

Wissenschaftliche Reihe  
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Hannes Vollmer

# Neue Methoden zur Analyse der Benetzung von Pkw-Seitenscheiben



---

# **Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart**

## **Reihe herausgegeben von**

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten. Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen. Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose. Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahr-simulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal. Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

**Reihe herausgegeben von**

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende  
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann  
Lehrstuhl Kraftfahrwesen  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss  
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik  
Institut für Verbrennungsmotoren und  
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

---

Hannes Vollmer

# Neue Methoden zur Analyse der Benetzung von Pkw-Seitenscheiben

 Springer Vieweg

Hannes Vollmer  
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2017

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart  
ISBN 978-3-658-22487-5 ISBN 978-3-658-22488-2 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-22488-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des ProMotion Programms der BMW Group in Kooperation mit dem Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann für die Übernahme des Hauptberichts und dem mir entgegengebrachten Vertrauen in Kombination mit konstruktiven Diskussionen, die maßgeblich zum Fortschritt und Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Weigand danke ich für die freundliche Übernahme des Mitberichts und den damit verbundenen Mühen. Auf universitärer Seite möchte ich mich ebenso bei Herrn Dr.-Ing. Timo Kuthada und Herrn Dipl.-Ing. Nils Widdecke für die gute Zusammenarbeit und die stets guten, die Arbeit bereichernden, Diskussionen bedanken.

Da die Arbeit im Wesentlichen in der Aerodynamikabteilung der BMW Group angefertigt wurde, gilt ein großer Dank allen Kolleginnen und Kollegen, die mich während der Arbeit unterstützt und begleitet haben. Besonders hervorheben möchte ich den damaligen Abteilungsleiter und Mitinitiator der Arbeit Herrn Dipl.-Ing. Holger Winkelmann. Sein großes Interesse an meinem Fortschritt, das in mich gesetzte Vertrauen und seine Unterstützung waren mir zu jeder Zeit ein wichtiger und sicherer Rückhalt. Ebenso danke ich Herrn Dr.-Ing Norbert Grün, der die Arbeit mit initialisiert hat und mich mit seiner Erfahrung und seinem großen Fachwissen in vielen Diskussionen gefördert hat. Gleicher Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Holger Gau. Seiner Unterstützung und Diskussionsbreitschaft war ich mir stets sicher.

Meinen Eltern danke ich für ihre Liebe und Unterstützung, durch die ich erst soweit kommen konnte. Von Herzen bedanke ich mich bei meiner Frau Karina. Ohne ihre unendliche Geduld und Rücksichtnahme, hätte diese Dissertation nicht gelingen können.

Hannes Vollmer

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
Abbildungsverzeichnis .....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XVII
Formelzeichen .....	XIX
Abkürzungsverzeichnis .....	XXIII
Zusammenfassung .....	XXV
Abstract .....	XXIX
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>3</b>
2.1 Quellen der Fahrzeugverschmutzung .....	3
2.2 Experimentelle Untersuchung der Fahrzeugverschmutzung .....	4
2.3 Numerische Simulation der Mehrphasenströmung .....	7
2.4 Wassermanagement im Bereich A-Säule und dessen Begrifflichkeiten .....	11
<b>3 Grundlagen .....</b>	<b>13</b>
3.1 Benetzung von Festkörpern .....	13
3.1.1 Oberflächenspannung, Oberflächenenergie und Kontaktwinkel .....	13
3.1.2 Kontaktwinkelhysterese .....	20
3.1.3 Kontaktwinkelmessung .....	21
3.2 Niederschlag .....	24
<b>4 Aerodynamische Entwicklungswerkzeuge .....</b>	<b>31</b>
4.1 Prüfstand .....	31
4.1.1 Der BMW Umweltwindkanal .....	31
4.1.2 Der FKFS Thermowindkanal .....	32
4.1.3 Messtechnik .....	33

4.2	Fahrversuch .....	34
4.2.1	Testgelände .....	35
4.2.2	Messtechnik und Messaufbau .....	35
<b>5</b>	<b>Methoden zur Quantifizierung der Sichtfreihaltung ....</b>	<b>39</b>
5.1	Automatisierte Detektion von Flüssigkeiten auf Fahrzeugscheiben.....	39
5.1.1	Fluoreszenzmethode .....	40
5.1.2	Methode der opaken Schicht.....	47
5.1.3	Gittermethode .....	57
5.2	Bewertungsgrundlagen für die Sichtfreihaltung .....	58
5.2.1	Erzeugung des Sichtfensters .....	59
5.2.2	Quantitative Bewertung .....	61
5.2.3	Visuelle Darstellungsformen.....	62
<b>6</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>67</b>
6.1	Grundlagenversuche zur Benetzung .....	67
6.1.1	Benetzung von Fahrzeugscheiben .....	67
6.1.2	Einfluss der Oberflächenenergie auf das Fließverhalten von Rinnsalen.....	71
6.2	Einflussgröße Windkanal.....	81
6.2.1	Fahrzeuganströmung .....	82
6.2.2	Darstellung von Regen .....	83
6.2.3	UV-Beleuchtung.....	89
6.3	Untersuchung der Sichtfreihaltung .....	91
6.3.1	Quellen und Phänomene .....	92
6.3.2	Zeitliche Entwicklung.....	98
6.3.3	Einfluss der Oberflächenenergie auf die Sichtfreihaltung	101
6.3.4	Vergleich der Fluoreszenzmethode mit der Methode der opaken Schicht .....	104
6.4	Fahrversuch .....	107
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>113</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>117</b>

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2.1:</b>	Quellen der Fahrzeugverschmutzung. In der Regel führen nur die Quellen (1), (2) und (3) zu einer Benetzung der vorderen Seitenscheiben. ....	4
<b>Abbildung 2.2:</b>	Benetzungsformen im Bereich Frontscheibe, A-Säule und Seitenscheibe. ....	9
<b>Abbildung 2.3:</b>	Volume-of-Fluid Simulation eines Rinnsals mit StarCCM+.....	10
<b>Abbildung 2.4:</b>	Begrifflichkeiten im Bereich A-Säule. ....	12
<b>Abbildung 3.1:</b>	Modell zur Deutung der Oberflächenspannung (vgl. [40]) .....	14
<b>Abbildung 3.2:</b>	Skizze eines Tropfens auf einer ebenen und horizontalen Festkörperoberfläche mit der Definition der drei Phasengrenzen und des Kontaktwinkels $\Theta$ . ....	15
<b>Abbildung 3.3:</b>	Beispiel zur Variation der Tropfengestalt auf einer unterschiedlich vorkonditionierten Glasscheibe.....	16
<b>Abbildung 3.4:</b>	Zusammenhang aus Tropfenvolumen und Tropfendurchmesser zur Bestimmung der Gültigkeit der Vernachlässigung der Gravitationskraft für verschiedene Kontaktwinkel. ....	17
<b>Abbildung 3.5:</b>	Beispiel zur Ermittlung der Kontaktwinkelhysterese mit schematischem Verlauf nach <i>Dussan</i> [52] und <i>Zielke</i> [53].....	20
<b>Abbildung 3.6:</b>	Kontaktwinkelhysterese auf der geneigten Ebene mit und ohne Windlast nach <i>Roser</i> [45].....	21
<b>Abbildung 3.7:</b>	Kontaktwinkelmessung mit dem Krüss MobileDrop GH11. ....	22

<b>Abbildung 3.8:</b>	Versuchsaufbau und Ergebnisse zur Überprüfung der Gültigkeit der Kontaktwinkelmessung auf der geneigten Fahrzeugscheibe unterschiedlicher Konditionierung.....	23
<b>Abbildung 3.9:</b>	Terminale Fallgeschwindigkeit von destillierten Wassertropfen in Abhängigkeit vom Tropfendurchmesser. ....	26
<b>Abbildung 3.10:</b>	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für verschiedene Niederschlagsintensitätsklassen. ....	28
<b>Abbildung 4.1:</b>	Regenrack und Versuchsaufbau im BMW Umweltwindkanal. ....	32
<b>Abbildung 4.2:</b>	Schnellfahrbahn M1 des BMW Testgeländes in Aschheim.....	35
<b>Abbildung 4.3:</b>	Im Fahrversuch eingesetzte fahrzeugfeste Messtechnik.	36
<b>Abbildung 4.4:</b>	Aufbau und Komponenten der Niederschlagsmessstation. ....	37
<b>Abbildung 5.1:</b>	Beispiel der Fluoreszenzmethode im Thermowindkanal (TWK) des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart. ....	39
<b>Abbildung 5.2:</b>	Spektrum der anregenden und emittierten Wellenlängen. Der schraffierte Bereich resultiert aus der Emission und der Transmission des Filters und wird von der Kamera erfasst. ....	41
<b>Abbildung 5.3:</b>	Lehre zur Kalibrierung der Filmhöhe über die Intensität der Fluoreszenz. ....	43
<b>Abbildung 5.4:</b>	Intensität der Fluoreszenz Emission in Abhängigkeit von der Tinopal Konzentration und der UV-Belichtungszeit. ....	44
<b>Abbildung 5.5:</b>	Einsatz einer Milchglasfolie als opake Schicht zur Filterung von Vorder- und Hintergrund im Prüfstandsversuch. ....	48
<b>Abbildung 5.6:</b>	Visualisierung der linearen Faltung.....	49

---

<b>Abbildung 5.7:</b>	Algorithmus zur Detektion von Flüssigkeit unter Anwendung der Methode der opaken Schicht - Schritt I und II. ....	50
<b>Abbildung 5.8:</b>	Algorithmus zur Detektion von Flüssigkeit unter Anwendung der Methode der opaken Schicht - Schritt III. ....	51
<b>Abbildung 5.9:</b>	Erläuterung der Minkowski Operationen am Beispiel der Ausgangsform A in Kombination mit dem Kreiselement B. ....	52
<b>Abbildung 5.10:</b>	Algorithmus zur Detektion von Flüssigkeit unter Anwendung der Methode der opaken Schicht - Schritt IV.....	53
<b>Abbildung 5.11:</b>	Medianfilter. ....	53
<b>Abbildung 5.12:</b>	Algorithmus zur Detektion von Flüssigkeit unter Anwendung der Methode der opaken Schicht - Schritt V. ....	54
<b>Abbildung 5.13:</b>	Algorithmus zur Detektion von Flüssigkeit unter Anwendung der Methode der opaken Schicht - Schritt V und VI.....	55
<b>Abbildung 5.14:</b>	Algorithmus zur Detektion von Flüssigkeit unter Anwendung der Methode der opaken Schicht - Schritt VII. ....	56
<b>Abbildung 5.15:</b>	Detektion der Benetzung auf einer Fahrzeugscheibe mit der Methode der opaken Schicht. ....	56
<b>Abbildung 5.16:</b>	Schematische Darstellung der Gittermethode. Die Kamera erfasst das hinter der Scheibe befindliche Gitter, das durch den Tropfen lokal verzerrt wird. ....	57
<b>Abbildung 5.17:</b>	Beispiel zur automatisierten Detektion eines Tropfens auf einer Glasscheibe mit der Gittermethode. .	58
<b>Abbildung 5.18:</b>	Erzeugung des kollektiven Sichtfensters auf den Außenspiegel.....	60
<b>Abbildung 5.19:</b>	Projektion der CAD-Masken auf die Seitenscheibe.....	61

<b>Abbildung 5.20:</b>	Schema der Bildebenen zur Visualisierung der Benetzung. ....	63
<b>Abbildung 5.21:</b>	Visuelle Darstellungsformen der Sichtfreihaltung. ....	64
<b>Abbildung 6.1:</b>	Veränderung der Benetzbarkeit einer Seitenscheibe zu verschiedenen Zeitpunkten eines Prüfstandsversuchs zur Sichtfreihaltung. ....	68
<b>Abbildung 6.2:</b>	Kontaktwinkel und Oberflächenenergie der Seitenscheibe von zufällig ausgewählten BMW Fahrzeugen. ....	70
<b>Abbildung 6.3:</b>	Plattenaufbau nach <i>Spruss</i> [91]. ....	72
<b>Abbildung 6.4:</b>	Eintrag des Fluids auf die Glasplatte mit Koordinatensystem. ....	73
<b>Abbildung 6.5:</b>	Rinnsalgestalt (10 ml/min) bei verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten nach 20 Sekunden Versuchsdauer auf der mit 80 km/h überströmten, um 75° geneigten Platte. Die Abbildungen (a-d) wurden mit reinem Wasser und der Methode der opaken Schicht aufgezeichnet. Für die Bilder (e-f) wurde die Fluoreszenzmethode verwendet. ....	75
<b>Abbildung 6.6:</b>	Visualisierung zur Bestimmung von Rinnsalbreite und Abflusswinkel. ....	76
<b>Abbildung 6.7:</b>	Erläuterung der Rinnsalbreitenmessung und Fehlerabschätzung am Schnitt A-A' durch ein Rinnsal auf der geneigten Platte. ....	77
<b>Abbildung 6.8:</b>	Mittlere Rinnsalbreite für Wasser und fluoreszierende Flüssigkeit bei verschiedenen Kontaktwinkeln und Massenströmen, auf der 75° geneigten, mit 80 km/h überströmten Platte. ....	79
<b>Abbildung 6.9:</b>	Abflusswinkel für Wasser und fluoreszierende Flüssigkeit bei verschiedenen Kontaktwinkeln und Massenströmen. Ermittelt auf der mit 80 km/h überströmten, um 75° geneigten Platte. ....	80

---

<b>Abbildung 6.10:</b>	Vergleich des Druckverlaufs im Mittelschnitt eines 5er BMW im AWK und UWK. ....	83
<b>Abbildung 6.11:</b>	Versuchsaufbau zur Ermittlung des Tropfenspektrums der UWK Sprühdüsen mit einem Malvern-Spraytec-Messgerät. ....	85
<b>Abbildung 6.12:</b>	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Tropfengrößen für verschiedene Niederschlagsklassen und den im BMW Umweltwindkanal verwendeten Sprühdüsen. ....	85
<b>Abbildung 6.13:</b>	Einschnürung der Sprühkegel im UWK in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. ....	86
<b>Abbildung 6.14:</b>	Einfluss der Emitterhöhe auf die Charakteristik der Sichtfreihaltung bei einer Windgeschwindigkeit von 100 km/h. Aufgezeichnet im UWK mit der Fluoreszenzmethode. ....	87
<b>Abbildung 6.15:</b>	Einfluss der Emitterhöhe auf den Benetzungsgrad der Seitenscheibe und des Sichtfensters. Ermittelt im UWK mit der Fluoreszenzmethode. ....	88
<b>Abbildung 6.16:</b>	Verstärktes Rohbild einer benetzten Seitenscheibe. Aufgezeichnet mit der Fluoreszenzmethode im UWK. ....	89
<b>Abbildung 6.17:</b>	Einfluss der Grauwertschwelle auf die quantitative Erfassung der Benetzung unter Anwendung der Fluoreszenzmethode. ....	90
<b>Abbildung 6.18:</b>	Typische Quellen der Seitenscheibenbenetzung und ihr resultierendes Benetzungsbild. ....	93
<b>Abbildung 6.19:</b>	Direkte Benetzung der Seitenscheibe durch große, von aerodynamischen Kräften weitgehend unbeeinflussten Tropfen. Erfasst mit der Methode der opaken Schicht im Fahrversuch. ....	94
<b>Abbildung 6.20:</b>	Benetzung der Seitenscheibe durch Sprühnebel. Aufgezeichnet und ausgewertet mit der Fluoreszenzmethode im UWK. ....	95

- Abbildung 6.21:** Benetzung der Seitenscheibe durch am Spiegel ablösende Tropfen. Aufgezeichnet und ausgewertet mit der Fluoreszenzmethode im UWK. .... 95
- Abbildung 6.22:** Primärer Wasserpfad von der Frontscheibe über A-Säule und Dichtung bis auf die Seitenscheibe. Aufgezeichnet mit der Fluoreszenzmethode im UWK... 97
- Abbildung 6.23:** Ausbildung einer Wasserblase am Spiegelfuß. Aufgezeichnet mit der Fluoreszenzmethode im UWK... 98
- Abbildung 6.24:** Erläuterung zur Darstellung des charakteristischen zeitlichen Verlaufs des Benetzungsgrads am Beispiel von drei verschiedenen Fahrzeugen bei einer Fahrgeschwindigkeit..... 99
- Abbildung 6.25:** Mittlerer, auf den jeweiligen Benetzungsgrad im Intervall von 90 bis 120 Sekunden bezogener Benetzungsgrad von über 40 Fahrzeugen für vier Testgeschwindigkeiten. .... 100
- Abbildung 6.26:** Einfluss der Oberflächenenergie der Seitenscheibe auf die Sichtfreihaltung bei 100 km/h. Aufgezeichnet mit der Fluoreszenzmethode im UWK. .... 102
- Abbildung 6.27:** Einfluss der Oberflächenenergie der Seitenscheibe auf die Sichtfreihaltung bei 100 km/h nach 100 Sekunden. Aufgezeichnet mit der Fluoreszenzmethode im UWK. .... 103
- Abbildung 6.28:** Einfluss der Oberflächenenergie, ausgedrückt über den Kontaktwinkel von Wasser auf der Seitenscheibe, auf den Benetzungsgrad eines Fahrzeuges bei 100 km/h. .... 104
- Abbildung 6.29:** Gegenüberstellung der Summenbilder, aufgezeichnet im UWK unter Verwendung der Fluoreszenzmethode und der Methode der opaken Schicht. .... 105
- Abbildung 6.30:** Gegenüberstellung des Benetzungsgrads des Sichtfensters, ermittelt im UWK unter Anwendung der Fluoreszenzmethode und der Methode der opaken Schicht. .... 107

- 
- Abbildung 6.31:** Vergleich zwischen Prüfstand und Straße bei einer Fahrgeschwindigkeit von 60 km/h und variabler Regenintensität  $R$ . Erfasst mit der Methode der opaken Schicht. .... 108
- Abbildung 6.32:** Vergleich zwischen Prüfstand und Straße bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h und variabler Regenintensität  $R$ . Erfasst mit der Methode der opaken Schicht. .... 110
- Abbildung 6.33:** Vergleich zwischen Prüfstand und Straße bei einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h und variabler Regenintensität  $R$ . Erfasst mit der Methode der opaken Schicht. .... 111