

Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 260

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, partially overlapping a vertical white line that runs down the right edge of the cover.

Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst

von

Günter Hausmann

KOMMZEPT
Ingenieurbüro Hausmann

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 260

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, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt: FE 04.0237/2010/KRB
Optimierung der Streustoffausbringung
Modell der objektiv notwendigen Streudichten im Straßenwinterdienst

Fachbetreuung:
Horst Badelt

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-187-4
Bergisch Gladbach, Juli 2015

Kurzfassung – Abstract

Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst

Die Festlegung der Salzdosierung (Streudichte) wird in der aktuellen Winterdienstpraxis zumeist vom Einsatzpersonal auf den Fahrzeugen vorgenommen. Aus der Auswertung von automatisierten Datenaufzeichnungen ist bekannt, dass dabei persönliche Erfahrungen eine wesentliche Rolle spielen. Das drückt sich darin aus, dass beim Vergleich des Dosierverhaltens von mehreren Mitarbeitern unter vergleichbaren Randbedingungen der durchschnittlich eingestellte Dosierwert bis zu 100 % abweicht. Das von der Bundesanstalt für Straßenwesen (Bergisch Gladbach, Deutschland) in Auftrag gegebene Pilotprojekt „Optimierung der Streustoffausbringung – Modell zur Festlegung der objektiv notwendigen Streudichten im Straßenwinterdienst“ hatte die Minimierung von „subjektiven Faktoren“ bei der Taustoffanwendung zum Ziel.

Aufbauend auf dem Phasendiagramm für die Mischung von NaCl und H₂O wurde ein Berechnungsalgorithmus entwickelt, der Temperatur und Wasserfilmdicke auf der Fahrbahn in wählbaren Prognosezeiträumen berücksichtigt. Die stündlich aktualisierten Prognosedaten werden während der Einsatzfahrt des Winterdienstfahrzeuges übermittelt und haben direkten Einfluss auf die Streudichte. Neben den Prognosedaten haben auch technologische und streckenbezogenen Randbedingungen direkten Einfluss auf die berechnete Streudichte. Technologische Randbedingungen sind die Streutechnologie (wahlweise FS 30 oder FS 100) und der Prognosezeitraum.

Zu diesem Zweck wurden vier Fahrzeuge von Autobahnmeistereien in Brandenburg und Nordrhein-Westfalen mit Bordcomputern ausgestattet, mit denen Daten kurzfristiger Wetterprognosen des Deutschen Wetterdienstes (Zeithorizont 3 Stunden), Messungen der Fahrbahntemperatur und Daten der an der Strecke befindlichen Straßenwetterstationen verarbeitet werden. Die Bordcomputer sind über das GSM-Netz mit einem zentralen Server verbunden. Dadurch werden die Daten der Wetterprognosen laufend aktualisiert.

Der Einsatz der prognostischen Streudichteberechnung hat gezeigt, dass durch diese Technik erheb-

liche Einsparungspotenziale bei der Taustoffanwendung erschlossen werden können. Das gilt vor allem für präventive Streueinsätze.

Calculation of the optimal spreading density in winter road clearance services

For current winter road maintenance, the determining of the salt dosing (spreading density) is mostly carried out by field personnel on the vehicles. From the evaluation of automated data logging, it is known that personal experience plays a key role in this process. This can be seen from the fact that comparisons of dosing by several employees reveal differences from the average set dosing of up to 100% under comparable boundary conditions. The pilot project „Optimisation of the degree of spreading material – Model to determine the spreading density objectively required in winter road clearance“ commissioned by the Bundesanstalt für Straßenwesen (Federal Highway Research Institute), based in Bergisch Gladbach, Germany, set out to minimise the „subjective factors“ involved in the application of ice-melting materials.

For this purpose, four motorway maintenance vehicles in Brandenburg and North Rhine-Westphalia were equipped with on-board computers to process short-term weather forecast data (3 hour time horizon), road surface temperature readings and data from the road weather stations located along the route. The on-board computers are linked up with a central server via the GSM-network, enabling continual updating of the weather forecast data.

The algorithm software in the on-board computers calculates the optimal amount of spreading material based on liquid quantities forecast on the road surface and the road surface temperatures expected. In addition, the algorithm provides the option of determining increases and reductions for specific sections of the route. In this manner, the experience gained in previous winter service periods is also integrated into the calculation of the optimal spreading density. This can be beneficial on, say, bridges. Thanks to the GPS signal control,

the optimal density setting ensues for the restricted section of the bridge crossing in good time without delay.

The use of prognostic calculation of the spreading density has revealed a considerable potential for savings in the application of ice-melting material by means of this technology. This is particularly true in the case of preventative spreading operations.

Inhalt

Abkürzungen	6	6.1.2 Straßenwetterstationen im Einsatzgebiet	26
1 Einleitung	7	6.1.3 Empfangs- und Sendequalität im Bereich der Einsatzstrecken der AM Erkner	26
2 Stand der Wissenschaft und Technik	7	6.2 Autobahnmeisterei Werl	28
3 Theoretische Grundlagen der Wirkung von Tausalzen	8	6.2.1 Straßenwetterstationen im Einsatzgebiet	28
3.1 Phasendiagramm Wasser-Salz	8	6.2.2 Empfangs- und Sendequalität der Datenübertragung im Bereich A 445/A 46	30
3.2 Einflussfaktoren auf die Glättebildung	8	7 Ergebnisse der Feldversuche im Winter 2011/12	31
4 Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus für die optimale Streudichte	10	7.1 Versuchsumfang	31
4.1 Allgemeiner Ansatz	10	7.2 Fahrbahntemperaturen	32
4.2 Mathematische Beschreibung der Phasengrenzlinie	10	7.2.1 Messung der Fahrbahntemperaturen vom fahrenden Fahrzeug	32
4.3 Prognose der Fahrbahntemperatur	14	7.2.2 Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur durch stationäre Sonden	33
4.4 Prognose der Wasserfilmdicke	15	7.3 Vergleich zwischen praktisch angewandten und berechneten Streudichten	33
4.5 Kalkulation der Restsalzmengen und der Liegezeitverluste	17	8 Schlussfolgerungen aus den Versuchsfahrten 2011/12	34
4.6 Berechnungsalgorithmus	18	9 Vorbereitung der Winterdienstsaison 2012/13	35
5 Umsetzung des Pilotprojektes zur optimierten Streudichte	20	9.1 Ausrüstung der Einsatzfahrzeuge	35
5.1 Umsetzungskonzept	20	9.2 Erweiterung der Funktionen der Streudichteoptimierung	35
5.2 Funktionsweise des Systems zur Optimierung der Streudichte	21	10 Ergebnisse der Feldversuche im Winter 2012/13	35
5.2.1 Übersicht	21	10.1 Versuchsumfang	35
5.2.2 Fahrzeugrechner	22	10.2 Auswertungssystematik	36
5.2.3 Zentralserver	24	10.3 Auswertung ausgewählter Touren	38
5.2.4 Streubereichseditor	25		
6 Versuchsstrecken	26		
6.1 Autobahnmeisterei Erkner	26		
6.1.1 Charakteristik der Einsatzstrecken	26		

10.3.1	Autobahnmeisterei Werl	38
10.3.2	Autobahnmeisterei Erkner	46
11	Qualität der Eingangsdaten	52
11.1	Einfluss der gemessenen Fahrbahntemperaturen	52
11.2	Temperaturprognose aus der Punktwettervorhersage	53
11.3	Straßenzustandsprognose aus der Punktwettervorhersage	54
12	Zusammenfassung und Ausblick	55
13	Literatur	56

Indizes

0	Wert zum Zeitpunkt 0 (aktueller Zeitpunkt)
A	Streckenattribute
B	berechnet
F	Fahrbahn
G	Gefrier
K	kalkuliert
L	Liegezeitverlust
max	Maximal (höchster Wert)
min	Minimal (niedrigster Wert)
Opt	Optimal
P	prognostisch
R	Rest
S	Streckenattribute
verl	Verlustmenge innerhalb eines definierten Zeitraumes
vorh	zum Zeitpunkt der Messung/Berechnung vorhandener Wert
X	Prognosezeitpunkt X h (X = 0 bis 3)

Abkürzungen

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
D		Differenz zwischen dem aktuellen Dampfdruck der Luft in 2 m Höhe und dem Sättigungsdampfdruck auf der Straßenoberfläche
F		Faktor (Ausgleichsfaktor, Bewertungsfaktor)
f		Funktion
GT	°C	Gefriertemperatur
KO	%	Salzlösungskonzentration
PZ	h	Prognosezeitraum
R ²		Bestimmtheitsmaß
SD	g/m ²	Streudichte
SD A	g/m ²	Streudichte Berechnungsstufe A
SD B	g/m ²	Streudichte Berechnungsstufe B
SD C	g/m ²	Streudichte Berechnungsstufe C
SM	g/m ²	Streustoffmenge
SR	kg/m ² /s	Resublimationsrate ist die Zuwachsgeschwindigkeit von gefrorenem Wasser oder Raureif, Resublimation ist die Phasenumwandlung vom gasförmigen in festen Aggregatzustand
ST		Steigung der linearen Trendlinie
SZ		Straßenzustandsprognose nach DWD-Schema = WR
T	°C	Temperatur
TA	K	Lufttemperatur in 2 m Höhe
TD	K	Taupunkttemperatur der Luft
TS	K	Temperatur der Straßenoberfläche
WFD	mm	Wasserfilmdicke
WS	m/s	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe

1 Einleitung

Die Festlegung der Streudichte wird in der aktuellen Winterdienstpraxis zumeist vom Einsatzpersonal auf den Fahrzeugen vorgenommen. Aus der Auswertung von automatisierten Datenaufzeichnungen ist bekannt, dass dabei persönliche Erfahrungen eine wesentliche Rolle spielen. Das drückt sich darin aus, dass beim Vergleich des Dosierverhaltens von mehreren Mitarbeitern unter vergleichbaren Randbedingungen der durchschnittlich eingestellte Dosierwert bis zu 100 % abweicht. Zumeist wird während der Streutouren keine Anpassung der Streudichte an veränderte Rahmenbedingungen vorgenommen. Das ist dadurch begründet, dass nicht alle relevanten Daten auf dem Fahrzeug zur Verfügung stehen. Außerdem ist der Einfluss unterschiedlicher Faktoren so komplex, dass eine Entscheidungsfindung ohne automatisierte Verarbeitung der verfügbaren Daten nicht denkbar ist.

Das Ziel der Forschungsarbeit bestand darin, einen Algorithmus zu entwickeln, der alle für die Berechnung der objektiv notwendigen Streudichte relevanten Daten berücksichtigt. Auf Basis der während der Einsätze ständig aktualisierten und mit einem Bordrechner ausgewerteten Daten wurden auf vier Fahrzeugen der Autobahnmeistereien Erkner in Brandenburg und Werl in Nordrhein-Westfalen Pilotversuche durchgeführt und ausgewertet. Mit diesen Versuchen wurden umfangreiche Erfahrungen gesammelt, die als Grundlage für die weitere Entwicklung von Systemen zur Bestimmung der optimalen Streudichte dienen können. Durch die zu erwartende Entwicklung mobiler Sensoren für die Bestimmung von Restsalzmengen und Flüssigkeitsfilmdicken auf der Fahrbahn, deren Messdaten in die Berechnung der optimalen Streudichte einbezogen werden können, besteht die Möglichkeit einer weitgehend automatisierten Wahl der Streudichte. Damit werden subjektive Faktoren bei der Wahl der Streudichte verringert.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Einzelne technische Systeme, die auch in Deutschland angewandt werden, geben Hilfestellung bei der Festlegung der optimalen Streudichte. Dazu gehören folgende technische Lösungen:

- Anzeige der Fahrbahntemperatur im Fahrerhaus (Messung durch Infrarot-Pyrometer),

- automatisierte Steuerung der Streudichte in Abhängigkeit von Fahrbahntemperatur in Verbindung mit der manuellen Auswahl der Wasserfilm- bzw. Glätteschichtdicke.

Aus den USA sind Versuche bekannt, mithilfe einer Vielzahl von Sensoren, die am Winterdienstfahrzeug angebracht sind, objektive Informationen für die Festlegung der Streudichte zu gewinnen (Bild 1). Gemessen werden unter anderem die Restsalzmenge und der Reibwert auf der Fahrbahn. Welche Qualität die mit diesen Sensoren gemessenen Daten haben, ist nicht bekannt [15].

Mit einem ähnlichen Ziel werden in Dänemark Versuche mit GPS gestützter Salzstreuung und straßenabschnittbezogener Dosiervorgabe durchgeführt [7].

Vom schwedischen Straßenforschungsinstitut wurde der Einfluss von Winterdienstaktivitäten, Wetterbedingungen und Verkehrsbelastung auf die winterlichen Straßenbedingungen untersucht. Ziel war unter anderem, den Straßenzustand für eine Stunde im Voraus zu bestimmen [16].

In der Arbeit von EVANS [2] sind Übersichten über die empfohlene Temperaturbegrenzung bei präventiver Streuung mit maximaler Streudichte von 10 g/m² für verschiedene Länder zusammengestellt.

Darüber hinaus sind auch die empfohlenen Streudichten für Feuchtsalz zusammengestellt, die bei Temperaturen zwischen -5 und -10 °C angewandt werden sollen. Im Rahmen eines Forschungsthemas der BAST wurde ein Glättemodell entwickelt mit dem die Zusammenhänge zwischen Messwerten von Straßenwetterstationen und Glättewarungen hergestellt werden [1].

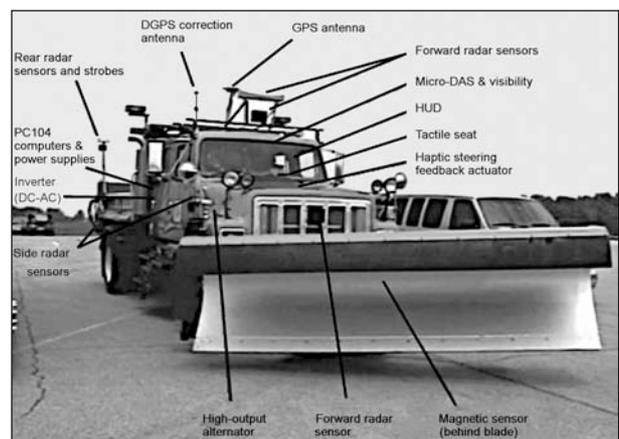


Bild 1: „Konzept-Fahrzeug“ mit spezieller Sensorik für den Winterdienst [10]

Land	Straßenzustand	Oberflächentemperatur/°C
Großbritannien	nass, feucht und trocken	≥ -2 (Trockensalz)
Dänemark	feucht, trocken, erheblicher Verkehr	< -3
Frankreich	nass, feucht und trocken	≥ -3
Norwegen	trocken, feucht	≥ -10
Schweden	trocken, nass	≥ -10
Schweiz	keine Angabe	≥ -8

Tab. 1: Temperaturgrenze für den präventiven Salzeinsatz von 10 g/m² nach [2]

Land	Streudichte/g/m ²
Großbritannien	2 x 20
Frankreich	15,5
Deutschland	10-30
Island	11,6-15,4
Niederlande	7-14
Norwegen	18,9
Schweden	7,4
Schweiz	5,4-15,4

Tab. 2: Empfohlene Streudichte bei Temperaturen zwischen -5 und -10 °C nach [2]

Möglichkeiten der Optimierung der Verkehrssicherheit im Winterdienst durch den Einsatz moderner Kommunikationstechnologie wurden von RUESS [14] im Auftrag des Schweizerischen Verbandes der Straßen- und Verkehrsfachleute (VSS) untersucht. Im Ergebnis der Untersuchungen wird für eine stärkere Nutzung „moderner, anforderungsgerechter Informations- und Kommunikationstechnologien im Winterdienst“ plädiert. Innerhalb des Forschungsauftrages wurde auch untersucht, wie die von festen Messstationen mit Bodensonden und von Fahrzeugen mit Infrarot-Pyrometern gemessenen Fahrbahntemperaturen miteinander korrelieren.

In einer eigenen Forschungsarbeit wurde eine Berechnungsformel aufgestellt, mit der die Verdünnung der Salzlösung auf der Fahrbahn bei Niederschlag und gleichzeitigem Abfließen von Flüssigkeit berechnet werden kann [4].

3 Theoretische Grundlagen der Wirkung von Tausalzen

3.1 Phasendiagramm Wasser-Salz

In trockener Form wird in Deutschland fast ausschließlich NaCl (Stein- oder Siedesalz) eingesetzt. Die Qualitätsanforderungen für Taustoffe sind in der TL-Streu geregelt. Die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen der Tausalze leiten sich aus den Phasendiagrammen ab. Aus diesen Diagrammen ist abzulesen, welche Konsistenz Salzlösungen in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur annehmen. Für jedes Salz gibt es spezifische Phasendiagramme. In Bild 2 ist das Phasendiagramm von NaCl für Temperaturen unter 0 °C dargestellt.

Für die Glätteverhinderung bzw. Glättebekämpfung auf Verkehrsflächen muss so viel Taustoffe ausgebracht werden, dass kein Eis oder fest gefahrene Schneedecken mit Glätteschicht auf der Fahrbahn entstehen können. Das ist mit Sicherheit der Fall, wenn sich Salzlösung ohne Eiskristalle auf der Fahrbahn befindet. Auch die Phase Salzlösung mit Eiskristallen führt nicht automatisch zu gefährlicher Glätte. Hier ist es von Bedeutung, welches Masseverhältnis zwischen Salzlösung und Eiskristallen besteht. Bekannt ist auch der Effekt, dass eine Salzmenge, die nicht ausreicht den Schnee auf der Fahrbahn zu tauen, zumindest die Verdichtung des Schnees und damit die Eisbildung an der Oberfläche verhindert. Man spricht in diesem Zusammenhang von „Schneemulm“. Auch dieser Effekt ist in der Phase „Salzlösung + Eiskristalle“ angesiedelt.

3.2 Einflussfaktoren auf die Glättebildung

Glättebildung auf Verkehrsflächen ist bei Anwendung von Tausalzen von drei Primärfaktoren abhängig:

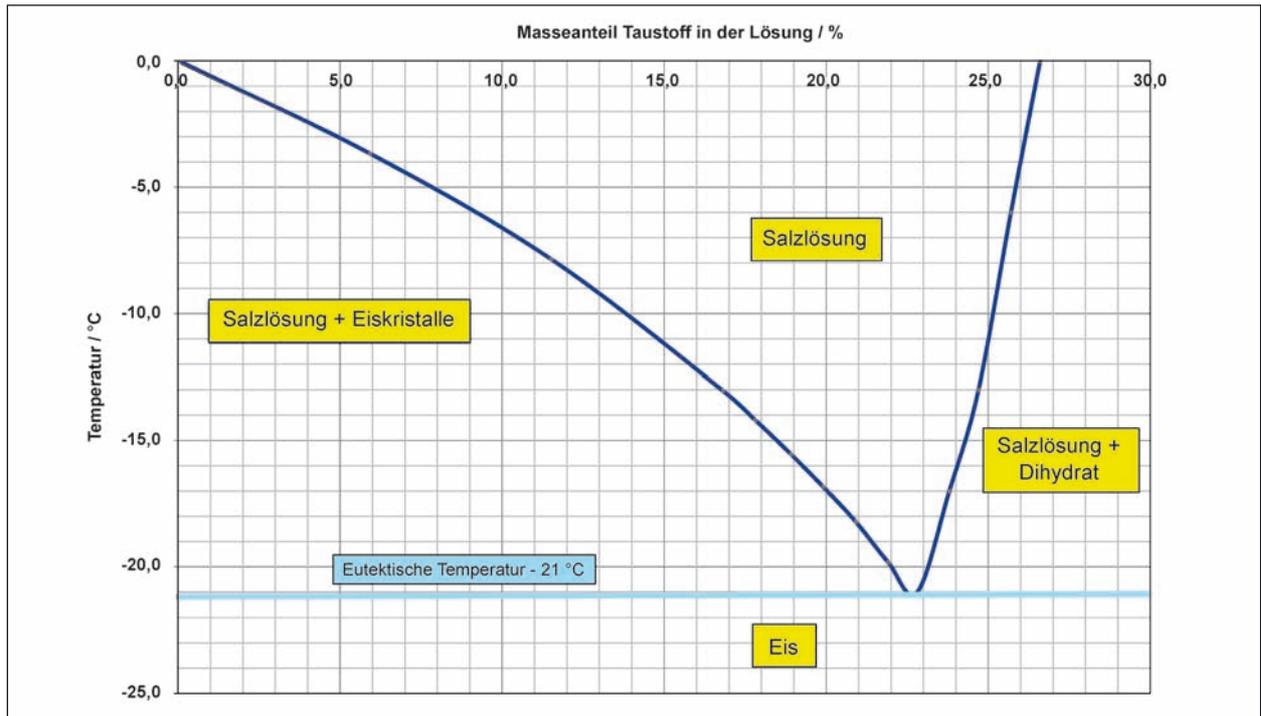


Bild 2: Phasendiagramm H₂O – NaCl

Fahrbahnoberflächentemperatur	Konzentration des gelösten Taustoffes an der Fahrbahnoberfläche	Taustoffart
<ul style="list-style-type: none"> • Lufttemperatur • Untergrundtemperatur • Strahlung • Bewölkung • Wind • Verkehrsmenge • Fahrbahnbelag • Taustoffart • Taustoffmenge • Wasserfilmdicke 	<ul style="list-style-type: none"> • Salzmenge <ul style="list-style-type: none"> • Streudichte • Qualität der Taustoffausbringung • Technologie der Taustoffausbringung • Taustoffqualität • Restsalz <ul style="list-style-type: none"> • Qualität der Taustoffausbringung • Technologie der Taustoffausbringung • Taustoffqualität • Fahrbahnbelag • Verkehrsmenge • Wasserfilmdicke <ul style="list-style-type: none"> • Niederschlag • Wasserabfluss • Abtrocknung <ul style="list-style-type: none"> • Fahrbahntemperatur • Lufttemperatur • Relative Luftfeuchte • Taustoffart • Kondensation <ul style="list-style-type: none"> • Fahrbahntemperatur • Lufttemperatur • Relative Luftfeuchte • Fahrbahnbelag • Fahrbahnoberfläche <ul style="list-style-type: none"> • Struktur • Geometrie • Verkehrseinfluss <ul style="list-style-type: none"> • Menge • Geschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • NaCl • CaCl₂ • MgCl₂

Bild 3: Einflussfaktoren auf die Glättesituation auf taustoffbehandelten Fahrbahnoberflächen

1. Fahrbahnoberflächentemperatur (genaue Temperatur in der Salzlösung auf der Fahrbahn),
2. Konzentration der Salzlösung auf der Fahrbahn,
3. Art des Tausalzes.

Diese Primärfaktoren sind von weiteren Einflüssen (Sekundärfaktoren) abhängig. Das sind im wesentlichen meteorologische, fahrbahnspezifische, verkehrsabhängige und technologische Faktoren. In Bild 3 sind die Primärfaktoren in Verbindung mit den Sekundärfaktoren aufgeführt. Die Primärfaktoren Fahrbahntemperatur und Taustoffkonzentration werden teilweise von den gleichen Sekundärfaktoren beeinflusst. Beispielsweise hat die Art des Fahrbahnbelages Einfluss auf die Fahrbahntemperatur und auf die Taustoffkonzentration (z. B. offenporiger Asphalt). Aus der Vielzahl der Einflussfaktoren entsteht für die Prognose von Glättezuständen bzw. für die optimale Festlegung von Streudichten eine relativ komplexe Ausgangssituation.

4 Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus für die optimale Streudichte

4.1 Allgemeiner Ansatz

Unter optimaler Streudichte (SD_{Opt}) wird die Mindestmenge an Taustoff verstanden, die pro Quadratmeter ausgebracht werden muss, um Glätte auf Verkehrsflächen kurzfristig zu beseitigen oder innerhalb eines technologisch erforderlichen bzw. sinnvollen Zeitraumes (Planzeitraum) zu verhindern.

Unter dem technologisch erforderlichen Zeitraum ist die Zeitspanne zu verstehen, innerhalb derer eine Wiederholungsstreuung ausgeführt werden könnte oder sollte. Das kann von den Umlaufzeiten, der Schichtplanung und dem Wetterverlauf abhängig sein.

Die nachfolgenden Betrachtungen werden für den Einsatzfall „Präventive Streuung“ durchgeführt. Das heißt, die optimale Streudichte wird für einen Glättefall errechnet, der für maximal 8 Stunden nach dem Streuzeitpunkt prognostiziert wurde. Bei den Berechnungen in nachfolgenden Beispielen werden die Daten für NaCl verwendet. Der Berechnungsalgorithmus gilt gleichfalls für andere Tausalze.

Nach der Abhängigkeit von den Primärfaktoren lässt sich für einen bestimmten Taustoff allgemeiner folgender Zusammenhang formulieren:

$$SD_{Opt} = f(T_{Fmin}, WFD_{max}, SM_R, SM_{verl}) \quad (1)$$

Darin bedeuten:

T_{Fmin} in °C Niedrigste Fahrbahnoberflächentemperatur, die innerhalb des technologisch erforderlichen Zeitraumes zu erwarten ist.

WFD_{max} in mm In Wasserfilmdicke umgerechnete Flüssigkeitsmenge, die innerhalb des technologisch erforderlichen Zeitraumes maximal auf der Fahrbahnoberfläche vorhanden ist.

SM_R in g/m² Vorhandene Streustoffmenge aus zurückliegenden Streuungen, die sich zum Zeitpunkt der aktuellen Streuung auf der Fahrbahn befindet.

SM_{verl} in g/m² Streustoffmenge auf der Fahrbahn, mit deren Verlust innerhalb des Planzeitraumes gerechnet werden muss.

Für kurative Einsätze gelten grundsätzlich die gleichen Zusammenhänge. Für die Fahrbahnoberflächentemperatur und die Wasserfilmdicke sind dann die aktuellen Werte relevant. Mit einem Streustoffverlust muss nicht kalkuliert werden. Der Algorithmus für diesen Fall könnte einfacher gestaltet sein. In diesem Zusammenhang ist anzunehmen, dass über die Temperaturmessung hinaus, der visuelle Eindruck des Bedienpersonals im Vergleich zu Niederschlagsmessungen die bessere Information darstellt.

4.2 Mathematische Beschreibung der Phasengrenzlinie

Die Phasengrenzlinie zwischen den Phasen „Salzlösung + Eiskristalle“ und „Salzlösung“ kann durch eine polynomische Gleichung beschrieben werden.

Für $y = T_G$ und $x = KO$ ergibt sich:

$$T_G = -0,0006 KO^3 - 0,0007 KO^2 - 0,5941 KO \quad (2)$$

(T_G -Gefriertemperatur/°C, KO-Salzlösungskonzentration/%)

Für den Fall $T_F = T_G$ beschreibt die Gleichung den Grenzbereich zwischen nasser und vereister Fahrbahn (Bild 4).

In der Salzlösungskonzentration (KO) sind Streustoffmenge und Wassermenge (Wasserfilmdicke – WFD) enthalten.

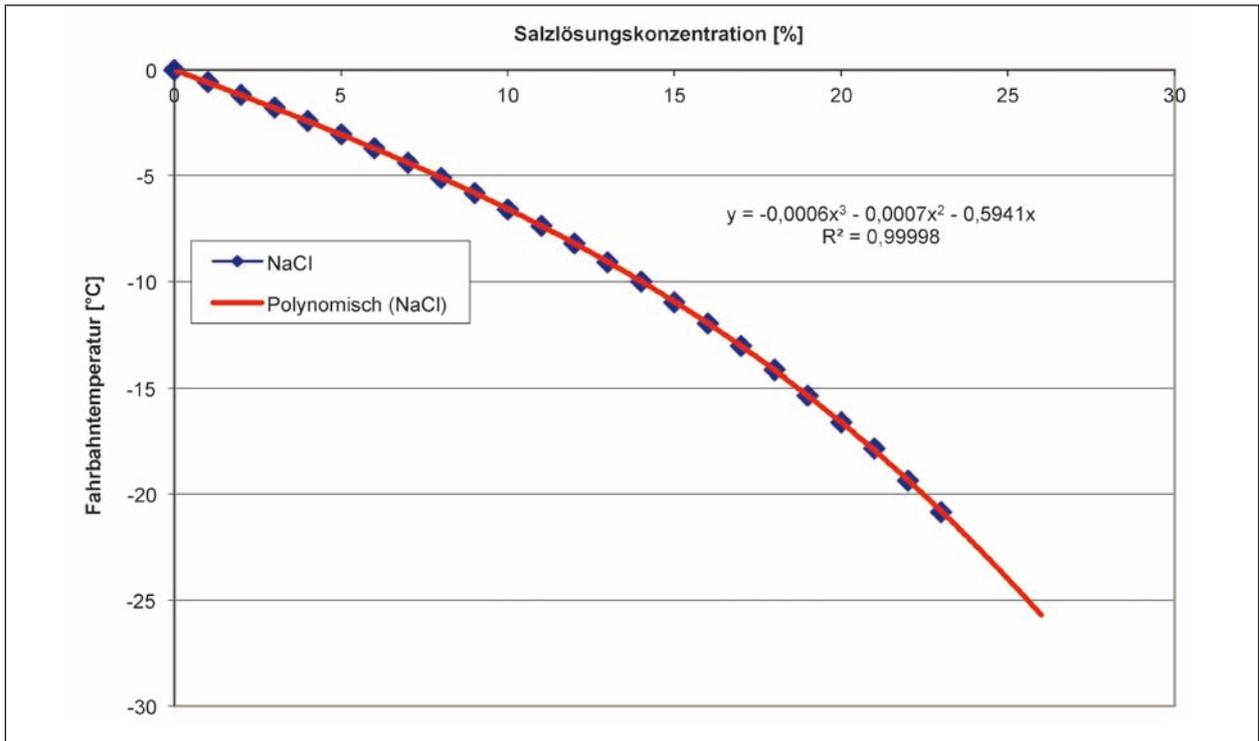


Bild 4: Phasengrenzlinie als polynomische Formel

WFD mm	Streustoffmenge g/m ²									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	
0,01	0,0									
0,02	0,0	-17,0								
0,03	0,0	-10,4								
0,04	0,0	-7,5	-20,1							
0,05	0,0	-5,9	-14,6							
0,06	0,0	-4,9	-11,5							
0,07	0,0	-4,2	-9,5	-17,0						
0,08	0,0	-3,6	-8,1	-14,0						
0,09	0,0	-3,2	-7,0	-11,9	-18,4					
0,10	0,0	-2,9	-6,2	-10,4	-15,7					
0,15	0,0	-1,9	-4,0	-6,4	-9,1	-12,3	-16,1	-20,7		
0,20	0,0	-1,5	-3,0	-4,6	-6,4	-8,4	-10,7	-13,3	-16,3	
0,30	0,0	-1,0	-2,0	-3,0	-4,1	-5,2	-6,5	-7,8	-9,3	
0,40	0,0	-0,7	-1,5	-2,2	-3,0	-3,8	-4,7	-5,6	-6,5	
0,50	0,0	-0,6	-1,2	-1,8	-2,4	-3,0	-3,7	-4,4	-5,0	

Tab. 3: Gefriertemperaturen in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke (WFD) und Streustoffmenge

$KO = (SM/WFD) \times 100$

(3) Wasserfilmdicke (WFD) und der Streustoffmenge (Tabelle 3).

Nach SM aufgelöst ergibt sich:

$SM = (KO \times WFD)/100$

(4) Die Ergebnisse der Berechnung können als Kurvenschar dargestellt werden. Jede Kurve steht für eine Wasserfilmdicke (Bild 5).

Formel (2) ermöglicht die Berechnung der Gefrier-temperatur für alle sinnvollen Wertepaare der

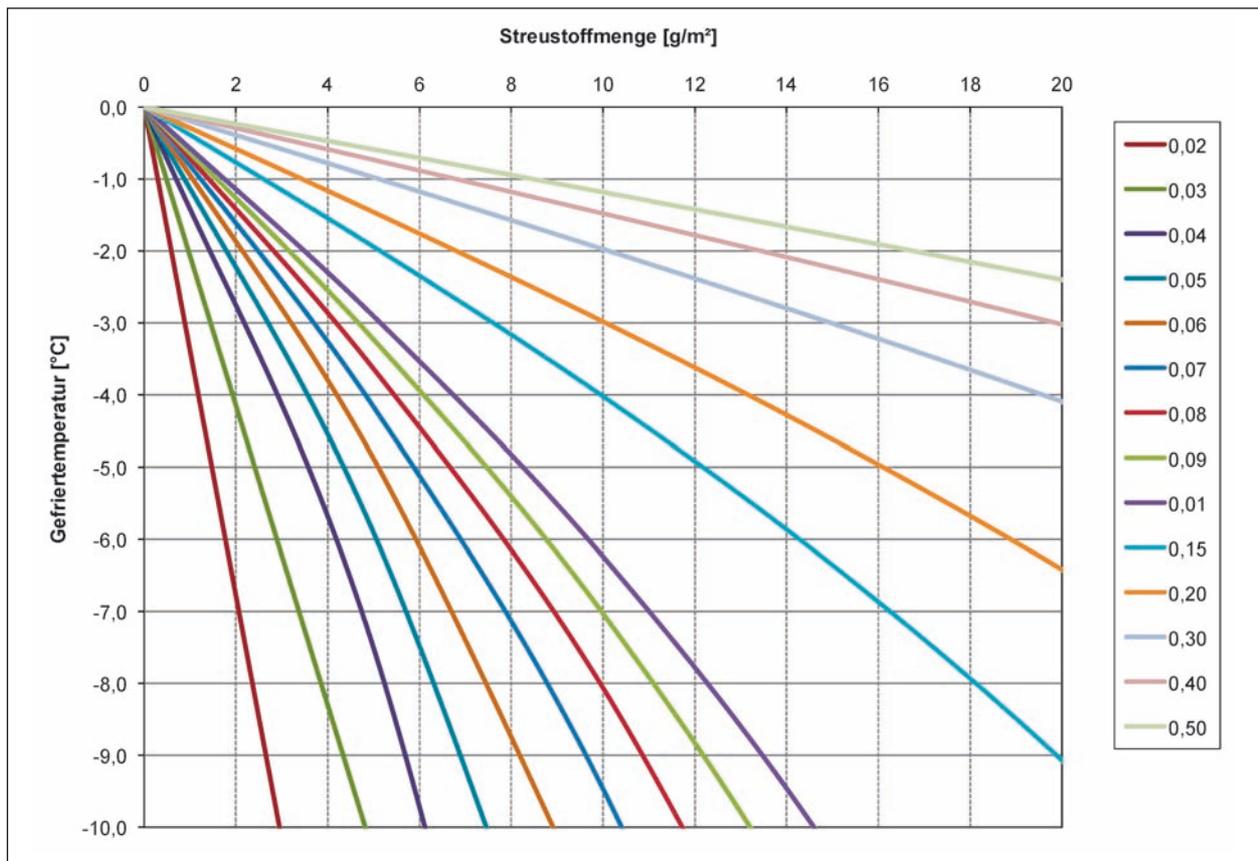


Bild 5: Gefriertemperatur in Abhängigkeit von Streustoffmenge und Wasserfilmdicke in mm

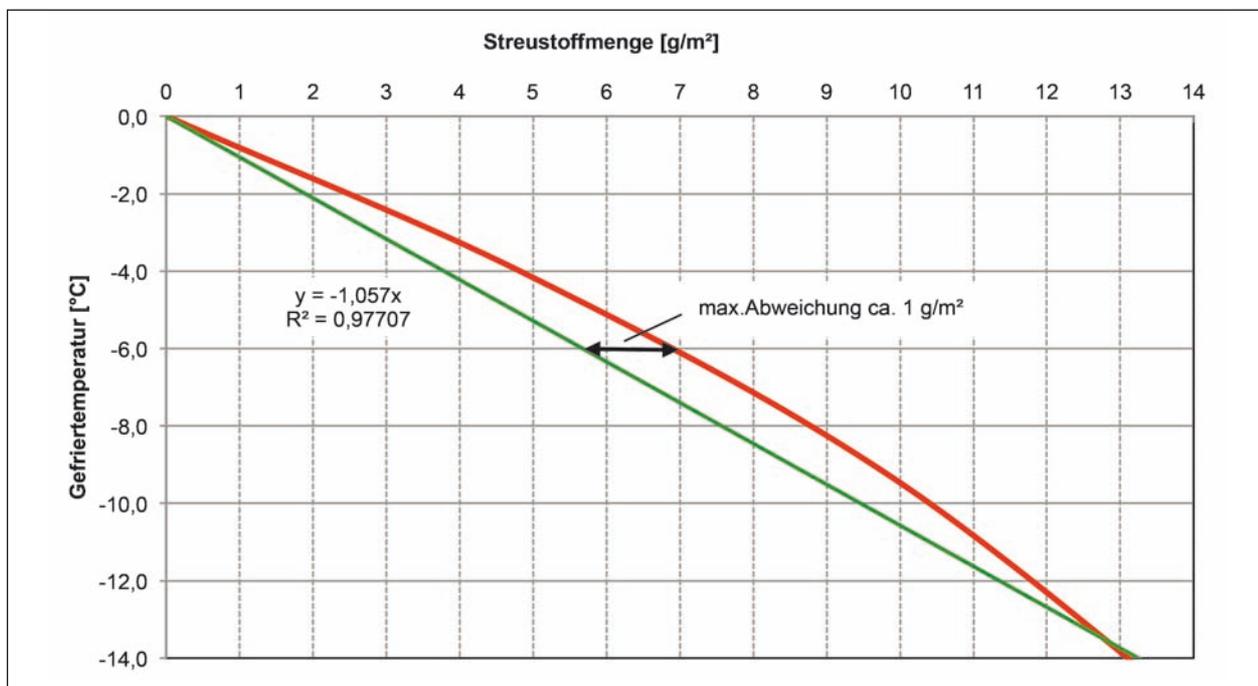


Bild 6: Verlauf der linearen Trendlinie im Vergleich zum berechneten Kurvenverlauf auf Basis der Phasengrenzlinie (rote Linie). Beispiel mit Wasserfilmdicke WFD 0,07 mm

Zur Vereinfachung der Berechnungen ist es sinnvoll mit linearen Gleichungen zu arbeiten. Dazu werden lineare Trendlinien hinzugefügt und deren Gleichung

ermittelt. Für jede Wasserfilmdicke gibt es eine lineare Trendlinie. Die Trendlinien unterscheiden sich nur durch ihre Steigung.

WFD mm	Streustoffmenge g/m ²									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	
0,01	0,0									
0,02	0,0									
0,03	0,0	-10,4								
0,04	0,0	-7,5								
0,05	0,0	-5,9								
0,06	0,0	-4,9								
0,07	0,0	-4,2								
0,08	0,0	-3,6								
0,09	0,0	-3,2	-7,0							
0,10	0,0	-2,9	-6,2							
0,15	0,0	-1,9	-4,0	-6,4						
0,20	0,0	-1,5	-3,0	-4,6	-6,4	-8,4				
0,30	0,0	-1,0	-2,0	-3,0	-4,1	-5,2	-6,5	-7,8		
0,40	0,0	-0,7	-1,5	-2,2	-3,0	-3,8	-4,7	-5,6	-6,5	
0,50	0,0	-0,6	-1,2	-1,8	-2,4	-3,0	-3,7	-4,4	-5,0	

Tab. 4: Eingeschränkter Wertebereich für die Berechnung der Trendlinien

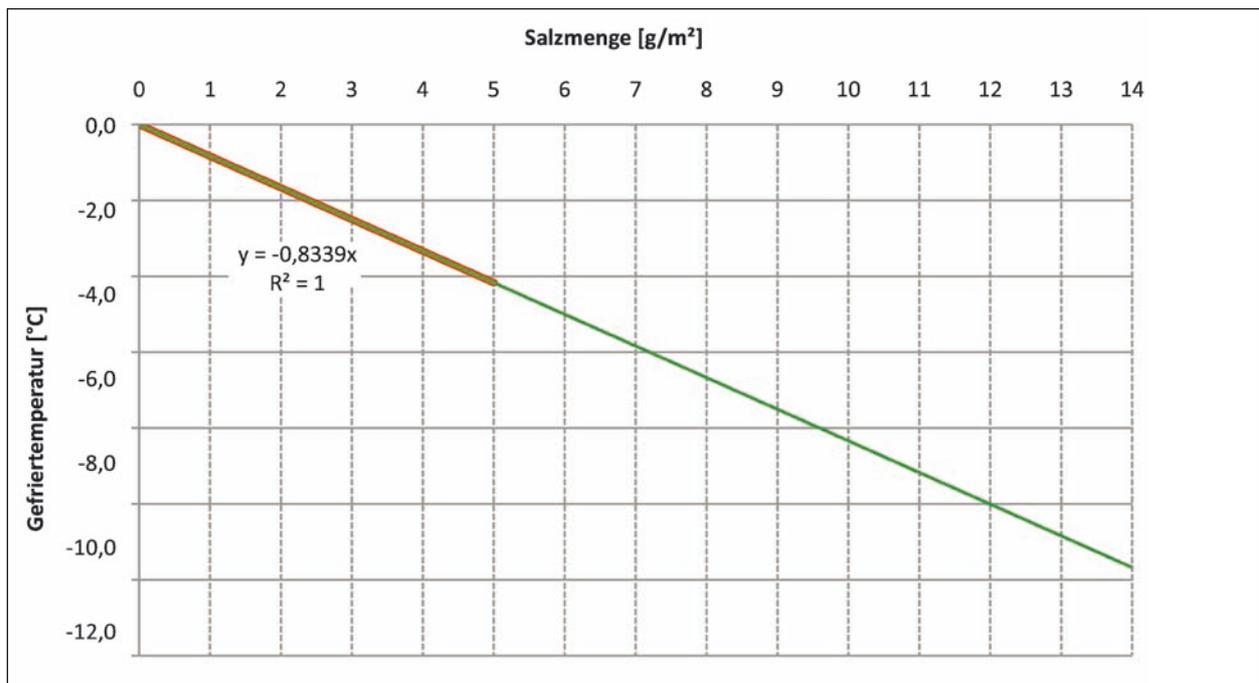


Bild 7: Übereinstimmung von Trendlinie und linearer Funktion im eingeschränkten Temperaturbereich (Beispiel für 0,7 mm)

In einem ersten Schritt zeigt sich, dass dadurch in bestimmten Temperaturbereichen ein zu geringer Streustoffbedarf errechnet wird. Die Abweichung beträgt maximal 1 g/m² (Bild 6). Zur Verringerung dieser Abweichung wurden in einem zweiten Schritt die linearen Trendlinien innerhalb eines eingeschränkten Temperaturbereiches (bis minimal -10 °C) berechnet (Tabelle 4). Damit liegt die Trend-

linie im Temperaturbereich bis -6 °C immer sehr nahe der Ideallinie (Bild 7). Bei niedrigeren Temperaturen gibt es dadurch mehr Sicherheit.

Für jede Wasserfilmdicke wird die Steigung (ST) der linearen Trendlinie berechnet (Tabelle 5). Aus der grafischen Darstellung der Wertepaare lässt sich ein mathematisch fassbarer Zusammenhang erkennen

WFD/mm	Steigung der linearen Trendlinie ST
0,03	2,0759
0,04	1,5021
0,05	1,1819
0,06	0,9769
0,07	0,8339
0,08	0,7282
0,09	0,6918
0,10	0,6156
0,15	0,4357
0,20	0,3242
0,30	0,2199
0,40	0,1578
0,50	0,1235

Tab. 5: Steigung der linearen Trendlinie für verschiedene Wasserfilmdicken

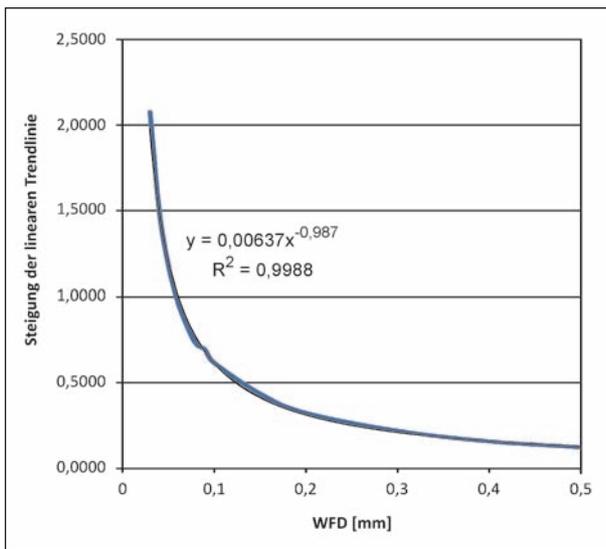


Bild 8: Steigung der linearen Trendlinien in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke

(Bild 8). Die Steigung ST der linearen Trendlinie ist an eine bestimmte Wasserfilmdicke gebunden und drückt aus, in welchem Maß die erforderliche Streustoffmenge von der Fahrbahntemperatur abhängig ist. Bei geringer Wasserfilmdicke (z. B. 0,03 mm) ist der Einfluss der Fahrbahntemperatur auf die erforderliche Streustoffmenge deutlich geringer als bei großen Wasserfilmdicken (z. B. 0,5 mm). Dieser Zusammenhang ist auch aus der grafischen Darstellung vor der Linearisierung erkennbar (Bild 5).

In der Formeldarstellung ergibt sich:

$$ST = 0,0637 \times WFD^{-0,987} \tag{5}$$

Dieser rechnerisch abgeleitete Zusammenhang zwischen Steigung der linearen Trendlinien und Wasserfilmdicke ermöglicht die Entwicklung einer relativ einfachen Formel für die Berechnung der erforderlichen Streudichte. Unter Benutzung dieser exponentialen Gleichung wird eine Formel gebildet, mit der die theoretisch erforderliche Mindestmenge an Taustoff anhand der Temperatur und der Wasserfilmdicke errechnet werden kann.

Vereinfacht (Exponent auf -1 gerundet):

$$ST = 0,0637/WFD \tag{6}$$

$$y = -mx \text{ (allgemeine Form der linearen Trendlinie)}$$

$$y = T_G \text{ (Gefriertemperatur/°C)}$$

$$m = ST \text{ (Steigung der linearen Trendlinie)}$$

$$x = SM \text{ (Streustoffmenge/g/m}^2\text{)}$$

$$\Rightarrow T_G = -ST \times SM \tag{7}$$

(6) in (7) eingesetzt ergibt:

$$T_G = (-0,0637/WFD) \times SM \tag{8}$$

Nach SM umgestellt:

$$SM = (T_G \times WFD)/-0,0637 \tag{9}$$

Für den Fall der Streustoffdosierung gilt unter Verwendung der dafür relevanten Formelzeichen:

$$SD = (T_F \times WFD)/-0,0637 \tag{10}$$

Damit wird eine Streudichte berechnet, welche die bekannten chemisch-physikalischen Zusammenhänge berücksichtigt.

Werden für T_F und WFD-Prognosewerte eingesetzt, finden auf diese Weise meteorologische Einflüsse Eingang in die Berechnung. Für die Berechnung der optimalen Streudichte sinnvolle Prognosewerte sind T_{FK} und WFD_{max} . Als T_{FK} wird die aus den Prognosewerten kalkulierte Fahrbahntemperatur bezeichnet, die in die Berechnung eingeht (s. Kapitel 4.3).

4.3 Prognose der Fahrbahntemperatur

T_{FK} kann durch eine Kombination aus aktueller Messung der Fahrbahntemperatur (Infrarot-Pyrometer) und dem z. B. aus der Punktvorhersage des DWD ermittelten Temperaturtrend für die Zeit von 0 bis 8 Stunden berechnet werden. Die Punktvorhersagen des DWD werden stündlich aktualisiert auf die Einsatzfahrzeuge übertragen. Diese Lösung

verspricht nach allen bisherigen Erfahrungen eine größere Genauigkeit der Temperaturprognose als eine Verfahrensweise, die auf „Thermal Mapping“ basiert, da die an der Position des Einsatzfahrzeuges gemessenen Fahrbahntemperaturen in die Berechnung eingehen. Abgeleitet aus den praktisch realisierbaren Umlaufzeiten wurde in den Feldversuchen mit einem Prognosezeitraum von maximal 3 Stunden gerechnet. In die Berechnung geht der kleinste innerhalb der nächsten drei Stunden prognostizierte Temperaturwert T_{PX} ein (Bild 9). Die Software ist jedoch so konzipiert, dass jederzeit mit anderen Prognosezeiträumen gerechnet werden kann.

Zusätzlich wurde der Korrekturfaktor F_K in die Berechnung eingeführt. Er berücksichtigt bekannte Temperaturabweichungen zwischen den Messstellen und ermöglicht zum Beispiel die rechtzeitige Streudichteanpassung an unterkühlte Brückenfahrbahnen.

$F_K > 0 \Rightarrow$ Temperatur erfahrungsgemäß höher als an der nächstliegenden Messstelle,

$F_K < 0 \Rightarrow$ Temperatur erfahrungsgemäß niedriger als an der nächstliegenden Messstelle.

4.4 Prognose der Wasserfilmdicke

Mit der maximalen Wasserfilmdicke (WFD_{max}) innerhalb des Wirkungszeitraumes einer präventiven Streuung wird erfasst, wie viel Flüssigkeit sich von zurückliegenden Niederschlägen auf der Fahrbahn befindet (Restfeuchte), wie viel Flüssigkeit durch Taubildung (Kondensation) auf die Fahrbahn gelangen kann oder welche Flüssigkeitsmengen sich als Reif ansetzen könnten.

Eine Verbindung zwischen der optischen Wahrnehmung der Fahrbahnfeuchte und der Wasserfilmdicke ist aus Tabelle 6 zu entnehmen, die von RAUKOLA entwickelt wurde [13].

Bei LYSBAKKEN werden in Abhängigkeit vom Oberflächenzustand die in Tabelle 7 aufgeführten Wasserfilmdicken angenommen [9].

Oberflächenzustand	Wassermenge (g/m ²)	Wasserfilmdicke (mm)
trocken	0	0
feucht	0-100	0-0,1
nass	> 100	> 0,1

Tab. 7: Oberflächenzustand und Wasserfilmdicke nach [9]

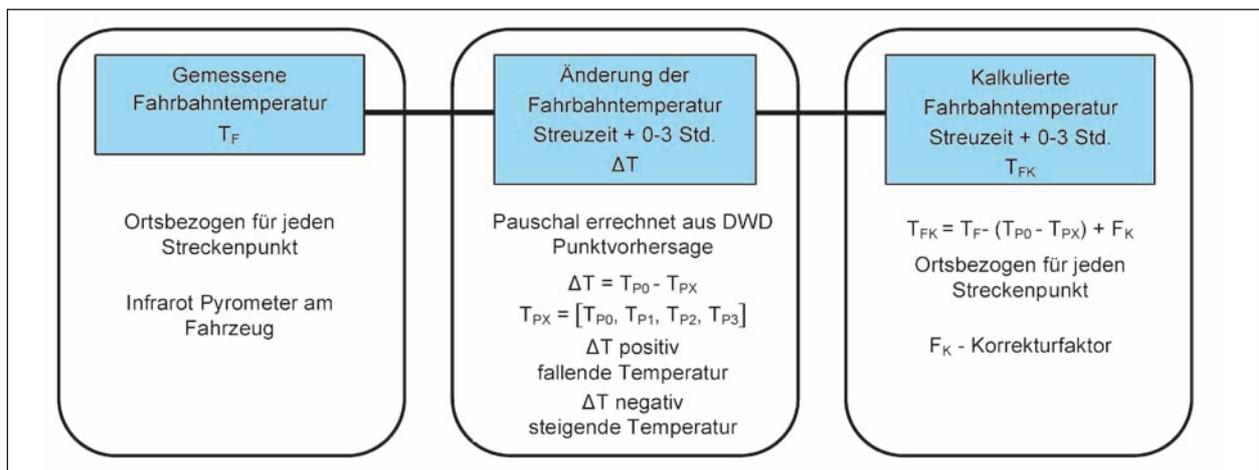


Bild 9: Ermittlung der kalkulierten Fahrbahntemperatur

Bezeichnung	Wassermenge [g/m ²]	Wasserfilmdicke [mm]	Beschreibung
wenig feucht	5-20	0,005-0,020	sichtbar dunkle Straßenoberfläche
feucht	20-50	0,020-0,050	deutlich dunkle Straßenoberfläche
nass	50-200	0,050-0,200	beginnende Sprühfahnenbildung
sehr nass	200-400	0,200-0,400	kleine Wassertropfen in der Luft
fließend	> 400	> 0,400	fließendes Wasser im Gefälle

Tab. 6: Definition des Status der Straßenoberfläche

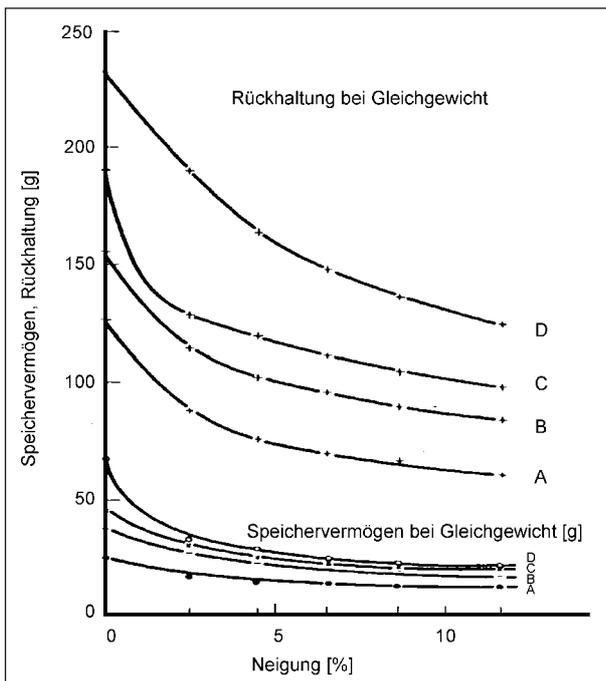


Bild 10: Rückhalte- und Speichervermögen von Fahrbohnoberflächen in Abhängigkeit von Fahrbohnneigung und mittlerer Rautiefe nach LUKAS [8]

Rückhaltung und Speichervermögen von Fahrbohnoberflächen mit unterschiedlicher Oberflächentextur in Abhängigkeit von der Fahrbohnneigung sind bei LUKAS (Bild 10) dargestellt [8].

- Rückhaltung
Wassermenge, die sich während des Regens auf der Straßenoberfläche befindet.
- Speichervermögen
Wassermenge, die infolge der Rauheit der Straßenoberfläche nach einem Regen zurückgehalten wird.
- Rautiefen
A = 0,40 mm,
B = 1,60 mm,
C = 2,65 mm,
D = 6,10 mm.

Die für die Berechnungen relevante Restfeuchte ist dem Speichervermögen gleichzusetzen, das für unterschiedliche Fahrbohnoberflächen und Fahrbohnneigungen im Rahmen der Untersuchung von Aquaplaningeffekten experimentell ermittelt wurde. Aus dem Diagramm (Bild 10) ist abzuleiten, dass unter den zumeist anzutreffenden Umständen (Fahrbohnneigung 2,5 %; mittlere Rautiefe maximal 1,60 mm) wenige Minuten nach Niederschlägen maximal mit Wasserfilmdicken von 0,03 mm gerechnet werden muss.

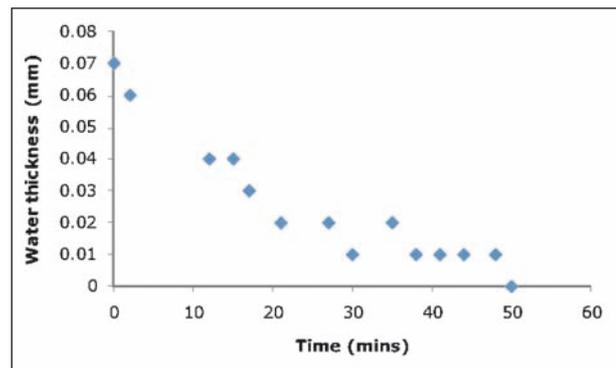


Bild 11: Verlauf der Wasserfilmdicke nach Niederschlagsende [2]

Diese Angabe wird auch durch Messergebnisse von EVANS [2] (Bild 11) bestätigt, die mit dem berührungslosen Fahrbohnensensor DSC 111 der Firma Vaisala gewonnen wurden. Nach diesen Messungen stellt sich die Wasserfilmdicke von 0,03 mm nach etwa 15 Minuten ein und verringert sich nach 30 Minuten auf 0,01 mm. Es handelt sich dabei um Werte, die in der Fahrstreifenmitte gemessen wurden. In den Rollspuren verringert sich die Wasserfilmdicke noch schneller.

Bei EVANS werden darüber hinaus folgende Werte angegeben, die zusätzlichen Bezug zur Verkehrsbelastung haben:

- Wasserfilmdicke einer feuchten Straße mit erheblichem Verkehr: 0,03 mm,
- Wasserfilmdicke einer feuchten Straße mit wenig Verkehr oder einer Straße, mit erheblichem Verkehr bis eine Stunde nach Niederschlagsende: 0,05 mm,
- Wasserfilmdicke einer feuchten Straße mit wenig Verkehr: 0,10 mm.

Die für diese Messwerte zugrundeliegenden Verkehrsstärken sind nicht angegeben. Es wird lediglich erklärt, dass es sich bei den Straßen mit erheblichem Verkehr um Hauptfahrbohnen handelt, während bei Straßen mit wenig Verkehr einzelne Spuren von Zufahrten zu Hauptstrecken gemeint sind.

An dieser Stelle ist sicher auch davon auszugehen, dass nicht nur die Verkehrsstärke sondern auch die gefahrene Geschwindigkeit Einfluss hat.

Die durch Reifbildung gebundenen Flüssigkeitsmengen können mithilfe von relativer Luftfeuchte, Fahrbohn- und Lufttemperatur aus der DWD-Punktproggnose ermittelt werden.

Bei MÖLLER [10] wird eine modifizierte Formel eingeführt, die von KNOLLHOFF [6] entwickelt wurde. Mit dieser Formel können die Zuwachsraten bei der Reifbildung in Abhängigkeit von meteorologischen und straßenbezogenen Randbedingungen bestimmt werden.

Die Formel lautet:

$$SR = 2,16 \times 10^{-6} \times WS \times D/TA \quad (11)$$

mit

$$D = 611 \times e^{(22,2-6061/TD)-(22,2-6061/TS)} \quad (12)$$

Es gelten:

SR Resublimationsrate (Zuwachsgeschwindigkeit von gefrorenem Wasser oder Raureif – kg/m²/s). Unter Resublimation ist die Phasenumwandlung vom gasförmigen in festen Aggregatzustand zu verstehen.

WS Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe (m/s)

D Differenz zwischen dem aktuellen Dampfdruck der Luft in 2 m Höhe und dem Sättigungsdampfdruck auf der Straßenoberfläche

TA Lufttemperatur in 2 m Höhe (K)

TD Taupunkttemperatur der Luft (K)

TS Temperatur der Straßenoberfläche (K)

Es muss jedoch noch überprüft werden, ob diese Berechnungsmethode zu praxisrelevanten Ergebnissen führt und der Genauigkeitsgrad der Vorhersage ausreicht.

4.5 Kalkulation der Restsalzmengen und der Liegezeitverluste

Für die Berechnung der optimalen Streudichte für präventive Einsätze sind weitere Einflussfaktoren zu berücksichtigen.

Dazu gehören zwei wesentliche Angaben über den Verbleib von Streustoff auf der Fahrbahn:

1. SM_{verl} in g/m²
Streustoffmenge auf der Fahrbahn, mit deren Verlust innerhalb des technologisch erforderlichen Zeitraumes gerechnet werden muss.
2. SM_R in g/m²
Streustoffmenge aus zurückliegenden Streuungen (Restsalzmenge), die sich zum Zeit-

punkt der aktuellen Streuung auf der Fahrbahn befindet.

Diese beiden Werte können unter Verwendung der Erkenntnisse kalkuliert werden, die bei Liegezeitmessungen von FS 30 und Sole gewonnen wurden.

Die Anrechnung der Liegezeitverluste (SM_{verl}) erfolgt dadurch, dass die unter Berücksichtigung der beschriebenen Einflussfaktoren errechnete Streudichte mit Erhöhungsfaktoren (Ausgleichsfaktor für Liegezeitverluste – F_L) multipliziert wird. Bei der Berechnung des Liegezeitfaktors fließen die bei Liegezeitmessungen gewonnenen Erkenntnisse über prozentuale Verluste pro Zeiteinheit, aber auch praktische Erfahrungen ein [4, 5]. Die in den letzten Jahren durchgeführten Liegezeitmessungen hatten ergeben, dass in der ersten Stunde nach der Streustoffausbringung die mit Abstand größten Taustoffverluste auftreten. Darüber hinaus ergaben die Messungen, dass bei der Ausbringung von Tausalzlösungen wesentlich geringere Taustoffverluste auftreten. Der Ausgleichsfaktor für Liegezeitverluste F_L ist der Quotient aus der unmittelbar nach der Streustoffausbringung gemessenen Streustoffmenge SM_0 und der Streustoffmenge x -Stunden nach der Ausbringung SM_x .

$$F_L = SM_0/SM_x \quad (13)$$

Die Erhöhungsfaktoren sind abhängig vom Prognosezeitraum und der Streutechnologie (Tabelle 8).

Für die Kalkulation der Restsalzmenge muss mindestens Folgendes bekannt sein:

- Zeitpunkt der vorhergehenden Streuung,
- Art des Streustoffes,
- Streudichte,
- Niederschlag seit der letzten Streuung Ja/Nein.

Prognosezeitraum	FS 30	FS 100
h		
1	4,75	1,30
2	4,76	1,40
3	4,77	1,50
4	4,78	1,66
5	4,79	1,70
6	4,80	1,75
7	4,81	1,80
8	4,82	1,87

Tab. 8: Ausgleichsfaktor F_L für Liegezeitverluste

Soweit diese Daten nicht automatisiert übernommen werden können, müssten sie vor der Einsatzfahrt per Hand eingegeben werden. Aus in den vergangenen Jahren im Auftrag der BAST durchgeführten Untersuchungen ist bekannt, dass in einem Zeitraum bis 24 h nach der letzten Streuung, eine Salzmenge von etwa 2 g/m² auf der Fahrbahn gemessen wird, wenn zwischenzeitlich kein Niederschlag gefallen ist [4]. In Abhängigkeit von der Struktur der Fahrbahnoberfläche und dem Wetterverlauf wurden in einigen Fällen auch nach mehreren Tagen noch Restsalzmengen bis 10 g/m² gemessen.

Im Berechnungsalgorithmus bestand die Möglichkeit, die Restsalzmenge fest einzugeben (in der Regel 2 g/m²) und von der errechneten Streudichte unter Berücksichtigung des Taustoffinhaltes (Taustoffmengenfaktor) abzuziehen.

Die technische Möglichkeit, Restsalzmengen am Einsatzfahrzeug zu messen, würde zu Salzeinsparungen in einer geschätzten Höhe von ca. 10 % führen.

Faktoren wie Verkehrsstärke, Fahrbahnbelag, Brücken und weitere Streckenattribute können in einem weiteren Bewertungsfaktor (F_S) Berücksichtigung finden.

Die Streckenattribute könnten in einer Streckendatei hinterlegt werden. Es gibt derzeit noch keine ausreichenden Erkenntnisse über die Wirkung

dieser Faktoren auf die Liegezeit von Taustoffen. Der Bewertungsfaktor F_S ging daher nicht in die Berechnung ein.

4.6 Berechnungsalgorithmus

Zusammengefasst stellt sich der Berechnungsalgorithmus wie folgt dar:

$$SD = (((T_K \times WFD)/-0,0637) \times F_L \times F_S) - SM_R \quad (14)$$

Der Liegezeitfaktor F_L berücksichtigt die unterschiedlichen Liegezeiten der Taustoffe in Abhängigkeit von dem angewandten Streuverfahren. Es wird zwischen FS 30 und FS 100 unterschieden. In Abhängigkeit vom Prognosezeitraum wird bei präventiven Streuungen durch den Liegezeitfaktor eine Streustoffmenge ausgebracht, welche die zu erwartenden Verluste berücksichtigt. Dazu wurden die Ergebnisse von Messungen berücksichtigt, die in den Jahren 2007 bis 2012 durchgeführt wurden [4, 5].

Für den Prognosezeitraum von 3 Stunden wurden folgende Liegezeitfaktoren angewandt:

- FS 30: 4,77,
- FS 100: 1,50.

Mit Ausnahme des Faktors F_S ist der Berechnungsalgorithmus für die Bordcomputer programmiert worden (Bild 12). Er ist auch als Excel-Datei

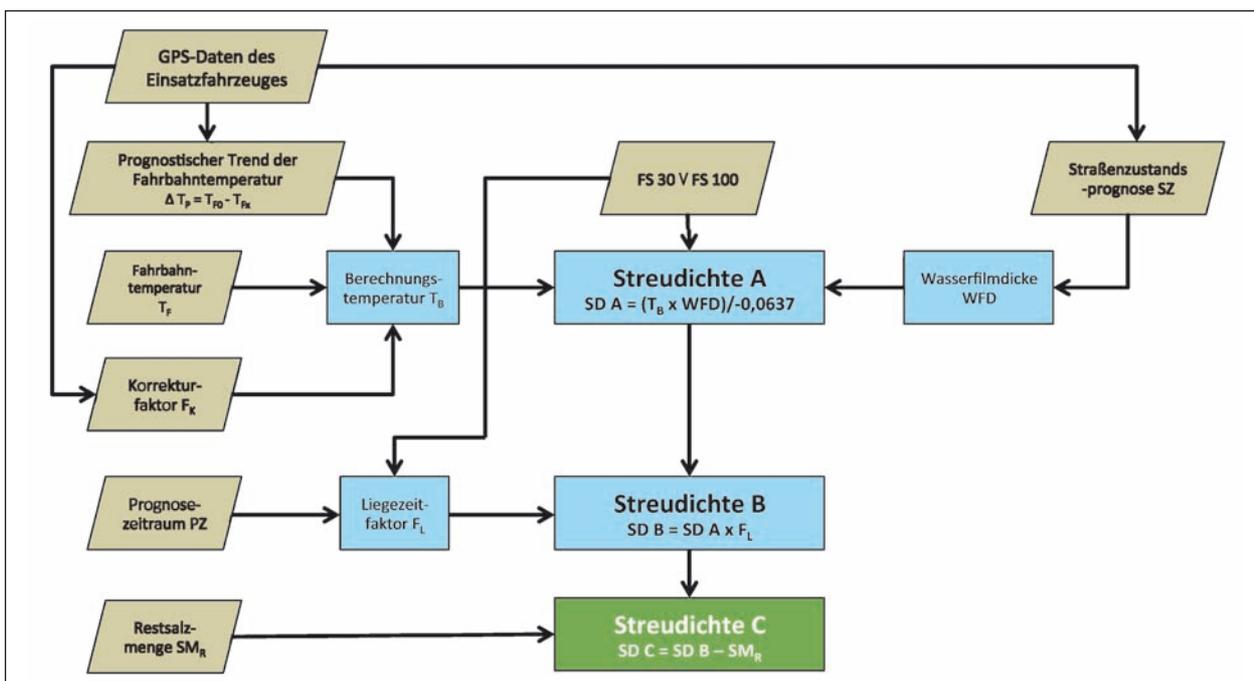


Bild 12: Programmablaufplan zur Berechnung der optimalen Streudichte

„Algorithmus Kurzform 1.3.xlsx“ mit Berechnungsvorschriften realisiert.

In der programmtechnischen Umsetzung des Algorithmus wird die Streudichte in drei Stufen berechnet (Streudichte A, B, C). In den einzelnen Stufen werden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Streudichte A
Rechenwert unter Berücksichtigung der Wasserfilmdicke und der Berechnungstemperatur für die Fahrbahnoberfläche auf Grundlage der Phasengrenzlinie (chemisch-physikalische Zusammenhänge),
- Streudichte B
qualifizierter Rechenwert unter zusätzlicher Berücksichtigung der Liegezeitverlust,
- Streudichte C
optimale Streudichte unter zusätzlicher Berücksichtigung der Restsalzmengen.

Mithilfe der Excel-Datei können im Nachhinein auch Modellrechnungen durchgeführt werden, bei denen die Eingangsgrößen variiert werden.

Mit den Eingangswerten

WFD = 0,04 mm,

PZ = 3 h,

SM_R = 0 g/m².

ergeben sich in Abhängigkeit von der kalkulierten Fahrbahntemperatur die in Bild 13 dargestellten Werte für die optimale Streudichte.

Mit den Eingangswerten

WFD (Wasserfilmdicke) = 0,10 mm,

PZ (Prognosezeitraum) = 3 h,

SM_R (Restsalzmenge) = 0 g/m²

wird deutlich, dass bei großer Wasserfilmdicke (Schneefall) bereits bei geringen Temperaturänderungen eine starke Steigerung der Streudichte erforderlich ist (Bild 14).

Für die Berechnung der optimalen Streudichte wurde außerdem berücksichtigt:

- Maximalstreumenge 40 g/m² mit FS 30 und 60 g/m² mit FS 100,
- Mindeststreumenge 5 g/m² mit FS 30 und 10 g/m² mit FS 100 bei Temperaturen bis 2 °C.

Damit besteht auch dann Sicherheit, wenn die Temperaturberechnungen im Gefrierpunktbereich Toleranzen aufweisen.

Bei der Verarbeitung der Daten, die von unterschiedlichen technischen Systemen generiert werden, ist die Durchführung von Plausibilitätskontrollen unverzichtbar. Bereitgestellte Daten können durch technische Defekte an Messeinrichtungen und Fehler bei der Datenübertragung unrichtig sein. Durch Plausibilitätskontrollen kann eine offensichtliche Unrichtigkeit von Daten erkannt und deren Eingang in die Berechnung ausgeschlossen werden.

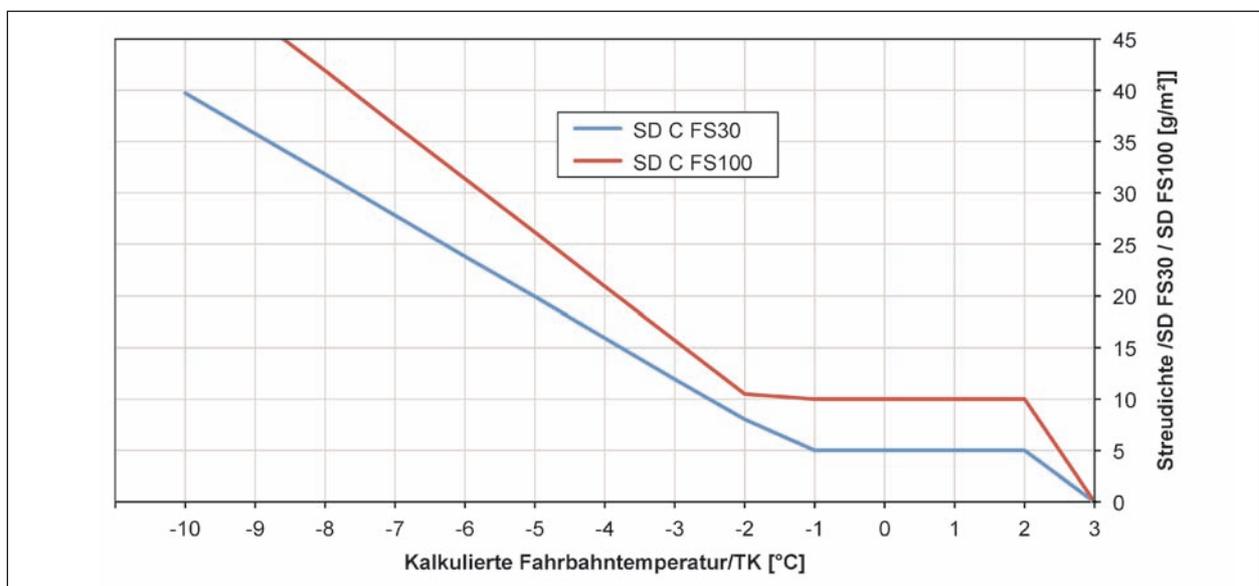


Bild 13: Streudichte in Abhängigkeit von der kalkulierten Fahrbahntemperatur für WFD = 0,04 mm, PZ = 3 h, SM_R = 0 g/m²

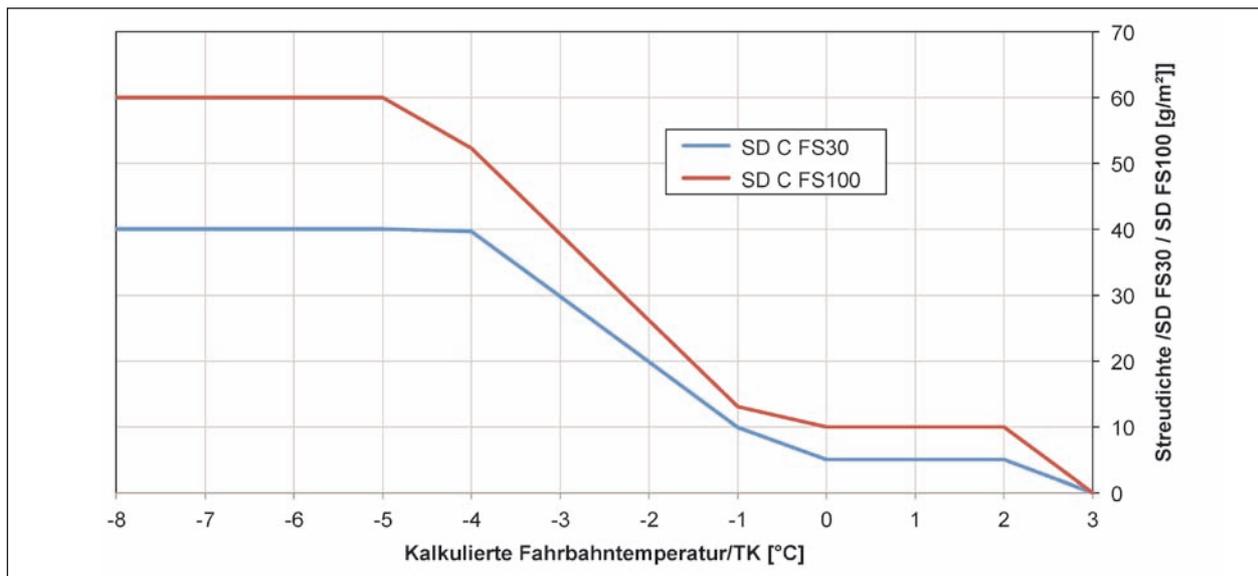


Bild 14: Streudichte in Abhängigkeit von der kalkulierten Fahrbahntemperatur für WFD = 0,10 mm, PZ = 3 h, $SM_R = 0 \text{ g/m}^2$

Die bei den Feldversuchen eingesetzte Software enthielt Plausibilitätsregeln, die sich auf die Temperaturwerte bezogen, welche über die Punktwetterprognose (T_{P0}) und das Infrarot-Pyrometer (T_F) in das System eingebracht wurden.

Zur Plausibilitätsprüfung der mit der Punktprognose übermittelten Temperaturwerte für T_{P0} wird ΔT mit folgenden Gleichungen ermittelt:

$$\Delta T = T_{P0} - T_F \text{ bei } T_F < T_{P0}$$

$$\Delta T = T_F - T_{P0} \text{ bei } T_F > T_{P0}$$

Für große Abweichungen gilt:

$$\Delta T > 5 \text{ K} \Rightarrow T_B = T_F$$

Das heißt, es wird nur die vom Fahrzeug aus gemessene Temperatur T_F berücksichtigt, da eine Temperaturdifferenz von mehr als 5 K zur Temperatur T_{P0} , die aus der Bodensonde einer naheliegenden Straßenwetterstation stammt, unplausibel ist. Die maximal zugelassene Temperaturdifferenz kann nach vorliegenden Erfahrungen auch anders gewählt werden.

Zur Plausibilitätsprüfung der mit der Punktprognose übermittelten Temperaturwerte für T_{Px} wird ΔT mit folgenden Gleichungen ermittelt:

$$\Delta T = T_{Px} - T_F \text{ bei } T_F < T_{Px}$$

$$\Delta T = T_F - T_{Px} \text{ bei } T_F > T_{Px}$$

Für große Abweichungen innerhalb von Prognosezeiten bis 3 h gilt:

$$\Delta T > 10 \text{ K} \Rightarrow T_B = T_F$$

Das bedeutet, dass bei unplausibler Prognose ebenfalls nur die vom Fahrzeug aus gemessene Temperatur T_F berücksichtigt wird.

Weitere Plausibilitätsprüfungen für Temperaturwerte und Straßenzustandsprognosen bzw. deren Kombination sind denkbar und sollten bei der Weiterentwicklung der Software bedacht werden.

5 Umsetzung des Pilotprojektes zur optimierten Streudichte

5.1 Umsetzungskonzept

Die Demonstrationsanlagen wurden in zwei Autobahnmeistereien auf jeweils zwei Streufahrzeugen im Parallelbetrieb eingesetzt. Die berechneten und die vom Fahrpersonal eingestellten Streudichten wurden zeit- und ortsbezogen aufgezeichnet. Auf dieser Basis wird in einem ersten Schritt die Plausibilität der Berechnungen unter Feldbedingungen im praktischen Einsatz überprüft.

Mit den zusätzlich in den Fahrzeugen installierten Bordcomputern wurden alle eingehenden internen und externen Daten verarbeitet. Im Ergebnis wurde die optimale Streudichte (Streudichte C) mit dem programmierten Algorithmus im Sekundentakt berechnet. Die Quelle der externen Daten war die Punktwettervorhersage des DWD, die stündlich aktualisiert wurde.

Die Datenübertragung erfolgte vom DWD über den Server des Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI) in Dresden auf die Einsatzfahrzeuge.

Dazu wurde folgendes vereinbart [3]:

Fraunhofer IVI setzt auf einem eigenen Server einen Prozess auf, der zyklisch die CSV-Datei vom DWD liest, speichert, für das im Fahrzeug zu realisierende Rechnersystem aufbereitet und in einer geeigneten Form für den Fernzugriff via Internet bereithält.

Zur Fernkonfiguration und zum Fernzugriff wird eine im Funktionsumfang auf die wesentlichen Punkte beschränkte Bediensoftware realisiert, in der Kartendaten (z. B. Open Street Map) als Hintergrundbild angezeigt und eigene GPS-Tracks dargestellt werden können. Die eigenen Strecken (aus GPS-Track oder vom Editor) sollen manipuliert und mit Attributen versehen werden können.

Das Demonstrationssystem im Fahrzeug besteht aus einer Rechner- und einer Anzeigeeinheit. Der Rechner wird ein Windows-Betriebssystem haben. Die Anzeigeeinheit wird als Touchscreen ausgeführt. Soweit technisch möglich, wird über RS 232 eine Schnittstelle zum Temperatursensor der Streumaschine realisiert. Darüber hinaus wird eine GPS-Verortung realisiert (voraussichtlich mit separater Antenne, sofern sich keine günstigere Möglichkeit darstellt). Das vom Auftraggeber in Form von Gleichungen oder Tabellenkalkulationen bereitgestellte analytische Optimierungsmodell wird auf dem Rechner unter Einbeziehung von GPS-Verortung und Temperatursensor sowie der serverseitig vorliegenden DWD-Daten softwaretechnisch umgesetzt. Der Rechner soll über eine eigene GSM/GPRS-Anbindung verfügen, damit ein Fernzugriff möglich ist. Weiterhin ist ein Map-Matching auf Basis der vom Konfigurationsprogramm bereitgestellten Streckeninformationen zu realisieren.

Der Dosierungsalgorithmus lag mit allen Berechnungsvorschriften als Excel-Datei vor. Daraus wurde die Software entwickelt.

Eingangsdaten sind:

- T_F aktuelle, vom Fahrzeug gemessene Fahr-
bahnoberflächentemperatur,
- T_{F0} Prognosetemperatur 0 Stunden (DWD-
Punktvorhersage mit Datenfernübertragung),

- T_{F3} Prognosetemperatur 3 Stunden (DWD-
Punktvorhersage mit Datenfernübertragung),
- PZ Prognosezeitraum in Stunden (Regelfall 0-3
Stunden),
- WFD Wasserfilmdicke (kalkuliert oder gemessen),
- SM_R Restsalzmenge (kalkuliert oder gemessen),
- SZ Straßenzustandsprognose nach DWD-
Schema.

Für die Temperatur- und Niederschlagsprognosen werden die Daten derjenigen Wetterstationen verarbeitet, die für den betreffenden Streckenabschnitt die qualitativ besten Daten liefern. Das wird bezogen auf den Streckenabschnitt individuell programmiert.

5.2 Funktionsweise des Systems zur Optimierung der Streudichte

5.2.1 Übersicht

Die wesentlichen Komponenten des Gesamtsystems sind in Bild 15 dargestellt. Sie gliedern sich in zwei Gruppen: externe Systeme, welche nur über vorgegebene Schnittstellen angesprochen werden können (Hellgrau hinterlegt) und Systeme, die für dieses Projekt entwickelt wurden (Orangefarben hinterlegt).

In die erste Kategorie fallen das GPS-Ortungssystem zur Bestimmung der aktuellen Position, der Server des Deutschen Wetterdienstes für die Abfrage der aktuellen Wetterprognose-Daten und die auf dem Winterdienstfahrzeug bereits vorhandene Technik. Im Fahrzeug vorhanden ist das Vpad (kommerzieller Standard-Bordrechner), über das die aktuelle Fahrbahntemperatur per Infrarot-Pyrometer (Infrarot-Sensor, ebenfalls bereits verbaut) zur Optimierung der Streusalzmenge ausgelesen werden kann sowie die tatsächliche eingestellte Streumenge für spätere vergleichende statistische Auswertungen dokumentiert wird.

Innerhalb des Projektes wurden drei Komponenten entwickelt: der Fahrzeugrechner auf dem Winterdienstfahrzeug inklusive Optimierungsalgorithmus (Kapitel 5.2.2), der zentrale Server für die Zwischenspeicherung und Weiterleitung der Daten des Deutschen Wetterdienstes (Kapitel 5.2.3) und der Streubereichseditor (Kapitel 5.2.4) zur Erstellung des notwendigen Straßennetzes und zur Auswertung der gesammelten Messwerte.

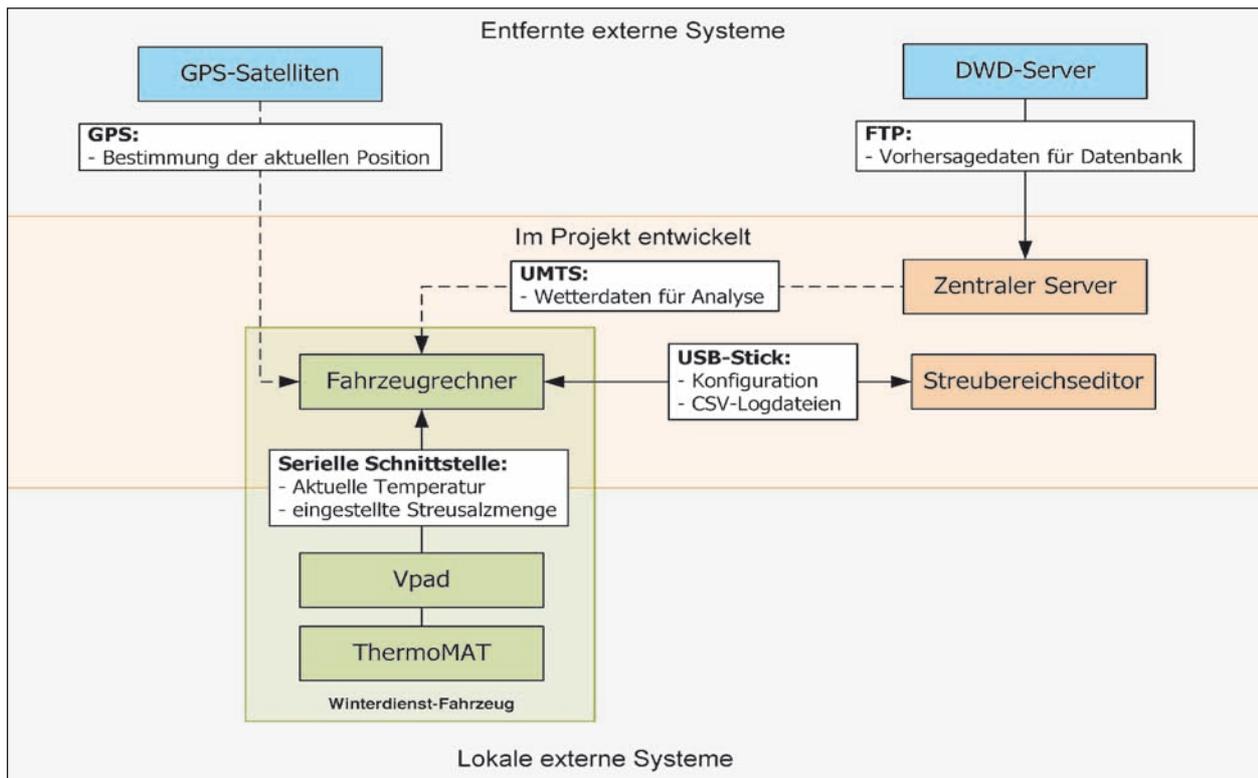


Bild 15: Systemübersicht

5.2.2 Fahrzeugrechner

Auf dem Fahrzeugrechner findet die eigentliche Berechnung der Prognose für die benötigte Streusalzmenge statt.

Bild 16 stellt die beteiligten Komponenten noch einmal etwas detaillierter dar. Zudem spiegelt sie den technischen Systemaufbau wieder.

Grün ist das Winterdienstfahrzeug umrissen. Aus Sicht der Streumengenprognose ist es lediglich über zwei Antennen (für GPS und UMTS) mit der Außenwelt verknüpft. Die Prognosedaten für Temperatur und Fahrbahnzustand werden regelmäßig durch den Server des Fraunhofer Institutes (FHG-Server) beim Server des Deutschen Wetterdienstes (DWD) abgeholt. Die Daten des DWD werden im FHG-Server selektiert und über UMTS an die Einsatzfahrzeuge übermittelt.

Am Fahrzeug befindet sich das Infrarot-Pyrometer, welches die aktuelle Fahrbahntemperatur misst.

Der auf dem Fahrzeug befindliche Prognoserechner ist rot hervorgehoben. Auf ihm befinden sich der GPS-Empfänger, das zur Verortung nötige Kartenmaterial inkl. Konfigurationsdaten, eine Logdatei, in der die ermittelten Werte gespeichert werden und das eigentliche Prognoseprogramm

mit Berechnungsalgorithmen. Dieses ist Blau dargestellt und erhält die zuvor genannten Daten aus den verschiedenen Geräten, um sie weiterzuverarbeiten. Dabei wird zunächst ein Vorschritt ausgeführt: die vom GPS-Empfänger ermittelten Koordinaten werden auf das Kartenmaterial abgebildet und verortet. Somit kennt der Rechner den exakten Straßenabschnitt, auf dem sich das Fahrzeug befindet und kann auf das für diesen Abschnitt hinterlegte Metawissen zurückgreifen.

Der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgabe des Algorithmus wird schematisch in Bild 17 dargestellt.

Für die Berechnung werden zwei verschiedene Arten von Eingangsgrößen benötigt:

Fest vorkonfigurierte Größen: Diese sind bereits vor Start der Prognose bekannt und ändern sich nicht in deren Verlauf. Sie sind entweder fest im Programm kodiert oder werden über eine Konfigurationsdatei bei Programmstart eingelesen. In dieser Gruppe gibt es folgende Werte (in Bild 17 Blau hinterlegt):

- Das mit dem Streubereichseditor erstellte Straßennetz. Dabei handelt es sich um reduziertes Kartenmaterial, das sich auf den Teil des Netzes beschränkt, auf dem das Streufahrzeug einge-

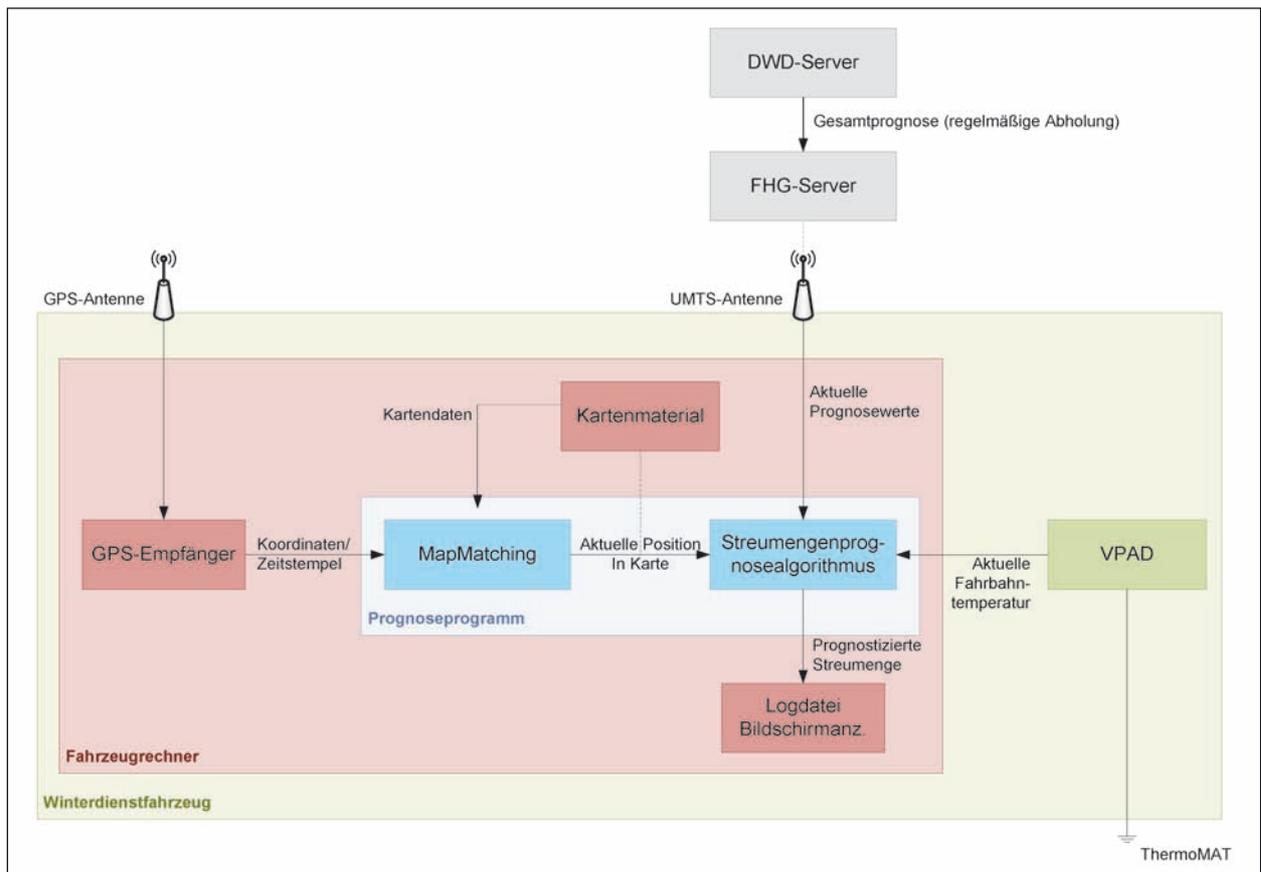


Bild 16: Detaillierte Darstellung der Komponenten der Streumengenprognose

setzt wird. Die Daten werden benötigt, um festzustellen, in welchem Gebiet sich das Fahrzeug befindet. Dieses wiederum hat Einfluss darauf, für welche DWD-Zone Prognosedaten abgefragt werden. Zudem lassen sich damit Korrekturen vornehmen, die sich aufgrund lokaler Randbedingungen ergeben (z. B. auf Brücken).

- Schätzung der vorhandenen Restsalzmenge in mg/m^2 ,
- Schätzung der aktuellen Niederschlagsmenge in μm .

Die letzten beiden Einträge sind zukünftig eventuell auch über neue Messgeräte (Restsalzmenge) oder aus den DWD-Daten (Niederschlagsmenge) bestimmbar.

Zur Laufzeit gemessene Größen: Diese werden während des Programmablaufs in mehr oder weniger regelmäßigen Intervallen (u. a. in Abhängigkeit von der Empfangsqualität) immer wieder neu bestimmt und nehmen damit unmittelbaren Einfluss auf die berechnete Prognose für die benötigte Streusalzmenge. In dieser Gruppe gibt es folgende Werte (in Bild 17 Grün hinterlegt):

- Die aktuelle Position (WGS84) wird über einen GPS-Empfänger im Fahrzeugrechner bestimmt.
- Die aktuelle Fahrbahntemperatur. Diese wird über eine serielle Schnittstelle vom im Fahrzeug installierten Vpad ausgelesen, welches sie wiederum über ein angeschlossenes Infrarot-Pyrometer erhält.
- Prognosedaten des Deutschen Wetterdienstes (in Abhängigkeit von der aktuellen Position). Diese holt sich der Fahrzeugrechner über Funk (UMTS) von einem bei Fraunhofer installierten zentralen Server.
- Lokale Korrekturwerte (in Abhängigkeit von der aktuellen Position). Diese werden über das vorgegebene Kartenmaterial bestimmt. Sie ist nötig, um auf lokale Charakteristiken einzugehen, für die das vom Deutschen Wetterdienst gelieferte Material zu grob gegliedert ist.

Aus diesen Eingabewerten berechnet der Algorithmus die folgende Ausgabe (in Bild 17 Rot hinterlegt):

- Rechenwert unter Berücksichtigung der Wasserfilmdicke und der Berechnungstemperatur für

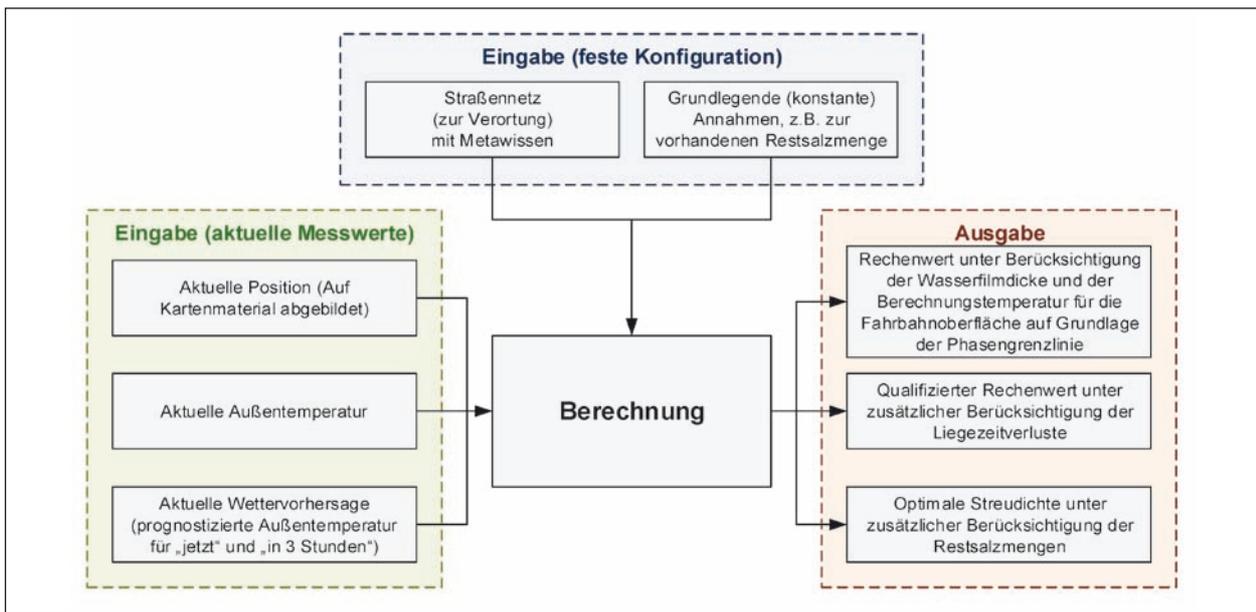


Bild 17: Grundprinzip der Streudichteberechnung



Bild 18: Hardwarekomponenten des Systems in Laboranordnung

die Fahrbahnoberfläche auf Grundlage der Phasengrenzlinie (chemisch-physikalische Zusammenhänge) \Rightarrow Streudichte A,

- qualifizierter Rechenwert unter zusätzlicher Berücksichtigung der Liegezeitverluste \Rightarrow Streudichte B,
- optimale Streudichte unter zusätzlicher Berücksichtigung der Restsalzmengen \Rightarrow Streudichte C.

Als Hardware wurde für den Versuchsaufbau ein lüfterloser Box-PC des Typs PICE-V6200-NI für den Fahrzeugeinbau eingesetzt. Er verfügt über einen Pineview-DualCore-Prozessor mit 1,66 GHz Taktfrequenz. Der Fahrzeug PC ist außerdem mit einem GPS-Modul für die Positionsbestimmung und einem GSM-/UMTS-Modul für die Übermittlung

von Daten zwischen dem Fahrzeug und dem Zentralserver ausgerüstet. Die Hardware des Versuchsaufbaues wird in Verbindung mit einem Vpad- und einem Thermomat-System von Küpper-Weisser betrieben (Bild 18).

5.2.3 Zentralserver

Der beim Fraunhofer IVI stationierte Zentralserver erfüllte zwei Aufgaben:

- Regelmäßige Abfrage der Wettervorhersagedaten vom Server des Deutschen Wetterdienstes. Dies geschieht über eine FTP-Verbindung. Die Daten liegen auf dem DWD-Server als CSV-Dateien vor und werden stündlich aktualisiert. Einmal in der Stunde werden sie heruntergeladen, umgewandelt und in einer MySQL-Datenbank auf dem Zentralserver gespeichert. Dabei werden ältere Daten durch neuere überschrieben.
- Bereitstellung der gesammelten Daten für den Fahrzeugrechner. Der Zentralserver bietet Webservices an, mit dem der Fahrzeugrechner Daten für eine bestimmte DWD-Zone und einen bestimmten Zeitpunkt abfragen kann. Dabei wird ein relativer Zeitpunkt angegeben („in x-Stunden“, wobei x größer oder gleich null sein muss). Der Fahrzeugrechner sollte sich allerdings die Ergebnisse für wiederholte Berechnungen merken, da die Abfrage über UMTS langsam ist (ca. 5-10 Sekunden pro

Anfrage) und den Analysealgorithmus unnötig verlangsamt.

5.2.4 Streubereichseditor

Der Streubereichseditor erfüllt zwei Aufgaben:

- Konfiguration von geografischem Kartenmaterial für die Streusalzmengenprognose. Dabei handelt es sich um sogenannte Polylinien (aneinandergerichtete Geradenstücke), die den Straßenverlauf im Einsatzgebiet nachbilden. Zudem besitzen Polylinien bestimmte Attribute (vgl. Bild 19).
- Temperaturkorrektur durch einen lokalen Korrekturwert für die Temperatur (F_K). Dieser wird zur gemessenen Fahrbahntemperatur addiert. Auf diese Weise kann z. B. eine erhöhte Vereisungsgefahr auf Brücken abgebildet werden. Für die räumliche Begrenzung der Gültigkeit von lokalen Korrekturwerten werden Schaltpunkte festgelegt. Zwischen denen wird der Korrekturwert angewandt (Bild 20).

Zur Vervollständigung der Liniendaten sind noch folgende Parameter einzugeben:

- Richtung: Die (ungefähre) Himmelsrichtung, in die die Polylinie verläuft. Diese Information dient lediglich dem Anwender zur Orientierung und wird vom Berechnungsalgorithmus nicht ausgewertet.
- Name: Der Name des Gebiets, in dem die Polylinie liegt. Diese Information dient lediglich dem Anwender zur Orientierung und wird vom Berechnungsalgorithmus nicht ausgewertet.
- DWD-Kennung: Die Kennung der DWD-Wetterzone, in der sich die Polylinie befindet. Diese wird genutzt, um die entsprechenden Vorhersagedaten vom Zentralserver abzufragen.

Die grafische Auswertung der durch den Algorithmus gesammelten Messwerte kann ebenfalls mit dem Streubereichseditor vorgenommen werden. Der gefährere Streckenverlauf und die gemessene Fahrbahntemperatur werden farbig in einer Karte dargestellt. In der Tabelle darunter werden für bestimmte Teilabschnitte der Fahrt jeweils Minimal-, Maximal- und Durchschnittswert für die Fahrbahntemperatur und die Prognosetemperaturen angezeigt.

In der Einstellebene können den gemessenen Fahrbahntemperaturen unterschiedliche Farbwerte zugewiesen werden. (Bild 21, Bild 22).

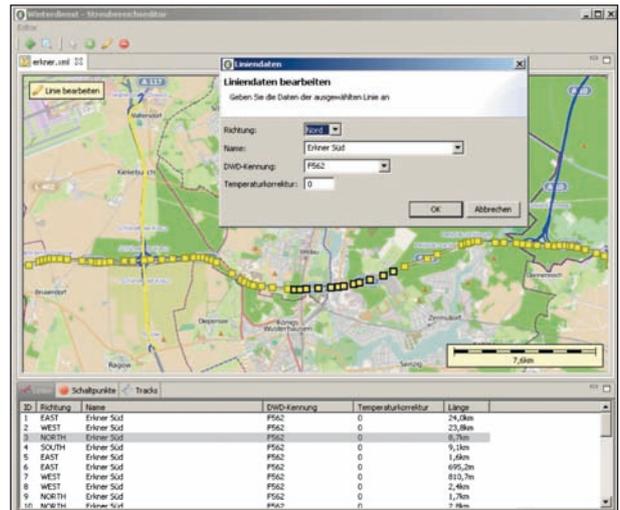


Bild 19: Streubereichseditor – Bearbeiten von geografischen Liniendaten

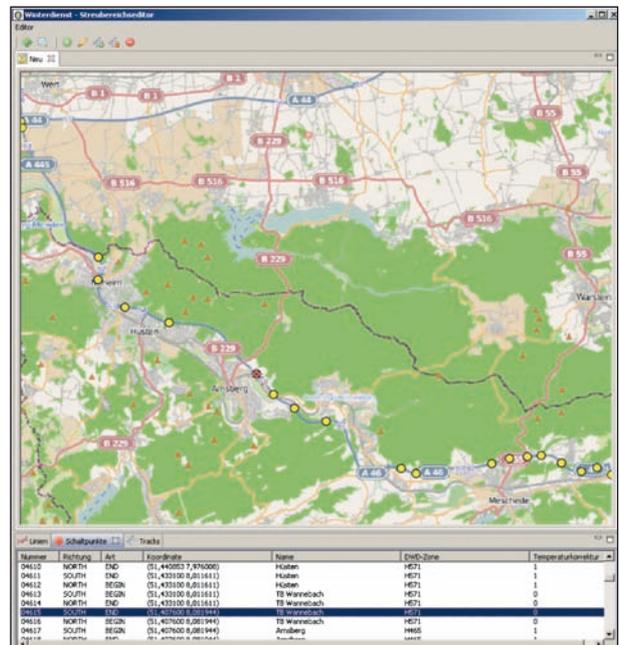


Bild 20: Streubereichseditor – Festlegen

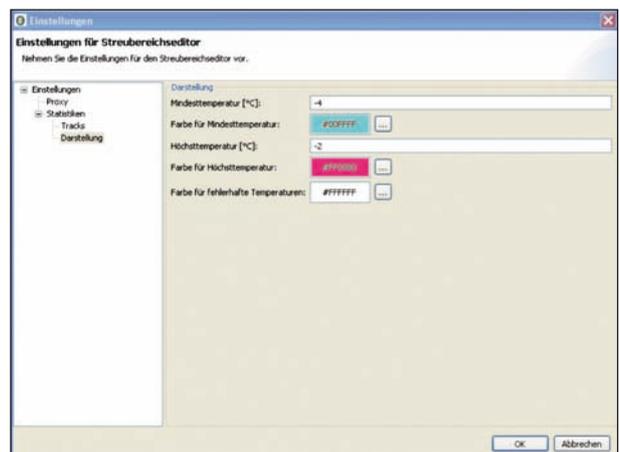


Bild 20: Streubereichseditor – Festlegen

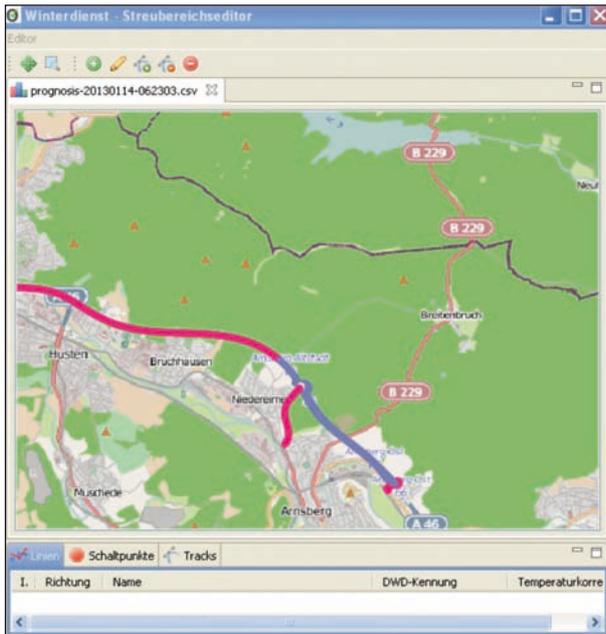


Bild 22: Farbdarstellung der gemessenen Fahrbahntemperatur in der Tourengrafik

6 Versuchsstrecken

6.1 Autobahnmeisterei Erkner

6.1.1 Charakteristik der Einsatzstrecken

Das Einsatzgebiet erstreckte sich über den gesamten Verantwortungsbereich der Autobahnmeisterei Erkner. Südlichster Wendepunkt war die Anschlussstelle Ragow auf der A 13. Nördlichster Wendepunkt war die Anschlussstelle Bernau-Süd auf der A 11. Das Einsatzgebiet befindet sich im Flachland und besitzt daher keine nennenswerten Höhenunterschiede. Die Höhe über NN beträgt zwischen 35 und 70 m.

Für die Winterdienstdurchführung sind insbesondere die Talbrücke Rüdersdorf und eine langjährig beobachtete Wetterscheide in Höhe des Oder-Spree-Kanals zu beachten.

6.1.2 Straßenwetterstationen im Einsatzgebiet

Für die Prognose der Wetterentwicklung sind die Daten von drei Straßenwetterstationen von Bedeutung (Tabelle 9). Davon befinden sich zwei direkt an den betreuten Streckenabschnitten (Spreeau, Rüdersdorf) und eine in der Nähe des nördlichen Abschnittes der Betreuungsstrecke (Dreieck Pankow).

Kennung	GMA-Name	Streckentyp	Streckenlage	Streckenbelag	Breite	Länge	Höhe in m
F348	Dreieck Pankow	1	2	1	52,63333	13,41667	55
F461	Ruedersdorf	2	3	4	52,46667	13,76667	50
F562	Spreeau	1	2	1	52,31667	13,76000	35

Legende:
 Streckentyp: 1 eben zur Umgebung
 2 Brücke Streckenlage
 Streckenlage: 2 eben zur Umgebung
 3 über großen Fluss
 Streckenbelag: 1 Asphalt
 4 Stahlkonstruktion

Tab. 9: Straßenwetterstationen im Einsatzgebiet der Autobahnmeisterei Erkner

Für die Standorte dieser Straßenwetterstationen werden vom DWD stündlich Punktwettervorhersagen erstellt, deren 3 Stunden Wert in die Kalkulation der Streudichte einbezogen wird.

Für die Grenzen des Einflussbereiches der Straßenwetterstation wurden ebenso wie für die besonderen Einflüsse durch Brückenlage oder Wetterscheide die Koordinaten der Schaltpunkte festgelegt (Tabelle 10).

6.1.3 Empfangs- und Sendequalität im Bereich der Einsatzstrecken der AM Erkner

Als Eignungstest für den gewählten Übertragungsweg wurde auf den Einsatzstrecken am 23.10.2012 die Empfangsqualität im GSM-Netz gemessen. Dazu wurde die Strecke in beiden Richtungen abgefahren (südlichster Punkt AS Ragow, nördlichster Punkt AS Bernau-Süd). Im gesamten Streckenbereich gab es kurze Abschnitte mit schlechtem Empfang. Ursache dafür sind sowohl die Netzabdeckung als auch die Netzbelastung (Bild 23). Die Empfangsqualität war ausreichend für die Durchführung der Versuchsfahrten.

Punkt Nr.	Fahrrichtung	Art	Koordinate		Bezeichnung der Zone	SWS-Bereich	Korrekturwert		
	Nord/Ost/ Süd/West		Start/Ende	Breite		Länge		DWD-Kennung	Kelvin
01301	N	S	52°17'30.94"	13°33'41.83"	Erkner Süd	F562	0		
01302	S	E	52°17'28.87"	13°33'28.53"					
01001	O	S	52°18'19.77"	13°27'2.73"					
01002	W	E	52°18'35.03"	13°26'56.42"					
11701	N	E	52°21'55.32"	3°33'17.70"					
11702	S	S	52°22'3.71"	13°33'8.54"					
01201	O	E	52°19'2.52"	13°46'50.43"					
01202	W	S	52°19'18.20"	13°46'43.56"					
01003	S	S	52°20'59.08"	13°45'25.90"					
01004	N	E							
01005	S	E	52°20'59.08"	13°45'25.90"	Erkner Mitte	F461	1		
01006	N	S							
01007	S	S							
01008	N	E							
01009	N	S							
01010	S	E							
01011	N	S			52°27'41.85"		13°47'37.31"	TB Mühlenfließ	0
01012	S	E							
01013	N	E							
01014	S	S							
01015	N	S	52°28'38.06"	13°45'31.67"	Erkner Mitte	1			
01016	S	E							
01017	N	E							
01018	S	S							
01019	N	S	52°35'57.82"	13°36'32.48"	Erkner Nord	F348	0		
01020	S	E							
01021	W	E							
01022	O	S							
01101	N	E							
01102	S	S							

Tab. 10: Schaltpunkte im Bereich der AM Erkner

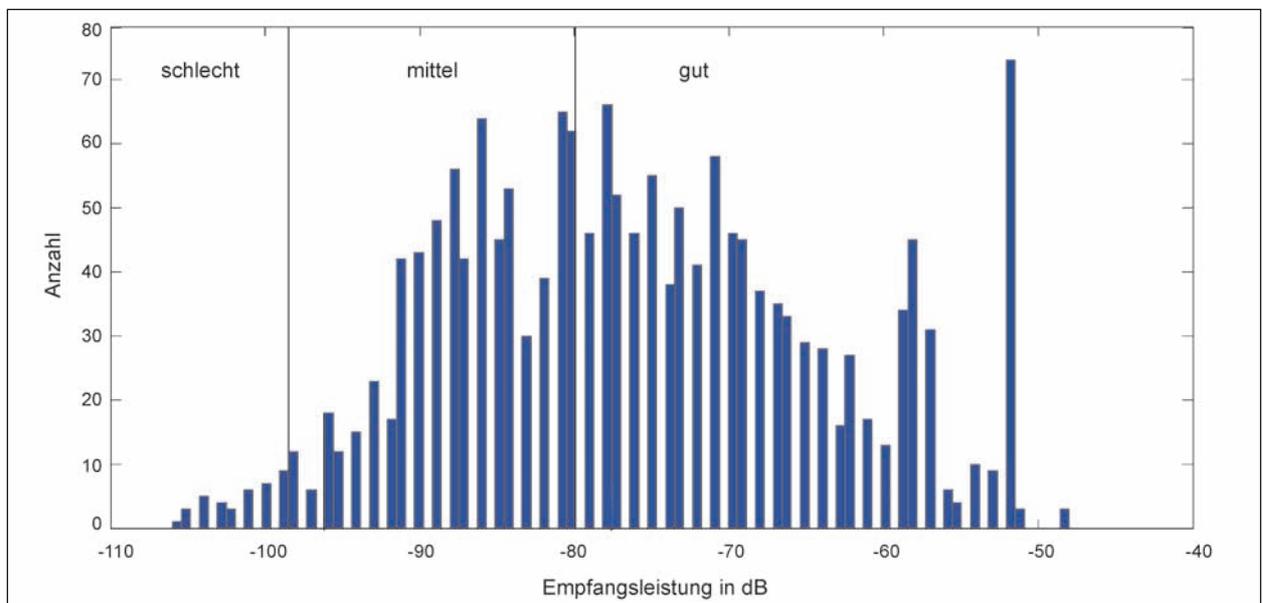


Bild 23: Zahl der Messungen in Abhängigkeit von der Empfangsleistung

Punkt Nr.	Fahrtrichtung	Art	Koordinate		Bezeichnung der Zone	SWS-Bereich	Korrekturwert
	Nord/Ost/ Süd/West	Start/Ende	Breite	Länge		DWD-Kennung	Kelvin
04606	N	E	51°27'17.42"	7°57'15.37"	Neheim	H459	1
04607	S	E	51°26'27.07"	7°58'33.63"			
04608	N	S					
04609	S	S	51°26'27.07"	7°58'33.63"	Hüsten	H571	1
04610	N	E	51°25'59.16"	8° 0'41.80"			
04611	S	E					
04612	N	S	51°25'59.16"	8° 0'41.80"	TB Wannebach	H465	0
04613	S	S					
04614	N	E					
04615	S	E	51°24'27.36"	8° 4'55.00"	Arnsberg	H465	1
04616	N	S	51°24'27.36"	8° 4'55.00"			
04617	S	S					
04618	N	E	51°23'49.76"	8° 5'44.47"	TB Rumbecke	H462	0
04619	S	E	51°23'49.76"	8° 5'44.47"			
04620	N	S					
04621	S	S	51°23'49.76"	8° 5'44.47"	Echterberg	H583	0
04622	N	E	51°23'24.54"	8° 6'45.10"			
04623	S	E					
04624	N	S	51°23'24.54"	8° 6'45.10"	TB Deitmecke	H462	0
04625	S	S	51°23'0.81"	8° 8'16.86"			
04626	N	E					
04627	S	E	51°23'0.81"	8° 8'16.86"	TB Wennemen	H580	0
04628	N	S	51°21'34.92"	8°11'54.85"			
04629	S	S					
04630	N	E	51°21'34.92"	8°11'54.85"	Enste	H580	1
04631	S	E	51°21'25.43"	8°12'37.79"			
04632	N	S					
04633	O	S	51°21'25.43"	8°12'37.79"	TB Fulmecke	H580	0
04634	W	E	51°21'43.64"	8°16'17.05"			
04635	O	E					
04636	W	S	51°21'43.64"	8°16'17.05"	Meschede	H580	1
04637	O	S	51°21'52.81"	8°17'8.48"			
04638	W	E					
04639	O	E	51°21'52.81"	8°17'8.48"	TB Kohlwederbach	H582	0
04640	W	S	51°21'56.30"	8°18'0.97"			
04641	O	S					
04642	W	E	51°21'56.30"	8°18'0.97"	Eversberg	H582	1
04643	O	E	51°21'58.36"	8°18'40.92"			
04644	W	S					
04645	O	S	51°21'58.36"	8°18'40.92"	Eversberg	H582	1
04646	W	E	51°21'58.36"	8°18'40.92"			
04647	O	E			51°21'58.36"	8°18'40.92"	Eversberg
04648	W	S	51°21'58.36"	8°18'40.92"			
04649	O	S			51°21'58.36"	8°18'40.92"	Eversberg
04650	W	E	51°21'58.36"	8°18'40.92"			
04651	O	E			51°21'58.36"	8°18'40.92"	Eversberg
04652	W	S	51°21'58.36"	8°18'40.92"			
04653	O	S			51°21'58.36"	8°18'40.92"	Eversberg
04654	W	E	51°21'58.36"	8°18'40.92"			

Tab. 12: Fortsetzung

Punkt Nr.	Fahrtrichtung	Art	Koordinate		Bezeichnung der Zone	SWS-Bereich	Korrekturwert
	Nord/Ost/Süd/West	Start/Ende	Breite	Länge		DWD-Kennung	Kelvin
04655	O	E	51°21'44.66"	8°19'39.29"	Eversberg	H582	1
04656	W	S					
04657	O	S	51°21'44.66"	8°19'39.29"	TB Berkey		0
04658	W	E					
04659	O	E	51°21'29.37"	8°20'37.21"	Wehrstapel		1
04660	W	S					
04661	O	S	51°21'29.37"	8°20'37.21"	TB Gränscheid/ TB Velmede		0
04662	W	E					
04663	O	E	51°21'36.10"	8°21'22.61"			
04664	W	S					
04665	O	S	51°21'36.10"	8°21'22.61"			
04666	W	E					
04667	S	E	51°21'23.08"	8°22'4.17"			
04668	N	S					

Tab. 12: Fortsetzung

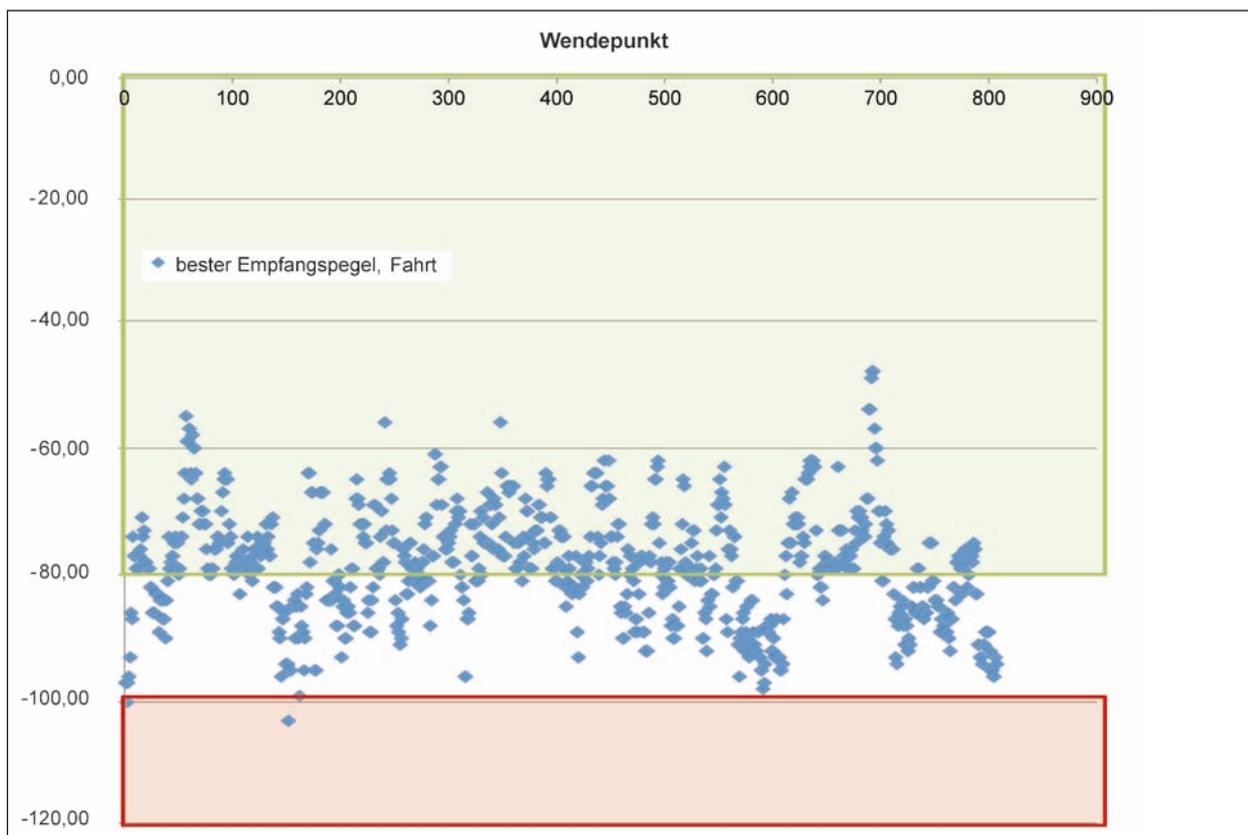


Bild 25: Gemessener Empfangspegel in dB auf der Einsatzstrecke (Grün – sehr gut, Weiß – gut, Rot – schlecht)

6.2.2 Empfangs- und Sendequalität der Datenübertragung im Bereich A 445/A 46

Auf den Einsatzstrecken wurde am 30.10.2012 vorsorglich die Empfangsqualität im GSM-Netz gemessen. Dazu wurde die Strecke in beiden Richtungen abgefahren (Hinfahrt ab AS Wickede, Wen-

depunkt in Enste, Rückfahrt über AD Werl bis AS Wickede), (Bild 25).

Der Empfangspegel in Bild 25 gibt mit negativen Werten an, wie stark das Signal gedämpft wird. Auf der X-Achse ist die Zahl der Messpunkte dargestellt.

Aus den Messungen war zu erkennen, dass es bei der Empfangsqualität nur wenige kritische Stellen gibt. Eins der beiden Einsatzfahrzeuge wurde mit 9 einer zusätzlichen Stabantenne für einen stabileren GSM-/UMTS-Empfang ausgestattet. Das Infrarot-Pyrometer war am Rahmen des Abrollsys-



Bild 26: Einsatzfahrzeug der AM Werl mit Infrarot-Pyrometer

tems befestigt (Bild 26). Im Bereich der AM Werl wurden beim praktischen Einsatz keine wesentlichen Probleme mit dem GSM-/UMTS-Empfang auf den Fahrzeugen festgestellt.

7 Ergebnisse der Feldversuche im Winter 2011/12

7.1 Versuchsumfang

Die erste Anlage wurde am 19. Dezember 2011 in ein Fahrzeug der Autobahnmeisterei Erkner eingebaut. Die erste Aufzeichnung eines Einsatzes erfolgte witterungsbedingt am 12.01.2012. Bis zum 15.02.2012 wurden insgesamt 18 Einsätze aufgezeichnet (Tabelle 13).

Der Rechner zur Optimierung der Streudichte war in Verbindung mit einer Streumaschine der Firma Küpper-Weisser, Typ IMSSN E29050HFA, Serien-

Beginn		Ende		Strecke		
Datum	Uhrzeit	Datum	Uhrzeit	Start/Ziel	Wendepunkt Nord	Wendepunkte Süd
jj.mm.dd	hh:min	jj.mm.dd	hh:min			
120112	07:09	120112	08:16	Erkner	Bernau Süd	
120118	07:09	120118	08:16	Erkner	Bernau Süd	
120120	06:48	120120	08:00	Erkner	Bernau Süd	
120120	20:10	120120	20:32	Erkner	Hellersdorf	
120125	07:22	120125	08:37	Erkner	Rüdersdorf	Ragow Friedersdorf
120128	20:14	120128	20:31	Erkner		Hellersdorf
120203	03:15	120203	05:17	Erkner	Bernau Süd	
120203	06:53	120203	08:18	Erkner	Rüdersdorf	Friedersdorf
120203	09:29	120203	11:16	Erkner	Rüdersdorf	Ragow
120209	20:09	120209	21:07	Erkner		Königs Wusterhausen Friedersdorf
120209	23:52	120210	01:12	Erkner		Königs Wusterhausen Friedersdorf
120210	03:40	120210	05:05	Erkner		Ragow Friedersdorf
120214	18:42	120214	20:50	Erkner	Rüdersdorf	Ragow
120215	00:23	120215	02:19	Erkner	Rüdersdorf	Ragow
120215	03:29	120215	05:17	Erkner	Rüdersdorf	Ragow
120215	07:04	120215	08:16	Erkner		Friedersdorf
120215	09:43	120215	11:51	Erkner		Königs Wusterhausen Friedersdorf
120215	16:08	120215	17:23	Erkner	Bernau Süd	

Tab. 13: Zeitraum und Streckenführung der aufgezeichneten Touren

nummer 100281, Baujahr 2010 eingesetzt. Der Behälter der Streumaschine fasst 5,0 cbm Streustoff. Die maximale Streubreite beträgt 12,0 m.

Zu Beginn der Einsatzfahrten galt es die Funktionsfähigkeit des Systems zu überprüfen. Das betraf insbesondere die Übertragungswege. Für die Übertragung der Daten zwischen dem zentralen Server von Fraunhofer IVI und dem Fahrzeug wird das D2-Mobilfunknetz genutzt. Es wurde deshalb gewählt, weil nach Erfahrung der AM Erkner in diesem Netz auf den betreffenden Strecken eine bessere Empfangsqualität als im D1-Netz zu erwarten ist

Die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Systems konnte bereits bei den ersten Fahrten im Januar 2012 nachgewiesen werden. Allerdings kam es sporadisch immer wieder zu Ausfällen bei der Übertragung der Daten. Aus diesem Grund wurden vor der Winterdienstsaison 2012/13 auf einem Fahrzeug zusätzlich zwei Kfz-Außenantennen installiert.

In der Winterdienstsaison 2011/12 gab es zeitweise Probleme beim Auslesen und Umsetzen der Daten in den Berechnungsalgorithmus. Die möglichen Fehler wurden eingegrenzt und durch Fraunhofer IVI vor der Winterdienstsaison 2012/13 abgestellt.

Die Referenzdaten der tatsächlich eingestellten Streudichte wurden durch das Streudatenmanagementsystem (SDM) von Küpper-Weisser erfasst,

das auch schon bisher am Fahrzeug installiert war. Die Referenzdateien wurden ursprünglich manuell und in der zweiten Winterdienstsaison automatisiert mit den Aufzeichnungsdaten des Systems zur Optimierung der Streudichte zusammengefügt.

7.2 Fahrbahntemperaturen

7.2.1 Messung der Fahrbahntemperaturen vom fahrenden Fahrzeug

Die Aufzeichnung von Mess- und Berechnungsdaten erfolgt im Versuchssystem einmal pro Sekunde. Das trifft auch auf die Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur mit dem Infrarot-Pyrometer zu. Eingesetzt wird ein Infrarot-Pyrometer (Thermomat) der Firma Küpper-Weisser mit der Kamera CT 11 einschließlich Temperaturschock-Kompensation. Mit den Aufzeichnungen konnte ein Überblick darüber gewonnen werden, wie das System reagiert und wie häufig Temperaturschwankungen festgestellt werden.

In Bild 27 sind die gemessenen Fahrbahnoberflächentemperaturen auf einer Achse mit den Koordinaten der nördlichen Breite aufgetragen. Dabei ist zu erkennen, dass auf dem Betriebshof wegen der fehlenden Verkehrsbelastung geringe Temperaturen herrschen. Ein weiterer Abschnitt mit gerin-

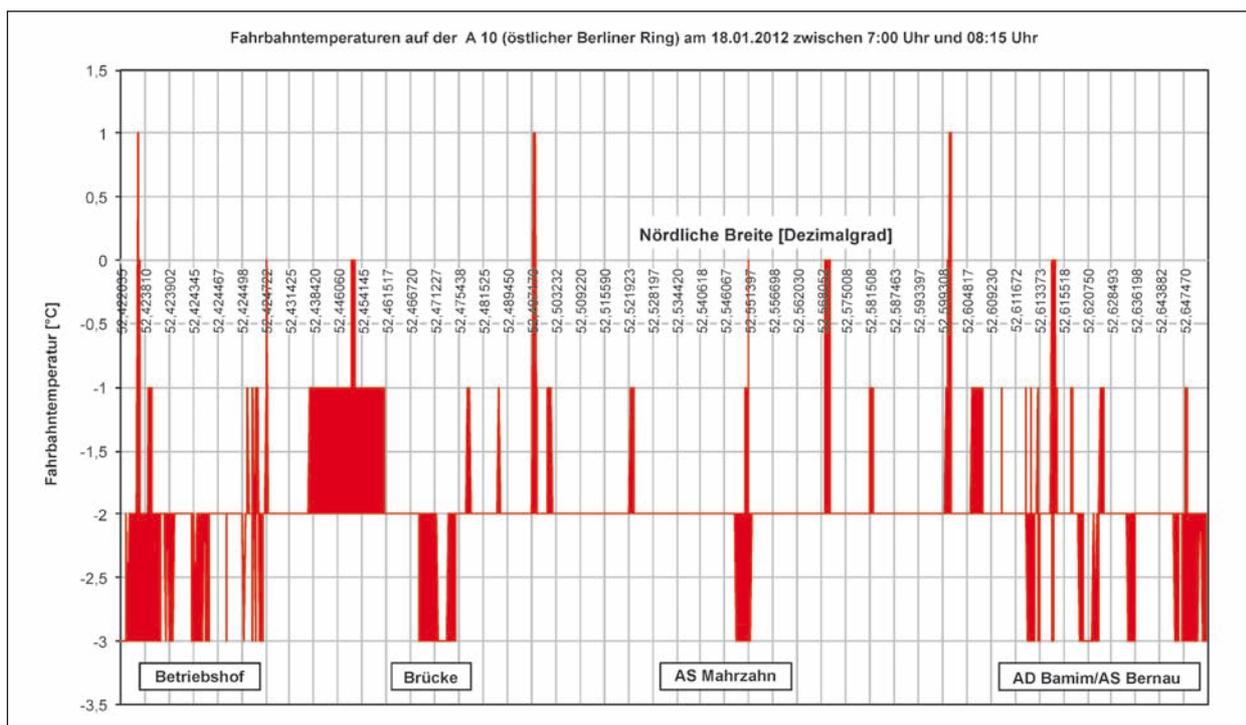


Bild 27: Beispiel für die mit dem Infrarot-Pyrometer gemessenen Fahrbahntemperaturen bei einer Einsatzfahrt

gen Temperaturen befindet sich erwartungsgemäß auf den Großbrücken bei Rüdersdorf (Mühlenfließbrücke, Kalkgrabenbrücke). Geringe Temperaturen wurden auch an Anschlussstellen und am AD Barnim gemessen, wo teilweise untergeordnete Fahrbahnen benutzt wurden. Die roten Flächen im Diagramm entstehen durch ständigen Wechsel in der gemessenen Temperatur. Dabei handelt es sich zumeist um eine Temperaturspanne von 1 K.

In einzelnen Fällen wurden kurzzeitig Temperatursprünge bis zu 3 K nach oben festgestellt. Dafür gibt es im Moment noch keine Erklärung. Das Phänomen muss weiter beobachtet werden, um festzustellen, ob sich daraus Sicherheitsrisiken ergeben.

7.2.2 Messung der Fahrbahnoberflächen-temperatur durch stationäre Sonden

Als zweite Temperaturkomponente gehen die an den GMA gemessenen T_{F0} - und prognostizierten T_{F3} -Temperaturen in die Berechnung ein. Dabei ist es unter Anderem interessant, welche Fahrbahntemperaturen an Straßenwetterstationen mit unterschiedlicher Charakteristik gemessen werden. Die Grafik (Bild 28) zeigt den Temperaturverlauf am 3.2.2012 im Vergleich der Straßenwetterstationen Spreeau und Rüdersdorfer Brücke auf der A 10 im Bereich der AM Erkner. Die Ähnlichkeiten im

Tagesgang sind sehr deutlich. Die Fahrbahntemperaturen auf der Brücke sind nicht zwangsläufig niedriger, als auf der normalen Strecke (Bild 28).

7.3 Vergleich zwischen praktisch angewandten und berechneten Streudichten

Parallel zur Aufzeichnung der berechneten Streudichten waren die mit dem Streudatenmanagementsystem (SDM) der Firma Küpper-Weisser aufgezeichneten Streudichten verfügbar. Sie wurden in der Winterdienstsaison 2011/12 separat ausgelesen und manuell mit den berechneten Streudichten des Versuchssystems synchronisiert, um den Vergleich zu ermöglichen. Die Synchronisation der Aufzeichnungsdaten erfolgte über den Zeitpunkt der Aufzeichnungen (Zeitstempel).

Im Versuchssystem werden die berechneten Daten im Sekundentakt aufgezeichnet. Die Aufzeichnungen im SDM erfolgen ereignisbezogen bzw. in längeren Zeittakten. Im Durchschnitt wird alle 20 bis 30 Sekunden ein Datensatz aufgezeichnet.

Die Wahl der Streudichte erfolgt bei den Einsätzen der Autobahnmeisterei Erkner durch den Fahrer ohne Nutzung des Infrarot-Pyrometers. Die Daten des Infrarot-Pyrometers werden allerdings im Rah-

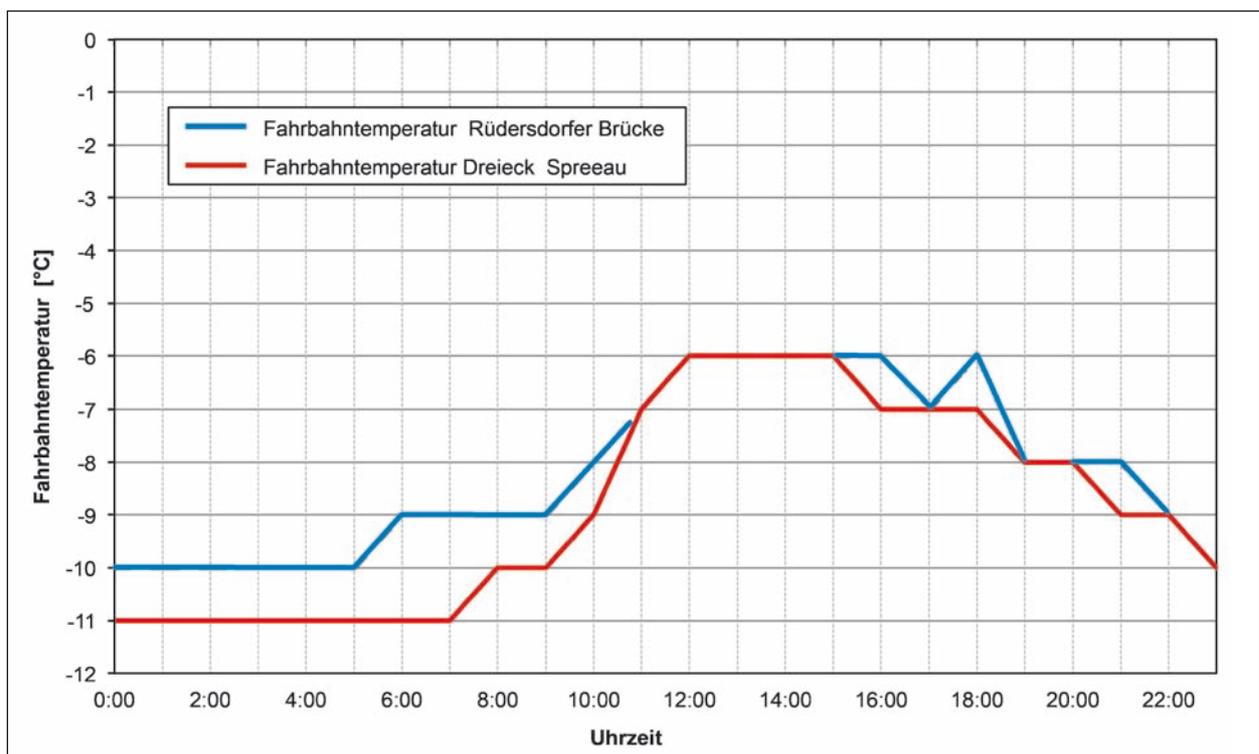


Bild 28: Vergleich der mit Fahrbahnsonden gemessenen Temperaturen an zwei Straßenwetterstationen am 03.02.2012

men der Versuche bei der automatischen Streudichteberechnung in die Berechnung einbezogen.

Die Vergleiche der Streudichten waren nach der Winterdienstsaison 2011/13 nur bei einem kleinen Teil der aufgezeichneten Fahrten möglich, da aus unterschiedlichen Gründen in mehreren Fällen einzelne Primärdaten für die Anwendung des Algorithmus nicht übertragen worden sind (s. Kapitel 8, Punkte 4 und 5.).

Ein Beispiel für den Vergleich von Daten ist in Bild 29 dokumentiert. Es handelt sich um die Aufzeichnungen einer Einsatzfahrt, die am 09.02.2012 zwischen 20:09 und 21:05 südlich der Autobahnmeisterei Erkner auf der A 10 und einem kurzen Abschnitt der A 12 durchgeführt wurde. Die gemessenen Fahrbahntemperaturen lagen zwischen -4 und -7 °C bei einer Luftfeuchtigkeit von 64 %. Beim Einsatz war der Himmel noch bewölkt. Es war jedoch klarer Himmel prognostiziert. Damit war bei weiter sinkenden Temperaturen mit Reifbildung zu rechnen. Insofern war es geboten, eine präventive Streuung durchzuführen.

Nach den Aufzeichnungen wurde bei der manuellen Streudichteeinstellung zwischen 10 und 20 g/m² variiert. An Abschnitten, die sich nicht im Verantwortungsbereich der AM Erkner befinden, wurde

die Streumaschine ausgeschaltet. Die automatisch berechnete Streudichte wird häufiger variiert. Sie liegt in einem Bereich zwischen 5 und 11 g/m². Nach den vorliegenden Daten der Wetterentwicklung wäre das als angemessen anzusehen. Bei den im Bild 29 dokumentierten Ergebnissen handelt es sich um ein Einzelbeispiel.

8 Schlussfolgerungen aus den Versuchsfahrten 2011/12

Aus den Versuchsfahrten in der Winterdienstsaison 2011/12, waren folgende Schlussfolgerungen zu ziehen:

1. Es ist mit vertretbarem technischen Aufwand möglich, Wetterprognosedaten in die Berechnung und Steuerung der Streudichte auf Einsatzfahrzeugen einzubeziehen.
2. Die Einbeziehung von Temperaturprognosen lieferte für die berechnete Streudichte plausible Ergebnisse.
3. Die Betriebssicherheit des Systems ist von mehreren Einzelkomponenten abhängig, deren stabile Funktion noch verbessert werden muss.

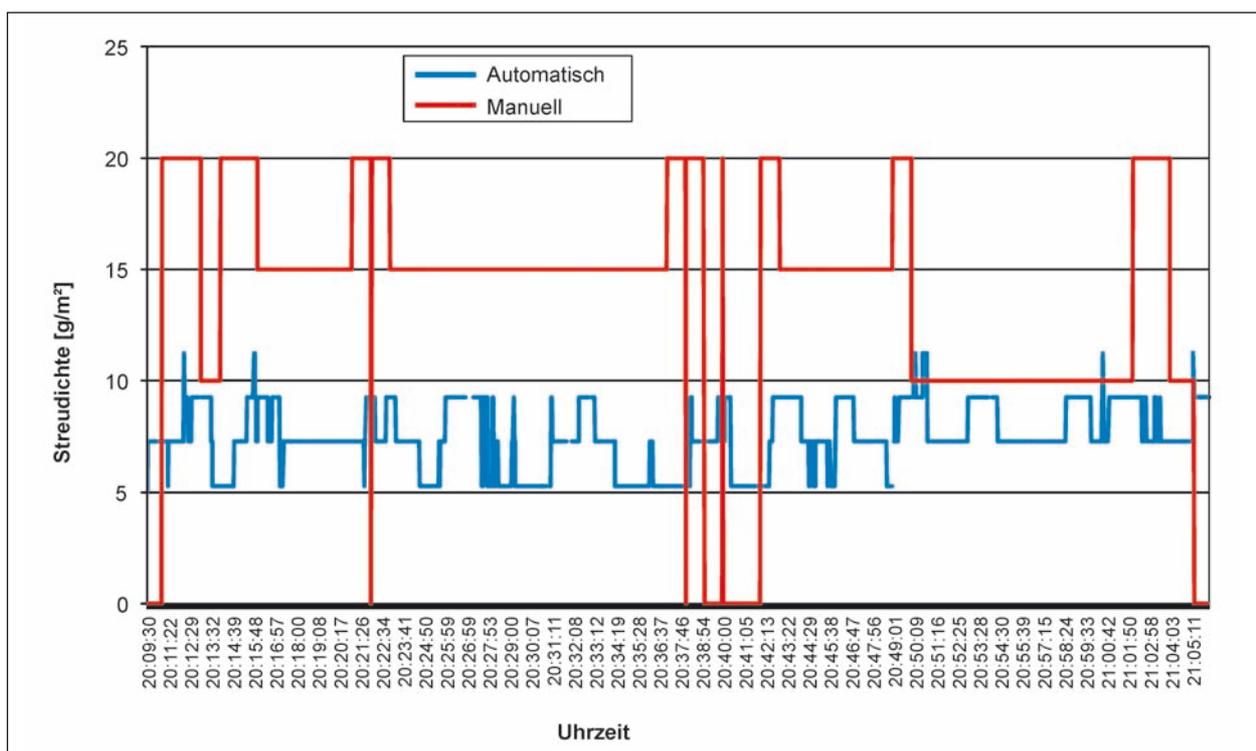


Bild 29: Vergleich der manuell eingestellten Streudichte mit der automatisch berechneten Streudichte bei einer Einsatzfahrt am 09.02.2012 im Bereich der Autobahnmeisterei Erkner

4. Besondere Probleme bereitet die stabile Übertragung der Daten über das D2-Mobilfunknetz. Zur Lösung dieses Problems wurden in der kommenden Saison versuchsweise Kfz-Außenantennen eingesetzt. Die Empfangsstärke im Streckenverlauf wird gemessen und mit einem Datenlogger aufgezeichnet.
5. Die Software zur Berechnung der Streudichte musste dahingehend verbessert werden, dass die fehlerhafte Interpretation von Eingangsdaten ausgeschlossen wird.
6. Die Einbeziehung weiterer verfügbarer Eingangsdaten in die Berechnung der Streudichte erschien sinnvoll.
7. Die in der ersten Wintersaison gesammelten Daten waren noch nicht ausreichend, um die Qualität der errechneten Daten zu beurteilen.

9 Vorbereitung der Winterdienstsaison 2012/13

9.1 Ausrüstung der Einsatzfahrzeuge

Die Hardware für vier Fahrzeuge stand mit Beginn der Winterdienstsaison 2012/13 zur Verfügung. Die Bordcomputer wurden am 23.10.2012 und am 30.10.2012 in jeweils zwei Fahrzeuge der Autobahnmeistereien Erkner in Brandenburg und Werl in Nordrhein-Westfalen eingebaut. An jeweils einem Fahrzeug pro Standort wurde eine zusätzliche Antenne (Scheibenantenne oder Stabantenne) zur Verbesserung des GSM-Empfanges installiert.

9.2 Erweiterung der Funktionen der Streudichteoptimierung

Neben der Fahrbahntemperatur ist die Wasserfilmdicke für die Wahl der optimalen Streudichte entscheidend. Die stündlichen Punktvorhersagen des DWD enthalten auch Prognosen zu dem erwarteten Straßenzustand. Daraus ist eine Prognose der Flüssigkeitsmenge abzuleiten, die auf der Fahrbahn vorhanden sein wird. Auch für die trockene Fahrbahn wird eine Wasserfilmdicke angesetzt, da der Algorithmus so ausgerichtet ist, dass nur bei vorhandenem Wasserfilm ein sinnvoller Wert berechnet werden kann. Ob die dabei errechnete Streudichte ausgebracht werden soll (zumeist nur 5 g/m^2) oder die Streumaschine ausgeschaltet wird

Straßenzustand (SZ)	Code	Wasserfilmdicke [mm]
trocken	0	0,01
feucht	1	0,02
nass	2	0,06
Reif	3	0,02
Schnee	4	0,10
Eis	5	0,06

Tab. 14: Zuordnung von Wasserfilmdicken zu Straßenzuständen

kann nur vom Einsatzfahrer entschieden werden. Die Prognose der Flüssigkeitsmenge wird bei einsetzenden Niederschlägen sehr ungenau sein. Sie stellt aber bei zeitnahen Präventivstreuungen eine sinnvolle Differenzierung gegenüber erwarteten Fahrbahnzuständen mit geringer Feuchtigkeit (Feucht, Reif) dar. Bei einsetzendem Niederschlag muss außerdem ohnehin erneut gestreut werden.

Tabelle 14 stellt eine Möglichkeit der Zuordnung von Wasserfilmdicken zu Straßenzuständen dar. Die Tabellenwerte für die Wasserfilmdicke können nach weiteren Erfahrungen unkompliziert angepasst werden.

Alternativ können auch gemessene Wasserfilmdicken in die Berechnung einbezogen werden, soweit dafür Messtechnik zur Verfügung steht, die realistische Werte liefert.

Eine weitere technische Erweiterung der Streudichteoptimierung besteht in der Einbeziehung gemessener Restsalzmengen in die Berechnung. Auch dazu befindet sich Sensortechnik in der Entwicklung, die aber im Moment noch nicht einsatzreif ist.

10 Ergebnisse der Feldversuche im Winter 2012/13

10.1 Versuchsumfang

Aufzeichnungen von Streutouren erfolgten in Erkner vom 13.11.2012 bis zum 13.02.2013. Aus der Autobahnmeisterei Werl liegen Touraufzeichnungen vom 13.11.2012 bis zum 17.01.2013 vor.

Die technischen Systeme funktionierten ohne wesentliche Störungen. An einem der beiden Fahrzeuge der Autobahnmeisterei Erkner war das Infrarot-Pyrometer für die laufende Messung der Fahr-

bahntemperatur so positioniert, dass die Temperaturmessung offenbar durch Auspuffgase beeinträchtigt wurde. Das wurde bei der Auswertung der Daten berücksichtigt.

10.2 Auswertungssystematik

Mit Beginn der Winterdienstsaison 2012/13 standen folgende Auswertungsdateien zur Verfügung:

1. „prognosis-JJJJMMDD-hhmmss.csv“

Erklärung:

JJJJ	Jahr als vierstellige Zahl,
MM	Monat als Zahl mit führender Null,
DD	Tag als Zahl mit führender Null,
hh	Stunde als Zahl mit führender Null,
mm	Minute als Zahl mit führender Null,
ss	Sekunde als Zahl mit führender Null.

Datum und Zeit in der Dateibezeichnung geben die Startzeit der Aufzeichnung einzelner Touren an.

Die unbearbeiteten Prognose-Dateien enthalten die in Tabelle 15 aufgeführten Datenspalten.

Diese Daten werden einmal pro Sekunde erhoben bzw. berechnet.

2. „vpad-JJJJMMDD-hhmmss.csv“

Die vpad-Dateien enthalten die aus den Bedienpulten der Streumaschinen übernommenen Daten.

Die unbearbeiteten Prognose-Dateien enthalten die in Tabelle 16 aufgeführten Datenspalten.

Die Daten aus dem Bedienpult stehen alle 2 Sekunden als Datensatz zur Verfügung und werden demgemäß aufgezeichnet.

3. dwd-daten.csv.txt

Zur Kontrolle der exakten Übernahme der Wetterdaten in den Berechnungsalgorithmus und zur Beurteilung der Prognosequalität wurden die Daten der Punktvorhersage für die einbezogenen Wetterstationen auch separat ausgewertet. Die Prognosen der DWD-Punktvorhersagen erfolgen stündlich.

Es standen die in Tabelle 17 aufgeführten Daten zur Verfügung.

Für die Verarbeitung im Dosierungsalgorithmus werden folgende Mess- und Prognosedaten (3h-Prognose) verwendet: Lfd. Nr. 01, 02, 03, 06, 08.

Bezeichnung	Einheit	Beschreibung
Systemzeit	Datum/Uhrzeit	Mitteleuropäische Winterzeit
GPS-Zeit	Datum Uhrzeit	Greenwich Mean Time (GMT)
GPS-Längengrad	° E	Grad östlicher Länge, Angabe mit 9 Stellen nach dem Komma
GPS-Breitengrad	° N	Grad nördlicher Breite, Angabe mit 9 Stellen nach dem Komma
GPS-Höhe über dem Meeresspiegel	m über NN	Daten werden nicht erhoben
GPS-Geschwindigkeit	km/h	Geschwindigkeit des Einsatzfahrzeuges
Temperatur T_F	°C	aktuelle, vom Fahrzeug gemessene Fahrbahnoberflächentemperatur
Temperatur T_{F0}	°C	Prognosetemperatur 0 Stunden (DWD-Punktvorhersage aus Datenfernübertragung)
Temperatur T_{F3}	°C	Prognosetemperatur 3 Stunden (DWD-Punktvorhersage aus Datenfernübertragung)
Korrekturwert	K	Lokaler Temperaturkorrekturwert zur Berücksichtigung von baulichen Gegebenheiten und betrieblichen Erfahrungen
Straßenzustandsprognose SZ	-	Codierte Straßenzustandsprognose (3-Stunden-Wert) nach Schema des DWD (Tabelle 14)
Kalkulierte Streudichte A	g/m ²	Rechenwert unter Berücksichtigung der Phasengrenzlinie (chemisch-physikalische Zusammenhänge)
Kalkulierte Streudichte B	g/m ²	Qualifizierter Rechenwert unter zusätzlicher Berücksichtigung der Liegezeitverluste
Kalkulierte Streudichte C	g/m ²	Optimierte Streudichte unter Berücksichtigung von A, B und der Restsalzmengen

Tab. 15: Aufzeichnungs- und Berechnungsdaten des Bordcomputers zur Berechnung der optimalen Streudichte

Mit der Punktwetterprognose des DWD werden die Prognosedaten für Prognosezeiträume von 1 bis 20 Stunden bereitgestellt. Für die Berechnung der optimalen Streudichte für präventive Streuungen wurde mit dem Prognosezeitraum 3 Stunden gerechnet, da dieser Zeitraum der Umlaufzeit der Winterdienstfahrzeuge im Falle von Schneeniederschlägen entspricht. Nach diesem Zeitraum besteht bei Erfordernis die technologische Möglichkeit eines weiteren Umlaufes. Die Streudichte ist theoretisch so bemessen, dass auch bei einsetzendem Niederschlag der Zeitraum bis zum nächsten Einsatz abgesichert ist.

Vor der Auswertung müssten die Primärdateien bearbeitet und umgewandelt werden. In die Prognosedateien wird dabei ein Berechnungsalgorithmus für die Wasserfilmdicke eingefügt, die aus dem prognostizierten Straßenzustand ermittelt wird. Bei der Bearbeitung der automatisch aufgezeichneten Daten müssen auch die Datensätze gelöscht werden, die außerhalb der offiziellen Tour aufgezeichnet wurden.

Zur Auswertung und zum Vergleich der eingestellten Streudichte mit den Berechnungsdaten des Algorithmus zur Optimierung der Streudichte wer-

Bezeichnung	Einheit	Beschreibung
Systemzeit	Datum/Uhrzeit	Mitteleuropäische Winterzeit
Streudichte	g/m ²	Vom Bediener eingestellte oder vom Infrarot-Pyrometer ermittelte Streudichte
Befeuchtungsanteil	%	z. B. 30 $\hat{=}$ FS 30
Streubreite	m	
Geschwindigkeit	km/h	Geschwindigkeit des Einsatzfahrzeuges
Streukilometer	km	kumulierte Streulänge des Einsatzes
Fahrkilometer	km	kumulierte Fahrlänge des Einsatzes
Temperatur T _F	°C	aktuelle, vom Fahrzeug gemessene Fahrbahnoberflächentemperatur
Kalkulierte Streudichte C	g/m ²	Optimierte Streudichte unter Berücksichtigung von A, B und der Restsalzmengen

Tab. 16: Aufzeichnungsdaten aus dem Bedienpult der Streumaschine

Lfd. Nr.	Feldname	Beschreibung
01	label	Kennung der GMA
02	updated	Datum und Zeit des letzten Updates des Eintrages
03	timestamp	Zieldatum und Zielzeit der Vorhersage
04	temp_atmos	Lufttemperatur in ganzen Grad Celsius
05	temp_dewpt	Taupunkttemperatur in ganzen Grad Celsius
06	temp_	Belagtemperatur in ganzen Grad Celsius ...
07	state_	Straßenzustand nach Tabelle unten ...
08	_stnd	... für Hauptstrecke (Standard)
09	_minr	... für wenig befahrene Strecken
10	_shad	... für Schatten
11	_urba	... für Stadtbereich
12	_brid	... für Brücken
13	effective_coverage	effektive Gesamtbedeckung in Achtel
14	precipitation_amount	Niederschlagsmenge in mm
15	precipitation_type	Niederschlagstyp nach Tabelle unten
16	wind_direction	Windrichtung in Zehnergrad, 36 für Nord, 99 für windstill und umlaufend
17	wind_speed_avg	mittlere Windgeschwindigkeit in km/h
18	wind_speed_max	Windböen in km/h

Tab. 17: Daten der DWD-Punktvorhersage

den die Prognose-Dateien mit den vpad-Dateien zusammengeführt. Die Synchronisation der Dateien erfolgt über die Systemzeit.

10.3 Auswertung ausgewählter Touren

10.3.1 Autobahnmeisterei Werl

Tour Werl 1

Datum	14.01.2013
Beginn der Aufzeichnungen:	07:50:32 Uhr
Ende der Aufzeichnungen:	11:16:57 Uhr
T_F Min:	-5 °C
T_F Max:	1 °C
T_{F0} Min:	-5
T_{F0} Max:	-5
T_{F3} Min:	-5
T_{F3} Max:	-4
Straßenzustandsprognose:	4-Schnee
Zahl der Datensätze	12.381
Bezeichnung der Primärdatei	prognose-201301 14-062303.rtf

Der gemessene und prognostizierte Temperaturverlauf in einem Teilabschnitt der Tour ist in Bild 30 dargestellt.

Aus den in Bild 30 und Bild 31 dargestellten Temperaturverläufen wird deutlich, dass eine relativ große

Differenz zwischen der am Fahrzeug gemessenen Fahrbahntemperatur und den Temperaturen aus der Punktvorhersage besteht. In die Berechnung geht allerdings nur die relative Veränderung $\Delta T = T_{F0} - T_{F3}$ ein. Sie beträgt in diesem Fall maximal 1 °C.

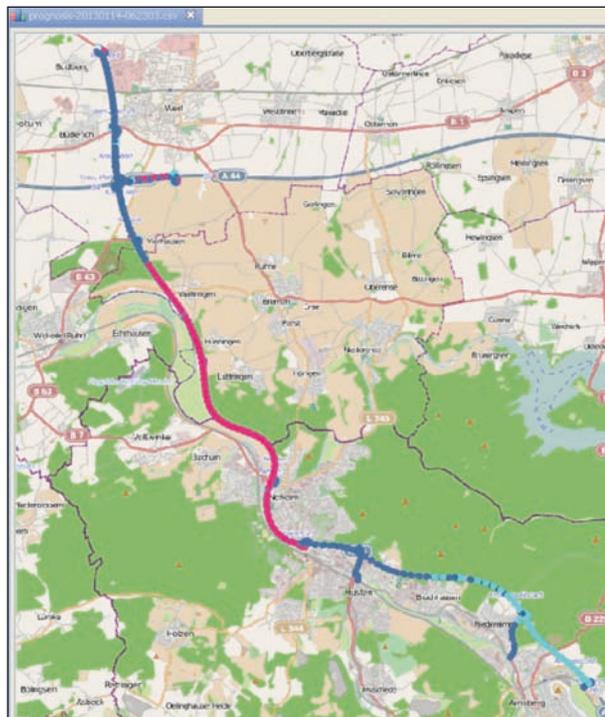


Bild 31: Fahrbahntemperaturen im Verlauf der Einsatztour (Hellblau -3 °C, Mittelblau -2 °C, Rot -1 °C)

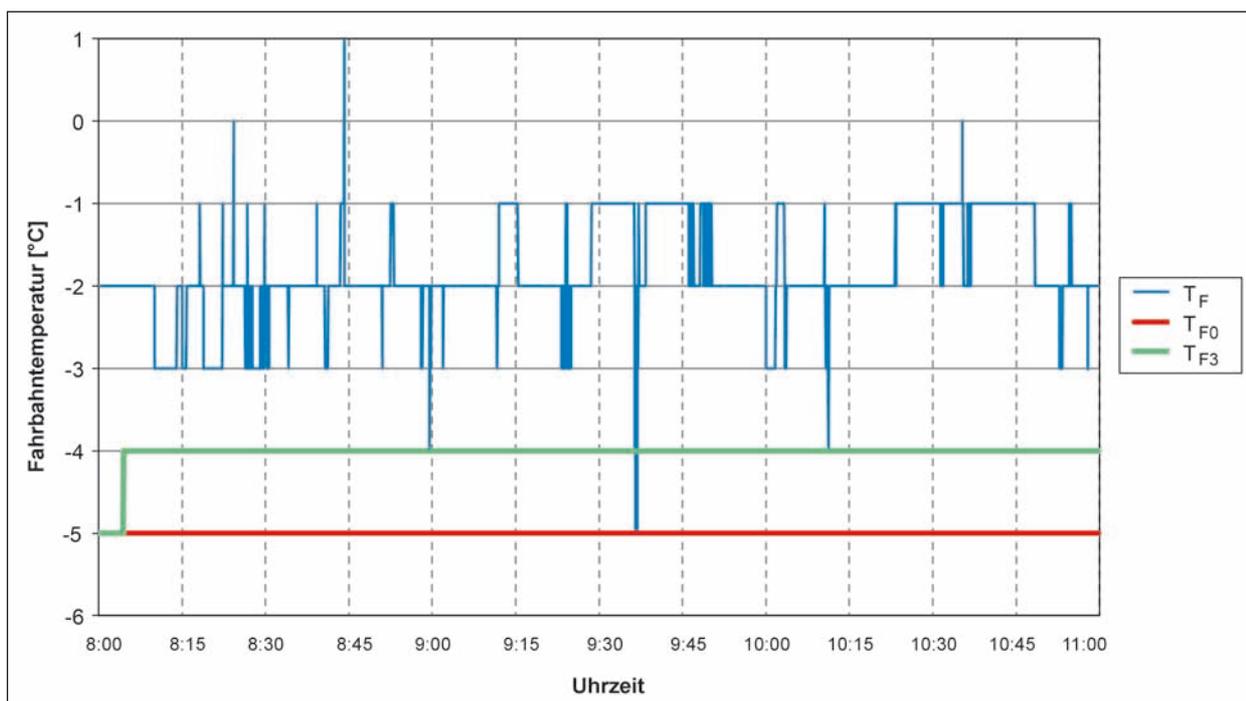


Bild 30: Temperaturverläufe während der Tour Werl 1; T_F – Fahrbahntemperatur aus Messung mit dem Infrarot-Pyrometer am Fahrzeug, T_{F0} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 0 h, T_{F3} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 3 h Achse Temperatur

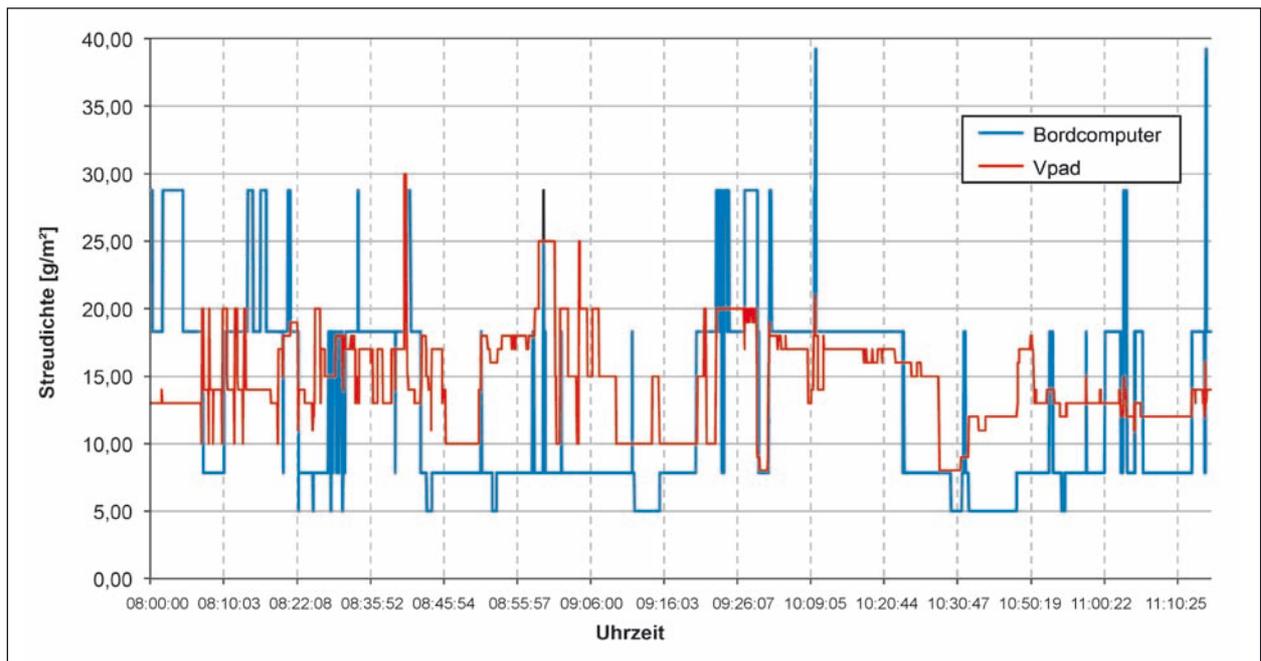


Bild 32: Gegenüberstellung der praktizierten Streudichte (Vpad) bei der Tour Werl 1 mit der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte

Die durchschnittliche, mit dem Bordcomputer berechnete Streudichte beträgt $13,9 \text{ g/m}^2$. Die vom Vpad erfasste Streudichte, die mit „Infrarot-Pyrometer“ temperaturabhängig ermittelt wurde, betrug durchschnittlich $14,5 \text{ g/m}^2$.

Bei der durch den Algorithmus errechneten Streudichte werden kurzzeitig mehrmals nur 5 g/m^2 ausgegeben (Bild 32). Das hat seine Ursache im kurzzeitigen Anstieg der gemessenen Temperatur. Bei fallender Berechnungstemperatur (z. B. von $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $-4 \text{ }^\circ\text{C}$) und einer Wasserfilmdicke von $0,10 \text{ mm}$ erhöht sich die berechnete Streudichte um 10 g/m^2 . Das ist direkt aus dem Phasendiagramm abzuleiten und hat somit seinen Eingang in den Berechnungsalgorithmus gefunden (siehe auch Bild 14). Der Berechnungsalgorithmus ist darauf ausgerichtet, dass durch die Taustoffmenge eine komplette Verflüssigung der Glätteschicht bewirkt wird.

Bei Schneefall ist es im ersten Schritt jedoch ausreichend, dass „Schneemulm“ erzeugt wird. Dazu genügt eine geringere Taustoffmenge. „Schneemulm“ bleibt gut räumfähig, wird auch bei stärkerem Verkehr nicht festgefahren und bildet keine Glätteschicht.

Derzeit ist jedoch nicht bekannt, wie viel Taustoff in Abhängigkeit von Schneemenge und Temperatur zur Erzeugung von „Schneemulm“ erforderlich ist. Untersuchungen dazu werden in dem von der BAST beauftragten Forschungsprojekt „Optimierung der

auftauenden Streustoffe und der Streustoffausbringung“ vorgenommen, das im Jahr 2015 abgeschlossen wird.

Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen könnten problemlos in den Algorithmus übernommen werden.

Tour Werl 2

Datum	14.01.2013
Beginn der Aufzeichnungen:	11:40:20 Uhr
Ende der Aufzeichnungen:	12:57:25 Uhr
T_F Min:	$-4 \text{ }^\circ\text{C}$
T_F Max:	$1 \text{ }^\circ\text{C}$
T_{F0} Min:	-4
T_{F0} Max:	-4
T_{F3} Min:	-3
T_{F3} Max:	-3
Straßenzustandsprognose:	4-Schnee
Zahl der Datensätze	4.625
Bezeichnung der Primärdatei	prognosis-201301 14-112626.csv

Bei der Auswertung der Temperaturverläufe zeigt sich, dass die am Fahrzeug gemessene Temperatur T_F fast über den gesamten Zeitraum 3 K über der Temperatur T_{F0} liegt, die an den Fahrbahnsonden der Straßenwetterstationen gemessen wird (Bild 33, Bild 34). Das kann seine Ursache in Messungenauigkeiten der Geräte haben. Darüber

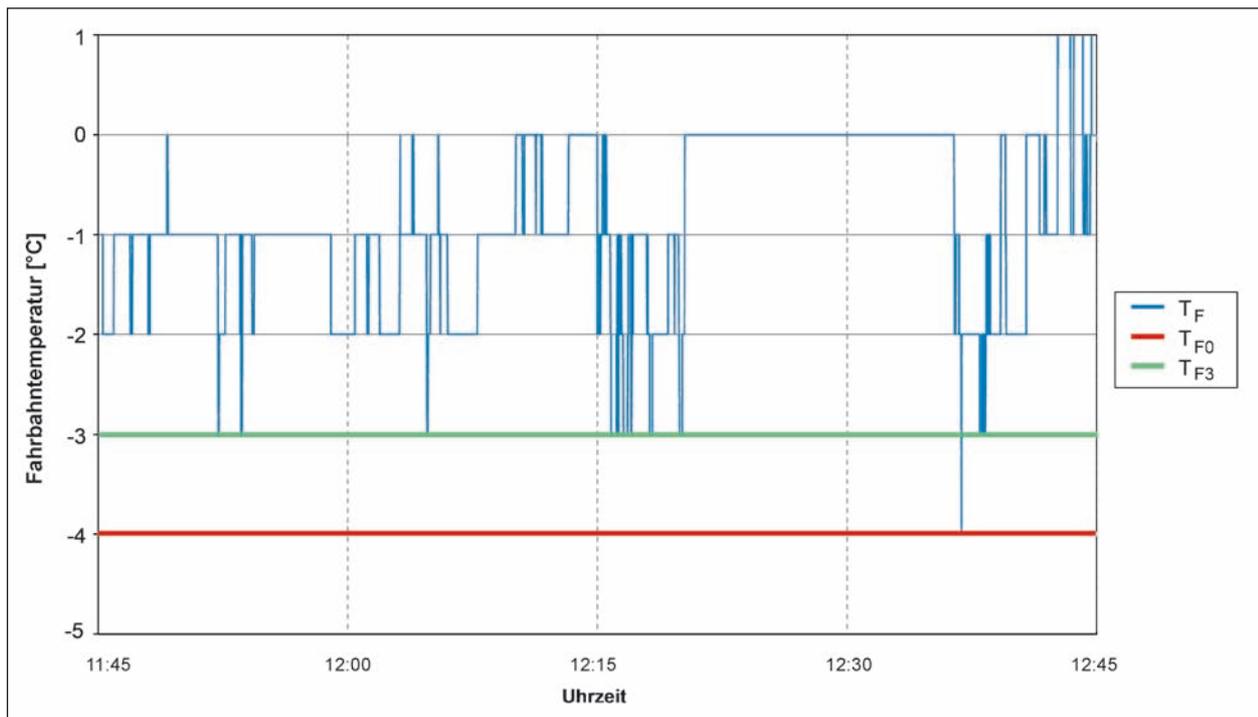


Bild 33: Temperaturverläufe während der Tour Werl 2; T_F – Fahrbahntemperatur aus Messung mit dem Infrarot-Pyrometer am Fahrzeug, T_{F0} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 0 h, T_{F3} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 3 h

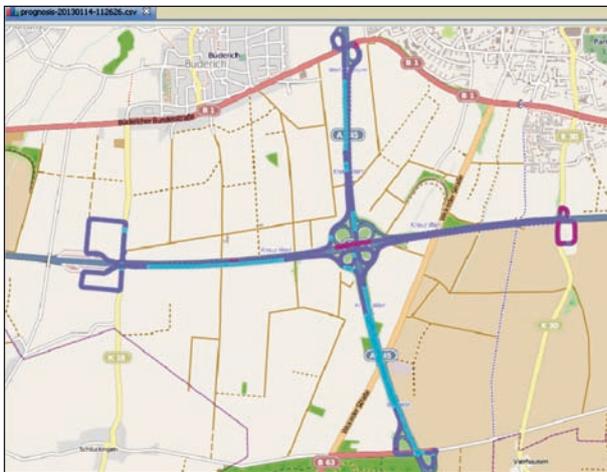


Bild 34: Fahrbahntemperaturen im Verlauf eines Teilbereiches der Einsatztour (Hellblau -3 °C, Mittelblau -2 °C, Weinrot -1 °C, Rot 0 °C)

hinaus muss berücksichtigt werden, dass die Messungen mit dem am Fahrzeug installierten Infrarot-Pyrometer in oder nahe der Rollspur erfolgen, während die Fahrbahnsonden in der Fahrbahnmitte, der am wenigsten befahrenen Spur positioniert sind. Zwischen diesen Messpunkten können Temperaturunterschiede von 1 bis K auftreten. Es kann auch von Bedeutung sein, dass die für die Punktvorhersage maßgebliche Straßenwetterstation einige Kilometer vom Autobahnkreuz Werl entfernt ist. Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Temperaturen

auf die Höhe der Streudichte zu verdeutlichen, wurden neben dem aufgezeichneten Streudichteverlauf (Bild 35) zwei weitere Streudichteverläufe mit einer Simulationsrechnung ermittelt. In Bild 36 ist der Streudichteverlauf dargestellt, wenn sich die Temperatur um K verringert. In Bild 37 wird eine um 2 K verringerte Temperatur angenommen.

Der in Bild 36 dargestellte Verlauf der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte kommt der praktizierten Streudichte am nächsten. Es ist allerdings eine wesentlich stärkere Differenzierung der Werte zu beobachten. Große Sprünge in der errechneten Streudichte treten insbesondere dann auf, wenn sich mindestens zwei Eingangswerte gleichzeitig oder annähernd gleichzeitig ändern.

Tour Werl 3

Datum:	14.01.2013
Beginn der Aufzeichnungen:	16:55:00 Uhr
Ende der Aufzeichnungen:	19:15:15 Uhr
T_F Min:	-4 °C
T_F Max:	1 °C
T_{F0} Min:	-4 °C
T_{F0} Max:	-4 °C
T_{F3} Min:	-4 °C
T_{F3} Max:	-4 °C

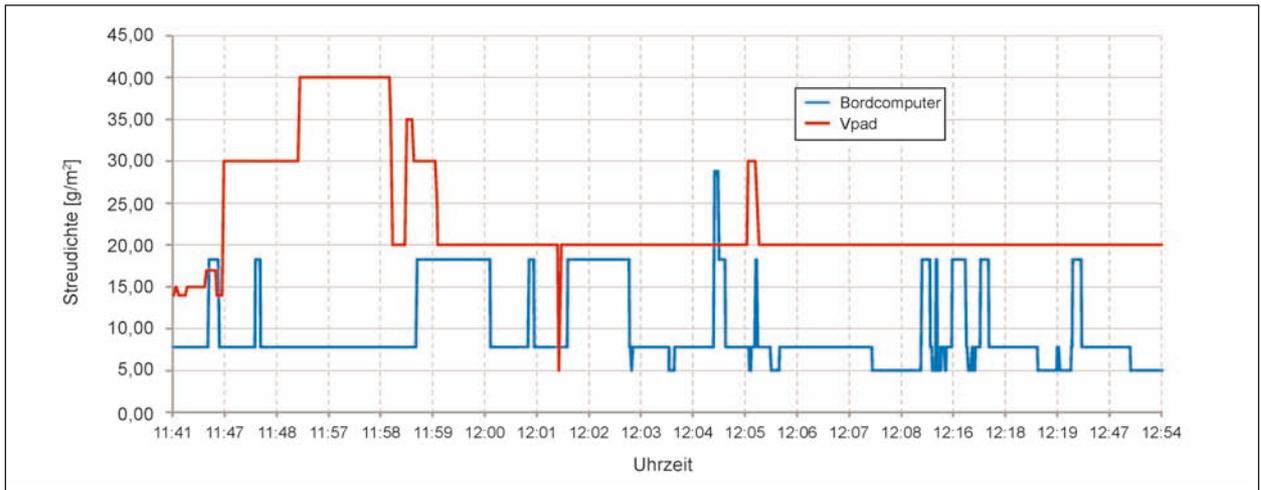


Bild 35: Gegenüberstellung der praktizierten Streudichte (Vpad) bei der Tour Werl 2 mit der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte

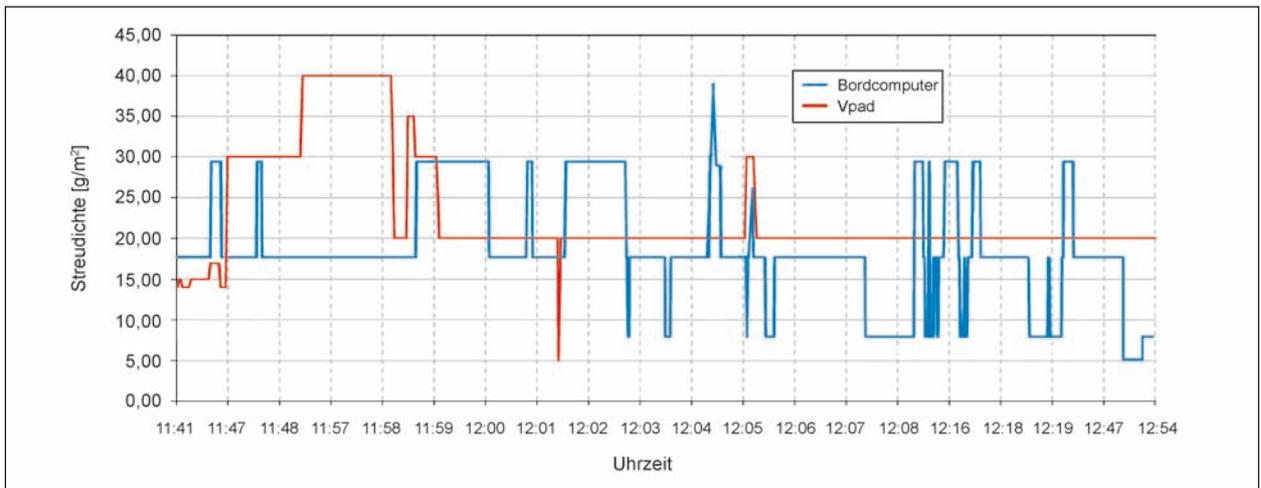


Bild 36: Gegenüberstellung der praktizierten Streudichte (Vpad) bei der Tour Werl 2 mit der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte (Absenkung der Berechnungstemperatur um 1 K)

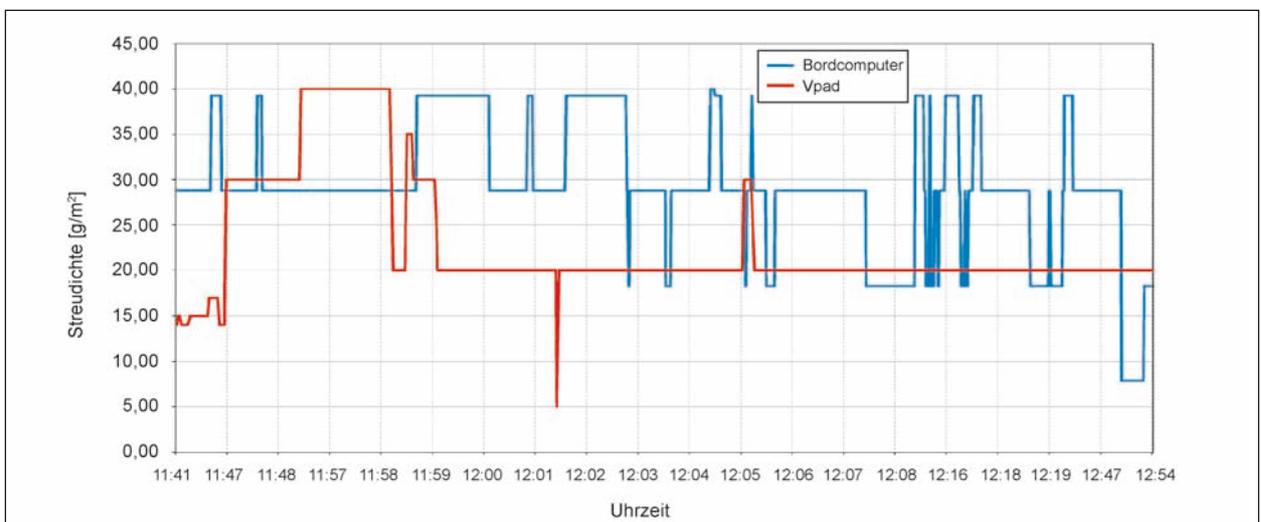


Bild 37: Gegenüberstellung der praktizierten Streudichte (Vpad) bei der Tour Werl 2 mit der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte (Absenkung der Berechnungstemperatur um 2 K)

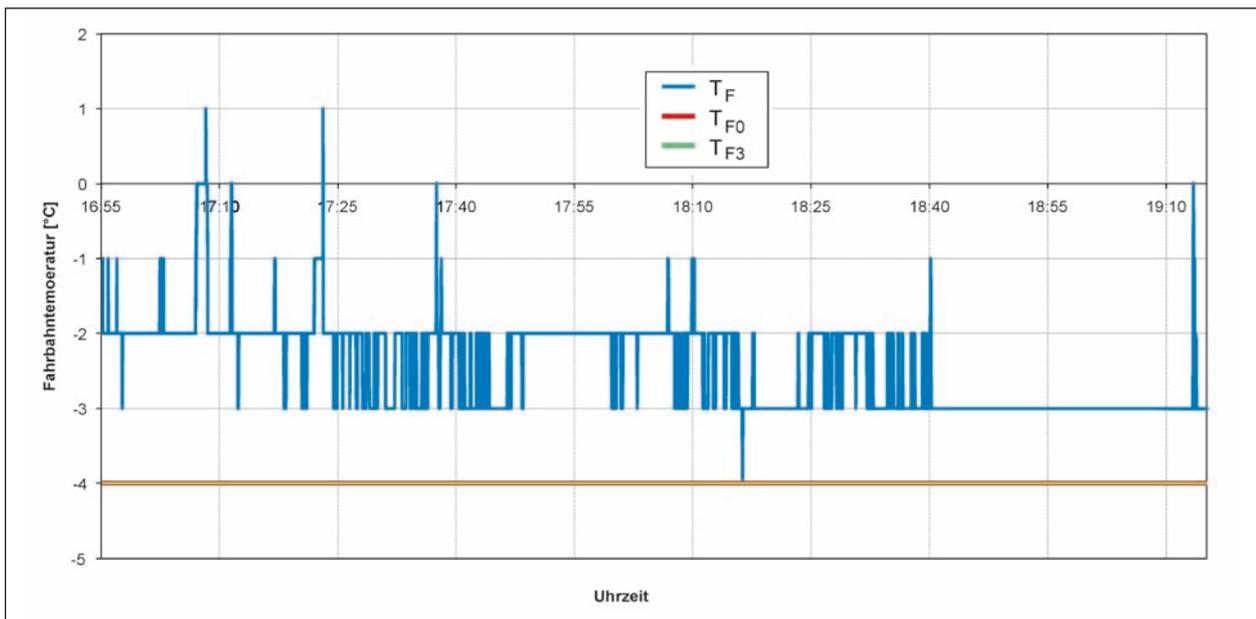


Bild 38: Temperaturverläufe während der Tour Werl 3; T_F – Fahrbahntemperatur aus Messung mit dem Infrarot-Pyrometer am Fahrzeug, T_{F0} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 0 h, T_{F3} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 3 h (im vorliegenden Fall $T_{F0} = T_{F3}$)

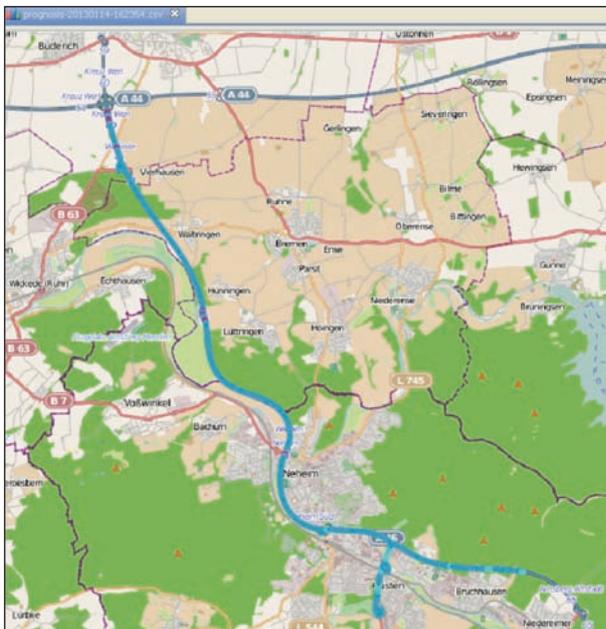


Bild 39: Fahrbahntemperaturen im Verlauf eines Teilbereiches der Einsatztour (Hellblau -3 °C, Mittelblau -2 °C, Weinrot -1 °C)

Straßenzustandsprognose: 0-trocken
 Zahl der Datensätze: 8.410
 Bezeichnung der Primärdatei: prognosis-201301
 14-162354.csv

Die mit dem Infrarot-Pyrometer gemessenen Temperaturen liegen bei -4 bis 1 °C (s. Bild 38). Der überwiegende Teil der Messungen ergab -2 bzw. -3 °C (s. Bild 39).

Der Verlauf der Streudichteeinstellung (V_{pad}) ist durch das temperaturabhängige Infrarot-Pyrometer-System geprägt. Die starken Ausschläge der Streudichte über 10 g/m² sind wahrscheinlich durch manuelle Veränderungen an der Streustufe verursacht oder es handelt sich um fehlerhaft aufgezeichnete Daten (s. Bild 40). Ein Zusammenhang mit der gemessenen Fahrbahntemperatur ist nicht zu erkennen. Mit dem Dosierungsalgorithmus wurde durchgängig eine Streudichte von 5 g/m² errechnet. Bei trockener oder feuchter Fahrbahn und gemessenen Temperaturen bis -4 °C ist das als ausreichend anzusehen.

Tour Werl 4

Datum:	15.01.2013
Beginn der Aufzeichnungen:	03:42:17 Uhr
Ende der Aufzeichnungen:	05:32:24 Uhr
T_F Min:	-8 °C
T_F Max:	-2 °C
T_{F0} Min:	-6 °C
T_{F0} Max:	-5 °C
T_{F3} Min:	-5 °C
T_{F3} Max:	-5 °C
Straßenzustandsprognose:	0-trockene Fahrbahn
Zahl der Datensätze	6.609
Bezeichnung der Primärdatei	prognosis-201301 14-204518.csv

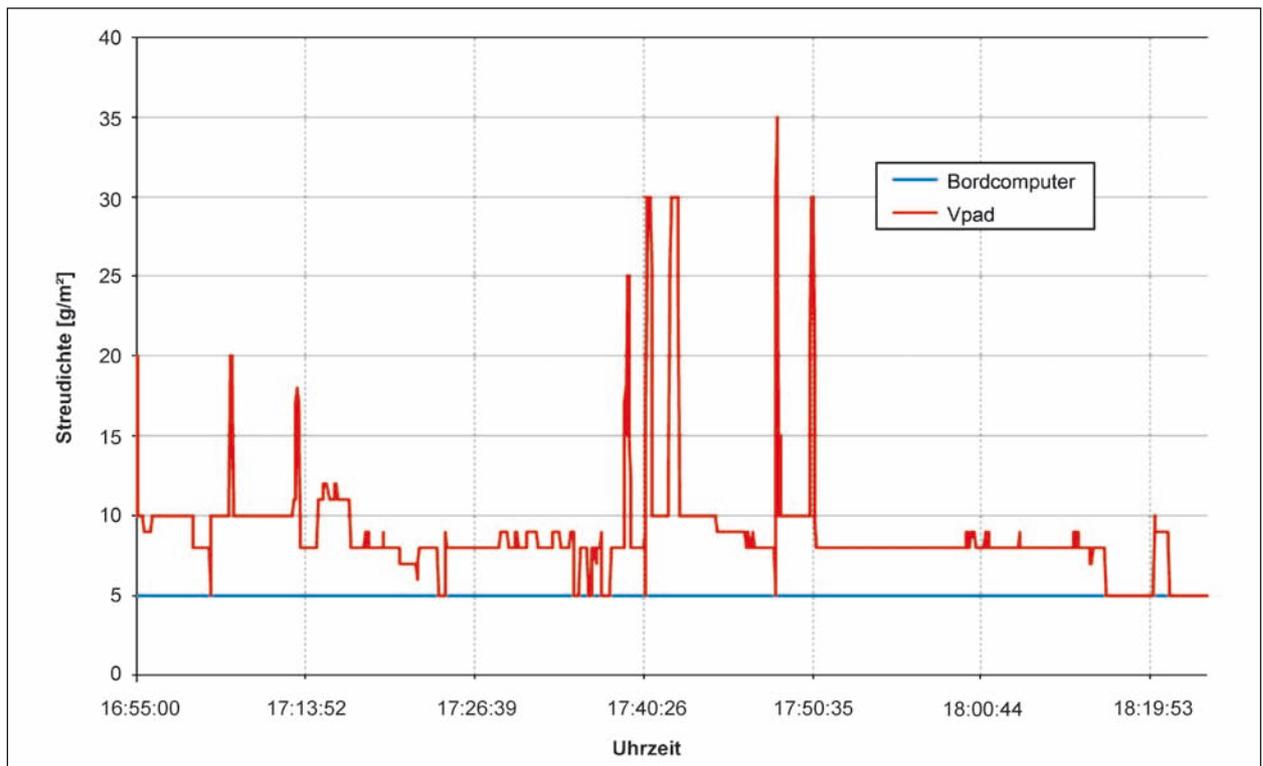


Bild 40: Gegenüberstellung der praktizierten Streudichte (Vpad) bei der Tour Werl 3 mit der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte

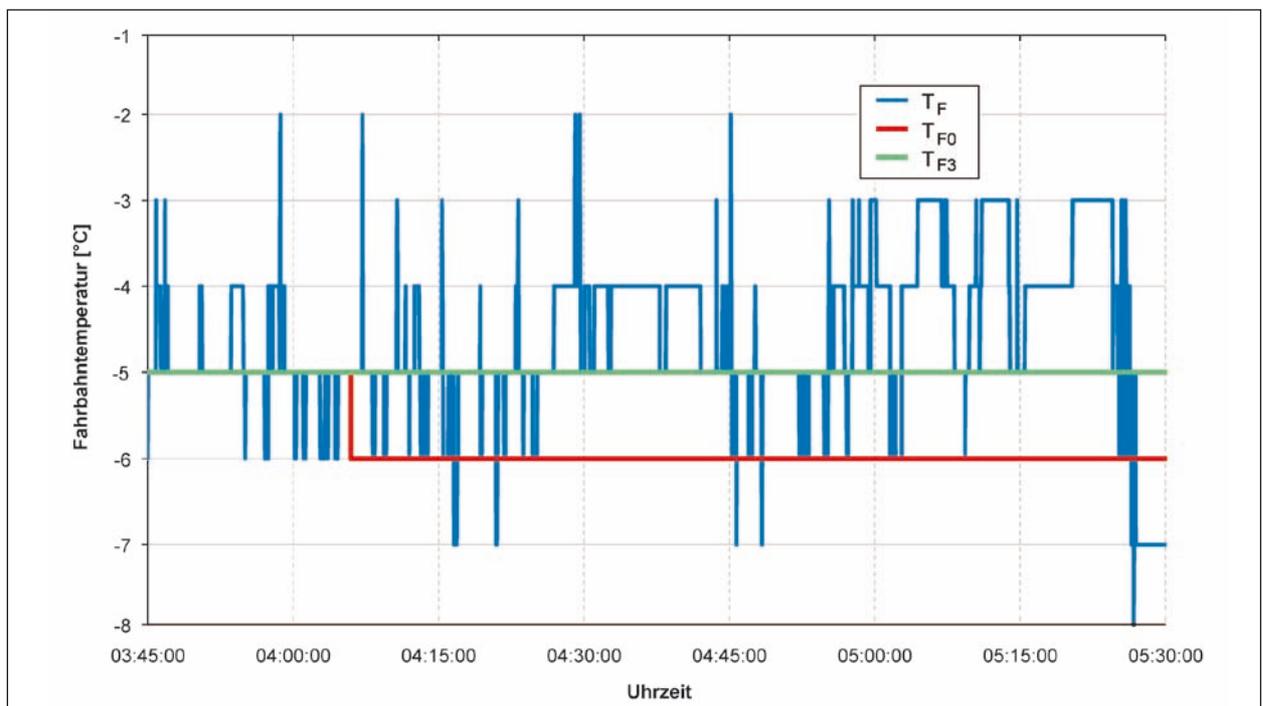


Bild 41: Temperaturverläufe während der Tour Werl 4; T_F – Fahrbahntemperatur aus Messung mit dem Infrarot-Pyrometer am Fahrzeug, T_{F0} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 0 h, T_{F3} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 3 h

Die am Fahrzeug gemessene Temperatur ist gleich oder liegt nahe der an den Sonden gemessenen Temperatur zum Zeitpunkt 0 (s. Bild 41). Im Mittelwert ist sie $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ höher. Auch hier kann

die Ursache darin liegen, dass die Temperatur mit dem Infrarot-Pyrometer in der Rollspur gemessen wird.

Die Tourgrafik zeigt wechselnde Fahrbahntemperaturen. Die hellblauen Abschnitte mit der niedrigsten Temperatur sind weitgehend identisch mit der Lage der zahlreichen Großbrücken auf diesem Autobahnabschnitt. Der vergrößerte Abschnitt zeigt, dass unterhalb der Brücke etwas höhere Temperaturen vorhanden sind (s. Bild 42).

Bild 43 zeigt eine deutliche Abweichung der Streudichten. In die mit dem Algorithmus errechnete Streudichte geht neben der Temperatur aus der Prognose auch ein, dass in drei Stunden noch eine tro-

ckene Fahrbahn zu erwarten ist. Nach dem Algorithmus würde erst ab einer Temperatur von -9 °C eine höhere Streudichte als 5 g/m^2 errechnet werden. Das erscheint auch in diesem Fall als gerechtfertigt.

Tour Werl 5

Datum: 15.01.2013
 Beginn der Aufzeichnungen: 08:39:50 Uhr
 Ende der Aufzeichnungen: 10:42:43 Uhr
 $T_{F\text{ Min}}$: -4 °C

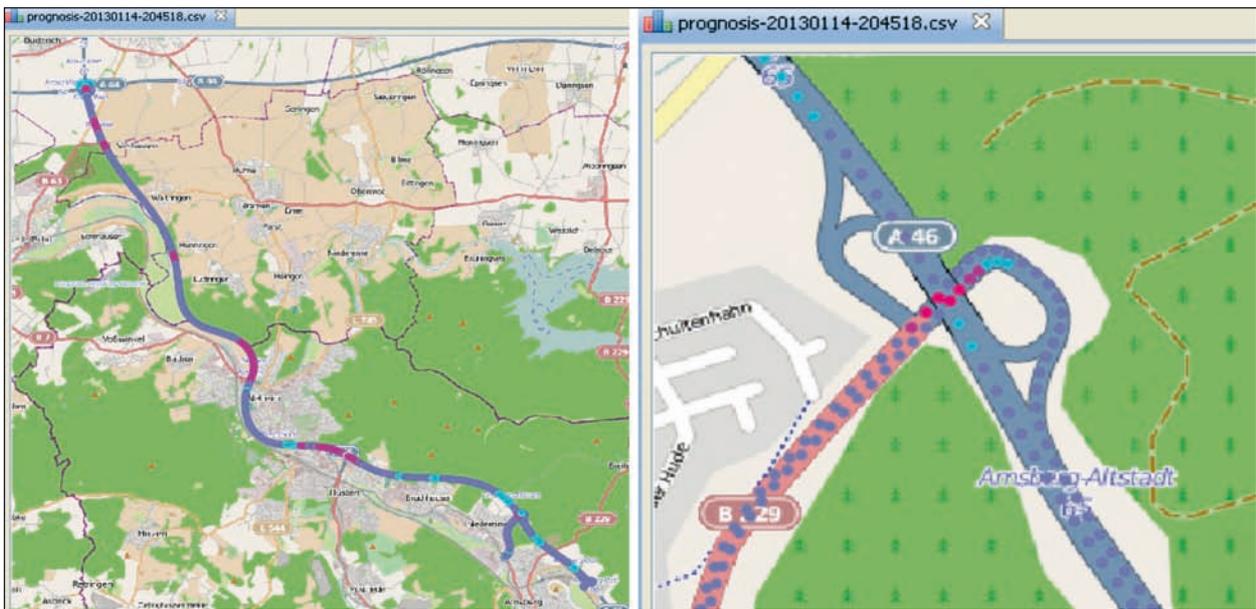


Bild 42: Fahrbahntemperaturen im Verlauf der Einsatztour, Rechts-Detail des Temperaturverlaufes an der Anschlussstelle Amberg-Altstadt (Hellblau -4 °C , Mittelblau -3 °C , Weinrot -2 °C , Rot -1 °C)

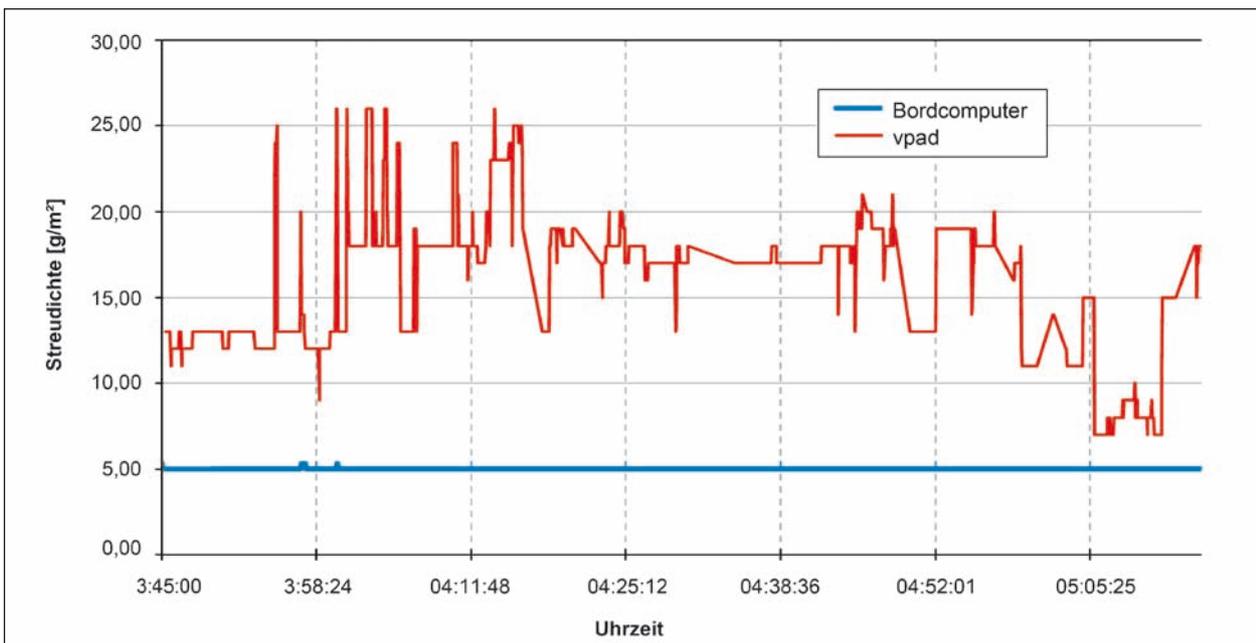


Bild 43: Gegenüberstellung der praktizierten Streudichte (Vpad) mit der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte

T_F Max:	0 °C
T_{F0} Min:	-4 °C
T_{F0} Max:	-2 °C
T_{F3} Min:	-3 °C
T_{F3} Max:	-2 °C
Straßenzustandsprognose:	4-Schnee
Zahl der Datensätze	7.372
Bezeichnung der Primärdatei	prognosis-20130115-080244.csv

Das Verhältnis der Temperaturen zueinander ist ähnlich wie bei Tour 3. Im Mittel ist die am Fahrzeug gemessene Temperatur um 1,8 °C höher (s. Bild 44).

Die Tourgrafik zeigt geringe Temperaturunterschiede auf dem ausgewählten Streckenabschnitt. Die niedrigsten Werte wurden auf Brückenbauwerken gemessen (s. Bild 45).

Der prognostizierte Schneefall führt in Verbindung mit den Temperaturen um -3 °C bei der Berechnung

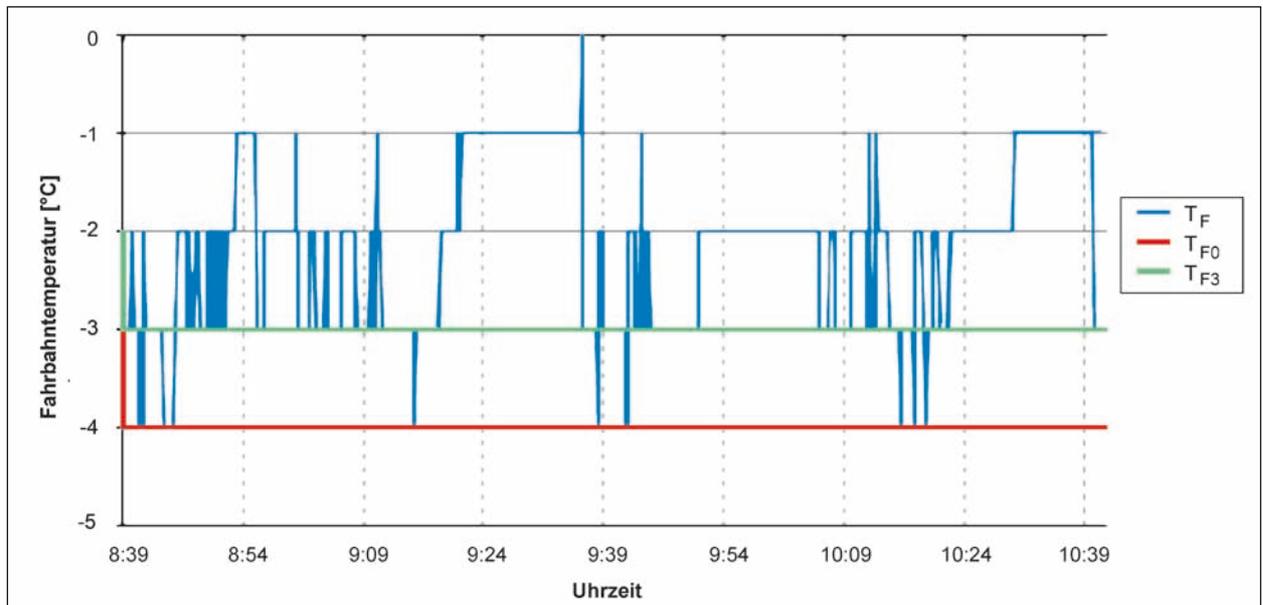


Bild 44: Temperaturverläufe während der Tour Werl 5; T_F – Fahrbahntemperatur aus Messung mit dem Infrarot-Pyrometer am Fahrzeug, T_{F0} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 0 h, T_{F3} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 3 h

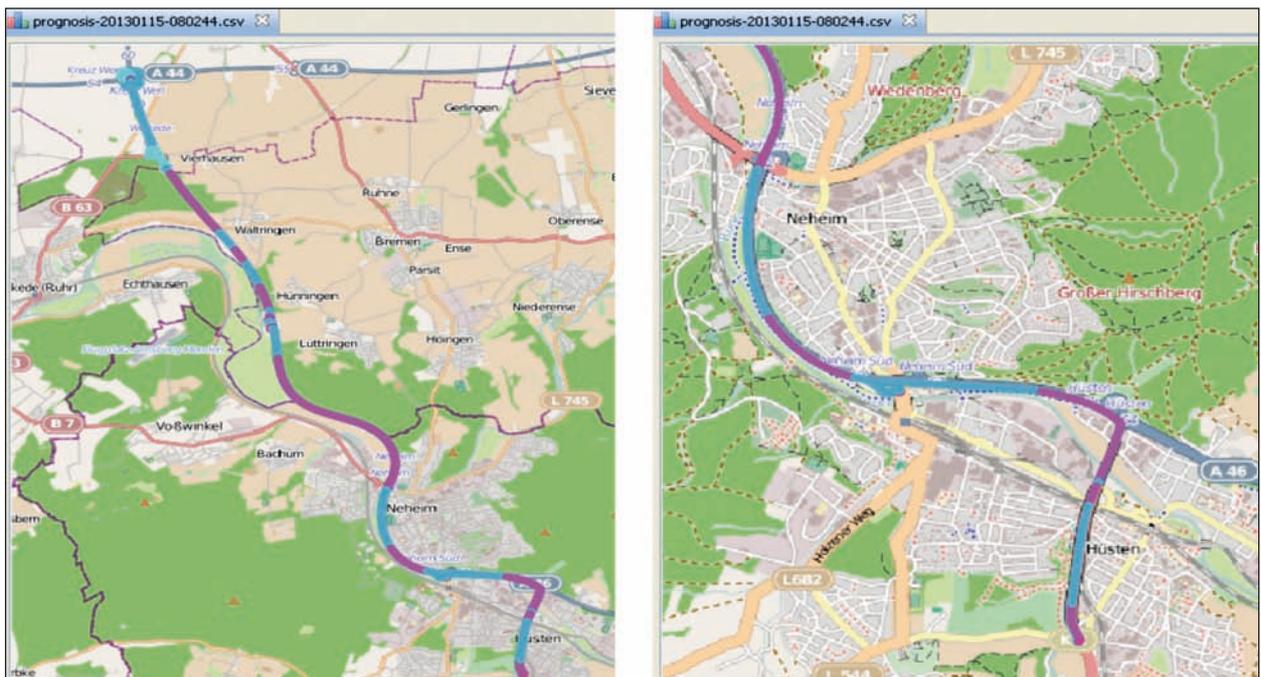


Bild 45: Fahrbahntemperaturen im Verlauf der Einsatztour (Hellblau -4 °C, Mittelblau -3 °C, Weinrot -2 °C, Rot -1 °C), Rechts: Detail des Temperaturverlaufes an der Anschlussstelle Hüsten

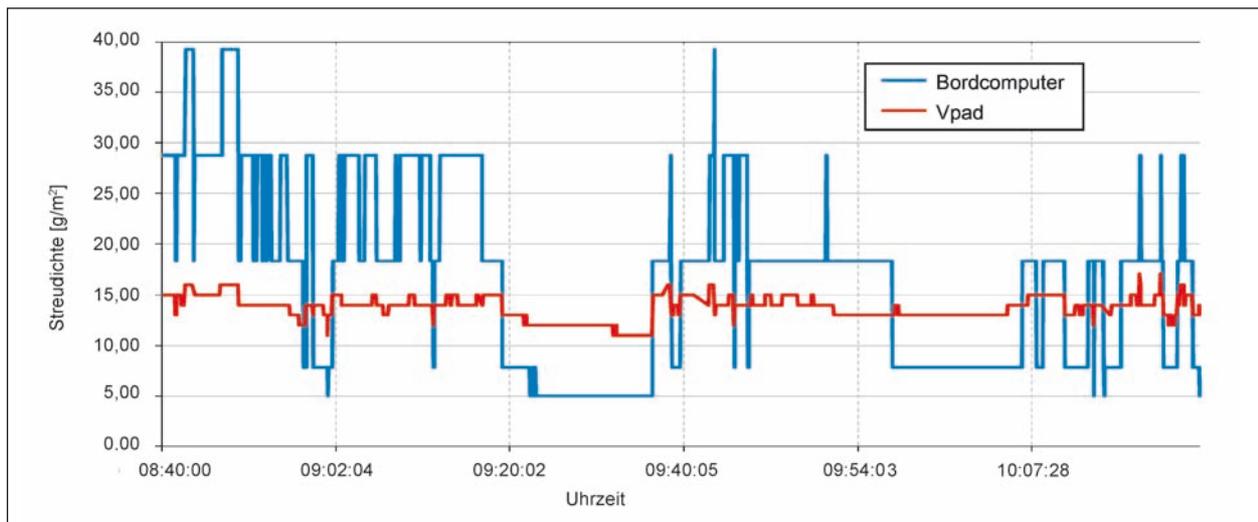


Bild 46: Gegenüberstellung der bei Tour Werl 5 praktizierten Streudichte (Vpad) mit der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte

durch den Algorithmus zu relativ hohen Werten für die Streudichte. Der Mittelwert liegt bei $16,9 \text{ g/m}^2$, während mit der installierten temperaturabhängigen Steuerung (Thermomat) im Durchschnitt tatsächlich $13,7 \text{ g/m}^2$ ausgebracht wurden (s. Bild 46).

10.3.2 Autobahnmeisterei Erkner

Tour Erkner 1

Datum:	01.12.2012
Beginn der Aufzeichnungen:	07:51:10 Uhr
Ende der Aufzeichnungen:	09:42:38 Uhr
$T_F \text{ Min:}$	$-2 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_F \text{ Max:}$	$2 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_{F0} \text{ Min:}$	$-1 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_{F0} \text{ Max:}$	$-1 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_{F3} \text{ Min:}$	$-1 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_{F3} \text{ Max:}$	$0 \text{ }^\circ\text{C}$
Straßenzustandsprognose:	0-trocken
Zahl der Datensätze	5.267
Bezeichnung der Primärdatei	prognosis-201212 01-072644.csv

Der Einsatz erfolgte bei trockener Fahrbahn und Temperaturen, die streckenweise unter $0 \text{ }^\circ\text{C}$ lagen (s. Bild 48). Im Zeithorizont bis 3 h waren keine Niederschläge vorhergesagt. Es ist allerdings bekannt, dass zu einem späteren Zeitpunkt geringer Niederschlag von 1 mm fiel. Diese Prognose war dem Einsatzpersonal möglicherweise bekannt. Die Berechnung mit dem Algorithmus ist trotzdem als plausibel anzusehen, da bei trockener Fahrbahn in dem vorliegenden Temperaturbereich 5 g/m^2 als optimal anzusehen sind (s. Bild 49).

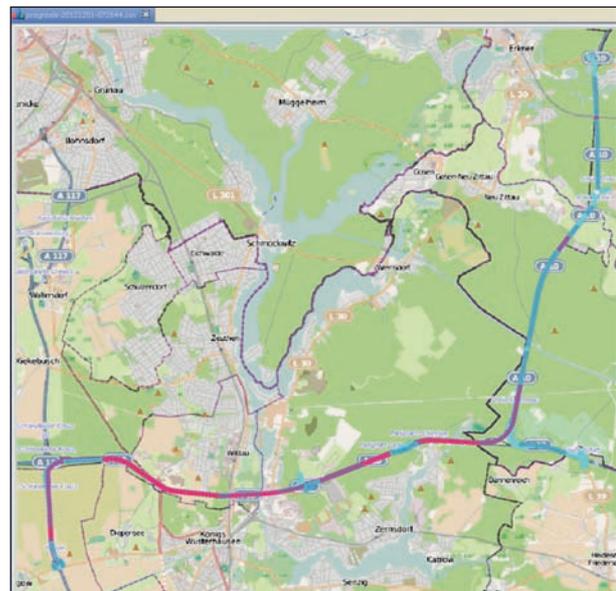


Bild 47: Fahrbahntemperaturen im Verlauf der Einsatztour (Hellblau $-1 \text{ }^\circ\text{C}$, Mittelblau $0 \text{ }^\circ\text{C}$, Weinrot $1 \text{ }^\circ\text{C}$, Rot $2 \text{ }^\circ\text{C}$)

Die Tourgrafik (s. Bild 47) zeigt eine interessante Differenzierung der Temperaturen. Niedrige Temperaturen finden sich vor allem im Bereich der Anschlussstellen und auf Brücken.

Tour Erkner 2

Datum:	04.12.2012
Beginn der Aufzeichnungen:	07:07:09 Uhr
Ende der Aufzeichnungen:	11:31:42 Uhr
$T_F \text{ Min:}$	$-2 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_F \text{ Max:}$	$5 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_{F0} \text{ Min:}$	$1 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_{F0} \text{ Max:}$	$3 \text{ }^\circ\text{C}$

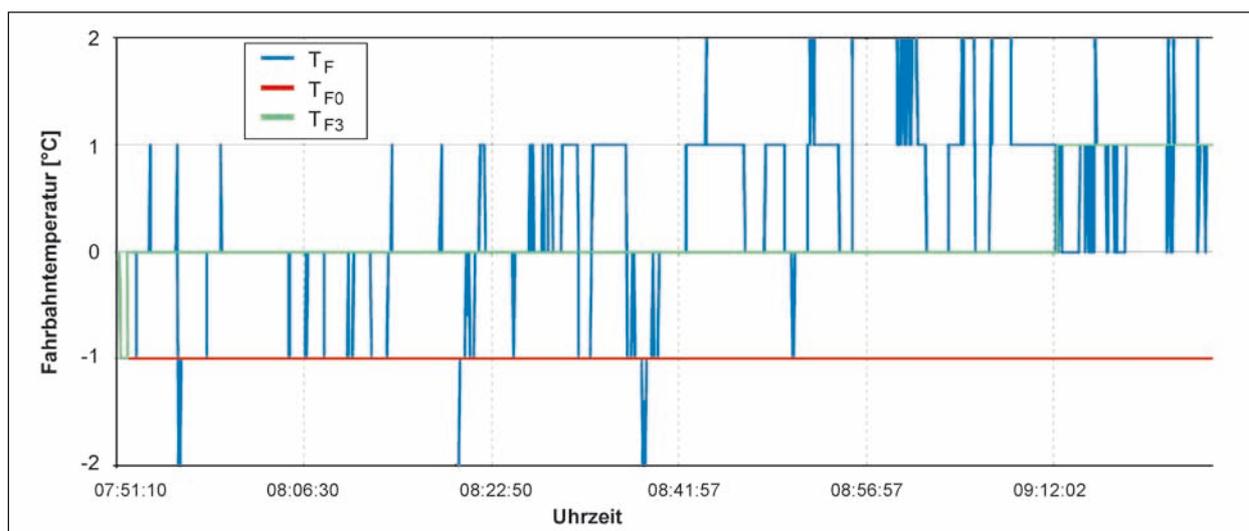


Bild 48: Temperaturverläufe während der Tour Erkner 1; T_F – Fahrbahntemperatur aus Messung mit dem Infrarot-Pyrometer am Fahrzeug, T_{F0} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 0 h, T_{F3} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 3 h

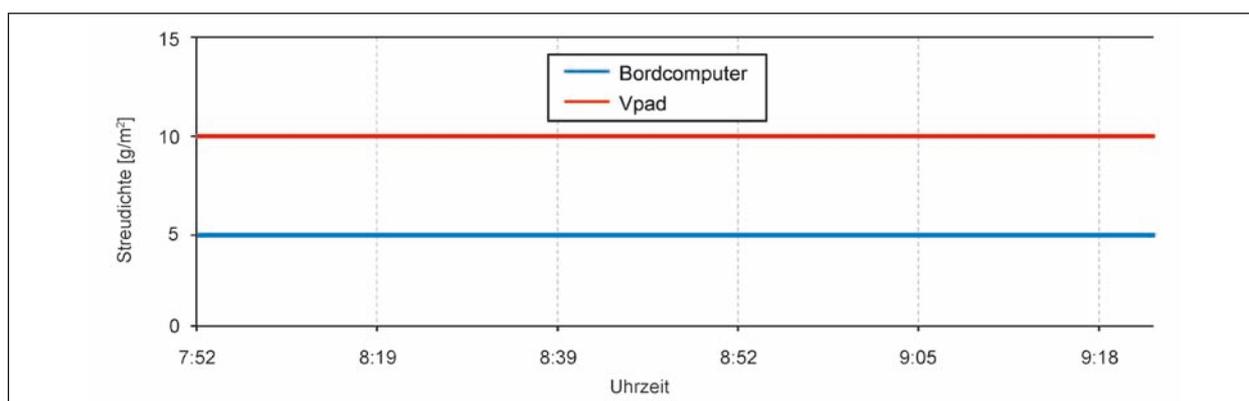


Bild 49: Gegenüberstellung der bei Tour Erkner 1 praktizierten Streudichte (Vpad) mit der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte

T_{F3} Min:	2 °C
T_{F3} Max:	4 °C
Straßenzustandsprognose:	0-trocken
Zahl der Datensätze	15.846
Bezeichnung der Primärdatei	prognosis-201212 04-064603.csv

Am 4.12.2012 trat in den Morgenstunden eine Erwärmung ein. Sie war begleitet von Schneeregenfällen. Ab etwa 9:00 Uhr wurden keine Fahrbahntemperaturen kleiner 0 °C gemessen (s. Bild 50). An der Straßenwetterstation Spreeau war bereits 7:00 Uhr eine Fahrbahntemperatur von 1 °C erreicht. Die tiefsten Temperaturen wurden an den Anschlussstellen und auf der Brücke im Bereich des Autobahndreieckes Spreeau gemessen (s. Bild 51). Die aktuellen Daten und die 3 h Prognose wiesen auf eine trockene Fahrbahn hin. Ab etwa 10:30 Uhr wurde errechnet, dass eine Streuung abschnittsweise nicht mehr notwendig ist. In

Bild 52 ist der erste Umlauf der Gesamttour dargestellt, der von 7:07 bis 9:12 Uhr stattfand.

Die manuell eingestellte Streudichte lässt angesichts des Schneeregens und der in den ersten Stunden noch niedrigen Temperaturen auf nachvollziehbare Vorsicht schließen. Bei den gestiegenen Temperaturen ab 9:00 Uhr wurde mit deutlich geringerer Streudichte gearbeitet.

Die nachträgliche Auswertung der Wetterdaten lässt darauf schließen, dass die mit dem Algorithmus errechnete Streudichte ausgereicht hätte.

Angesichts des während der Tour 2 gefallenen Schneeregens könnte man den Einsatz auch als kurativ ansehen. Nach den Prinzipien des Dosierungsalgorithmus ändern sich für diesen Fall bei Einsatz von FS 30 die Ausgangsdaten wie in Tabelle 18 dargestellt.

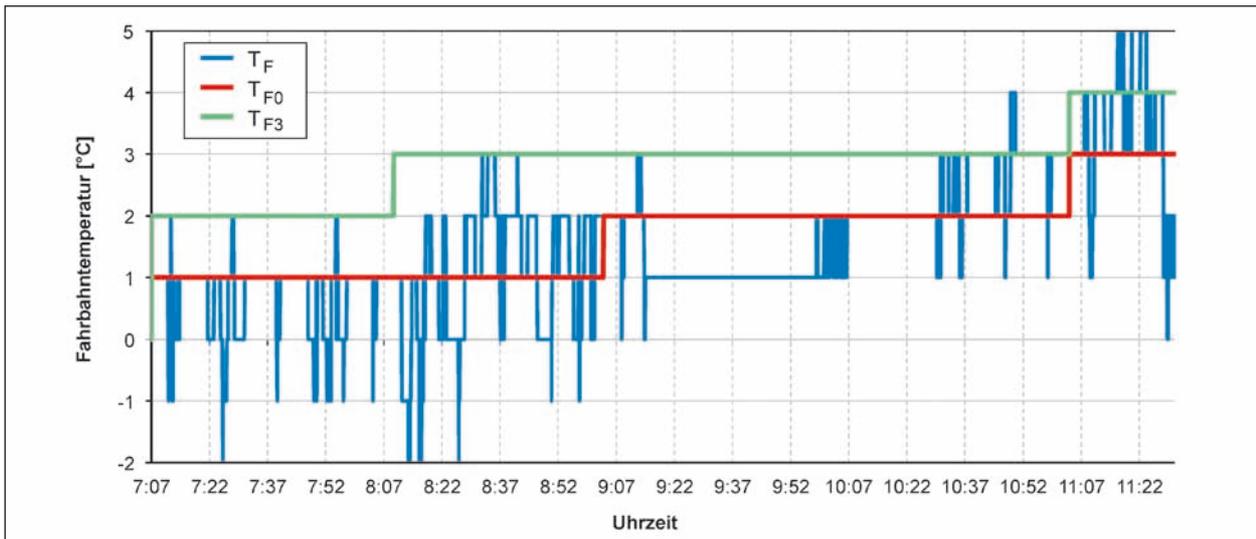


Bild 50: Temperaturverläufe während der Tour Erkner 2; T_F – Fahrbahntemperatur aus Messung mit dem Infrarot-Pyrometer am Fahrzeug, T_{F0} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 0 h, T_{F3} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 3 h

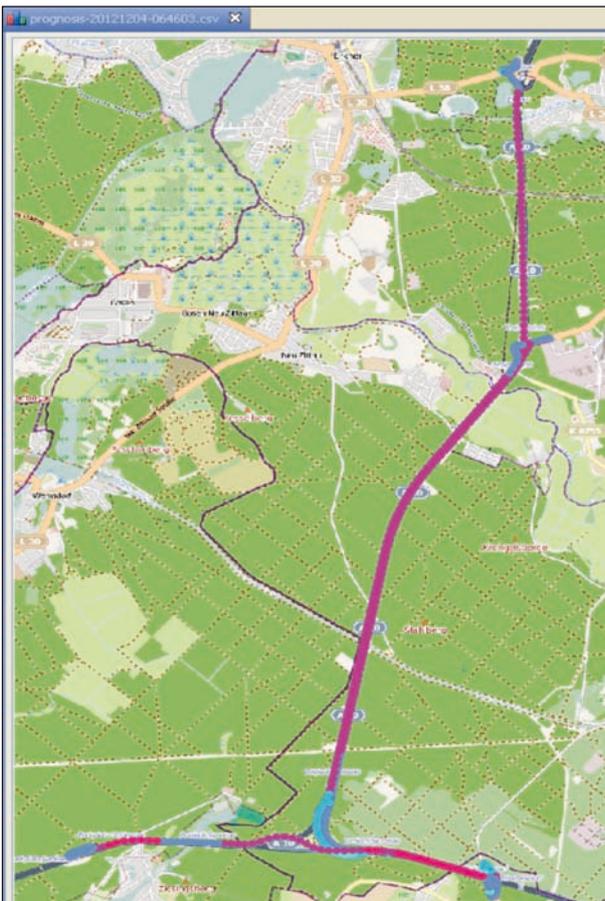


Bild 51: Fahrbahntemperaturen im Verlauf der Einsatztour (Hellblau -2 °C, Mittelblau -1 °C, Graublau 0 °C, Weinrot 1 °C, Rot 2 °C)

Eine mit den Parametern für kurative Streuung durchgeführte Modellrechnung ergibt ebenfalls nur eine Streudichte von 5 g/m² (Tabelle 18). Das ist für diesen Fall dadurch zu erklären, dass die Tempera-

	präventiv	kurativ
Vorhersagezeitraum/h	3	0
Ausgleichsfaktor für Liegezeitverluste – F_L	4,77	1,00
Straßenzustand – SZ	0	4
Wasserfilmdicke/mm	0,01	0,1

Tab. 18: Tour Erkner 2 – Ausgangsparameter für die Streudichteberechnung im Vergleich von präventivem und kurativem Einsatz

turen nahe des Gefrierpunktes lagen. Die Ergebnisse der Streudichteberechnung werden aber auch ganz wesentlich dadurch beeinflusst, dass keine Liegezeitverluste zu berücksichtigen sind ($F_L = 1,00$). Bei der Streudichteberechnung für kurative Einsätze bei Schneefall wäre jedoch noch zu untersuchen, wie der bei präventiven Einsätzen für die Wasserfilmdicke angesetzte Pauschalwert von 0,1 mm in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität variiert werden sollte.

Tour Erkner 3

Datum:	06.12.2012
Beginn der Aufzeichnungen:	20:30:51 Uhr
Ende der Aufzeichnungen:	22:51:57 Uhr
T_F Min:	-8 °C
T_F Max:	-1 °C
T_{F0} Min:	-5 °C

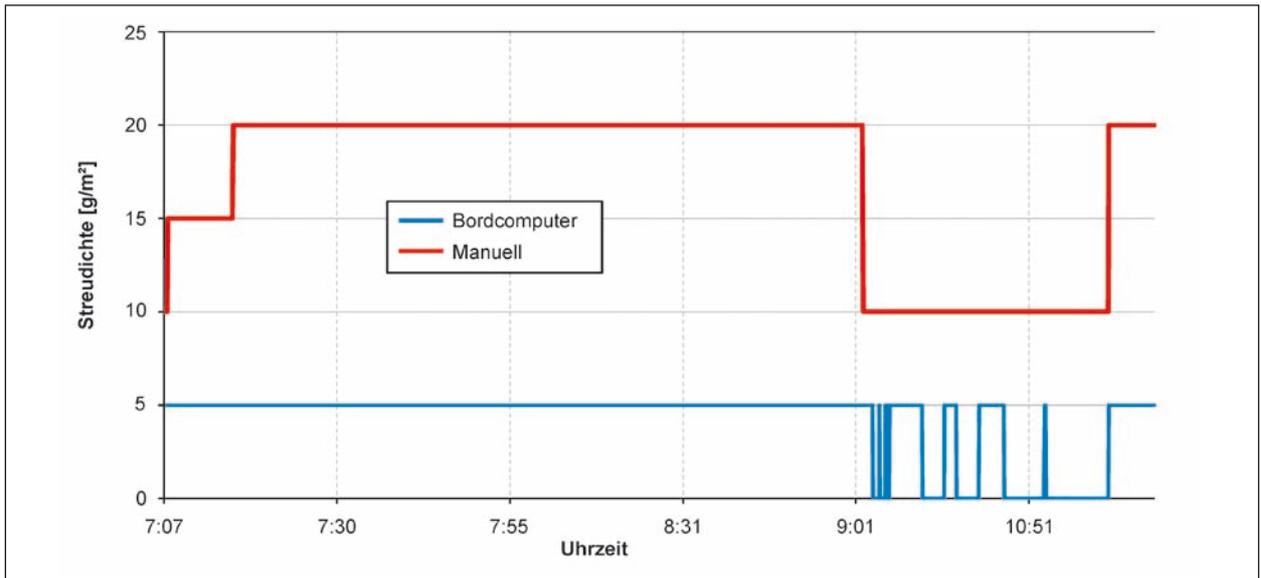


Bild 52: Gegenüberstellung der bei Tour Erkner 2 praktizierten Streudichte (manuell) mit der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte

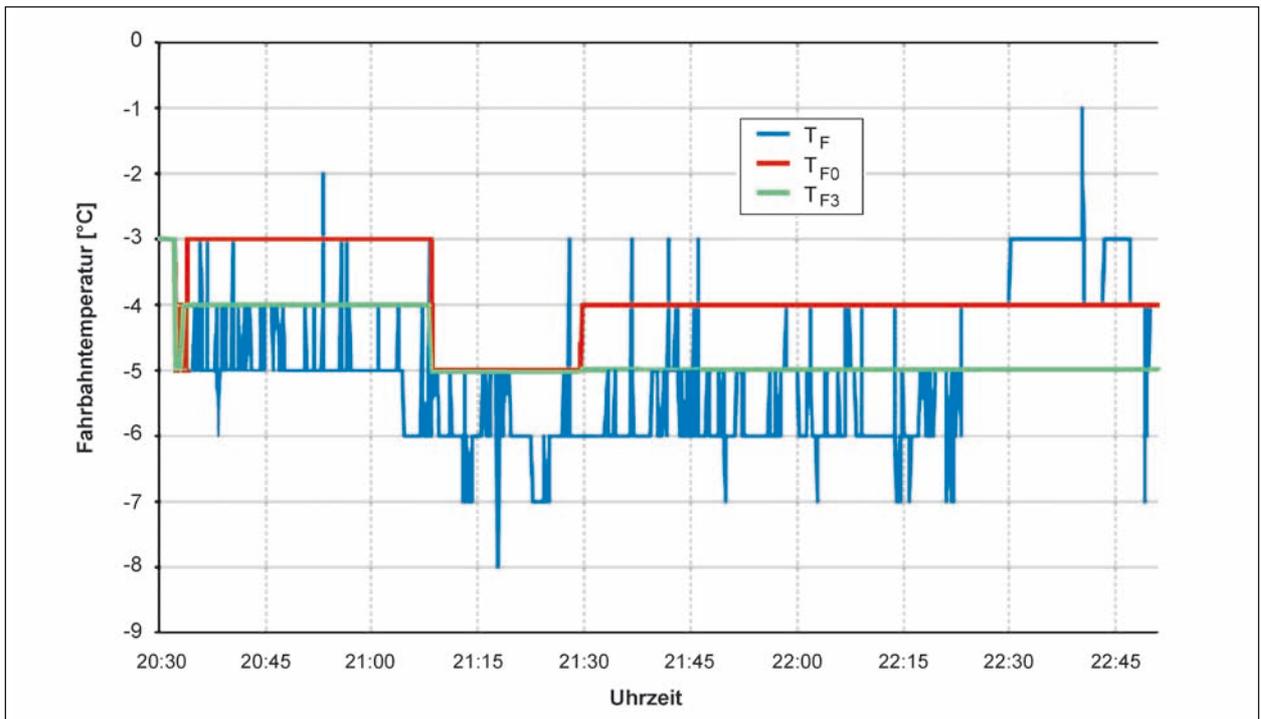


Bild 53: Temperaturverläufe während der Tour Erkner 2; T_F – Fahrbahntemperatur aus Messung mit dem Infrarot-Pyrometer am Fahrzeug, T_{F0} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 0 h, T_{F3} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 3 h

T_{F0} Max:	-3 °C
T_{F3} Min:	-5 °C
T_{F3} Max:	-3 °C
Straßenzustandsprognose:	0-trocken
Zahl der Datensätze	8.466
Bezeichnung der Primärdatei	prognosis-201212 06-203035.csv

Die Temperaturprognose zeigt leicht fallende Temperaturen (s. Bild 53). Die vom Fahrzeug aus gemessenen Fahrbahntemperaturen lagen zwischen -8 und -1 °C. Ohne die kurzzeitigen Temperaturspitzen lagen die Temperaturen in den ersten 80 Minuten der Tour zwischen -7 und -4 °C (s. Bild 54). In Verbindung mit der Straßenzustandsprognose (trockene Fahrbahn) errechnet sich eine

Streudichte um 5 g/m² (s. Bild 55). In manueller Einstellung wurde teilweise auf Streuung verzichtet. Zumeist wurden 10 g/m² eingestellt. Im Bereich der Brücken bei Rüdersdorf wurde mit einer Streudichte

von 20 g/m² gestreut. die Temperatur der Fahrbahnoberfläche auf der Brücke lag weniger als 1 K unter der Temperatur der anschließenden Streckenabschnitte.

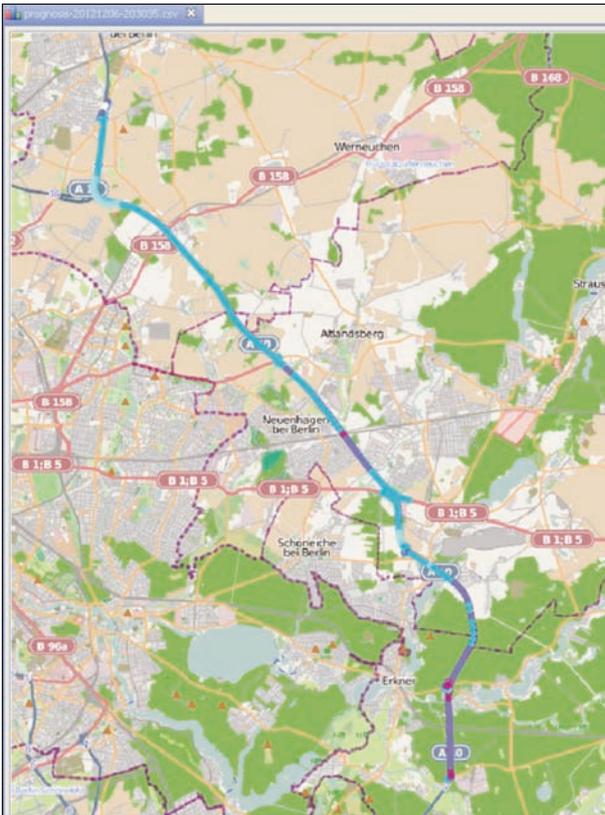


Bild 54: Fahrbahntemperaturen im Verlauf ersten 80 Minuten der Einsatztour (Hellblau -7 °C, Mittelblau -6 °C, Graublau -5 °C, Weinrot -4 °C)

Anhand der Daten kann eingeschätzt werden, dass eine Streudichte von 5 g/m² ausgereicht hätte. Der streckenweise Verzicht auf Streuung ist allerdings im Algorithmus bei Temperaturen unter 2 °C nicht vorgesehen. Diese Entscheidung kann mit den derzeitigen Möglichkeiten nur vom Fahrpersonal getroffen werden.

Tour Erkner 4

Datum:	12./13.01.2013
Beginn der Aufzeichnungen:	19:47:01 Uhr
Ende der Aufzeichnungen:	04:02:02 Uhr
T _F Min:	-2 °C
T _F Max:	1 °C
T _{F0} Min:	-3 °C
T _{F0} Max:	-1 °C
T _{F3} Min:	-4 °C
T _{F3} Max:	-2 °C
Straßenzustandsprognose:	0-trocken
Zahl der Datensätze	29.616
Name der Primärdatei	prognosis-201301 12-193901.csv

Die Aufzeichnung umfasst zwei Umläufe, die innerhalb einer Nacht gefahren wurden. Zwischen

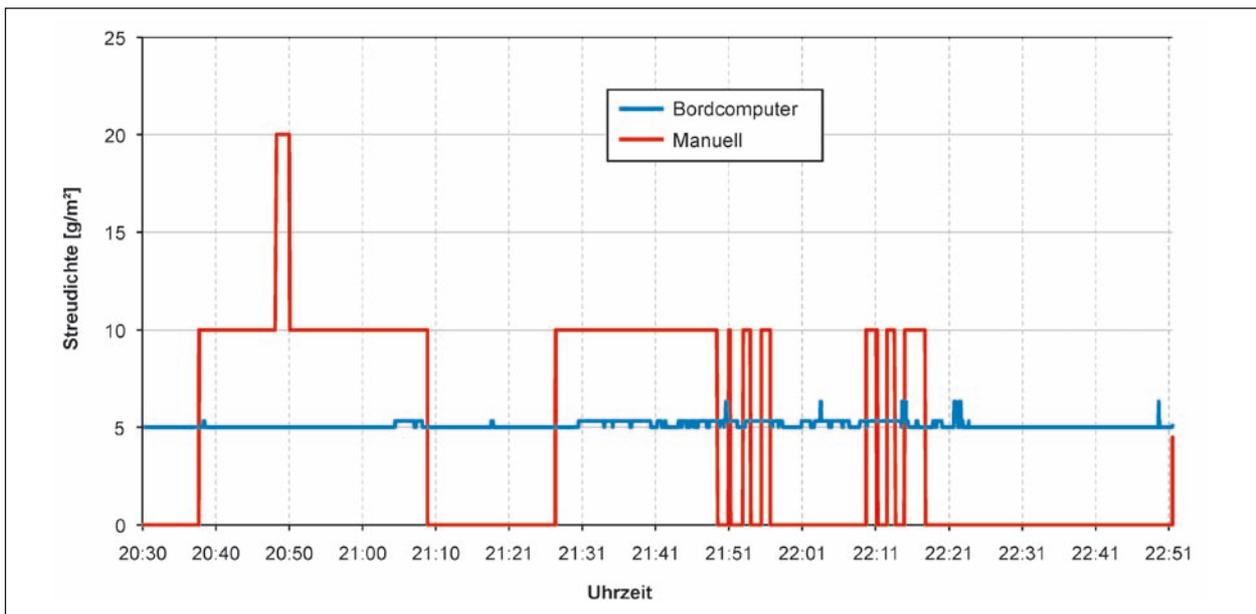


Bild 55: Gegenüberstellung der bei Tour Erkner 3 praktizierten Streudichte (manuell) mit der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte

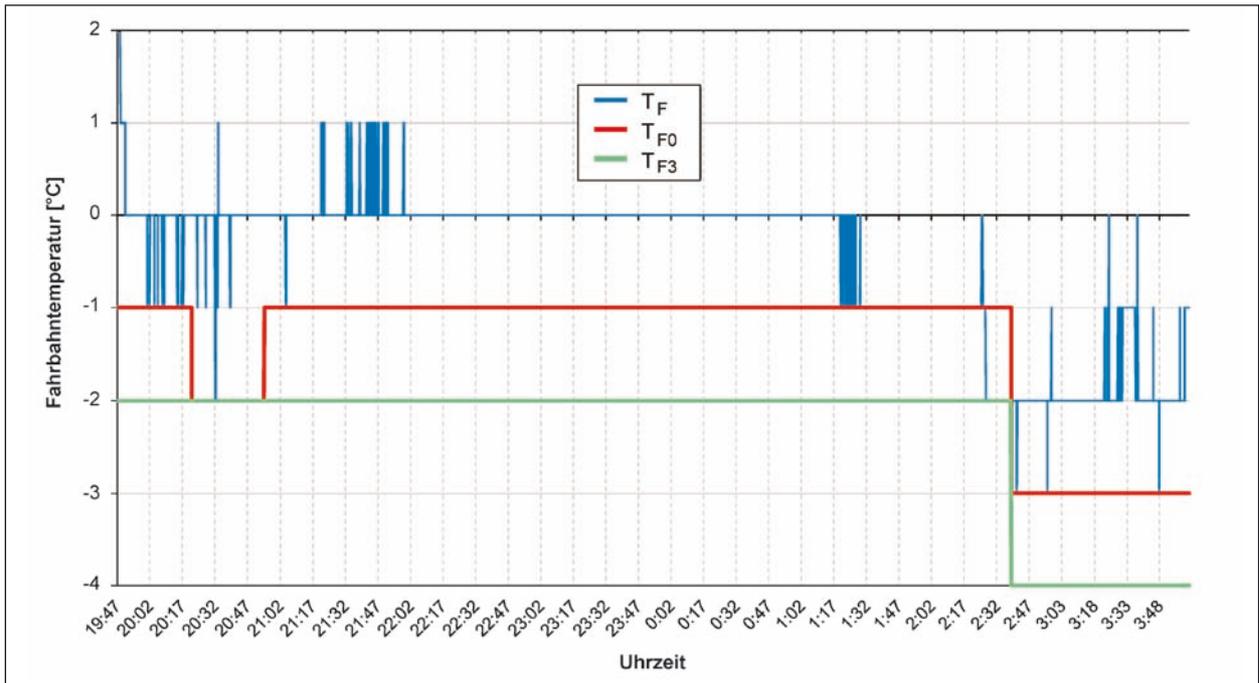


Bild 56: Temperaturverläufe während der Tour Erkner 4; T_F – Fahrbahntemperatur aus Messung mit dem Infrarot-Pyrometer am Fahrzeug, T_{F0} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 0 h, T_{F3} – Fahrbahntemperaturprognose für Zeitpunkt 3 h

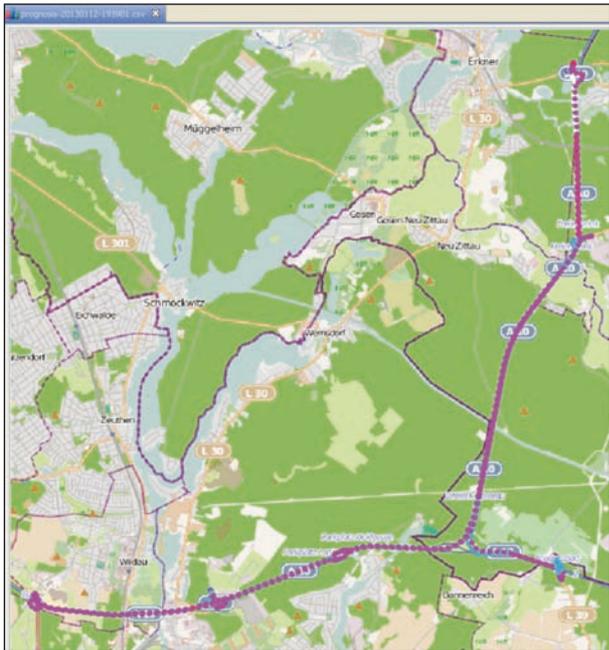


Bild 57: Fahrbahntemperaturen im Verlauf des Ersten Umlaufes der Einsatztour von 20:00 bis 22:00 Uhr (Mittelblau -1 °C, Weinrot 0 °C, Rot 1 °C)

den Umläufen liegt eine Fahrpause von 21:06 bis 2:26 Uhr. Beim ersten Umlauf wurden Temperaturen zwischen -2 und 1 °C gemessen (siehe Bild 56 und Bild 57). Beim zweiten Umlauf lagen die Temperaturen zwischen -3 und 0 °C. Während des ersten Umlaufes waren manuell 20 g/m² eingestellt. Beim 2. Umlauf wurden durchgängig

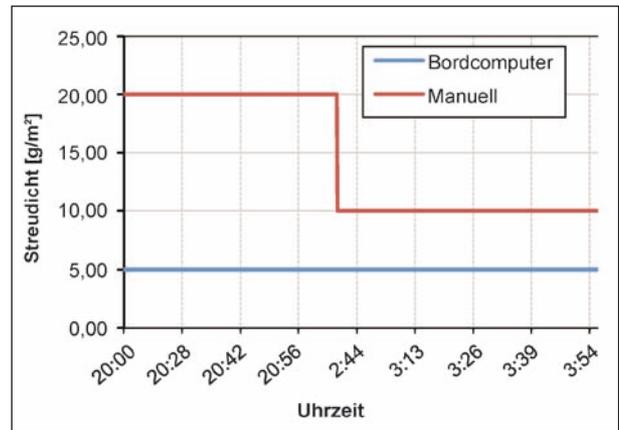


Bild 58: Gegenüberstellung der bei Tour Erkner 4 praktizierten Streudichte (manuell) mit der durch den Bordcomputer errechneten Streudichte

10 g/m² ausgebracht. Die mit dem Algorithmus berechnete Streudichte betrug kontinuierlich 5 g/m² (s. Bild 58).

Die mit dem Algorithmus errechnete Streudichte erscheint unter den gegebenen Randbedingungen (trockene Fahrbahn, Temperaturen zwischen -3 und +1 °C) plausibel.

11 Qualität der Eingangsdaten

11.1 Einfluss der gemessenen Fahrbahntemperaturen

Die Fahrbahntemperatur geht mehrfach in die Berechnung ein (s. Kapitel 4.3). Die mit einem Infrarot-Pyrometer gemessene Fahrbahntemperatur T_F wird alle 2 Sekunden gemessen. Zu der an den Straßenwetterstationen gemessenen Fahrbahntemperatur T_{F0} gibt es zumeist eine Differenz. Sie ist damit zu erklären, dass die Infrarot-Pyrometer zumeist so montiert sind, dass in oder nahe der Rollspur gemessen wird. Dort sind die Temperaturen in der Regel 1 K höher. Es ist auch zu berücksichtigen, dass T_F und T_{F0} nicht am gleichen Ort gemessen werden.

Eine höhere Differenz als 3 K zwischen T_F und T_{F0} ($T_F > T_{F0} + 3$) ist jedoch als fragwürdig anzusehen. Das könnte im Bereich des Gefrierpunktes dazu führen, dass keine Streuung erfolgt.

Aus Bild 59 ist zu entnehmen, dass bei einer Tour mit 6.609 Datensätzen kurzzeitig (maximal 4 Sekunden) derartige Differenzen vorkommen. In diesem Zeitrahmen ist die Abweichung gerade noch tolerierbar.

Für die Berechnung der Streudichte hat die Genauigkeit des absoluten Wertes für T_F eine größere Bedeutung als die Werte für T_{F0} und T_{F3} , die in ihrer Relation zueinander (ΔT) in die Berechnung eingehen. Durch ΔT werden die Tendenz und die Größenordnung der Temperaturentwicklung der folgenden drei Stunden beschrieben. Die berechnete Streudichte verringert sich bei negativen Werten von ΔT . Die Negativabweichungen sind daher besonders kritisch.

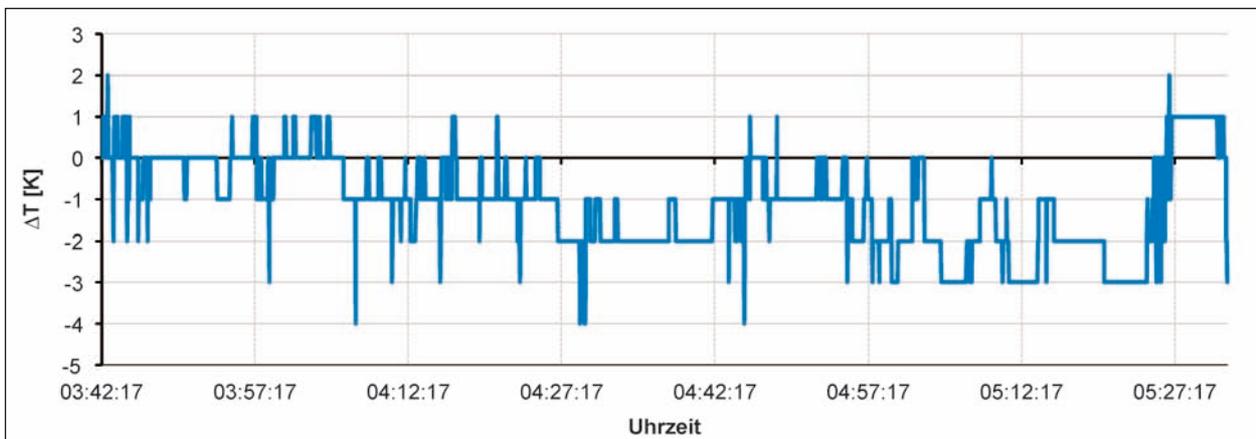


Bild 59: Differenz zwischen der vom Fahrzeug aus gemessenen Fahrbahntemperatur und der an naheliegenden Straßenwetterstationen gemessenen Temperatur bei einer Einsatzfahrt auf der A 46/A 445 am 15.01.2013

Die Bedeutung der Messgenauigkeit von Temperaturmessungen hängt auch von der prognostizierten Wasserfilmdicke ab. Bei geringer Wasserfilmdicke (Beispiel 0,01 mm) wird erst ab -8 °C eine höhere Streudichte als der Minimalwert von 5 g/m^2 berechnet (s. Bild 60).

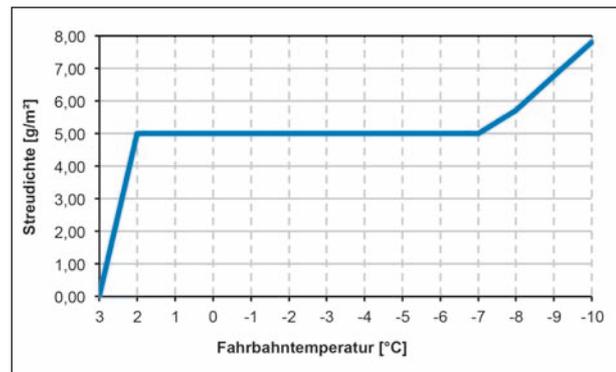


Bild 60: Berechnete Streudichte in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstanter Wasserfilmdicke von 0,01 mm (prognostizierter Straßenzustand 0-trockene Fahrbahn)

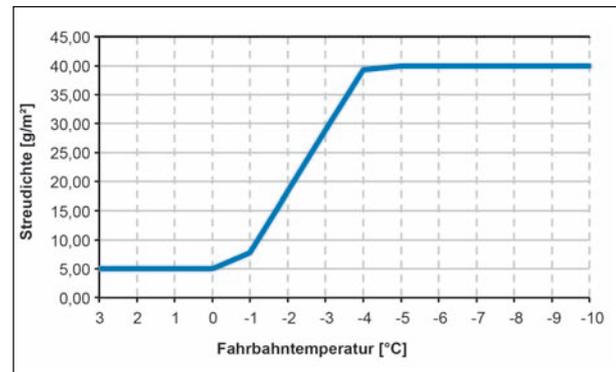


Bild 61: Berechnete Streudichte in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstanter Wasserfilmdicke von 0,1 mm (prognostizierter Straßenzustand 4-Schnee)

Bei größerer Wasserfilmdicke (Beispiel 0,1 mm) wird schon ab -1 °C eine höhere Streudichte als der Minimalwert von 5 g/m^2 berechnet (s. Bild 61). Bereits ab Temperaturen von -5 °C reicht die in Deutschland übliche Maximalstreudichte von 40 g/m^2 nicht mehr aus, um den Schnee (0,1 mm Wasserfilmdicke $\hat{=}$ 1 mm Schneehöhe) komplett zu schmelzen. Bei Schneeniederschlag ist das jedoch nicht unbedingt erforderlich, da es im ersten Schritt ausreicht Schneemulm zu erzeugen, der keine feste Glätteschicht bildet. Wie viel Salz dafür mindestens erforderlich ist, wird im Moment in einem BAST-Forschungsprojekt mit dem Titel „Optimierung der auftauenden Streustoffe und der Streustoffausbringung“ untersucht.

11.2 Temperaturprognose aus der Punktwettervorhersage

Die tatsächlich eintretende Temperatur sollte möglichst nicht oder nur wenig von der prognostizierten Temperatur abweichen. Negativabweichungen (eingetretene Temperatur < prognostizierte Tem-

peratur) sind besonders problematisch, da sie zur Berechnung einer zu geringen Streudichte führen können.

Die Häufigkeit der Abweichungen bei Temperaturvorhersagen für die Straßenwetterstationen Gränscheid (DWD-Kennung H582) und Dreieck Spreeau (DWD-Kennung F562) sind in Bild 62 und Bild 63 dargestellt. Problematisch sind auch hier die Negativabweichungen. Das heißt: Die tatsächliche Temperatur nach drei Stunden ist niedriger als die für diesen Zeitpunkt prognostizierte Temperatur. Dabei erscheint eine Negativabweichung von 1 K als tolerierbar. Unter diesem Aspekt sind die Prognosen für die Anwendung zur Berechnung von Streudichten folgendermaßen zu bewerten (siehe Tabelle 19).

Die Verwendung von Prognosen mit dem Attribut „problematisch“ muss nicht zwangsläufig ein Sicherheitsrisiko darstellen. Wahrscheinlich wird auch mit Verwendung dieser Prognosen noch eine höhere Dosierungsqualität erzielt, als ohne Assistenzsystem.

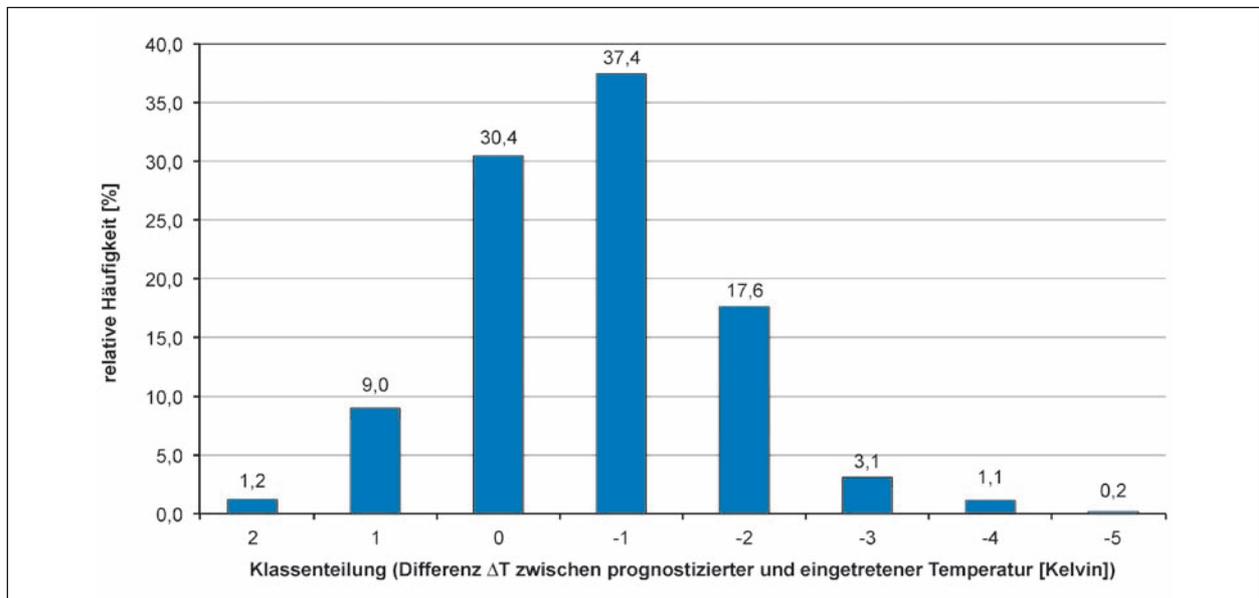


Bild 62: Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen prognostizierter und nach 3 Stunden eingetretener Temperatur an der Wetterstation Gränscheid (Vergleich von 1.170 Datensätzen im Zeitraum vom 31.10.2012 bis 17.12.2012)

DWD-Kennung	GMA-Name	Auswertungszeitraum	Zahl der ausgewerteten Einzelprognosen	Prognosequalität Fahrbahntemperatur/%	
				gut	problematisch
H582	Gränscheid	31.10.2012 bis 17.12.2012	1.170	78,0	22,0
F562	Dreieck Spreeau	01.12.2012 bis 25.1.2013	1.994	93,4	6,6

Tab. 19: Bewertung der Prognosequalität der Fahrbahntemperatur für einen Prognosezeitraum von 3 h

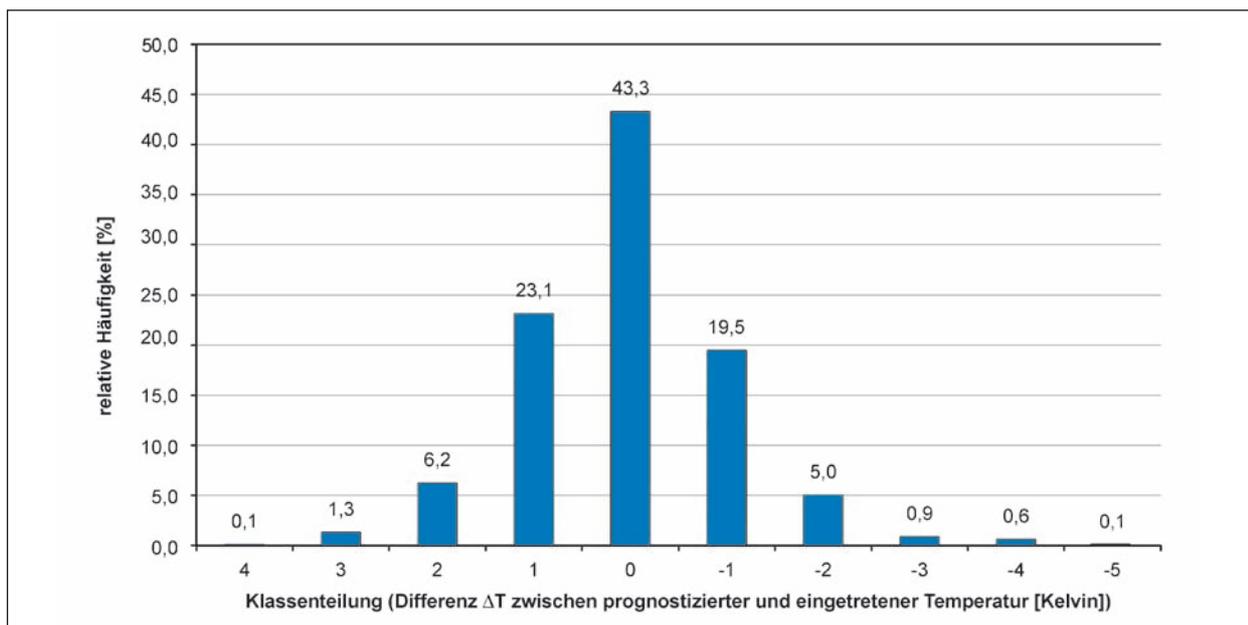


Bild 63: Relative Häufigkeit der Differenzen zwischen prognostizierter und nach 3 Stunden eingetretener Temperatur an der Wetterstation Spreeau (Vergleich von 1994 Datensätzen im Zeitraum vom 01.12.2012 bis 25.1.2013)

11.3 Straßenzustandsprognose aus der Punktwettervorhersage

Der prognostizierte Straßenzustand hat über die zugeordnete Wasserfilmdicke auch bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt (z. B. $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$) einen erheblichen Einfluss auf die berechnete Streudichte (s. Bild 64). Die Mindeststreuemenge reicht nur für trockene oder feuchte Fahrbahn oder bei Reifbildung.

Bei niedrigeren Temperaturen (z. B. $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) ist der Einfluss auf die berechnete Streudichte noch größer (Bild 65). Ab diesen Temperaturen genügt die Mindeststreuemenge nur noch für die trockene Fahrbahn.

Bei Temperaturen ab $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ kommt der Straßenzustandsprognose insbesondere dann eine große Bedeutung zu, wenn Niederschläge zu erwarten sind. Problematisch für die optimale Berechnung der Streudichte ist ein nicht vorhergesagter Niederschlag (Straßenzustandscode > 1). Unter dieser Maßgabe wurde die Prognosequalität für zwei Straßenwetterstationen ausgewertet.

Kriterien für Straßenzustandsprognose „problematisch“:

Prognose: Code 0-trocken oder Code 1-feucht \Rightarrow eingetretener Zustand: Code 2 bis 5.

Alle anderen Kombinationen von prognostiziertem und eingetretenerem Straßenzustand werden als gut eingestuft.

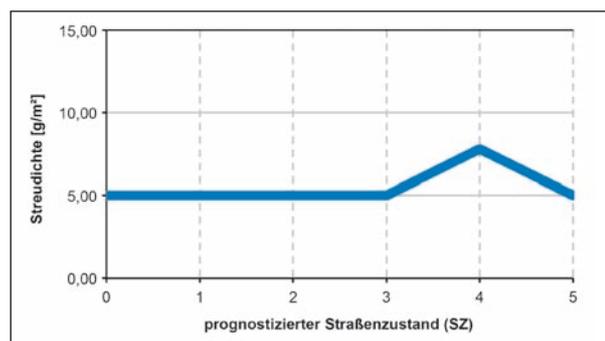


Bild 64: Berechnete Streudichte in Abhängigkeit vom prognostizierten Straßenzustand bei einer Fahrbahntemperatur von $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Codierung des Straßenzustandes siehe Tabelle 14)



Bild 65: Berechnete Streudichte in Abhängigkeit vom prognostizierten Straßenzustand bei einer Fahrbahntemperatur von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Codierung des Straßenzustandes siehe Tabelle 14)

Mit 95,0 bzw. 96,6 % als „gut“ bewertete Prognosen ist eine hohe Prognosequalität erreicht. Es ist zu diskutieren, ob die problematischen Straßenzu-

DWD-Kennung	GMA-Name	Auswertungszeitraum	Zahl der ausgewerteten Einzelprognosen	Prognosequalität Straßenzustandsprognose/%	
				gut	problematisch
H582	Gränscheid	31.10.2012 bis 17.12.2012	1.170	95,0	5,0
F562	Dreieck Spreewald	01.12.2012 bis 25.1.2013	1.994	96,6	3,4

Tab. 20: Bewertung der Prognosequalität des Fahrbahnzustandes für einen Prognosezeitraum von 3 h

standsprognosen ein Sicherheitsrisiko darstellen. Das Risiko ist allerdings bereits dadurch minimiert, dass bei Temperaturen ≤ 2 °C unabhängig von der Straßenzustandsprognose immer die Mindestmenge von 5 g/m² gestreut wird.

12 Zusammenfassung und Ausblick

Zentrales Ziel des Forschungsthemas war die Entwicklung eines Algorithmus, der dazu geeignet ist, die objektiv erforderliche Streudichte zu ermitteln, die für die Verhinderung von Fahrbahnglätte unter Berücksichtigung der prognostizierten Wetterentwicklung und des Fahrbahnzustandes erforderlich ist.

Aufbauend auf dem Phasendiagramm für die Mischung von NaCl und H₂O wurde ein Berechnungsalgorithmus entwickelt, der Temperatur und Wasserfilmdicke auf der Fahrbahn in wählbaren Prognosezeiträumen berücksichtigt. Die stündlich aktualisierten Prognosedaten werden während der Einsatzfahrt des Winterdienstfahrzeuges übermittelt und haben direkten Einfluss auf die Streudichte.

Neben den Prognosedaten haben auch technologische und streckenbezogenen Randbedingungen direkten Einfluss auf die berechnete Streudichte.

Technologische Randbedingungen sind die Streutechnologie (wahlweise FS 30 oder FS 100) und der Prognosezeitraum.

Als streckenbezogene Randbedingungen können Streckeneigenschaften (z. B. Art des Belages, Brückenlage der Fahrbahn) und Restsalzmengen auf der Fahrbahn berücksichtigt werden.

Die Praxistests wurden in den Winterdienstperioden 2011/12 und 2012/13 durchgeführt. Die Montage der Bordcomputer und der GPS-Antennen war an allen Fahrzeugen sehr einfach und schnell möglich. Das konzipierte Funktionsprinzip wurde ohne wesentliche Änderungen in die Praxis um-

gesetzt und hat grundsätzlich die gestellten Erwartungen erfüllt.

Aus dem Vergleich der Streudichten ist zu erkennen, dass bei der Straßenzustandsprognose „trocken“ oder „feucht“ immer eine wesentlich geringere Streudichte errechnet wird, als vom Bedienungspersonal in der Praxis eingestellt wird. Bei Schneefall werden durch den Algorithmus eher höhere Streudichten errechnet, als in der Praxis ausgebracht werden. Das kann auch dadurch begründet sein, dass die in den Streumaschinen mitgeführten Streustoffmengen auf Autobahnen nicht ausreichen, um einen Umlauf ohne Nachladen mit Streudichten über 20 bis 30 g/m² zu absolvieren.

Unabhängig davon ist es wichtig, die derzeitigen Schwächen und Probleme des Systems zu benennen, um eine Grundlage für die weitere Entwicklung zu schaffen:

1. Die Übertragung der Daten über das GSM-/UMTS-Netz ist nicht immer stabil. Übertragungsprobleme können durch geringe Empfangsstärke oder Netzüberlastung entstehen. Das kann dazu führen, dass Prognosedaten auf dem Fahrzeug nicht regelmäßig aktualisiert werden. In diesem Fall wird mit den zuletzt übertragenen Daten weiter kalkuliert.
2. Fehler bei der Ermittlung der Eingangsdaten können zu Fehlberechnungen führen.
3. Die Zuordnung von Wasserfilmdicken zu prognostizierten Straßenzuständen hat sich grundsätzlich als praktikabel erwiesen. Die Höhe der zugeordneten Wasserfilmdicke bedarf jedoch weiterer praktischer Überprüfung.
4. Bei Schneeniederschlägen ist eine Prognose der Schneemengen pro Zeiteinheit nicht möglich. Insofern kann auf diese Situation nur pauschal eingegangen werden.
5. Die Ermittlung der Restsalzmengen ist vom fahrenden Fahrzeug aus noch nicht möglich. Aus diesem Grund kann auf diesen Faktor nur pauschal eingegangen werden.

6. Die einwandfreie Funktion des Infrarot-Pyrometers am Fahrzeug muss häufig überprüft werden, um die Verarbeitung einer fehlerhaften Fahrbahntemperatur zu vermeiden.

Die Berechnung der optimalen Streudichte mit einem Algorithmus unter Berücksichtigung von Mess- und Prognosewerten erschließt mit den derzeitigen Möglichkeiten mit der Verringerung der Salzmengen vor allem bei präventiven Streueinsätzen ein bisher ungenutztes Einsparungspotenzial.

Der Dosierungsalgorithmus kann in Verbindung mit der im Fahrzeug installierten Hardware den bei der Winterdienststreuung stark ausgeprägten subjektiven Faktor bei der Wahl der Streudichte verringern. Insofern besteht die Möglichkeit, mit derartigen Assistenzsystemen beim Salzeinsatz ein großes Einsparungspotenzial zu erschließen. Die Stärke des Systems liegt im Vergleich zum Infrarot-Pyrometer-System in der besseren Berücksichtigung der zu erwartenden Flüssigkeitsmengen auf der Fahrbahn. Das erhöht die Sicherheit des Fahrpersonals bei der Wahl der Streudichte im Falle von präventiven Streuungen. Die Funktionsfähigkeit des erprobten Systems wurde nachgewiesen. Für eine praxisgerechte Umsetzung muss die Funktion des Systems stabilisiert werden. Danach kann der Algorithmus direkt für die Einstellung der Streudichte an den Streumaschinen eingesetzt werden. Idealerweise sollte das System so konfiguriert sein, dass es mit Streumaschinen der gängigen Hersteller kompatibel ist. Die Voraussetzungen dafür sind gegeben.

Aus den bei der Erprobung gewonnenen Erfahrungen leiten sich zwei Vorschläge ab, die auch unabhängig von der Einführung des Systems kurzfristig realisiert werden könnten.

1. Ausrüstung von Streumaschinen mit einer „Restsalztaste“. Mit deren Bedienung könnte bei der Dosierung, die aus der Kenntnis durchgeführter Streuungen anzunehmende Restsalzmenge mit einem fixen Wert (z. B. 2 g/m²) bei der Streustoffausbringung berücksichtigt werden.
2. GPS-gesteuerte Temperaturkorrektur ca. 100 m vor Großbrücken, um die systembedingten Verzögerungen bei der Dosierungsanpassung zu kompensieren. Die Temperaturkorrektur könnte nach den ersten Metern auf der Brücke wieder abgeschaltet werden, wenn das System die real

gemessene Temperatur direkt in die optimale Streudichte umsetzen kann. Diese Maßnahme könnte das Vertrauen in die temperaturabhängige Dosierung erhöhen.

Mit Ziel der Einführung derartiger Fahrerassistenzsysteme in die Winterdienstpraxis sollten folgende Schritte unternommen werden:

1. Durchführung weiterer Praxisversuche,
2. Modifizierung des Algorithmus in Auswertung weiterer Praxisversuche und unter Berücksichtigung der Fachdiskussionen,
3. Anpassung des Systems an die Streumaschinen weiterer Hersteller,
4. Durchführung von überwachten Praxiseinsätzen mit direkter Übertragung der errechneten Streudichte auf die Steuerung der Streumaschinen,
5. Einbeziehung einer mobilen Restsalzmengenmessung, sobald die technischen Möglichkeiten dafür bestehen,
6. Förderung der Entwicklung von technischen Systemen zur mobilen Messung der Wasserfilmdicke, um diesen wichtigen Parameter für die Berechnung der Streudichte bei kurativen Einsätzen nutzen zu können,
7. Quantifizierung der bei Schneefall erforderlichen Taustoffmengen, um „Schneemulm“ zu erzeugen.

Die Einführung von Assistenzsystemen zur parametergesteuerten Ermittlung der optimalen Streudichte sollte als wichtiger Schritt angesehen werden, um den Straßenwinterdienst zukünftig noch wirtschaftlicher, sicherer und mit geringsten Umweltbelastungen durchführen zu können.

13 Literatur

- [1] BADEL, H., BREITENSTEIN, J.: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst, Berichte der BASt, Heft V 129, Bergisch Gladbach 2005
- [2] EVANS, M. G., JORDAN, R. W.: Proposed precautionary treatment rates for the Highways Agency's road network, TRL, PPR 459, August 2010

- [3] FÖRSTER, G.: Angebotsspezifikation zu dem Angebot A 11-241-04, Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme, Juli 2011
- [4] HAUSMANN, G.: Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn, Berichte der BAST, Heft V 180, Bergisch Gladbach, Mai 2009
- [5] HAUSMANN, G.: Empfehlungen zum richtigen Aufbringen von Tausalzlösungen, Berichte der BAST, Heft V 218, Bergisch Gladbach, Dezember 2012
- [6] KNOLLHOFF, D. S., TAKLE, E. S., GALLUS, Jr. W. A., BURKHEIMER, D. & McCAULEY, D.: Evaluation of a frost accumulation model. Meteorol. Appl. 10, p 337-343, 2003
- [7] KNUDSEN, F. & B.: Sommer Road Directorate, Ministry of Transport, Denmark, GPS controlled salt spreading and section based forecasts, Piarc Kongress, Quebec 2010
- [8] LUKAS, J.: Messungen der geometrischen Rauigkeit und Wasserabfluss von der Straße. Internationales Kolloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Berlin 1968
- [9] LYSBAKKEN, K. R., NOREM, H.: The Amount of Salt on Road Surfaces after Salt Application, Seventh International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, Indianapolis 2008, Transportation Research Circular Number E-C126
- [10] MÖLLER, St.: Tema Vintermodell, VTI Rapport 529, 2006
- [11] Final Report: Phase Four: Highway Maintenance Concept Vehicle. CTRE, June 2002
- [12] NICOLAS, J.-P.: Glättebildung durch Überfrieren, Schwellwerte der Oberflächenfeuchte auf Fahrbahnen, Berichte der BAST, Heft V 36, Bergisch Gladbach 1996
- [13] RAUKOLA et al.: Anti-icing activities in Finland: field tests with liquid and prewetted chemicals, Transportation Research Record 1387, p 48-56, 1993
- [14] RUESS, B., HOLLDOERF, Chr.: Optimierung der Verkehrssicherheit und des Verkehrsflusses im Winter durch den Einsatz moderner Kommunikationstechnologie im Straßenbetrieb, Forschungsbericht, Schweizer Verband der Verkehrsfachleute, August 2007
- [15] TILLEY, J., KROEBER, S., GREEN, J., CLONCH, D., HALLIDAY, D.: Measurements of Pavement Condition and Road Weather Environment Within North Dakota Using a Tow-Hitch Mount Road-Grip Tester. In: Transportation Research Circular E-C126: Surface Transportation Weather and Snow Removal and Ice Control Technology, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., June 2008, p 364-378
- [16] WALLMANN, C.-G.: Tema vintermodell, etap 2. Huvudrapport (schwed.), VTI rapport 531, 2006

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2011

V 202: Einfluss innerörtlicher Grünflächen und Wasserflächen auf die PM10-Belastung

Endlicher, Langner, Dannenmeier, Fiedler, Herrmann, Ohmer, Dalter, Kull, Gebhardt, Hartmann € 16,00

V 203: Bewertung von Ortsumgehungen aus Sicht der Verkehrssicherheit

Dohmen, Vieten, Kesting, Dürhager, Funke-Akbiyik € 16,50

V 204: Einfluss von Straßenrandbegrünung auf die PM10-Belastung

Bracke, Reznik, Mölleken, Berteilt, Schmidt € 22,00
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 205: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2009

Fitschen, Nordmann € 27,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 206: Sicherheitspotenzialkarten für Bundesstraßen nach den ESN

Färber, Lerner, Pöppel-Decker € 14,50

V 207: Gestaltung von Notöffnungen in transportablen Schutzeinrichtungen

Becker € 16,00

V 208: Fahrbahnquerschnitte in baulichen Engstellen von Ortsdurchfahrten

Gerlach, Breidenbach, Rudolph, Huber, Brosch, Kesting € 17,50

V 209: Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2008/2009

Beer, Surkus, Kocher € 14,50

2012

V 210: Schmale zweibahnig vierstreifige Landstraßen (RQ 21)

Maier, Berger € 18,50

V 211: Innliegende Linkseinfädungsstreifen an plangleichen Knotenpunkten innerorts und im Vorfeld bebauter Gebiete

Richter, Neumann, Zierke, Seebo € 17,00

V 212: Anlagenkonzeption für Meistereigehöfte – Optimierung von Arbeitsabläufen

Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00

V 213: Quantifizierung von Verkehrsverlagerungen durch Baustellen an BAB

Laffont, Mahmoudi, Dohmen, Funke-Akbiyik, Vieten € 18,00

V 214: Vernetzungseignung von Brücken im Bereich von Lebensraumkorridoren

Schmellekamp, Tegethof
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 215: Stauprävention auf BAB im Winter

Kirschfink, Poschmann, Zobel, Schedler € 17,00

V 216: Verbesserung der Verkehrssicherheit auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen (AOSI)

Lippold, Weise, Jählig € 17,50

V 217: Verbesserung der Bedingungen für Fußgänger an Lichtsignalanlagen

Alrutz, Bachmann, Rudert, Angenendt, Blase, Fohlmeister, Häckelmann € 18,50

V 218: Empfehlungen zum richtigen Aufbringen von Tausalzlösungen

Hausmann € 16,00

V 219: Bewältigung großer Verkehrsmengen auf Autobahnen im Winter

Roos, Zimmermann, Schulz, Riffel € 16,50

2013

V 220: Maßnahmen zur Bewältigung der besonderen psychischen Belastung des Straßenbetriebsdienstpersonals – Pilotstudie

Pöpping, Pollack, Müller € 16,00

V 221: Bemessungsverkehrsstärken auf einbahnigen Landstraßen

Arnold, Kluth, Ziegler, Thomas € 18,50

V 222: Aktualisierung des MLuS 02 – Erstellung der RLuS

Düring, Flassak, Nitzsche, Sörgel, Dünnebeil, Rehberger € 19,50

V 223: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2010

Fitschen, Nordmann € 16,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 224: Prüfung und Bewertung von Schutzeinrichtungen der Aufhaltestufe H4b für den Einsatz auf Brücken – Teil 1 und 2

Bergerhausen, Klostermeier, Klöckner, Kübler € 19,00

V 225: Neue Technik für den Straßenbetriebsdienst – Teil 1: Neue Informations- und Kommunikationstechniken

Teil 2: Autonomes Fahren für den Straßenbetriebsdienst
Holldorb, Häusler, Träger € 21,50

V 226: Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Landstraßen

Maier, Berger, Schüller, Heine € 18,00

V 227: Radpotenziale im Stadtverkehr

Baier, Schuckließ, Jachtmann, Diegmann, Mahlau, Gässler € 17,00

V 228: Sicherheitskenngößen für den Radverkehr

Baier, Göbbels, Klemps-Kohnen € 15,50

V 229: Straßenverkehrszählungen (SVZ) mit mobilen Messsystemen

Schmidt, Frenken, Hellebrandt, Regniet, Mahmoudi € 20,50

V 230: Verkehrsadaptive Netzsteuerungen

Hohmann, Giuliani, Wietholt € 16,50

V 231: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2011

Fitschen, Nordmann € 28,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 232: Reflexkörper und Griffigkeitsmittel in Nachstreumittelgemischen für Markierungssysteme

Recknagel, Eichler, Koch, Proske, Huth € 23,50

V 233: Straßenverkehrszählung 2010 – Ergebnisse

Lensing € 16,00

V 234: Straßenverkehrszählung 2010 – Methodik

Lensing € 17,50

2014

V 235: **Dynamische Messung der Nachsichtbarkeit von Fahr-
bahnmarkierungen bei Nässe**
Drewes, Laumer, Sick, Auer, Zehntner € 16,00

V 236: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2012**
Fitschen, Nordmann € 28,50
Die Ergebnisdateien sind auch als CD erhältlich oder können au-
ßerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de
heruntergeladen werden.

V 237: **Monitoring von Grünbrücken – Arbeitshilfe für den Nach-
weis der Wirksamkeit von Grünbrücken für die Wiedervernetzung
im Rahmen der KP II – Maßnahmen**
Bund-Länder Arbeitskreis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden. Der Anhang ist
interaktiv. Das heißt er kann ausgefüllt und gespeichert werden.

V 238: **Optimierung der Arbeitsprozesse im Straßenbetriebs-
dienst – Sommerdienst**
Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00

V 239: **Dynamische Messung der Griffigkeit von Fahrbahnmar-
kierungen**
Steinauer, Oeser, Kemper, Schacht, Klein € 16,00

V 240: **Minikreisverkehre – Ableitung ihrer Einsatzbereiche und
Einsatzgrenzen**
Baier, Leu, Klemps-Kohnen, Reinartz, Maier, Schmotz € 23,50

V 241: **Rastanlagen an BAB – Verbesserung der Auslastung und
Erhöhung der Kapazität durch Telematiksysteme**
Kleine, Lehmann, Lohoff, Rittershaus € 16,50

V 242: **Bordsteinkanten mit einheitlicher Bordhöhe und Bodenin-
dikatoren an Überquerungsstellen**
Boenke, Grossmann, Piazzolla, Rebstock,
Herrnsdorf, Pfeil € 20,00

V 243: **Nutzen und Kosten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen
über den gesamten Lebenszyklus**
Balmberger, Maibach, Schüller, Dahl, Schäfer € 17,50

V 244: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2013**
Fitschen, Nordmann € 28,50

V 245: **Überprüfung der Befahrbarkeit innerörtlicher Knotenpunk-
te mit Fahrzeugen des Schwerlastverkehrs**
Friedrich, Hoffmann, Axer, Niemeier, Tengen, Adams, Santel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 246: **Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Verkehrssicherheit in
Einfahrten auf Autobahnen**
Kathmann, Roggendorf, Kemper, Baier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 247: **Befahrbarkeit plangleicher Knotenpunkte mit Lang-Lkw**
Lippold, Schemmel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 248: **Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw – Grundlage-
ermittlung**
Burg, Röhling
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

2015

V 249: **Auswirkungen von Querschnittsgestaltung und längsge-
richteten Markierungen auf das Fahrverhalten auf Landstraßen**
Schlag, Voigt, Lippold, Enzfelder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 250: **Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen
mit Lang-Lkw**
Lippold, Schemmel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 251: **Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen von Straßenumge-
staltungen nach dem „Shared Space“-Gedanken**
Baier, Engelen, Klemps-Kohnen, Reinartz € 18,50

V 252: **Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprogno-
se für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen**
Gündra, Barron, Henrichs, Jäger, Höfle, Marx,
Peters, Reimer, Zipf € 15,00

V 253: **Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit und den
Ablauf des Verkehrs in Arbeitsstellen**
Baier, Kemper
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 254: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw**
Wellner, Uhlig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 255: **Überholen und Räumen – Auswirkungen auf Verkehrssi-
cherheit und Verkehrsablauf durch Lang-Lkw**
Zimmermann, Riffel, Roos
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 256: **Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagen-
teile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Vor-
aussetzung eines umfassenden Asset Managements**
Zander, Birbaum, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 257: **Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtli-
chen Hauptverkehrsstraßen**
Ohm, Fiedler, Zimmermann, Kraxenberger, Maier
Hantschel, Otto € 18,00

V 258: **Regionale Erfassung von Straßenwetter-Daten**
Holldorb, Streich, Uhlig, Schäufele € 18,00

V 259: **Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellie-
rung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten**
Geistefeldt, Sievers
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 260: **Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinter-
dienst**
Hausmann € 15,50

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.