

Entwicklung von Prüf- und Kalibriermethoden für Fahrbahnfeuchtesensoren

Abschlussbericht zum Projekt 99653

Bundesanstalt für Straßenwesen

Dipl.-Ing. H. Badelt
Dr.-Ing. J. Breitenstein
Dipl.-Ing. (FH) S. Scheurl
Dipl.-Ing. (FH) J. Fleisch
TA G. Häusler
TA A. Wendl

Inzell
Februar 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Fahrbahnfeuchte bei der Glättebildung – Kenntnisstand	3
2.1	Definitionen zur Fahrbahnfeuchte	3
2.2	Definition der kritischen Wasserfilmdicke bei der Glättebildung	3
2.3	Einflüsse auf die Fahrbahnfeuchte	4
3	Technischer Stand der Sensorik für die Fahrbahnfeuchte	5
4	Entwicklungsziel	6
5	Kritische Wasserfilmdicken für die Glättebildung	7
5.1	Vorliegende kritische Wasserfilmdicken für die Glättebildung	7
5.2	Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der kritischen Wasserfilmdicke	7
5.2.1	Versuchsdurchführung	7
5.2.2	Auswahl der Probestücke.....	8
5.2.3	SRT-Pendelverfahren bei tiefen Temperaturen	9
5.2.4	Messergebnisse	9
6	Auftragen einer gleichmäßigen Wasserfilmdicke	11
6.1	Beschreibung Prüfvorrichtung	11
6.2	Gleichmäßigkeit der Wasserfilmauftragung	13
6.3	Wiederholbarkeit der Auftragungen	15
7	Anwendung des Messverfahrens im Labor und auf der Fahrbahn	16
7.1	Beschreibung der Testdurchführung	16
7.2	Ergebnisse und Beobachtungen bei Tests der Spritzvorrichtung	17
8	Anforderungen an die Sensoren für die Fahrbahnfeuchte.....	18
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	20

Literaturverzeichnis**Anhang**

1 Einleitung

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

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

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

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

Ein wesentlicher Parameter für die Vorhersage der häufig auftretenden Eisglätte ist die Fahrbahnfeuchte. Bereits sehr geringe Wasserfilmdicken führen beim Gefrieren zu einer für den Verkehrsteilnehmer gefährlichen Glätte /18/. Für die Winterdiensteinsatzleitung ist weiterhin die Tendenz der Abtrocknung von Bedeutung. Bei Ausschluss weiterer Niederschläge kann bei Kenntnis des Abtrocknungsvorgangs und der Entwicklung der Fahrbahnoberflächentemperatur gegebenenfalls ein Einsatz vermieden werden. Die „Betriebstechnischen Anforderungen an Glättemeldeanlagen“ /2/ schreiben für diesen Zweck die Anzeige des Fahrbahnfeuchtezustandes in vier Stufen vor: trocken, feucht, feucht-nass und nass.

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

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

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

Messwerte ist eine Grundvoraussetzung für das notwendige Vertrauen der Einsatzleiter in die Anzeigewerte.

2 Fahrbahnfeuchte bei der Glättebildung – Kenntnisstand

2.1 Definitionen zur Fahrbahnfeuchte

Die Fahrbahnfeuchte wird in der Literatur qualitativ und quantitativ verschieden interpretiert, wobei die meisten Definitionen zur Bewertung einer Aquaplaninggefahr dienen /8//14//15/. Viele Größen nehmen dabei Bezug auf die Rauheit bzw. Rauheitsspitzen der Fahrbahnoberfläche und sind relativ aufwendig zu ermitteln. Die am einfachsten zu ermittelnde Größe ist die rechnerische Wasserfilmdicke. Sie ist definiert als Quotient aus dem Wasservolumen auf einer ebenen (Fahrbahn-)Fläche ohne Berücksichtigung der Oberflächenstruktur:

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

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

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

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

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

2.2 Definition der kritischen Wasserfilmdicke bei der Glättebildung

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

Der Einfluss der Rauigkeit und der stofflichen Beschaffenheit auf den Kraftschluss (Griffigkeit) lässt sich unter festgelegten Bedingungen bestimmen. Dabei wird der Kraftschluss zwischen einem Messreifen (SCRIM, Stuttgarter Reibungsmesser) bzw. Pendelgummi (SRT-

Pendelgerät) und einer Fahrbahnoberfläche unter festgelegten Bedingungen gemessen. Im Normalfall ist bei diesen Messungen die Fahrbahnoberfläche definiert angenässt.

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

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

2.3 Einflüsse auf die Fahrbahnfeuchte

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

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

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

Nach ihrem Entstehen trocknet die Fahrbahnfeuchte durch Verdunstung, Abfluss und Verdrängung unterschiedlich schnell ab. Die Einflussgrößen dabei sind $1/3$, $1/12$:

- Luftfeuchte

Die Luft enthält u. a. Wasserdampf, den sie bis zum Sättigungsgrad auch von einer feuchten Fahrbahnoberfläche aufnimmt. Der Wasserdampfgehalt kann in verschiedenen Größen angegeben werden: z. B. relative oder absolute Luftfeuchte, Taupunkttemperatur. Beim Zuführen weiteren Wasserdampfes bei Sättigung bzw. bei Abkühlen unter der Taupunkttemperatur wird Wasser abgegeben, das sich auch auf der Fahrbahnoberfläche niederschlagen kann.

- Lufttemperatur

Die Luft nimmt in Abhängigkeit von ihrer Temperatur eine bestimmte Wassermenge auf. Das Aufnahmevermögen nimmt mit fallender Temperatur ab.

Die Temperatur (0°C -Grenze) bestimmt, welchen Aggregatzustand der bei Übersättigung aus der Luft ausscheidender Wasserdampf einnimmt: in Form kleiner Wassertröpfchen (Nebel, Wolken, Tau) bei Temperaturen über 0°C bzw. als Eiskristalle (Schnee, Reif, Eisregen) bei Temperaturen gleich oder unter 0°C .

Die Temperatur der Luft hängt wiederum von verschiedenen Faktoren ab.

- Wind

Wind als bewegte Luft infolge von Luftdruckunterschieden in der Atmosphäre führt zu wechselnden Luftmengen über der Fahrbahnoberfläche. Bei der Verdunstung von Wasser auf der Fahrbahnoberfläche ist eine darüber liegende unbewegte Luftschicht schnell gesättigt. Die Weiterleitung des Wasserdampfes in der Luft geht vergleichsweise langsam vor sich.

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

– Verkehr

Der Verkehr wirkt sich durch mehrere Faktoren auf die Fahrbahnfeuchte aus.

- Durch die Reifen tritt eine mechanische Verdrängung und Aufwirbelung von vorhandener Feuchte auf. Die aufgewirbelte Wassermenge kann schneller verdunsten, da sie in einer größeren Luftschicht verteilt wird.
- Durch die erzeugten Luftbewegungen wird immer wieder trockenere Luft über der Fahrbahnoberfläche herangeführt, wodurch sich der Verdunstungsprozess beschleunigt.
- Eine hohe Verkehrsdichte erhöht in den Rollspuren der Fahrbahnoberfläche die Fahrbahnoberflächentemperatur in geringem Umfang /6/. Wasser mit einer höheren Temperatur verdunstet schneller.

Bei intensiver Sonneneinstrahlung kann der Verkehr die Fahrbahnoberflächentemperatur aber auch absenken, weil immer wieder kühlere Luftmassen an die Fahrbahnoberfläche herangeführt werden und somit der Wärmeabtransport von der Fahrbahnoberfläche erhöht wird /6/.

– Neigung, Rauheit und Ebenheit der Fahrbahn

Je nach Neigung, Rauheit und Ebenheit der Fahrbahn kommt es vor allem bei intensiven Niederschlag in Form von Regen zu einem unterschiedlichen Abflussverhalten der Fahrbahnnaße.

3 Technischer Stand der Sensorik für die Fahrbahnfeuchte

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

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

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

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

b) Berührungslose Messverfahren

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

Entsprechend der Wellenlänge der Strahlung werden die Verfahren unterschieden:

- Infrarotverfahren
- Mikrowellenverfahren /20/

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

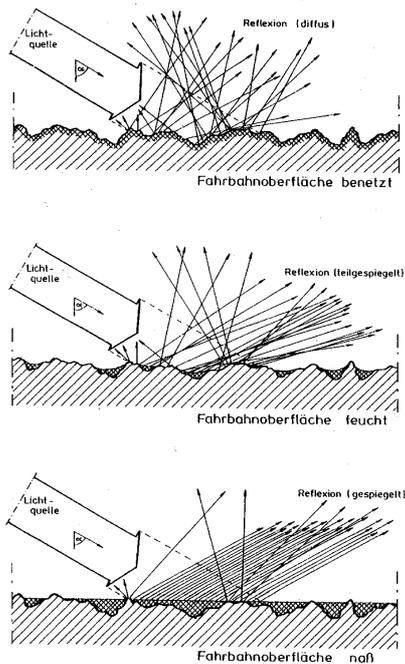


Abbildung 1: Reflexionsverhältnisse bei unterschiedlichen Feuchtezuständen von Fahrbahnoberflächen /16/

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

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

4 Entwicklungsziel

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

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

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

5 Kritische Wasserfilmdicken für die Glättebildung

5.1 Vorliegende kritische Wasserfilmdicken für die Glättebildung

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

Unter Verwendung eines SRT-Pendelgerätes wurde die Griffigkeit der eisüberdeckten Bohrkernoberfläche bestimmt. Die Versuche führten zu dem Ergebnis, dass bereits ab einer Wasserfilmdicke von ca. 0,03 mm SRT-Messwerte unter 50 entstanden (Abbildung 2). Ein SRT-Messwert unter 50 bedeutet nach dem Merkblatt über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Ausgabe 1968, /11/ und der Arbeitsanweisung für das SRT-Pendelgerät /10/ schlechte Werte für die Griffigkeit, bei denen geeignete Maßnahmen für die Verkehrssicherheit eingeleitet werden sollten.

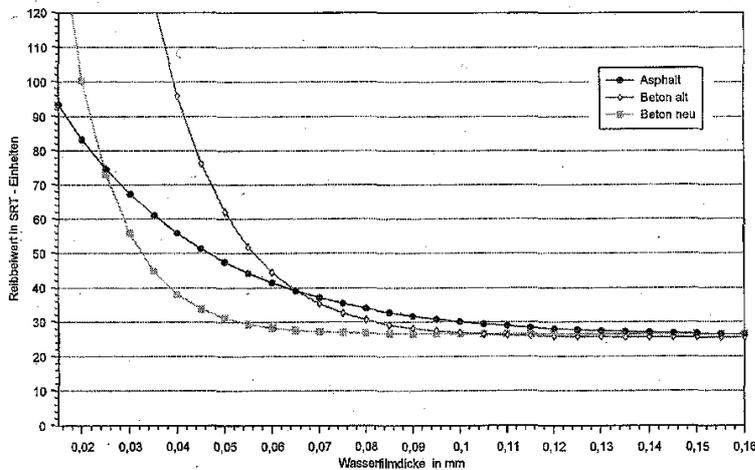


Abbildung 2: Änderung der SRT-Messwerte in Abhängigkeit von einer gefrorenen Wasserfilmdicke bei -5°C, Auftragung der Wasserfilmdicke mit einem Schwamm /18/

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

5.2 Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der kritischen Wasserfilmdicke

5.2.1 Versuchsdurchführung

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

Die Bohrkern wurden vor der Benetzung und den anschließenden Griffigkeitsmessungen bei rund +40°C im Klimaschrank getrocknet und anschließend mindestens 16 Stunden bei -5°C abgekühlt. Die relative Luftfeuchte betrug während der Versuche in der Kältekammer ca. 55-65%. Ein Versuch war innerhalb von ca. 5 min abgeschlossen, so dass die Verdunstung von Eis bei der Bewertung vernachlässigt werden kann.

Nach mehreren Probedurchgängen lagen nach subjektiven Prüfungen durch visuelle Betrachtung und Abtasten mit der Hand Erfahrungen für ein weitgehend gleichmäßiges Aufspritzen vor. Die Gleichmäßigkeit ist durch den Abstand der Spritzpistole zum Bohrkern, durch die Einstellungen an der Spritzpistole (Öffnungsstand der Wasser- und Luftdüsen sowie der dort anstehende Luftdruck) und durch den Abstand der Spritzpistole zum Bohrkern

beim Spritzen bestimmt. Die Auftragsmenge wird im wesentlichen durch die Geschwindigkeit und/oder die Anzahl der Spritzübergänge reguliert. Mit der Handführung lässt sich aber eine vorgesehene Menge nur sehr ungenau einhalten. Jedoch konnte mit einer hohen Anzahl von Versuchen ein breites Band unterschiedlicher Wasserfilmdicken erzielt werden. In der Regel wurde eine höhere Wasserfilmdicke durch mehrmalige und nicht durch langsamere Übergänge mit der Spritzpistole erreicht.

5.2.2 Auswahl der Probestücke

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



Abbildung 3: SRT-Pendelgerät auf Einspanntisch

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

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

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

5.2.3 SRT-Pendelverfahren bei tiefen Temperaturen

Für die Bewertung der Griffigkeit im Labor bei tiefen Temperaturen ist neben einer subjektiven Betrachtung nur das SRT-Pendelverfahren geeignet. Der Einsatz des Verfahrens wird allerdings in einer Arbeitsanweisung für das SRT-Pendelgerät bei Temperaturen unter +5°C für die Anwendung nicht empfohlen, weil bei den tiefen Temperaturen eine erhöhte Beanspruchung des Messpersonals und eine damit sinkende Qualität der Messungen erwartet wird /10/.

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

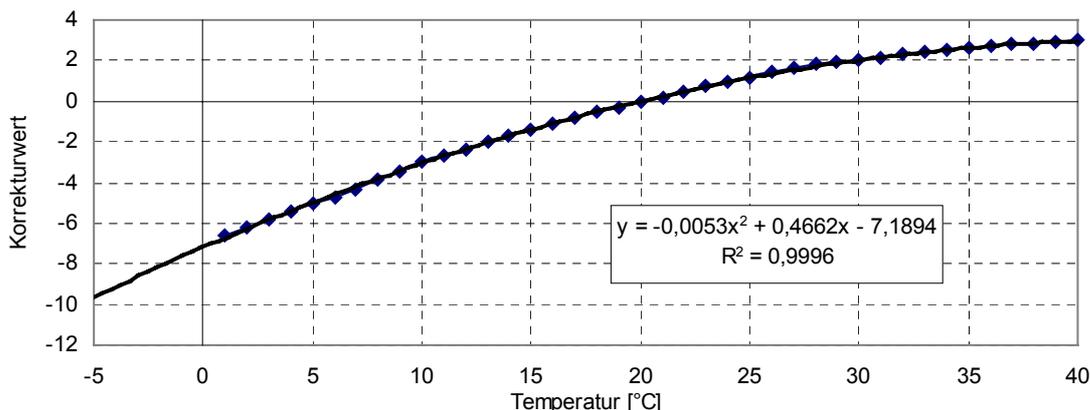


Abbildung 4: Temperaturkorrektur für die Messergebnisse des SRT-Pendelgerätes

5.2.4 Messergebnisse

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

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

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

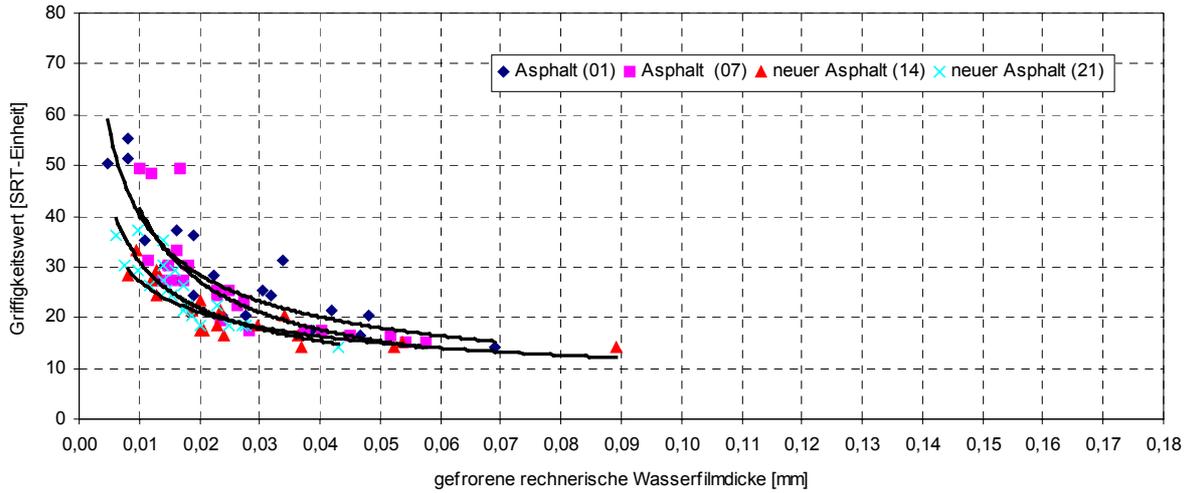


Abbildung 5: Griffigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit von einer gefrorenen Wasserfilmdicke bei -5°C auf verschiedenen Fahrbahndeckschichten in Asphaltbauweise

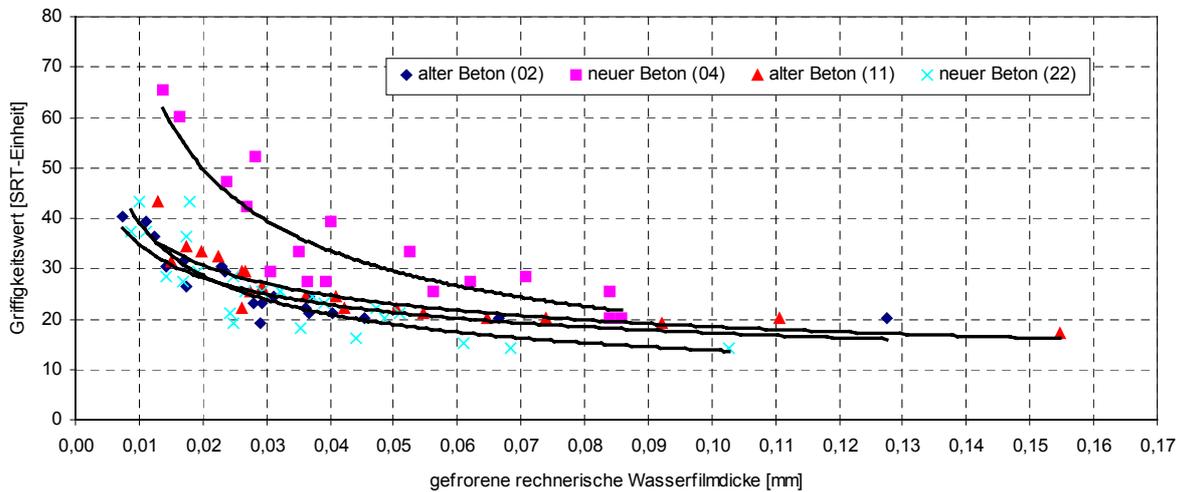


Abbildung 6: Griffigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit von einer gefrorenen Wasserfilmdicke bei -5°C auf verschiedenen Fahrbahndeckschichten in Betonbauweise

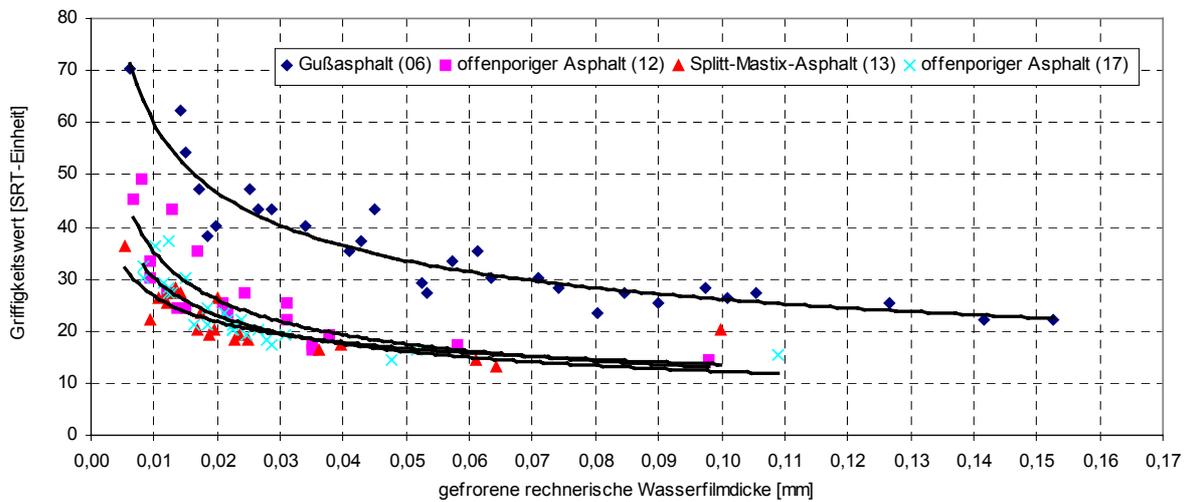


Abbildung 7: Griffigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit von einer gefrorenen Wasserfilmdicke bei -5°C auf verschiedenen Fahrbahndeckschichten in Asphaltbauweise

Bei den vorgenommenen Korrelationen zwischen der gefrorenen Wasserfilmdicke und der gemessenen Griffigkeit mit einer Potenzfunktion der Form $y=ax^b$ ergaben sich Bestimmtheitsmaße R^2 zwischen 0,76 und 0,88 (siehe Abbildungen 1 bis 12 im Anhang). Die Abweichungen von diesem funktionellen Zusammenhang werden vor allem auf eine ungleiche Auftragung des Wassers aufgrund der handgeführten Spritzpistole zurückgeführt. Weitere Fehler können bei der Messung mit dem SRT-Gerät oder durch die Wägung aufgetreten sein. Die erreichten Genauigkeiten reichen jedoch für die Abschätzung der kritischen Wasserfilmdicken aus.

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

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

Vereinzelt wurde die Glättebildung subjektiv durch Drüberrutschen mit einem Schuh bewertet, der ein glattes Profil hatte. Ab einer Wasserfilmdicke von 0,03 mm war besonders auf den „glatten“ Bohrkernen eine sehr deutliche Glätte länger anhaltend spürbar.

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

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

6 Auftragen einer gleichmäßigen Wasserfilmdicke

6.1 Beschreibung Prüfvorrichtung

Anhand der Erfahrungen aus den im Abschnitt 5 beschriebenen Versuchen wurde eine maschinelle Vorrichtung zum Führen einer Airbrush-Spritzpistole erstellt. Das äußere Gestell der Vorrichtung hat die Form eines flachen Tisches mit vier Beinen und eine Abmessung von ca. 110x110x50 cm (Abbildung 8). Eine bewegliche Baueinheit mit zwei Stellmotoren führt innerhalb des Gestells die Spritzpistole in einer Ebene ca. 23 cm über der Fahrbahnoberfläche jeweils in x-y-Richtung weitestgehend beliebig. Die maximal überfahrbare Fläche beträgt 50x50 cm. Zur Zeit sind ausgeführte Sensoren wesentlich kleiner. Auch in Zukunft ist nicht mit größeren Sensoren zu rechnen, da es schwierig ist, derart große Sensoren ebenflächig in der Fahrbahn einzubauen.



Abbildung 8: Gesamtansicht der Kalibriervorrichtung im Labor

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

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

Die Airbrush-Spritzpistole sprüht senkrecht nach unten. Die Einstellvorrichtungen an der Spritzpistole für die Luftzufuhr und die Düsenöffnung sind durch Anschlagsschrauben fest justiert. Die Einstellungen werden im Betrieb nicht geändert. Der Luftdruck am Kompressoraustritt ist bei den Versuchen auf 1,5 bar konstant eingestellt. Das Wasser fließt der Spritzpistole aus einem oberhalb liegenden Behälter zu. Das Behältervolumen beträgt etwa 0,5 l (Abbildung 9). Aufgrund dieser Menge und der Behälterform ändert sich der Wasserspiegel im Betrieb innerhalb von 10 min nur um etwa 5 mm, so dass aus der Wasserspiegelsenkung nur vernachlässigbare Auswirkungen auf die Druckverhältnisse und damit den Wasserdurchsatz in der Spritzpistole zu erwarten sind. Die gewünschte Auftragsmenge wird über die Geschwindigkeit der Führung bzw. durch mehrmaliges Überfahren geregelt.

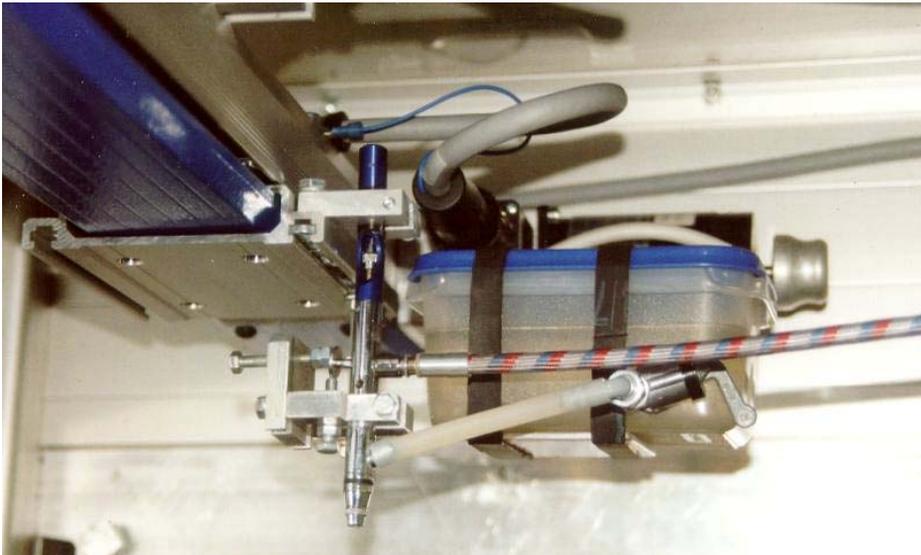


Abbildung 9: Befestigung der Spritzpistole und des Wasserbehälters an der Verfahrvorrichtung

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

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

6.2 Gleichmäßigkeit der Wasserfilmauftragung

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

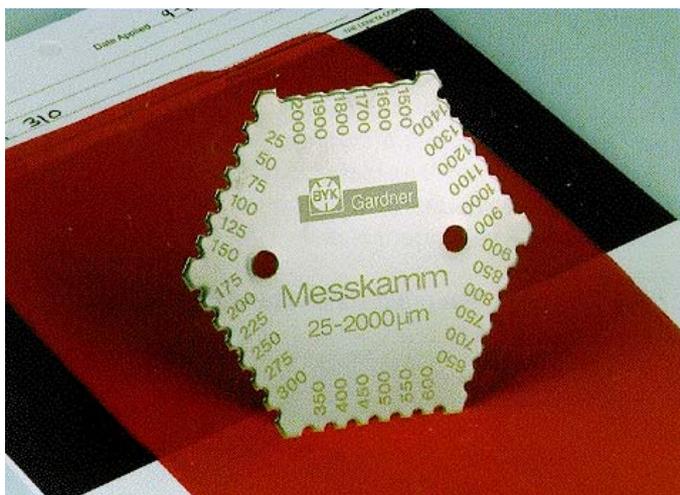


Abbildung 10: Messkamm für das Messen von Schichtdicken

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

Alternativ wurde die Gleichmäßigkeit des Auftrags von sehr dünnen Wasserfilmdicken durch Wägung nach Bespritzen von sogenannten Prüfstreifen nachgewiesen. Dazu erfolgte der Wasserauftrag mit der maschinell geführten Spritzpistole auf 10 aneinander liegende Streifen aus Kunststoff mit einer Abmessung von 300x10x10 mm. Neben den beiden äußeren Streifen lag jeweils ein weiterer Streifen, der ein seitliches Bespritzen dieser Messstreifen verhindern sollte. Vor und nach dem Auftragen wurde die Masse der Streifen gewogen und aus der Differenz die Wasserfilmdicke berechnet.

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



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

Nach umfangreichen Optimierungsversuchen betragen die Differenzen zwischen den auf den Streifen aufgetragenen Wassermengen maximal rund 30%. Die hohe Differenz wird neben dem Wägefehler und den tatsächlichen Ungleichmäßigkeiten beim Aufspritzen auch auf die Verdunstung des aufgetragenen Wassers zurückgeführt.

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

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

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

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

Es ist davon auszugehen, dass die Wasserfilme mit der entwickelten Vorrichtung gleichmäßiger aufgetragen werden können, als die gemessenen Abweichungen auf den Messstreifen von bis zu 30 % angeben. Aus der Erfahrung bei der Versuchsdurchführung wird geschätzt, dass nach Eliminierung der Fehler bei der Wägung und durch die Verdunstung die tatsächlichen Wassermengen auf den Teststreifen um maximal +/- 8 % von einem Mittelwert abweichen.

6.3 Wiederholbarkeit der Auftragungen

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

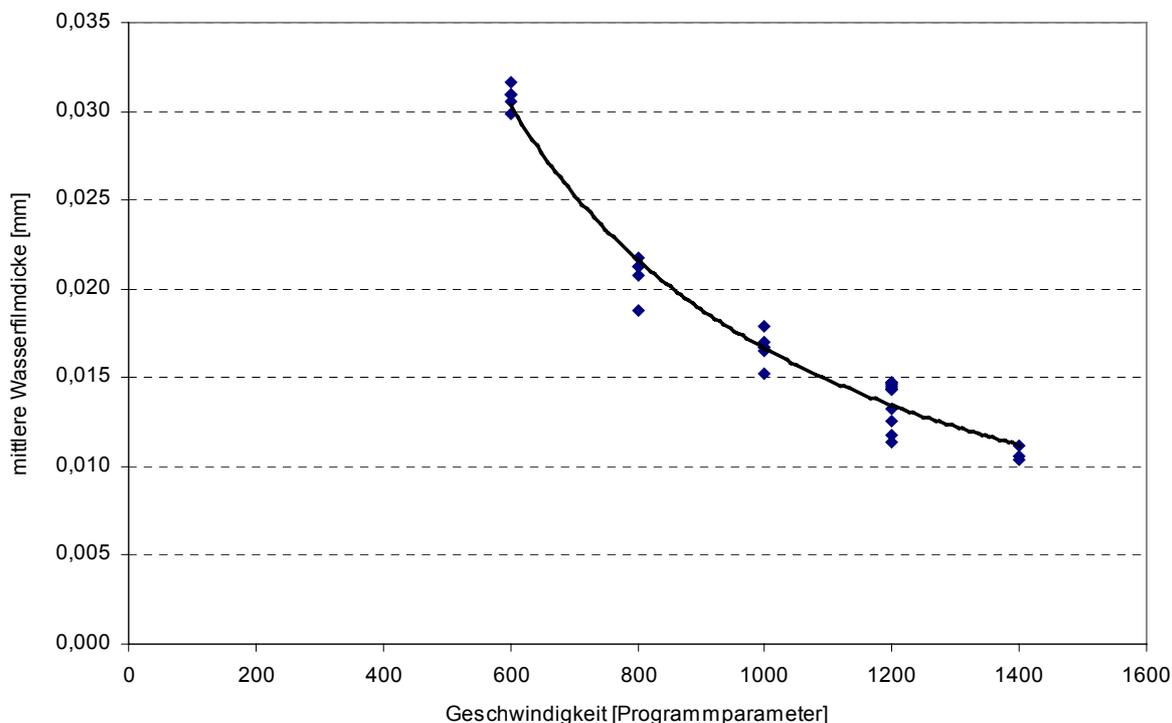


Abbildung 12: Wiederholbarkeit für das Auftragen von dünnen Wasserfilmdicken

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

Nach den aufgeführten Versuchen fanden Untersuchungen statt, die die Wiederholbarkeit einer gewünschten Auftragsmenge verbessern sollten. Durch visuelle Kontrollen können Blasenbildungen in der Zuleitung beseitigt werden. Ebenso wurde die Spritzdüse und -nadel öfters gereinigt. Mit diesen Maßnahmen wurde erreicht, dass die Ausbringmenge um einen Mittelwert von 8,8 g/min um +/- 6 % schwankt. Höhere Genauigkeiten bedeuten bei der vorhandenen Spritzpistole einen erhöhten Einstellaufwand. Zur Vermeidung von Kalkanlagerungen in der Spritzpistole und den Leitungen wurden die Versuche mit entionisiertem Wasser durchgeführt.



Abbildung 13: Auffangen der Spritzmenge mit einem Becherglas

7 Anwendung des Messverfahrens im Labor und auf der Fahrbahn

7.1 Beschreibung der Testdurchführung

Tests der Spritzvorrichtung fanden im Labor und/oder auf der Fahrbahn an sechs Sensoren (4 Typen) für die Fahrbahnfeuchte statt. Bei den Tests wurde jeweils nur der Messwert betrachtet, der die Fahrbahnfeuchte angibt. Plausibilitätsprüfungen der Messwerte zur Fahrbahnfeuchte, bei denen die Glättemeldeanlagen z. B. den Niederschlag oder eine hohe Luftfeuchte bei Beginn einer Fahrbahnfeuchte einbeziehen, wurden nicht durchgeführt. Drei der eingesetzten Sensortypen leiteten die Wasserfilmdicke von einem elektrischen Messwert unmittelbar ab. Ein Sensortyp stellte nur die Feuchte auf der Fahrbahn fest, eine Differenzierung der Wasserfilmdicke nimmt dieser Lieferant nicht vor. Abstufungen der Fahrbahnfeuchte werden anhand der gleichzeitig gemessenen Niederschlagsintensität angegeben.

Bei den ersten Tests der Spritzvorrichtung an Sensoren für die Wasserfilmdicke wurde diese mit einem Sollwert von 0,015 mm im Minutentakt aufgetragen. Diese Menge galt zum Zeitpunkt dieser Tests als die niedrigste, die mit hinreichender Genauigkeit wiederholt werden konnte. Erst bei dem 6. Test wurde über einem eingebauten Sensorblock eine Wasserfilmdicke von 0,01 mm ohne Probleme aufgetragen. Die beaufschlagte Fläche betrug in allen Fällen 40x38 cm. Diese Fläche fährt die Vorrichtung in 39 s (0,015 mm Wasserfilmdicke) bzw. 34 s (0,01 mm Wasserfilmdicke) ab.

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



Abbildung 14: Einsatz der Kalibriervorrichtung auf der Autobahn

7.2 Ergebnisse und Beobachtungen bei Tests der Spritzvorrichtung

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

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

Von anderen Sensoren wurde die zunehmende Wasserfilmdicke nicht richtig erkannt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass auf einigen Sensoroberflächen das Wasser mehr oder weniger große Tropfen bildet. Ein Teil der Tropfen ändert bei einer weiteren Wasserzugabe nicht proportional seine Höhe sondern seinen Umfang (Abbildung 15 und Anhang Abbildungen 13 bis 18). Ein Zuwachs der Wasserfilmdicke kann damit auf den teilweise sehr kleinen Messflächen von nur wenigen Quadratmillimetern nicht richtig gemessen werden. Bei einem Test wichen die angezeigten Messwerte über 200% von den aufgetragenen Wasserfilmdicken ab.



Abbildung 15: Sensorblock mit Wassertropfen

Diese Tropfenbildung findet vornehmlich auf polierten Metalloberflächen statt, ist aber auch auf nicht oder wenig aufgerauten Kunststoffoberflächen sehr deutlich erkennbar. Auf einer Fahrbahnoberfläche verteilt sich das Wasser dagegen aufgrund der rauen Struktur sehr gleichmäßig, es sind keinerlei Tropfenbildungen zu erkennen. Auf den Sensoroberflächen

stehende Wassertropfen werden durch überrollende Reifen zur Seite geschleudert bzw. dort konzentriert. Durch die Überrollungen ändert sich die Verteilung des Wassers auf der Fahrbahn und auf der Sensoroberfläche verkehrsmengenabhängig ständig. Eine verlässliche Erfassung der Wasserfilmdicke sollte daher auf einer Vielzahl von Einzelwerten beruhen, aus denen mit geeigneten Verfahren Mittelwerte gebildet werden.

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

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

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

8 Anforderungen an die Sensoren für die Fahrbahnfeuchte

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

– Wasserfilmdicke

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

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

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

- Tropfenbildungen und Wasserfilmdicken auf den Sensorblöcken

Tropfenbildungen auf den Sensorblöcken führen mit großer Wahrscheinlichkeit zu falschen Messergebnissen. Die Sensorblöcke sollten durch eine Oberflächengestaltung entsprechend den Fahrbahnbauweisen ausgeführt werden, auf denen sich keine Tropfen bilden. Gleichzeitig muss durch eine gleichartige Gestaltung vermieden werden, dass sich auf den Sensorblöcken eine andere Wasserfilmdicke als auf der umliegenden Fahrbahn bildet. Ebenso müssen sie einwandfrei ebenflächig zur umliegenden Fahrbahnfläche eingebaut sein.

- Anzahl der Messungen/Messintervalle

Infolge von Überrollungen wechselt die Dicke des Wasserfilms auf der Fahrbahnoberfläche innerhalb von wenigen Sekunden erheblich. Für eine hinreichend genaue Aussage reicht es nicht, wenn die kleinflächigen Sensoren innerhalb einer Minute nur wenige Messungen vornehmen oder die Bestimmung eines Messwertes mehrere Sekunden und länger dauert. Um unter diesen Verhältnissen den Messfehler zu verkleinern, sollten die Sensoren innerhalb einer Minute mindestens 15-20 Messwerte erfassen und diese dann für die Anzeige gemittelt werden.

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

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

- Verschmutzung der Sensoroberflächen

Eine weitere Forderung ist, dass Schmutz die Messwerte der Sensoren nicht über die geforderte Genauigkeit hinaus beeinflusst. Die Sensoren sollten unter normalen Verhältnissen eine Winterperiode ohne Wartung einwandfrei arbeiten.

- Sonstige Forderungen an GMA im Zusammenhang mit der Fahrbahnfeuchte

Niederschlag führt zur Verdünnung einer vorhandenen Tausalzkonzentration in der Fahrbahnfeuchte und damit zur Erhöhung der Gefriertemperatur. Bei Abfluss von Tausalzlösungen verringert sich die aufgetragene Tausalzmenge. Die Angaben von bisher vorhandenen Glättemeldeanlagen für die Gefriertemperatur gelten als sehr ungenau /5/.

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

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

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kenntnis einer Feuchte auf der Fahrbahn ist ein entscheidender Faktor für die Vorhersage einer Eisglätte. Der Verlauf einer Abtrocknung lässt eine mögliche Glättegefahr besser abschätzen. Die bisher vorgegebenen Stufen einer Fahrbahnfeuchte stellen nur grobe Einschätzungen dar, die die tatsächlichen Wassermengen nur sehr ungenau wiedergeben.

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

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

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

Daraus abgeleitet wurde neben einem Verfahren zum Nachweis einer dünnen gleichmäßigen Wasserfilmdicke eine Vorrichtung zum Auftragen definierter Wasserfilmdicken geschaffen, die sowohl die Prüfung von Sensoren im Labor als auch auf der Fahrbahn zulässt. Die Vorrichtung besteht im wesentlichen aus einem Gestell mit dem eine Spritzpistole in einer Ebene in x-y-Richtung über eine Fläche von max. 50x50 cm anhand einer elektronischen Steuerung beliebig verfahren werden kann. Die Kosten aller Komponenten für eine Prüfung auf der Fahrbahn (Spritzvorrichtung mit Steuereinheit und Windschutz, Laptop, Waage und Elektroaggregat) betragen rund 30 TDM.

Die Eignung der Vorrichtung wurde im Labor und auf der Fahrbahn an verschiedenen Sensortypen getestet. Sie ließ sich ohne Probleme einsetzen. Bei den Erprobungen haben alle Sensoren eine aufgetragene Wasserfilmdicke von 0,015 mm bzw. 0,01 mm erkannt. Nur ein Sensor konnte dagegen eine zunehmende Wasserfilmdicke hinreichend genau angeben. Zwischen den aufgetragenen Wasserfilmdicken und den angezeigten Messwerten der Sensoren traten Abweichungen über 200 % auf. Bei einigen Sensoren hätte eine andere Kalibrierung eine richtige Anzeige ergeben. Bei anderen Sensoren traten wahrscheinlich Messfehler auf, weil sich auf der Oberfläche der Sensorblöcke Tropfen bildeten, die keine gleichmäßige Wasserverteilung wie auf der Fahrbahn zuließen. Diese Sensoren sind für die Messung der Wasserfilmdicke eher ungeeignet.

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

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

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

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

Literaturverzeichnis

- /1/ - Konzept eines Straßenzustands- und Wetterinformationssystems (SWIS)
Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Oktober 1991
- /2/ - Betriebstechnische Anforderungen an Glättemeldeanlagen
Bundesanstalt für Straßenwesen, November 1996
- /3/ Autorenkollektiv Meyers kleines Lexikon „Meteorologie“
Meyers Lexikonverlag, Mannheim 1987
- /4/ Bach, V. Verbesserung der Straßenwetterprognose durch Einbeziehung der Messwerte von Glättefrühwarnsystemen
Abschlussbericht zum Forschungsauftrag FA 03.205R89H des Bundesministers für Verkehr, TH Darmstadt 1991
- /5/ Badelt, H. Praxisgerechte Anforderungen an Glättemeldeanlagen,
Abschlussbericht zum BAST-Projekt 92715, Inzell 03/1996
- /6/ Badelt, H. Straßenbauliche und verkehrsbedingte Einflüsse auf die Fahrbahnoberflächentemperatur in Bezug auf die winterliche Glättebildung, Abschlussbericht zum BAST-Projekt 92714, Inzell 06/1996
- /7/ Blaser, P.; Link, P.; Lüdin, P.; Ryf, W. Einfluss der Ausbringung von Streusalz auf das benachbarte und entferntere Grundwasser
Forschungsbericht Nr. 386, Peter Link AG, Dr. Heinrich Jäckli AG, 1998
- /8/ Euler, G.; Schröder, R.C.M.; Lang, J.; Plhak, R.; Retzlaff, G. Ermittlung der zeitlichen Feuchte- und Nässeverteilung auf Fahrbahnen, Technische Hochschule Darmstadt, Heft 567
Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik
- /9/ FGSV Richtlinie zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe,
Entwurf 05/99
- /10/ FGSV Arbeitsanweisung für kombinierte Griffigkeits- und Rauheitsmessungen mit dem Pendelgerät und dem Ausflussmesser
- /11/ FGSV Merkblatt über die Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Glätte, Ausgabe 1968
- /12/ Geiger, R. Das Klima der bodennahen Luftschicht, Verlag Friedrich Vieweg&Sohn, Braunschweig 1950
- /13/ Hanke, H., Levin, C. Wirksamkeit des Straßenwinterdienstes auf die Verkehrssicherheit und die Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufes
Abschlussbericht zum Forschungsauftrag FA 03.174G85H des Bundesministers für Verkehr, TH Darmstadt 1987
- /14/ Höcker, H.J. „Nasse“ Fahrbahnoberflächen – Definition und Einflussfaktoren. Straße und Autobahn 10/1971, S. 452-458
- /15/ Holzwarth, F. Entwicklung eines Verfahrens zur berührungslosen Messung der Wasserfilmdicke auf Fahrbahnen
- /16/ Krebs, H.G.; Böllinger, G. Beurteilung und Erfassung von Nässezuständen auf Fahrbahnen, Schlussbericht zum Forschungsauftrag des BMW, Bau- Nr.4.075G79G
- /17/ Kutter, M., Niebrügge, L. Erfahrungen mit Glätteismeldegeräten beim Landschaftsverband Westfalen-Lippe
Straße und Autobahn Heft 12/85, S.498 - 503

- /18/ Nicolas, J.-P. Glättebildung durch Überfrieren, Schwellwerte der Oberflächenfeuchte auf Fahrbahnen
Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V36, 1996
- /19/ Ruess, B. Salz- oder Splittstreuung im Winterdienst
Forschungsauftrag 4/95 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute (VSS), Januar 1998
- /20/ Scharsching, H. Schlussbericht Glatteisfrühwarnsysteme Test 1990/91
Mödling 12/91