



Berichte aus dem Institut für Konstruktion
und Fertigung in der Feinwerktechnik

Fabian Holzwarth

**Entwicklung eines Verfahrens zur berührungslosen
Messung der Wasserfilmdicke auf Fahrbahnen**

Ein Beitrag zur Verkehrssicherheit

Entwicklung eines Verfahrens zur berührungslosen Messung der Wasserfilmdicke auf Fahrbahnen

Ein Beitrag zur Verkehrssicherheit

Von der Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Fabian Holzwarth

geboren in Ulm

Hauptberichter: Prof. Dipl.-Ing. A. Jung
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Dipl.-Ing. H. J. Tiziani
Tag der mündlichen Prüfung: 1. Juli 1996

Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik
der Universität Stuttgart

1996

345/4165
INSTITUT
FÜR METEOROLOGIE U. KLIMATOLOGIE
UNIVERSITÄT HANNOVER
HERRENHÄUSER STR. 2 - 30419 HANNOVER

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen.....	8
	Eigennamen und Abkürzungen.....	14
1	Einleitung	15
2	Ziel der Arbeit.....	17
2.1	Vorgehensweise.....	17
2.2	Pflichtenheft	19
3	Nässe auf Fahrbahnen - Stand der Kenntnis.....	20
3.1	Witterungsbedingte und fahrbahnspezifische Einflußgrößen auf die Wasserfilmdicke.....	20
3.2	Meßgrößen und qualitative Definitionen für die Fahrbahn­nässe	21
3.2.1	Niederschlagsintensität und rechnerische Wasserhöhe.....	22
3.2.2	Bezogene Wasserfilmdicke.....	23
3.2.3	Wasserhöhendefinition mit dem ausgeliterten Bezugsniveau	24
3.2.4	Maßgebende Wasserfilmdicke.....	24
3.2.5	Repräsentative Wasserfilmdicke.....	25
3.2.6	Qualitative Beschreibungen des Begriffes "feucht".....	25
3.3	Beurteilung der Meßgrößen	28
4	Berührungslose Meß- und Detektionsverfahren für Feuchtigkeit, Wasser- und Eisschichten	29
4.1	Niederfrequente elektromagnetische Felder	29
4.2	Mikrowellen	29
4.3	Strahlung im Infrarotbereich.....	30
4.4	Sichtbares Licht und nahes Infrarot, Reflexions- und Streulichtverfahren.....	31
4.5	Ionisierende Strahlung	33
5	Vorüberlegungen zum Wasserhöhensensor.....	34
5.1	Funktionelle Darstellung des Sensors	34
5.2	Passives Sensorprinzip.....	36
5.2.1	Black-Box-Darstellung eines passiven Sensorprinzips.....	36
5.3	Aktives Sensorprinzip.....	38
5.3.1	Black-Box-Darstellung des aktiven Sensorprinzips.....	39

6	Modellierung des Systems Sensor-Fahrbahn	41
6.1	Nomenklatur für Strahlung und Black-Boxes im Modell	41
6.2	Festlegungen im System Sensor-Fahrbahn	42
6.3	Black-Box-Darstellung	43
6.4	Geometrische und materialspezifische Annahmen	45
6.4.1	Fahrbahnoberfläche	45
6.4.2	Wasserschicht	45
6.4.3	Ausgesandte Strahlungsleistung - Strahlungssender	45
6.4.4	Strahlungsempfänger	45
6.5	Betrachtung der einzelnen Black-Boxes des Modells	45
6.5.1	Einfluß der Luftstrecke im Sendestrahlgang (Black-Box 0)	45
6.5.2	Einfluß der Grenzfläche Luft-Wasser (Black-Box 01)	46
6.5.3	Wegstrecke zwischen Wasseroberfläche und Fahrbahnoberfläche (Black-Box 1)	50
6.5.4	Wirkung der Grenzfläche Wasser-Fahrbahnoberfläche (Black-Box 12)	53
6.5.4.1	Ursachen der Streuung	55
6.5.4.2	Räumliche Verteilung der von der Fahrbahn ausgehenden Streustrahlung	59
6.5.5	Weg der gestreuten Strahlung zum Empfänger	60
6.5.5.1	Wegstrecke von der Fahrbahnoberfläche bis zur Wasseroberfläche (Black Box 1')	60
6.5.5.2	Wirkung der Grenzfläche Wasser-Luft (Black-Box 10)	61
6.5.6	Einfluß der Luftstrecke auf die gestreute Strahlung (Black-Box 0')	62
6.6	Energetische Betrachtung des gesamten Strahlungsweges	62
6.6.1	Empfänger innerhalb des an der Oberfläche reflektierten Strahlenbündels	62
6.6.2	Empfänger außerhalb des an der Oberfläche reflektierten Strahlenbündels	63
7	Herleitung der Auswertungsfunktion	64
7.1	Schichtdickenbestimmung mit einem Wellenlängenbereich	64
7.2	2-Wellenlängen-Meßprinzip	65
8	Erarbeitung der Meßmethode	67

8.1	Funktionen im Signalfluß Sensor - Fahrbahn - Sensor	67
8.2	Zusätzliche Funktionen am realen Sensor	68
8.3	Varianten zur Signalerzeugung	69
8.3.1	Methode 1 - breitbandig bestrahlen, wellenlängenselektiv empfangen	71
8.3.2	Methode 2 - wellenlängenselektiv bestrahlen, breitbandig empfangen	71
8.3.3	Methode 3 - wellenlängenselektiv bestrahlen und empfangen	71
8.4	Bewertung der Methoden	72
9	Konkretisierung der Hauptfunktionen	74
9.1	Betrachtete Wellenlängenbereiche	74
9.1.1	Meßbereich 0 bis 1 mm Schichtdicke	78
9.1.2	Meßbereich 0 bis 10 mm Schichtdicke	79
9.2	Geometrische Anordnung der Sensorkomponenten relativ zur Fahrbahn	79
10	Auswahl und Auslegung der Sensorkomponenten zur konstruktiven Lösung	80
10.1	Strahlungssender	80
10.1.1	Anforderungen an den Strahlungssender	80
10.1.2	Übersicht der Strahlungsquellen	81
10.1.2.1	Lumineszenzquellen	82
10.1.2.2	Thermische Strahlungssender	83
10.1.3	Auswahl des Strahlungssenders	84
10.1.3.1	Auswahl einer geeigneten Glühlampe und der Beleuchtungsoptik	85
10.2	Strahlungsmodulation	90
10.2.1	Anforderungen an den Strahlungsmodulator	90
10.2.2	Auswahl des Modulators	90
10.3	Strahlungsempfänger	92
10.3.1	Anforderungen an den Strahlungsempfänger	92
10.3.2	Auswahl der Strahlungsempfänger	93
10.4	Strahlungsfiler	94
10.4.1	Anforderungen an die Strahlungsfiler	94
10.4.1.1	Auswahl der Strahlungsfiler	95
10.5	Empfängeroptik	96
10.5.1	Anforderungen an die Empfängeroptik	96

10.5.1.1	Auswahl der Empfängeroptik	96
10.6	Justierung der Strahlungsempfänger	98
10.6.1	Anforderungen an die Justierelemente	98
10.6.2	Justierung des Axialabstandes Linse-Detektor	98
10.6.3	Ausrichtung der optischen Achse	99
10.7	Gehäuse	103
10.7.1	Anforderungen an das Gehäuse	103
10.7.2	Auswahl des Gehäuses, Abdichtung	103
10.7.3	Weitere Maßnahmen zur Reinhaltung des Sensorinnenraumes	104
10.8	Optische Fenster	105
10.9	Auswertungselektronik	107
10.9.1	Anforderungen an die Elektronik	107
10.9.1.1	Vorverstärker	107
10.9.1.2	Signalübertragung	109
10.9.1.3	Erzeugung und Übertragung des Phasensignales	109
10.9.2	Störunterdrückung durch das Trägerfrequenzverfahren	111
10.9.2.1	Eingangsstufe der Signalverarbeitungseinheit	112
10.9.2.2	Rechenschaltung	113
10.9.2.3	Fehlererkennung	114
10.9.2.4	Leistungsversorgung	115
11	Realisierte Prototypen	116
11.1	Erste Ausbaustufe - Laborgerät	116
11.1.1	Daten im Überblick	118
11.2	Zweite Ausbaustufe - Kompaktsensor	118
11.2.1	Daten im Überblick	121
11.3	Dritte Ausbaustufe - Robuster Labor-Sensor	121
11.3.1	Daten im Überblick	122
11.4	Vierte Ausbaustufe - Wasserhöhenmessung und Eisdetektion	122
11.4.1	Daten im Überblick	123
12	Meßergebnisse	125
12.1	Was mißt der Sensor? - Einfluß der Fahrbahntextur	125
12.2	Linearität des Ausgangssignales	126
12.3	Einfluß der geometrischen Anordnung des Sensors zur Fahrbahn	127

12.3.1	Einfluß von Winkeländerungen	127
12.3.2	Einfluß des Meßabstandes	131
12.4	Einfluß von Veränderungen in der Versorgungsspannung	132
12.5	Anwendung des Sensors	133
12.6	Effekte im Feldbetrieb und nach längerer Einsatzzeit	134
12.6.1	Medien	134
12.6.2	Mechanische Einwirkungen	135
12.6.2.1	Vibrationen	135
12.6.3	Temperatur	135
13	Zusammenfassung und Ausblick	136
14	Literaturverzeichnis	137