute (VSS), Januar 1998
- [14] SCHARSCHING, H.: Schlussbericht Glatteisfrühwarnsysteme, Test 1990/91, Mödling 12/91

## **Teil 2**

### **Referenzmessverfahren für die Prüfung von Niederschlagssensoren**

Horst Badelt

Jürgen Breitenstein

Simon Scheurl

Gerd Häusler



## 1 Einleitung

Die Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Straßennetzes und die Gewährleistung der Verkehrssicherheit im Winter sind wichtige Aufgabengebiete des Unterhaltungs- und Betriebsdienstes. Winterliche Straßenverhältnisse führen im Vergleich mit sommerlichen Straßenverhältnissen zu erheblichen volkswirtschaftlichen Mehrkosten [11]. Vorrangiges Ziel des Winterdienstes ist deshalb, winterliche Glätte durch vorbeugende Maßnahmen zu vermeiden oder entstandene Glätte schnell zu beseitigen.

Unter dem Druck von knappen Haushaltsmitteln müssen aber auch die Kosten für den Winterdienst verringert werden. Neue organisatorische Maßnahmen und der verstärkte Einsatz von moderner Technik sollen den Winterdienst rationeller und damit wirtschaftlicher gestalten. Gleichzeitig führt die Optimierung der Maßnahmen zu einem geringeren Einsatz von Streustoffen. Damit werden auch Umweltbelastungen verringert, die bei umfangreicher Verwendung von Streustoffen bei winterlichen Verhältnissen auftreten können [10], [13].

Eine wesentliche Rationalisierung des Winterdienstes stellt die genaue Vorhersage einer winterlichen Glättebildung dar. Dafür dient das im Autobahnnetz bundesweit eingeführte Straßenzustands- und Wetterinformationssystem (SWIS) [1]. Ein Bestandteil des SWIS sind Glättemeldeanlagen (GMA), mit deren Sensorik die Parameter der Glättebildung (Fahrhahnoberflächentemperatur, Fahrhahneuchte, Luftfeuchte, Niederschlag u. a.) unmittelbar auf, in und an der Fahrhahne erfasst werden.

Diese Messergebnisse sind einerseits eine Grundlage für längerfristige Vorhersagen einer möglichen Glättebildung durch meteorologische Dienste zur besseren Personalplanung für Winterdienstmaßnahmen und dienen andererseits als eine unmittelbare Entscheidungshilfe für den gezielten Beginn einer Winterdienstmaßnahme. Mit Hilfe der Glättemeldeanlagen konnten erste wesentliche Verbesserungen der bisherigen Winterdienstpraxis erreicht werden [6], [12]. Das Anlagennetz wird weiter ausgebaut, vorhandene Sensoren müssen wegen Verschleißes oder Defektes ersetzt werden.

Ein wesentlicher Parameter für die Glättevorsage ist der Niederschlag. Mit ihm lässt sich die Zufuhr neuer Wassermengen ableiten, die auf der Fahrhahnoberfläche nach einem Gefrieren oder unmittelbar als Eisregen oder Schnee zu neuer Glätte führen.

Neben der Erkennung der Niederschlagsart ist die Niederschlagsintensität eine wichtige Angabe. Sie kennzeichnet eine Niederschlagshöhe bezogen auf ein Zeitintervall (z. B. mm/h). Zum einen können mit diesem Parameter vorhandene Wasserfilmdicken auf der Fahrhahne besser eingeschätzt werden. Zum anderen sind gegebenenfalls Einschätzungen über das Wegspülen von Tausalz von der Fahrhahne möglich. Mit beiden Kenntnissen sollen in Zukunft genauere Angaben für die notwendige aufzutragende Tausalzstreuendichte möglich werden.

Die Niederschlagsintensität ist auch ein wesentlicher Parameter bei der Warnung der Kraftfahrer vor nassen Fahrhahnoberflächen mit wesentlich geringeren Griffigkeiten. Streckenbeeinflussungsanlagen zeigen zurzeit aufgrund fehlender hinreichend zuverlässiger Sensoren für die Messung des direkten Fahrhahnezustandes Warnungen vor Rutschgefahr und/oder eingeschränkte Höchstgeschwindigkeiten anhand gemessener Niederschlagsintensitäten an [3], [8]. Dafür sind die Niederschlagsintensitäten in einem Zeitintervall von einer Minute zu messen.

Sensoren für die Niederschlagsintensität über ein kurzes Messintervall und mit einer hohen Messwertauflösung sind erst seit wenigen Jahren erhältlich. Andere Anwender mit den ähnlichen Anforderungen für eine kurzzeitige und genaue Messung der Niederschlagsintensität sind nicht bekannt. Eine Prüfung dieser Sensoren [9] hat erhebliche Abweichungen zwischen zeitgleich erzielten Messwerten von verschiedenen Messverfahren ergeben.

Mit dieser Untersuchung soll deshalb ein Verfahren für die Prüfung von Sensoren für die Niederschlagsintensität entwickelt werden. Damit soll in Zukunft sichergestellt werden, dass beschaffte Sensoren für diesen Parameter für die Glättevorsage im Winterdienst und für die Warnung von Kraftfahrern vor erhöhter Nässegefahr zuverlässige Messwerte liefern.

## 2 Bisherige Anforderungen an Niederschlagssensoren

Für Glättemeldeanlagen werden nach den „Betriebstechnischen Anforderungen für Glättemeldeanlagen“ [2] nur Anzeigen „Niederschlag ja/nein“ mit der Unterscheidung zwischen Regen oder Schnee gefordert. Ausgeführte Glättemeldeanlagen



gen zeigen in der Regel die Messwerte entsprechend dieser Forderung an. Darüber hinausgehende Forderungen bestehen für den Einsatz in Glättemeldeanlagen bisher nicht [7].

Für Streckenbeeinflussungsanlagen kommen häufig die gleichen Sensoren wie in Glättemeldeanlagen zum Einsatz, die aber in diesen Fällen die Niederschlagsintensität angeben. In dem Merkblatt „Nässeerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen“ [3] wird die Genauigkeit jedes arithmetischen Mittelwertes über eine Minute zur Bestimmung der Niederschlagsintensität bis 0,5 mm/h mit  $\pm 0,1$  mm/h, bei Werten größer 0,5 mm/h mit  $\pm 20$  % des Messwertes gefordert.

Für beide Einsatzzwecke ist die Niederschlagsintensität innerhalb einer kurzen Zeitspanne von Interesse, weil nur mit diesen Werten eine unmittelbare Auswirkung auf den tatsächlichen Fahrbahnzustand abgeleitet werden kann. Ein kurzer intensiver Schauer senkt die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche kurzzeitig erheblich mehr und fließt durch die Fahrbahnneigung schneller ab als ein langanhaltender Sprühregen, obwohl für beide Niederschlagsformen eine gleiche Niederschlagsintensität über eine längere Zeitspanne angegeben werden könnte. Als kurze Zeitspanne wird für den vorgesehenen Einsatz eine Minute angesehen. Bei intensiven Niederschlägen (Platzregen) werden in Streckenbeeinflussungsanlagen auch Messintervalle von 15 Sekunden gefordert [3].

Die Intensitäten müssen sowohl für flüssigen als auch für festen Niederschlag angegeben werden. Der feste Niederschlag ist in ein Äquivalent der entsprechenden Wasserfilmhöhe umzurechnen. Das Messergebnis muss für die unmittelbare Umgebung repräsentativ sein.

### 3 Technischer Stand der Sensorik für die Niederschlagsintensität

Die Sensoren für die Niederschlagsintensität lassen sich in zwei wesentliche Bauarten unterteilen:

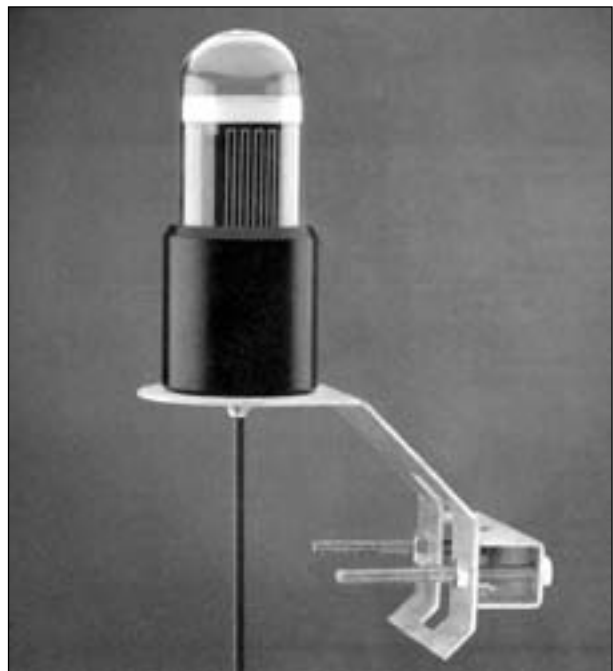
- a) Optoelektronische Sensoren, die mit verschiedenen Formen des Lichtschranken- oder Lichtstreuungsprinzips den Niederschlag quantitativ und qualitativ erkennen (z. B. Sensoren der Firmen Boschung, MickS [siehe Bild 1], Lufft [siehe Bild 2], Metek). Die Sensoren strahlen Wellen aus, die je nach Form, Größe, Fallge-

windigkeit und/oder Anzahl der fallenden Regentropfen bzw. Eiskristalle unterschiedlich reflektiert oder transmittiert werden. Die beeinflussten Strahlen werden vom Sensor wieder aufgefangen und nach vorgegebenen Algorithmen ausgewertet. Die dabei eingesetzten Wellenlängen der ausgesendeten Strahlen sind unterschiedlich (sichtbares Licht, Infrarot, Radar).

- b) Auffangsensoren, die auf einer definierten Fläche in unterschiedlichen Zeitspannen einen Niederschlag auffangen und quantitativ anhand von Wägung (z. B. Firma Ott, siehe Bild 3), Än-



**Bild 1:** IRSS88-Sensor (Lieferant: Firma MickS) nach dem Lichtschrankenprinzip; die Niederschlagsintensität wird nach Anzahl, Größe und Fallgeschwindigkeit der Niederschlagspartikel bestimmt



**Bild 2:** Radar-Regen-Sensor (R<sup>2</sup>S) der Firma Lufft, die Niederschlagsintensität wird aus der Tropfengröße und der Fallgeschwindigkeit berechnet

derung elektrischer Leitungswerte (z. B. elektrische Kapazität, Firma Vaisala) oder Volumeneinheiten messen (z. B. Firmen Thies, Lambrecht, Friedrichs [siehe Bild 5], Lufft).

Einzelne Hersteller kombinieren auch verschiedene Messverfahren für ein Aussageergebnis (z. B. Firma Vaisala, siehe Bild 4).

Die Messwerte aller Sensoren können auf Wunsch des Anwenders in digitaler Form angeboten werden. Dabei werden häufig für die Wetterbeschreibung oder Wettervorhersage pauschale Begriffe genutzt, die sich auf die Zeitdauer oder die Art des

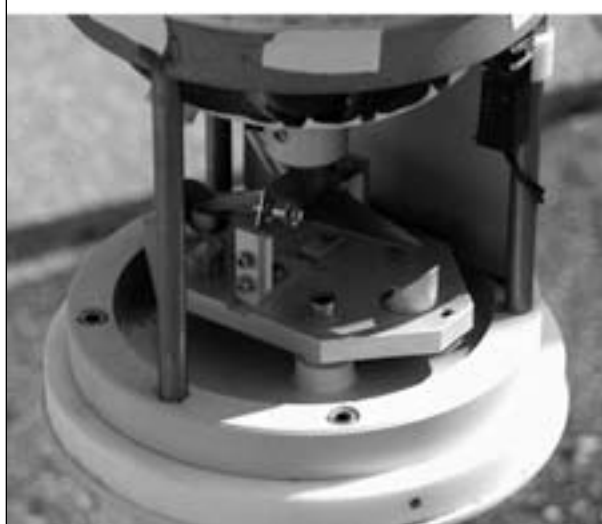
Niederschlags beziehen (Regenschauer, Sprühregen, lang anhaltender Regen u. v. a., siehe Tabelle 4680 für automatische Erkennungen der World Meteorological Organization – WMO). Da diese Begriffe keinen genauen Zahlenangaben entsprechen, sind sie für die Glätte- und Kraftfahrerwarnung zu ungenau. Die meisten beschriebenen Verfahren



**Bild 3:** Sensor nach dem elektronischen Wägeprinzip der Firma Ott



**Bild 4:** Present Weather Sensor PWD 11 der Firma Vaisala, Kombination eines Sensors nach dem Lichtstreuprinzip mit einem kapazitiven Sensor (helles Plättchen auf dem rechten Kasten)



**Bild 5:** Niederschlagssensor nach dem Sammel-Arbeitsprinzip mit Kippwaage (oben: Gesamtansicht, unten: Kippwaage unterhalb des Sammelbehälters im geöffneten Zustand)

geben beim Einsatz im Straßenwesen aber auch direkte Zahlenwerte an. Die Angaben zur Messwertempfindlichkeit und -genauigkeit sind unterschiedlich. Messwertaufösungen sind bei verschiedenen Sensoren bis 0,01 mm/h möglich.

Niederschlagsintensitäten in mm/h werden hauptsächlich für wasserwirtschaftliche Zwecke angegeben. Die hierfür häufig genutzten Sensoren nach dem Hellmann-Prinzip [5] werden als bewährte Vorrichtungen schon seit vielen Jahren eingesetzt. Sie sammeln den Niederschlag in einem Topf mit einer Öffnung von 200 cm<sup>2</sup> Fläche. Der Topf ist ca. 30 cm tief, damit bei intensivem Niederschlag keine Tropfen aus dem Topf herausspringen können. Das Wasser fließt einer darunterliegenden Messvorrichtung, z. B. Kippwaage, zu, die nach einer definierten zugeflossenen Menge einen Zählimpuls auslöst (Bild 5). Das Zusammenfließen kann je nach Niederschlagsintensität mehrere Minuten dauern.

Für wasserwirtschaftliche Messungen stellen diese längeren Messintervalle kein Problem dar. Sie sind für eine Anwendung im Straßenwesen ebenfalls zu ungenau.

#### 4 Problemstellung und Entwicklungsziel

Verfahren für eine objektive quantitative Prüfung von Sensoren für die kurzzeitige Niederschlagsintensität sind nicht bekannt. Der Deutsche Wetterdienst prüfte bisher Niederschlagssensoren hauptsächlich nach subjektiven Beobachtungen [14]. Dabei werden die Kriterien der WMO-Tabelle 4677 für Beobachtungen durch Personal ähnlich der WMO-Tabelle 4680 herangezogen. Für den Einsatz im Straßenwesen, insbesondere für Streckenbeeinflussungsanlagen, sind diese WMO-Einteilungen zu ungenau.

Für eine Prüfung ausgeführter optoelektronischer Sensoren wurden auf der BAB A 8 im Rahmen einer Abnahmeprüfung Versuche für mögliche Referenzmessungen der Niederschlagsintensität durchgeführt [9]. Dabei wurde in Anlehnung an Vereinbarungen der World Meteorological Organisation (WMO) der Niederschlag auf einer Fläche von 200 cm<sup>2</sup> (Schale/Scheibe) zeitgleich zu den Messungen des Sensors innerhalb einer Minute aufgefangen und anschließend gewogen. Der Abstand zwischen der Auffangschale und dem optoelektronischen

Sensor war kleiner 5 m. Die Niederschlagsintensitäten betragen bei den Messungen zwischen 0,2 und 1,6 mm/h.

Zwischen den zeitgleich ermittelten Ergebnissen bei diesen Vergleichsmessungen für die Niederschlagsintensität ergaben sich nur wenige Übereinstimmungen. Es traten Differenzen von bis über 400 % auf. Die Ursache für die Abweichungen wird hauptsächlich auf die geringe Repräsentativität der Messwerte zurückgeführt. Das optoelektronische Verfahren betrachtete eine deutlich kleinere Fläche bei der Messung als das angeführte Referenzmessverfahren mit 200 cm<sup>2</sup>.

Auch zwischen zwei zeitgleich aufgenommenen Messwerten mit dem Referenzmessverfahren traten vereinzelt Abweichungen bis etwa 100 % auf. Dies war aber in der Regel bei kleineren Niederschlagsintensitäten unter 0,3 mm/h der Fall.

Ein Niederschlag fällt nach subjektiven Beobachtungen sehr ungleichmäßig und muss daher für eine durchschnittliche Aussage auf einer größeren Fläche und/oder über eine längere Zeitspanne aufgefangen werden. Umfangreichere Untersuchungen, die diese Annahme bestätigen, fanden im Rahmen dieser vorliegenden Untersuchung nicht statt.

Eine Alternative zu einem Referenzmessverfahren wäre eine Prüfvorrichtung, mit der Niederschlagssensoren mit einer definierten Niederschlagsintensität beaufschlagt werden. Sie wurde im Wesentlichen aus den beiden folgenden Gründen verworfen:

- Es wird als technisch schwierig angesehen, einen Regen entsprechend seinen natürlichen Gegebenheiten schon auf einer kleinen Fläche (ca. 0,5 x 0,5 m) zu simulieren.
- Sensoren für die Niederschlagsintensität, die mit Strahlungsreflexionen arbeiten, bestimmen im Einzelfall in der weiteren Umgebung von mehreren Metern des Sensors den Niederschlag. Diese betrachteten Räume können nicht definiertem künstlichem Niederschlag ausgesetzt werden.

Mit dem Projekt ist daher ein Verfahren für Referenzmessungen zu ermitteln, das die Messung einer repräsentativen Niederschlagsintensität innerhalb einer Minute zulässt und mit möglichst hoher Genauigkeit ( $\pm 0,1$  mm/h) quantitativ angibt.

Ausgehend aus den Ergebnissen mit dem Referenzmessverfahren sind Anforderungen an die

Sensoren für Streckenbeeinflussungs- und Glättemeldeanlagen abzuleiten und eine Prüfvorschrift für die Abnahme dieser Sensoren zu erarbeiten.

## 5 Referenzmessung für die Niederschlagsintensität

### 5.1 Verfahrensauswahl

Für eine plausible Wahrnehmung bieten sich als Referenz für die Niederschlagsintensität Verfahren an, bei denen das Volumen oder die Masse des Niederschlags bestimmt wird.

Aufgrund der geforderten kurzzeitigen Niederschlagsintensität über eine Minute ist eine Volumenmessung aufgrund der sehr kleinen Mengen ungeeignet. Die aufgefangenen Wassertropfen müssten in einer Volumenmesseinrichtung zusammenfließen, was aufgrund der geringen Anzahl und Größe der Tropfen in der geforderten kurzen Zeiteinheit nicht erfolgt (siehe Messvorrichtung nach HELLMANN Bild 5 im Kapitel 3).

Die hohe Dichtekonstanz von Wasser lässt dagegen auf einer definierten Fläche aufgefangene Wassermassen ohne Probleme in eine Niederschlagsintensität  $z$  mit der allgemein genutzten Einheit „mm/h“ umrechnen.

$$\frac{xg \times 1.000 \times 60}{y\text{mm}^2 \times 1 \text{ min}} = z \frac{\text{mm}}{\text{h}}$$

( $x$  = aufgefangene Niederschlagsmasse in g,  $y$  = Auffangfläche in  $\text{mm}^2$ )

Dieses Verfahrensprinzip wird in den weiteren Untersuchungen genutzt.

### 5.2 Verfahrensdurchführung

Beim Auffangen des Niederschlags muss darauf geachtet werden, dass nur der Niederschlag auf der genau definierten Fläche erfasst wird.

Die einfachste Methode wäre dabei, den Niederschlag auf einer Scheibe aufzufangen und dann zu wiegen. Bei diesem Verfahren treten hauptsächlich zwei Probleme auf:

- Bei sehr hoher Intensität kann der Niederschlag von der Scheibe herunterlaufen.
- Die Niederschlagstropfen prallen auf die Scheibe auf, springen von dort wieder zurück und

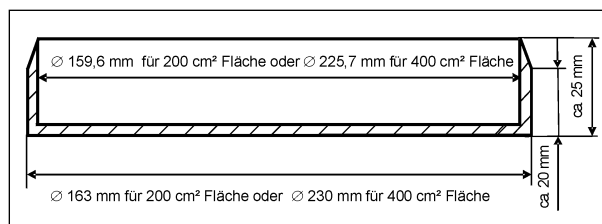


Bild 6: Maße der Auffangschalen (unmaßstäbliche Zeichnung)

damit auch neben die Scheibe. Sie gehen für die Massemessung verloren.

Um diese Probleme zu vermeiden, kamen Schalen mit definierten Auffangflächen zum Einsatz. Für eine direkte Wägung des aufgefangenen Niederschlags muss darauf geachtet werden, dass keine Niederschlagstropfen an der äußeren Wand des Auffanggefäßes die Messung verfälschen. Deshalb besaßen die Schalen nur eine Höhe von ca. 2,5 cm. Der Mantelbereich am Öffnungsrand war gefasst, damit kein ebene Fläche neben der eigentlichen Auffangfläche vorhanden war.

Die Schalen besaßen zum einen eine Auffangfläche von  $200 \text{ cm}^2$  entsprechend der WMO-Standardfläche für die Messung der Niederschlagsintensität. Aufgrund der im Kapitel 4 aufgeführten Problematik über ungleiche zeitgleich ermittelte Messergebnisse mit  $200 \text{ cm}^2$  großen Auffangschalen kamen auch Schalen mit einer Fläche von  $400 \text{ cm}^2$  zum Einsatz. Alle Schalen waren kreisrund (Maße siehe Bild 6).

Für die Bestimmung der Repräsentativität eines Messergebnisses kamen bei allen Messungen jeweils zwei Schalen zeitgleich zum Einsatz (siehe Kapitel 5.3.1).

In den Schalen eingelegte Verbandwatte verhinderte das Herausspringen von Regentropfen. Watte ist im Vergleich zu anderen Materialien (Stoffe, Teppichboden) am einfachsten zu handhaben. Allerdings muss genau darauf geachtet werden, dass keine Watte außerhalb der Schale hängen bleibt.

Bei den Messungen wurde zunächst mit zwei Waagen das Leergewicht einer trockenen Schale einschließlich Watteeinlage bestimmt. Die eingesetzten Waagen besaßen eine Auflösung von mindestens  $0,01 \text{ g}$  (Bild 7).

Anschließend wurden die Schalen unter einem Schirm auf speziell gefertigte Stative gestellt. Die Stative hatten eine ausreichend große obere Auflagefläche, damit die Schalen stabil lagen. Die Stative wurden mit Hilfe von an den Stativfüßen vor-



**Bild 7:** Wägung der Schalen im Labor, zur Vermeidung des Wegspringens von Wassertropfen sind die Schalen mit Watte gefüllt (links Schale mit 200 cm<sup>2</sup> Auffangfläche, rechts Schale mit 400 cm<sup>2</sup> Auffangfläche)



**Bild 8:** Zwei Auffangschalen mit 200 cm<sup>2</sup> Auffangfläche auf den Stativen

handenen Einstellschrauben und einer Wasserwaage so eingerichtet, dass die Auffangschalen waagrecht standen (Bild 8). Vor dem Auffangen waren diese Flächen ebenfalls abzutrocknen, damit kein Wasser an den Schalen anhaften und damit die Messergebnisse verfälschen kann.

Für genau eine Minute waren die Schalen dann dem Niederschlag ausgesetzt. Danach wurden die Schalen mit dem aufgefangenen Niederschlag, wieder mit einem Schirm abgedeckt, gewogen. Vor der Wägung musste der an den Schalenaußenrändern aufgekommene Niederschlag abgewischt werden. Zwischen dem Ende des Niederschlagsauffangens und der Wägung vergingen ca. 45 sec., sodass ein Fehler durch Verdunstung vernachlässigt werden kann.

Bei höheren Windgeschwindigkeiten waren keine Messungen möglich. Zum einen besaßen die Schalen keinen speziellen Befestigungsmechanismus auf den Stativen und zum Zweiten beeinflussten schon geringere Windgeschwindigkeiten das Wiegen. Zum Vermeiden von Wägefehlern durch



**Bild 9:** Waage mit Glaskasten als Windschutz, rechts separates Blech zum Öffnen des Kastens

Windeinwirkungen waren die Waagen bei Messungen an Fahrbahnen komplett mit einem Gehäuse aus Glas umgeben. Die offene Seite für die Einbringung der Schalen wurde mit einer abnehmbaren Blechkonstruktion geschlossen (Bild 9). Die Waagen mussten dabei auf einem sehr stabilen Tisch stehen, der wiederum mit einem Zelt überdacht war. Genaue Wägungen im Fahrzeug (Kleinbus) waren wegen der federnden Radaufhängung nicht möglich.

## 5.3 Messergebnisse

### 5.3.1 Auswerteverfahren

Die Messgenauigkeit des im Kapitel 5.2 beschriebenen Verfahrens kann bewertet werden, wenn zeitgleich mit mehreren Schalen unmittelbar nebeneinander die Niederschlagsintensität gemessen wird. Um den personellen und technischen Aufwand klein zu halten, kamen immer paarweise je zwei Schalen mit 200 cm<sup>2</sup> oder 400 cm<sup>2</sup> Auffangfläche zum Einsatz.

Die Messungen fanden von Ende November 2001 bis September 2002 statt. Sie konnten bei verschiedenen Niederschlagsverhältnissen durchgeführt werden. Die Mehrzahl der Messungen fand bei Regen statt. Erfasster leichter Sprühregen führte nur zu sehr geringen Niederschlagsintensitäten mit Messwerten unter 0,05 mm/h, die nur mit erheblichen Abweichungen zwischen zeitgleichen Messungen erfasst werden konnten (siehe Kapitel 5.4.); für Sprühregen liegen nur sehr wenige Messwerte vor. Im geringeren Umfang stehen auch

Beschreibung der Parameter bei Messung	0 – 1 mm/h	> 1 – 2 mm/h	> 2 – 3 mm/h	> 3 – 4 mm/h	> 4 – 5 mm/h	> 5 – 6 mm/h	> 6 – 7 mm/h	> 7 – 8 mm/h	> 8 mm/h	Gesamt
alle Messpaare mit 200 cm <sup>2</sup> -Auffangschale	34	9	2	3	2	0	0	0	1	51
alle Messpaare mit 400 cm <sup>2</sup> -Auffangschale	39	37	11	3	2	2	2	1	0	97
Messpaare mit 200 cm <sup>2</sup> -Auffangschale bei Regen	18	4	2	1	0	0	0	0	0	25
Messpaare mit 200 cm <sup>2</sup> -Auffangschale bei Schneefalle	16	5	0	2	2	0	0	0	1	26
Messpaare mit 200 cm <sup>2</sup> -Auffangschale bei Windgeschwindigkeiten über ca. 0,3 m/s	18	3	1	1	2	0	0	0	1	26
Messpaare mit 200 cm <sup>2</sup> -Auffangschale bei Windgeschwindigkeiten unter ca. 0,3 m/s	16	6	1	2	0	0	0	0	0	25
Messpaare mit 400 cm <sup>2</sup> -Auffangschale bei Regen	28	17	10	2	2	2	2	1	0	64
Messpaare mit 400 cm <sup>2</sup> -Auffangschale bei Schneefalle	11	20	1	1	0	0	0	0	0	33
Messpaare mit 400 cm <sup>2</sup> -Auffangschale bei Windgeschwindigkeiten über ca. 0,3 m/s	18	5	1	2	2	2	2	1	0	33
Messpaare mit 400 cm <sup>2</sup> -Auffangschale bei Windgeschwindigkeiten unter ca. 0,3 m/s	21	32	10	1	0	0	0	0	0	64

Tab. 1: Anzahl der Messungen unter verschiedenen Messbedingungen mit Unterteilung nach der Niederschlagsintensität

Messwerte bei Schneefall bei unterschiedlichen Intensitäten zur Verfügung.

Zum größeren Teil wurde nur das Referenzmessverfahren mit zwei Schalen nebeneinander auf seine Eignung überprüft. Einige Messungen fanden neben im Betrieb befindlichen Sensoren für die Niederschlagsintensität statt. Deren Messwerte wurden ebenfalls zu einem Vergleich herangezogen (siehe Kapitel 6).

Für die Auswertung stehen Ergebnisse von 151 Messzeitpunkten zur Verfügung. 19 Messungen fanden neben einem Sensor für die Niederschlagsintensität statt, dessen Messwerte für Vergleiche einbezogen werden konnten.

Neben der Niederschlagsintensität wurden die Niederschlagsart und die Windgeschwindigkeit erfasst. Beide Parameter galten als mögliche Einflussgrößen auf die Genauigkeit bei der Messung der Niederschlagsintensität. Andere meteorologische Parameter (Lufttemperatur, Luftfeuchte) wurden als Parameter mit geringem Einfluss auf die Messung der Niederschlagsintensität angesehen und nicht betrachtet.

Bei der Niederschlagsart wurde zwischen Schneefall und Regen unterschieden. Bei Schneefall fand eine grobe subjektive Einschätzung der Kristallgröße statt. Die Angaben zur Windgeschwindigkeit sind anhand der Beobachtung eines Windrades oder der Umgebung zwischen den Angaben „wenig windig“ und „windig“ unterschieden. Die

Grenze zwischen beiden Bewertungen liegt bei etwa 0,3 m/s.

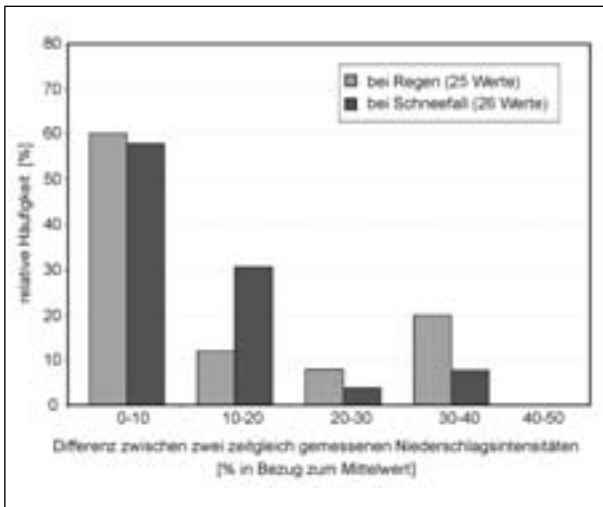
Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Zahl der durchgeführten Messungen mit Unterteilungen für verschiedene Messbedingungen und dabei erreichten Niederschlagsintensitäten an. Fielen bei den Messungen Regen und Schnee gleichzeitig (Schneereggen), wurden die Messpaare in die Rubrik Schneefall einbezogen.

Die Anzahl der Messpaare fällt allgemein aufgrund des begrenzten Bearbeitungszeitraumes und nur wenigen Werktagen mit Niederschlag für eine statistische Auswertung gering aus. Insbesondere fehlen Messpaare mit den 200 cm<sup>2</sup> großen Schalen bei Niederschlagsintensitäten über 1 mm/h.

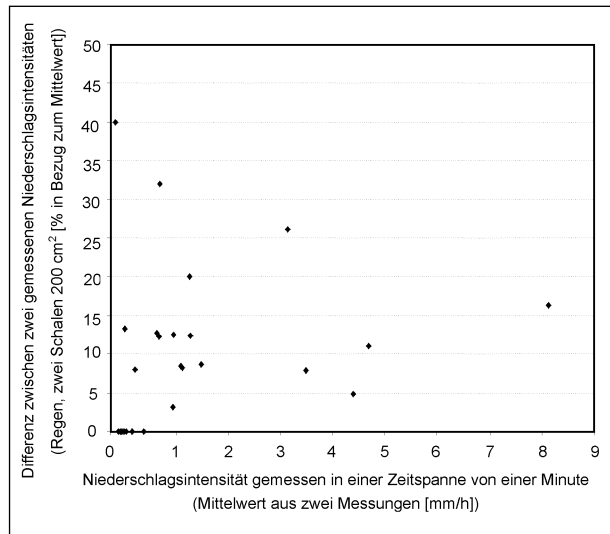
### 5.3.2 Vergleich der Messwerte zwischen zwei Auffangschalen mit 200 cm<sup>2</sup> Fläche

Bei rund 60 % der Beobachtungen beträgt die relative Abweichung zwischen zwei zeitgleich durchgeführten Regenmessungen weniger als 10 % (bei Schneefall 58 %), in 72 % der Fälle (bei Schneefall 89 %) weniger als 20 % und in 80 % der Fälle (bei Schneefall 93 %) unter 30 % (Bild 10).

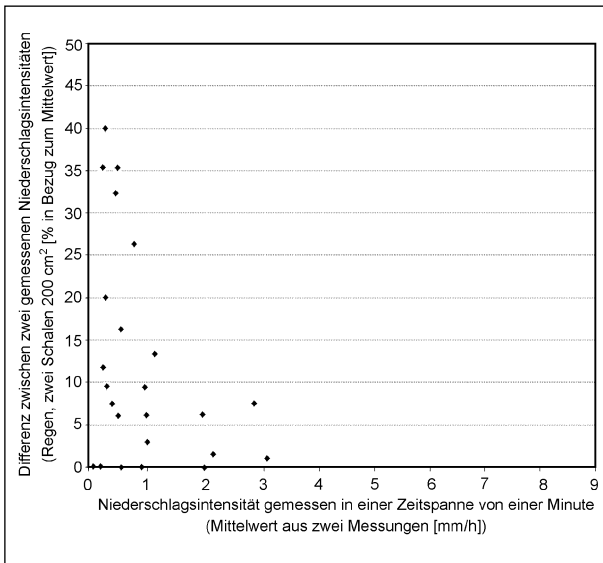
Wird die prozentuale Abweichung zweier zeitgleicher Messungen in Beziehung zu ihrem gemeinsamen Mittelwert gesetzt, wird deutlich, dass die großen prozentualen Abweichungen vor allem bei geringen Niederschlagsintensitäten auftreten (Bilder 11 und 12). Bei geringen Niederschlagsinten-



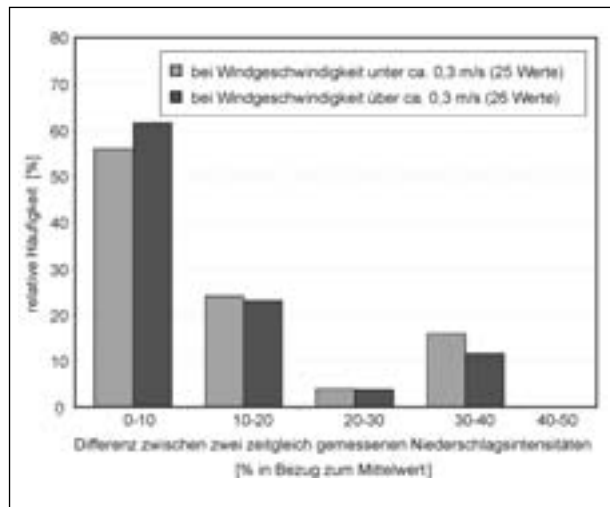
**Bild 10:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen den gemessenen Niederschlagsintensitäten auf zwei Auffangschalen mit 200 cm<sup>2</sup> Fläche unterteilt nach der Niederschlagsart



**Bild 12:** Korrelation zwischen den Differenzen zweier zeitgleich ermittelter Messwerte für die Niederschlagsintensität bei Schneefall und der dabei erreichten Niederschlagsintensität als Mittelwert der beiden Messwerte (200- cm<sup>2</sup>-Auffangschalen, 26 Werte)



**Bild 11:** Korrelation zwischen den Differenzen zweier zeitgleich ermittelter Messwerte für die Niederschlagsintensität bei Regen und der dabei erreichten Niederschlagsintensität als Mittelwert der beiden Messwerte (200-cm<sup>2</sup> -Auffangschalen, 25 Werte)



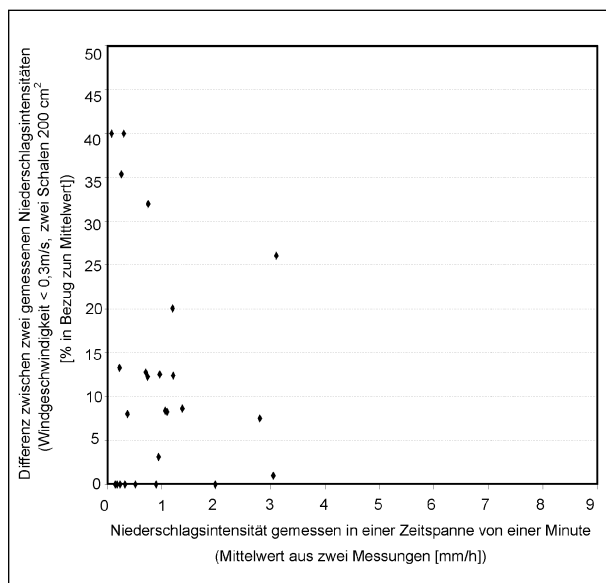
**Bild 13:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen den gemessenen Niederschlagsintensitäten auf zwei Auffangschalen mit 200 cm<sup>2</sup> Fläche unterteilt nach Windgeschwindigkeiten unter und über ca. 0,3 m/s

sitäten wirken sich die Messfehler des Verfahrens besonders deutlich aus (siehe Kapitel 5.4)

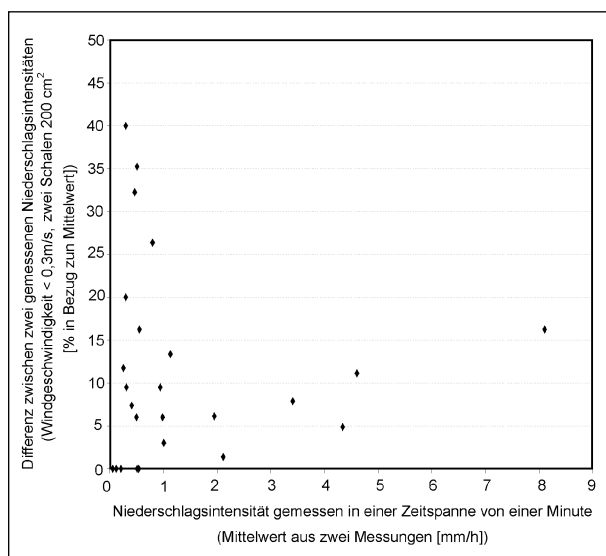
Für die Beurteilung einer drohenden Glättebildung sind jedoch auch sehr geringe Niederschlagsintensitäten von großer Bedeutung, da bereits Wasserfilmdicken von 0,02 mm zu Fahrbahnglätte führen können [8].

Die Windgeschwindigkeit wirkte sich nach den vorliegenden Messergebnissen nicht auf die Höhe der

Differenzen aus. Sowohl bei höheren und niedrigen Windgeschwindigkeiten treten unterschiedliche Differenzen zwischen zwei zeitgleich erfassten Niederschlagsintensitäten auf (Bilder 13 bis 15).



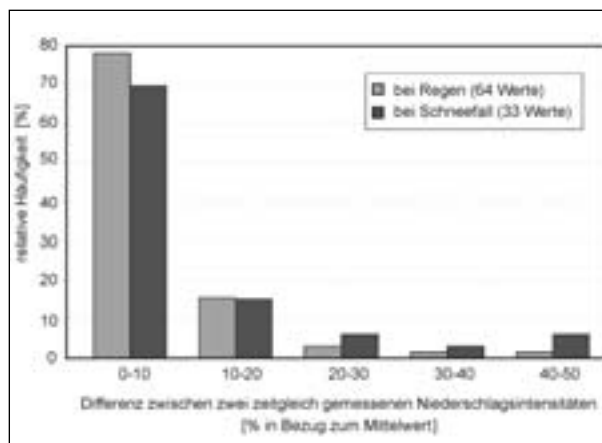
**Bild 14:** Korrelation zwischen den Differenzen zweier zeitgleich ermittelter Messwerte für die Niederschlagsintensität bei Windgeschwindigkeiten unter ca. 0,3 m/s und der dabei erreichten Niederschlagsintensität als Mittelwert der beiden Messwerte (Schalen mit 200 cm<sup>2</sup> Auffangfläche, 25 Werte)



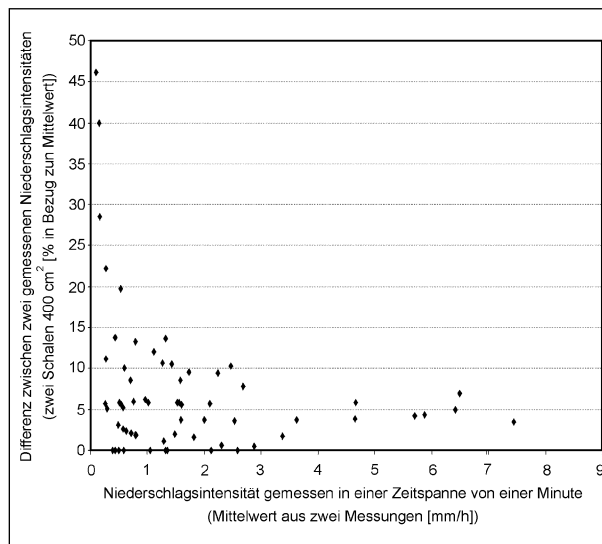
**Bild 15:** Korrelation zwischen den Differenzen zweier zeitgleich ermittelter Messwerte für die Niederschlagsintensität bei Windgeschwindigkeiten über ca. 0,3 m/s und der dabei erreichten Niederschlagsintensität als Mittelwert der beiden Messwerte (Schalen mit 200 cm<sup>2</sup> Auffangfläche, 26 Werte)

### 5.3.3 Vergleich der Messwerte zwischen zwei Auffangschalen mit 400 cm<sup>2</sup> Fläche

Bei rund 78 % der Messungen bleibt die relative Abweichung zwischen zwei zeitgleich durchgeführten Regenmessungen unter 10 % (bei Schneefall 70 %), in 94 % der Fälle (bei Schneefall 85 %) unter 20 % und in 96 % der Fälle (bei Schneefall 91 %)



**Bild 16:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen den gemessenen Niederschlagsintensitäten auf zwei Auffangschalen mit 400 cm<sup>2</sup> Fläche unterteilt nach der Niederschlagsart



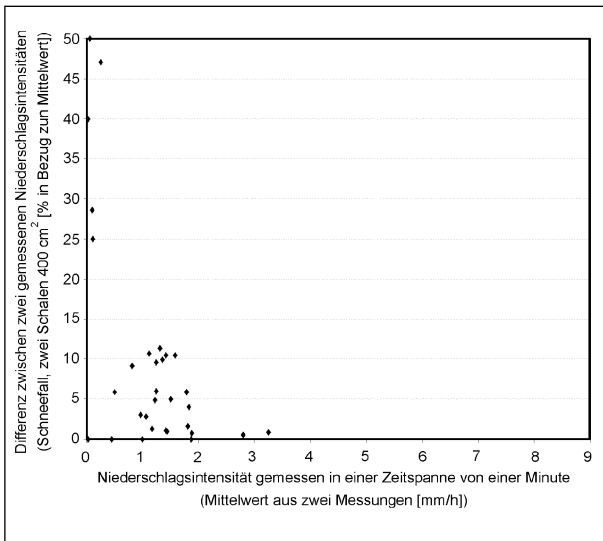
**Bild 17:** Korrelation zwischen den Differenzen zweier zeitgleich ermittelter Messwerte der Niederschlagsintensität bei Regen und der dabei erreichten Niederschlagsintensität als Mittelwert der beiden Messwerte (Schalen mit 400 cm<sup>2</sup> Auffangfläche, 64 Werte)

unter 30 % (Bild 16). In 2 % der Messungen übersteigt die Differenz 40 % in Bezug zum Mittelwert.

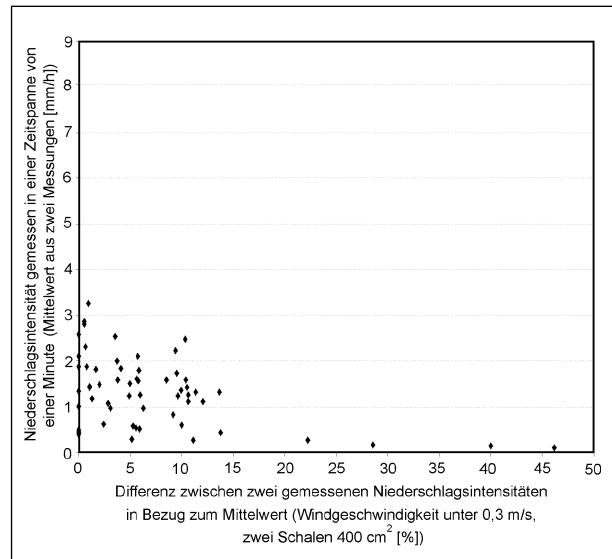
Wie bei den Messungen mit den 200-cm<sup>2</sup>-Schalen treten die größeren prozentualen Abweichungen bei geringeren Niederschlagsintensitäten auf (Bild 17 und 18). Die hohen Abweichungen über 40 % treten mit einer Ausnahme nur bei gemessenen Niederschlagsintensitäten unter 0,1 mm/h auf. Alle Messwertpaare bis auf eine Ausnahme mit Niederschlagsintensitäten über 0,5 mm/h bleiben dagegen unter 15 % Abweichung.

Durch die deutlich höhere Schalenmasse und -größe ergeben sich insbesondere bei sehr geringen

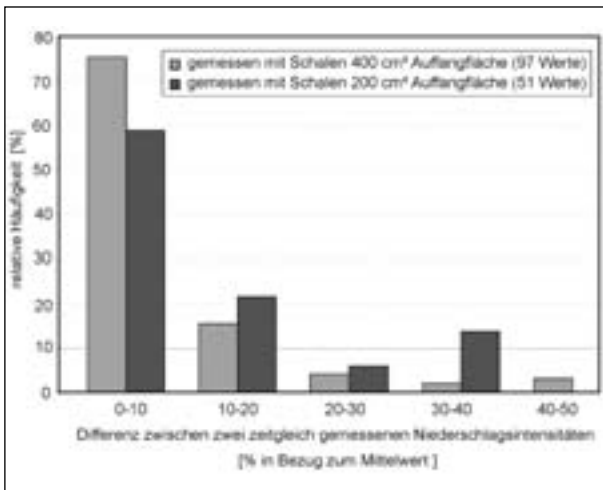




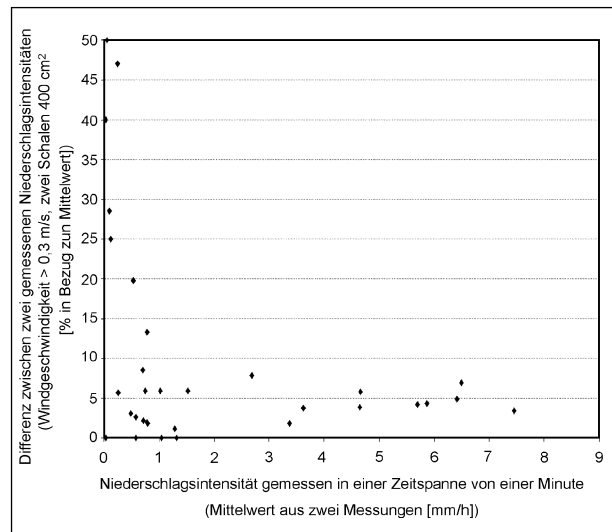
**Bild 18:** Korrelation zwischen den Differenzen zweier zeitgleich ermittelter Messwerte der Niederschlagsintensität bei Schneefall und der dabei erreichten Niederschlagsintensität als Mittelwert der beiden Messwerte (Schalen mit 400 cm<sup>2</sup> Auffangfläche, 33 Werte)



**Bild 20:** Korrelation zwischen den Differenzen zweier zeitgleich ermittelter Messwerte für die Niederschlagsintensität bei Windgeschwindigkeiten unter ca. 0,3 m/s und der dabei erreichten Niederschlagsintensität als Mittelwert der beiden Messwerte (Schalen mit 400 cm<sup>2</sup> Auffangfläche, 64 Werte)



**Bild 19:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen den gemessenen Niederschlagsintensitäten auf zwei Auffangschalen mit 400 cm<sup>2</sup> Fläche unterteilt nach Windgeschwindigkeiten unter und über ca. 0,3 m/s



**Bild 21:** Korrelation zwischen den Differenzen zweier zeitgleich ermittelter Messwerte für die Niederschlagsintensität bei Windgeschwindigkeiten über ca. 0,3 m/s und der dabei erreichten Niederschlagsintensität als Mittelwert der beiden Messwerte (Schalen mit 400 cm<sup>2</sup> Auffangfläche, 33 Werte)

gen Niederschlagsintensitäten höhere Messfehler mit dem Verfahren (siehe Kapitel 5.4)

Eine Abhängigkeit der Differenzen von der Windgeschwindigkeit ist auch bei diesen Messungen nicht erkennbar. Sowohl bei niedrigen als auch bei höheren Windgeschwindigkeiten traten unterschiedliche Differenzen auf (Bilder 20-21). Allerdings stand bei niedrigen Windgeschwindigkeiten nur eine sehr geringe Anzahl von Messwerten bei Niederschlagsintensitäten über 1 mm/h für eine eindeutige Aussage zur Verfügung.

### 5.4 Vergleich der Ergebnisse mit 200 cm<sup>2</sup> und 400 cm<sup>2</sup> Auffangfläche

Zwischen den beiden Variationen des Messverfahrens (Auffangflächen 200 und 400 cm<sup>2</sup>) bestehen deutliche Unterschiede bei der Übereinstimmung zweier zeitgleich aufgenommener Niederschlagsin-

tensitäten. Nur 59 % der Messungen mit den 200-cm<sup>2</sup>-Auffangschalen erreichten Abweichungen unter 10 % zwischen den zwei erzielten Messwerten. Bei dem Einsatz der 400 cm<sup>2</sup> großen Auffangschalen stimmten zwei zeitgleich erfasste Messwerte zu 75 % mit einer Abweichung unter 10 % überein. Abweichungen über 30 % zwischen zwei Ergebnissen traten mit den 200-cm<sup>2</sup>-Auffangschalen fast dreimal so häufig auf wie bei den Messungen mit den 400-cm<sup>2</sup>-Auffangschalen (siehe Bild 22).

Bei beiden Auffangschalengrößen stimmen zwei zeitgleich erzielte Ergebnisse mit abnehmender Niederschlagsintensität weniger überein.

Dieses Verhalten lässt sich mit der anfangs beschriebenen Unregelmäßigkeit des Niederschlags begründen. Regentropfen oder Schneekristalle treffen nach subjektiven Beobachtungen insbesondere bei geringer Intensität mit sehr unterschiedlichen räumlichen Abständen auf der Erdoberfläche bzw. den Auffangschalen auf.

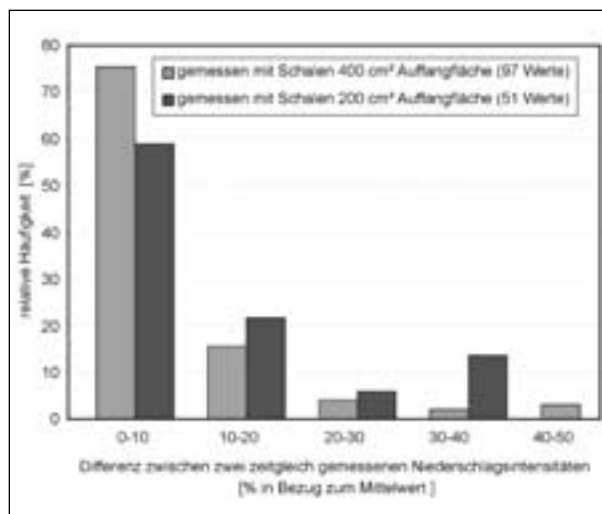
Je größer die Auffangfläche ist, desto größer sind dann die Wahrscheinlichkeit eines repräsentativen Messwertes und damit die Vergleichbarkeit mit einem zweiten mit dem gleichen Verfahren unmittelbar daneben erzielten Messwert. Diese Wahrscheinlichkeit nimmt durch die in der Regel höhere Tropfendichte mit zunehmender Niederschlagsintensität zu. Dieses Verhalten ist bei beiden Schalengrößen erkennbar.

Bei sehr geringer Niederschlagsintensität unter 0,1 mm/h treten bei beiden Schalengrößen deutlich höhere Differenzen auf. Bei diesen geringen Intensitäten wirken dann zum Teil auch Messfehler stärker ein.

Eine Niederschlagsintensität von 0,1 mm/h bedeutet auf einer 200-cm<sup>2</sup>-Auffangschale eine aufgefangene Masse innerhalb einer Minute von weniger als 0,04 g, bei einer 400-cm<sup>2</sup>-Auffangschale weniger als 0,08 g.

Trotz aller im Kapitel 5.1 beschriebener Maßnahmen für die Erzielung genauer Messergebnisse können Schwankungen bei der Wägung vor allem windbedingt bis 0,02 g auftreten.

Bei den 400-cm<sup>2</sup>-Auffangschalen besteht die Möglichkeit größerer Wägefehler aufgrund ihrer größeren Masse und vor allem der größeren Fläche (Windanfälligkeit). Andere Messfehler wirken sich



**Bild 22:** Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen den zeitgleich gemessenen Niederschlagsintensitäten auf zwei Auffangschalen

ebenfalls zum Teil bei den kleinen Niederschlagsintensitäten größer aus:

- Die Außenseiten der Schalen weisen trotz Trockenwischens noch geringe Reste von Niederschlag auf.
- Geringe Watteteile haben über den Schalenrand herausgeragt und damit die Auffangfläche unzulässig erhöht.
- Die Bestimmung des Leergewichtes der Auffangschalen erfolgt nicht genau genug.
- Die Waage ist nicht richtig justiert.
- Beim Transportieren zwischen Stativ und Waage fällt in die Schale Niederschlag außerhalb der eigentlichen Auffangzeit.
- Beim Freimachen und Abdecken der Schale am Beginn bzw. Ende der Auffangzeit fallen unzulässig Wassertropfen vom Abdeckschirm in die Schale.

Aufgrund dieser Fehlerquellen sind Messungen der Niederschlagsintensität unter 0,1 mm/h mit dem benutzten Verfahren nur sehr fehlerhaft durchführbar. Für genauere Messergebnisse bei diesen geringen Intensitäten muss die Anfälligkeit der Wägung gegenüber Wind verringert werden. Dies kann vor allem durch einen speziellen schwereren Wägetisch erreicht werden, der allerdings an der Fahrbahn neben zu prüfenden Sensoren schwieriger handhabbar ist.

## 6 Referenzmessungen zu Sensoren für die Niederschlagsintensität

Einige Messungen gemäß Kapitel 5 fanden unmittelbar neben in Betrieb befindlichen Sensoren für die Niederschlagsintensität statt. Die Messergebnisse der Sensoren wurden erst im Nachhinein eingeholt, sodass nicht von einer unmittelbaren Zeitgleichheit ausgegangen werden kann. Da aber ein Abgleich zwischen der Systemzeit in der Rechenzentrale und der tatsächlichen Referenzmesszeit erfolgte, werden die möglichen zeitlichen Unterschiede zwischen einer Sensor- und Referenzmessung nicht höher als zwei Minuten eingeschätzt. Beide Sensoren haben die Niederschlagsintensität in einem Zeitintervall von einer Minute gemessen.

- Messungen am 28.05.2002 an BAB A 8, km 106, Sensor PWD 11 der Firma Vaisala (19 Messwerte)

In den Messzeiträumen herrschte zunächst Regen mit gleichmäßigen geringen Intensitäten von zwischen ca. 0,1-0,3 mm/h vor, der sich später auf eine Intensität bis 0,55 mm/h erhöhte (Messwerte siehe Tabelle 2).

Die geringe Niederschlagsintensität am Beginn des Messzeitraumes registrierte der Sensor nicht. Erst ab einer mit dem Referenzverfahren gemessenen Niederschlagsintensität von ca. 0,5 mm/h gab der Sensor Messwerte über 0 mm/h an. Sie erreichten aber nur rund 20 bis 40 % der mit dem Referenzmessverfahren gemessenen Niederschlagsintensitäten. Wenn die Messwerte des Sensors jeweils in beiden Richtungen um 60 oder 120 Sekunden verschoben werden, tritt nur in einem Fall eine höhere Übereinstimmung nahe 60 % auf.

Bei den allgemein deutlich niedrigeren Messwerten des Sensors im Vergleich zu den Ergebnissen des Referenzmessverfahrens kann zunächst eine falsche Einstellung des Sensors vermutet werden. Eine empfindlichere Einstellung ließe vielleicht höhere Werte zu. Umgekehrt kann auch eine Verschmutzung des Sensors zu einer geringeren Empfindlichkeit des Sensors geführt haben. Nach Angaben der Herstellers soll aber der Sensor bis zu einem bestimmten Maß gegenüber Schmutz unempfindlich sein. Eine Änderung der Sensoreinstellungen oder eine Reinigung fanden im Zeitraum der Untersuchungen nicht statt.

Die hohen Abweichungen zwischen Referenz- und Sensormessungen können aber auch auf die unterschiedlichen Verfahren zurückgeführt werden. Der bei den Messungen einbezogene Sensor PWD 11 betrachtet eine deutlich kleinere Messfläche als das Referenzmessverfahren. Genaue Maße für die betrachteten Messflächen liegen für diesen Sensortyp nicht vor. Sie dürften aber nur einen kleineren Teil der 200 bzw. 400 cm<sup>2</sup> Auffangfläche des Referenzmessverfahrens ausmachen. Mit diesen wesentlich geringeren Messflächen werden nach den Erfahrungen der Referenzmessungen noch weniger repräsentativ die Niederschlagsintensitäten erkannt.

- Messungen und Beobachtungen am 25.09.2002 an BAB A 4, Sensor IRSS 88 der Firma MicKS

Während der vorgesehenen Messzeit fiel nur Niederschlag in Form von Sprühregen sehr geringer Intensität unter 0,05 mm/h, sodass die schon erwähnten hohen Differenzen von über 100 % zwischen den beiden Schalen des Referenzmessverfahrens auftraten. Auf eine Vergleichsmessung des Referenzmessverfahrens mit dem Sensor wurde verzichtet.

Die nachträglich vorgenommene Auswertung der Aufzeichnung der Sensormesswerte zeigte darüber hinaus keine plausiblen Niederschlagsintensitäten an, die mit der subjektiven Wahrnehmung übereinstimmte.

Die subjektive Beurteilung der Fahrbahnnässe während der Beobachtungszeit führte des Weiteren zu Überlegungen, die für die Schaltung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen von Bedeutung sind: Zu Beginn der Beobachtungszeit war die Fahrbahnoberfläche sehr nass. Trotz der genannten geringen Niederschlagsintensität trocknete die Fahrbahn nur sehr langsam ab. Die dadurch bedingte Sprühfahnenbildung und resultierende Sichtbehinderung führten über einen Zeitraum von ca. 90 Minuten zu deutlichen Geschwindigkeitsreduzierungen.

Diese Beobachtungen zeigen, dass schon sehr niedrige, aber länger andauernde Niederschlagsintensitäten das Abtrocknen dickerer Wasserfilme auf der Fahrbahnoberfläche wesentlich verzögern können. Dieses Verhalten wird bei bekannten Schaltungsalgorithmen in Streckenbeeinflussungsanlagen nicht hinreichend berücksichtigt.

Uhrzeit	Messwerte der ersten Messschale			Messwerte der zweiten Messschale			Sensormesswert [mm/h]	Windverhältnisse
	Durchmesser der Messschale [cm <sup>2</sup> ]	aufgefangene Niederschlagsmasse/min. [g]	Niederschlagsintensität [mm/h]	Durchmesser der Messschale [cm <sup>2</sup> ]	aufgefangene Niederschlagsmasse/min. [g]	Niederschlagsintensität [mm/h]		
13:59							0,00	
14:00	200	0,08	0,24	200	0,09	0,27	0,00	geringer Wind
14:01							0,00	
14:02							0,00	
14:03							0,00	
14:04	200	0,06	0,18	200	0,11	0,33	0,00	windig
14:05							0,00	
14:06							0,00	
14:07							0,00	
14:08	200	0,09	0,27	200	0,08	0,24	0,00	windig
14:09							0,00	
14:10							0,00	
14:11	200	0,05	0,15	200	0,06	0,18	0,00	windig
14:12							0,00	
14:13							0,00	
14:14							0,00	
14:15	200	0,04	0,12	200	0,04	0,12	0,00	windig
14:16							0,00	
14:17							0,00	
14:18							0,00	
14:19							0,00	
14:20	200	0,04	0,12	200	0,03	0,09	0,00	windig
14:21							0,00	
14:22							0,00	
14:23							0,00	
14:24							0,00	
14:25							0,00	
14:26							0,00	
14:27							0,00	
14:28	400	0,23	0,35	400	0,26	0,39	0,00	windig
14:29							0,00	
14:30							0,00	
14:31	400	0,22	0,33	400	0,23	0,35	0,00	windig
14:32							0,00	
14:33							0,00	
14:34	400	0,26	0,39	400	0,32	0,48	0,00	windig
14:35							0,00	
14:36							0,00	
14:37							0,00	
14:38	400	0,20	0,30	400	0,26	0,39	0,00	windig
14:39							0,00	
14:40							0,00	
14:41	400	0,19	0,29	400	0,21	0,32	0,00	windig
14:42							0,00	
14:43							0,00	
14:44							0,00	
14:45	400	0,36	0,54	400	0,36	0,54	0,00	windig
14:46							0,00	
14:47							0,00	
14:48	400	0,30	0,45	400	0,31	0,41	0,00	windig
14:49							0,00	
14:50							0,10	
14:51	400	0,35	0,53	400	0,36	0,54	0,10	windig
14:52							0,10	
14:53							0,20	
14:54	400	0,38	0,57	400	0,38	0,57	0,20	windig
14:55							0,20	
14:56							0,30	
14:57							0,30	
14:58							0,20	
14:59							0,00	
15:00							0,10	
15:01	400	0,29	0,44	400	0,30	0,45	0,10	windig
15:02							0,10	
15:03							0,20	
15:04	400	0,32	0,48	400	0,36	0,54	0,20	windig
15:05							0,20	
15:06							0,20	
15:07							0,10	
15:08	400	0,37	0,56	400	0,35	0,53	0,20	windig
15:09							0,20	
15:10							0,30	
15:11	400	0,32	0,48	400	0,33	0,50	0,10	windig
15:12							0,20	
15:13							0,10	

**Tab. 2:** Vergleichsmessungen zwischen Referenzmessverfahren (zweifach) und einem PWD 11 der Firma Vaisala, gemessen am 28.05.2002

Im Merkblatt für die Nässeerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen [3] wird eine erste Schaltstufe für die Kraftfahrerwarnung bei einer Niederschlagsintensität von 0,2 mm/h vorgeschlagen. Ebenso wird im Merkblatt nach dem Unterschreiten dieses oder eines anderen Grenzwertes die Zurücknahme einer vorgenommenen Schaltung schon nach 1-3 Minuten empfohlen. Beide Vorschläge hätten die Kraftfahrerwarnung bei den beobachteten Verhältnissen wesentlich zu früh zurückgenommen oder auch gar nicht ausgelöst. Hier ist es sinnvoll, weitere Kriterien für die Schaltung von Kraftfahrerwarnungen bei länger andauernden, aber geringen Niederschlagsintensitäten zu erarbeiten.

## 7 Anforderungen an die Sensoren für die Niederschlagsintensität

Die Untersuchungen mit dem Referenzmessverfahren zeigen, dass Sensoren für die Niederschlagsintensität bei Messintervallen von einer Minute für eine hohe Repräsentativität des Messwertes den Niederschlag über größere Flächen betrachten müssen. Dies gilt insbesondere für die Sensoren, die den Niederschlag auf einer Fläche auffangen und dann entsprechend auswerten.

Für das Referenzmessverfahren hat eine Auffangfläche von 400 cm<sup>2</sup> hinreichend genaue Ergebnisse geliefert. Diese Flächengröße sollte auch bei anderen Sensoren, die nach dem Auffangprinzip arbeiten, genutzt werden.

Mit größeren Auffangflächen ließen sich gegebenenfalls Ergebnisse mit einer höheren Repräsentativität erzielen. Allerdings ist bei entsprechend größeren Sensoren mit einem höheren Aufwand bei der Installation und damit auch mit höheren Preisen zu rechnen.

Ob optoelektronische Messverfahren auch mit den üblicherweise betrachteten kleineren Messflächen eine ähnlich hohe Messgenauigkeit wie Sensoren erreichen, die eine Niederschlagsmenge auffangen, lässt sich zwar vermuten, aber wegen fehlender Messergebnisse gegenwärtig nicht beurteilen.

Bei Einbindung in Streckenbeeinflussungsanlagen für die Warnung von Kraftfahrern soll eine Niederschlagsintensität über einen Zeitraum nicht länger als eine Minute bestimmt werden [3]. Für kurze in-

tensive Schauer bestehen sogar Forderungen nach noch kürzeren Messintervallen, die jedoch in derzeit bestehenden Anlagen nicht realisiert sind. Auch wäre aufgrund der sehr selten „wolkenbruchartig“ auftretenden Niederschlagsintensitäten die Prüfung eines Sensors unter diesen Verhältnissen mit dem erarbeiteten Referenzmessverfahren nicht möglich.

Für Glättemeldeanlagen kann das Messintervall auch länger als eine Minute sein, da für die Einschätzung des Wegspülens von Taustoffen gegenwärtig keine Erfahrungen vorliegen. Sie sollten allerdings nicht länger als das nach den Betriebstechnischen Anforderungen an Glättemeldeanlagen [2] längste zulässige Abfrageintervall von drei Minuten sein. Sollte sich herausstellen, dass intensive Regenschauer über einen kurzen Zeitraum von einer Minute oder weniger zu einer deutlichen Reduzierung des Restsalzgehaltes auf der Fahrbahnoberfläche führen als länger andauernde geringere Niederschlagsintensitäten, dann sind die Abfrageintervalle entsprechend zu kürzen.

Entsprechend den mit zunehmender Niederschlagsintensität repräsentativeren Messergebnissen bei dem Referenzmessverfahren sollten auch bei den Sensoren unterschiedliche Genauigkeiten in Abhängigkeit von der Höhe der gemessenen Niederschlagsintensität gefordert werden. Hierzu werden zunächst die Genauigkeiten des Referenzmessverfahren mit der 400-cm<sup>2</sup>-Auffangschale vorgeschlagen. Die höchsten Ungenauigkeiten bei den beschriebenen Messungen mit einem Anteil kleiner 5 % in den definierten Stufen für die Niederschlagsintensität wurden als Ausreißer und nicht als Verfahrensungenauigkeit angesehen (siehe Kapitel 5.3) [4]:

- bei Niederschlagsintensitäten ab 0,1 bis einschließlich 0,5 mm/h:  $\pm 40 \%$ ,
- bei Niederschlagsintensitäten ab 0,5 mm/h:  $\pm 15 \%$ .

Eine weitere Stufung der Genauigkeiten ist denkbar. Für deren Einschätzung liegen allerdings nicht genügend Messwerte aus der Erprobung des Referenzmessverfahrens vor.

Die Auflösung der Messwerte darf 0,1 mm/h nicht unterschreiten. Niederschlagsintensitäten unter 0,1 mm/h sind zu erkennen und auf 0,1 mm/h aufzurunden. Damit ist bei Einsatz eines Sensors in Glättemeldeanlagen gewährleistet, dass der Winterdienstverantwortliche auch eine sehr geringe Niederschlagsintensität gemeldet bekommt.

## 8 Prüfung von Sensoren für die Niederschlagsintensität

Das im Kapitel 5 beschriebene und in seiner Anwendung erprobte Verfahren ist ein geeignetes Referenzmessverfahren für Sensoren für die Niederschlagsintensität. Die Auffangschalen müssen mindestens eine Fläche von 400 cm<sup>2</sup> haben, da die mit ihnen erzielten Messergebnisse die höhere Repräsentativität im Vergleich zu Auffangschalen mit 200 cm<sup>2</sup> Messfläche erreichen. Damit bei Überprüfungen der Aufwand gering bleibt, wird bei den Überprüfungen nur mit einer Auffangschale gemessen. Die Genauigkeitsanforderungen sind aus den Messergebnissen und den Überlegungen in den Kapiteln 5.3. bzw. 7 abgeleitet.

Aus den vorliegenden Ergebnissen ist die nachfolgende Prüfvorschrift erarbeitet.

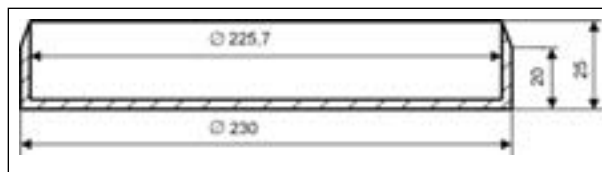
### 8.1 Anwendungsbereich und Kurzbeschreibung

Die Prüfvorschrift gilt für die Überprüfung von Sensoren für die Niederschlagsintensität beim Einsatz im Straßenwesen. Bei dem Prüfverfahren sind erzielte Referenzmessergebnisse mit zeitgleich ermittelten Messwerten eines zu prüfenden Sensors für die Niederschlagsintensität zu vergleichen. Bei der Referenzmessung ist ein Niederschlag mit einer definierten Auffangschale zeitgleich und in gleicher Länge wie das dem Sensor vorgegebene Messintervall aufzufangen.

Das Verfahren kann sowohl für die Abnahme dieser Sensoren nach der Installation als auch für die Überprüfung im laufenden Betrieb genutzt werden.

### 8.2 Einrichtungen, Geräte und Hilfsmittel

- Waage mit einer Auflösung 0,01 g, Messgenauigkeit  $\pm 0,01$  g,
- Windschutzvorrichtung zum Umschließen der Waage (z. B. Aquarium + Abdeckblech),
- Tisch,
- Vorrichtung zum Trockenhalten des Tisches einschließlich Waage und Messzubehör (z. B. Zelt),
- Stativ mit einer oberen ebenen Plattform (ca. 120 mm Durchmesser) zum sicheren Aufsetzen



**Bild 23:** Konstruktionszeichnung für Auffangschale mit 400 cm<sup>2</sup> Auffangfläche für die Prüfvorschrift (unmaßstäblich)

der Auffangschale, Oberkante der Plattform ca. 1.000 mm über dem Erdboden.

Das Stativ muss Vorrichtungen besitzen, damit sich die Plattform in eine horizontale Lage ausrichten lässt.

- Wasserwaage, ca. 400 mm lang,
- Auffangschale nach Abbildung (siehe Bild 23),
- Verbandwatte,
- Regenschirm,
- Papiertücher,
- Stoppuhr.

### 8.3 Versuchsdurchführung

#### 8.3.1 Vorbereitung der Messungen

- Aufstellen des Stativs neben dem zu prüfenden Sensor  
Achtung: Der Abstand zum Sensor muss weniger als 5 m betragen. Der Niederschlagsfall auf die Auffangschale darf durch umstehende Einrichtungen oder Vegetation nicht anders beeinflusst sein als der Niederschlagsfall auf den zu prüfenden Sensor. Windverhältnisse beachten.

- Obere Plattform des Stativs mit der Wasserwaage in eine horizontale Lage ausrichten.
- Waage eben auf den Tisch, mit einer geeigneten Vorrichtung vor Niederschlag und Wind geschützt, aufstellen.

#### 8.3.2 Durchführung der Messung

- Auffangschale trocken wischen und zur Vermeidung des Herausspringens von Regentropfen mit einer dünnen Schicht Verbandwatte flächendeckend auslegen.  
Achtung: Die Verbandwatte darf nicht über den Rand der Schale heraushängen.

- Masse der Auffangschale einschließlich Verbandwatte bestimmen und im Protokoll (siehe Bild 24) eintragen oder je nach Möglichkeit der Waage diese gleich 0 g (Tara) setzen.

Achtung: Bei der Bestimmung der Masse darf das Messergebnis oder Tara nicht höher als um  $\pm 0,02$  g schwanken.

Bei höheren Abweichungen ist für eine schwingungsfreie Auflage der Waage und/oder besseren Windschutz zu sorgen.

- Plattform des Stativs unter dem Regenschirm trocken wischen, Auffangschale mitführen

<b>Messprotokoll</b> <b>Überprüfung eines Sensors für die Niederschlagsintensität</b> <b>Referenzmessung mit einer Auffangschale (400 cm<sup>2</sup> Auffangfläche)</b>							
Standort des Sensors: Sensortyp: Lieferfirma:							
A	B	C	D	E	F	G	H
Datum	Uhrzeit	aufgefangene Niederschlagsmasse/min mit Referenzmessverfahren [g]	Niederschlagsintensität der Referenzmessung [mm/h] (Spalte C x 1,5)	Sensormesswert [mm/h]	Differenz zwischen Referenz- und Messwert [%] (Spalte D - Spalte E x 100/Mittelwert aus Spalten D+E)	Beschreibung der Niederschlagsart	Bewertung der Übereinstimmung [erfüllt/nicht erfüllt] *)
*) Die Differenzen zwischen Sensor- und Referenzmesswert dürfen folgende Werte nicht überschreiten: Niederschlagsintensität ab 0,1 mm/h bis einschließlich 0,5 mm/h: <span style="float: right;">+/- 40 %</span> Niederschlagsintensität über 0,5 mm/h: <span style="float: right;">+/- 15 %</span> Niederschlagsintensität unter 0,1 mm/h: keine quantitative Genauigkeitsvorgabe							
Unterschrift des Prüfers:							

Bild 24: Vorschlag für Protokoll zur Prüfung von Sensoren für die Niederschlagsintensität (Messungen in einem 1-Min-Messintervall, Waage erlaubt eine 0-Setzung für die leere Auffangschale [Tara])

- Trockene Auffangschale unter dem Regenschirm auf die Plattform stellen, durch Regenschirm Niederschlag auf die Auffangschale verhindern
- Auffangschale genau eine Minute (Messung mit Stoppuhr) dem Niederschlag aussetzen  
Achtung: Beim Beginn und Ende der Auffangzeit, Regenschirm so bewegen, dass keine Tropfen vom Regenschirm auf die Auffangschale fallen

Die Referenzmessung muss zeitgleich mit dem Messintervall des Sensors erfolgen. Der Lieferant des Sensors muss gewährleisten, dass der Sensorwert in der Referenzmesszeit ermittelt wurde. Die zum Sensormesswert gehörende Zeitangabe muss das Ende des Referenzmessintervalls  $\pm 2$  Sekunden wiedergeben.

- Auffangschale unter dem Schirm zur Waage tragen
- Trockenwischen des Außenrands der Auffangschale
- Masse der Auffangschale mit Niederschlag bestimmen und im Protokoll (siehe Bild 24) eintragen

#### 8.4 Anzahl der Messungen und Ergebnisbewertungen

Die Versuche sind bei folgenden Gruppen von Niederschlagsintensitäten jeweils 5 x zu wiederholen. Die Differenzen zwischen den beiden zeitgleich erzielten Ergebnissen dürfen in Bezug zu dem jeweils zu bildenden Mittelwert die angegebenen prozentualen Werte nicht überschritten werden:

- Bei Niederschlagsintensitäten ab 0,1 bis einschließlich 0,5 mm/h:  $\pm 40 \%$
- Bei Niederschlagsintensitäten über 0,5 bis einschließlich 1,0 mm/h:  $\pm 15 \%$
- Bei Niederschlagsintensitäten über 1,0 mm/h:  $\pm 15 \%$
- Bei Niederschlagsintensitäten unter 0,1 mm/h muss der Sensor den Niederschlag erkennen und mit 0,1 mm/h angeben.

Tritt eine höhere Differenz zwischen den Messwerten auf, sind weitere Messungen durchzuführen.

Treten in einer Messreihe weniger als 15 % der Messwerte mit einer höheren Differenz auf, können diese als Ausreißer vernachlässigt werden.

Übersteigen mehr als 15 % der Messergebnisse einer Messreihe die vorgegebenen Toleranzen, sind die Sensoren neu zu kalibrieren oder zu justieren bzw. auszutauschen.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Der meteorologische Parameter Niederschlagsintensität wird gegenwärtig hauptsächlich innerhalb von Streckenbeeinflussungsanlagen für die Warnung von Kraftfahrern vor gefährlicher Nässe genutzt. Im Winterdienst sollen zukünftig mit Hilfe der Niederschlagsintensität der Fahrbahnzustand und der Gehalt an Restsalz auf der Fahrbahnoberfläche besser eingeschätzt werden. Geeignete Sensoren müssen für beide Aufgaben über kurze Zeiträume von einer bis drei Minuten die Niederschlagsintensität ermitteln.

Derartige Sensoren mit einer geeigneten Auflösung (0,1 mm/h) sind im größeren Umfang erst seit wenigen Jahren auf dem Markt. Erste Prüfungen ergaben jedoch erhebliche Abweichungen zu Referenzmessergebnissen. Die Referenzmessungen selber zeigten bei zeitgleichen Messungen an einem Ort ebenfalls größere Differenzen an, die auf Ungenauigkeiten im Messverfahren und der ungleichen Form des Niederschlags zurückgeführt wurden.

Im bearbeiteten Projekt war ein Verfahren zur Prüfung von Sensoren für die Niederschlagsintensität zu entwickeln. Eine Vorrichtung zur Simulation von verschiedenen Niederschlägen kam wegen eines nicht realisierbaren hohen technischen Aufwands nicht in Frage. Deshalb soll die Überprüfung der Sensoren anhand eines geeigneten plausiblen Referenzmessverfahrens erfolgen.

Das neue Verfahren wurde von einem Verfahren aus der Meteorologie abgeleitet, das ebenfalls die Niederschlagsintensität misst, jedoch dabei längere Zeiträume betrachtet. Bei dem entwickelten Referenzmessverfahren wird mit Hilfe einer flachen Schale der Niederschlag über den kurzen Zeitraum von einer Minute aufgefangen und gewogen. Die Masse des Niederschlags lässt sich in eine gewünschte Niederschlagsintensität umrechnen.



Durchgeführte Messreihen zum Nachweis der Repräsentativität der Messwerte zeigten, dass der Niederschlag insbesondere bei geringen Intensitäten ungleich fällt. Das heißt, mit zwei gleich großen Schalen werden bei zeitgleichen Messungen unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Die Gleichmäßigkeit und damit die Repräsentativität waren allerdings bei den Schalen mit 400 cm<sup>2</sup> höher als bei den Schalen mit 200 cm<sup>2</sup>.

Die Differenzen betragen bei Niederschlagsintensitäten zwischen 0,1 und 0,5 mm/h zwischen zeitgleich ermittelten Messwerten mit den 400-cm<sup>2</sup>-Auffangschalen bis 40 %, im Einzelfall bis 50 %. Mit zunehmender Niederschlagsintensität stimmen die zeitgleich ermittelten Messergebnisse besser überein. Bei Niederschlagsintensitäten über 0,5 mm/h gab es keine Differenzen über 15 %. Unter 0,1 mm/h Niederschlagsintensität ist das Messverfahren wesentlich ungenauer und damit als Referenzmessverfahren ungeeignet. Eine zahlenmäßig genaue Messung dieser Niederschlagsintensitäten erscheint aber nach den gegenwärtigen Kenntnissen weniger relevant.

Eine Abhängigkeit der Messgenauigkeit von anderen Einflüssen als der Niederschlagsintensität selber ließ sich nicht erkennen. Allerdings liegt für verschiedene Bedingungen nur eine geringe Anzahl von Messwerten vor, die keine statistisch gesicherte Aussage zulässt. Weitere Messungen für gesichrtere Aussagen sollten vorgenommen werden.

Aus den Erfahrungen der Messungen mit dem Referenzmessverfahren sind Anforderungen an die Sensoren für die Niederschlagsintensität abgeleitet worden. Vergleichsmessungen zwischen Referenzmessverfahren und einem ausgeführten Sensor fanden nur im geringen Umfang statt. Sie führten wie die bereits vor dem Projekt vorgenommenen Untersuchungen zu deutlich höheren Differenzen zwischen zeitgleichen Messwerten. Die Messwerte des Sensors erreichten nur maximal 40 % der Niederschlagsintensitäten, die das Referenzmessverfahren erzielte.

Mit dem entwickelten Referenzmessverfahren lassen sich Sensoren für die Niederschlagsintensität prüfen. Eine entsprechende Beschreibung wurde erarbeitet. Für eine genauere Beurteilung der Messgenauigkeit eines Sensors sind mindestens 15 Messungen über jeweils eine Minute bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten notwendig. Durch die Abhängigkeit von dem natürlichen Niederschlag ist es allerdings zeitaufwändig.

Das erprobte Referenzmessverfahren kann für eine plausible Grundkalibrierung eines kontinuierlich automatisch arbeitenden Sensors genutzt werden, der wiederum als Referenzsensor für die Überprüfung anderer Sensoren eingesetzt werden kann. Dieser kann über einen längeren Zeitraum neben einem zu prüfenden Sensor aufgestellt werden. Dadurch könnten die wegen der Wetterabhängigkeit aufwändig zu organisierenden Referenzmessungen mit den Auffangschalen entfallen.

Die hohen Differenzen zwischen Messwerten des Referenzmessverfahrens und ausgeführten Sensoren zeigen aber auch, dass eine Überprüfung dieser Sensoren für die weiterführende Messwertverarbeitung unbedingt notwendig ist. Der gegenwärtige technische Stand der Sensoren scheint den hohen Ansprüchen für den Einsatz im Straßenwesen nicht ausreichend zu entsprechen. Weitere Entwicklungen auf diesem Gebiet wären wünschenswert.

## Literatur

- [1] Konzept eines Straßenzustands- und Wetterinformationssystems (SWIS), Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Oktober 1991
- [2] Betriebstechnische Anforderungen an Glättemeldeanlagen, Bundesanstalt für Straßenwesen, November 1996
- [3] Merkblatt „Nässeerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen“, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, September 2002
- [4] Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 1: Grundlagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1986
- [5] Autorenkollektiv: Meyers kleines Lexikon „Meteorologie“, Meyers Lexikonverlag, Mannheim 1987
- [6] BACH, V.: Verbesserung der Straßenwetterprognose durch Einbeziehung der Messwerte von Glättefrühwarnsystemen, Abschlussbericht zum Forschungsauftrag FA 03.205R89H des Bundesministers für Verkehr, TH Darmstadt 1991
- [7] BADEL, H.: Praxisgerechte Anforderungen an Glättemeldeanlagen, Abschlussbericht zum BAST-Projekt 92715, Inzell, März 1996

- 
- [8] BADEL, H., BREITENSTEIN, J., SCHEURL, S., FLEISCH, J., HÄUSLER, G., WENDL, A.: Entwicklung von Prüf- und Kalibriermethoden für Fahrbahnfeuchtesensoren, Abschlussbericht zum BAST-Projekt 99653, Inzell, Februar 2002
- [9] BADEL, H., BREITENSTEIN, J.: Erfahrungsbericht über die Beurteilung von Niederschlagssensoren der Firma Vaisala, Bundesanstalt für Straßenwesen, unveröffentlicht, Inzell, April 2001
- [10] BLASER, P., LINK, P., LÜDIN, P., RYF, W.: Einfluss der Ausbringung von Streusalz auf das benachbarte und entferntere Grundwasser, Forschungsbericht Nr. 386, Peter Link AG, Dr. Heinrich Jäckli AG, 1998
- [11] HANKE, H., LEVIN, C.: Wirksamkeit des Straßenwinterdienstes auf die Verkehrssicherheit und die Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufes, Abschlussbericht zum Forschungsauftrag FA 03.174G85H des Bundesministers für Verkehr, TH Darmstadt 1987
- [12] KUTTER, M., NIEBRÜGGE, L.: Erfahrungen mit Glatteismeldegeräten beim Landschaftsverband Westfalen-Lippe, Straße und Autobahn, Heft 12/85, S. 498–503
- [13] RUESS, B.: Salz- oder Splittstreuung im Winterdienst, Forschungsauftrag 4/95 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute (VSS), Januar 1998
- [14] WILLHOLZ, J., THEEL, M., SZABO, I.: Abschlussbericht über Present Weather Sensoren (PWS), Deutscher Wetterdienst, unveröffentlicht, Februar 2000



## **Teil 3**

### **Entwicklung von Prüf- und Kalibriermethoden für Fahrbahnfeuchtesensoren**

Horst Badelt

Jürgen Breitenstein

Simon Scheurl

Jürgen Fleisch

Gerd Häusler

Alfons Wendl



## 1 Einleitung

Die Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Straßennetzes und die Gewährleistung der Verkehrssicherheit im Winter sind wichtige Aufgabengebiete des Unterhaltungs- und Betriebsdienstes. Winterliche Straßenverhältnisse führen im Vergleich mit sommerlichen Straßenverhältnissen zu erheblichen volkswirtschaftlichen Mehrkosten [13]. Vorrangiges Ziel des Winterdienstes ist deshalb, winterliche Glätte durch vorbeugende Maßnahmen zu vermeiden oder entstandene Glätte schnell zu beseitigen.

Unter dem Druck von knappen Haushaltsmitteln müssen aber auch die Kosten für den Winterdienst verringert werden. Neue organisatorische Maßnahmen und der verstärkte Einsatz von moderner Technik sollen den Winterdienst rationeller und damit wirtschaftlicher gestalten. Gleichzeitig führt die Optimierung der Maßnahmen zu einem geringeren Einsatz von Streustoffen. Damit werden auch Umweltbelastungen verringert, die bei umfangreicher Verwendung von Streustoffen unter winterlichen Verhältnissen auftreten können [7], [19].

Eine wesentliche Rationalisierung des Winterdienstes stellt die genauere Vorhersage einer winterlichen Glättebildung dar. Dafür dient das im Autobahnnetz bundesweit eingeführte Straßenzustands- und Wetterinformationssystem (SWIS) [1]. Ein Bestandteil des SWIS sind Glättemeldeanlagen (GMA), mit deren Sensorik die Parameter der Glättebildung (Fahrbahnoberflächentemperatur, Fahrbahnfeuchte, Luftfeuchte, Niederschlag u. a.) unmittelbar auf, in und an der Fahrbahn erfasst werden.

Die Messergebnisse von Glättemeldeanlagen sind einerseits eine Grundlage für längerfristige Vorhersagen einer möglichen Glättebildung durch meteorologische Dienste im Rahmen des SWIS zur besseren Planung von Winterdienstmaßnahmen und dienen andererseits unmittelbar als Entscheidungshilfe für den gezielten Beginn einer Winterdienstmaßnahme durch die Straßenmeisterei. Mit Hilfe der Glättemeldeanlagen konnten erste wesentliche Verbesserungen der bisherigen Winterdienstpraxis erreicht werden [4], [17]. Das Anlagenetz wird weiter ausgebaut, vorhandene Sensoren müssen bei Fahrbahnunterhaltungsarbeiten ersetzt werden.

Ein wesentlicher Parameter für die Vorhersage der häufig auftretenden Eisglätte ist die Fahrbahnfeuchte. Bereits sehr geringe Wasserfilmdicken führen beim Gefrieren zu einer für den Verkehrsteil-

nehmer gefährlichen Glätte [18]. Für die Winterdiensteseinsatzleitung ist weiterhin die Tendenz der Abtrocknung von Bedeutung. Bei Ausschluss weiterer Niederschläge kann bei Kenntnis des Abtrocknungsvorgangs und der Entwicklung der Fahrbahnoberflächentemperatur gegebenenfalls ein Einsatz vermieden werden. Die „Betriebstechnischen Anforderungen an Glättemeldeanlagen“ [2] schreiben für diesen Zweck die Anzeige des Fahrbahnfeuchtezustandes in vier Stufen vor: trocken, feucht, feucht-nass und nass.

In einer abgeschlossenen BAST-Untersuchung wurden visuell beobachtete Feuchtezustände mit an gleicher Stelle aufgenommenen Messdaten von 4 verschiedenen GMA-Anlagen verglichen. Die Fahrbahnsensoren waren jeweils zweimal in der Fahrbahn eingebaut, einmal in der Mitte des 3. Fahrstreifens und einmal in der Rollspur des ersten Fahrstreifens. Bei der groben Einteilung zwischen „trocken“ und „nicht trocken“ lagen die Übereinstimmungen zwischen den Messwerten und den visuellen Beobachtungen zwischen 68 und 94 % [5]. Größere Unterschiede gab es bei den differenzierten GMA-Anzeigen „trocken“, „feucht“ und „nass“. Hierbei sanken die Übereinstimmungen zu den visuellen Beobachtungen bei den betrachteten Stufen des Fahrbahnzustandes in der überwiegenden Anzahl unter 60 %. In einem Fall betrug sie nur 3,5 %.

Die genannten Sensorbeurteilungen beruhen ausschließlich auf visuellen Beobachtungen. Eine messtechnische Beurteilung war bisher wegen fehlender Messverfahren nicht möglich.

Für die zu erarbeitenden Technischen Lieferbedingungen für Glättemeldeanlagen ist deshalb ein technisch einwandfreies Messverfahren zu entwickeln, das mit hinreichender Präzision und Wiederholgenauigkeit sowohl eine objektive Beurteilung neuer als auch eine Überprüfung und Kalibrierung bereits eingebauter Sensoren ermöglicht. Eine hohe Genauigkeit der Messwerte ist eine Grundvoraussetzung für das notwendige Vertrauen der Einsatzleiter in die Anzeigewerte.

## 2 Fahrbahnfeuchte bei der Glättebildung – Kenntnisstand

### 2.1 Definitionen zur Fahrbahnfeuchte

Die Fahrbahnfeuchte wird in der Literatur qualitativ und quantitativ verschieden interpretiert, wobei die meisten Definitionen zur Bewertung einer Aquapla-

ninggefahr dienen [8], [14], [15]. Viele Größen nehmen dabei Bezug auf die Rauheit bzw. Rauheitsspitzen der Fahrbahnoberfläche und sind relativ aufwändig zu ermitteln. Die am einfachsten zu ermittelnde Größe ist die rechnerische Wasserfilmdicke. Sie ist definiert als Quotient aus dem Wasservolumen auf einer ebenen (Fahrbahn-)Fläche ohne Berücksichtigung der Oberflächenstruktur:

$$h_r = \frac{\text{Volumen}_{\text{Wasser}}}{\text{Fläche}_{\text{Fahrbahn}}}$$

Allerdings ist die rechnerische Wasserfilmdicke bei geringen Volumina im Vergleich zur Fläche eine Größe, die in der Praxis nicht nachgemessen werden kann. Die „Betriebstechnischen Anforderungen an Glättemeldealagen“ definieren deshalb zurzeit 4 Feuchtestufen mit folgender Bedeutung:

- Trocken Keine Feuchte auf der Fahrbahnoberfläche sichtbar.
- Feucht Auf der Fahrbahnoberfläche ist eine Feuchte, jedoch kein Wasserfilm sichtbar.
- Feucht-Nass ein Wasserfilm bedeckt vollständig die Fahrbahnoberfläche. Die Fahrbahnrauigkeit bleibt dabei sichtbar.
- Nass Die Fahrbahnoberfläche ist vollständig mit einem Wasserfilm bedeckt. Die Wasserfilmoberfläche liegt über den Rauigkeitsspitzen der Fahrbahnoberfläche.

Diese Einteilung enthält keine Zahlengrößen. Bei unterschiedlich rauen Fahrbahnoberflächen bedeuten sie in der Regel unterschiedliche Wasserfilmdicken, die von den Sensoren entsprechend erfasst werden müssen. Ein Teil der Hersteller von Glättemeldealagen zeigt die gemessenen Wasserfilmdicken entsprechend in Millimeter an. Andere Hersteller bilden zurzeit die Zuordnung zwischen Messwert und Wasserfilmdicke nicht. Sie geben die Fahrbahnfeuchte nur stufenartig mit verbalen Angaben („feucht“, „nass“, „nass1“ oder Ähnliches) entsprechend den Vorgaben der Anwender an.

In diesem Projekt soll für die Angabe der Fahrbahnfeuchte die rechnerische Wasserfilmdicke in Millimeter als Parametergröße verwendet werden. Eine genaue Angabe der Wasserfilmdicke auf der Fahrbahnoberfläche stellt für den Winterdienst einen Vorteil dar, weil sich aus der vorhandenen

Wasserfilmdicke die Menge des einzusetzenden Tausalzes ableiten lässt.

## 2.2 Definition der kritischen Wasserfilmdicke bei der Glättebildung

Bei Temperaturen über 0 °C senkt Wasser auf Fahrbahnoberflächen den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn. Der Kraftschluss hängt neben der Reifenart, der Wassermenge u. a. von der geometrischen Feingestalt (Rauigkeit) und der stofflichen Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche ab, wobei hauptsächlich zwischen der Makro- und Mikrorauheit an der Fahrbahnoberfläche unterschieden wird. In einem Richtlinienentwurf für die Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe [9] werden als Mikrorauheiten Rauheitselemente bis 0,5 mm horizontaler Ausdehnung angesehen. Rauheitselemente bis 50 mm horizontaler Ausdehnung werden als Makrorauheit bezeichnet.

Der Einfluss der Rauigkeit und der stofflichen Beschaffenheit auf den Kraftschluss (Griffigkeit) lässt sich unter festgelegten Bedingungen bestimmen. Dabei wird der Kraftschluss zwischen einem Messreifen (SCRIM, Stuttgarter Reibungsmesser) bzw. Pendelgummi (SRT-Pendelgerät) und einer Fahrbahnoberfläche unter festgelegten Bedingungen gemessen. Im Normalfall ist bei diesen Messungen die Fahrbahnoberfläche definiert angeätzt.

Im Winter verändern gefrorene Wassermengen auf der Fahrbahnoberfläche ebenfalls deren Eigenschaften. Bei geringen gefrorenen Wasserfilmdicken werden zunächst die Mikrorauigkeiten „geglättet“. Mit zunehmender Wassermenge sinkt auch die Griffigkeitswirkung von größeren Rauigkeitselementen. Als kritische Wasserfilmdicke im Zusammenhang mit der Eisglättebildung im Winter wird die Wasserfilmdicke angesehen, die beim Gefrieren zu einer erheblichen Absenkung des Kraftschlusses führt.

Für die Beurteilung des Kraftschlusses einer überfrorenen Fahrbahnoberfläche soll neben der subjektiven Beurteilung das SRT-Pendelverfahren zum Einsatz kommen. Dazu muss die Bewertung des Messwertes an die gesonderten Bedingungen bei tiefen Temperaturen angepasst sein (siehe Kapitel 5.2.1).

## 2.3 Einflüsse auf die Fahrbahnfeuchte

Die Fahrbahnfeuchte entsteht in erster Linie durch Niederschlag aus der Luft. Dabei gibt es folgende Möglichkeiten:

- Der Niederschlag fällt als Regen,
- durch Übersättigung der Luft mit Wasserdampf schlägt sich Niederschlag auf der Fahrbahnoberfläche nieder (Taubildung),
- der Niederschlag fällt als Eiskristalle (Schnee oder Eisregen), die unmittelbar nach dem Auftreffen auf die Fahrbahnoberfläche durch Tausalzeinwirkung oder Temperaturen über dem Gefrierpunkt schmelzen.

Eine weitere großflächige Ausbildung einer Fahrbahnfeuchte im Winter ist durch das Schmelzen von Schneewällen möglich, andere Formen sind Überschwemmungen oder Rohrbrüche. Diese Fälle werden bei den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

Nach ihrem Entstehen trocknet die Fahrbahnfeuchte durch Verdunstung, Abfluss und Verdrängung unterschiedlich schnell ab. Die Einflussgrößen dabei sind [3], [12]:

- Luftfeuchte  
Die Luft enthält u. a. Wasserdampf, den sie bis zum Sättigungsgrad auch von einer feuchten Fahrbahnoberfläche aufnimmt. Der Wasserdampfgehalt kann in verschiedenen Größen angegeben werden: z. B. relative oder absolute Luftfeuchte, Taupunkttemperatur. Beim Zuführen weiteren Wasserdampfs bei Sättigung bzw. bei Abkühlen unter der Taupunkttemperatur wird Wasser abgegeben, das sich auch auf der Fahrbahnoberfläche niederschlagen kann.
- Lufttemperatur  
Die Luft nimmt in Abhängigkeit von ihrer Temperatur eine bestimmte Wassermenge auf. Das Aufnahmevermögen nimmt mit fallender Temperatur ab.  
  
Die Temperatur (0-°C-Grenze) bestimmt, welchen Aggregatzustand der bei Übersättigung aus der Luft ausscheidende Wasserdampf einnimmt: in Form kleiner Wassertröpfchen (Nebel, Wolken, Tau) bei Temperaturen über 0 °C bzw. als Eiskristalle (Schnee, Reif, Eisregen) bei Temperaturen gleich oder unter 0 °C.  
  
Die Temperatur der Luft hängt wiederum von verschiedenen Faktoren ab.
- Wind  
Wind als bewegte Luft infolge von Luftdruckunterschieden in der Atmosphäre führt zu wechselnden Luftmengen über der Fahrbahnober-

fläche. Bei der Verdunstung von Wasser auf der Fahrbahnoberfläche ist eine darüberliegende unbewegte Luftschicht schnell gesättigt. Die Weiterleitung des Wasserdampfes in der Luft geht vergleichsweise langsam vor sich.

Bei Wind wird in der Regel mit Wasserdampf ungesättigte Luft an die Fahrbahnoberfläche herangeführt und damit der Verdunstungsprozess beschleunigt. Die Verdunstungszeit hängt von der Konzentration des Wasserdampfes in der Luft ab. Ist die herangeführte Luft bereits mit Wasserdampf gesättigt, trocknet die Fahrbahnoberfläche nicht weiter ab.

- Verkehr  
Der Verkehr wirkt sich durch mehrere Faktoren auf die Fahrbahnfeuchte aus.
  - Durch die Reifen treten eine mechanische Verdrängung und Aufwirbelung von vorhandener Feuchte auf. Die aufgewirbelte Wassermenge kann schneller verdunsten, da sie in einer größeren Luftschicht verteilt wird.
  - Durch die erzeugten Luftbewegungen wird immer wieder trockenere Luft über der Fahrbahnoberfläche herangeführt, wodurch sich der Verdunstungsprozess beschleunigt.
  - Eine hohe Verkehrsdichte erhöht in den Rollspuren der Fahrbahnoberfläche die Fahrbahnoberflächentemperatur in geringem Umfang [6]. Wasser mit einer höheren Temperatur verdunstet schneller.  
  
Bei intensiver Sonneneinstrahlung kann der Verkehr die Fahrbahnoberflächentemperatur aber auch absenken, weil immer wieder kühlere Luftmassen an die Fahrbahnoberfläche herangeführt werden und somit der Wärmeabtransport von der Fahrbahnoberfläche erhöht wird [6].
- Neigung, Rauheit und Ebenheit der Fahrbahn  
Je nach Neigung, Rauheit und Ebenheit der Fahrbahn kommt es vor allem bei intensivem Niederschlag in Form von Regen zu einem unterschiedlichen Abflussverhalten der Fahrbahnnaße.

### 3 Technischer Stand der Sensorik für die Fahrbahnfeuchte

Bisher ausgeführte Sensoren für die Fahrbahnfeuchte lassen sich in zwei Gruppen einteilen:



a) Die Sensoren sind in der Fahrbahn eingebaut und stellen Feuchte bzw. die Feuchtemenge durch einen direkten Kontakt mit der Feuchte fest. Die Feuchte ändert entsprechend ihrer Menge die elektrischen Kenngrößen der Sensoren. Folgende Größen werden bei bisherigen Sensoren genutzt:

- Leitfähigkeit,
- Kapazität,
- Frequenz,
- Widerstand,
- Reflexion von Wellen.

Die Feuchtesensoren sind bei allen bisherigen Glättemeldeanlagen zusammen mit Sensoren für andere Parameter wie Fahrbahnoberflächentemperatur, Fahrbahnglätte oder Gefriertemperatur in einem Sensorblock zusammengefasst. Die Blöcke erreichen Abmessungen bis ca. 30 cm Länge. Die Fläche, auf der die festgestellte Feuchte wirkt, ist bei bisherigen Anlagen nicht größer als ein Quadratdezimeter.

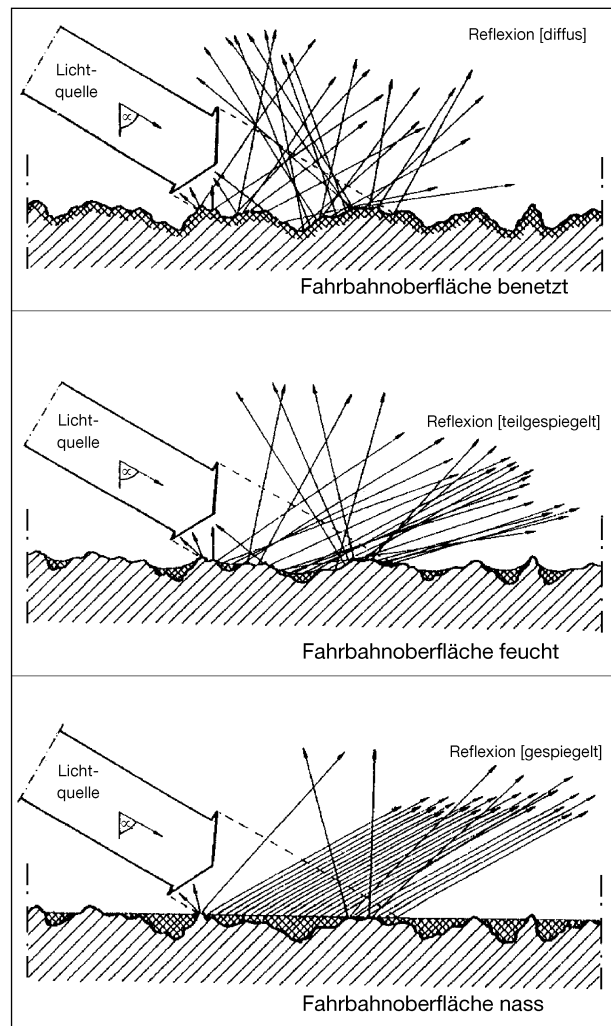
b) Berührungslose Messverfahren

Die Fahrbahnfeuchte beeinflusst in Abhängigkeit von ihrer Fahrbahnbedeckung die Reflexion von Strahlung. An einer trockenen Fahrbahnoberfläche werden definiert ausgesendete Strahlen sehr diffus reflektiert. Mit zunehmender Bedeckung mit Wasser tritt eine Glättung der Oberflächenstruktur ein und die Reflexion der Strahlen wird zunehmend gleichmäßiger. Bei vollständiger Überdeckung der Rauheitsspitzen reflektieren alle ausgesendeten Strahlen in nahezu gleichem Winkel (Bild 1).

Entsprechend der Wellenlänge der Strahlung werden die Verfahren unterschieden:

- Infrarotverfahren,
- Mikrowellenverfahren [20].

Die Verfahren arbeiten mit unterschiedlichen Ausführungen der Messgrößenerfassung. Bei einigen Ausführungen sind Sender und Empfänger für die Strahlung in einer Baugruppe zusammengefasst. Bei anderen Anlagenausführungen sind die Sende- und Empfangsteile getrennt, wobei die Strahlung an einem Fahrbahnrand ausgesendet und auf dem gegenüberliegenden Rand entsprechend der vorhandenen Fahrbahnfeuchte empfangen wird.



**Bild 1:** Reflexionsverhältnisse bei unterschiedlichen Feuchtezuständen von Fahrbahnoberflächen [16]

Kein berührungsloses Verfahren hat bisher eine umfangreichere Praxisanwendung mit zufriedenstellenden Messergebnissen erreicht.

Die Feuchtemenge wird bei einigen Anlagen nicht direkt mit einem Bodensensor gemessen, sondern von der Niederschlagsintensität abgeleitet. In der Regel messen derartige Anlagen nur, ob auf der Fahrbahnoberfläche eine Feuchte vorhanden ist, die Menge können sie nicht differenzieren. Bei diesen Anlagen ist eine Prüfung des Übergangs von trocken auf feucht bei einem Niederschlagsbeginn und umgekehrt notwendig. Für die Prüfung der differenzierten Angaben der Niederschlagsmenge ist eine Prüfung der Niederschlagssensoren notwendig, die nicht Gegenstand dieses Projektes ist. Eine Bewertung einer Fahrbahnfeuchte anhand der Niederschlagsmenge ist auch aufgrund der unterschiedlichen Verweildauer auf der Fahrbahnoberfläche infolge der im Kapitel 2 genannten verschiedenen Einflussfaktoren als zu ungenau anzusehen.

## 4 Entwicklungsziel

Ein Winterdienstverantwortlicher kann eine mögliche Eisglättebildung nur dann genau einschätzen, wenn er die genaue Feuchtemenge auf der Fahrbahnoberfläche weiß. Erste quantitative Versuche zu dieser Problematik zeigen, dass bereits eine Wasserfilmdicke um 0,03 mm im Gefrierfall zu einer Griffigkeitsabsenkung führt, die für den Kraftfahrer gefährlich sein kann.

Die zur Verfügung stehende Messtechnik in Glättemeldeanlagen zeigt nach subjektiver Beurteilung der Nässesituation vor allem im Bereich des Übergangs von trocken zu feucht teilweise falsche Ergebnisse an. Um ein höheres Vertrauen zur Messtechnik zu erreichen, ist eine objektive Prüf- und Kalibriermethode erforderlich. Entsprechende Methoden stehen bisher nicht zur Verfügung und sind daher zu entwickeln.

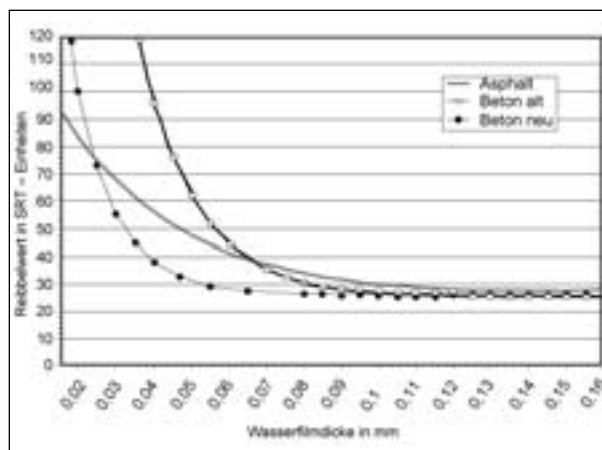
Da eine einfache Bestimmung der Wasserfilmdicke mit einfachen Methoden der Höhenmessung (z. B. Messschieber) aufgrund der Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche nur sehr ungenau ist, muss mit den Prüf- und Kalibriermethoden in einfacher Weise und mit einer hohen Wiederholgenauigkeit ein gleichmäßiger dünner Wasserfilm auf einem Sensor aufgetragen werden können. Das Verfahren soll nach Möglichkeit sowohl für die Eignungs- als auch für die Abnahmeprüfung an Sensoren im eingebauten Zustand anwendbar sein. Dabei soll die Idee einer maschinell geführten Spritzpistole in die Praxis umgesetzt und erprobt werden.

## 5 Kritische Wasserfilmdicken für die Glättebildung

### 5.1 Vorliegende kritische Wasserfilmdicken für die Glättebildung

Erste Bestimmungen zur Bewertung der kritischen Wasserfilmdicke fanden in einer Kältekammer statt. Auf 3 verschiedenen Bohrkernen wurden dünne Wasserfilmdicken mit einem Schwamm aufgetragen, die bei Temperaturen unter 0 °C gefroren. Anhand der Massendifferenz zwischen trockenem und feuchtem Bohrkern sowie der bekannten Fläche wurde die Wasserfilmdicke bestimmt.

Unter Verwendung eines SRT-Pendelgerätes wurde die Griffigkeit der eisüberdeckten Bohrkernoberfläche bestimmt. Die Versuche führten zu dem Er-



**Bild 2:** Änderung der SRT-Messwerte in Abhängigkeit von einer gefrorenen Wasserfilmdicke bei -5 °C, Auftragung der Wasserfilmdicke mit einem Schwamm [18]

gebnis, dass bereits ab einer Wasserfilmdicke von ca. 0,03 mm SRT-Messwerte unter 50 entstanden (Bild 2). Ein SRT-Messwert unter 50 bedeutet nach dem Merkblatt über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Ausgabe 1968, [11] und der Arbeitsanweisung für das SRT-Pendelgerät [10] schlechte Werte für die Griffigkeit, bei denen geeignete Maßnahmen für die Verkehrssicherheit eingeleitet werden sollten.

Der Nachteil dieser Aufbringungsmethode mit dem Schwamm besteht darin, dass keine definierte Wasserfilmdicke aufgetragen werden kann.

### 5.2 Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der kritischen Wasserfilmdicke

#### 5.2.1 Versuchsdurchführung

Für das definierte Auftragen einer sehr dünnen Wasserfilmdicke auf einer Fahrbahn- oder Sensoroberfläche kam in den weiteren Versuchen eine handgeführte Spritzpistole zum Einsatz. Mit ihr wurde versucht, sehr dünne und gleichmäßige Wasserfilmdicken an ausgesuchten Bohrkernen bei einer Temperatur von -5 °C aufzutragen, die unmittelbar nach dem Auftragen gefroren. Die Wasserfilmdicke wurde auch in diesen Fällen aus der beaufschlagten Fläche und der Massendifferenz zwischen dem trockenem und befeuchteten Bohrkern berechnet.

Die Bohrkern wurden vor der Benetzung und den anschließenden Griffigkeitsmessungen bei rund +40 °C im Klimaschrank getrocknet und anschließend mindestens 16 Stunden bei -5 °C abgekühlt.

Die relative Luftfeuchte betrug während der Versuche in der Kältekammer ca. 55-65 %. Ein Versuch war innerhalb von ca. 5 min abgeschlossen, sodass die Verdunstung von Eis bei der Bewertung vernachlässigt werden kann.

Nach mehreren Probedurchgängen lagen nach subjektiven Prüfungen durch visuelle Betrachtung und Abtasten mit der Hand Erfahrungen für ein weitgehend gleichmäßiges Aufspritzen vor. Die Gleichmäßigkeit ist durch den Abstand der Spritzpistole zum Bohrkern, durch die Einstellungen an der Spritzpistole (Öffnungsstand der Wasser- und Luftdüsen sowie der dort anstehende Luftdruck) und durch den Abstand der Spritzpistole zum Bohrkern beim Spritzen bestimmt. Die Auftragsmenge wird im Wesentlichen durch die Geschwindigkeit und/oder die Anzahl der Spritzübergänge reguliert. Mit der Handführung lässt sich aber eine vorgesehene Menge nur sehr ungenau einhalten. Jedoch konnte mit einer hohen Anzahl von Versuchen ein breites Band unterschiedlicher Wasserfilmdicken erzielt werden. In der Regel wurde eine höhere Wasserfilmdicke durch mehrmalige und nicht durch langsamere Übergänge mit der Spritzpistole erreicht.

### 5.2.2 Auswahl der Probestücke

Für die Versuche standen Bohrkern mit verschiedenen Griffigkeitswerten und Rautiefen, die mit einem SRT-Pendelgerät bzw. mit der Sandfleckmethode bestimmt wurden, zur Verfügung. Der Durchmesser der Bohrkern betrug 15 bis 16 cm. Für die Versuche wurde ein spezieller Pendeltisch genutzt, mit dem sich eine parallele Lage der Bohrkern zur Pendelebene ohne größeren Aufwand und schnell einstellen ließ (Bild 3).

Die Bohrkern wiesen sehr verschiedene Griffigkeitswerte und Rautiefen auf, wie aus der Spreizung der ermittelten Messwerte (Tabelle 1) ersichtlich ist. Bei einer Reihe von Oberflächentypen ergaben sich bereits unter Nässe SRT-Messwerte, die wenig über dem Schwellenwert von 50 für eine schlechte Griffigkeitsbewertung liegen [10], [11]. Ebenso besitzen einige Oberflächentypen teilweise sehr geringe Rautiefen. Auf Oberflächen mit einer geringen Griffigkeit und/oder geringer Rautiefe wird eher eine niedrige kritische Wasserfilmdicke im Zusammenhang mit der Glättebildung erwartet.



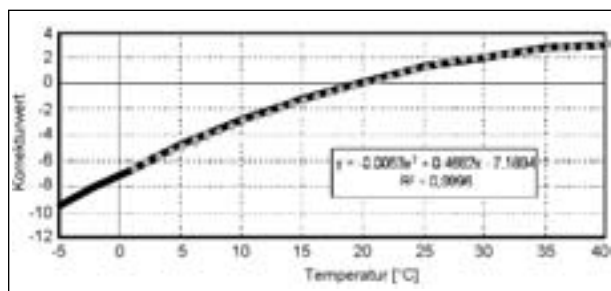
Bild 3: SRT-Pendelgerät auf Einspanntisch

Bohrkern verschiedener Deckschichtbauweisen	Korrigierter Griffigkeitsmesswert nach SRT bei 15 °C und Nässe (Mittelwert aus 5 Einzelwerten)	Rautiefen mit dem Sandfleckverfahren (Mittelwert aus 3 Einzelwerten)
Asphalt (01)	62	0,25
alter Beton (02)	54	0,60
neuer Beton (04)	74	0,62
Gussasphalt (06)	68	Nicht bestimmt
Asphalt (07)	55	0,28
alter Beton (11)	55	0,64
offenporiger Asphalt (12)	44	Entfällt
Splitt-Mastix-Asphalt (13)	51	0,66
neuer Asphalt (14)	55	Nicht bestimmt
offenporiger Asphalt (17)	55	0,98
neuer Asphalt (21)	51	0,14
neuer Beton (22)	52	0,31

Tab. 1: Griffigkeitswerte nach SRT und Rautiefen nach dem Sandfleckverfahren ausgewählter Deckschichtbauweisen für die Bestimmung kritischer Wasserfilmdicke bei der Glättebildung

### 5.2.3 SRT-Pendelverfahren bei tiefen Temperaturen

Für die Bewertung der Griffigkeit im Labor bei tiefen Temperaturen ist neben einer subjektiven Betrachtung nur das SRT-Pendelverfahren geeignet. Der Einsatz des Verfahrens wird allerdings in einer



**Bild 4:** Temperaturkorrektur für die Messergebnisse des SRT-Pendelgerätes

Arbeitsanweisung für das SRT-Pendelgerät bei Temperaturen unter +5 °C für die Anwendung nicht empfohlen, weil bei den tiefen Temperaturen eine erhöhte Beanspruchung des Messpersonals und eine damit sinkende Qualität der Messungen erwartet werden [10].

Das Verfahren ist temperaturabhängig, die Messwerte müssen entsprechend der Temperatur korrigiert werden. Korrekturwerte liegen für die Temperaturen von 0 °C und tiefer nicht vor. Ausgehend von den in der Arbeitsanweisung enthaltenen Korrekturwerten für den Temperaturbereich von +1 °C bis +40 °C wurde durch Extrapolation der Korrekturwert bei -5 °C ermittelt. Mit dem Funktionsansatz  $y = ax^2 + bx + c$  erreicht die Korrelation zwischen den vorhandenen Korrekturwerten und den dazugehörigen Temperaturen ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9996$  (Bild 4). Der nach der genannten Funktion abgeleitete Korrekturwert bei -5 °C beträgt dann -9,7. Um diesen Wert wurden die ermittelten Pendelwerte bei diesen Temperaturen in den nachfolgenden Darstellungen korrigiert.

#### 5.2.4 Messergebnisse

Anhand der bestimmten Massen der Bohrkerns vor und nach Aufspritzen sowie der ermittelten bespritzten Flächen wurden unter der Voraussetzung eines gleichmäßigen Auftrags rechnerische Wasserfilmdicken ab ca. 0,005 mm aufgebracht. Da die Spritzpistole das Wasser extrem fein ausbringt und Wasser auf Fahrbahnoberflächen aufgrund der Mikrostruktur sehr gut verläuft, waren keinerlei Tropfenbildungen auf den Oberflächen zu erkennen.

Eine Wasserfilmdicke von 0,01 mm ist deutlich als Feuchte sichtbar. Nach deren Gefrieren war bei einem einmaligen Berühren mit der Hand eine deutliche Glätte spürbar. Die Eismengen schmolzen und verdunsteten durch die Wärmezufuhr beim Berühren aber sehr schnell. Deshalb ist es fraglich, ob diese sehr geringen Mengen in der Praxis nicht

nach wenigen Überfahrungen schnell verschwunden sind bzw. einen Bremsvorgang wesentlich verlängern.

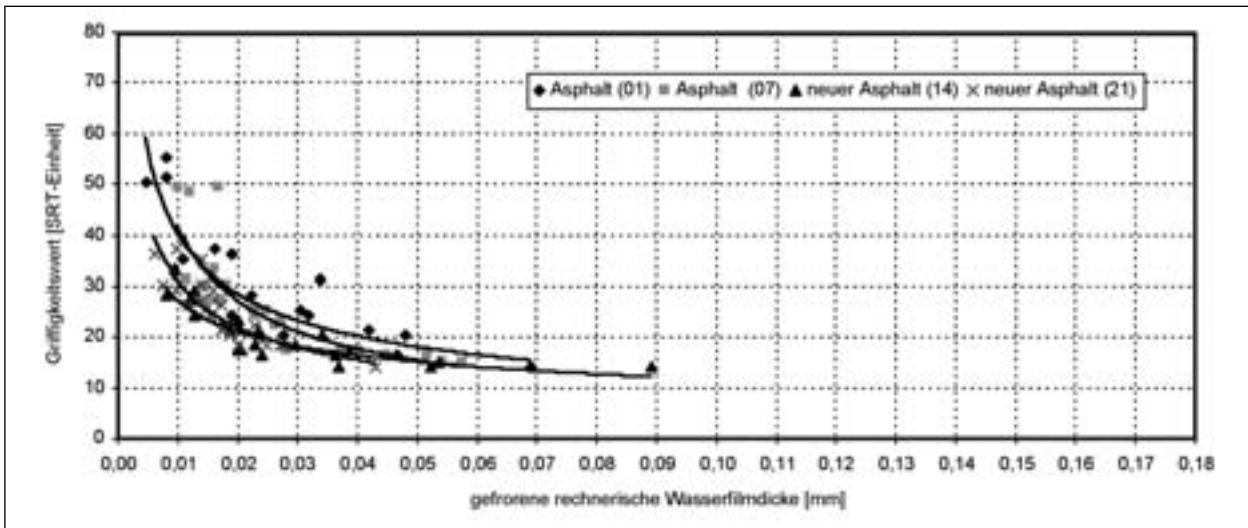
Die mit dem SRT-Pendelgerät ermittelten Griffigkeitsmesswerte nach der Eisbildung verschiedener Wasserfilmdicken waren für die verschiedenen Bohrkerns recht unterschiedlich (siehe Bilder 5 bis 7).

Bei den vorgenommenen Korrelationen zwischen der gefrorenen Wasserfilmdicke und der gemessenen Griffigkeit mit einer Potenzfunktion der Form  $y = ax^b$  ergaben sich Bestimmtheitsmaße  $R^2$  zwischen 0,76 und 0,88. Die Abweichungen von diesem funktionellen Zusammenhang werden vor allem auf eine ungleiche Auftragung des Wassers aufgrund der handgeführten Spritzpistole zurückgeführt. Weitere Fehler können bei der Messung mit dem SRT-Gerät oder durch die Wägung aufgetreten sein. Die erreichten Genauigkeiten reichen jedoch für die Abschätzung der kritischen Wasserfilmdicken aus.

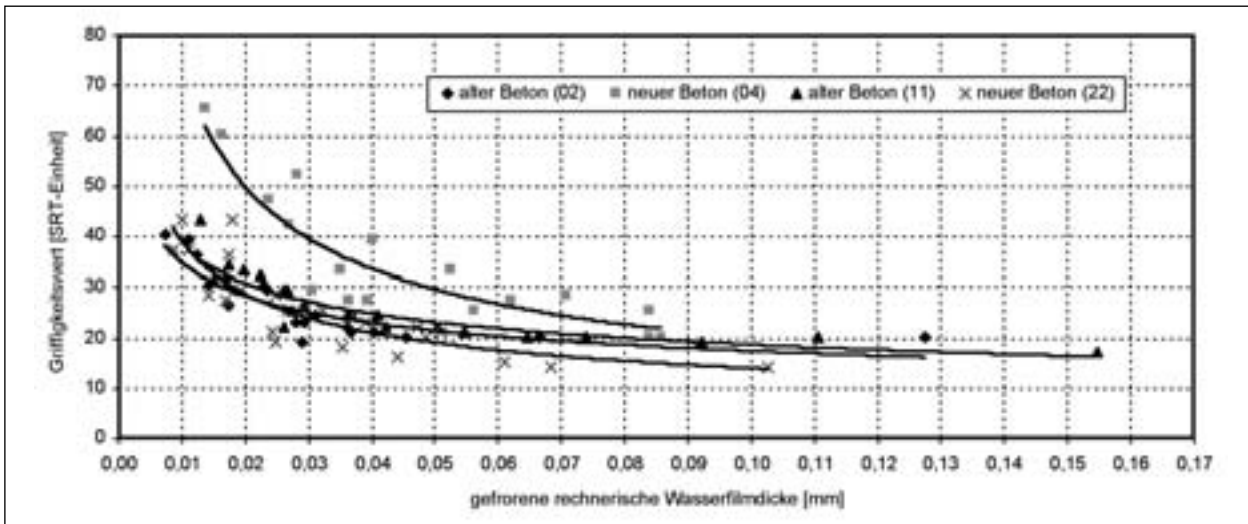
Nur bei den 3 Bohrkernen mit einem SRT-Messwert bei Nässe über 60 entstand nach dem Gefrieren geringer Wasserfilmdicken zwischen 0,005 mm und 0,015 mm noch keine gefährliche Glätte, d. h., die SRT-Messwerte blieben über dem Schwellenwert für eine ungenügende Griffigkeit von 50. Der Schwellenwert wurde bei einem dieser Bohrkerns entsprechend der berechneten Korrelationsfunktion bei etwa 0,007 mm rechnerischer Wasserfilmdicke unterschritten. Bei den anderen beiden Bohrkernen trat die Unterschreitung des Schwellenwertes ebenfalls entsprechend der berechneten Korrelationsfunktion erst bei einer Wasserfilmdicke zwischen 0,01 und 0,02 mm ein.

Bei den Bohrkernen, die schon bei Nässe nur einen SRT-Messwert von knapp über 50 erreichten, führten bis auf vereinzelte Ausnahmen bereits gefrorene Wasserfilmdicken von 0,01 mm und darunter zu SRT-Messwerten unter 40. Alle Bohrkerns mit Ausnahme der Gussasphaltdeckschicht und einer neuen Betondeckschicht erreichten SRT-Messwerte unter 30 schon bei einer Wasserfilmdicke bis 0,03 mm. Bei höheren Wasserfilmdicken war nur noch ein langsames Abfallen der SRT-Messwerte feststellbar. Die unterschiedlichen Rautiefen der einzelnen Bohrkerns haben anscheinend wenig Einfluss auf das Griffigkeitsverhalten beim Überfrieren von Feuchte.

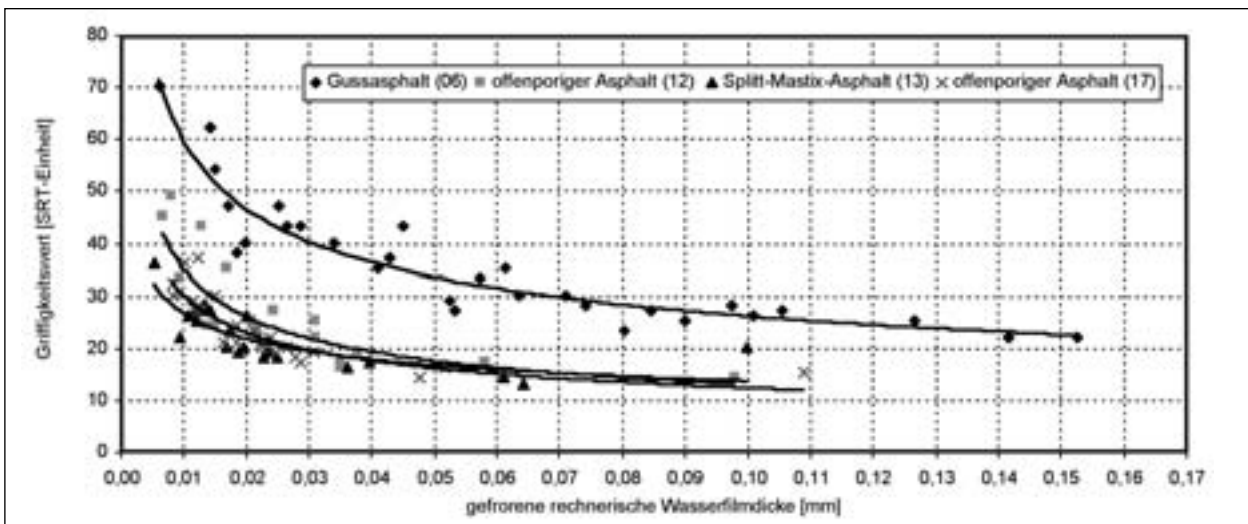
Vereinzelt wurde die Glättebildung subjektiv durch Darübereitschen mit einem Schuh bewertet, der



**Bild 5:** Griffigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit von einer gefrorenen Wasserfilmdicke bei -5 °C auf verschiedenen Fahrbahndeckschichten in Asphaltbauweise



**Bild 6:** Griffigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit von einer gefrorenen Wasserfilmdicke bei -5 °C auf verschiedenen Fahrbahndeckschichten in Betonbauweise



**Bild 7:** Griffigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit von einer gefrorenen Wasserfilmdicke bei -5 °C auf verschiedenen Fahrbahndeckschichten in Asphaltbauweise

ein glattes Profil hatte. Ab einer Wasserfilmdicke von 0,03 mm war besonders auf den „glatten“ Bohrkernen eine sehr deutliche Glätte länger anhaltend spürbar.

Aus den vorliegenden Ergebnissen kann der Wert von 0,01 mm für eine kritische Wasserfilmdicke bei der Glättebildung als nahezu allgemeingültig abgeleitet werden. Ab dieser Wasserfilmdicke ist eine deutliche Absenkung der SRT-Messwerte bei nahezu allen für die Untersuchung genutzten Probe­stücken verschiedener Deckschichten messbar. Bei zwei „griffigen“ Bauweisen lag sie mit rund 0,02 mm nur unwesentlich darüber. Ebenso ist auf allen Deckschichten subjektiv eine Griffigkeitsabsenkung beim Überfrieren dieser geringen Wasser­filmdicken im Vergleich zum trockenen oder nassen Zustand spürbar, auch wenn es gegenwärtig keinen Nachweis für die längere Haltbarkeit dieser extrem dünnen Eisschichten unter Verkehrseinwirkung gibt.

Eine Wasserfilmdicke von 0,01 mm sollte deshalb von der Sensorik für Glättemeldeanlagen bei Vorhersage einer Eisglättegefahr sicher erkannt werden. Für die Prüfung derartiger Sensoren ist ein entsprechendes Verfahren zum gleichmäßigen Auftragen dieser extrem dünnen Wasserfilmdicke zu entwickeln.

## 6 Auftragen einer gleichmäßigen Wasserfilmdicke

### 6.1 Beschreibung Prüfvorrichtung

Anhand der Erfahrungen aus den im Kapitel 5 beschriebenen Versuchen wurde eine maschinelle Vorrichtung zum Führen einer Airbrush-Spritzpistole erstellt. Das äußere Gestell der Vorrichtung hat die Form eines flachen Tisches mit vier Beinen und eine Abmessung von ca. 110 x 110 x 50 cm (Bild 8). Eine bewegliche Baueinheit mit zwei Stellmotoren führt innerhalb des Gestells die Spritzpistole in einer Ebene ca. 23 cm über der Fahrbahnoberfläche jeweils in x-y-Richtung weitestgehend beliebig. Die maximal überfahrbare Fläche beträgt 50 x 50 cm. Zurzeit sind ausgeführte Sensoren wesentlich kleiner. Auch in Zukunft ist nicht mit größeren Sensoren zu rechnen, da es schwierig ist, derart große Sensoren ebenflächig in der Fahrbahn einzubauen.

Die Spritzpistolenöffnung besitzt eine definierte Höhe innerhalb der Vorrichtung. Die gesamte Ein-



**Bild 8:** Gesamtansicht der Kalibriervorrichtung im Labor



**Bild 9:** Befestigung der Spritzpistole und des Wasserbehälters an der Verfahrvorrichtung

richtung lässt sich auf der Fahrbahn aufstellen, ohne dass die Einstellung der Spritzhöhe verstellt werden muss. Im Labor können die Sensoroberflächen durch einen höhenverstellbaren Tisch in die Spritzebene eingebracht werden.

Mit Hilfe einer Steuerelektronik und eines Steuerprogramms lassen sich der Fahrweg und die Geschwindigkeit der Spritzpistole innerhalb der gesamten Fläche beliebig einstellen. Für die x- und y-Richtung sind jeweils unterschiedliche Geschwindigkeiten einstellbar.

Die Airbrush-Spritzpistole sprüht senkrecht nach unten. Die Einstellvorrichtungen an der Spritzpistole für die Luftzufuhr und die Düsenöffnung sind durch Anschlagsschrauben fest justiert. Die Einstellungen werden im Betrieb nicht geändert. Der Luftdruck am Kompressorausgang ist bei den Versuchen auf 1,5 bar konstant eingestellt. Das Wasser fließt der Spritzpistole aus einem oberhalb liegenden Behälter zu. Das Behältervolumen beträgt etwa 0,5 l (Bild 9). Aufgrund dieser Menge und der

Behälterform ändert sich der Wasserspiegel im Betrieb innerhalb von 10 min nur um etwa 5 mm, so dass aus der Wasserspiegelsenkung nur vernachlässigbare Auswirkungen auf die Druckverhältnisse und damit den Wasserdurchsatz in der Spritzpistole zu erwarten sind. Die gewünschte Auftragsmenge wird über die Geschwindigkeit der Führung bzw. durch mehrmaliges Überfahren geregelt.

Die Spritzpistole kann nur einen schmalen Streifen bespritzen, sodass für das Bespritzen einer größeren Fläche mehrere Übergänge mit entsprechendem Längsversatz der Spritzpistole notwendig sind.

Bei ersten Versuchen waren deutliche Einflüsse durch vorhandenen Luftzug im Labor sichtbar, was auch zu einer messbaren ungleichmäßigen Verteilung des Wassers führte. Da auch mit Luftzug bei Einsatz auf der Fahrbahn zu rechnen ist, wurde zur Fehlerminimierung der äußere Rahmen der Spritzvorrichtung mit Blechen versehen.

## 6.2 Gleichmäßigkeit der Wasserfilmauftragung

Die mit der Spritzvorrichtung ausgetragenen Wasserfilmdicken sollten nach ersten Überlegungen mit einem Messkamm gemessen werden. Ein Messkamm hat die Form einer mehreckigen Metallscheibe. Jede Seite hat zwei Standfüße. Zwischen diesen Standfüßen befinden sich mehrere Nocken, die im Bezug zu einer ebenen Fläche unterschiedliche Abstände haben (Bild 10). Eine vorhandene Wasserfilmdicke wird an dem Nocken mit dem größten Abstand abgelesen, der noch Kontakt mit dem auf einer ebenen Fläche aufgetragenen Wasserfilm hat.



Bild 10: Messkamm für das Messen von Schichtdicken

Das Messen der geringen Wasserfilmdicke mit einem Messkamm ließ sich nicht realisieren, weil sich das Wasser auf ebenen Oberflächen aufgrund von Adhäsionskräften zu Tropfen zusammenzieht. Es konnte kein wasserentspannendes Mittel gefunden werden, das die Tröpfchenbildung auf verschiedenen Kunststoff- oder Metallflächen unterbindet und damit eine genaue Messung zulässt.

Alternativ wurde die Gleichmäßigkeit des Auftrags von sehr dünnen Wasserfilmdicken durch Wägung nach Bespritzen von so genannten Prüfstreifen nachgewiesen. Dazu erfolgte der Wasserauftrag mit der maschinell geführten Spritzpistole auf 10 aneinanderliegende Streifen aus Kunststoff mit einer Abmessung von 300 x 10 x 10 mm. Neben den beiden äußeren Streifen lag jeweils ein weiterer Streifen, der ein seitliches Bespritzen dieser Messstreifen verhindern sollte. Vor und nach dem Auftragen wurde die Masse der Streifen gewogen und aus der Differenz die Wasserfilmdicke berechnet.

Die geringe Fläche dieser Messstreifen macht den Einsatz einer Waage mit einer Auflösung von 0,001 g notwendig. Wägungsfehler traten in erster Linie durch Luftzug auf. Deshalb stand die Waage in einem Glaskasten, der nur nach einer Seite offen war (Bild 11). Weiterhin beeinflussten statische Aufladungen der Messstreifen die Waage. Zur Vermeidung dieses Einflusses wurden die Streifen mit Antistatikspray besprüht. Mit diesen Maßnahmen wird der Wägungsfehler auf rund 0,003 g geschätzt, der bei den eingesetzten Streifen einer Wasserfilmdicke von rund 0,001 mm entspricht.

Nach umfangreichen Optimierungsversuchen betrugen die Differenzen zwischen den auf den Streifen aufgetragenen Wassermengen maximal rund 30 %. Die hohe Differenz wird neben dem Wägefehler und den tatsächlichen Ungleichmäßigkeiten

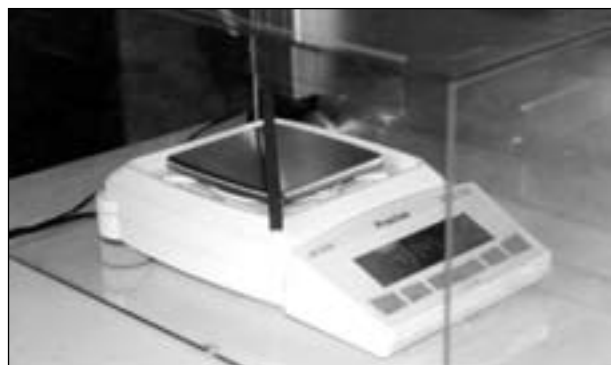


Bild 11: Wägung eines Prüfstreifens in einem Glaskasten auf einer Waage mit 0,001 g Auflösung

beim Aufspritzen auch auf die Verdunstung des aufgetragenen Wassers zurückgeführt.

Während der Wägung aller 10 Streifen nimmt die Wassermenge tendenziell vom 1. zum 10. Messstreifen infolge der auftretenden Verdunstung ab. Zwischen der Wägung des ersten und des zehnten Streifens vergehen rund 90 Sekunden. Der Einfluss durch Verdunstung und nicht durch Unregelmäßigkeiten bei der Spritzpistole lässt sich durch eine andere Reihenfolge bei der Wägung nachweisen.

Auffällig war bei den meisten Versuchen eine tendenziell deutlichere Abnahme der Wassermasse auf den jeweils letzten 1-3 gewogenen Messstreifen. Nach dem Aufspritzen wurden die Messstreifen neben die Waage gelegt. Zur besseren Handhabung blieben die äußeren Streifen unter der Spritzvorrichtung liegen, die das seitliche Bespritzen vermeiden sollten. Da die Streifen bis zur Wägung unmittelbar nebeneinander liegen blieben, hatte nur der äußere Streifen eine frei stehende Längsseite. Die dadurch mögliche Überströmung von mehr trockener Luft bewirkt wahrscheinlich eine höhere Verdunstung auf diesem und den benachbarten Streifen. Wird das Messergebnis des äußeren Messstreifens außer Acht gelassen, weichen die gemessenen Wasserfilmdicken auf den einzelnen Streifen bis rund 20 % voneinander ab.

Bei relativen Luftfeuchten von 65-70 % und Lufttemperaturen zwischen 10-12 °C verdunsten ca. 0,002 mm Wasserfilmdicke in der Minute. Bei Lufttemperaturen um 20 °C und 50-60 % relativer Luftfeuchte sind es innerhalb einer Minute ca. 0,003 mm Wasserfilmdicke. Allerdings wurden diese Messergebnisse auf einem einzelnen Messstreifen ermittelt, indem nach dem Bespritzen die Abtrocknung auf der Waage gemessen wurde (siehe Bild 11).

Für definierte Messungen müssen definierte Bedingungen vorherrschen. Aufgrund der nicht einstellbaren Luftfeuchte im Labor konnte keine genaue Abhängigkeit zwischen Verdunstung des aufgetragenen Wasserfilms, Temperatur und relativer Luftfeuchte ermittelt werden, sodass diese auch nicht berücksichtigt werden konnte.

Es ist davon auszugehen, dass die Wasserfilme mit der entwickelten Vorrichtung gleichmäßiger aufgetragen werden können, als die gemessenen Abweichungen auf den Messstreifen von bis zu 30 % angeben. Aus der Erfahrung bei der Versuchsdurchführung wird geschätzt, dass nach Eliminierung der

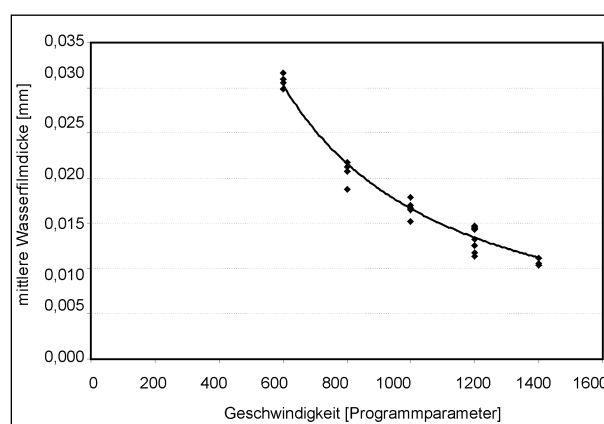
Fehler bei der Wägung und durch die Verdunstung die tatsächlichen Wassermengen auf den Teststreifen um maximal  $\pm 8\%$  von einem Mittelwert abweichen.

### 6.3 Wiederholbarkeit der Auftragungen

Neben der Gleichmäßigkeit auf der Fläche wurde auch die Wiederholbarkeit der Auftragungsmenge untersucht. Hier traten bei den durchgeführten Messungen Unterschiede bis rund 25 % auf (Bild 12). Die Ursache wurde auf Unregelmäßigkeiten in der Spritzpistole zurückgeführt. Andere Ursachen sind vernachlässigbar: Ein eingestellter Laufweg der Führungsvorrichtung wird sekundengenau wiederholt. Ebenso treten nur sehr geringe Schwankungen bei der Luftzufuhr auf, die sich aber leicht korrigieren lassen.

An der Spritzpistole führen wahrscheinlich Kalkablagerungen aus dem Leitungswasser zu vorübergehenden Verengungen an den feinen Spritzöffnungen. Denkbar sind auch Luftblasen in der Spritzpistole, die den Medienquerschnitt einengen. Zur Vermeidung derartiger Fehlerquellen muss die Spritzmenge je Zeiteinheit (eine Minute) jeweils vor und nach den Einstell- und Prüfarbeiten kontrolliert werden. Die ausgebrachte Wassermenge wurde in einem Becherglas aufgefangen (Bild 13).

Nach den aufgeführten Versuchen fanden Untersuchungen statt, welche die Wiederholbarkeit einer gewünschten Auftragungsmenge verbessern sollten. Durch visuelle Kontrollen können Blasenbildungen in der Zuleitung beseitigt werden. Ebenso wurden die Spritzdüse und -nadel öfters gereinigt. Mit diesen Maßnahmen wurde erreicht, dass die Ausbringungsmenge um einen Mittelwert von 8,8 g/min



**Bild 12:** Wiederholbarkeit für das Auftragen von dünnen Wasserfilmdicken





**Bild 13:** Auffangen der Spritzmenge mit einem Becherglas

um  $\pm 6\%$  schwankt. Höhere Genauigkeiten bedeuten bei der vorhandenen Spritzpistole einen erhöhten Einstellaufwand. Zur Vermeidung von Kalkanlagerungen in der Spritzpistole und den Leitungen wurden die Versuche mit entionisiertem Wasser durchgeführt.

## 7 Anwendung des Messverfahrens im Labor und auf der Fahrbahn

### 7.1 Beschreibung der Testdurchführung

Tests der Spritzvorrichtung fanden im Labor und/oder auf der Fahrbahn an sechs Sensoren (4 Typen) für die Fahrbahnfeuchte statt. Bei den Tests wurde jeweils nur der Messwert betrachtet, der die Fahrbahnfeuchte angibt. Plausibilitätsprüfungen der Messwerte zur Fahrbahnfeuchte, bei denen die Glättemeldeanlagen z. B. den Niederschlag oder eine hohe Luftfeuchte bei Beginn einer Fahrbahnfeuchte einbeziehen, wurden nicht durchgeführt. Drei der eingesetzten Sensortypen leiteten die Wasserfilmdicke von einem elektrischen Messwert



**Bild 14:** Einsatz der Kalibriervorrichtung auf der Autobahn

unmittelbar ab. Ein Sensortyp stellte nur die Feuchte auf der Fahrbahn fest, eine Differenzierung der Wasserfilmdicke nimmt dieser Lieferant nicht vor. Abstufungen der Fahrbahnfeuchte werden anhand der gleichzeitig gemessenen Niederschlagsintensität angegeben.

Bei den ersten Tests der Spritzvorrichtung an Sensoren für die Wasserfilmdicke wurde diese mit einem Sollwert von 0,015 mm im Minutentakt aufgetragen. Diese Menge galt zum Zeitpunkt dieser Tests als die niedrigste, die mit hinreichender Genauigkeit wiederholt werden konnte. Erst bei dem 6. Test wurde über einem eingebauten Sensorblock eine Wasserfilmdicke von 0,01 mm ohne Probleme aufgetragen. Die beaufschlagte Fläche betrug in allen Fällen 40 x 38 cm. Diese Fläche fährt die Vorrichtung in 39 s (0,015 mm Wasserfilmdicke) bzw. 34 s (0,01 mm Wasserfilmdicke) ab.

Beim Einsatz auf der Fahrbahn stand die Vorrichtung über dem Sensor (Bild 14). Der Mittelpunkt der beaufschlagten Fläche befand sich bei allen Tests etwa in der Mitte der jeweiligen Sensorenblöcke. Die größte Sensorblockfläche hatte einen Durchmesser von rund 16 cm.

### 7.2 Ergebnisse und Beobachtungen bei Tests der Spritzvorrichtung

Alle bei den Tests eingesetzten Sensoren haben die erste Beaufschlagung mit einer Wasserfilmdicke von 0,015 mm bzw. 0,01 mm erkannt. Ein Lieferant, dessen Sensor die Wasserfilmdicke direkt messen kann, hätte diese geringe Wasserfilmdicke nicht als Feuchte angezeigt. Den Schwellenwert für den Anzeigeübergang von „trocken“ zu „feucht“ hatte er mit 0,05 mm zu hoch angesetzt. Dieses Problem lässt sich durch eine Softwareanpassung für die Anzeige ändern.



**Bild 15:** Sensorblock mit einem Wasserfilm von 0,03 mm Dicke



**Bild 18:** Sensorblock mit einem Wasserfilm von 0,21 mm Dicke



**Bild 16:** Sensorblock mit einem Wasserfilm von 0,09 mm Dicke



**Bild 19:** Sensorblock mit einem Wasserfilm von 0,27 mm Dicke



**Bild 17:** Sensorblock mit einem Wasserfilm von 0,15 mm Dicke



**Bild 20:** Sensorblock mit einem Wasserfilm von 0,27 mm Dicke, verwischt

Nur ein Sensor gab die durch wiederholte Auftragung zunehmenden Wasserfilmdicken hinreichend richtig an. Bei einem weiteren Sensor wichen die Anzeigewerte proportional von den aufgetragenen Wasserfilmdicken ab, wobei Differenzen bis rund 100 % entstanden. Durch eine einfache Neukalibrierung des Sensors ist eine richtige Anzeige möglich.

Von anderen Sensoren wurde die zunehmende Wasserfilmdicke nicht richtig erkannt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass auf einigen

Sensoroberflächen das Wasser mehr oder weniger große Tropfen bildet. Ein Teil der Tropfen ändert bei einer weiteren Wasserzugabe nicht proportional seine Höhe, sondern seinen Umfang (Bilder 15 bis 20, Wasserfilm in Schritten von 0,03 mm nacheinander aufgetragen). Ein Zuwachs der Wasserfilmdicke kann damit auf den teilweise sehr kleinen Messflächen von nur wenigen Quadratmillimetern nicht richtig gemessen werden. Bei einem Test wichen die angezeigten Messwerte über 200 % von den aufgetragenen Wasserfilmdicken ab.

Diese Tropfenbildung findet vornehmlich auf polierten Metalloberflächen statt, ist aber auch auf nicht oder wenig aufgerauten Kunststoffoberflächen sehr deutlich erkennbar. Auf einer Fahrbahnoberfläche verteilt sich das Wasser dagegen aufgrund der rauen Struktur sehr gleichmäßig, es sind keinerlei Tropfenbildungen zu erkennen. Auf den Sensoroberflächen stehende Wassertropfen werden durch überrollende Reifen zur Seite geschleudert bzw. dort konzentriert. Durch die Überrollungen ändert sich die Verteilung des Wassers auf der Fahrbahn und auf der Sensoroberfläche verkehrsmengenabhängig ständig. Eine verlässliche Erfassung der Wasserfilmdicke sollte daher auf einer Vielzahl von Einzelwerten beruhen, aus denen mit geeigneten Verfahren Mittelwerte gebildet werden.

Bei der Anwendung der Spritzvorrichtung auf der Fahrbahn ist die Neigung der Fahrbahnoberfläche ein zusätzliches Problem. Das Wasser fließt in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur und der Neigung ab einer bestimmten Höhe ab. Bei einem Test der Vorrichtung auf der Fahrbahn konnte nur eine Wasserfilmdicke von 0,1 mm bei einer Neigung von  $1,5^\circ$  aufgetragen werden, ohne dass die Wassermenge verlief. Im Labor ließen dagegen sich auf ausgebauten Sensorblöcken oder Bohrkernen mit einer horizontalen Oberfläche Wasserfilmdicken von 0,3 mm auftragen, ohne dass ein Abfließen beobachtet werden konnte. Für Arbeiten mit höheren Wasserfilmdicken kann der Rand des Sensorblocks mit Silikon eingefasst werden, so dass höhere Wasserfilmdicken am Abfließen gehindert werden. Tests dieser Art fanden nicht statt.

Ein weiteres Problem ergab sich bei den Tests durch zeitliche Verschiebungen der Messwerterfassungen zu den Beaufschlagungen. Bei Kalibrierungen oder Prüfungen muss der Zeitpunkt des Auftragens mit den Messintervallen der Sensorik abgestimmt sein. Zwischen den Sensortypen gibt es unterschiedliche Messintervalle. Während nach Herstellerangaben einige Sensoren mit einer hohen Messfrequenz innerhalb einer Minute arbeiten, misst ein Sensor innerhalb einer Minute nur zweimal kurzzeitig. Für die Anzeige werden die Werte jeweils gemittelt.

Weiterhin konnte auf ausgebauten Sensorblöcken beobachtet werden, dass Schmutz auf den Sensorblockoberflächen die Verbindung einer geringen Wasserfilmdicke mit dem eigentlichen Sensor beeinflussen kann. Die getesteten funktionstüchtigen Sensoren waren aber weitestgehend sauber. Einwirkungen von Schmutz wurden an eingebauten Sensoren nicht untersucht.

## 8 Anforderungen an die Sensoren für die Fahrbahnfeuchte

Ausgehend von den Untersuchungen, nach denen auf einer relativ glatten ebenen Fahrbahnoberfläche schon beim Gefrieren eines 0,01 mm dicken Wasserfilms gefährliche Glätte entstehen kann, sind an die Glättemeldeanlagen folgende Anforderungen zu stellen:

- **Wasserfilmdicke**  
Glättemeldeanlagen müssen einen Wasserfilm mit einer Dicke ab 0,01 mm auf der Fahrbahnoberfläche in jedem Fall sicher erkennen und anzeigen können. Dazu bedarf es einer direkten Messung auf der Fahrbahnoberfläche. Die Ableitung einer Feuchte auf der Fahrbahnoberfläche aus dem Niederschlag ist nur unzureichend möglich, weil der Verlauf der Abtrocknung eines Niederschlags auf der Fahrbahnoberfläche im Wesentlichen vom Verkehr, Wind und Sonnenstrahlung und dem von der Rauigkeit bestimmten Rückhaltevermögen abhängt. Die ersten drei genannten Einflussfaktoren werden üblicherweise jedoch nicht bzw. nur an wenigen Messstellen erfasst.

Aufgrund der im Kapitel 6.2 erreichten Genauigkeiten bei der Gleichmäßigkeit von  $\pm 8\%$  und der Vorgabe nach Kapitel 6.3 für den einzuhaltenden Bereich bei der Wiederholbarkeit der Auftragsmenge von  $\pm 6\%$  lässt sich für das Verfahren eine Genauigkeit von ca.  $\pm 14\%$  einer eingestellten Sollmenge angeben. Diese Ungenauigkeit muss bei Prüfungen von GMA-Sensoren für die Wasserfilmdicke mit der hier geschaffenen Spritzvorrichtung berücksichtigt werden.

Als geforderte Genauigkeit eines Sensors wird eine maximale Abweichung von  $\pm 15\%$  von einem Sollwert vorgeschlagen. Mit dieser Angabe sollte eine hinreichende genaue Einschätzung der Fahrbahnfeuchte durch den Winterdienstverantwortlichen möglich sein. Bei einer Prüfung mit dem entwickelten Verfahren ist dann eine maximale Abweichung von rund  $-27\%$  bis  $+32\%$  einzuhalten. Diese sehr hoch erscheinenden Abweichungen können im Vergleich zu den subjektiv beobachteten Fehlanzeigen von Sensoren und zu den bei den Tests aufgetretenen Differenzen als gering angesehen werden.

- Tropfenbildungen und Wasserfilmdicken auf den Sensorblöcken  
Tropfenbildungen auf den Sensorblöcken führen mit großer Wahrscheinlichkeit zu falschen Messergebnissen. Die Sensorblöcke sollten durch eine Oberflächengestaltung entsprechend den Fahrbahnbauweisen ausgeführt werden, auf denen sich keine Tropfen bilden. Gleichzeitig muss durch eine gleichartige Gestaltung vermieden werden, dass sich auf den Sensorblöcken eine andere Wasserfilmdicke als auf der umliegenden Fahrbahn bildet. Ebenso müssen sie einwandfrei ebenflächig zur umliegenden Fahrbahnfläche eingebaut sein.
- Anzahl der Messungen/Messintervalle  
Infolge von Überrollungen wechselt die Dicke des Wasserfilms auf der Fahrbahnoberfläche innerhalb von wenigen Sekunden erheblich. Für eine hinreichend genaue Aussage reicht es nicht, wenn die kleinflächigen Sensoren innerhalb einer Minute nur wenige Messungen vornehmen oder die Bestimmung eines Messwertes mehrere Sekunden und länger dauert. Um unter diesen Verhältnissen den Messfehler zu verkleinern, sollten die Sensoren innerhalb einer Minute mindestens 15-20 Messwerte erfassen und diese dann für die Anzeige gemittelt werden.
- Verschmutzung der Sensoroberflächen  
Eine weitere Forderung ist, dass Schmutz die Messwerte der Sensoren nicht über die geforderte Genauigkeit hinaus beeinflusst. Die Sensoren sollten unter normalen Verhältnissen eine Winterperiode ohne Wartung einwandfrei arbeiten.
- Sonstige Forderungen an GMA im Zusammenhang mit der Fahrbahnfeuchte  
Niederschlag führt zur Verdünnung einer vorhandenen Tausalzkonzentration in der Fahrbahnfeuchte und damit zur Erhöhung der Gefriertemperatur. Bei Abfluss von Tausalzlösungen verringert sich die aufgetragene Tausalzmenge. Die Angaben von bisher vorhandenen Glättemeldeanlagen für die Gefriertemperatur gelten als sehr ungenau [5].

Eine genaue Ableitung der Verdünnung aus den angezeigten Wasserfilmdicken erscheint nach den vorliegenden Messmethoden nicht möglich. Insofern ist die genaue Messung hoher Wasserfilmdicken über 0,1-0,3 mm je nach Oberflächenstruktur, die über der Fahrbahn fließen, zurzeit für den Winterdienst weniger wichtig. Eine Ableitung einer hohen Wasserfilmdicke aus der Niederschlagsintensität sollte bei deren genauen Messung ausreichend sein. Für die Ableitung einer Tausalzkonzentration auf der Fahrbahnoberfläche erscheint die Angabe der Niederschlagsintensität sogar die sinnvollere Methode.

Die durch unterschiedlichen Verkehr (Anzahl, Art und Geschwindigkeit der Fahrzeuge mit einer unterschiedlichen Anzahl mit direkter Sensorüberrollung) dennoch möglicherweise erheblich wechselnden Anzeigewerte in einem Zeitraum von 10-20 Minuten sollte der Anwender vor allem bei angezeigtem Niederschlag als tatsächlich gegeben ansehen. Eine Mittelung nur von wenigen Werten über mehrere Minuten kann dagegen zu größeren Fehleinschätzungen führen.

Die geforderte hohe Anzahl der Messungen kann geprüft werden, indem ein Sensor innerhalb weniger Sekunden mehrfach bespritzt wird. Eine aufgetragene Wasserfilmdicke mit einer gleichen Anzahl von Spritzübergängen, die aber bei mehreren Versuchen in unterschiedlichen Sekundenabständen innerhalb einer Minute über den Sensor laufen, muss der Sensor hinreichend gleich angeben können. Bei den bisher kleinen Sensorenoberflächen für die Wasserfilmdicke lassen sich mit der vorhandenen Spritzvorrichtung mehrfache Übergänge in wenigen Sekunden realisieren.

Die Messung differenzierter Wasserfilmdicken im Bereich der jetzigen Angaben „feucht“ und „feucht-nass“ durch die Glättemeldeanlagen mit den genannten Genauigkeiten sollte generell gefordert werden, damit eine Einschätzung der Abtrocknung erfolgen kann. Bei einer sicheren Messung der Wasserfilmdicke können gegebenenfalls Streueinsätze oder Kontrollfahrten vermieden werden. Weil die vorliegenden Messverfahren nur Punktmessungen im Straßennetz vornehmen können, muss aber auch das Abtrocknungsverhalten im weiteren Umfeld der Sensoren abgeleitet werden können.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kenntnis einer Feuchte auf der Fahrbahn ist ein entscheidender Faktor für die Vorhersage einer Eis-

glätte. Der Verlauf einer Abtrocknung lässt eine mögliche Glättegefahr besser abschätzen. Die bisher vorgegebenen Stufen einer Fahrbahnfeuchte stellen nur grobe Einschätzungen dar, die die tatsächlichen Wassermengen nur sehr ungenau wiedergeben.

Zur Vereinheitlichung der Angaben für die Wassermenge stellt die Wasserfilmdicke in mm eine sinnvolle Angabe dar. Die Wasserfilmdicke wird zunehmend von neuen Glättemeldeanlagen erfasst und dem Anwender angezeigt.

Genauere Bewertungen differenzierter Feuchteangaben von Glättemeldeanlagen anhand subjektiver Beobachtungen zeigten eine hohe Zahl falscher Angaben. Die genaue Wasserfilmdicke auf der Fahrbahn lässt sich mit einfachen Mitteln nicht beurteilen. Deshalb sollte ein Verfahren geschaffen werden, mit dem die Kalibrierung und damit auch die Prüfung von Sensoren für die Fahrbahnfeuchte möglich sind.

Innerhalb des Projektes wurde zunächst die Wasserfilmdicke hergeleitet, die im Winter beim Gefrieren zu einer gefährlichen Glätte für den Kraftfahrer führen kann. Anhand von Versuchen mit einem SRT-Pendelgerät bei Minustemperaturen auf verschiedenen Fahrbahndeckschichten wurde eine Wasserfilmdicke von 0,01 mm als kleinster Wert ermittelt, der zur Glättebildung führt und deshalb von Glättemeldeanlagen erkannt werden sollte.

Daraus abgeleitet wurde neben einem Verfahren zum Nachweis einer dünnen gleichmäßigen Wasserfilmdicke eine Vorrichtung zum Auftragen definierter Wasserfilmdicken geschaffen, die sowohl die Prüfung von Sensoren im Labor als auch auf der Fahrbahn zulässt. Die Vorrichtung besteht im Wesentlichen aus einem Gestell, mit dem eine Spritzpistole in einer Ebene in x-y-Richtung über eine Fläche von max. 50 x 50 cm anhand einer elektronischen Steuerung beliebig verfahren werden kann. Die Kosten aller Komponenten für eine Prüfung auf der Fahrbahn (Spritzvorrichtung mit Steuereinheit und Windschutz, Laptop, Waage und Elektroaggregat) betragen rund 30 TDM.

Die Eignung der Vorrichtung wurde im Labor und auf der Fahrbahn an verschiedenen Sensortypen getestet. Sie ließ sich ohne Probleme einsetzen. Bei den Erprobungen haben alle Sensoren eine aufgetragene Wasserfilmdicke von 0,015 mm bzw. 0,01 mm erkannt. Nur ein Sensor konnte dagegen eine zunehmende Wasserfilmdicke hinreichend

genau angeben. Zwischen den aufgetragenen Wasserfilmdicken und den angezeigten Messwerten der Sensoren traten Abweichungen über 200 % auf. Bei einigen Sensoren hätte eine andere Kalibrierung eine richtige Anzeige ergeben. Bei anderen Sensoren traten wahrscheinlich Messfehler auf, weil sich auf der Oberfläche der Sensorblöcke Tropfen bildeten, die keine gleichmäßige Wasserverteilung wie auf der Fahrbahn zuließen. Diese Sensoren sind für die Messung der Wasserfilmdicke eher ungeeignet.

Neben den Anforderungen zur Genauigkeit und Messbereich der zu messenden Wasserfilmdicke wurden auch weitere Anforderungen an die Sensoren im Bezug zu ihrer Gestaltung und der Intervalle der Messwerterfassung erarbeitet.

Die Erprobungsergebnisse zeigen, dass eine Überprüfung der Sensoren auf eine genaue Angabe der Wasserfilmdicke erforderlich ist. Dabei sollte zum einen die grundsätzliche Eignung einzelner Typen geprüft werden. Ebenso erscheint eine Prüfung nach dem Einbau bei Abnahme und eine Kontrolle nach einem längeren Betrieb nötig.

Mit dem entwickelten Verfahren ist eine Kalibrier- und Prüfmöglichkeit geschaffen worden, die sowohl von den Firmen bei der Einrichtung von Glättemeldeanlagen als auch von den Straßenbauverwaltungen bei Problemen mit vorhandenen Anlagen genutzt werden kann. Damit sollte künftig eine sicherere Bewertung von GMA-Angaben über die Fahrbahnfeuchte als bisher möglich sein, die zu einem zielgerichteten Straßenwinterdienst führt.

Die Untersuchungen zeigen aber auch, dass die bisher sehr kleinflächigen Sensoren nicht das Optimum einer genauen Anzeige erreichen können. Für eine genauere Anzeige sollte die Entwicklung von Sensoren erfolgen, welche die Fahrbahnfeuchte in einem breiteren Fahrbahnquerschnitt messen können. Dafür sind wahrscheinlich, wie bei anderen Parametern auch, berührungslose Messverfahren geeigneter.

## Literatur

- [1] Konzept eines Straßenzustands- und Wetterinformationssystems (SWIS), Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Oktober 1991
- [2] Betriebstechnische Anforderungen an Glättemeldeanlagen, Bundesanstalt für Straßenwesen, November 1996
- [3] Autorenkollektiv: Meyers kleines Lexikon „Meteorologie“, Meyers Lexikonverlag, Mannheim 1987
- [4] BACH, V.: Verbesserung der Straßenwetterprognose durch Einbeziehung der Messwerte von Glättefrühwarnsystemen, Abschlussbericht zum Forschungsauftrag FA 03.205R89H des Bundesministers für Verkehr, TH Darmstadt 1991
- [5] BADEL, H.: Praxisgerechte Anforderungen an Glättemeldeanlagen, Abschlussbericht zum BAST-Projekt 92715, Inzell 03/1996
- [6] BADEL, H.: Straßenbauliche und verkehrsbedingte Einflüsse auf die Fahrbahnoberflächentemperatur in Bezug auf die winterliche Glättebildung, Abschlussbericht zum BAST-Projekt 92714, Inzell 06/1996
- [7] BLASER, P., LINK, P., LÜDIN, P., RYF, W.: Einfluss der Ausbringung von Streusalz auf das benachbarte und entferntere Grundwasser, Forschungsbericht Nr. 386, Peter Link AG, Dr. Heinrich Jäckli AG, 1998
- [8] EULER, G., SCHRÖDER, R.C.M., LANG, J., PLHAK, R., RETZLAFF, G.: Ermittlung der zeitlichen Feuchte- und Nässeverteilung auf Fahrbahnen, Technische Hochschule Darmstadt, Heft 567 Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik
- [9] FGSV: Richtlinie zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe, Entwurf 05/99
- [10] FGSV: Arbeitsanweisung für kombinierte Griffigkeits- und Rauheitsmessungen mit dem Pendelgerät und dem Ausflussmesser
- [11] FGSV: Merkblatt über die Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Glätte, Ausgabe 1968
- [12] GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht, Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig 1950
- [13] HANKE, H., LEVIN, C.: Wirksamkeit des Straßenwinterdienstes auf die Verkehrssicherheit und die Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufes, Abschlussbericht zum Forschungsauftrag FA 03.174G85H des Bundesministers für Verkehr, TH Darmstadt 1987
- [14] HÖCKER, H. J.: „Nasse“ Fahrbahnoberflächen – Definition und Einflussfaktoren. Straße und Autobahn 10/1971, S. 452-458
- [15] HOLZWARTH, F.: Entwicklung eines Verfahrens zur berührungslosen Messung der Wasserfilmdicke auf Fahrbahnen
- [16] KREBS, H. G., BÖLLINGER, G.: Beurteilung und Erfassung von Nässezuständen auf Fahrbahnen, Schlussbericht zum Forschungsauftrag des BMV, Bau-Nr.4.075G79G
- [17] KUTTER, M., NIEBRÜGGE, L.: Erfahrungen mit Glätteismeldegeräten beim Landschaftsverband Westfalen-Lippe, Straße und Autobahn Heft 12/85, S. 498–503
- [18] NICOLAS, J.-P.: Glättebildung durch Überfrieren, Schwellwerte der Oberflächenfeuchte auf Fahrbahnen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V36, 1996
- [19] RUESS, B.: Salz- oder Splittstreuung im Winterdienst, Forschungsauftrag 4/95 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Straßenschaffende (VSS), Januar 1998
- [20] SCHARSCHING, H.: Schlussbericht Glättefrühwarnsysteme, Test 1990/91, Mödling 12/91



## **Teil 4**

### **Verfahren zur Prüfung von Sensoren für die Gefriertemperatur**

Horst Badelt





## 1 Einleitung

Die Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Straßennetzes und die Gewährleistung der Verkehrssicherheit im Winter sind wichtige Aufgabengebiete des Unterhaltungs- und Betriebsdienstes. Winterliche Straßenverhältnisse führen im Vergleich mit sommerlichen Straßenverhältnissen zu erheblichen volkswirtschaftlichen Mehrkosten [14]. Vorrangiges Ziel des Winterdienstes ist deshalb, winterliche Glätte durch vorbeugende Maßnahmen zu vermeiden oder entstandene Glätte schnell zu beseitigen.

Unter dem Druck knapper Haushaltsmittel müssen aber auch die Kosten für den Winterdienst verringert werden. Neue organisatorische Maßnahmen und der verstärkte Einsatz von moderner Technik sollen den Winterdienst rationeller und damit wirtschaftlicher gestalten. Gleichzeitig führt die Optimierung der Maßnahmen zu einem geringeren Einsatz von Streustoffen. Damit werden auch Umweltbelastungen verringert, die bei umfangreicher Verwendung von Streustoffen unter winterlichen Verhältnissen auftreten können [8], [13], [19].

Eine wesentliche Verbesserung des Winterdienstes stellt die genauere Vorhersage einer winterlichen Glättebildung dar. Dafür dient das im Autobahnnetz bundesweit eingeführte Straßenzustands- und Wetterinformationssystem (SWIS) [1]. Ein Bestandteil des SWIS sind Glättemeldeanlagen (GMA), mit deren Sensorik die Parameter der Glättebildung (Fahrhahnoberflächentemperatur, Fahrhahnefeuchte, Luftfeuchte, Niederschlag, Gefriertemperatur u. a.) unmittelbar auf, in und an der Fahrhahne erfasst werden.

Die Messergebnisse von Glättemeldeanlagen sind einerseits eine Grundlage für längerfristige Vorhersagen einer möglichen Glättebildung durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) im Rahmen des SWIS zur besseren Planung von Winterdienstmaßnahmen. Sie dienen andererseits unmittelbar als Entscheidungshilfe für den gezielten Beginn einer Winterdienstmaßnahme durch die Straßenmeisterei. Mit Hilfe der Glättemeldeanlagen konnten erste wesentliche Verbesserungen der bisherigen Winterdienstpraxis erreicht werden [4], [16]. Das Anlagenetz wird weiter ausgebaut, vorhandene Sensoren müssen bei Fahrhahneunterhaltungsarbeiten ersetzt werden.

Ein Parameter für die Einschätzung eines notwendigen Winterdiensteinsatzes ist die Kenntnis über das auf der Fahrhahne vorhandene Tausalz. Als

sinnvolle Darstellungsgröße für die Einschätzung dieser Tausalzmenge wird die Gefriertemperatur genutzt. Sie drückt aus, bei welcher Temperatur eine vorhandene Fahrhahnefeuchte in Abhängigkeit von dem Tausalzgehalt zu gefrieren beginnt.

In einer abgeschlossenen BAST-Untersuchung [5] wurden die Messdaten von vier Glättemeldeanlagen von unterschiedlichen Herstellern verglichen, die auf einem Fahrhahneabschnitt von 10 m jeweils im gleichen Fahrhahnequerschnitt installiert waren. Die Differenzen zwischen den Messdaten bei der Gefriertemperatur waren dabei trotz der geringen Entfernung untereinander extrem hoch. Aufgrund der hohen Differenzen bei der Gefriertemperatur entstanden zwischen den Anlagen auch erhebliche Differenzen bei den Glättewarnungen.

Im vorliegenden Projekt sollte deshalb ein Messverfahren entwickelt werden, das mit hinreichender Präzision und Wiederholgenauigkeit sowohl eine objektive Beurteilung neuer als auch eine Überprüfung und Kalibrierung bereits eingebauter Sensoren ermöglicht. Eine hohe Genauigkeit der Messwerte ist eine Grundvoraussetzung für das notwendige Vertrauen der Einsatzleiter in die Anzeigewerte von GMA.

## 2 Problem, Ziel, Nutzen

Vom Winterdienst ausgebrachtes Tausalz schmilzt nicht nur Eis und Schnee, sondern verhindert auch das Gefrieren von vorhandenem Wasser auf der Fahrhahnoberfläche. Für die genaue Einschätzung einer Glättegefahr auf einem Fahrhahneabschnitt ist deshalb neben der Kenntnis der Luft- und Fahrhahnoberflächentemperatur, der Luftfeuchte, des Niederschlages, des Fahrhahnezustandes u. a. auch die Kenntnis der Tausalzmenge auf der Fahrhahnoberfläche von Bedeutung.

Bei vorhandenen ausreichenden Tausalzmengen kann ein weiterer Winterdiensteinsatz entfallen. Voraussetzung ist dabei, dass nicht mit weiteren Niederschlägen gerechnet werden muss, die zu einer Verdünnung der Tausalzkonzentration auf der Fahrhahne führen.

Punktuelle Messungen in einer Untersuchung zu Tausalzkonzentrationen auf der Fahrhahnoberfläche ergaben, dass die aufgetragenen Tausalzmengen mit der Fahrhahnefeuchte infolge Verwirbelung durch den Verkehr relativ schnell abnehmen [9], [15]. Die Menge der verwirbelten Tausalzmenge

ist dabei wiederum sehr von der Verkehrsstärke abhängig. Unterschiedliche Tausalzmengen im Fahrbahnquerschnitt ließen sich auch durch unterschiedliche ausgebrachte Streubilder und auch die vorhandene Fahrbahnneigung nachweisen.

Mögliche Angaben für das vorhandene Tausalz wären die Tausalzkonzentration in Gramm Tausalz je Gramm Wasser auf der Fahrbahn oder die Tausalzmenge in Gramm Tausalz je Fläche (z. B. Quadratmeter).

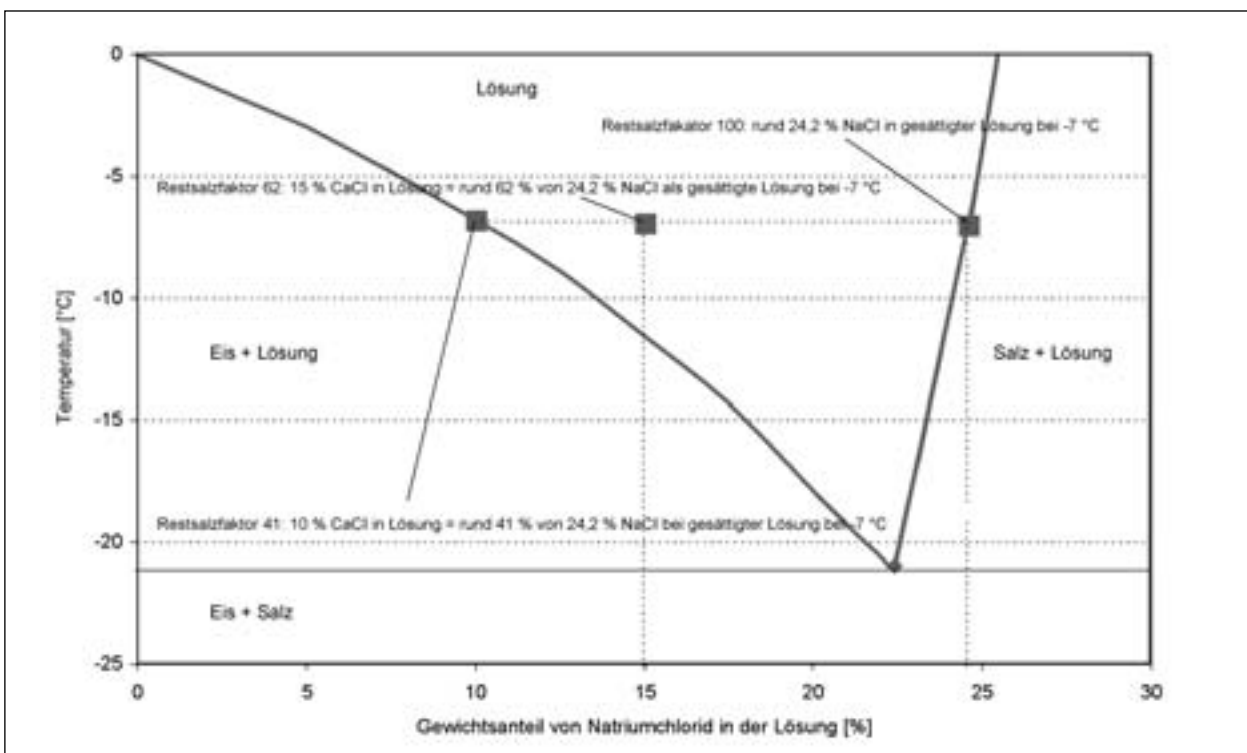
Verschiedene Hersteller von Glättemeldeanlagen geben die Tausalzmenge auch in Form von „Restsalz“ gemäß den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen [3] an. Der Wert sagt aus, wie hoch die Konzentration des Tausalzes in der vorhandenen Feuchtemenge prozentual in Bezug zur Sättigung (= 100 %) einer Tausalzlösung ist. Die Sättigung ist temperaturabhängig (siehe Bild 1). Angaben für den positiven Temperaturbereich liegen nicht vor.

Der Restsalzfaktor führt beim Nutzer von GMA-Daten immer wieder zu Verständnisproblemen. Der Nutzer benötigt für die Bewertung die Lösungskurve, die aber in den seltensten Fällen bekannt ist. Erschwert kann die Bewertung werden, wenn verschiedene Tausalze zum Einsatz kommen. In der überwiegenden Anzahl der Anwendungen kommt

jedoch Natriumchlorid zum Einsatz. Calcium- und Magnesiumchlorid werden in Form von Lösungen beim Ausbringen von Natriumchlorid für dessen Anfeuchtung nur in geringen Mengen genutzt.

Die Tausalzmenge kann auch in Form der Gefrier-temperatur angegeben werden. Sie gibt an, bei welcher Temperatur eine vorhandene Wassermenge in Abhängigkeit vom Tausalzgehalt mit dem Gefrieren beginnt. Die Gefrier-temperatur gilt daher als die verständlichste Angabe. Mit ihr kann ein direkter Bezug zur Fahrbahnoberflächentemperatur hergestellt werden. Ist die Gefrier-temperatur über der Fahrbahnoberflächentemperatur, so muss mit einer Glättebildung auf der Fahrbahn gerechnet werden. Sie stellt die Angabeform dar, die auch in den „Betriebstechnischen Anforderungen für Glättemeldeanlagen“ gefordert wird [2].

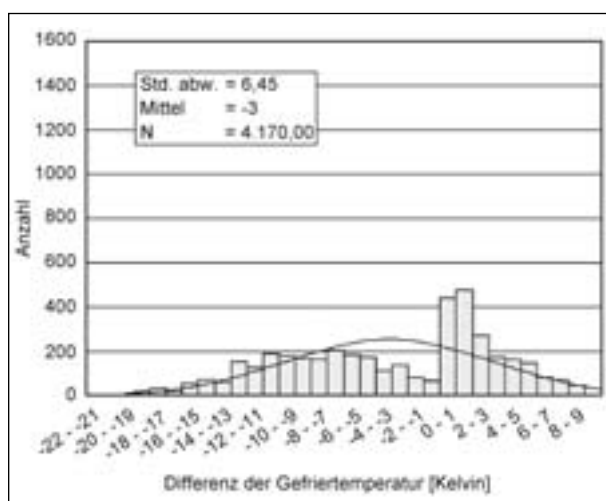
In einer abgeschlossenen BAST-Untersuchung wurden die Messdaten von vier Glättemeldeanlagen von unterschiedlichen Herstellern verglichen, die auf einem Fahrbahnabschnitt von 10 m jeweils im gleichen Fahrbahnquerschnitt installiert waren [3]. Trotz der geringen Entfernung untereinander entstanden zwischen den Messdaten bei der Gefrier-temperatur extrem hohe Differenzen. Die mittleren Abweichungen aller auswertbaren Messwertpaare zwischen jeweils 2 Sensoren betragen zwischen 3 und 6 Kelvin. Zwischen den Messwerten



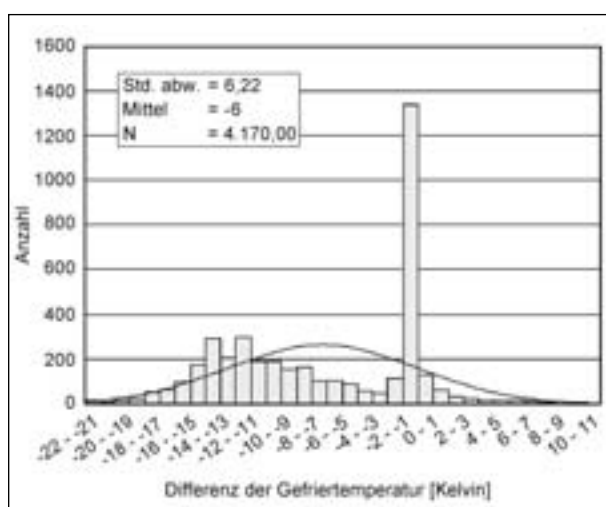
**Bild 1:** Lösungs- und Gefrierkurve für Natriumchlorid

eines Sensorpaares betrug der Anteil der Differenzen über 10 Kelvin über 25 %. Die Bilder 2 und 3 zeigen die Anteile der Differenzen zwischen den Messwerten von zwei Sensoren im gesamten Bewertungszeitraum aus dieser Untersuchung.

Die Messwerte waren in vielen Fällen auch nicht plausibel zu vorgenommenen Messfeldbeobachtungen. Die Glättemeldeanlagen meldeten Gefriertemperaturen, die erheblich unterhalb der gleichzeitig gemessenen Fahrbahnoberflächentemperatur lagen, obwohl mehrere Zentimeter Schnee auf der Fahrbahnoberfläche lagen. Umgekehrt gab es Beobachtungszeiten, bei denen die Gefriertemperatur über der gemessenen Fahrbahnoberflächen-



**Bild 2:** Häufigkeit der Differenzen innerhalb verschiedener Klassen bei den Gefriertemperaturen zwischen zwei im gleichen Fahrbahnquerschnitt auf dem dritten Fahrstreifen eingebaute Sensoren unterschiedlicher Bauart [5]



**Bild 3:** Häufigkeit der Differenzen innerhalb verschiedener Klassen bei den Gefriertemperaturen zwischen zwei im gleichen Fahrbahnquerschnitt auf dem dritten Fahrstreifen eingebaute Sensoren unterschiedlicher Bauart [5]

temperatur lag, aber keine Eisbildung auf der feuchten Fahrbahnoberfläche erkennbar war.

Sehr hohe Abweichungen zwischen Messwerten von verschiedenen Sensoren wurden auch bei einer Untersuchung mit einem ähnlichen Versuchsaufbau wie bei der BAST-Untersuchung in Österreich festgestellt [20].

Sensoren für die Gefriertemperatur wurden bisher in der Praxis durch einfaches Auftragen von Tausalzungen auf den Sensor geprüft. Die aufgetragenen Lösungsfilmdeken entsprachen jedoch nicht den Wasserfilmdicken, die in der Praxis vorkommen. Bei einigen Messungen kam es zusätzlich zu wenig plausiblen Ergebnissen, weil von den GMA-Herstellern Verknüpfungen zwischen verschiedenen Parametern vorgenommen wurden. Z. B. erfolgte keine Messung der Gefriertemperatur, wenn kein Niederschlag gefallen war.

Im Ergebnis dieses Projektes sollte deshalb eine Vorrichtung entstehen, mit der Sensoren für die Gefriertemperatur mit einer definierten Lösungskonzentration und einem definierten dünnen Lösungsfilm ähnlich den praxisnahen Verhältnissen beaufschlagt werden können. Damit soll es zukünftig möglich sein, Sensoren für die Gefriertemperatur im Labor und nach dem Einbau in die Straße in ihrer Genauigkeit zu überprüfen.

### 3 Technischer Stand der Sensorik für die Gefriertemperatur

Bisher angebotene Sensoren für die Gefriertemperatur lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

- a) Aktive Sensoren  
Aktive Sensoren ändern durch künstliche Abkühlung und Erwärmung den Oberflächenzustand auf dem Sensor.

Der Wechsel von flüssigem zu gefrorenem Wasser und umgekehrt wird aus dem Temperaturverlauf abgeleitet. Während des Aggregatzustandswechsels besteht eine Temperaturkonstanz, die entsprechend ausgewertet wird.

Ein anderes Verfahren bestand darin, dass der Zustand des Wassers (fest, flüssig) auf der Fahrbahnoberfläche bei der Abkühlung bzw. Erwärmung über das Vibrationsverhalten auf einer Membran innerhalb des Sensors festgestellt wurde. Dieser Sensor wird inzwischen nicht mehr angeboten.

#### b) Passive Sensoren

Im Gegensatz zum aktiven Sensor werden keine Beeinflussungen des Fahrbahnzustandes vorgenommen. Alle bekannten Sensoren leiten die Tausalzkonzentration in einer vorhandenen Fahrbahnfeuchte aus dem elektrischen Leitwert dieser Fahrbahnfeuchte zwischen zwei Polen ab. Diese Messung ist temperaturabhängig. Erfahrungen über den Einfluss unterschiedlicher Tausalze liegen bisher nicht vor.

In Österreich gab es die Entwicklung eines berührungsfreien Messverfahrens, bei dem die Gefriertemperatur aus der Reflexion von Mikrowellen entsprechend dem Tausalzgehalt abgeleitet werden sollte [20]. Eine Einführung des Verfahrens fand nicht statt.

Eine andere Idee sah vor, Tausalzen fluoreszierende Stoffe zuzusetzen. Bei einer geeigneten Anleuchtung sollten je nach vorhandenem Tausalzgehalt unterschiedliche Reflexionen entstehen, aus denen sich eine entsprechende Gefriertemperatur ableiten lässt [21]. Eine umfangreiche Praxisanwendung ist aber ebenfalls nicht bekannt.

Alle bekannten, in größerem Umfang eingesetzten Sensoren können den Tausalzgehalt nur messen, wenn eine Feuchte auf der Fahrbahnoberfläche vorhanden ist. Nach vorliegenden Erfahrungen wird die Gefriertemperatur erst gemessen, wenn ein dickerer Wasserfilm auf der Fahrbahnoberfläche vorhanden ist. Allerdings können bereits dünnere Wasserfilme beim Gefrieren schon zu einem deutlichen Griffigkeitsabfall führen [7]. Die eingesetzten Sensoren für den Fahrbahnzustand erkennen diesen Wasserfilm messtechnisch, jedoch nicht das Tausalz in dieser Feuchte. Das hat zur Folge, dass Glättmeldeanlagen eine Glättewarnung abgeben, die im Einzelfall nicht berechtigt ist [6].

## 4 Anforderungen an die Sensoren für die Gefriertemperatur

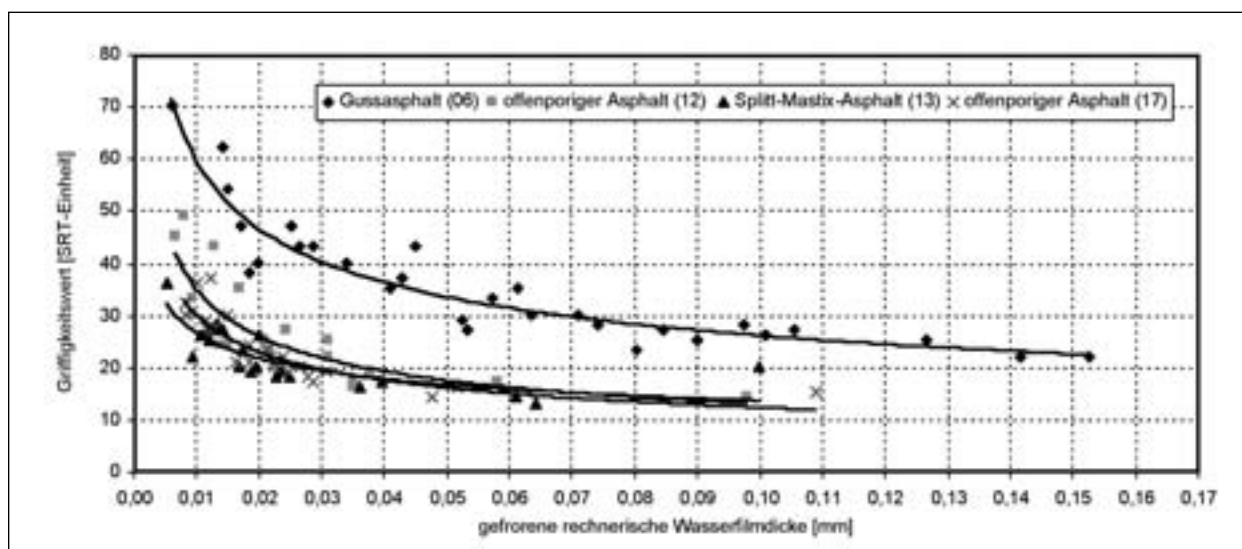
Genauigkeitsanforderungen an die Sensoren für die Gefriertemperatur enthalten die „Betriebstechnischen Anforderungen an Glättmeldeanlagen“ [2]. Eine Weiterentwicklung stellt ein Entwurf für „Technische Lieferbedingungen an Glättmeldeanlagen“ [10] dar. Dieser ist wiederum der deutsche Vorschlag eines Teils für eine europäische Norm für Straßenzustands- und Wetterinformationssysteme. Darin sind zurzeit folgende Anforderungen aufgeführt:

- Die Gefriertemperatur ist für Wasser bzw. wässrige Lösungen auf der Fahrbahn ab einer Dicke von 0,01 mm zu messen.
- Die Gefriertemperatur ist bei Fahrbahnoberflächentemperaturen unter +5 °C zu messen.
- Messbereich: zwischen -25 °C und 0 °C.
- Messwertauflösung: 0,1 °C.
- Messgenauigkeit: ± 1 Kelvin.
- Die Gefriertemperatur ist als IST-Wert aus einer Messperiode anzugeben. Die Messperiode darf bis 15 min betragen. Der Messzyklus ist ohne Pause zu wiederholen. Übersteigt die Messperiode den Abfragezyklus, so ist der zuletzt gemessene Wert anzugeben.

Der bzw. die eingesetzten Taustoffe sind vom Auftraggeber vorzugeben.

Die Notwendigkeit einer Messung der Gefriertemperatur schon bei geringen Wasserfilmdicken ergibt sich aus Untersuchungen zur Wasserfilmdicke. Nach den Untersuchungen im BAST-Arbeitsprojekt „Entwicklung von Prüf- und Kalibriermethoden für Fahrbahnfeuchtesensoren“ entstehen bei den meisten Fahrbahnoberflächen schon bei gefrorenen 0,03 mm Wasserfilmdicke sehr niedrige Griffigkeitswerte (siehe Bild 4) [7]. Der Schwellwert für eine ungenügend griffige Fahrbahnoberfläche liegt bei 50 SRT-Einheiten [12]. Die rechnerische Dicke von 0,01 mm bildet bereits einen durchgehenden Wasserfilm auf einer Fahrbahnoberfläche und führt auch zu einer Griffigkeitsabsenkung im Gefrierfall. Die Zeiträume mit einer feuchten Fahrbahn mit Wasserfilmen unter 0,03-0,05 mm Dicke werden als wesentlich höher eingeschätzt als die Zeiträume mit einer höheren Wasserfilmdicke [5], [18]. Deshalb muss dieser Wasserfilm einschließlich des vorhandenen Tausalzgehaltes von den Sensoren erkannt werden, damit die Glättegefahr bei diesem Fahrbahnzustand eingeschätzt werden kann.

Die genannte Genauigkeit wird für eine optimale Einschätzung einer Glättegefahr und die zeitgenaue Steuerung von Taumittelsprühanlagen als notwendig angesehen und deshalb auch gefordert. Eine geringere Messgenauigkeit führt zu weniger zeitgenauen Aussagen für die Glättewarnung. Dadurch kann es zu einer zu späten oder zu frühen Auslösung des Winterdienstes oder einer Taumittelsprühanlage kommen [6], die wiederum eine ein-



**Bild 4:** Griffigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit von einer gefrorenen Wasserfilmdicke bei -5 °C auf verschiedenen Fahrbahndeckschichten in Asphaltbauweise [7]

geschränkte Verkehrssicherheit bzw. einen höheren Taustoffverbrauch zur Folge haben kann.

Die genannte Messwertauflösung wird im Vergleich zur Messgenauigkeit als zu hoch angesehen. Sie kann zu falschen Annahmen der Messgenauigkeit führen.

Die genannte Europäische Norm befindet sich zurzeit in Bearbeitung. Erfahrungen anderer europäischer Länder liegen nicht vor.

## 5 Anforderungen an die Prüfvorrichtung

Mit der Prüfvorrichtung muss das Auftragen von gleichmäßig dünnen Lösungsfilmen mit einer sehr guten Wiederholbarkeit erfolgen können. Die Dicke eines Lösungsfilmes muss den Wasserfilmdicken entsprechen, die nach dem Gefrieren zu einer gefährlichen Griffigkeitsminderung führen.

Zur Vereinfachung der Aussagen wird die Lösungsfilmdicke  $h$  als eine rechnerische Messgröße angegeben. Sie ist definiert als Quotient aus dem Lösungsvolumen auf einer ebenen (Fahrbahn-)Fläche ohne Berücksichtigung der Oberflächenstruktur:

$$h = \frac{\text{Volumen}_{\text{Lösung}}}{\text{Fläche}_{\text{Fahrbahn}}}$$

Die Lösungen besitzen je nach Konzentration eine unterschiedliche Dichte, die bei der Steuerung der Prüfvorrichtung berücksichtigt muss. Die Vorrichtung muss Lösungen mit sehr geringen Konzentra-

tionen bis Konzentrationen nahe der Sättigung aufbringen können.

Neben den sehr dünnen Wasserfilmen sollen auch dickere Wasserfilme bis etwa 0,5 mm im Labor aufgetragen werden können. Ein Wasserfilm von 0,1 mm Dicke fließt bereits bei einer Neigung von etwa 2° ab [7].

Beim Winterdienst der Bundesrepublik Deutschland wird nahezu ausschließlich Natriumchlorid als Streustoff ausgebracht. Daher wird eine Auslegung der Prüfvorrichtung auf diesen Taustoff als ausreichend angesehen.

## 6 Auftragen eines gleichmäßigen dünnen Lösungsfilmes

### 6.1 Beschreibung Prüfvorrichtung

Für das Auftragen von dünnen Lösungsfilmen war vorgesehen, die im BAST-Projekt „Entwicklung von Prüf- und Kalibriermethoden für Fahrbahnfeuchtesensoren“ [7] entwickelte Vorrichtung zum Auftragen von dünnen Wasserfilmdicken zu nutzen.

Das äußere Gestell der Vorrichtung hat die Form eines flachen Tisches mit vier Beinen und eine Abmessung von ca. 110 x 110 x 50 cm (Bild 5). Eine bewegliche Baueinheit führt innerhalb des Gestells ein Sprühventil in einer Ebene ca. 23 cm über der Fahrbahnoberfläche jeweils in x-y-Richtung. Mit Hilfe einer Steuerelektronik und eines Steuerprogramms ist diese Führung in Millimeterschritten



**Bild 5:** Ansicht der Kalibriervorrichtung im Labor, links Steuervorrichtung für die maschinelle Führung des Sprühventils, in der Mitte Drucktopf für Tausalösungen, rechts Gestell mit beweglicher Baueinheit für die Sprühventilführung



**Bild 6:** Sprühventil

einstellbar. Die maximal überfahrbare Fläche beträgt 50 x 50 cm. Alle zurzeit bekannten Sensoren sind wesentlich kleiner. Auch in Zukunft ist nicht mit größeren Sensoren zu rechnen, da es schwierig ist, derart große Sensoren ebenflächig in der Fahrbahn einzubauen.

Für das Auftragen der Lösungsfilme kommt ein Sprühventil zum Einsatz (siehe Bild 6). Dieses Sprühventil ist im Vergleich zur bisherigen Vorrichtung neu. Diese Teile bestehen aus Edelstahl und sind somit gegenüber Tausalzen korrosionsbeständig. Die vorhandene Spritzpistole war für diese Stoffe nicht ausgelegt.

Mit Hilfe einer Steuerelektronik und des Steuerprogramms lässt sich ebenso die Geschwindigkeit des Sprühventils innerhalb der gesamten Fläche in sehr kleinen Schritten nahezu beliebig einstellen. Für die x- und y-Richtung sind jeweils unterschiedliche Geschwindigkeiten einstellbar.

Tausalösungen oder Wasser werden vom außerhalb der Führungsvorrichtung stehenden Drucktopf (siehe Bild 5) zum Sprühventil gefördert. Der Druck kann mit Präzisionsdruckregler über ein angeschlossenes Feinmanometer (Skaleneinteilung 0,5 bar) eingestellt werden. Zusätzlich wird beim Sprühen durch das Sprühventil reine Druckluft gedrückt, die eine hohe Feinverteilung des Spritzmediums bewirkt.

Das Sprühventil kann nur einen schmalen Streifen besprühen, sodass für das Bespritzen einer größeren Fläche mehrere Übergänge mit entsprechendem Längsversatz des Sprühventils notwendig sind. Die Auftragsmenge kann mit der Geschwindigkeit der Führung und mit dem Sprühdruck geregelt werden.

Zur Fehlerminimierung durch Windeinflüsse wurde der äußere Rahmen der Prüfvorrichtung mit Blechen versehen.

Die Sprühventilöffnung besitzt eine festgelegte Höhe innerhalb der Vorrichtung. Die gesamte Einrichtung lässt sich auf der Fahrbahn aufstellen, ohne dass die Einstellung der Spritzhöhe verstellt werden muss. Im Labor können die Sensoroberflächen durch einen höhenverstellbaren Tisch in die Spritzebene eingebracht werden.

## 6.2 Nachweis der Gleichmäßigkeit der Auftragung

### 6.2.1 Verfahrensbeschreibung

Das Überprüfen der Gleichmäßigkeit und der Dicke des aufgetragenen Lösungsfilmes erfolgt wie schon beim BAST-Arbeitsprojekt „Entwicklung von Prüf- und Kalibriermethoden für Fahrbahnfeuchte-sensoren“ mit Hilfe von schmalen Plastikstreifen mit einer Abmessung von 300 x 10 x 10 mm [7] (Bild 7). Diese werden vor und nach dem Auftragen mit dem Sprühventil nacheinander gewogen (Bild 8). Aus der Massedifferenz lässt sich die aufgetragene Lösungsdicke berechnen.

Zum Einsatz kommen 10 Plastikstreifen, sodass sich eine Prüffläche von 300 x 100 mm ergibt. Die Flächen aller gegenwärtig bekannten Sensoren für die Gefriertemperatur sind kleiner.

Die Überprüfung der Auftrittsmenge findet durch Auffangen des ausgesprühten Wassers über 30 oder 60 Sekunden statt (Bild 9). Die Geschwindigkeit des Sprühübergangs wird nur in der x-Rich-



**Bild 7:** Plastikstäbe für das Aufnehmen von gesprühtem Wasser unter der Sprühvorrichtung für die Messung der Gleichmäßigkeit, die breiteren Außenstäbe dienen der seitlichen Abdeckung der 10 Messstäbe



**Bild 8:** Wägung eines Prüfstreifens in einem Glaskasten auf einer Waage mit 0,001 g Auflösung



**Bild 9:** Auffangen der Spritzmenge mit einem Becherglas

fung für die Regulierung der Auftragungsmengen geändert.

### 6.2.2 Gleichmäßigkeit von Wasserfilmen

Die weiterentwickelte Vorrichtung wurde zunächst mit reinem Wasser getestet. Damit sollte der bekannte hohe Aufwand bei der Kalibrierung der Ma-

schine gering gehalten werden [7]. Da ein Rückbau auf die vorher getestete Ausführung für die Prüfung von Sensoren für die Wasserfilmdicke einen hohen Aufwand bedeutete, sollte die neue Vorrichtung auch gleichzeitig für die Prüfung von Sensoren für die Wasserfilmdicke eingesetzt werden. Die neue Vorrichtung wird als wesentlich betriebssicherer angesehen.

Für verschiedene Testzyklen sollten Wasserfilme mit Dicken von 0,01 mm, 0,02 mm und 0,05 mm mit jeweils einem Übergang aufgetragen werden. Für die Überprüfung der Wiederholgenauigkeit fanden zu diesen Wasserfilmdicken Versuche statt. Die genauen Einstellungen konnten erst nach einer Vielzahl von Einstellversuchen gefunden werden.

Die Tabelle 1 gibt die Ergebnisse der einzelnen Versuche für das Auftragen einer Wasserfilmdicke von 0,01 mm zusammengefasst wieder.

Erläuterung der Angaben (auch für Tabellen 2, 3 und 5 bis 9):

- Spalte 1: Datum des Versuchs.
- Spalte 2: Angabe des Programmparameters für die Geschwindigkeit in x-Richtung, Geschwindigkeit in y-Richtung bleibt immer konstant.
- Spalte 3/4: Gemessene relative Luftfeuchte/Lufttemperatur im Laborraum, für die Beurteilung der Verdunstungsverhältnisse.
- Spalte 5: Laufzeit des Sprühventils über die Versuchsfläche vom Einschalten bis zum automatischen Ausschalten für die Überprüfung mechanischer Störungen an der Maschine.
- Spalte 6: Am Sprühventil in 30 oder 60 Sekunden aufgefangene Lösungs- oder Wassermasse, abhängig vom Einstelldruck, Parameter für die Einstellung der aufzutragenden Filmdicken.
- Spalte 7: Mittlere gemessene Wasserfilmdicke, die sich aus den Wasserfilmdicken von den 10 Plastikstäben je Versuch ergibt.
- Spalte 8: Spannweite der Einzelwerte auf den 10 Plastikstäben (Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten erzielten Wert).
- Spalte 9: Prozentuale Höhe der Spannweite im Vergleich zur Höhe der mittleren gemessenen Wasser-/Lösungsfilmstärke.



Spalte 10: Mittlere Wasser-/Lösungsfilmstärke aus den Ergebnissen aller Versuche mit gleichen Einstellungen.

Spalte 11: Prozentuale Abweichung der mittleren Wasserfilmstärke eines Versuchs zu dem Mittelwert aller Versuche mit einer Einstellung.

Spalte 12: Eingestellter Luftdruck für die Förderung des Wasser zum Sprühventil (nicht in allen Tabellen).

Alle Versuche für das Auftragen eines Wasserfilms fanden bei gleicher Druckeinstellung statt. Bis auf eine Ausnahme weichen alle Einzelergebnisse unter 10 % von den erzielten Mittelwerten ab.

Die Wasserfilmstärken auf den einzelnen Plastikstäben nach einem Sprühübergang weichen bis zu  $\pm 20\%$  vom Mittelwert aller Einzelwerte ab. Die hohen Abweichungen treten im Regelfall immer an den Randstäben auf. Die zuerst gemessenen Stäbe weisen die höheren Wasserfilme, die zuletzt gemessenen Stäbe die geringeren Werte auf. Dieses Verhalten weist auf den Einfluss der Verdunstung bei den Messungen hin. Visuell betrachtet, sind die Stäbe sehr gleichmäßig besprüht.

Die ersten Versuchsreihen fanden in einem unklimateisierten Raum statt, bei denen durch Wasserversprühen versucht wurde, eine höhere Luftfeuchte zu erreichen. Nach der Fortführung der Arbeiten in einer Klimakammer mit einer einstellbaren relativen Luftfeuchte bis 90 % wurden die Einstellwerte bei der Geschwindigkeit der Ventildrehung (siehe Spalte 2) geringfügig geändert. Eine höhere Gleichmäßigkeit zwischen den einzelnen Stäben konnte in der Klimakammer nicht erzielt werden. Höhere Luftfeuchten konnten aus technischen Gründen nicht eingestellt werden.

Auffällig ist gegen Ende der Versuchsreihe, dass für den Auftrag gleicher Wasserfilmstärken weniger ausgesprühte Wassermengen bei gleichen Geschwindigkeitseinstellungen (siehe Tabelle 1, Spalte 8) benötigt werden. Eine Ursache für dieses Verhalten konnte bisher nicht gefunden werden. Bis zur Klärung der Ursache ist daher vor einer Prüfung eine Überprüfung der notwendigen Einstellungen notwendig.

Bei dem Aufsprühen von Wasserfilmen mit einer Dicke von 0,02 mm bei einem Durchgang wird eine höhere Gleichmäßigkeit erreicht als beim Auftragen von Wasserfilmen mit 0,01 mm Dicke (vergleiche Spalte 9 der Tabellen 1 und 2). Ursache dafür ist

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Datum	Geschwindigkeit (X) [Programmparameter]	relative Luftfeuchte [%]	Lufttemperatur [°C]	Laufzeit [s]	Spritzmenge [g/min]	Mittelwert Wasserfilmstärke [mm]	Spannweite [mm]	Spannweite im Verhältnis zur Wasserfilmstärke [%]	Mittelwert der Wasserfilmstärke bei der Geschwindigkeit [mm]	Abweichung Einzelwert prozentual vom Mittelwert aller Werte [%]
17.04.02	4000	62	19	18,0		0,0100	0,0010	10	0,0105	-5
17.04.02	4000	62	18	18,0	43,1	0,0099	0,0017	17		-6
07.05.02	4000	70	14	18,0		0,0098	0,0017	17		-7
07.05.02	4000	69	14	18,0	42,3	0,0105	0,0010	10		0
07.05.02	4000	69	14	18,0	45,7	0,0111	0,0020	18		6
07.05.02	4000	69	14	18,0	45,2	0,0103	0,0020	19		-2
07.05.02	4000	67	15		45,6	0,0111	0,0030	27		6
13.05.02	4000	70	17	18,0	45,2	0,0105	0,0013	12		0
03.08.04	4000	90	20		43,7	0,0105	0,0020	19		0
03.08.04	4000	91	20	18,5	45,1	0,0112	0,0013	12		7
03.08.04	4200	91	20	17,5	43,9	0,0103	0,0017	17	7	
03.08.04	4200	91	20	17,7	44,5	0,0103	0,0020	19	7	
06.12.04	4200				43,1	0,0095	0,0013	14	0,0097	-2
06.12.04	4200					0,0101	0,0020	20		4
07.12.04	4200	70	20	17,7	44,4	0,0086	0,0007	8		-11
02.03.05	4200	92	20	17,8	38,2	0,0100	0,0027	27		3
02.03.05	4200	92	20		37,2	0,0093	0,0020	22		-4
02.03.05	4200	94	20	17,8	36,3	0,0096	0,0023	24		-1
02.03.05	4200	93	20	17,8	37,8	0,0093	0,0010	11		-4

Tab. 1: Ergebnisse der Messreihen für den Nachweis der Wiederholbarkeit zum Auftragen eines Wasserfilms mit einer Höhe von 0,01 mm

der geringere Einfluss der Verdunstung bei den größeren Mengen.

Die höhere Wasserfilmdicke wurde durch ein langsames Bewegen des Sprühventils über der zu besprühenden Fläche bei gleichem Sprühdruk (0,1 bar) erreicht. Bei den letzten Messungen dieser Messreihe (siehe Tabelle 2, Ende) weichen die Mittelwerte höher von den sonstigen Werten ab. Diese Abweichungen werden auf Schwankungen im

Druckregler zurückgeführt, die auch zu geringeren Austrittsmengen pro Zeiteinheit führten (siehe Tabelle 2, Spalte 6 unten).

Bei der Messreihe mit einer mit einem Übergang aufgetragenen Wasserfilmdicke von 0,05 mm verbessert sich die Gleichmäßigkeit noch einmal im Vergleich zu den vorher beschriebenen Messreihen. Bei Versuchen mit diesen Einstellungen nach der Nutzung der Sprühanlage mit Taustoffen kann

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Datum	Geschwindigkeit (X) [Programmparameter]	relative Luftfeuchte [%]	Lufttemperatur [°C]	Laufzeit [s]	Spritzmenge [g/min]	Mittelwert Wasserfilmdicke [mm]	Spannweite [mm]	Spannweite im Verhältnis zur Wasserfilmdicke [%]	Mittelwert der Wasserfilmdicke bei der Geschwindigkeit [mm]	Abweichung Einzelwert prozentual vom Mittelwert aller Werte [%]
06.05.02	2400	91	14	24,0		0,0214	0,0017	8	0,0202	6
03.08.04	2400	91	20	23,9	45,0	0,0206	0,0023	11		2
03.08.04	2400	91	20	23,8	44,0	0,0200	0,0023	12		-1
03.08.04	2400	90	20	23,9	43,7	0,0208	0,0013	6		3
03.08.04	2400	90	20	24,0	43,2	0,0202	0,0027	13		0
03.08.04	2400	90	20	24,0	43,0	0,0199	0,0020	10		-1
03.08.04	2400	90	20	23,8	42,8	0,0187	0,0017	9		-7
03.08.04	2400	90	20	23,9	42,3	0,0204	0,0007	3		1
04.08.04	2400	90	20	23,9	43,7	0,0208	0,0013	6		3
04.08.04	2400	90	20	24,0	43,2	0,0202	0,0027	13		0
04.08.04	2400	90	20	24,8	43,0	0,0199	0,0020	10		-1
05.08.04	2400	90	20	23,8	42,8	0,0187	0,0017	9		-7
06.08.04	2400	90	20	23,9	42,3	0,0204	0,0007	3		1
25.10.04	2400	90	20	23,9	45,2	0,0241	0,0030	12		19
25.10.04	2400	90	20	23,8	45,2	0,0235	0,0037	16		16
25.10.04	2400	90	20	24,0	42,2	0,0203	0,0013	6		0
25.10.04	2400	90	20	24,0	47,7	0,0177	0,0030	17		-12
25.10.04	2400	90	20	24,0	40,9	0,0163	0,0030	18		-19

**Tab. 2:** Ergebnisse der Messreihen für den Nachweis der Wiederholbarkeit zum Auftragen eines Wasserfilms mit einer Höhe von 0,02 mm

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Datum	Geschwindigkeit (X) [Programmparameter]	relative Luftfeuchte [%]	Lufttemperatur [°C]	Laufzeit [s]	Spritzmenge [g/min]	Mittelwert Wasserfilmdicke [mm]	Spannweite [mm]	Spannweite im Verhältnis zur Wasserfilmdicke [%]	Mittelwert der Wasserfilmdicke bei der Geschwindigkeit [mm]	Abweichung Einzelwert prozentual vom Mittelwert aller Werte [%]	eingestellter Wasserdruck [bar]
04.08.04	2750	90	20	22,2	50,9	0,0504	0,0053	11	0,0499	1	0,5
04.08.04	2750	90	20	21,8	49,5	0,0501	0,0053	11		0	0,5
05.08.04	2750	90	20	21,7	50,7	0,0505	0,0027	5		1	0,5
05.08.04	2750	90	20	21,8	51,3	0,0498	0,006	12		0	0,5
05.08.04	2750	90	20	22,0	51,2	0,0516	0,0063	12		3	0,5
25.10.04	2750	90	20	22,0	49,8	0,0494	0,0037	7		-1	0,5
25.10.04	2750	90	20	22,0	50,9	0,0489	0,006	12		-2	0,5
25.10.04	2750	90	20	22,0	50,4	0,0481	0,0043	9		-4	0,5
02.03.04	2750	90	20	22,1	51,0	0,0497	0,0077	15		0	0,65
03.03.04	2750	90	20	21,7	51,0	0,0501	0,0047	9		0	0,65

**Tab. 3:** Ergebnisse der Messreihen für den Nachweis der Wiederholbarkeit zum Auftragen eines Wasserfilms mit einer Höhe von 0,05 mm

te ohne Änderung des Drucks nicht mehr die gleiche Wasserfilmdicke aufgetragen werden. Für die gleichen Wasserfilmdicken waren höhere Drücke notwendig (siehe Tabelle 3, Spalte 12).

### 6.2.3 Gleichmäßigkeit von Lösungsfilmen

Für einen umfassenden Test der Sensoren für die Gefriertemperatur ist das Auftragen von Lösungen mit verschiedenen Gefriertemperaturen vorgesehen. Dabei kommt wie beschrieben nur Natriumchlorid zum Einsatz. Die Tabelle 4 enthält die vorgesehenen Gefriertemperaturen mit der gleichzeitigen Angabe der Konzentrationen des Natriumchlorids im Wasser. Die einzelnen Werte wurden anhand der Lösungs- und Gefrierkurven für Natriumchlorid im Kommentar zur TL Streu ermittelt (siehe auch Bild 1) [11].

Die Dichte der Lösungen wurden nach deren Herstellung bestimmt. Für alle Konzentrationen fanden Kalibrierversuche wie bei den Versuchen mit Wasser statt.

Wie bereits bei der Wasserfilmdicke war für jede der genannten Lösungskonzentrationen ein Auftrag von Lösungsfilmen mit 0,01, 0,02 und 0,05 mm Dicke

Gefriertemperatur	Konzentration der Lösung	Dichte der Lösung
-2 °C	3,7 %	1,026 kg/dm <sup>3</sup>
-5 °C	7,8 %	1,054 kg/dm <sup>3</sup>
-10 °C	13,3 %	1,094 kg/dm <sup>3</sup>
-15 °C	17,5 %	1,127 kg/dm <sup>3</sup>
-20 °C	21,1 %	1,153 kg/dm <sup>3</sup>

Tab. 4: Gefriertemperaturen von Natriumchloridlösungen mit verschiedenen Konzentrationen

vorgesehen. In den meisten Fällen konnte aufgrund fehlender Personalkapazitäten und eines Defektes an Teilen der Vorrichtung nicht die genaue Kalibrierung im Rahmen der Projektarbeit erfolgen.

Erste Grundlage der Einstellwerte für das Aufbringen von Tausalzlösungen bildeten die Einstellwerte für Wasser; bei denen gleichzeitig versucht wurde, die geänderten Dichten der Lösungen mit einzubeziehen. Die einzelnen Einstellwerte wurden entsprechend den gewünschten Lösungsfilmdicken angepasst.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Messreihen geben für die jeweiligen Lösungskonzentrationen die Tabellen 5 bis 9 wieder (Erläuterungen zu den Tabellenangaben siehe Kapitel 6.2.2). In den Tabellen sind die Ergebnisse von Versuchen mit unterschiedlichen aufgetragenen Lösungsfilmdicken je Lösungskonzentration zusammengefasst.

Für das Auftragen von Lösungsfilmen mit einer Gefriertemperatur von -2 °C fanden nur wenige Versuche statt. Die Messergebnisse zeigen annähernd das Verhalten wie bei Wasser (siehe Kapitel 6.2.2). Die höheren Spannweiten bei dem Auftragen von Lösungsfilmen mit einer Höhe von 0,01 mm lassen sich auch hier wieder aufgrund unterschiedlicher Zeitdauer bis zum Wiegen der einzelnen Stäbe und damit als Einfluss der Verdunstung zurückzuführen. Sie sind weniger Ergebnis einer ungleichen Auftragung. Eine genaue Kalibrierung für die vorgesehenen Lösungsfilmhöhen erfolgte nicht.

Auch bei der Lösungskonzentration mit einer Gefriertemperatur von -5 °C ergeben sich zwischen den unterschiedlichen Lösungsfilmdicken unter-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Datum	Geschwindigkeit (X) [Programmparameter]	relative Luftfeuchte [%]	Lufttemperatur [°C]	Laufzeit [s]	Spritzmenge [g/min]	Mittelwert Wasserfilmdicke [mm]	Spannweite [mm]	Spannweite im Verhältnis zur Wasserfilmdicke [%]	Mittelwert der Wasserfilmdicke bei der Geschwindigkeit [mm]	Abweichung Einzelwert prozentual vom Mittelwert aller Werte [%]	eingestellter Wasserdruck [bar]
26.10.04	3700	90	18	19,0	22,4	0,0123	0,0016	13	0,0121	2	0,1
26.10.04	3700	90	18	19,0	22,3	0,0127	0,0026	20		5	0,1
26.10.04	3700	90	18	18,9	22,3	0,0114	0,0026	23		-6	0,1
26.10.04	2200	90	18	25,0	22,9	0,0218	0,0016	7	0,0225	-3	0,1
26.10.04	2200	90	18	25,0	22,5	0,0209	0,0019	9		-7	0,1
26.10.04	2200	90	18	25,0	23,6	0,0248	0,0013	5		-10	0,1
28.10.04	2700	90	18	22,0	51,9	0,0529	0,0032	6	0,0538	-2	0,5
28.10.04	2700	90	18	22,0	53,2	0,0544	0,0019	3		1	0,5
28.10.04	2700	90	18	22,0	52,8	0,0540	0,0013	2		0	0,5

Tab. 5: Ergebnisse der Messreihen für den Nachweis der Wiederholbarkeit zum Auftragen von Lösungsfilmen mit einer NaCl-Konzentration von 3,7 % (entspricht -2 °C Gefriertemperatur)

schiedliche Gleichmäßigkeiten beim Auftragen mit einem Übergang (Tabelle 6). Mit dieser Konzentration wurden die meisten Versuche durchgeführt. Je niedriger die Filmdicke ist, umso ungleicher ist die Gleichmäßigkeit auf den Stäben. Bei der Lösungsfilmdicke von 0,01 mm ist der aufgetragene Film ungleichmäßiger als bei den Versuchen mit reinem Wasser. Die Ursache wird in einer ungleichmäßigen Verteilung der Lösung durch das Sprühventil gesehen. Diese kann durch zunehmenden Verschleiß oder Verunreinigung infolge Salzablagerungen am Sprühventil entstanden sein. Die genaue Ursache für dieses Verhalten konnte nicht festgestellt werden.

Bei den Lösungskonzentrationen mit einer Gefrier-temperatur von -10 °C ergeben sich bei den Lö-

sungsfilmhöhen von 0,01 und 0,02 mm ähnliche Ergebnisse wie bei Wasser (Tabelle 7). Bei der Wiederholbarkeit eines 0,05 mm dicken Lösungsfilms konnte im Vergleich zu Wasser nur ein deutlich schlechteres Ergebnis erzielt werden. Die Abweichungen zum Mittelwert aller Versuche gehen bis  $\pm 10 \%$ , bei Wasser bleiben sie unter  $\pm 5 \%$ .

Die Messergebnisse der Versuche mit einer Lösungskonzentration von 17,5 % bzw. mit einer Gefrier-temperatur von -15 °C ergeben in Bezug auf die Gleichmäßigkeit bei einem Übergang etwas schlechtere Ergebnisse als bei den Versuchen mit einer 13,3%igen Lösung (Tabelle 8). Dies kann mit der höheren Dichte der Lösung zusammenhängen.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Datum	Geschwindigkeit (X) [Programmparameter]	relative Luftfeuchte [%]	Lufttemperatur [°C]	Laufzeit [s]	Spritzmenge [g/min]	Mittelwert Wasserfilmdicke [mm]	Spannweite [mm]	Spannweite im Verhältnis zur Wasserfilmdicke [%]	Mittelwert der wasserfilmdicke bei der Geschwindigkeit [mm]	Abweichung Einzelwert prozentual vom Mittelwert aller Werte [%]	eingestellter Wasserdruck [bar]
28.10.04	3800	90	18	18,8	41,6	0,0118	0,0022	19	0,0108	9	0,1
28.10.04	3850	90	18	18,0	44,5	0,0110	0,0009	8		2	0,1
28.10.04	3850	90	18	18,0	44,0	0,0106	0,0019	18		-2	0,1
28.10.04	3850	90	18	19,0	44,0	0,0112	0,0016	14		4	0,1
03.03.05	4200	90	20	18,0	40,8	0,0099	0,0038	38		-8	0,1
03.03.05	4200	90	20	18,0	40,8	0,0107	0,0016	15		-1	0,1
03.03.05	4200	90	20	17,8	37,8	0,0099	0,0025	25		-8	0,1
03.03.05	4200	90	20	17,8	40,2	0,0113	0,0025	22		5	0,1
28.10.04	2300	90	18	24,5	41,4	0,0212	0,0025	12	0,0209	1	0,1
28.10.04	2200	90	18	25,2	46,0	0,0249	0,0014	6		19	0,1
29.10.04	2250	90	18	25,0	43,9	0,0216	0,0025	12		3	0,1
29.10.04	2250	90	18	25,0	39,7	0,0207	0,0081	39		-1	0,1
29.10.04	2250	90	18	25,0	41,0	0,0190	0,0028	15		-9	0,1
29.10.04	2200	90	18	25,0	42,6	0,0212	0,0019	9		1	0,1
29.10.04	2200	90	18	25,0	42,1	0,0222	0,0049	22		6	0,1
29.10.04	2200	90	18	25,0	40,7	0,0201	0,0022	11		-4	0,1
01.02.05	2200	85	20	25,2	40,0	0,0197	0,0032	16		-6	0,1
01.02.05	2200	85	20	25,1	39,6	0,0185	0,0025	14		-11	0,1
29.10.04	2500	90	18	23,2	51,1	0,0489	0,0025	5	0,0504	-3	0,5
29.10.04	2600	90	18	22,1	51,8	0,0471	0,0038	8		-7	0,5
29.10.04	2650	90	18	22,1	51,1	0,0495	0,0019	4		-2	0,5
29.10.04	2700	90	20	22,0	51,4	0,0539	0,0025	5		7	0,5
01.02.05	2600	85	20	22,8	51,1	0,0490	0,0044	9		-3	0,5
01.02.05	2600	85	20	22,6	51,0	0,0506	0,0022	4		0	0,5
01.02.05	2600	85	20	22,8	52,7	0,0517	0,0041	8		3	0,5
03.03.05	2700	90	20	22,3	51,1	0,0522	0,0032	6		4	0,6
03.03.05	2700	90	20	20,0	50,4	0,0506	0,0035	7		0	0,6
03.03.05	2700	90	20	22,0	50,4	0,0504	0,0028	6		0	0,6

**Tab. 6:** Ergebnisse der Messreihen für den Nachweis der Wiederholbarkeit zum Auftragen von Lösungsfilmen mit einer NaCl-Konzentration von 7,8 % (entspricht -5 °C Gefrier-temperatur)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Datum	Geschwindigkeit (X) [Programmparameter]	relative Luftfeuchte [%]	Lufttemperatur [°C]	Laufzeit [s]	Spritzmenge [g/min]	Mittelwert Wasserfilmdicke [mm]	Spannweite [mm]	Spannweite im Verhältnis zur Wasserfilmdicke [%]	Mittelwert der Wasserfilmdicke bei der Geschwindigkeit [mm]	Abweichung Einzelwert prozentual vom Mittelwert aller Werte [%]	eingestellter Wasserdruck [bar]
02.02.05	3800	85	20	18,5	42,2	0,0101	0,0018	18	0,0105	-4	0,1
02.02.05	3800	85	20	18,5	42,3	0,0111	0,0009	8		6	0,1
02.02.05	3800	85	20	18,7	40,7	0,0102	0,0009	9		-3	0,1
02.02.05	2250	85	20	25,0	42,8	0,0202	0,0015	7	0,0204	-1	0,1
02.02.05	2250	85	20	25,0	43,3	0,0214	0,0015	7		5	0,1
04.02.05	2250	85	20	25,0	43,2	0,0209	0,0018	9		2	0,1
04.02.05	2200	85	20	25,0	40,3	0,0190	0,0015	8	0,0495	-7	0,1
04.02.05	2500	85	20	21,0	52,8	0,0468	0,0122	26		-5	0,5
04.02.05	2500	85	20	23,0	52,2	0,0511	0,0052	10		3	0,5
04.02.05	2500	85	20	23,0	50,9	0,0541	0,0034	6		9	0,5
04.02.05	2500	85	20	23,0	50,9	0,0546	0,0034	6		10	0,5
08.02.05	2550	85	20	23,0	51,3	0,0460	0,0015	3		-7	0,5
08.02.05	2500	85	20	23,1	50,6	0,0489	0,0021	4		-1	0,5
08.02.05	2500	85	20	23,0	50,4	0,0448	0,0034	8		-9	0,5
08.02.05	2500	85	20		50,3	0,0498	0,0043	9		7	0,5

**Tab. 7:** Ergebnisse der Messreihen für den Nachweis der Wiederholbarkeit zum Auftragen von Lösungsfilmen mit einer NaCl-Konzentration von 13,3 % (entspricht -10 °C Gefriertemperatur)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Datum	Geschwindigkeit (X) [Programmparameter]	relative Luftfeuchte [%]	Lufttemperatur [°C]	Laufzeit [s]	Spritzmenge [g/min]	Mittelwert Wasserfilmdicke [mm]	Spannweite [mm]	Spannweite im Verhältnis zur Wasserfilmdicke [%]	Mittelwert der Wasserfilmdicke bei der Geschwindigkeit [mm]	Abweichung Einzelwert prozentual vom Mittelwert aller Werte [%]	eingestellter Wasserdruck [bar]
08.02.05	3800	85	20	18,5	40,4	0,0094	0,0015	16	0,0096	-2	0,1
08.02.05	3800	85	20	18,5	39,4	0,0105	0,0015	14		9	0,1
08.02.05	3800	85	20	18,2	40,6	0,0090	0,0009	10		-6	0,1
09.02.05	2250	90	20	25,0	46,8	0,0190	0,0041	22	0,0200	-5	0,1
09.02.05	2220	90	20	25,0	46,1	1740,0	0,0024	14		-13	0,1
09.02.05	2150	90	20	25,5	43,2	0,0202	0,0044	22		1	0,1
09.02.05	2150	90	20	25,5	40,3	0,0202	0,0018	9		1	0,1
09.02.05	2150	90	20	25,5	42,3	0,0231	0,0024	10		16	0,1
09.02.05	2500	90	20	23,0	52,3	0,0529	0,0047	9		6	0,5
09.02.05	2500	90	20	23,0	52,2	0,0523	0,0027	5		5	0,5
09.02.05	2550	90	20	22,7	52,5	0,0516	0,0065	13	3	0,5	
09.02.05	2600	90	20	22,7	52,0	0,0501	0,0030	6	0	0,5	
09.02.05	2600	90	20	22,8	51,0	0,0476	0,0030	6	0,05	-5	0,5
09.02.05	2600	90	20	22,9	52,5	0,0486	0,0021	5		-7	0,5
10.02.05	2550	90	20	23,0	50,2	0,0518	0,0044	8		4	0,5
10.02.05	2550	90	20	23,0	51,0	0,0512	0,0033	6		2	0,5
10.02.05	2550	90	20	23,0	50,6	0,0540	0,0041	8		8	0,5
10.02.05	2550	90	20	23,0	50,9	0,0498	0,0062	12		0	0,5

**Tab. 8:** Ergebnisse der Messreihen für den Nachweis der Wiederholbarkeit zum Auftragen von Lösungsfilmen mit einer NaCl-Konzentration von 17,5 % (entspricht -15 °C Gefriertemperatur)

Die Ergebnisse mit der 21,1%igen Lösung führen zu erheblich größeren Differenzen sowohl bei der Gleichmäßigkeit nach einem Übergang als auch bei

den Differenzen zwischen den einzelnen Versuchen im Vergleich zu allen anderen Lösungskonzentrationen (Tabelle 9). Als Ursache wird hier die hohe

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Datum	Geschwindigkeit (X) [Programmparameter]	relative Luftfeuchte [%]	Lufttemperatur [°C]	Laufzeit [s]	Spritzmenge [g/min]	Mittelwert Wasserfilmdicke [mm]	Spannweite [mm]	Spannweite im Verhältnis zur Wasserfilmdicke [%]	Mittelwert der Wasserfilmdicke bei der Geschwindigkeit [mm]	Abweichung Einzelwert prozentual vom Mittelwert aller Werte [%]
10.02.05	3800	90	20	18,5	42,7	0,0128	0,0046	36	0,0121	6
10.02.05	3800	90	20	18,5	42,7	0,0164	0,0020	12		36
10.02.05	3850	90	20	18,4	39,2	0,0086	0,0020	23		-29
10.02.05	3850	90	20	18,4	40,6	0,0088	0,0023	26		-27
10.02.05	3850	90	20	18,4	43,0	0,0139	0,0029	21		12
10.02.05	3850	90	20	18,4	38,9	0,0121	0,0009	7		0
10.02.05	2150	90	20	25,0	41,4	0,0160	0,0023	14	0,0223	-28
10.02.05	2050	90	20	26,2	44,4	0,0222	0,0023	10		0
10.02.05	2050	90	20	26,2	40,1	0,0272	0,0029	11		22
10.02.05	2150	90	20	25,4	43,4	0,0173	0,0029	17		-22
10.02.05	2100	90	20	26,0	40,8	0,0284	0,0035	12		27
11.02.05	2100	90	20	26,0	40,0	0,0201	0,0038	19		-10
11.02.05	2100	90	20	26,0	44,3	0,0332	0,0049	15	49	
11.02.05	2100	90	20	26,0	40,4	0,0140	0,0029	21	-37	

**Tab. 9:** Ergebnisse der Messreihen für den Nachweis der Wiederholbarkeit zum Auftragen von Lösungsfilmen mit einer NaCl-Konzentration von 21,1 % (entspricht -20 °C Gefriertemperatur)

Salzkonzentration in der Lösung angesehen, die nahe an der Sättigungsgrenze liegt. Es ist nicht auszuschließen, dass es deshalb am Sprühventil zu Auskristallisationen kommt, die das Sprühbild so erheblich beeinflussen. Aufgrund der sehr kompakten Bauweise des Sprühventils mit ca. 1 x 1 x 1 cm mit Schlauchanschluss konnten am Ventil selber keine Verunreinigungen erkannt werden. Die Versuche für eine genaue wiederholbare Einstellung mit dieser Sprühdüse wurden aufgegeben, ebenso Einstellungen für den Auftrag von Lösungsfilmen mit 0,05 mm Dicke.

### 6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit der weiterentwickelten Sprühvorrichtung ist das Auftragen von dünnen Wasser- bzw. Lösungsfilmen mit einer hohen Gleichmäßigkeit und Wiederholbarkeit möglich. Eine Ausnahme bildet das Austragen von hochkonzentrierten Tausalzlösungen, die sich mit der vorhandenen Konstruktion weder ausreichend gleichmäßig noch mit wiederholbaren Ergebnissen bei der Lösungsfilmdicke austragen ließ. Für das Austragen dieser Konzentrationen sind geeignetere Sprühdüsen denkbar, die der Hersteller des genutzten Sprühventils auch anbietet. Eine Erprobung fand nicht statt.

Für das Aussprühen von Wasser erwies sich die weiterentwickelte Vorrichtung im Vergleich zur ersten Konstruktion als wesentlich einfacher hand-

habbar. Mit ihr konnte auch eine erheblich höhere Wiederholbarkeit der Ergebnisse erzielt werden.

Die Tausalzlösungen lassen sich bis auf die genannte Ausnahme ähnlich gleichmäßig und wiederholbar wie Wasser ausbringen. Der Einsatz des Salzes bedarf aber eines wesentlich höheren Reinigungsaufwandes beim Betrieb der Vorrichtung. Aussagen zu einem schnelleren Verschleiß durch die Salzeinwirkung ließ sich aus den bisherigen Versuchen nicht ableiten. Eine nicht durchgeführte Reinigung nach einem Einsatz führte allerdings zu Verstopfungen am Sprühventil. Die Vorrichtung ließ sich danach nicht mit den vorherigen Einstellungen weiterbetreiben.

Aufgetretene Differenzen bei der Wiederholbarkeit von Ergebnissen können nicht nur auf technische Unzulänglichkeiten der Sprühvorrichtung selber zurückgeführt werden. Weitere Fehlerquellen ergeben sich durch menschliche Fehler, z. B. bei der Wägung oder bei der Einstellung der Drücke.

Weitere Fehlerquellen ergeben sich aus den vorhandenen Messmitteln bzw. Messbedingungen. Die Wägung z. B. der Lösungsfilme erfolgt mit einer Auflösung von 0,001 g in einer Klimakammer mit einem spürbaren Luftzug. Dieser Luftzug führt trotz der Einhausung der Waage zu Schwankungen bei der Wägung eines Stabes bis  $\pm 0,002$  g. Weiterhin weichen die zu besprühenden Flächen der Plastikstäbe fertigungsbedingt bis zu 5 % voneinander ab.

Eine höhere Genauigkeit erfordert einen wesentlich höheren Aufwand bei den Messmitteln und Messbedingungen (u. a. eine zugfreie Klimakammer). Die erreichte Genauigkeit der Prüfvorrichtung wird aber für die Beurteilung der Sensoren für die Gefrier-temperatur als ausreichend angesehen.

## 7 Erfahrungen aus dem Einsatz der Prüfvorrichtung auf Straßen

Die Prüfvorrichtung wurde auf einem Testfeld auf der BAB A 92 nahe der Anschlussstelle Eching Ost an Bodensensoren für die Gefrier-temperatur und Wasser-(Lösungs-)filmdicke in der Praxis erprobt. Das genannte Messfeld dient u. a. der Erprobung von Sensoren für die Umfelddatenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen. Im Messfeld sind Sensortypen von vier verschiedenen Firmen in der Fahrbahn eingebaut. Die von den verschiedenen Firmen gelieferten Sensoren für die Wasserfilmdicke und Gefrier-temperatur sowie für die Fahrbahnoberflächentemperatur sind jeweils zusammengefasst in einem Block eingebaut. Alle Sensoren für die Gefrier-temperatur besitzen eine passive Arbeitsweise.

### 7.1.1 Beschreibung der Versuchsdurchführung

Die Erprobung der Prüfvorrichtung auf der Fahrbahn fand Anfang März 2005 statt. Während der Erprobung um die Mittagszeit herrschte bedeckter Himmel mit vereinzelt geringem Schneefall bei geringer Windgeschwindigkeit. Die Fahrbahnoberfläche trocknete während der Erprobungszeit ab. Die Fahrbahnoberflächentemperaturen betragen zwischen 3 und 6 °C (je nach Sensorblock und Zeitpunkt).

In der Nacht zuvor wurde in diesem Fahrbahnabschnitt aufgrund von Schneefall gestreut. Deshalb wurden die Sensoren vor dem Auftragen der Lösungen mit der entwickelten Sprühvorrichtung mit Wasser gespült und anschließend getrocknet, bis der Sensor für die Wasserfilmdicke „0 mm“ anzeigte.

Danach sprühte die Vorrichtung eine 7,8-prozentige NaCl-Lösung (Gefrier-temperatur -5 °C) mit jeweils einem Übergang pro Minute. Ein Übergang dauerte ca. 18 sec. Es erfolgten je Sensor 10-11 Übergänge. Je Übergang trug die Sprühvorrichtung 0,01 mm mit einer geschätzten Toleranz

von -0,002 bis +0,003 mm auf. In dieser Zeit wurde der Sensor nicht berührt. Die geschätzte Toleranz ergibt sich aus den Erfahrungen der Einstellungen bei der Arbeit mit der Prüfvorrichtung an vorherigen Tagen (siehe Kapitel 6.2). Das Sprühverhalten wurde in Bezug auf Aussetzer und Gleichmäßigkeit ständig visuell überprüft.

Wenige Minuten nach dem maschinellen Auftragen wurde auf jedem Sensor die gleiche Lösung von Hand aufgeschüttet, bis der Sensor vollständig mit einem Lösungsfilm bedeckt war. Eine Messung dieser Lösungsfilmhöhe fand nicht statt. Dieses Ausschütten sollte die Arbeitsweise der Sensoren im Vergleich zwischen niedrigen und höheren Filmdicken zeigen.

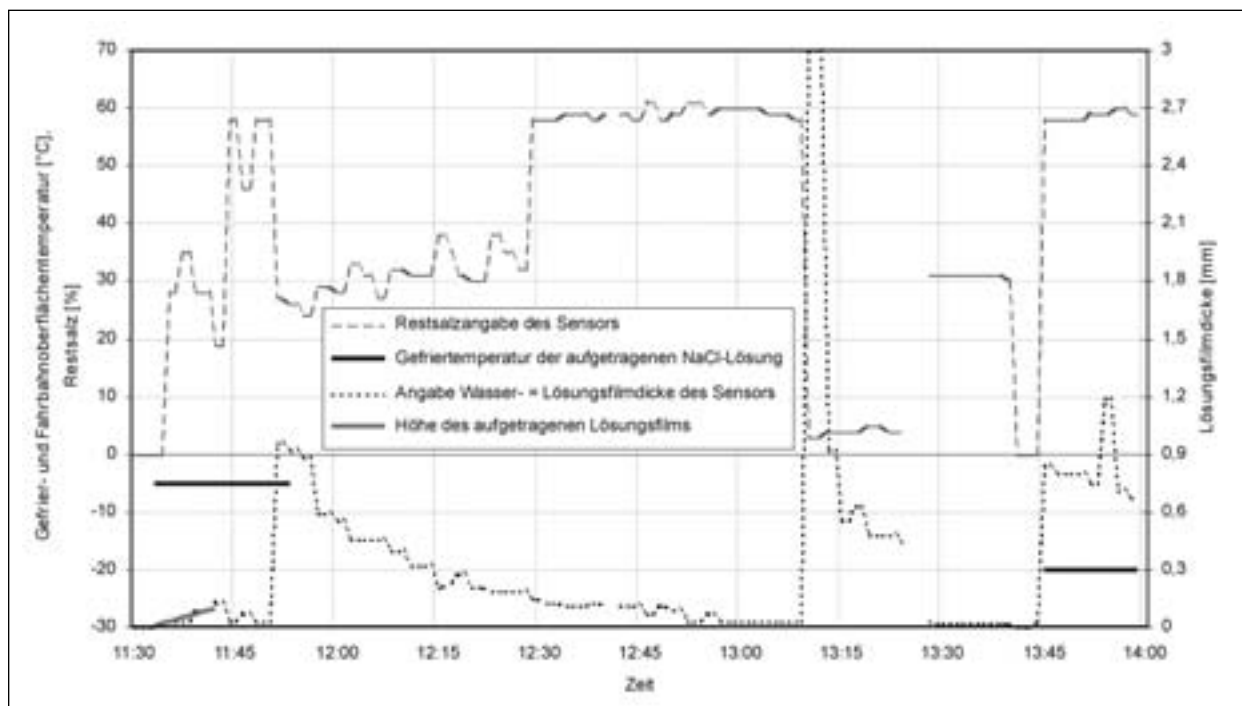
In einem jeweils zweiten Versuch je Sensor wurde eine 21,1-prozentige NaCl-Lösung (Gefrier-temperatur = -20 °C) aufgeschüttet, bis der Sensor wiederum vollständig bedeckt war. Vor diesem Auftragen wurden alle Sensoren wie vor den ersten Versuchen mit reinem Wasser gespült und anschließend getrocknet.

Der Zeitbedarf für die beschriebenen Versuche betrug 3,5 Stunden. Der Verkehr im Bereich der Sensoren auf dem 3. Fahrstreifen war während der Versuche gesperrt. Längere Sperrzeiten für Versuche mit weiteren Lösungen oder anderen Lösungsfilm-dicken waren nicht möglich.

### 7.1.2 Ergebnisse und Bewertung zu den einzelnen Sensoren

Die Bilder 10 bis 13 geben die Messwerte nach dem oben beschriebenen Vorgehen wieder. Die aufgetragenen Lösungsfilm-dicken sind nur dann dargestellt, wenn sie definiert mit der Sprühvorrichtung aufgetragen wurden. Die Höhen der aufgeschütteten Lösungsfilme sind aufgrund fehlender Messergebnisse nicht dargestellt.

Sensor 1 (Bild 10) zeigt eine sofortige Reaktion auf die maschinelle Auftragung der Tausalz-lösung. Die Restsalzangabe gemäß TLS entspricht etwa der Tausalz-konzentration (Restsalzangabe ca. 30 % der 7,8%igen Lösung bei +5 °C, Restsalzangabe 100 % gleich 26%ige Lösungskonzentration, genaue Angaben liegen nicht vor, siehe Kapitel 6.1). Die Restsalzangabe steigt kurzzeitig an, was durch Verdunstung möglich sein kann. Nach dem Aufkippen der Lösung sinkt die Angabe wieder auf den angenommenen Wert der Lösung.



**Bild 10:** Verlauf der Messwerte bei der Überprüfung eines Sensors für die Gefriertemperatur (hier nur Restsalzangaben durch den Sensor)

Der Sensor für die Wasserfilmdicke reagiert auf den zunehmend aufgetragenen Lösungsfilm hinreichend genau.

Das Abspülen mit Wasser ist bei der Angabe der Restsalzkonzentration und Wasserfilmdicke erkennbar (ca. 13:10 Uhr). Das Aufschütten einer 21,1%igen Lösung um 13:46 Uhr wird sofort erkannt. Die Restsalzangabe steigt auf rund 60 %. Bei der Annahme, dass die Restsalzangabe 100 % = Sättigung bei gleicher Temperatur bei 26 % Lösungskonzentration liegt, wäre die Angabe von rund 80 % richtig. Der Sensorwert weicht damit um rund 25 % vom angenommenen richtigen Wert ab.

Bei Sensor 2 (Bild 11) konnte durch Spülen und Abtrocknen keine Gefriertemperatur = 0 °C erreicht werden. Auf das maschinelle Auftragen der Lösung mit der Gefriertemperatur -5 °C reagiert der Sensor für die Gefriertemperatur nicht. Die gemessene Lösungsfilmdicke steigt auf Werte bis ca. 3 mm und ist deutlich damit zu hoch.

Nach dem Aufschütten der 7,8%igen Lösung um 13:02 Uhr gibt der Sensor die Gefriertemperatur mit rund -4 °C annähernd richtig an.

Auf das Aufschütten der 21,1%igen Lösung gegen 13:55 Uhr reagiert der Sensor sofort. Die gemessene Gefriertemperatur sinkt aber nicht unter -5°C.

Der Sensor 3 (Bild 12) reagiert auf die maschinelle Auftragung der 7,8%igen Lösung innerhalb der ersten 5 Minuten gar nicht. Danach sinkt die Gefriertemperatur minimal auf -0,1 °C. Die Restsalzangabe gemäß TLS steigt kurzzeitig auf rund 5 %, fällt aber während des Auftragens wieder auf 0 %.

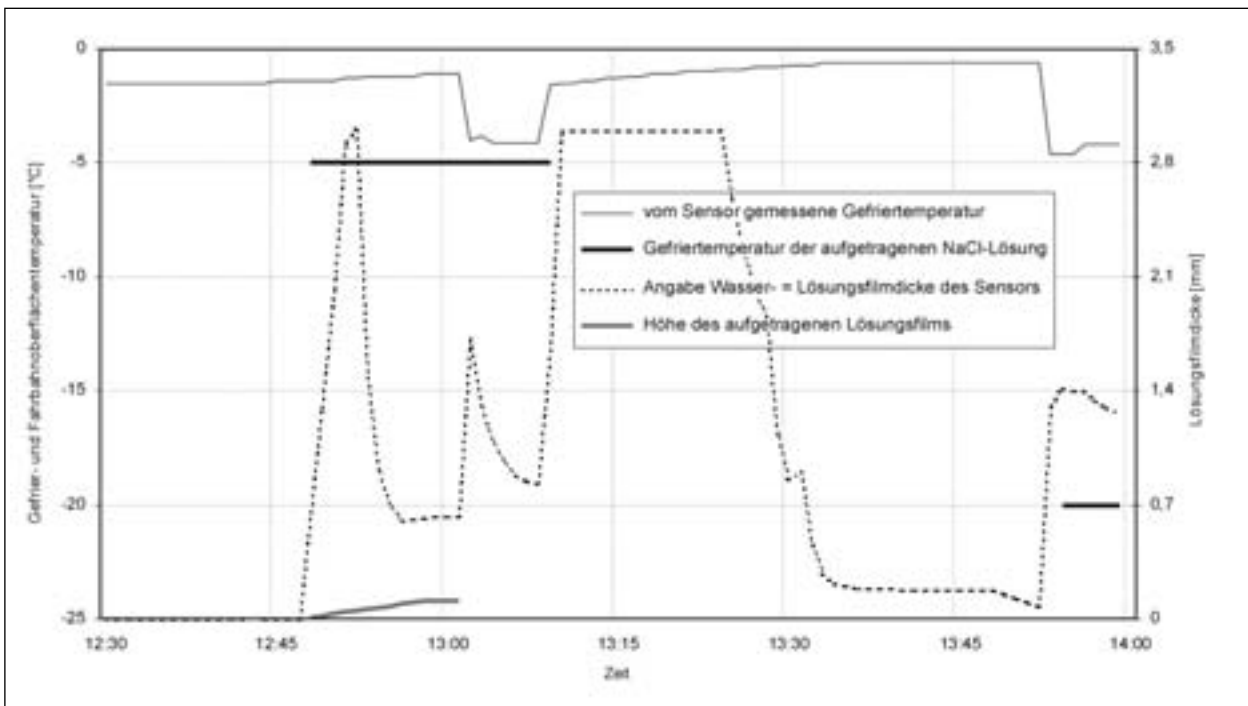
Die maschinell aufgetragene Lösungsfilmhöhe zeigt der Sensor zunächst nicht, später deutlich höher als aufgetragen an.

Auf das Aufschütten der gleichen Lösung von Hand (ca. 13:30 Uhr) reagiert der Sensor sofort. Allerdings fällt die gemessene Gefriertemperatur bis auf -21,1 °C, die Restsalzangabe steigt auf ca. 18 %. Beide Angaben sind damit widersprüchlich.

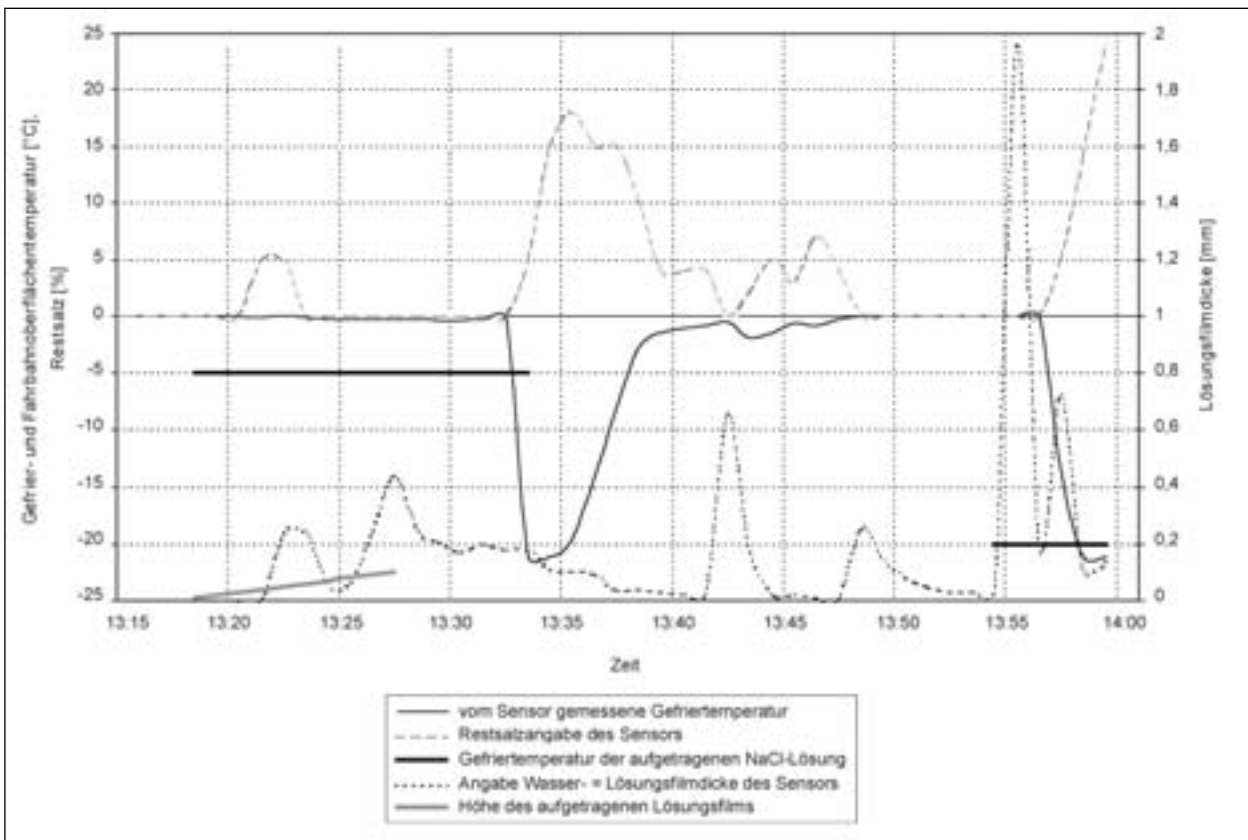
Auf das Aufschütten der 21,1%igen Lösung erkennt der Sensor die geänderte Höhe des Lösungsfilms sofort, die niedrige Gefriertemperatur der Lösung wird etwas verzögert, aber annähernd richtig angeben. Die Restsalzangaben sind auch in diesem Fall mit Werten unter 25 % ebenfalls widersprüchlich zur angegebenen Gefriertemperatur.

Der vierte Sensor reagiert auf den maschinell aufgetragenen Lösungsfilm in Bezug auf die Lösungshöhe sofort (Bild 13). Allerdings übersteigen die ermittelten Werte deutlich die tatsächlich aufgetragenen Mengen.





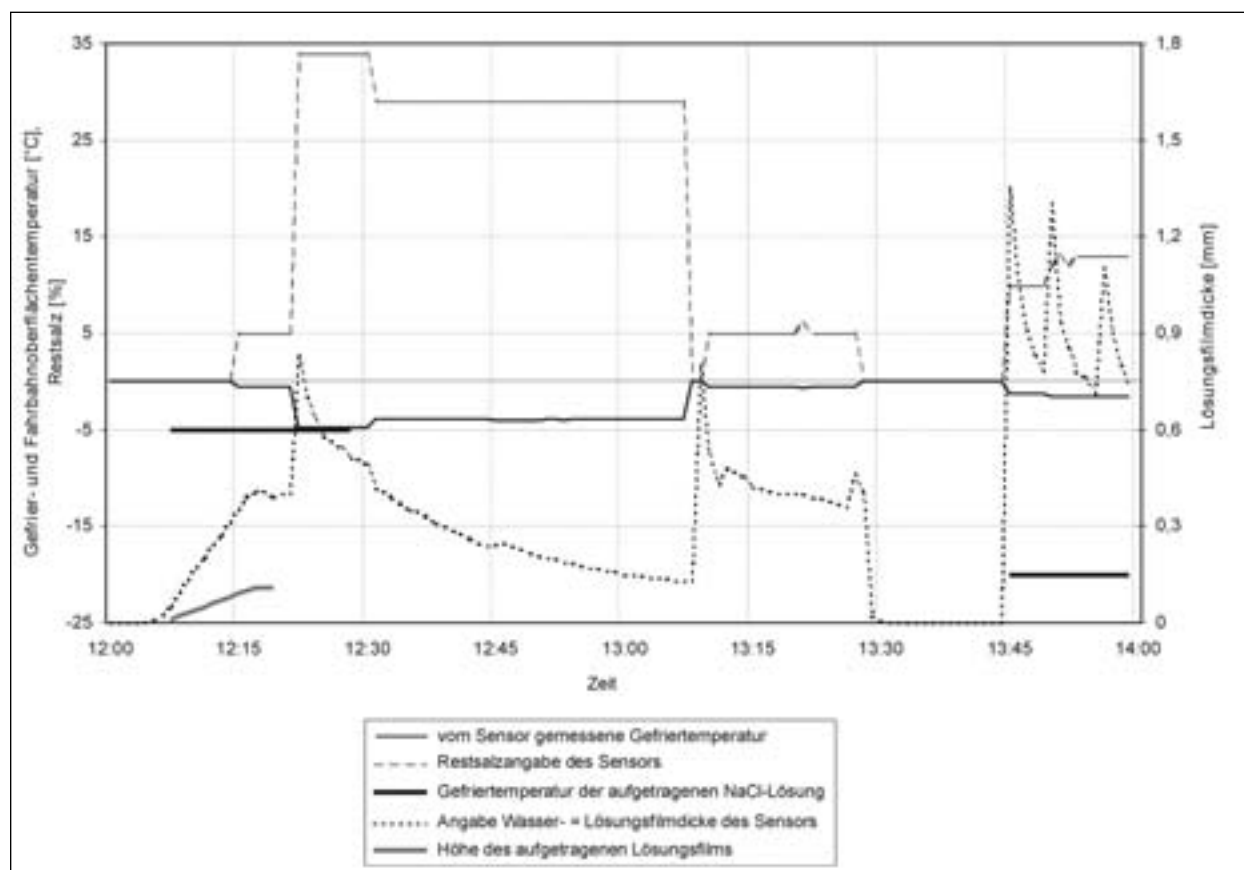
**Bild 11:** Verlauf der Messwerte bei der Überprüfung eines Sensors für die Gefriertemperatur



**Bild 12:** Verlauf der Messwerte bei der Überprüfung eines Sensors für die Gefriertemperatur

Auf die Lösungskonzentration reagiert der Sensor bei dem maschinell aufgetragenen Lösungsfilm zunächst nicht. Erst gegen Ende der Auftragung

sinkt die Gefriertemperatur nur geringfügig. Die Gefriertemperatur der aufgeschütteten Lösung wird dagegen mit  $-4,7\text{ °C}$  nahezu richtig erkannt.



**Bild 13:** Verlauf der Messwerte bei der Überprüfung eines Sensors für die Gefriertemperatur

Beim Aufschütten der 21,1%igen Lösung (13:45 Uhr) reagiert der Sensor sofort. Die Gefriertemperatur wird aber falsch angegeben.

Die Angaben von Gefriertemperatur und Restsalz gemäß TLS sind im Gegensatz zum Sensor 3 in allen Fällen zueinander plausibel.

## 7.2 Zusammenfassende Ergebnisbewertung

Die Versuche führten zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Nur ein Sensor reagierte in Bezug auf die Lösungsfilmhöhe weitgehend richtig (Sensor 1, Bild 9). Bei allen weiteren Sensoren wichen die gemessenen Lösungsfilmdicken deutlich von der tatsächlich aufgetragenen Lösungsfilmdicke ab.

Bei der Gefriertemperatur zeigen die verschiedenen Sensoren ebenfalls ein unterschiedliches Verhalten. Kein Sensor reagierte auf beide aufgetragenen Lösungskonzentrationen richtig.

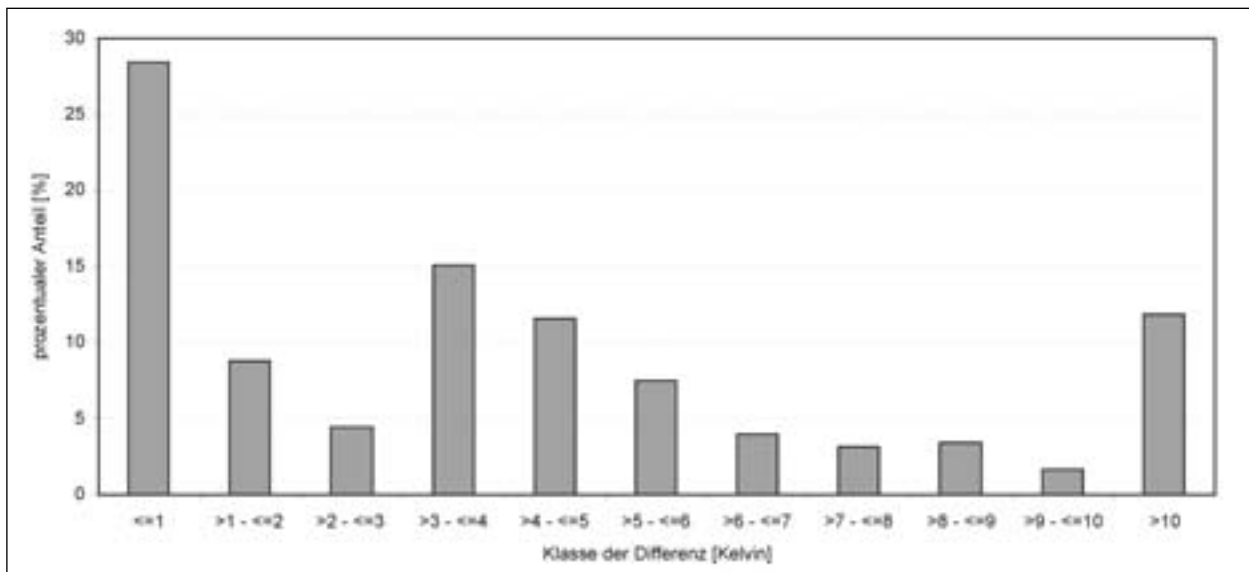
Zwei der Hersteller gaben als Grund für die falschen Angaben bei den geringen Lösungsfilmdicken die fehlende Bedeckung der Sensoren an. Eine exakte Messung ist erst möglich, wenn eine ausreichende

Überdeckung der Sensoren mit einer Salzlösung erfolgt. Die notwendigen Filmdicken wurden nicht benannt. Die Hersteller gehen davon aus, dass durch den Verkehr die ausreichende Bedeckung erreicht wird. Diese Aussage kann wegen fehlender Beobachtungskennnisse bisher nicht geprüft werden.

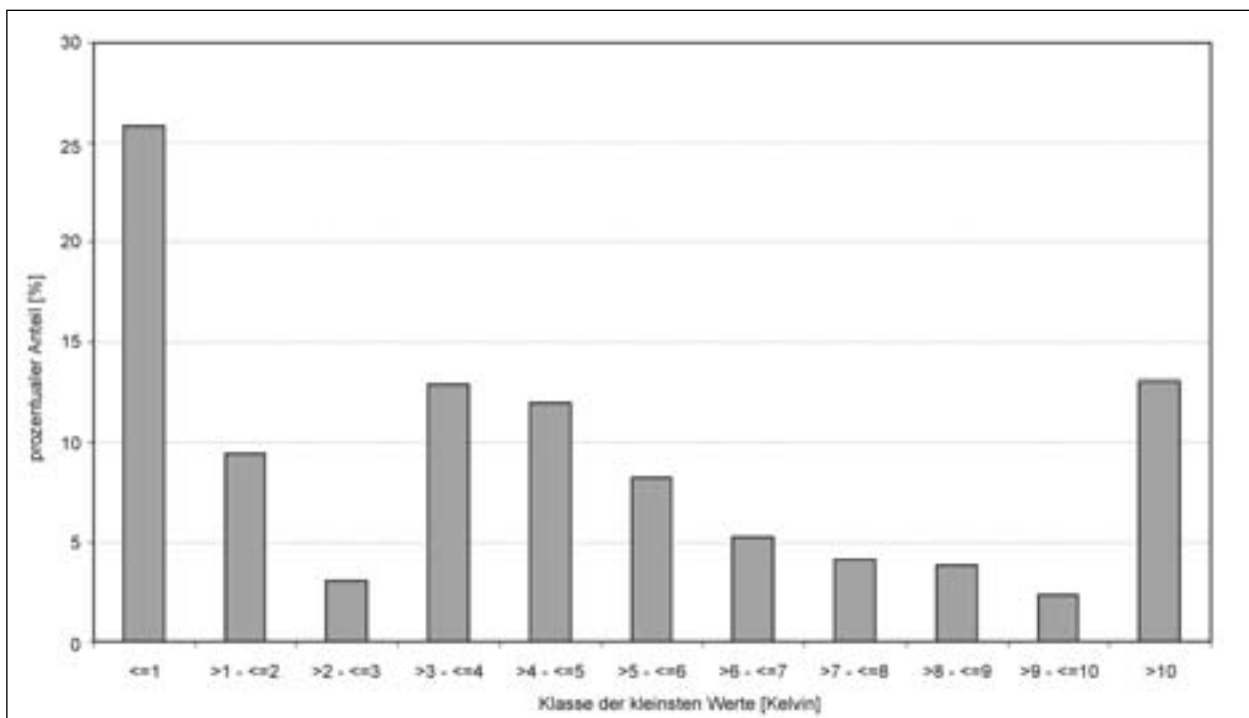
## 7.3 Vergleich der Messergebnisse mit anderen Messungen

Die dauerhaften Messwertaufzeichnungen der Sensoren auf dem genannten Prüffeld weisen im Vergleich zeitgleich erfasster Gefriertemperaturen erhebliche Differenzen untereinander auf. Bild 14 gibt die prozentualen Verteilungen der Differenzen zwischen drei Sensoren unterschiedlicher Bauart an. Die Sensoren sind im gleichen Querschnitt auf einem dreistreifigen Autobahnabschnitt in der Mitte des dritten Fahrstreifens eingebaut. Der Abstand zwischen allen Sensoren beträgt weniger als 15 m. In die Auswertung wurden nur Datensätze einbezogen, bei denen mindestens ein Sensor als Fahrbahnzustand „nass“ anzeigt.

In ca. 28 % der Fälle stimmen die Messwerte mit weniger als ein Kelvin Differenz überein. In rund



**Bild 14:** Prozentuale Verteilung der Differenzen der Gefriertemperaturen von drei Sensoren zu gleichen Zeitpunkten (6.322 Messzeitpunkte)



**Bild 15:** Prozentuale Verteilung der von drei Sensoren zu gleichen Zeitpunkten am kleinsten angegebenen Gefriertemperatur (6.322 Messzeitpunkte)

12 % der Fälle sind die Differenzen größer als 10 Kelvin. Dabei muss beachtet werden, dass bei rund 26 % aller Messzeitpunkte keiner der Sensoren unter  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  und in nur rund 13 % mindestens einer der Sensoren unter  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  misst (Bild 15). D. h., von den 28 % der Fälle mit der Differenz kleiner/gleich ein Kelvin können nur 2 % eine Differenz über 1 Kelvin erreichen. Bei den großen Differenzen misst in über 9 von 10 Fällen, bei denen ein Sensor eine Gefriertemperatur kleiner

$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  anzeigt, mindestens ein anderer Sensor eine 10 Kelvin höhere Gefriertemperatur.

Die Differenzen sind bei diesem Vergleich ähnlich hoch wie bei der bereits genannten Untersuchung Anfang der 1990iger Jahre [5]. Für die Ableitung einer Glättegefahr bleiben diese Angaben weiterhin wenig hilfreich, wenn die Messgenauigkeit der einzelnen Sensoren nicht geprüft wird.

Eine weitere Überprüfung Anfang 2005 von 3 Typen in der Fahrbahn eingebauter Sensoren für die Gefriertemperatur zeigte ebenfalls erhebliche Differenzen zwischen der Gefriertemperatur einer aufgetragenen Lösung auf einem Sensor und der vom Sensor gemessenen Gefriertemperatur. Die Lösungen wurden dabei von Hand aufgeschüttet.

Auffällig im Vergleich der verschiedenen Messungen ist, dass ein Sensor eines Typs bei einer Messung plausible Messergebnisse anzeigt, bei einer anderen Messung ein anderer Sensor gleichen Typs dagegen nicht. Diese Erkenntnis weist auf unterschiedliche Kalibrierungen bei den einzelnen Sensortypen durch die Hersteller oder einen möglichen Einfluss der Umfeldbedingungen hin. Die genauen Ursachen bedürfen weiterer Untersuchungen. Eine Überprüfung aller eingebauter Sensoren erscheint daher notwendig.

Wie weit richtig kalibrierte Sensoren einen repräsentativen Messwert für einen größeren Fahrbahnabschnitt anzeigen, bleibt weiterhin ungeklärt. Dafür sind wenigstens zwei nachweislich richtig kalibrierte Sensoren unmittelbar nebeneinander im gleichen Fahrbahnquerschnitt notwendig.

Zwei im Messfeld installierte Sensoren für die Gefriertemperatur gleichen Typs weisen ebenfalls erhebliche Differenzen auf. Diese sind aber in unterschiedlichen Querschnitten eines Fahrstreifens eingebaut. Einmal in der Mitte des Fahrstreifens und einmal in der rechten Rollspur des gleichen Fahrstreifens. Beide Sensoren sind ca. 1 m voneinander entfernt. Eine Überprüfung beider Sensoren fand nicht statt.

Eine weitere Untersuchung, bei der zwei Sensoren gleichen Typs im gleichen Fahrbahnquerschnitt eingebaut wurden, weist ebenfalls große Differenzen zwischen zeitgleichen Messergebnissen auf [17]. Diese Sensoren waren ebenfalls nicht überprüft.

## 7.4 Sonstige Einsätze der Prüfvorrichtung

Die Prüfvorrichtung kam neben dem genannten Test von Sensoren für die Gefriertemperaturen auch für die Prüfung von Sensoren für die Wasserfilmdicke zum Einsatz. Die Einsätze fanden im Auftrag von drei Straßenbauverwaltungen, zwei Forschungseinrichtungen und zwei Sensorherstellern sowohl auf der Fahrbahn als auch im Labor statt. Dabei hat sich die Vorrichtung bewährt. Die Ergeb-



Bild 16: Einsatz der Prüfvorrichtung auf der Fahrbahn

nisse wurden von allen Seiten akzeptiert. Sie werden aufgrund der abweichenden Thematik hier nicht weiter dargestellt. Alle Versuche fanden vor der umfangreichen Nutzung der Sprühvorrichtung mit Tausalzlösungen statt. Bild 16 zeigt die gesamte Vorrichtung beim Fahrbahneinsatz.

Ein weiterer Einsatz für die Prüfung von Sensoren für die Gefriertemperatur erfolgte bisher nicht.

## 8 Aufstellung eines Prüfverfahrens

Das im Kapitel 6 beschriebene und in seiner Anwendung erprobte Verfahren kann als geeignetes Verfahren zur Prüfung von Sensoren für die Gefriertemperatur angesehen werden.

Aus den vorliegenden Ergebnissen ist die nachfolgende Prüfvorschrift abgeleitet.

### 8.1 Anwendungsbereich und Kurzbeschreibung

Die Prüfvorschrift gilt für die Überprüfung von Sensoren für die Gefriertemperatur beim Einsatz im Straßenwesen. Bei dem Prüfverfahren wird ein Sensor mit einem Lösungsfilm beaufschlagt. Der Lösungsfilm wird bezüglich der Tausalzart, der Konzentration der Lösung und der Dicke definiert. Der Sensor muss die sich aus der Konzentration ergebende Gefriertemperatur entsprechend den Genauigkeitsvorgaben messen.

Das Verfahren kann sowohl für Eignungs- und Abnahmeprüfungen dieser Sensoren im Labor, die Abnahme nach der Installation als auch für die Überprüfung im laufenden Betrieb genutzt werden.

## 8.2 Einrichtungen, Geräte und Hilfsmittel

Einrichtungen und Hilfsmittel:

- Klimaraum mit einstellbarer Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte (Laborprüfung),
- maschinengeführte Vorrichtung (Spritzpistole, Sprühventil oder Ähnliches) zum Auftragen eines gleichmäßigen, definierten Taustofflösungsfilms,
- Wasserwaage,
- Stoppuhr,
- Becherglas,
- Papiertücher,
- Heizlüfter,
- wässrige Taustofflösungen mit verschiedenen Gefriertemperaturen. Der einzusetzende Taustoff und die verschiedenen Gefriertemperaturen in Abhängigkeit von der Konzentration der Lösung sind vom Auftraggeber vorzugeben.

Zusätzlich für die Justierung der Vorrichtung:

- Waage mit einer Auflösung 0,001 g, Messgenauigkeit  $\pm 0,003$  g,
- Plastikstäbe mit einer Querschnittabmessung 10 x 10 mm und einer angerauten Oberfläche, Anzahl und Länge (mindestens 300 mm) je nach zu prüfender Sensorgröße.

## 8.3 Versuchsdurchführung

### 8.3.1 Vorbereitung der Messungen (Kalibrierung im Labor)

Die Dicke und die Gleichmäßigkeit eines aufgetragenen Taustofflösungsfilms sind durch Auftragen auf Prüfstreifen (Plastikstäbe) zu ermitteln. Dazu sind die Massen der Stäbe vor und nach der Auftragung zu bestimmen. Aus den Massedifferenzen sind die Filmdicken der Taustofflösung auf jedem Stab zu berechnen.

Die Plastikstäbe sind zusammenliegend auszulegen. Die Oberfläche der zu besprühenden Plastikstäbe muss in der gleichen Ebene wie die des zu prüfenden Sensors liegen. Zusätzlich ist an den Längsseiten je ein weiterer Stab anzulegen, der das seitliche Besprühen der Prüfstreifen verhindert. Die Stäbe sind innerhalb einer Zeit kleiner 30

Sekunden mit der vorgesehenen Filmdicke zu beaufschlagen.

Die Spannweite der Filmdicken auf allen Stäben und der Mittelwert aller Einzelwerte dürfen nicht höher als  $\pm 25$  % vom vorgesehenen Wert abweichen. Die Gleichmäßigkeit der aufgetragenen Taustofflösungen auf den einzelnen Stäben ist visuell zu beurteilen.

Die Versuche sind nacheinander mit Taustofflösungen durchzuführen, deren Gefriertemperaturen den Vorgaben des Anwenders entsprechen.

### 8.3.2 Durchführung der Sensorprüfung

Der Sensor ist eben unterhalb der Spritzvorrichtung in die Ebene wie die Plastikstäbe bei Kalibrierung einzubringen. Gegen das Abfließen von höheren Taustofflösungsfilmen sind am Rand des Sensors entsprechende Abgrenzungen anzubringen. Beeinflussen im Labor diese Abgrenzungen die Messungen, ist der Sensor in eine straßenähnliche Fläche einzubauen. Die äußeren Ränder dieser Ebene sind dann entsprechend zu begrenzen.

Die Umfeldbedingungen müssen gewährleisten, dass nicht mehr als 5 % des Wassers der Taustofflösung innerhalb des Auftragszyklus verdunsten.

Auf den zu prüfenden Sensor ist in einem ersten Zyklus je Minute ein Taustofflösungsfilm von 0,01 mm aufzutragen, bis eine Dicke von 0,2 mm erreicht ist. In einem zweiten Zyklus ist je Minute ein Lösungsfilm von 0,05 mm bis zu einer Dicke von 0,5 mm aufzutragen.

Die Messwerte des zu prüfenden Sensors sind jede Minute auszugeben. Das Auftragen des Taustofflösungsfilms hat jeweils am Anfang einer Messperiode zu beginnen.

Die Auftragszyklen sind für alle Lösungen jeweils 3 x durchzuführen, zwischen den Zyklen ist die Taustofflösung vom Sensor vollständig zu entfernen und der Sensor zu trocknen.

## 8.4 Anzahl der Messungen und Ergebnisbewertungen

Ein Sensor muss ab einer aufgetragenen Lösungsfilmdicke von 0,02 mm die Gefriertemperatur in der geforderten Genauigkeit erkennen. Übersteigen ein oder mehrere Messwerte innerhalb eines Auftragszyklus die zulässigen Toleranzen, sind weite-

re Auftragszyklen durchzuführen. Treten in weniger als 15 % der Messreihen höhere Differenzen auf, können diese als Ausreißer vernachlässigt werden.

Übersteigen mehr als 15 % der Messergebnisse einer Messreihe die vorgegebenen Toleranzen (siehe Kapitel 4), sind die Sensoren neu zu kalibrieren oder zu justieren.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kenntnis der Gefriertemperatur einer Fahrbahnfeuchte ist ein entscheidender Parameter für die Vorhersage einer Eisglätte.

Bewertungen der Angaben von Glättemeldeanlagen zur Gefriertemperatur anhand visueller Beobachtungen der Fahrbahnzustände vor Ort oder Vergleiche von zeitgleich erfassten Messwerten am gleichen Ort zeigten eine hohe Zahl falscher Angaben bzw. erhebliche Differenzen bei der Gefriertemperatur. Aufgrund der Differenzen bestehen auch Zweifel, ob die bisherigen Sensoren mit ihren nahezu punktförmigen Messverfahren ein repräsentatives Messergebnis liefern können.

Falsche Angaben der Gefriertemperatur sind in den meisten Fällen der Hauptgrund für nicht plausible Glättewarnungen, die aus den Daten aller gemessenen Werte (Fahrbahnoberflächentemperatur, Fahrbahnzustand, Taupunkt u. a.) einer Glättemeldeanlage für einen Standort abgeleitet werden. Die Gefriertemperatur muss schon für sehr geringe Wasserfilme, ab etwa 0,01 bis 0,02 mm Dicke, ermittelt werden können. Die genaue Gefriertemperatur für diese geringen Filmdicken auf der Fahrbahn bzw. auf den Sensoren ließ sich bisher nicht ermitteln. Deshalb sollte ein Verfahren entwickelt werden, mit dem die Kalibrierung und damit auch die Prüfung von Sensoren für die Gefriertemperatur mit definierten dünnen Lösungsfilmen möglich sind.

Das in einem vorangegangenen Projekt für die Prüfung von Sensoren für die Wasserfilmdicke entwickelte Verfahren wurde für die Prüfung von Sensoren für die Gefriertemperatur weiterentwickelt. Dieses Verfahren lässt sowohl die Prüfung von Sensoren im Labor als auch auf der Fahrbahn zu. Die benötigte Vorrichtung besteht im Wesentlichen aus einem Gestell, mit dem ein Sprühventil in einer Ebene über eine Fläche von max. 50 x 50 cm in x-y-Richtung mittels einer elektronischen Steue-

rung beliebig verfahren werden kann. Die Kosten aller Komponenten für eine Vorrichtung zur Prüfung auf der Fahrbahn (Spritzvorrichtung mit Steuereinheit und Windschutz, Laptop, Waage, Elektroaggregat u. a.) betragen rund 25.000 €.

Die Vorrichtung wurde im Labor für das Aufbringen dünner Filme von Natriumchloridlösungen mit verschiedenen Konzentrationen eingestellt und anschließend auf der Fahrbahn an verschiedenen Sensortypen getestet. Im Ergebnis ließen sich Natriumchloridlösungen bis ca. 17-18 % Lösungskonzentration mit Lösungsdicken ab 0,01 mm hinreichend gleichmäßig aufbringen. Bei höheren Konzentrationen war ein gleichmäßiges Austragen eines definierten Lösungsfilms nicht möglich. Hierzu wäre eine Weiterentwicklung der Sprühvorrichtung notwendig.

Alle im Rahmen des Projektes durchgeführten Prüfungen von Sensoren für die Gefriertemperatur mit oder ohne die entwickelte Prüfvorrichtung sowie ausgewertete weitere Untersuchungen wiesen auf erhebliche Fehlmessungen der Sensoren hin. Daher sollten die verschiedenen Sensortypen grundsätzlich auf ihre Eignung umfassend geprüft werden. Aufgrund festgestellter unterschiedlicher Ergebnisse baugleicher Sensoren erscheinen auch die Prüfung jedes Sensors nach dem Einbau bei Abnahme und eine Kontrolle nach einem längeren Betrieb nötig.

Mit dem entwickelten Verfahren ist eine Kalibrier- und Prüfmöglichkeit für Gefriertempersensoren geschaffen worden, die von Firmen bei Einbau und Erprobung, von Prüfinstituten für Eignungsprüfungen und von den Straßenbauverwaltungen für die Abnahme und Kontrolle mit neuen bzw. vorhandenen Anlagen genutzt werden kann. Damit sollte künftig eine sicherere Bewertung von GMA-Angaben über die Gefriertemperatur als bisher möglich sein, die zu einem zielgerichteten Straßenwinterdienst führt.

## Literatur

- [1] Konzept eines Straßenzustands- und Wetterinformationssystems (SWIS), Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Oktober 1991
- [2] Betriebstechnische Anforderungen an Glättemeldeanlagen, Bundesanstalt für Straßenwesen, November 1996

- [3] Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, Ausgabe 2002, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
- [4] BACH, V.: Verbesserung der Straßenwetterprognose durch Einbeziehung der Messwerte von Glättefrühwarnsystemen, Abschlussbericht zum Forschungsauftrag FA 03.205R89H des Bundesministers für Verkehr, TH Darmstadt 1991
- [5] BADEL, H.: Praxisgerechte Anforderungen an Glättemeldeanlagen, Abschlussbericht zum BAST-Arbeitsprojekt 92715, Inzell 03/1996
- [6] BADEL, H., BREITENSTEIN, J.: Modell zur Glättesteuerung im Straßenwinterdienst, Abschlussbericht zum BAST-Arbeitsprojekt 99652, Bergisch Gladbach 06/2003
- [7] BADEL, H., BREITENSTEIN, J., SCHEURL, S., FLEISCH, J., HÄUSLER, G., WENDL, A.: Entwicklung von Prüf- und Kalibriermethoden für Fahrbahnfeuchtesensoren, Abschlussbericht zum BAST-Arbeitsprojekt 99653, Inzell 02/2002
- [8] BLASER, P., LINK, P., LÜDIN, P., RYF, W.: Einfluss der Ausbringung von Streusalz auf das benachbarte und entferntere Grundwasser, Forschungsbericht Nr. 386, Peter Link AG, Dr. Heinrich Jäckli AG, 1998
- [9] DIRNBÖCK, G.: Ermittlung des Streuzeitpunktes nach der Restsalzmenge, Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Heft 148, Wien 1980
- [10] FGSV: Technische Lieferbedingungen für Glättemeldeanlagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Entwurf 09/2003
- [11] FGSV: Hinweise und Empfehlungen für die Beschaffung von Streustoffen, Kommentar zur TL Streu, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2004
- [12] FGSV: Richtlinien zur Bewertung der Straßengriffbarkeit bei Nässe, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Entwurf 05/1999
- [13] GARTISER, St., REUTHER, R. GENSCHE, C.-O.: Machbarkeitsstudie zur Formulierung von Anforderungen für ein neues Umweltzeichen für Enteisungsmittel für Straßen und Wege, in Anlehnung an DIN EN ISO 14024, Umweltbundesamt, Texte 09/03, Berlin 02/2003
- [14] HANKE, H., LEVIN, C.: Wirksamkeit des Straßenwinterdienstes auf die Verkehrssicherheit und die Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufes, Abschlussbericht zum Forschungsauftrag FA 03.174G85H des Bundesministers für Verkehr, TH Darmstadt 1987
- [15] KUTTER, M., MORITZ, K., POHLE, G.: Untersuchung zur Wirkungsdauer von Tausalzen, Straßen- und Tiefbau 40, (1986) Nr. 11, S. 8-12
- [16] KUTTER, M., NIEBRÜGGE, L.: Erfahrungen mit Glätteismeldegeräten beim Landschaftsverband Westfalen-Lippe, Straße und Autobahn, Heft 12/1985, S. 498-503
- [17] KIENLEIN, E., STAUFER, M.: Versuchsstrecke BAB A 9 Talbrücke Lanzendorf: Schlussbericht Kurzfristteil 1998-2000, Universität der Bundeswehr München, 10/2001
- [18] LANG, J.: Zeitanteile nicht trockener Fahrbahnzustände zur Beurteilung des Einflusses der Witterung auf die Verkehrssicherheit, Straße + Autobahn, 6/1992, S. 481-488
- [19] RUESS, B.: Salz- oder Splittstreuung im Winterdienst, Forschungsauftrag 4/95 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute (VSS), 01/1998
- [20] SCHARSCHING, H.: Schlussbericht Glättefrühwarnsysteme, Test 1990/91, Mödling 12/1991
- [21] SCHARSCHING, H.: Optoelektronisches Verfahren zur Feststellung der quantitativen Verteilung von Taumitteln auf der Fahrbahn, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung, Heft 434, Wien 1995

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2001

#### V 79: Bedarf für Fahrradabstellplätze bei unterschiedlichen Grundstücksnutzungen

Alrutz, Böhle, Borstelmann, Krawczyk, Mader, Müller, Vohl € 15,50

#### V 80: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 1998

Lensing € 13,50

#### V 81: Emissionen beim Erhitzen von Fahrbahnmarkierungsmaterialien

Michalski, Spyra € 11,50

#### V 82: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 1999 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen

Laffont, Nierhoff, Schmidt € 19,50

#### V 83: Verkehrssicherheit in Einbahnstraßen mit gegengerichtetem Radverkehr

Alrutz, Gündel, Stellmacher-Hein, Lerner, Mättig, Meyhöfer, Angenendt, Draeger, Falkenberg, Klöckner, Abu-Salah, Blase, Rühle, Wilken € 17,00

#### V 84: Vereinfachtes Hochrechnungsverfahren für Außerorts-Straßenverkehrszählungen

Lensing, Mavridis, Täubner € 16,00

#### V 85: Erstellung einer einheitlichen Logik für die Zielführung (Wegweisung) in Städten

Siegener, Träger € 14,50

#### V 86: Neue Gütekriterien für die Beleuchtung von Straßen mit gemischtem Verkehr und hohem Fußgängeranteil

Carraro, Eckert, Jordanova, Kschischenk € 13,00

#### V 87: Verkehrssicherheit von Steigungsstrecken – Kriterien für Zusatzfahrstreifen

Brilon, Breßler € 18,50

## 2002

#### V 88: Tägliches Fernpendeln und sekundär induzierter Verkehr

Vogt, Lenz, Kalter, Dobeschinsky, Breuer € 17,50

#### V 89: Verkehrsqualität auf Busspuren bei Mitnutzung durch andere Verkehre

Baier, Kathmann, Schuckließ, Trapp, Baier, Schäfer € 13,50

#### V 90: Anprallversuche mit Motorrädern an passiven Schutzeinrichtungen

Bürkle, Berg € 16,50

#### V 91: Auswirkungen der Umnutzung von BAB-Standstreifen

Mattheis € 15,50

#### V 92: Nahverkehrsbevorrechtigung an Lichtsignalanlagen unter besonderer Berücksichtigung des nichtmotorisierten Verkehrs

Friedrich, Fischer € 14,00

#### V 93: Nothaltemöglichkeiten an stark belasteten Bundesfernstraßen

Brilon, Bäumer € 17,00

#### V 94: Freigabe von Seitenstreifen an Bundesautobahnen

Lemke, Moritz € 17,00

#### V 95: Führung des ÖPNV in kleinen Kreisverkehren

Topp, Lagemann, Derstroff, Klink, Lentze, Lübke, Ohlschmid, Pires-Pinto, Thömmes € 14,00

#### V 96: Mittellage-Haltestellen mit Fahrbahnanhebung

Angenendt, Bräuer, Klöckner, Cossé, Roeterink, Sprung, Wilken € 16,00

#### V 97: Linksparken in städtischen Straßen

Topp, Riel, Albert, Bugiel, Elgun, Roßmark, Stahl € 13,50

#### V 98: Sicherheitsaudit für Straßen (SAS) in Deutschland

Baier, Bark, Brühning, Krumm, Meewes, Nikolaus, Räder-Großmann, Rohloff, Schweinhuber € 15,00

#### V 99: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2000 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen

Laffont, Nierhoff, Schmidt € 21,00

## 2003

#### V 100: Verkehrsqualität unterschiedlicher Verkehrsteilnehmerarten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage

Brilon, Miltner € 17,00

#### V 101: Straßenverkehrszählung 2000 – Ergebnisse

Lensing € 13,50

#### V 102: Vernetzung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen

Kniß € 12,50

#### V 103: Bemessung von Radverkehrsanlagen unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten

Falkenberg, Blase, Bonfranchi, Cossé, Draeger, Kautzsch, Stapf, Zimmermann € 11,00

#### V 104: Standortentwicklung an Verkehrsknotenpunkten – Randbedingungen und Wirkungen

Beckmann, Wulfhorst, Eckers, Klönne, Wehmeier, Baier, Peter, Warnecke € 17,00

#### V 105: Sicherheitsaudits für Straßen international

Brühning, Löhe € 12,00

#### V 106: Eignung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen gemäß den Anforderungen nach DIN EN 1317

Ellmers, Balzer-Hebborn, Fleisch, Friedrich, Keppler, Lukas, Schulte, Seliger € 15,50

#### V 107: Auswirkungen von Standstreifenumnutzungen auf den Straßenbetriebsdienst

Moritz, Wirtz € 12,50

#### V 108: Verkehrsqualität auf Streckenabschnitten von Hauptverkehrsstraßen

Baier, Kathmann, Baier, Schäfer € 14,00

#### V 109: Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf auf b2+1-Strecken mit allgemeinem Verkehr

Weber, Löhe € 13,00

## 2004

#### V 110: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2001 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen

Laffont, Nierhoff, Schmidt, Kathmann € 22,00

#### V 112: Einsatzkriterien für Betonschutzwände

Steinauer, Kathmann, Mayer, Becher vergriffen

#### V 113: Car-Sharing in kleinen und mittleren Gemeinden

Schweig, Keuchel, Kleine-Wiskott, Hermes, van Hacken € 15,00

#### V 114: Bestandsaufnahme und Möglichkeiten der Weiterentwicklung von Car-Sharing

Loose, Mohr, Nobis, Holm, Bake € 20,00

#### V 115: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2002 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen

Kathmann, Laffont, Nierhoff € 24,50



- V 116: Standardisierung der Schnittstellen von Lichtsignalanlagen – Zentralrechner/Knotenpunktgerät und Zentralrechner/Ingenieurarbeitsplatz  
Kroen, Klod, Sorgenfrei € 15,00
- V 117: Standorte für Grünbrücken – Ermittlung konfliktreicher Streckenabschnitte gegenüber großräumigen Wanderungen jagdbarer Säugetiere  
Surkus, Tegethof € 13,50
- V 118: Einsatz neuer Methoden zur Sicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer  
Steinauer, Maier, Kemper, Baur, Meyer € 14,50

## 2005

- V 111: Autobahnverzeichnis 2004  
Kühnen € 21,50
- V 119: Alternative Methoden zur Überwachung der Parkdauer sowie zur Zahlung der Parkgebühren  
Boltze, Schäfer, Wohlfarth € 17,00
- V 120: Fahrleistungserhebung 2002 – Inländerfahrleistung  
Hautzinger, Stock, Mayer, Schmidt, Heidemann € 17,50
- V 121: Fahrleistungserhebung 2002 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko  
Hautzinger, Stock, Schmidt € 12,50
- V 122: Untersuchungen zu Fremdstoffbelastungen im Straßenseitenraum  
Beer, Herpetz, Moritz, Peters, Saltzmann-Koschke, Tegethof, Wirtz € 18,50
- V 123: Straßenverkehrszählung 2000: Methodik  
Lensing € 15,50
- V 124: Verbesserung der Radverkehrsführung an Knoten  
Angenendt, Blase, Klöckner, Bonfranchi-Simović, Bozkurt, Buchmann, Roeterink € 15,50
- V 125: PM<sub>10</sub>-Emissionen an Außererststraßen – mit Zusatzuntersuchung zum Vergleich der PM<sub>10</sub>-Konzentrationen aus Messungen an der A1 Hamburg und Ausbreitungsberechnungen  
Düring, Bössinger, Lohmeyer € 17,00
- V 126: Anwendung von Sicherheitsaudits an Stadtstraßen  
Baier, Heidemann, Klemps, Schäfer, Schuckließ € 16,50
- V 127: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2003  
Fitschen, Koßmann € 24,50
- V 128: Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen – Sicherheitsüberprüfung vorhandener Lichtsignalanlagen und Anpassung der Steuerung an die heutige Verkehrssituation  
Boltze, Reusswig € 17,00
- V 129: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst  
Badelt, Breitenstein € 13,50
- V 130: Fortschreibung der Emissionsdatenmatrix des MLuS 02  
Steven € 12,00
- V 131: Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken  
Friedrich, Dammann, Irzik € 14,50
- V 132: Vernetzung dynamischer Verkehrsbeeinflussungssysteme  
Boltze, Breser € 15,50
- V 133: Optimierung des Winterdienstes auf hoch belasteten Autobahnen  
Cypra, Roos, Zimmermann € 17,00
- V 136: Erhebung der individuellen Routenwahl zur Weiterentwicklung von Umlegungsmodellen  
Wermuth, Sommer, Wulff € 15,00
- V 137: PM<sub>x</sub>-Belastungen an BAB  
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 138: Kontinuierliche Stickoxid (NO<sub>x</sub>)- und Ozon (O<sub>3</sub>)-Messwertaufnahme an zwei BAB mit unterschiedlichen Verkehrsparametern 2004  
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,50
- V 139: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen  
Wirtz, Moritz, Thesenvitz € 14,00
- V 140: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2004 – Jahresauswertung der automatischen Dauerezählstellen  
Fitschen, Koßmann € 15,50
- V 141: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2003  
Lensing € 15,00
- V 142: Sicherheitsbewertung von Maßnahmen zur Trennung des Gegenverkehrs in Arbeitsstellen  
Fischer, Brannolte € 17,50
- V 143: Planung und Organisation von Arbeitsstellen kürzerer Dauer an Bundesautobahnen  
Roos, Hess, Norkauer, Zimmermann, Zackor, Otto € 17,50
- V 144: Umsetzung der Neuerungen der StVO in die straßenverkehrsrechtliche und straßenbauliche Praxis  
Baier, Peter-Dosch, Schäfer, Schiffer € 17,50
- V 145: Aktuelle Praxis der Parkraumbewirtschaftung in Deutschland  
Baier, Klemps, Peter-Dosch € 15,50
- V 146: Prüfung von Sensoren für Glätteldealanlagen  
Badelt, Breitenstein, Fleisch, Häusler, Scheurl, Wendl € 18,50

## 2006

- V 133: Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offener Straßenbeläge  
Hübelt, Schmid € 17,50
- V 134: Qualifizierung von Auditoren für das Sicherheitsaudit für Innerortsstraßen  
Gerlach, Kesting, Lippert € 15,50

---

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10  
D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.