

# Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 69

**bast**



# **Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen**

**Erfassung von Straßenoberflächen-  
texturen und Untersuchung der  
Klassifizierungsfähigkeit von  
Straßenbelägen mittels (akustisch)  
relevanter Texturkenngößen  
(LeiStra uAG Srta Tex)**

von

Igor Müller

unter Mitwirkung von

Börge Wasser

Otto Germann

Achim Kley

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 69**

**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 beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

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

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 04.336 (F1100.3304006.01)  
des Arbeitsprogramms der Bundesanstalt für Straßenwesen:**  
Erfassung von Straßenoberflächentexturen und Untersuchung der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen mittels (akustisch) relevanter Texturkenngößen (LeiStra uAG Srta Tex)

### 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

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

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-86918-118-9

Bergisch Gladbach, Mai 2011

Print  kompensiert  
Id-Nr. 1110444  
[www.bvdm-online.de](http://www.bvdm-online.de)

## Kurzfassung – Abstract

### Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen

Von Seiten der Straße ist die geometrische Feingestalt der Oberfläche, die als Textur bezeichnet wird, die Primärgröße für die Griffigkeit und die Geräuschemission. In Großbritannien und Frankreich werden Anforderungen an die Griffigkeit bzw. an die Makrotexturtiefe für verschiedene Straßenkategorien sehr detailliert vorgeschrieben. In Frankreich wird bei der Abnahme von neu gebauten Straßen sogar auf eine Griffigkeitsmessung verzichtet, zur Beurteilung reicht hier eine Texturmessung aus. In den einschlägigen deutschen Vorschriften (ZTV Asphalt/Beton StB 01) sowie für die Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) von Bundesfernstraßen sind die Abnahme- und Gewährleistungswerte bzw. die Ziel-, Warn- und Schwellenwerte für die Griffigkeit definiert. Für die Geräuschemission sind bisher vergleichbare Messungen nicht vorgesehen. Vor dem Hintergrund wachsender Bedeutung der Geräuschbelastung durch den Straßenverkehr kann hier eine Änderung erwartet werden. Zur Bestimmung des Geräuschpotenzials einer Straßenoberfläche könnte dann eine Messung akustisch relevanter Textureigenschaften erfolgen. Bisher wurde zur qualitativen Einschätzung des Rollgeräuschpegels über die Analyse der Textur nur wenig Grundlagenforschung betrieben und weder allgemein gültige Texturmerkmale noch Grenzwerte bestimmt.

Somit war es das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens, anhand der im Rahmen des AP-Projektes 03/330 „Erfassung und Bewertung der Texturen von Fahrbahnoberflächen“ neu entwickelten Texturkenngrößen eine Klassifizierung von Straßenbelägen zu erreichen sowie die Messgenauigkeit und die Reproduzierbarkeit der Texturmessungen zu untersuchen. Darüber hinaus sollten durch diese Untersuchungen Voraussetzungen geschaffen werden, um die Textur bzw. Texturkennwerte mit Reifen-Fahrbahn-Geräuschen zu verknüpfen und den Aufbau einer Datenbank für Parameter von klassifizierten Straßenoberflächentexturen vorzubereiten.

Es wurde ein aus drei Teilen bestehendes Untersuchungsprogramm erarbeitet. Darin wurden Untersuchungen unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen auf den neun Testfeldern aus Asphalt und

Beton des Versuchsgeländes in Sperenberg vorgesehen. Hierbei sollten die Messungen mit den optischen zwei- und dreidimensionalen (2D- und 3D-) Texturmessgeräten der BAST durchgeführt werden. Anschließend wurden die Messergebnisse mit den in der BAST entwickelten Auswerteprogrammen BATex ausgewertet.

Der Informationsgehalt der Texturmessung ist eine entscheidende Voraussetzung für die Aussagekraft einer Kenngröße über die erfassten Oberflächeneigenschaften. Unter Verwendung der flächenhaft berechneten geometrisch und akustisch relevanten Texturkenngrößen wurden im vorliegenden Bericht die erweiterte Messunsicherheit und die Reproduzierbarkeit der 3D-Texturmessungen ermittelt. Mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen konnte der Zusammenhang zwischen den wichtigsten Gebrauchseigenschaften von Straßen, die mittels der Texturkenngrößen (Oberflächenprofilgleichmäßigkeitskoeffizient  $V_{z0}$ , geschätzte Texturtiefe  $ETD_i$ , maximale spektrale Rauheitstiefe  $A_{max}$ , bewährter Gestaltfaktor  $GF_{5/95}$ ) und des Vorbeirollpegels ( $L$ ) beschrieben wurden, quantifiziert und eine Klassifizierung von gemessenen Fahrbahnbelägen erreicht werden.

Für die praktischen Zwecke können die gewonnenen Erkenntnisse bei der Bewertung von gemessenen Fahrbahnoberflächen eingesetzt werden, um einen ersten Einblick über die akustischen Eigenschaften aufgrund der Texturmessungen zu erhalten. Der theoretisch mögliche Vorbeirollpegel, der mittels des  $V_{z0}$ -Wertes abgeschätzt werden kann, ist dabei ein Maß für die akustischen Eigenschaften.

Der Originalbericht enthält als Anlagen unter anderem eine Übersicht über aktuelle Oberflächenkenngrößen, die Darstellung von Bewertungskriterien, Messprotokolle und Berechnungsergebnisse zur Ermittlung der Messunsicherheit. Auf die Wiedergabe dieser Anlagen wurde in der vorliegenden Veröffentlichung verzichtet. Sie liegen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und sind dort einsehbar. Hinweise auf diese Anlagen im Berichtstext wurden zur Information des Lesers beibehalten.

### **Investigating the measuring uncertainty and classifiability of road surfaces**

As far as roads are concerned, the fine-grained geometrical structure of the surface, which is referred to as its texture, is the primary value for both grip and noise emission. In Great Britain and France, the requirements for grip or macro-textural depth for various road categories are defined in great detail. In France, newly built roads are not subjected to grip measurements during the approval process; a mere textural measurement is used for evaluation purposes. The relevant German regulations (ZTV Asphalt/concrete StB 01) governing the recording and evaluation of the state of federal highways (ZEB) define the acceptance and warranty values or the target, alarm and limit values for grip. No comparable measurements have thus far been prescribed for noise emissions. Given the growing importance of noise pollution as a result of road traffic, this may be expected to change. Measuring the acoustically relevant textural characteristics might then be necessary to determine the noise potential of a road surface. Thus far very little basic research has been conducted on qualitative estimates of the rolling noise level, using an analysis of the texture; neither generally valid textural characteristics nor limit values have been determined.

Thus the aim of the current research project was to develop a classification of road surfaces within the framework of the AP project 03/330 "Recording and evaluating the textures of road surfaces", using newly developed textural reference values, as well as to investigate the measuring accuracy and reproducibility of textural measurements. In addition, these investigations were to create the preconditions for linking the texture or textural reference values with tyre/roadway noises and to prepare the development of a database for the parameters of classified road surface textures.

An investigation program consisting of three parts was worked out. This made provision for investigations under repeat and comparative conditions on the nine test fields made of asphalt and concrete at the test site in Sperenberg. The measurements were to be carried out with the optical two- and three-dimensional (2-D and 3-D) texture-measuring devices belonging to the BAST. The measuring results were then evaluated, using the BATex evaluation programs developed by the BAST.

The information content of the texture measurement is a critical requirement for a meaningful reference value for the surface characteristics recorded. By using the calculations for the geometrically and acoustically relevant texture reference values, the extended measuring uncertainty and reproducibility of the 3-D texture measurements in this report were determined. The results of these investigations were used to quantify the link between the major performance characteristics of roads, which were described using the textural reference values (the surface profile evenness coefficient  $V_{z0}$ , the estimated textural depth  $ETD_i$ , the maximum spectral roughness depth  $A_{max}$ , the proven shape factor  $GF_{5/95}$ ) and the roll-by level ( $\bar{L}$ ), with a resulting classification of the measured road surfaces.

For practical purposes, the information obtained may be used in the evaluation of the measured road surfaces to gain initial insight into the acoustic properties, based on the textural measurements. The theoretically possible roll-past level, which can be estimated using the  $V_{z0}$  value, is a measure for the acoustic properties.

The original report contains appendices, including an overview of current surface reference values, a presentation of the evaluation criteria, measuring protocols and calculation results, all of which are used to determine the measuring uncertainty. These appendices have not been included in the present publication. They are available from the Federal Highway Research Institute and may be viewed there. References to these appendices in the body of the report were retained for the information of the reader.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung</b> . . .	7	<b>6</b>	<b>Prüfung der Messgerätefähigkeit und Ermittlung der Messunsicherheit bei der Texturerfassung von Straßenoberflächen mit BAST-Texturmessgeräten</b> . . . . .	22
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b> . . . . .	7	6.1	Prüfung der Messgerätefähigkeit . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Beschreibung der anzuwendenden Messmethoden</b> . . . . .	8	6.2	Ermittlung der Messunsicherheit . . . . .	24
3.1	Triangulationsverfahren . . . . .	8	6.2.1	Untersuchungsprogramm und Durchführung der Messungen . . . . .	25
3.2	Streifenlichtprojektion . . . . .	9	6.2.2	Ermittlung der Mindestzahl der Messungen . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Verwendete Messtechnik</b> . . . . .	10	6.2.3	Ermittlung der Unsicherheitsbeiträge der Messunsicherheit . . . . .	30
4.1	Statischer Textur-Laserprofilometer TL-5 . . . . .	10	<b>7</b>	<b>Untersuchung der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen</b> . . . . .	35
4.2	Mobiler Textur-Laserprofilometer TMF . . . . .	11	<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	38
4.3	T3D-Messsystem . . . . .	12	<b>9</b>	<b>Literatur</b> . . . . .	41
4.4	Internationale Erfahrung . . . . .	13			
<b>5</b>	<b>Erweiterung der Auswerteprogramme BATex</b> . . . . .	14			
5.1	Texturkenngrößen . . . . .	14			
5.1.1	Bedeutung der wichtigsten geometrisch relevanten Oberflächenkenngrößen . . . . .	15			
5.1.2	Bedeutung der wichtigsten akustisch relevanten Oberflächenkenngrößen . . . . .	17			
5.1.2.1	Neue Texturkenngrößen zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften von Straßenbelägen . . . . .	19			
5.2	Grenzwellenlänge für die Berechnung der Texturkennwerte . . . . .	19			
5.2.1	Grenzwellenlängen des Filterverfahrens der Texturdaten . . . . .	19			
5.2.2	Grenzwellenlängen des Wellenlängenspektrums . . . . .	21			
5.2.3	Grenzwellenlängen des Spektrums der Texturdaten . . . . .	21			
5.2.4	Bestimmung der Länge von Auswerteprofilen . . . . .	21			



## 1 Einleitung und Problemstellung

In bewohnten Gebieten sind die Griffigkeit und das Reifen-Fahrbahn-Geräusch die wichtigsten Gebrauchseigenschaften einer Straße, jedoch sind in diesem Zusammenhang die Anforderungen an Straßen und Reifen mit teilweise gegensätzlichen Forderungen verbunden. So wird z. B. ein weiches Reifenmaterial eine geringere Geräuschemission produzieren, aber nur eine geringere Bremsverzögerung ermöglichen. Bei der Straße wird eine glatte Oberfläche eine geringe Anregung des Reifens verursachen und damit einen niedrigeren Geräuschpegel hervorrufen. Im Fall einer Nassbremsung hingegen wird das Wasser nur ungenügend abgeführt, wodurch sich ein längerer Bremsweg einstellt.

Von Seiten der Straße ist die geometrische Feingestalt der Oberfläche, die als Textur bezeichnet wird, die Primärgröße für die Griffigkeit und die Geräuschemission. Ausgehend von den Erfahrungen, die im Maschinenbau zur Oberflächenbearbeitung angewendet werden, haben sich für die Beurteilung der Straßenoberfläche eigene Texturgrößen etabliert. Mit dem ISO-Standard 13473 sind zum Beispiel die Größen MPD (Mean Profile Depth) und ETD (Estimated Texture Depth) weltweit eingeführt worden.

In Großbritannien und Frankreich werden Anforderungen an die Makrotexturtiefe und die Griffigkeit für verschiedene Straßenkategorien sehr detailliert vorgeschrieben [1]. In Frankreich wird bei der Abnahme von neu gebauten Straßen sogar auf eine Griffigkeitsmessung verzichtet, zur Beurteilung reicht hier eine Texturmessung aus [2]. In den einschlägigen deutschen Vorschriften (ZTV Asphalt/Beton StB 01) sowie für die Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) von Bundesfernstraßen sind die Abnahme- und Gewährleistungswerte bzw. die Ziel-, Warn- und Schwellenwerte für die Griffigkeit definiert. Für die Geräuschemission sind bisher vergleichbare Messungen nicht vorgesehen. Vor dem Hintergrund wachsender Bedeutung der Geräuschbelastung durch den Straßenverkehr kann hier eine Änderung erwartet werden. Zur Bestimmung des Geräuschpotenzials einer Straßenoberfläche könnte dann eine Messung akustisch relevanter Textureigenschaften erfolgen. Bisher wurde zur qualitativen Einschätzung des Rollgeräuschpegels über die Analyse der Textur nur

wenig Grundlagenforschung betrieben und weder allgemein gültige Texturmerkmale noch Grenzwerte bestimmt.

Für die Messung der Textur werden unterschiedliche mechanische und optische Messsysteme eingesetzt. Die optischen Systeme konnten sich in den letzten Jahren, insbesondere aufgrund der Fortschritte auf dem Gebiet der elektronischen Datenverarbeitung, durchsetzen. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) verfügt über mehrere optische Texturmesssysteme, die mit Streifenprojektions- und Lasertechnik arbeiten und die statisch und dynamisch eingesetzt werden können. Die statisch einzusetzenden Systeme, die mittels streifenprojektionsstechnischen Verfahrens arbeiten, sind in der Lage, eine 3-dimensionale Bewertung einer Textur zu erstellen.

Somit war es das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens, anhand der im Rahmen des AP-Projektes 03/330 „Erfassung und Bewertung der Texturen von Fahrbahnoberflächen“ neu entwickelten Texturkenngrößen eine Klassifizierung von Straßenbelägen zu erreichen sowie die Messgenauigkeit und die Reproduzierbarkeit der Texturmessungen zu untersuchen. Darüber hinaus soll mit den gewonnenen Erkenntnissen eine Datenbank für Parameter von klassifizierten Straßenoberflächentexturen vorbereitet werden.

## 2 Aufgabenstellung

Ausgehend von den Erfahrungen und Erkenntnissen, die im Rahmen des vorangehenden Projektes [3] gewonnen wurden, sollen die optischen Texturmessgeräte der BASt bei der Erfassung von Straßenoberflächentexturen verschiedener Beläge im Labor und in situ eingesetzt werden, um folgende Aufgaben zu bearbeiten:

- Verifizierung der Messgenauigkeit der Texturmessgeräte,
- Erweiterung der Auswerteprogramme, evtl. Definition weiterer Texturkennwerte,
- Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von Texturmessungen (wann ist ein Messergebnis für eine ermittelte Texturkenngröße repräsentativ?),
- Bewertung der Texturkennwerte hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit beim Vergleich von Straßen unterschiedlicher Bauweisen und

- Untersuchung der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen mittels der akustisch relevanten Texturkennwerte.

Durch o. g. Untersuchungen sollen Voraussetzungen geschaffen werden, um die Textur bzw. Texturkennwerte mit Reifen-Fahrbahn-Geräuschen durch spätere Geräuschemessungen zu verknüpfen und somit den Aufbau einer Datenbank für Parameter von klassifizierten Straßenoberflächentexturen vorzubereiten.

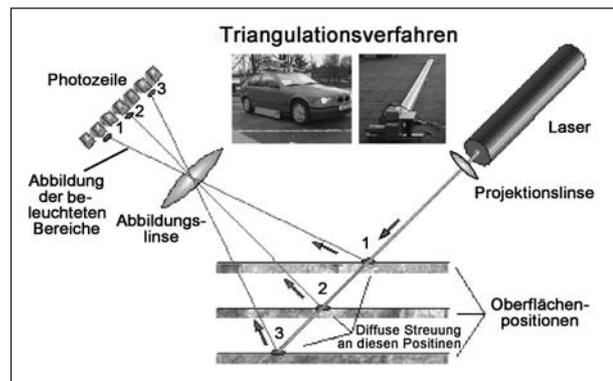


Bild 1: Prinzip der Punkttriangulation [36]

### 3 Beschreibung der anzuwendenden Messmethoden

Für die Erfassung von Straßenoberflächentexturen wurden im Rahmen des AP-Projektes F1100.3304006 „Erfassung von Straßenoberflächentexturen und Untersuchung der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen mittels (akustisch) relevanter Texturkenngrößen“ folgende Messverfahren angewendet:

- Triangulationsverfahren und
- Streifenlichtprojektion.

Dabei handelt es sich um optische Messverfahren, die es ermöglichen, die Oberflächentexturen berührungsfrei, schnell und mit hoher Genauigkeit zu erfassen.

Im Folgenden werden die angewendeten Messmethoden beschrieben.

#### 3.1 Triangulationsverfahren

Das Triangulationsverfahren bezeichnet in der optischen Messtechnik eine Methode in verschiedenen Varianten für die Messung von Abständen (Punkttriangulation), Profilen (Linientriangulation) oder Formen (Flächentriangulation) mit Licht.

Die allgemeine Funktionsweise der Triangulationsverfahren besteht darin, dass die Oberfläche eines Messobjektes mit einer geeigneten Lichtquelle (z. B. Laser) beleuchtet wird und das gestreute Licht mit Hilfe eines optoelektronischen Sensors (z. B. CCD-Zeile, CMOS-Array oder CCD-/CMOS-Kamera) aufgenommen wird. Innerhalb eines Dreiecks, daher auch die Bezeichnung Triangulation, mit bekannter Basislänge zwischen der Lichtquelle und dem Sensor kann dann bei ebenfalls bekanntem

angrenzenden Winkeln die unbekannte Position des aufgenommenen Lichtes bestimmt werden.

Im einfachsten Fall der Triangulation (Bild 1), d. h. bei der Abstandsmessung, wird mit einem Laser ein Lichtfleck auf die Oberfläche des Messobjektes projiziert. Das reflektierte Licht wird unter einem bekannten Triangulationswinkel  $\alpha$  mit einer Optik auf einen Sensor abgebildet. Der abgebildete Lichtfleck verschiebt sich auf dem Empfänger, wenn der Laserstrahl in einem anderen Abstand auf die Oberfläche des Messobjektes trifft. Das bedeutet, dass vertikale Änderungen auf der Oberfläche des Messobjektes  $\Delta Z$  in laterale Auslenkungen des aufgenommenen Lichtflecks  $\Delta L$  auf dem Sensor umgesetzt werden. Die detektierten Unterschiede in der Profilhöhe  $\Delta Z$  lassen sich dann punktwise durch folgende einfache Punkttriangulationsgleichung quantitativ bestimmen:

$$\Delta Z = \Delta L / \tan \alpha \quad (1)$$

Im Unterschied zu der Punkttriangulation wird bei der Linientriangulation eine Lichtlinie bzw. eine scharfe Hell-Dunkel-Grenze auf die Oberfläche des Messobjektes projiziert und mit einem zweidimensional ortsauflösenden Sensor aufgenommen. Mit Kenntnis der Triangulationsgleichung (1) wird aus jedem Punkt der aufgenommenen Lichtlinie das exakte Höhenprofil des Messobjektes ermittelt. Dies bedeutet einen erheblichen Zeitvorteil für die Linientriangulation. Da die projizierte Lichtlinie die Oberfläche des Messobjektes entlang einem Profilverlauf optisch schneidet, wird dieses Verfahren auch als Lichtschnittverfahren bezeichnet.

Das Grundprinzip der Flächentriangulation ist in Bild 2 vereinfacht dargestellt. Bei der Flächentriangulation gelten prinzipiell die gleichen Verhältnisse, wie sie in der Gleichung (1) für den eindimensionalen Fall angegeben sind. Durch die Projektion der

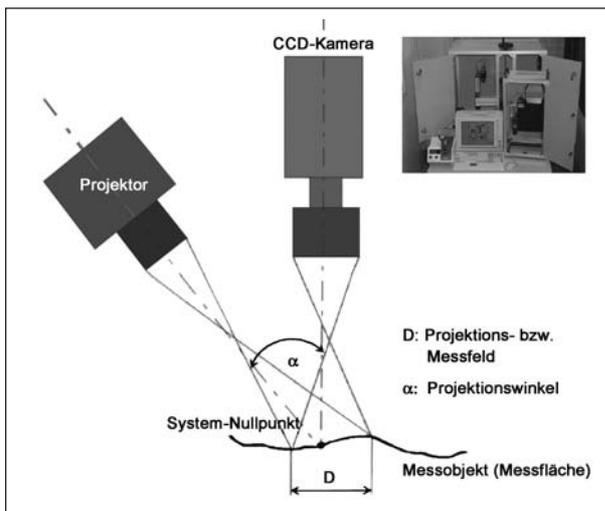


Bild 2: Prinzip der Flächentriangulation [4]

Linienmuster mit gleichem Linienabstand werden noch größere Oberflächenbereiche des Messobjektes als bei der Linientriangulation gleichzeitig aufgenommen. Die in jedem Punkt der Messfläche erfassten Profilhöhenunterschiede  $\Delta Z(x, y)$  lassen sich somit aus dem Zusammenhang zwischen den projizierten Linienmustern und ihrer Auslenkung an der Messoberfläche bzw. der Oberflächenform ermitteln. Dieser Zusammenhang ergibt sich in Anlehnung an die interferometrische Interpretation der projizierten Linienmuster aus der so genannten effektiven Wellenlänge  $\lambda_{\text{eff}}$  und kann wie folgt bestimmt werden [4]:

$$\Delta Z(x, y) = |\varphi(x, y) * \lambda_{\text{eff}}| / 4\pi \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = 2p / \sin\alpha = 2d / \tan\alpha. \quad (3)$$

Hierbei stellt  $\varphi(x, y)$  die Phase der projizierten Linie des Lichtmusters (Welle) in der Bildebene der Aufnahmekamera dar,  $p$  den Linienabstand des projizierten Linienmusters bei der Beobachtung aus der Projektionsrichtung und  $d$  den Linienabstand bei der Beobachtung aus der Position der Aufnahmekamera.

Im Bereich der Straßenerhaltung nutzt man o. g. Triangulationsverfahren vor allem bei der Texturtiefenmessung. Die durch die Profilhöhenauflösung erreichbare Messgenauigkeit und ihre physikalischen Grenzen hängen dabei von den technischen Daten des Senders und des Empfängers (z. B. Größe des Lichtfleckes, Pixelgröße und Pixelabstand des verwendeten Sensors, Blendenöffnung der Aufnahmekamera) sowie von der Oberflächenstruktur und von dem Triangulationswinkel ab [5]. Ein großer Triangulationswinkel verringert die Messge-

naugigkeit und verursacht eine Abschattung an steilen Kanten, die bei Oberflächen mit ausgeprägter Riefenstruktur große lokale Messfehler verursachen können. Hier ist ein Kompromiss zu finden, der meist bei  $\alpha = 25\text{-}45$  Grad liegt. Ebenfalls kritisch sind spiegelnde Oberflächen und solche Oberflächen, die das Licht absorbieren. In erstem Fall können sehr hohe Dynamikunterschiede in der Bildhelligkeit auftreten. Im zweiten Fall wird das reflektierende Lichtsignal abgeschwächt. Derartige Oberflächen können, wenn es die Anwendung zulässt, durch Besprühen mit einem diffus und gut reflektierenden Material (z. B. mit einer dünnen Kalkschicht) präpariert werden, wodurch sich die erreichbare Messgenauigkeit deutlich verbessern lässt. Dieser Zusammenhang zwischen der Messgenauigkeit und dem Triangulationswinkel ist typisch für alle auf dem Triangulationsprinzip beruhenden Verfahren.

### 3.2 Streifenlichtprojektion

Die grundlegende Funktionsweise der Streifenprojektion besteht darin, dass geometrische Lichtstreifenmuster auf die untersuchende Oberfläche projiziert werden und die dabei entstehende optische Verzerrung der Lichtstreifen exakt bestimmt wird. Aus dieser Verzerrung wird als Ergebnis das Höhenbild des Messobjektes errechnet.

Das Streifenprojektionsverfahren bezeichnet in der optischen Messtechnik eine Gruppe optischer Messmethoden, die eine Kombination der Flächentriangulation (s. Kapitel 3.1) und der Echtzeitinterferometrie darstellt. Die Interferometrie ist ihrerseits eine Messmethode, die durch den physikalischen Effekt der Interferenz Informationen über die untersuchende Oberfläche liefert. Für die Auswertung der optischen Verzerrung (Streifenprojektionsaufnahmen) auf der Grundlage der Interferometrie werden die Algorithmen der interferometrischen Phasenanalyse (Phasenschiebverfahren) oder der mechanischen Schwingungsanalyse (Trägerfrequenzverfahren) eingesetzt. In der Fachliteratur werden die entsprechenden Algorithmen auch als zeitliches und räumliches Heterodynverfahren bezeichnet.

Ein Kernstück optischer 3D-Messsysteme auf der Basis der Streifenlichtprojektion ist der Projektor. Mit seiner Hilfe wird ein stetig verfeinerndes Lichtmuster (Bild 3) aus schwarz-weißen Streifen auf die zu messende Oberfläche projiziert (jede Grenze

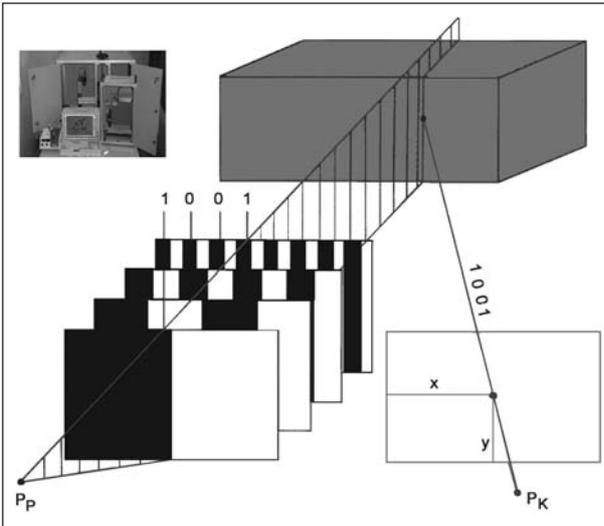


Bild 3: Prinzip der Streifenlichtprojektion [6]

zwischen einem schwarzen und einem weißen Streifen wirkt wie ein einzelner Lichtschnitt). Dieses Lichtmuster stellt eine Intensitätsstruktur dar, deren räumliche Verteilung durch Graycodes bekannt ist und die als Maßstabverkörperung dient. Werden die projizierten Streifen mittels einer CCD-Kamera erfasst und digitalisiert, so besteht unter Nutzung der Gleichungen (1) bis (4) die Möglichkeit, aus den aufgenommenen Streifenauslenkungen das 3D-Profil der zu messenden Oberfläche zu bestimmen.

Die Gleichung (4) ist dabei eine entscheidende Erweiterung für die Auswertung der detektierten Streifenauslenkungen, die durch die Oberflächenform des Messobjektes infolge optischer Verzerrung verursacht werden und durch die unter einem bestimmten Triangulationswinkel angeordnete CCD-Kamera wahrgenommen werden. Auf der Grundlage der Interferometrie und unter Berücksichtigung, dass bei der Streifenlichtprojektion eine  $\cos^2$ -förmige Intensitätsverteilung der projizierten Streifen bei gleichzeitig hoher Intensität und sehr gutem Streifenkontrast zu gewährleisten ist, sieht die Gleichung (4) wie folgt aus:

$$I(x, y) = I_0(x, y) [1 + v(x, y) * \cos(\varphi(x, y))] \quad (4)$$

Hierbei sind  $I_0(x, y)$  die Hintergrundintensität (Verteilung der Bildhelligkeit) und  $v(x, y)$  die Amplitude (Streifenkontrast) der projizierten Welle (Streifen)  $I(x, y)$  [4].

Im Bereich der Straßenerhaltung nutzt man das Streifenprojektionsverfahren für die dreidimensionale Erfassung von Straßenoberflächentexturen. Die dabei erreichbare Messgenauigkeit des Verfahrens wird prinzipiell durch die gleichen Faktoren wie

beim Triangulationsverfahren festgelegt. Bedingt durch Oberflächeneigenschaften, wie den Grad der Reflexion und die Farbe der Oberfläche, können Fehlstellen in den resultierenden Rohdaten entstehen. Durch schräge Projektion des Lichtmusters können auf den Oberflächen mit ausgeprägter Textur Abschattungen auftreten. Zusätzlich hängt die Genauigkeit der Messergebnisse von der Kalibrierung der Streifenprojektionstechnik ab, die für die präzise interferometrische Darstellung der Referenzebene unbedingt durchgeführt werden muss. Die Erwärmung bzw. eine nicht ausreichende Kühlung des Projektors kann die Messgenauigkeit optischer 3D-Streifenprojektionssysteme reduzieren, da eine Ausdehnung des LCD-Chips zur Änderung der Pixelabstände (Abstände zwischen einzelnen LCDs) führt. In der Praxis werden Genauigkeiten auf idealen Oberflächen bis zu wenigen Mikrometern erreicht. Weist die Oberfläche eine deterministische Struktur auf, so ist eine deutlich (um den Faktor 5 bis 10) größere Messunsicherheit zu erwarten [5].

## 4 Verwendete Messtechnik

Seit 2002 verwendet die BAST für die Erfassung und Bewertung der geometrisch und akustisch relevanten Eigenschaften unterschiedlicher Straßenbeläge folgende drei innovative optische Messsysteme [7]:

- das Textur-Laserprofilometer TL-5,
- das TMF-Messsystem und
- das T3D-Messsystem mit je einem kleinen und einem großen Messfeld,

die im Folgenden beschrieben werden.

### 4.1 Statisches Textur-Laserprofilometer TL-5

Das Textur-Laserprofilometer TL-5 (Bild 4) ermöglicht eine berührungslose, 2-dimensionale Erfassung von Straßenoberflächen im Makro- (von 5 mm bis 50 mm) und Megatexturbereich (von 50 mm bis 500 mm). Das TL-5 wurde für die Messung von Betonplatten in kompletter Länge durch den RWTÜV Nord entwickelt.

Das Profilometer besteht aus einem 5,5 m langen Balken mit mobilem Lasermesskopf und arbeitet nach dem Triangulationsprinzip. Die Datenaufnah-

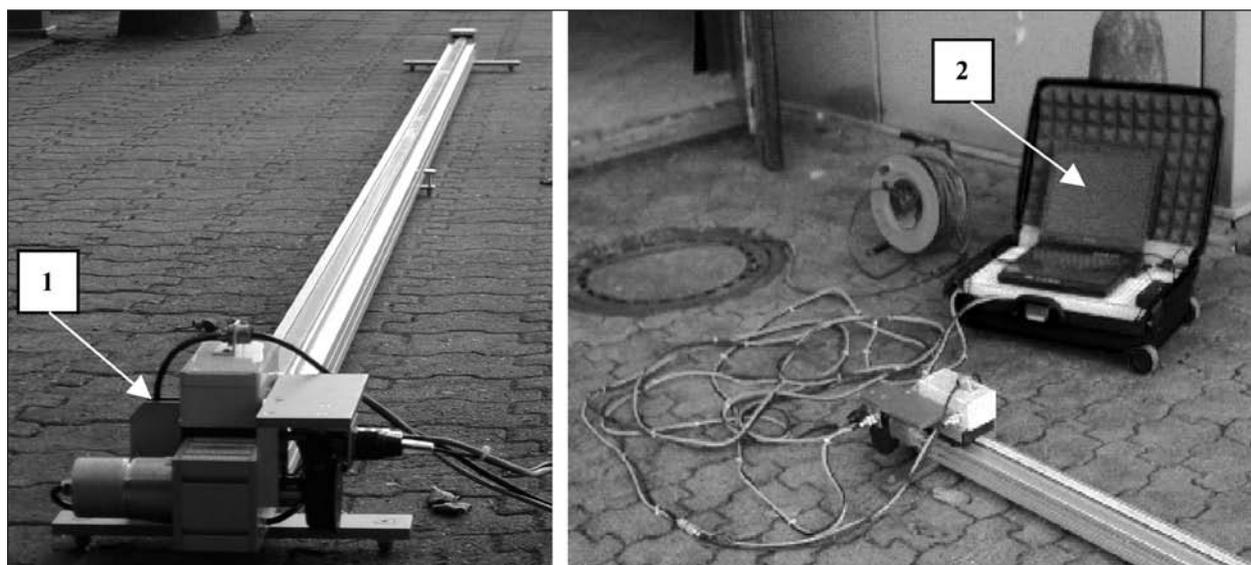


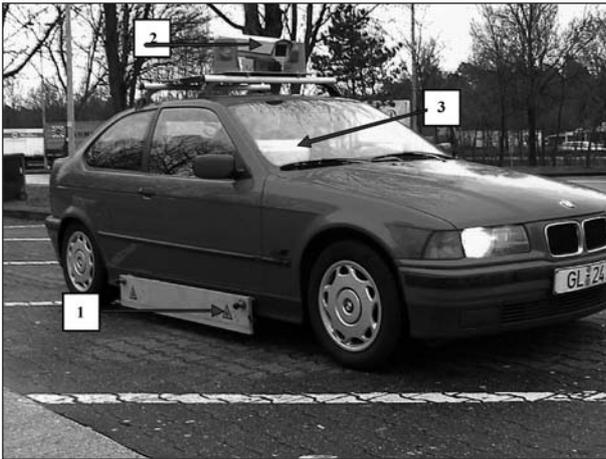
Bild 4: Textur-Laserprofilometer TL-5: Lasermesskopf (1), Steuereinheit (2)

me geschieht über zwei Analogkanäle (Kanal 0 = Lasersignal und Kanal 1 = Neigungssignal) der AD-Wandlerkarte KPCMCIA 12 AI der Firma Keithley. Die Aufnahmetaktung wird durch die Differenz zweier Drehwinkelschritte des Drehwinkelgebers der Firma TWK an der Laserschiene vorgegeben. Die gesamte gemessene Strecke beträgt dabei 5.303 mm, dies entspricht 40.174 Datenpunkten bei einem Taktintervall der Datenaufnahme von ca. 0,132 mm. Die vertikale Auflösung beträgt 0,01 mm. Beim Messen werden die Profiltiefe und der Neigungswinkel des Laserkopfes relativ zur absoluten Horizontalinie an jedem Abtastpunkt ermittelt und sofort unter dem automatisch vom Programm vergebenen Filenamen auf die Festplatte geschrieben. Das Datenaufnahmeprogramm ist mit einer ACCESS-Datenbank verknüpft, in der die Rohdaten der einzelnen Texturmessungen und die zugehörigen Messparameter verwaltet werden. Aus den gemessenen Neigungswinkeln des Laserkopfes entlang des Verschiebungsweges wird die Durchbiegung des Balkens ermittelt. Zur Auswertung wird das gemessene Texturprofil auf ein horizontales Niveau gebracht und um die gemessene Durchbiegung korrigiert. Das so entstandene trendbereinigte Profil ist das Ergebnis der Messung mit TL-5 und kann insgesamt oder für einzelne Teilabschnitte unterschiedlicher Länge grafisch dargestellt werden. Die dabei erreichbare Messgenauigkeit wird vom Hersteller im Bezug auf die technischen Möglichkeiten des Laserkopfes und das Messprinzip kommentiert. Nachteilig für die Praxis ist, dass die Messungen nur auf abgesperrten Straßen erfolgen können.

#### 4.2 Mobiles Textur-Laserprofilometer TMF

Um die Flexibilität und die Wirtschaftlichkeit der Messungen zu erhöhen, wurde durch den RWTÜV Nord im Auftrag der BAST das mobile Laserprofilometer TMF entwickelt (Bild 5). Mit dem TMF ist es möglich, die Straßenoberflächentexturen kontinuierlich im fließenden Verkehr bei Geschwindigkeiten zwischen 60 km/h und 85 km/h zu erfassen. Die minimale Messgeschwindigkeit ist dabei durch das Filtersystem des hochauflösenden Lasers des Lasersonden-Messsystems begrenzt. Die maximale Messgeschwindigkeit ist durch die technischen Eigenschaften des Messrechners eingeschränkt.

Das Lasersonden-Messsystem beinhaltet drei einzelne Lasersonden, die auf der Beifahrerseite auf einer Aluminiumplatte hintereinander montiert sind. Der Abstand zwischen der ersten und zweiten Lasersonde beträgt 5 cm, der Abstand zwischen der ersten und dritten Lasersonde 1,0 m. Für die Erfassung von kurzweiligen Texturanteilen im Makrotexturbereich ist ein schneller Laser M25L/50 in der 1,0-m-Position angebracht. An den weiteren Positionen befinden sich zwei Laser M5L/50. Alle drei Laser sind für die Erfassung der langwelligen Texturanteile im Megatexturbereich zuständig. Die Abtastfrequenz des Messfahrzeuges ändert sich in Abhängigkeit von der Messgeschwindigkeit im Bereich von ca. 23 KHz bis ca. 33 KHz, sodass die Profildaten des gemessenen Profils immer in gleichen Abständen aufgenommen werden. Diese Abstände entsprechen der horizontalen Auflösung des



**Bild 5:** Textur-Messfahrzeug (TMF): Lasersonden-Messsystem (1), Videokamera (2), Monitor der Steuereinheit (3)

TMF und betragen, bei der vertikalen Auflösung von 0,015 mm und wegbezogener Abtastung, 0,5 mm.

Das Messsystem arbeitet nach dem Punktriangulationsprinzip. Der Messbeginn kann sowohl intern vom Bediener als auch automatisch durch eine Lichtschranke gestartet werden. Die eingebaute Videokamera nimmt parallel zu den Texturmessungen den Straßenzustand auf. Die Länge der Datenaufnahmestrecke ist nur durch die Speicherkapazität begrenzt und kann mehrere Kilometer betragen. Voraussetzung für eine korrekte Messung ist dabei, dass sich die Fahrzeuggeschwindigkeit im Soll-Bereich langsam ändert und die Messung auf einer möglichst geraden Linie in Fahrtrichtung stattfindet. Mögliche Abweichungen von einer Geraden (z. B. bei der Kurvenfahrt) führen zu Fehlern in der langwelligen Struktur. Das mobile Laserprofilometer TMF wurde so konzipiert, dass beim Start der Messung der Anfang einer Bezugslinie automatisch definiert wird, von der das Höhenlängsprofil einer Fahrbahnoberfläche gemessen wird. Daher wird mit steigender Messstreckenlänge der Fehler im langwelligen Texturbereich durch Änderungen der Höhenlage (Ebenheit) umso größer. Der Einfluss des Effektes von kurzzeitigen Stößen wird beim Messen mit einem selbst entwickelten geschwindigkeitsabhängigen Filtersystem des Messfahrzeuges eliminiert.

Das Ergebnis der Messung mit dem TMF-Messsystem ist ein zweidimensionaler Texturverlauf im Wellenlängenbereich von 5 mm bis 500 mm. Die dabei erreichbare Messgenauigkeit wird vom Hersteller im Bezug auf das Messprinzip, auf die technischen Möglichkeiten des Lasersonden-Messsystems und auf die Genauigkeit des mathemati-

schen Algorithmus der im Steuer- und Datenauswerteprogramm verwendeten ASY-Verfahren der HRM-Technologie [8] geklärt. Laut Hersteller der Lasersensoren haben die optischen Sensoren keine Wiederholungsungenauigkeiten. Ihre Genauigkeit wird durch das Rauschen, die Linearität und durch die Oberflächenbeschaffenheit begrenzt. Im ungünstigsten Fall können oberflächenabhängige Messfehler 2 % betragen [9].

### 4.3 T3D-Messsystem

Ein drittes innovatives Texturmessgerät (Bild 6) ist das statische T3D-Messsystem für die dreidimensionale Aufnahme von Fahrbahnoberflächentexturen im Mikro- (von 0,2 mm bis 0,5 mm) und Makrotexturbereich (von 0,5 mm bis 100 mm).

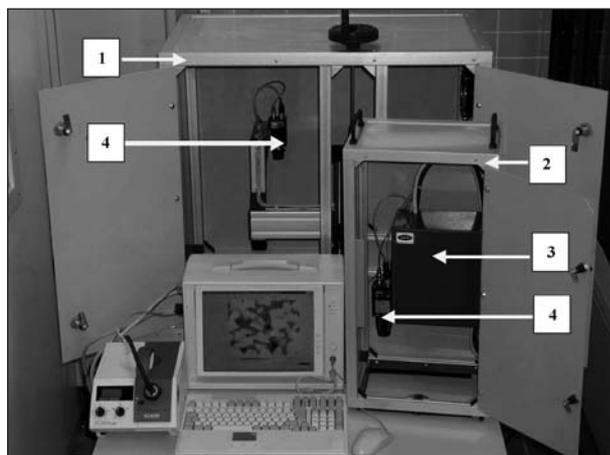
Das optische T3D-Messsystem arbeitet nach dem Prinzip der Streifenprojektionstechnik auf Mikrospeigelbasis und besteht aus einzelnen Systemkomponenten des digitalen Messsystems MikroCAD der Firma GF Messtechnik GmbH. Durch die Anwendung der digitalen Mikrospeigelprojektoren, die derzeit über 1.024 x 768 separat vom Rechner ansteuerbare Mikrospeigel verfügen, wurde eine sekundenschnelle und flächenhafte Messdatenerfassung von ca. 1,3 Mio. Messpunkten erreicht. Die maximale Anzahl der dabei mit dem Mikrospeigelprojektor projizierten schwarz-weißen Streifen ergibt sich aus der Anzahl der Mikrospeigel im Chip des Projektors und der minimalen Breite eines Streifens (Streifenbreite = 8 Pixel). Ein Pixel entspricht einem Spiegel des Projektors. Die verwendeten Mikrospeigel-Arrays DMD der Fa. Texas Instruments besitzen 1.024 Zellen von je 0,016 mm Breite im Abstand von 0,001 mm. Daraus resultiert die Möglichkeit, für Messaufgaben der Rauheitsmesstechnik interferometrische Untersuchungen mit geometrisch-optisch erzeugten  $\cos^2$ -förmigen Streifenmustern zu realisieren. Auf ihrer Grundlage wird das Höhenbild der aufgenommenen Fahrbahnoberfläche hochgenau berechnet. Somit werden Messsystemparameter und Profilhöhenauflösungen des T3D-Messsystems erreicht, wie sie mit der klassischen Streifenprojektionstechnik nicht gegeben sind. Ein weiterer Vorteil des T3D-Messsystems besteht darin, dass die Messungen sowohl im Labor als auch in situ durchgeführt werden können. Die dabei erreichbare horizontale Auflösung beträgt für das kleine (große) Messfeld des Messsystems 0,04 (0,4) mm und die vertikale Auflösung 0,004 (0,040) mm. Die horizontale Auflösung des

Messgerätes hängt dabei von der Pixelanzahl der digitalen CCD-Kamera ab und wird in Relation zur Größe des Lichtfeldes festgelegt. Die vertikale Auflösung ergibt sich aus dem verwendeten Algorithmus der automatischen Höhenberechnung.

Das Ergebnis der Messung mit dem T3D ist eine 3-dimensionale Darstellung der Fahrbahnoberfläche. Die dabei erreichbare Messgenauigkeit ist im Wesentlichen vom Messprinzip abhängig. Sie kann laut Hersteller nach der folgenden Gleichung abgeschätzt werden:

$$\Delta Z = 0,0001 * X + 0,002 * Z \quad (5)$$

Hierbei sind X die Länge des Messfeldes und Z die Ordinate im Oberflächenprofil [4].



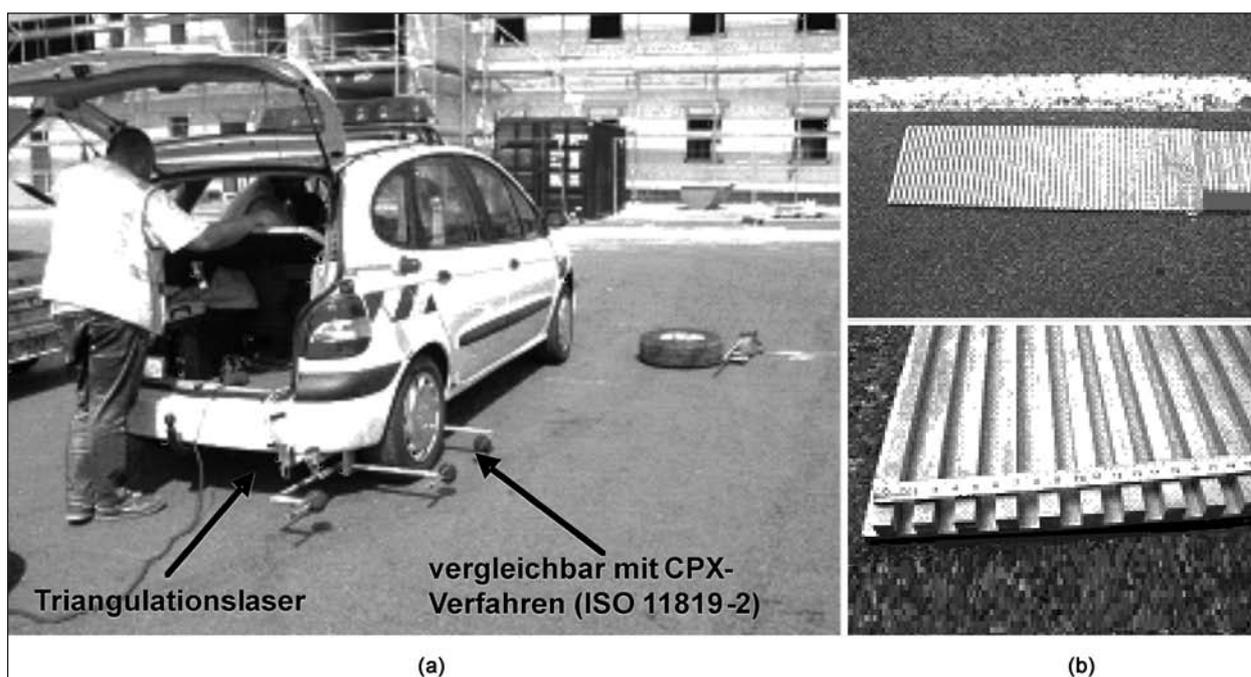
**Bild 6:** T3D-Messsystem: großes Messfeld (1), kleines Messfeld (2), Mikroskopprojektor (3), CCD-Kamera (4)

Die teilweise erheblichen Störungen, wie Phasenfehler oder Artefakte, treten beim Messen auf, sobald die messbaren Höhenunterschiede auf der Messoberfläche nicht innerhalb der angewendeten Streifenbreite (effektiven Wellenlänge  $\lambda_{\text{eff}}$ ) liegen oder die Bereiche im Lichtmessfeld ohne Streifen (z. B. Schattenbereiche) vorhanden sind. Die dabei entstehenden Fehlzeiten in den resultierenden Punktwolken werden in nachfolgenden Schritten im Programm ODSCAD des T3D-Messsystems bereinigt. Um Fehlzeiten effizient und automatisiert zu erkennen und gegebenenfalls zu korrigieren, wurde im Programm ODSCAD eine Methode realisiert, bei der die erwartete Geometrie genutzt wird.

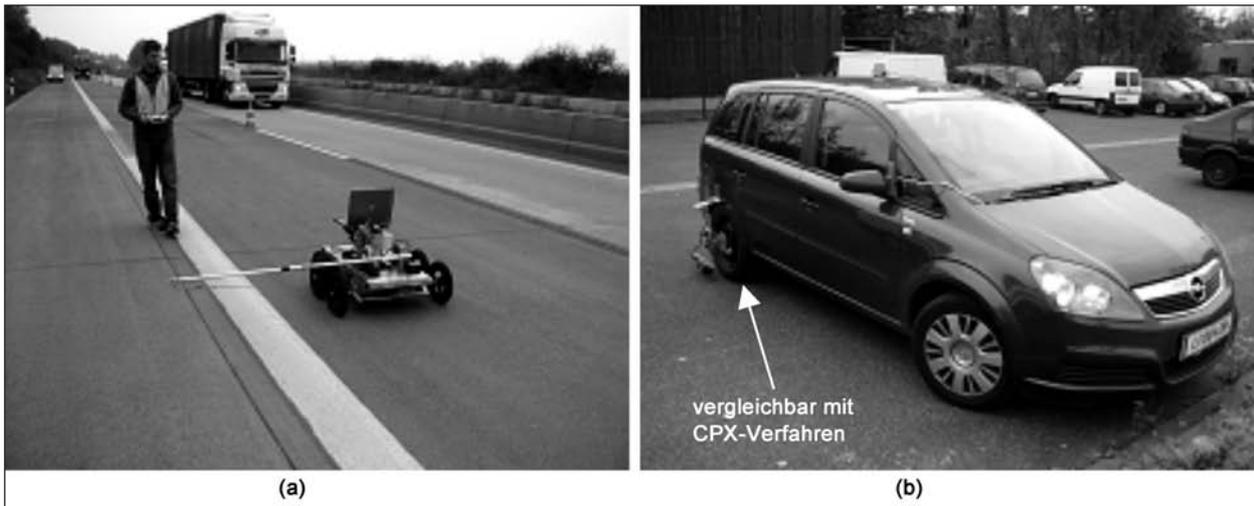
Für die Auswertung der Punktwolke-Messdaten aller drei Texturmessgeräte der BAST wurden die Auswerteprogramme BATex (BAST-Texturauswerteprogramme) entwickelt [3] und im Bezug auf die im Rahmen des aktuellen Projektes neu gestellten Aufgaben erweitert. Dies wird im Kapitel 5 beschrieben.

#### 4.4 Internationale Erfahrung

Neben den bei der BAST eingesetzten Messsystemen gibt es auch in anderen Ländern vergleichbare Messsysteme. In Bild 7 ist ein Messfahrzeug dargestellt, mit dem in Frankreich die Straßenoberflächentexturen nach dem Triangulationsprinzip erfasst und mittels des so genannten HSC-Wertes



**Bild 7:** Messverfahren (Frankreich): Messfahrzeug (a), Kalibrierung (b)



**Bild 8:** Messverfahren (USA): Textur-Roboter (a), Messfahrzeug-Akustik (b)

kontrolliert werden [2]. Die Sollwerte für HSC sind in französischen Normen verbindlich definiert. Zusätzlich erfolgt bei diesem Messsystem gleichzeitig die Erfassung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche.

In den USA werden die Reifen-Fahrbahn-Geräusche nach dem gleichen Messverfahren erfasst (Bild 8). Die Aufnahme der Textur wird dabei dreidimensional auf Basis eines 2D-Lasers durchgeführt und erfolgt mit einem Textur-Roboter im Vorfeld der akustischen Messung.

## 5 Erweiterung der Auswerteprogramme BATex

Zu den Aufgaben, die innerhalb dieses Projektes zu bewältigen waren, gehört eine Erweiterung der Auswerteprogramme in Verbindung mit einer Definition weiterer Texturkennwerte, die neben der geometrischen auch die akustischen Eigenschaften von Straßenfahrbahnbelägen beschreiben sollen. Nach dem aktuellen Stand werden vier Texturkenngrößen in BATex-Auswerteprogrammen berechnet. Dies sind die Texturproftiefe  $TD_{5/95}$ , der Gestaltfaktor  $GF_{5/95}$ , die maximale Amplitude des Wellenlängenspektrums  $A_{max}$  und die dem  $A_{max}$ -Wert entsprechende Wellenlänge  $W_{max}$  [3]. Diese Texturkenngrößen werden als Indikatoren zur Beurteilung der akustisch relevanten Eigenschaften von Straßenoberflächen verwendet. Für die Untersuchung der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen sind weitere Kenngrößen erforderlich, die die sekundären Oberflächeneigenschaften, wie z. B. Straßenmakrorauigkeit und Geräuschemission, beschreiben.

### 5.1 Texturkenngrößen

Es gibt zahlreiche DIN-Normen und Richtlinien zur Anwendung im Maschinenbau [10] sowie einen ISO-Standard zur Anwendung auf Straßen [11], die eine große Anzahl verschiedener Oberflächenkenngrößen enthalten. Die wichtigsten Normen für beide Anwendungsbereiche sind in der Tabelle 1 dargestellt. Die in diesen Normen enthaltenen Kenngrößen beschreiben das gesamte Profil einer technischen Oberfläche oder eines Fahrbahnbelages. Sie sind allgemein definiert und nicht auf ein bestimmtes Problem zugeschnitten. Dadurch sind sie weit verbreitet und können ohne Kenntnis des Prozesses, auf den die Oberfläche einwirkt, ermittelt werden.

Die aktuellen Kenngrößen für die technischen Oberflächen lassen sich in die fünf folgenden Gruppen aufteilen: Rauheits-, Welligkeits-, Motifkenngrößen sowie Kenngrößen aus dem primären Profil und statistische Kenngrößen (Anlage 1). Da sie unterschiedliche Aussagekraft besitzen, ist es wichtig, die zur Lösung der im Projekt gestellten Aufgaben passenden Kenngrößen auszuwählen. Die gemittelte Rautiefe  $R_z$  mit der zugehörigen maximalen Rautiefe  $R_{max}$ , der arithmetische Mittenrauwert  $R_a$ , die Kurtosis/Steilheit  $R_{ku}$ , der quadratische Mittenrauwert  $R_q$  und die Schiefe  $R_{sk}$  gehören zu den weltweit verbreiteten und in der Praxis meist verwendeten Kenngrößen. In dem für die Straßenoberflächen gültigen Standard ISO 13473 werden o. g. Kenngrößen als mittlere Profiltiefe MPD bzw. ETD, mittlere absolute Profilabweichung  $R_a$ , Profilwölbung  $R_{ku}$ , Standardabweichung des Profils  $R_{ms}$  und Profilschiefe  $R_{sk}$  genannt. Die Berechnungs-

DIN EN ISO-Normen von Fachgebieten		Oberflächenkenngrößen
Maschinenbau (technische Oberfläche)	Straßenbaubereich (Fahrbahnoberfläche)	
4287	—	Rauheitskenngrößen
4288	—	$R_a, R_z, R_{z1max}$ ; Messbedingungen
4768	—	maximale Rautiefe $R_{max}$
13565	—	Abbottkurve
12085	—	Motifkenngrößen
4281	—	Begriffe; Welligkeit
4771	—	Profiltiefe $P_t$ , Wellentiefe $W_t$
	13473-1, 2, 3	Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen

Tab. 1: Übersicht der wichtigsten DIN-Normen

methoden der in der ISO 13473 genannten Kenngrößen sind mit den Berechnungsmethoden der technischen Oberflächen gleich oder ähnlich. Ein entscheidender Unterschied liegt darin, dass die Längen der Bezugsabschnitte (Einzelmessabschnitte  $L_r$ ), aus denen die Oberflächenkenngrößen in der Praxis berechnet werden, unterschiedlich sind. Für das Fachgebiet „Fahrbahnoberfläche“ beträgt der Bezugsabschnitt 100 mm [11]. Für das Fachgebiet „technische Oberfläche“ ist die Länge des Bezugsabschnittes viel kleiner [10, 12]. In beiden Fachgebieten sind o. g. Oberflächenkenngrößen aufgrund ihrer Bedeutung die wichtigsten Texturkenngrößen.

### 5.1.1 Bedeutung der wichtigsten geometrisch relevanten Oberflächenkenngrößen

Der arithmetische Mittenrauwert bzw. die mittlere absolute Profilabweichung  $R_a$  ist eine Kenngröße, die sich weltweit als Standardrauheitskenngröße etabliert hat. Sie reagiert sensibel auf allmähliche Veränderungen der Oberfläche durch Verschleiß und wird für die Bewertung von Straßenoberflächentexturen im Rahmen der Langzeitbeobachtung von Versuchsstrecken verwendet.

Der  $R_a$ -Wert wird im BATex-Auswerteprogramm nach ISO 4287 aus dem Rauheitsprofil berechnet. Das Rauheitsprofil wird vom gemessenen Ist-Profil (Primärprofil) durch die Kombination von Hoch- und Tiefpassfilter hergeleitet. Durch die digitale Filterung werden die Steigung bzw. die langwellige Komponente, der Versatz und das Rauschen im Rauheitsprofil unterdrückt. Um die Filterung des Ist-Profiles korrekt durchführen zu können, sind Vor- und Nachlaufstrecken im Primärprofil zu berücksichtigen.

Ihre Länge entspricht üblicherweise mindestens einem Drittel bis der Hälfte des Einzelmessabschnittes  $L_r$ . Nach der Filterung erhält man eine für mathematische Berechnungen aller Rauheitskenngrößen geeignete Profilkurve, die das Rauheitsprofil genannt wird. Im BATex-Auswerteprogramm wird der  $R_a$ -Wert als arithmetisches Mittel der Absolutbeträge der Ordinatenwerte des Rauheitsprofils ermittelt. Rechnerisch bedeutet dieses, dass die Profildordinaten eines gefilterten Ist-Profiles als Absolutwert dargestellt werden müssen, damit ein arithmetischer Mittelwert berechnet werden kann. Als Mittelwert kann  $R_a$  nicht zwischen Spitzen und Riefen unterscheiden sowie ebenso wenig verschiedene Profilformen erkennen.

Im Maschinenbau ist die gemittelte Rautiefe  $R_z$  eine wichtige Rauheitskenngröße, welche ebenso wie  $R_a$  auch international verbreitet ist. Im Gegensatz zu  $R_a$  reagiert  $R_z$  sensibel auf die verschiedenen Oberflächentypen. Rechnerisch wird der  $R_z$ -Wert aus dem Rauheitsprofil durch die Mittelwertbildung von den maximalen Profilhöhen der fünf zugrunde liegenden Einzelmessabschnitte ( $L_r$ ) bestimmt. Die maximale Profilhöhe wird dabei nach ISO 4287 als Summe aus der Höhe der größten Profilschneide und der Tiefe des größten Profiltales ermittelt [13]. Neben  $R_z$  wird immer zur Kontrolle die maximale Rautiefe  $R_{max}$  ermittelt. Nach ISO 4287 ist der  $R_{max}$ -Wert der größte Wert aus fünf Einzelwerten für  $R_z$  der Einzelmessabschnitte  $L_r$ .

Dem  $R_z$ -Wert entspricht im Straßenbau die so genannte mittlere Oberflächentexturtiefe MTD (Mean Texture Depth). Sie wird nach der standardisierten volumetrischen Sandfleckmethode bestimmt [14]. Für die Messung der Rautiefe von Straßenbelägen

werden in der Praxis auch optische Verfahren eingesetzt. Die mittlere Texturtiefe, auch geschätzte Texturtiefe ETD genannt, kann dabei nach dem profilometrischen Verfahren [11] aufgrund der gemessenen mittleren Profiltiefe MPD mit Hilfe der folgenden Transformationsgleichung abgeschätzt werden:

$$\text{ETD} = 0,2 + 0,8 * \text{MPD} \quad (6)$$

Der MPD-Wert wird nach ISO 13473-2 als Differenz zwischen dem arithmetischen Mittel der zwei Spitzenwerte der beiden Grundlinienhälften von 50 mm Länge und dem mittleren Niveau über der gesamten Grundlinie des 100 mm langen Einzelmessabschnittes ermittelt. Das mittlere Niveau ist der Profilreferenzlinie gleich (Mittellinie, auch Regressionslinie genannt) und nimmt nach der Hochpassfilterung immer den Wert null an. Im Auswerteprogramm BATex kommt der digitale Bessel-Filter zum Einsatz, weil er ein gutes Rechteckübertragungsverhalten besitzt. Nach seiner Anwendung werden Anfang und Ende (Vor- und Nachlaufstrecke) des gefilterten Ist-Profiles laut ISO 13473-1 verworfen, um den Transienteneffekt im Filterprozess auszuschließen. Das so gekürzte Profil wird weiter für die Beseitigung der hochfrequenten Komponenten mittels Tiefpassfilters gefiltert, um den möglichen Einfluss von Rauschen zu reduzieren. Die eingesetzten Filterparameter sind im Bericht zum AP-Projekt der Bundesanstalt für Straßenwesen 03 330/S3 „Erfassung und Bewertung der Texturen von Fahr- bahnoberflächen“ [3] ausführlich beschrieben.

Für die Berechnung der MPD-Werte, die nach ISO 13473 nicht ermittelt werden können, z. B. aufgrund von Einzelmessabschnitten, die kleiner als 100 mm sind, oder anderer Gründe, wurde in der Praxis eine weitere Berechnungsmethode [16] eingesetzt. Nach dieser Methode wird die mittlere Profiltiefe aus einem ungefilterten Ist-Profil innerhalb des 50 mm langen Einzelmessabschnittes durch die Formel „Maximalwert minus Mittelwert über 50 mm“ errechnet. Als Ergebnis wird der Mittelwert aus allen Einzelwerten angegeben. Mit Hilfe dieser Berechnungsmethode werden die MPD-Werte für das kleine Messfeld des T3D-Messsystems ermittelt.

Neben dem MPD-Wert wird im Auswerteprogramm BATex ein so genannter HSC-Wert ermittelt, der dem MPD-Wert ähnlich ist und in Frankreich bei den Abnahmemessungen für die Abschätzung der mittleren Makrotexturtiefe als Standardkenngröße

angewendet wird (s. Kapitel 4.4). Die Berechnung des HSC-Wertes erfolgt beim Messen. Alle 25 cm wird eine Strecke von 100 mm aufgenommen. Für alle 20 m wird ein Mittelwert gebildet und ausgegeben. Die einzelnen HSC-Werte werden dabei nach der folgenden Formel berechnet [2]:

$$\text{HSC} = 2,06 * R_a + 0,05 \quad (7)$$

In allen Fällen wird für die Anwendung die mittlere Profiltiefe MPD bevorzugt [11]. Der ETD-Wert wird dann benötigt, wenn die nach dem volumetrischen und nach dem profilometrischen Verfahren ermittelten Texturtiefen gegeneinander verglichen werden sollen.

Die im Abschluss beschriebenen 3 Rauheitskenngrößen gehören zu den so genannten statistischen Kenngrößen.

Der quadratische Mittenrauwert  $R_q$  bzw. die Standardabweichung des Profils  $R_{ms}$  ist ähnlich definiert wie  $R_a$ , bewertet aber stärker größere Abweichungen von der Profilreferenzlinie bzw. reagiert etwas empfindlicher auf ausgeprägtere Spitzen und Täler im Rauheitsprofil. Statistisch beschreibt dieser Wert die Standardabweichung der Profilhöhenverteilung und ist eine der gebräuchlichsten Kenngrößen des Anwendungsbereiches „Fahr- bahnoberfläche“ [11]. Der  $R_{ms}$ -Wert wird möglichst aus fünf Einzelmessabschnitten wie folgt ermittelt:

$$R_{ms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (8)$$

In angelsächsischen Ländern wird der quadratische Mittenrauwert  $R_q$  für die Charakterisierung der technischen Oberflächen nicht mehr zur Anwendung empfohlen.

Die Schiefe  $RS_k$  bzw. die Profilschiefe  $R_{sk}$  ist eine wichtige Kenngröße, weil sie die Funktionalität einer Oberfläche wiedergibt. Die Profilschiefe  $R_{sk}$  beschreibt nicht nur die Rauheit der Oberfläche, sondern auch die Profildform. Sie ist ein Maß für die Asymmetrie der Verteilungsdichte der Profildordinaten um die Mittellinie des Rauheitsprofils und zeigt an, ob das Rauheitsprofil eine Mehrheit von Spitzen nach oben (positive Profilschiefe) oder nach unten (negative Profilschiefe) aufweist. Durch einen negativen Wert dieser Kenngröße wird ein plateauartiger Profildcharakter gekennzeichnet. Bei normalverteilten Profildordinaten ist der Wert der Schiefe null. Sie wird stark von einzelnen extremen Profilsitzen und Profiltälern beeinflusst. Aus diesem

Grund wird die Schiefe in manchen Fällen für die Beurteilung von plateauähnlichen technischen Oberflächen kritisch. Sie ist dimensionslos und wird möglichst innerhalb der 5 Einzelmessabschnitte nach folgender Formel berechnet:

$$R_{sk} = \frac{1}{Rms^3} * \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i^3 \right) \quad (9)$$

Die Steilheit bzw. die Profilwölbung  $R_{ku}$  ist dimensionslos und wird als Mittelwert möglichst aus 5 Einzelmessabschnitten des Rauheitsprofils ermittelt. Der  $R_{ku}$ -Wert wird nach folgender Formel berechnet:

$$R_{ku} = \frac{1}{Rms^4} * \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i^4 \right) \quad (10)$$

Diese Kenngröße ist ein Maß dafür, wie flach oder scharf die Verteilungsdichte der Profildordinaten um die Mittellinie des Rauheitsprofils verglichen mit einer Normalverteilung ist. Bei einem Rauheitsprofil mit normalverteilten Profildordinaten ist der Wert der Steilheit gleich 3. Wenn der  $R_{ku}$ -Wert größer als 3 ist, bedeutet dieses, dass scharfe, ausgeprägte Spitzen und Täler im Rauheitsprofil vorhanden sind. Die abgeflachten Profilsitzen und Profiltäler entsprechen einem Wert kleiner als 3.

Im Auswerteprogramm BATex werden alle geometrisch relevanten Texturkenngrößen flächenhaft berechnet.

### 5.1.2 Bedeutung der wichtigsten akustisch relevanten Oberflächenkenngrößen

Die Texturkenngrößen nach ISO 13473 beschreiben geometrische Eigenschaften einer Fahrbahnoberfläche. Ihre Korrelation mit der Geräuschemission wurde oder soll noch untersucht werden. Es wurde z. B. festgestellt, dass sich die mittleren Texturtiefen von 0,4 mm bis 0,8 mm für Pkw-Reifen und von 1,3 mm bis 1,7 mm für Lkw-Reifen für die Lärmreduzierung als günstig erwiesen haben [15, 16]. Es ist auch bekannt, dass dieses Kriterium für die Bewertung akustisch günstiger Fahrbahnoberflächen alleine nicht ausreichend ist. Um Straßenoberflächentexturen im Hinblick auf Ihre akustischen Eigenschaften vergleichen zu können und Möglichkeiten der gezielten Entwicklung von lärmarmen Belägen zu schaffen, wurden im Rahmen des Sperenbergberichtes [17] folgende vier Texturkenngrößen untersucht:

- $g$  – Gestaltfaktor,
- $gL$  – Gestaltlänge,
- $A_{max}$  – maximale Amplitude des Wellenlängenspektrums,
- $W_{max}$  – dem  $A_{max}$ -Wert entsprechende Wellenlänge.

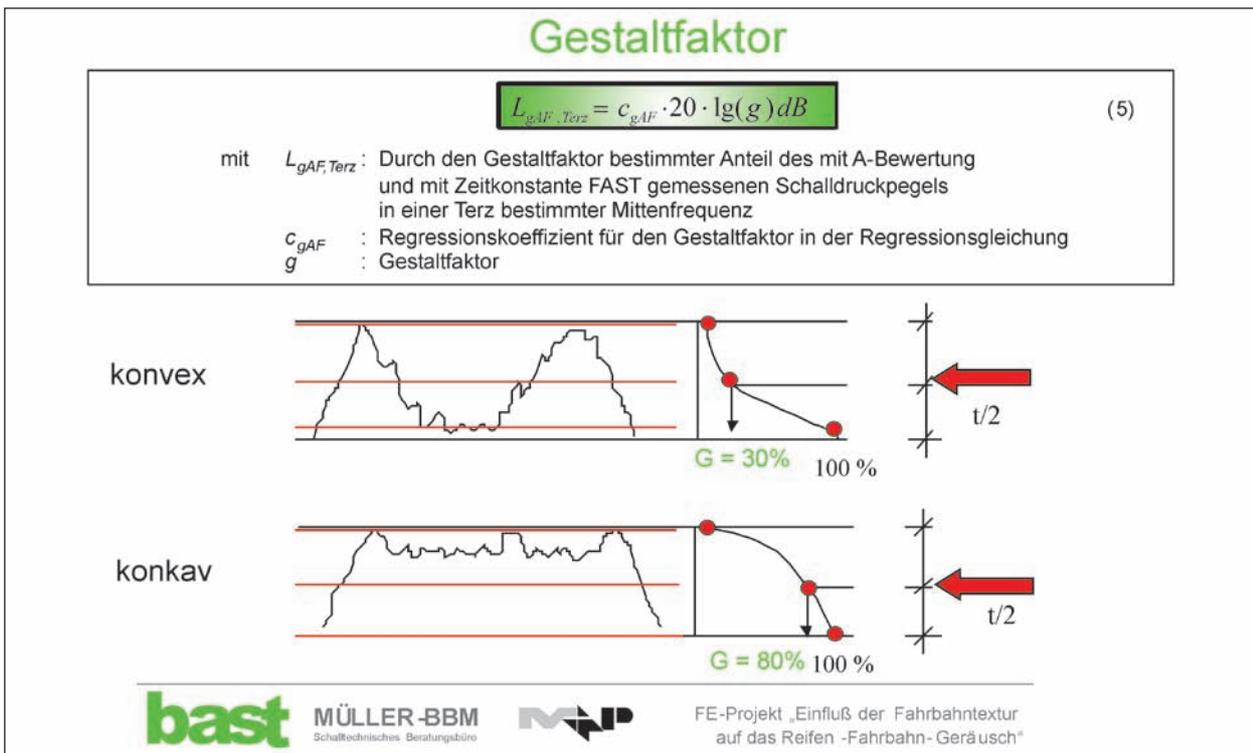
Der Gestaltfaktor  $g$  ist eine wichtige akustisch relevante Kenngröße, die die Rauheit von Straßenoberflächen berücksichtigt und gleichzeitig ein Maß für die Texturgestalt ist [17]. Die Texturgestalt wird üblicherweise mit Hilfe der Profiltragkurve (Abbottkurve [18, 19]) dargestellt. Die Profiltragkurve gibt die Beziehung zwischen dem Profiltraganteil und der Schnittlinientiefe wieder [13]. Mathematisch ist sie die Summenhäufigkeitslinie der Profildordinaten  $Z_K\%$ . Im Auswerteprogramm BATex wird diese Kurve innerhalb des Bezugsabschnittes von 100 mm berechnet, der aus dem 400 mm langen Rauheitsprofil gebildet wird. Aus der Abbottkurve wird der Gestaltfaktor bei halber Rautiefe ( $t/2$ ) für jeden Einzelmessabschnitt ermittelt (Bild 9). Als Resultat wird der Mittelwert des Gestaltfaktors  $\bar{g}$  von diesen vier Einzelwerten angegeben. Er liegt für konvexe Fahrbahnoberflächen unter und für konkave plateauartige Profilformen der Straßen oberhalb von 50 %.

Die konkaven Texturen mit einem großen Gestaltfaktor sind gegenüber den konvexen Profilformen mit einem kleinen Gestaltfaktor akustisch günstiger, da Kontaktdruck und Radialanregung der Reifen auf den plateauähnlichen Fahrbahnoberflächen geringer sind.

Die Gestaltlänge  $gL$  ist eine weitere wichtige akustisch relevante Texturkenngröße, die zu den so genannten zusammengesetzten Kenngrößen gehört. Sie spiegelt die Abhängigkeit der Geräuschemission nicht nur von der Profilform, sondern von Profilunregelmäßigkeiten einer Fahrbahnoberfläche wider. Die Gestaltlänge wird neben dem Gestaltfaktor ermittelt. Rechnerisch wird sie nach folgender Formel bestimmt:

$$gL = \bar{g} * W_{max}, \quad (11)$$

wobei  $\bar{g}$  der Mittelwert des Gestaltfaktors ist und sich aus der Mittelung über vier 100 mm lange Einzelmessabschnitte des Rauheitsprofils ergibt.  $W_{max}$  ist die dem  $A_{max}$ -Wert entsprechende Wellenlänge und wird wie  $A_{max}$  aus dem Wellenlängenspektrum ermittelt. Das Wellenlängenspektrum wird nach der



**Bild 9:** Bedeutung und Ermittlung des Gestaltfaktors „g“ [17]

Fast Fourier Transformation (FFT) errechnet und ist eine grafische Darstellung der Effektiv-Amplitude  $R_{ms}$  des ungefilterten Ist-Profiles im Texturwellen- bzw. Frequenzbereich 100 mm (10 Hz). Der  $A_{max}$ -Wert ist dabei gleich dem maximalen Effektivwert der Rauheitstiefe  $R_{ms}$ . Der im Auswerteprogramm BATex entwickelte Ablauf für die Berechnung der Profiltragkurve, des Wellenlängenspektrums und der aus dem Wellenlängenspektrum abgeleiteten  $A_{max}$ - und  $W_{max}$ -Werte ist im Schlussbericht zum AP-Projekt 03 330/S3 „Erfassung und Bewertung der Texturen von Fahrbahnoberflächen“ [3] ausführlich beschrieben.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass oben genannte Texturkenngrößen möglicherweise als Indikatoren für die Beurteilung der akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen genutzt werden können. Ihre Aussagefähigkeit ist im Sperenbergbericht nachgewiesen. Auf der Grundlage optimaler Werte dieser Texturkenngrößen wurden für die Bewertung des möglichen akustischen Verhaltens der Fahrbahnoberflächen Kriterien formuliert. Sie sind in der Anlage 2 zusammengefasst. Zu den lärmoptimalen Texturen gehören Fahrbahnoberflächen mit einer Profilform, die als „Plateaus mit Schluchten“ definiert werden kann (Bild 10). Im Gegensatz zu einer sägezahnähnlichen Profilform wird hier der Air-Pumping-Effekt minimiert. Wegen der geringen Anzahl von



**Bild 10:** Profilform einer lärmarmen Fahrbahnoberfläche [17]

Spitzen werden die Reifenschwingungen stark reduziert. Der Einfluss von Reifenschwingungen auf die Rollgeräuschenstehung ist unwesentlich, wenn die Gestaltlänge  $gL$  dem Bereich von 400 mm bis 700 mm entspricht. Genauso wird der Einfluss des Air-Pumping-Effektes reduziert, wenn die Werte der maximalen spektralen Rauheitstiefe  $A_{max}$  im Intervall zwischen 0,060 mm und 0,200 mm liegen. Bei größeren  $gL$ - und  $A_{max}$ -Werten nimmt der Einfluss der niederfrequenten Geräuschanteile zu. Bei kleineren Werten spielen bereits die hochfrequenten Geräuschanteile eine wesentliche Rolle. Im ersten Fall nimmt die mechanische Anregung der Reifen wegen der Erhöhung der Welligkeit der Straße zu. Im zweiten Fall wird die Oberfläche feiner und die Entlüftung über die Lauffläche schwieriger, was dafür spricht, dass eine idealebene Oberfläche akustisch nicht die günstigste ist. Aus Sicherheitsgründen soll in allen Fällen die mittlere Texturtiefe mindestens 0,40 mm betragen [14].

Im Auswerteprogramm BATex werden alle akustisch relevanten Texturkenngrößen flächenhaft berechnet.

### 5.1.2.1 Neue Texturkenngrößen zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften von Straßenbelägen

Die Texturprofiltiefe  $TD_{5/95}$  ist die Summe der Profilkuppenhöhe  $Z_{5\%}$  und der Profiltaltiefe  $Z_{95\%}$  und wird indirekt aus dem Rauheitsprofil ermittelt:

$$TD_{5/95} = |Z_{5\%}| + |Z_{95\%}|, \quad (12)$$

wobei die Profilkuppenhöhe  $Z_{5\%}$  eine Ordinate auf der Profiltragkurve ist, die dem 5%-Summenhäufigkeitswert aller Amplitudenwerte des Rauheitsprofils entspricht. Die Profiltaltiefe  $Z_{95\%}$  ist eine Profilorordinate, die dem 95%-Summenhäufigkeitswert entspricht.

Der 5%-Summenhäufigkeitswert und der 95%-Summenhäufigkeitswert werden nach dem Klassierverfahren berechnet [3], bei dem ein ausgewertetes Rauheitsprofil in 200 gleichmäßige Abschnitte unterteilt und eine Summenhäufigkeitsverteilung der Profilorordinaten erstellt wird. Die maximale Anzahl der Klassen wird üblicherweise in Abhängigkeit von der lateralen Auflösung und der Größe des vertikalen Messbereiches der eingesetzten Messgeräte bestimmt. Beispielweise beträgt sie für das T3D-Messsystem der BASt 400.

Der Gestaltfaktor  $GF_{5/95}$  wird, wie die Texturtiefe  $TD_{5/95}$ , aus den 5%- und 95%-Werten der Tragflächenanteilkurve bestimmt.

Der Gestaltfaktor  $GF_{5/95}$  entspricht dem Tragflächenanteil bei der Profilorordinate  $Z_{5/95}$  (13) und wird wie der Gestaltfaktor  $g$  [17] für die quantitative Bewertung der unterschiedlichen Texturgestalten von Fahrbahnoberflächen verwendet.

$$Z_{5/95} = (Z_{5\%} + Z_{95\%}) / 2. \quad (13)$$

Die beiden Texturkenngrößen  $TD_{5/95}$  und  $GF_{5/95}$  sind unempfindlich bezüglich der nicht texturrelevanten, zufälligen Abweichungen im Rauheitsprofil, da die Profilbereiche, die oberhalb der Profilkuppenhöhe  $Z_{5\%}$  (eine Oberflächenstörung, wie z. B. kleine Steine) und unterhalb der Profiltaltiefe  $Z_{95\%}$  (z. B. ein Loch in der Fahrbahnoberfläche) liegen, bei der Berechnung dieser Kenngrößen nicht berücksichtigt werden. Es handelt sich daher um robuste Kennwerte, die in Auswerteprogrammen BATex flächenhaft berechnet werden.

Eine weitere Neuigkeit besteht darin, dass die BATex-Auswerteprogramme für das statische (TL-5) und das mobile (TMF) Textur-Laserprofilometer

durch die Berechnung des Spektrums der Texturdaten (DFT) erweitert wurden. Aus dem DFT-Spektrum werden die Peak-Wellenlänge des gemessenen Texturprofils  $W_d$  und ihre Amplitude  $A_d$  ermittelt, die zusätzliche Informationen zum Einfluss der langwelligen Texturanteile auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch liefern sollen. Wie das Wellenlängenspektrum wird das Spektrum der Texturdaten mittels der Fast Fourier Transformation berechnet. Es stellt die Zusammensetzung der Effektiv-Amplituden des gemessenen Profils im Frequenzbereich dar. Die Unterschiede bestehen dabei in der Berechnung der räumlichen Frequenzen und in der grafischen Darstellung der Texturdaten. Alle gemessenen Profilamplituden werden auf dem DFT-Spektrum als einzelne Effektiv-Amplituden über die räumlichen Werte der FFT-Frequenz in  $\text{mm}^{-1}$  oder umgerechnet in mm (s. Gleichung 16 des Kapitels 5.2) als Wellenlängen aufgetragen. Die beiden Achsen des Spektrums werden dazu logarithmisch skaliert. Auf dem Wellenlängenspektrum werden die Effektiv-Amplituden als Terzamplituden in Abhängigkeit von den räumlichen Werten der Terzmitfrequenzen in  $\text{mm}^{-1}$  oder alternativ in mm (s. Gleichung 16) als Wellenlängen aufgetragen. Die X-Achse wird dabei in der Terz- und die Y-Achse in der Linear-Skalierung dargestellt [3]. Außerdem werden die Grenzwellenlängen der Spektren unterschiedlich gewählt (s. Kapitel 5.2).

## 5.2 Grenzwellenlängen für die Berechnung der Texturkennwerte

In der Praxis wird bei der Ermittlung der Grenzwellenlängen, die für die Berechnung der Texturkennwerte im Rahmen der BATex-Auswerteprogramme eingesetzt werden, zwischen den Grenzwellenlängen zum Filterverfahren der Texturdaten, zur Berechnung des Wellenlängenspektrums und des Spektrums der Texturdaten (DFT) unterschieden. Diese drei Fälle der Ermittlung der Grenzwellenlängen werden im Folgenden beschrieben.

### 5.2.1 Grenzwellenlängen des Filterverfahrens der Texturdaten

Mit Ausnahme der aus dem Wellenlängen- und dem DFT-Spektrum abgeleiteten Kenngrößen sowie der mittleren Profiltiefe, die aufgrund der Abweichung von standardisierten Randbedingungen (z. B. Bezugsabschnitt  $L_r$  ist kürzer als 100 mm, s. Kapitel 5.1.1) nicht nach ISO 13473 berechnet wer-

den kann, werden alle geometrisch und akustisch relevanten Texturkenngrößen aus dem gefilterten Profil ermittelt. Aus diesem Grund ist die Wahl der Grenzwellenlänge von großer Bedeutung.

Die Grenzwellenlänge spezifiziert die Frequenzgrenze, unter oder über welcher die Wellenlängenbereiche aus einem gemessenen Ist-Profil eliminiert werden, die nicht der Rauheit zugeordnet werden, sondern dem Rauschen, der Form oder der Welligkeit. Daher wirkt sich die obere ( $L_o$ ) und untere ( $L_u$ ) Grenzwellenlänge auf das resultierende Profil aus, welches als Grundlage für die Berechnung der Rauheitswerte verwendet wird (s. Kapitel 5.1). Dieses bedeutet, dass das Grundprinzip für die Erfassung der Oberflächeneigenschaften die Profilfilterung nach den in den Normen definierten Grenzwellenlängen ist. Im Maschinenbau werden diese Grenzen entweder nach dem Riefenabstand oder den zu erwartenden Rauheitswerten festgestellt [13, 20]. Für die Filterung des Texturprofils eines Fahrbahnbelages ist die obere Grenzwellenlänge in Abhängigkeit von der Länge des Einzelabschnittes  $L_r$  stets gleich lang zu wählen. Er ist  $100 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ , was im Wegfrequenzbereich  $10 \text{ m}^{-1}$  entspricht (Tabelle 1 [11]), und ist die obere Frequenzgrenze des Hochpassfilters  $L_o$ . Die Wahl der unteren Grenzwellenlänge  $L_u$  ist durch die Definition der Parameter des Tiefpassfilters gemäß der ISO 13473-1 verbindlich festgelegt. Dieser Filter muss Wellenkomponenten beseitigen, die kleiner als  $2,5 \text{ mm}$  ( $400 \text{ m}^{-1}$ ) sind. Ist die horizontale Auflösung größer, kann als Grenzwert für den Filter  $5 \text{ mm}$  gleich  $200 \text{ m}^{-1}$  gewählt werden. Im Rahmen dieser Grenzen wird die Makrorauheit untersucht.

Um Fahrbahnoberflächen im Mikrotextrbereich untersuchen zu können, der nach ISO 13473, Teil 1 und 2, für Größen kleiner  $0,5 \text{ mm}$  definiert ist, muss die obere Wegfrequenzgrenze  $L_o$  geändert und auf  $2.000 \text{ m}^{-1}$  gesetzt werden, was einer Texturwellenlänge von  $0,5 \text{ mm}$  entspricht. Die untere Grenzwellenlänge  $L_u$  hängt nur von technischen Möglichkeiten des verwendeten Messgerätes ab. Da die laterale Auflösung des kleinen Messfeldes des T3D-Messsystems der BAST (T3Dk)  $0,04 \text{ mm}$  beträgt, ist die untere Grenzwellenlänge unter Berücksichtigung des Abtasttheorems gleich  $0,2 \text{ mm}$  oder  $5.000 \text{ m}^{-1}$ . Dieses spricht auch dafür, dass die kleinste Profilabweichung, die mit dem kleinen Messfeld theoretisch sicher gemessen werden kann, unter Annahme des Faktors 5,  $0,2 \text{ mm}$  beträgt.

Für die Untersuchung der Fahrbahnbeläge im Megatexturbereich muss das gemessene Ist-Profil ausreichend lang sein und dabei mindestens 3- bis 5-mal länger sein als die obere Grenzwellenlänge des gesamten Texturbereiches, die nach ISO 13473, Teil 1 und 2,  $500 \text{ mm}$  ( $2 \text{ m}^{-1}$ ) beträgt. Die Profile solcher Größe oder sogar längere können in der Praxis nur mit dem statischen (TL-5) oder mobilen Laserprofilometer (TMF) der BAST erfasst werden. Die laterale Auflösung der beiden Geräte bestimmt dabei ihre unteren Grenzwellenlängen  $L_u$ . So ergeben sich für das TL-5 beim Faktor 5 eine untere Grenzwellenlänge  $L_u = 1,0 \text{ mm}$  ( $1.000 \text{ m}^{-1}$ ) und für das TMF beim Faktor 10 eine untere Grenzwellenlänge  $L_u = 5,0 \text{ mm}$  ( $200 \text{ m}^{-1}$ ). In beiden Fällen wird somit die Bedingung der Nichtverletzung des Abtasttheorems erfüllt.

Die unteren Grenzen  $L_u$  müssen bei allen Untersuchungen unverändert bleiben. Die obere Grenzwellenlänge  $L_o$  soll dagegen in Abhängigkeit vom zu untersuchenden Texturbereich geändert werden. Für die Untersuchung des Makrotextrbereiches werden Grenzwellenlängen für alle Texturmessgeräte der BAST mit Ausnahme des kleinen Messfeldes von  $2,5 \text{ mm}$  ( $400 \text{ m}^{-1}$ ) bis  $100 \text{ mm}$  ( $10 \text{ m}^{-1}$ ) angegeben. Die obere Grenzwellenlänge des kleinen Messfeldes muss aufgrund der Größe des zu messenden Profils auf  $10 \text{ mm}$  ( $100 \text{ m}^{-1}$ ) herabgesetzt werden. Damit ergeben sich zwei Untersuchungsbereiche für das kleine Messfeld, und zwar von  $0,2 \text{ mm}$  bis  $0,5 \text{ mm}$  und von  $0,5 \text{ mm}$  bis  $10 \text{ mm}$ , die dem Mikro- oder dem Makrotextrbereich entsprechen. Aus gleichem Grund werden aus dem gesamten Untersuchungsbereich des TL-5 ( $1,0 \text{ mm}$  bis  $500 \text{ mm}$ ) und des TMF ( $5,0 \text{ mm}$  bis  $500 \text{ mm}$ ) für jedes Messgerät zwei Bereiche der Textur mit unterschiedlichen Grenzwellenlängen gebildet. Im Rahmen der ersten Grenzen wird die Auswirkung der Makrotextr auf die akustischen und geometrischen Eigenschaften der gemessenen Fahrbahnbeläge untersucht. Im Rahmen des zweiten Grenzwellenlängenbereiches kann die Auswirkung der Megatextr untersucht werden.

An dieser Stelle ist es wichtig zu sagen, dass mit dem großen Messfeld (T3Dg) nur die Makrotextr untersucht werden kann, die sich unter Berücksichtigung der Auflösungsmöglichkeiten des Gerätes und der Länge des zu erfassenden Ist-Profils zwischen  $2,0 \text{ mm}$  und  $100 \text{ mm}$  erstreckt. Dem gegenüber sind die drei anderen o. g. Messgeräte in der Lage, noch zusätzlich entweder die Mikro- (T3Dk) oder die Megatextr (TL-5, TMF) zu erfassen.

sen. Um Mess- und Auswertergebnisse aller Texturmessgeräte miteinander vergleichen zu können, werden die in den BATex-Auswerteprogrammen zu berechnenden Kenngrößen nach den gleichen Berechnungsprinzipien wie bei dem T3Dg ermittelt. Die Ausnahme bildet das kleine Messfeld, da sein Makrorauheitsbereich viel kleiner ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle, mit Ausnahme der aus dem Wellenlängen- und DFT-Spektrum abgeleiteten, geometrisch und akustisch relevanten Texturkenngrößen aus einem gefilterten Ist-Profil berechnet werden müssen. Das gefilterte Ist-Profil soll in fünf gleiche Bezugsabschnitte bzw. Einzelmessabschnitte  $L_r$  unterteilt werden. Die obere Filtergrenzwellenlänge  $L_o$  und die Länge des Einzelmessabschnittes  $L_r$  sind dabei stets gleich lang zu wählen. Ihre Zuordnung und die Größe der unteren Filtergrenzwellenlänge sind in dem ISO-Standard 13473 verbindlich festgelegt und im Rahmen der BATex-Auswerteprogramme nach diesem Grundprinzip umgesetzt.

### 5.2.2 Grenzwellenlängen des Wellenlängenspektrums

Bei der Ermittlung der technisch möglichen und physikalisch vertrauenswürdigen oberen Grenzwellenlänge des Wellenlängenspektrums muss einerseits die Anzahl der Messwerte (Abtastpunkte) mit einer Potenz von 2 übereinstimmen. Andererseits müssen bei nicht rein sinusförmigen Schwingungen ca. 3 bis 5 Perioden der längsten Texturschwingung in die Auswertelänge passen. Die untere Grenzwellenlänge hängt dabei nur von der Abtastschrittweite ab und ergibt sich als gesicherte Grenze aus mindestens 5 bis 10 Messpunkten (für mobile Messsysteme) pro Periode der kleinsten detektierbaren Wellenlänge auf dem gemessenen Texturprofil.

Diese Vorgaben, die aus den Bedingungen für die FFT-Analyse und den Regeln für das Abtasttheorem stammen, wurden in BATex-Auswerteprogrammen [3] bei der Berechnung und Darstellung des Wellenlängenspektrums berücksichtigt.

### 5.2.3 Grenzwellenlängen des Spektrums der Texturdaten

Die obere Grenzwellenlänge des DFT-Spektrums ist die längste Welle im gemessenen Texturprofil, welche die kleinste räumliche Frequenz bzw. Grundfrequenz für die Frequenzanalyse bestimmt. Sie wird nach der folgenden Formel in mm berechnet:

$$L_o = (n - 1) * A_h \quad (14)$$

oder als räumliche Frequenz in  $\text{mm}^{-1}$  dargestellt:

$$l_o = 1 / L_o, \quad (15)$$

wobei  $n$  die Anzahl der Messwerte (Abtastpunkte) im gemessenen Texturprofil und  $A_h$  die Abtastschrittweite bzw. horizontale Auflösung des Messgerätes sind.

Die untere Grenzwellenlänge des DFT-Spektrums ist die kleinste Wellenlänge bzw. die größte räumliche Frequenz, die der räumlichen Frequenzauflösung entspricht.

Nach dem Nyquist-Kriterium beträgt die größte räumliche Frequenz die Hälfte der Sample-Frequenz und wird wie folgt in  $\text{mm}^{-1}$  berechnet:

$$l_u = \frac{1}{2 * A_h} \quad (16)$$

oder als untere Grenzwellenlänge in mm dargestellt:

$$L_u = 1 / l_u \quad (17)$$

Für die quantitative Abschätzung der Grenzwellenlängen des DFT-Spektrums der beiden Laserprofilometer muss die Länge ihrer Auswertepprofile bekannt werden [21]. Laut ISO 13473 wird die Messgenauigkeit der Texturmessgeräte auch in Bezug auf die Länge der Auswertepprofile ermittelt.

### 5.2.4 Bestimmung der Länge von Auswerteprofilen

Idealerweise wird nach ISO 13473 empfohlen, Messungen und Auswertungen entlang der gesamten Versuchsstrecke kontinuierlich durchzuführen. Um den Aufwand zu reduzieren, kann in der praktischen Anwendung davon abgewichen werden. Dazu wurde eine minimale zulässige Mess- und Auswertelänge festgelegt, die einem 1,0 m langen Profil, bestehend aus 10 gleichmäßig verteilten Profilen, entspricht, welche alle 100 m gemessen werden müssen. Für Oberflächen mit periodischen Texturen muss die gesamte Profillänge zusätzlich mindestens 10 Perioden der Textur umfassen. Wenn das gemessene Profil auch für eine Spektralanalyse verwendet wird, sind die oben angegebenen minimalen Auswertelängen als nicht ausreichend definiert.

In Übereinstimmung mit den oben durchgeführten Mindestforderungen und unter Berücksichtigung

der technischen Möglichkeiten der BAST-Texturmessgeräte wurden für die Bestimmung aussagekräftiger und vertrauenswürdiger Texturkenngrößen folgende Längen der Auswertepprofile festgelegt:

- statisches Laserprofilometer TL-5 – ein Auswertepprofil von 5.303 mm Länge, das der kompletten Messlänge des Profilometers entspricht und damit 40.174 Werte mit dem Abstand von 0,132 mm enthält,
- mobiles Laserprofilometer TMF – ein Profil von 4.096 mm (8.192 MW x 0,5 mm) Länge. Im Bezug auf dieses Profil wird im BATex-Auswerteprogramm jede gemessene Strecke komplett und kontinuierlich ausgewertet,
- das 3D-Messsystem T3D (kleines und großes Messfeld) – die Auswertepprofile von 50 mm und 500 mm Länge, die aus den gemessenen Oberflächen von 1.294 x 1.024 Messwerten gebildet werden. Der Messwerteabstand von 0,038 mm und 0,384 mm entspricht dabei der horizontalen Auflösung der Messgeräte.

Die Festlegung der weiteren wichtigen Parameter der Messungen von Straßenoberflächentexturen, wie die Mindestzahl der Wiederholungsmessungen in jeder Messposition und die Mindestzahl der Messstellen beim Messen eines Fahrbahnbelages, ist laut ISO 13473 aufgrund der dort vorhandenen Empfehlungen nicht immer sinnvoll und wird der fachlichen Beurteilung des Ausführenden der Messung überlassen. Wann eine Messung bzw. eine ermittelte Texturkenngröße repräsentativ ist, wird aus diesem Grund im Rahmen dieses Vorhabens durch praktische Untersuchungen der Unsicherheit der Ergebnisse von Texturmessungen mit BAST-Oberflächenmessgeräten beantwortet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im nächsten Kapitel dargestellt.

## 6 Prüfung der Messgerätefähigkeit und Ermittlung der Messunsicherheit bei der Texturerfassung von Straßenoberflächen mit BAST-Texturmessgeräten

Es gibt verschiedene Normen und Richtlinien, welche die Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit enthalten. Sie stammen dabei überwiegend

aus dem Maschinenbau (z. B. das Abschätzen einer Obergrenze der Messunsicherheit). Zu dieser Methode gehört beispielsweise das Vorgehen nach DIN 4772, bei dem die Einstufung in die Güteklassen durchgeführt wird. Gemäß dieser DIN darf die Genauigkeit eines Oberflächenmessgerätes der Güteklasse 1 die 5%ige Grenze des angezeigten Wertes nicht überschreiten [10]. Die gleiche Methode gilt zurzeit im Straßenbau. Gemäß der ISO 13473-1 wird die Genauigkeit der Texturmessungen bzw. die Streuung des Messsystems im Bezug auf ETD-Werte abgeschätzt. Die Standardunsicherheit der Wiederholungsmessungen (Wiederholbarkeit) darf dabei die Grenze von 20 % des Mittelwertes nicht überschreiten. Die maximale Standardunsicherheit der Vergleichsmessungen (Reproduzierbarkeit) wird in Höhe von 0,15 mm oder 10 % der mittleren Texturtiefe festgelegt.

Neben dieser Methode gibt es noch eine weitere Möglichkeit, um die Güte einer Messung zu ermitteln. Die international anerkannte und auf alle Fachgebiete verbreitete Norm zur Bestimmung der Messunsicherheit ist der Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, der als GUM [22] bezeichnet wird. Er beschreibt sehr umfassend und in allgemein gültiger Form Methoden zur Bestimmung der Messunsicherheit und bildet damit auf Basis einer Modellierung des Messprozesses die Grundlage für die quantitative Bewertung der Güte des Messergebnisses. Die Messunsicherheit nach GUM ist ein dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet. Sie wird in vier wesentlichen Schritten bestimmt. Zunächst sind alle relevanten Einflussgrößen aufzulisten. Danach ist ein physikalisch-mathematisches Modell des Messprozesses zu bilden. Im nächsten Schritt muss die Standardmessunsicherheit für jede Einflussgröße entweder nach der Methode A (experimentell, d. h. durch statistische Analyse von Messreihen) oder nach der Methode B (durch andere Informationsquellen) bestimmt werden. Anschließend werden die Standardmessunsicherheiten der Einzelkomponenten (Einflussgrößen) zur kombinierten Standardmessunsicherheit zusammengefasst und das Messunsicherheitsbudget berechnet. Als Ergebnis wird die erweiterte Messunsicherheit dargestellt.

Die Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM ist dann sinnvoll, wenn wie im vorliegenden Fall die Messgröße selbst nicht direkt gemessen werden kann [23]. Für die Praxis bedeutet dies, dass die Eignung eines Texturmessgerätes zuerst anhand

einer Beurteilung von Herstellerangaben bzw. der Messgerätefähigkeit geprüft werden muss. Diese Vorgehensweise verlangt aber zusätzlich die praktische Ermittlung der Messunsicherheit unter realistischen Bedingungen.

Im Folgenden werden die Messgerätefähigkeit und die Messunsicherheit der Texturerfassung am Beispiel des optischen T3Dg-Oberflächenmessgerätes der BAST untersucht.

## 6.1 Prüfung der Messgerätefähigkeit

Die Prüfung der Messgerätefähigkeit bzw. die Beurteilung von Herstellerangaben aufgrund der Verifizierung der Messgenauigkeit von Oberflächenmessgeräten ist im Straßenbau nicht genormt. In der Industrie wird dagegen die Verifizierung der Messgenauigkeit im Rahmen der Prüfmittelfähigkeit durchgeführt. Dabei wird ein so genannter %R&R-Wert, der die Streuung des Messsystems im Verhältnis zur Toleranz widerspiegelt, bestimmt und mit dem Grenzwert verglichen [24, 25]. Die Bestimmung erfolgt anhand der statistischen Untersuchungen der Ergebnisse der Messungen, die an einem Normal unter idealisierten Bedingungen vorgenommen werden. Wird die Grenze eingehalten, ist die Forderung erfüllt und das Messgerät kann prinzipiell als geeignet angesehen werden.

Die Prüfung der Messgerätefähigkeit der BAST-Texturmessgeräte nach diesem Prinzip ist zurzeit nicht zu 100 % realisierbar, da die Straßenoberflächen als Prüfobjekte unterschiedlichste Profilhöhen sowie verschiedenste Materialien aufweisen und keine genormte Toleranzgrenzen der Rauheitsstrukturen besitzen. Zudem werden noch spezielle Normale bzw. Rauhnormale benötigt. Aus diesem Grund sind in ISO13473-3 hohe Anforderungen an die technischen Daten der Fahrbahnbelagetechnik festgelegt. Die Mindestwerte für die vertikale und horizontale Auflösung, für das Abtastintervall sowie für den kleinsten vertikalen Messbereich sind in entsprechenden Tabellen der ISO dargestellt. Um einen ersten Einblick zu gewinnen, ob das optische T3Dg-Messsystem der BAST für die Messung von Straßenoberflächentexturen geeignet ist, wird die Prüfung der Messgerätefähigkeit in zwei Schritten durchgeführt, die eine Kombination der beiden o. g. Verfahren darstellen. Zunächst wird wie in ISO 13473-3 verlangt, die Auflösung des Messgerätes geprüft, danach, wie in der Industrie, die Streuung des Messgerätes anhand der Messung eines Stu-

kleinste vertikale Auflösung [mm]		Mindestwerte für die horizontale Auflösung und für das Abtastintervall [mm]		kleinster vertikaler Messbereich [mm]	
Soll	Ist	Soll	Ist	Soll	Ist
0,03 - 0,04 (0,05)*	0,04	1,0 - 20,0	0,4	20,0	100,0
*) dieser Soll-Wert gilt für Messgeräte, die ausschließlich Profilkurven messen und MPD- und ETD-Werte liefern					

Tab. 2: Prüfung der Auflösung des T3Dg-Messgerätes nach ISO 13473-3

fennormals ermittelt und abschließend das ermittelte Ergebnis mit einem vom Messgerätehersteller vorgegebenen Grenzwert der Messgenauigkeit verifiziert.

In der Tabelle 2 sind Ist- und Soll-Werte für die Prüfung der Auflösung zusammengestellt. Die Ist-Werte überschreiten dabei die Soll-Werte nicht. Dies spricht dafür, dass die Forderung bezüglich der Auflösung erfüllt ist. Für die praktische Anwendung bedeutet dies, dass die vertikale und horizontale Auflösung des T3Dg-Messgerätes ausreichend klein sind und das Messgerät für die Erfassung von Straßenoberflächentexturen geeignet ist. Daraus resultiert ein weiteres wichtiges Ergebnis, das für die nachfolgende Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit direkt umgesetzt werden kann. Der Anteil der Messabweichung, der durch die Auflösung verursacht wird, wird für vernachlässigbar klein gehalten und muss daher nicht berücksichtigt werden [24].

In der Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen an einem Stufennormal aufgeführt. Hierbei wurde die Rillentiefe des Stufennormals als mittlerer Abstand zwischen der oberen und der unteren Fläche (Rillenboden) gemessen. Der Nominalwert der Rillentiefe beträgt 25,088 mm (s. Anlage 3). Die diesem Wert entsprechende Messgenauigkeit beträgt ca. 0,10 mm. Sie ergibt sich aus der Gleichung (5) und legt die vom Hersteller angegebenen Grenzwerte für das Rauschen der Kamera und den maximal zulässigen Kalibrierfehler des Messgerätes fest. Das Rauschen beträgt dabei 0,05 mm und ist nicht größer als das Hintergrundrauschen nach ISO 13473-3 (Tabelle 6).

Der Soll-Wert der Kalibrierungsgenauigkeit in Höhe von ca. 0,05 mm als zweite aus der Gleichung (5) berechnete Komponente (entspricht zufälligerweise dem Grenzwert im P. 7 der ISO 13473-3) wird durch

den experimentell ermittelten Ist-Wert in Höhe von 0,042 mm nicht überschritten. Der Ist-Wert der Kalibrierungsgenauigkeit ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Nominal- und Mittelwert der gemessenen Rillentiefe des Stufennormals ( $\bar{X} = 25,046$  mm, s. Tabelle 3). Damit dieses Ergebnis nicht verfälscht wird, wurde ein Ausreißertest durchgeführt. Da ab einem Stichprobenumfang  $n = 30$  eine Normalverteilung für die Berechnung des Mittelwertes  $\bar{X}$  zugrunde gelegt werden darf [26], wurde der Ausreißertest nach Grubbs herangezogen [27]. Der kleinste Wert  $X_{\min} = 25,033$  mm und der größte Wert  $X_{\max} = 25,063$  mm werden als Ausreißer verdächtigt und mit dem Grubbs-Test auf dem Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  überprüft. Die Prüfwerte sind kleiner als der zugehörige Tabellenwert 2,745 ([27], s. Tabelle 7), der in Abhängigkeit von  $n$  angenommen wurde. Der verdächtige kleinste und größte Wert der Messreihe der Tabelle 3 darf also nicht als Ausreißer betrachtet werden.

$$(\bar{X} - X_{\min})/S = (25,046 - 25,033)/0,009 = 1,48 \quad (18)$$

und

$$(X_{\max} - \bar{X})/S = (25,063 - 25,046)/0,009 = 1,94 \quad (19)$$

Nr. der Messung	gemessene Rillentiefe des Stufennormals	Nr. der Messung	gemessene Rillentiefe des Stufennormals
1	25,051	16	25,045
2	25,038	17	25,034
3	25,038	18	25,040
4	25,046	19	25,059
5	25,050	20	25,051
6	25,063	21	25,051
7	25,041	22	25,062
8	25,052	23	25,059
9	25,033	24	25,036
10	25,037	25	25,052
11	25,056	26	25,051
12	25,044	27	25,047
13	25,035	28	25,054
14	25,051	29	25,036
15	25,040	30	25,041
Mittelwert, $\bar{X}$ [mm]			25,046
Standardabweichung, $S$ [mm]			0,009

Tab. 3: Überprüfung der Messgenauigkeit des T3Dg-Messgerätes

Damit sind beide o. g. Anforderungen an die Messgenauigkeit des T3Dg-Messgerätes aufgrund seiner Auflösung (Schritt 1) und Streuung (Schritt 2) erfüllt. Alle Werte liegen innerhalb der Messgerätespezifikation. Das optische 3D-Messgerät T3Dg zur Messung von Straßenoberflächen im Makrotextrurbereich hat somit den Systemtest bestanden. Mit welcher Messunsicherheit dabei gemessen wird, wird im nachfolgenden Kapitel untersucht.

## 6.2 Ermittlung der Messunsicherheit

Die Messunsicherheit  $U$  bezieht sich immer auf eine bestimmte Messgröße und wird bei der Angabe eines Messergebnisses in der Form einer Abweichung (Streuung) vom Messwert der Messgröße dargestellt. Nach GUM wird unter dieser Abweichung die erweiterte Messunsicherheit  $U_E$  angegeben, die sich aus verschiedenen Unsicherheitsbeiträgen  $U_i$  zusammensetzt. Diese ( $U_i$ ) werden als Einzelkomponenten der kombinierten Standardmessunsicherheit  $U_C$  bestimmt und durch Unvollkommenheiten [28] des Messgerätes, des Messverfahrens und des Messobjektes sowie durch die Umgebung und den Messbediener beeinflusst.

Die Messgeräte- und Messverfahrenseinflüsse sind im Kapitel 3 ausführlich beschrieben. Ihre Standardmessunsicherheit  $U_{\Delta Z}$  kann, mit Annahme der Empfehlung der Nichtberücksichtigung des Unsicherheitsbeitrages durch die Auflösung des T3Dg-Messgerätes (s. Kapitel 6.1), nach der Gleichung 5 abgeschätzt werden. Dieser Wert enthält in der Unsicherheitsbilanz der Kalibrierung  $U_Z$  zwei Komponenten, die mitberücksichtigt werden müssen. Es handelt sich dabei um die Unsicherheitsbeiträge des Kalibriernormals, die durch die Präzision der Herstellung der Kalibrierungsoberfläche  $U_{ZH}$  und durch den Kalibrierungsvorgang  $U_{ZV}$  verursacht werden.

Die Standardmessunsicherheit der ersten Komponente beträgt maximal  $U_{ZH} = 0,00791$  mm und wird aus den Angaben des Kalibrierprotokolls des Herstellers (s. Anlage 3) anhand der Methode A nach der folgenden Formel [20, 22] berechnet:

$$U_{ZH} = S_{ZH} * t / k, \quad (20)$$

wobei  $S_{ZH}$  die Standardabweichung ist ( $S_{ZH} = 0,007$  mm, s. Kalibrierprotokoll). Der Faktor  $t$  ist ein Korrekturfaktor zur Berechnung der Standardmessunsicherheit  $U_{ZH}$  aus der Standardabwei-

chung  $S_{ZH}$  bei einer Stichprobe mit einer kleinen Anzahl von Messwerten ( $t = 2,26$  für die aus dem Kalibrierschein entnommene Anzahl der Messwerte  $n$ ,  $n = 10$ ). Der Faktor  $k$  ist ein vom Vertrauensniveau  $(1-\alpha)$  abhängiger Erweiterungsfaktor ( $k = 2$  für die Aussagewahrscheinlichkeit  $(1-\alpha)$  von 95 %).

Die Standardmessunsicherheit der zweiten Komponente beträgt  $U_{ZV} = 0,042$  mm. Dieser Wert wurde im Kapitel 6.1 nach der Methode A ermittelt und ist die bekannte systematische Abweichung. Er kann durch den Kalibrierungsvorgang kompensiert bzw. verbessert werden. Die Berücksichtigung als Unsicherheitskomponente ist dabei nicht erforderlich. Es ist trotzdem offensichtlich, dass die Summe der beiden Unsicherheitskomponenten  $U_{ZH}$  und  $U_{ZV}$  in Höhe von  $U_Z = 0,0499$  mm den vom Gerätehersteller festgelegten Grenzwert der Standardmessunsicherheit der Kalibrierung  $U_Z^{zul} = 0,05$  mm nicht überschreitet. Zudem ist aus dem Kapitel 6.1 bekannt, dass der Grenzwert des Messfehlers für das Rauschen der Kamera maximal 0,05 mm beträgt. Dies bedeutet, dass mit dieser Kamera systematisch um ca. 0,025 mm [22, 20] zu groß gemessen wird. Für die Praxis bedeutet dies, dass der Unsicherheitsbeitrag  $U_{\Delta Z}$ , der durch die vorher genannten wichtigen Einflussfaktoren wie Messgerät und Messverfahren entsteht, in maximaler Höhe von ca. 0,033 mm (0,025 mm + 0,00791 mm) angenommen werden kann.

Zu den weiteren wichtigen Einflussgrößen gehören die Einflüsse des Messobjektes. In diesem Fall handelt es sich hierbei um folgende Straßenoberflächeneigenschaften: die Ausprägung der Fahrbahntextur (Makrorauheit), die Farbe und der Reflexionsgrad der Oberfläche (hell- oder dunkel-schwarz, glänzend oder matt). Sie sind vom Belagstyp und der Zusammensetzung des Mischgutes abhängig. Ihr Einfluss auf die Standardmessunsicherheit des Messobjektes  $U_O$  kann aufgrund nicht genügender Länge der gemessenen Oberfläche verstärkt werden, da die erfassten Oberflächeneigenschaften der kürzeren Belagsabschnitte nicht vollständig repräsentativ sind, um die Eigenschaften des Gesamtbelages ausreichend genau zu beschreiben. Aus diesem Grund wurde diese Gruppe der Einflussfaktoren auf die Unsicherheit der Messergebnisse in ISO 13473-1 als Inhomogenität der Oberfläche  $U_{hom}$  bezeichnet.

Als Umgebungseinflüsse  $U_U$  sind die Temperatur  $U_{U1}$ , die Fahrbahnverschmutzung  $U_{U2}$  und der Transport des Messgerätes zum Messort  $U_{U3}$  zu

beachten. Die Messbedienereinflüsse  $U_B$  sind abhängig von den Fähigkeiten des Ausführenden der Messung.

Der Unsicherheitsbeitrag  $U_O$ , der durch Einflüsse des Messobjektes bzw. durch Inhomogenität der Messoberfläche verursacht wird, sowie die Unsicherheitsbeiträge  $U_U$  und  $U_B$  sind unbekannt. Für ihre Bestimmung wurden die Messungen auf dem Versuchsgelände in Sperenberg (s. Bild 11) durchgeführt. Die Unsicherheit der Ergebnisse von durchgeführten Makrotexturmessungen  $U_E$  wurde dabei, wie in der Praxis üblich, unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen durch die Unsicherheitsbeiträge von o. g. Hauptquellen auf der Grundlage der Oberflächenprofile der gemessenen Testfelder ermittelt:

$$X = \bar{X} \pm U_E \quad (21)$$

$$U_E = k * U_C = 2 * \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2}, \quad (22)$$

wobei  $X$  die Merkmalsbezeichnung bzw. Texturkenngröße,  $\bar{X}$  das Messergebnis und  $U_E$  die erweiterte Messunsicherheit in derselben Einheit wie das Messergebnis sind. Hier ist  $\bar{X}$  der Mittelwert des Merkmals  $X$ , der nach der Methode A zu berechnen ist.  $U_{\Delta Z}$  ist die nach der Methode B in Kapitel 6.2 festgestellte Unsicherheitskomponente ( $U_{\Delta Z} = 0,033$  mm).

### 6.2.1 Untersuchungsprogramm und Durchführung der Messungen

Durch die Texturerfassung von verschiedenen Fahrbahnoberflächen soll

- der Einfluss von dominierenden Hauptquellen der Unsicherheit auf die Genauigkeit der Messergebnisse ( $U_E$ ) untersucht und quantitativ beschrieben werden,
- die Mindestzahl der Messungen in jeder Messposition und beim Messen des Gesamtbelages bestimmt werden, die nötig sind, um die gemessene Oberfläche ausreichend genau beschreiben zu können,
- die Untersuchung der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen mittels der wichtigsten geometrisch und akustisch relevanten Texturkenngrößen durchgeführt werden.



**Bild 11:** Versuchsgelände in Sperenberg mit Testfeldern aus Asphalt und Beton [29]

Um die gestellten Ziele zu erreichen, wurde ein Untersuchungsprogramm bestehend aus drei Teilen erarbeitet.

Im ersten Teil sollte unter Wiederholbedingungen (Messbedingungen, bei denen die Texturmessungen vom selben Messbediener, mit demselben Messgerät, am selben Testfeld und in kurzen Zeitabständen wiederholt werden) die Mindestzahl der Messungen ermittelt werden. Durch ihre Bestimmung wird festgestellt, wann eine Texturkenngröße, die die Eigenschaften der gemessenen Oberfläche charakterisiert, repräsentativ ist. Im zweiten Teil sollten unter Vergleichsbedingungen (Messbedingungen, bei denen die Texturmessungen mit demselben Messgerät, aber entweder von verschiedenen Messbedienern oder an unterschiedlichen Testfeldern oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten wiederholt werden) die wichtigsten Unsicherheitsbeiträge ermittelt werden. Durch ihre Bestimmung wird geklärt, ob das Messgerät nach dem Transport zum Messort vor Beginn der Messungen nochmals vor Ort kalibriert werden muss sowie inwieweit die Inhomogenität der zu messenden Oberfläche, die Temperatur, die Fahrbahnverschmutzung und der Messbediener die Genauigkeit der Messergebnisse beeinflussen. Dabei werden die Standardmessunsicherheiten für die wichtigsten Texturkenngrößen nach Gleichungen (21) und (22) quantitativ bestimmt. Abschließend sollte im dritten Teil des Untersuchungsprogramms die Klassifizierungsfähigkeit der gemessenen Fahrbahnbeläge mittels der wichtigsten geometrisch und akustisch relevanten Texturkenngrößen untersucht werden. Durch diese Untersuchung wird die Aussagefähigkeit der Texturkenngrößen zum Vergleich der Oberflächeneigenschaften von Straßen mit unterschiedlichen Bauweisen bestimmt.

Im Untersuchungsprogramm wurde vorgesehen, die Mikro-, Makro- und Megatextur auf den 9 Testfeldern A1, A4, A5, A7, B2, B11, B15, B17 und GA6 in Sperenberg zu erfassen. Im Bereich dieser Testfelder wurden 1-lagiger offenerporiger Asphalt 4/8, Asphaltbeton 0/8 ISO, Splitt-Mastix-Asphalt 0/3 (SMA), SMA 0/8 abgestreut mit Sand 1/3, Planschliff, Beton mit Kunstharzbeschichtung und Abstreuung (AS) 3/5 rundkörnig, Beton mit Kunstharzbeschichtung und AS 1/3 scharfkantig, 1-lagiger offenerporiger Beton sowie Gussasphalt 0/11 mit AS Quarzporphyr 1/3 eingebaut (s. Anlage 4).

### 6.2.2 Ermittlung der Mindestzahl der Messungen

Um die Mindestanzahl der Messungen in jeder Messposition zu bestimmen, wurden  $n = 30$  Wiederholungsmessungen durchgeführt. Das Gerät wurde zwischen jeder Wiederholungsmessung angehoben und von der Messposition entfernt. Anschließend wurde versucht, das Messgerät immer wieder möglichst genau in der ursprünglichen Position zurückzupositionieren.

Für die Bestimmung der Mindestzahl der Messungen auf dem Gesamtbelag wurden  $n = 38$  Wiederholungsmessungen entlang einer Markierungslinie (je 0,5 m Abstand) durchgeführt, sodass der ganze Belag ohne Lücken aufgenommen wurde (s. Bild 12).

In beiden Fällen wurden der zu messende Belag, die Fahrbahnverschmutzung und der Messbediener variiert. Der Unterschied bestand lediglich darin, dass im zweiten Fall jeder Belag in kompletter Länge des Testfeldes aufgenommen wurde, um die Inhomogenität der Oberflächentextur zu berücksichtigen.

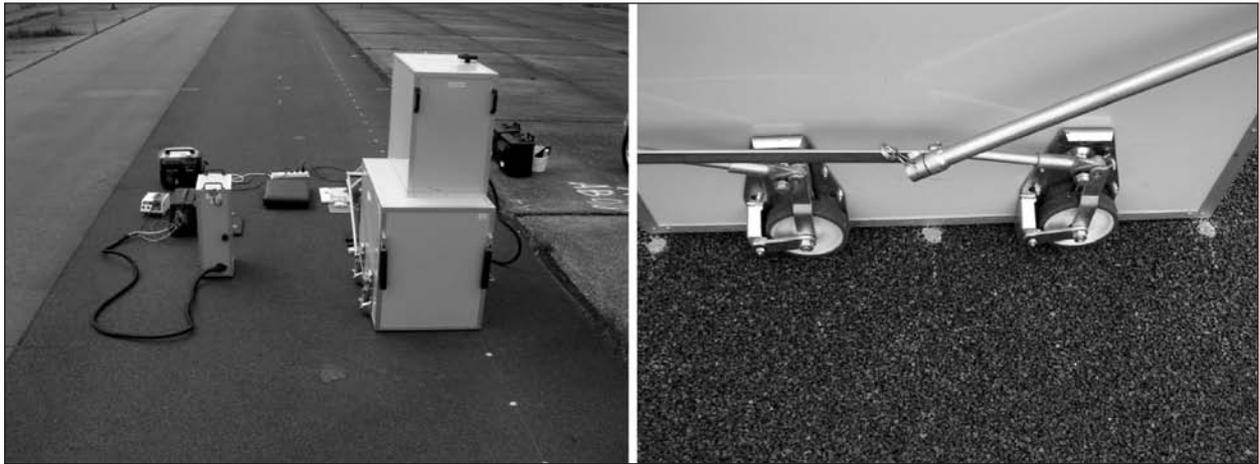


Bild 12: Beispiel einer 20 m langen, lückenlosen Messung mit T3D

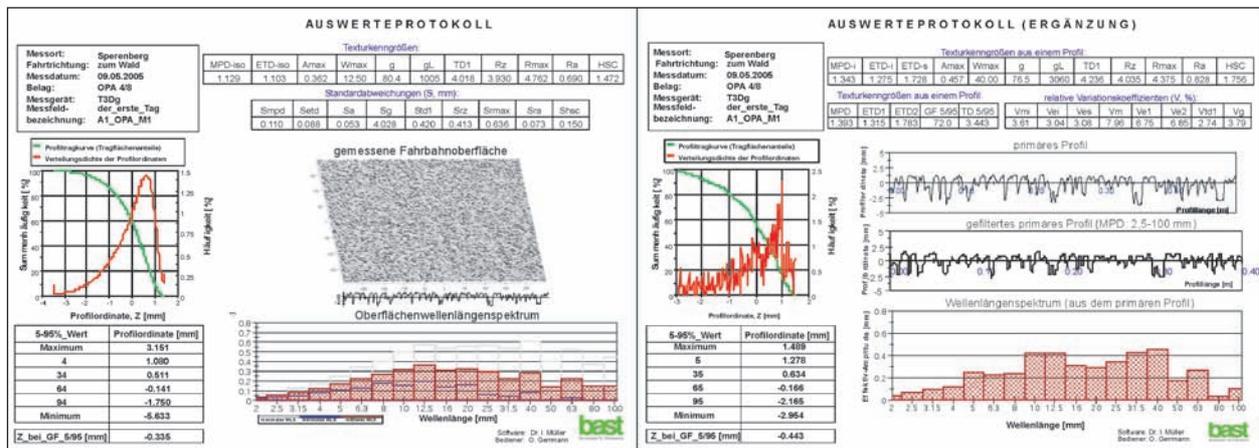


Bild 13: Auswerteprotokolle zur Berechnung von akustisch und geometrisch relevanten Texturkenngrößen aus 3D-Aufnahmen mit dem T3Dg-Messsystem

Mit Hilfe des Programms BATex wurden anschließend die Messungen ausgewertet. In Bild 13 sind die Auswertergebnisse einer Wiederholungsmessung beispielhaft dargestellt.

Für die weitere Analyse wurden aus den Auswerteprotokollen nur die wichtigsten, flächenhaft berechneten Texturkenngrößen ausgewählt und in den Tabellen 4 und 5 zusammengefasst.

Die Messreihen mit dem Index „S“ in der Tabelle 4 werden zur Bestimmung des Einflusses von Fahrbahnverschmutzungen auf die Standardmessunsicherheit (Wiederholgenauigkeit der Texturmessungen) unter Vergleichsbedingungen bzw. auf die Reproduzierbarkeit der Texturkenngrößen herangezogen. Im nächsten Kapitel werden diese Messreihen durch den Vergleich der Mittelwerte von gleichartigen Messreihen [30] für drei unterschiedliche Beläge statistisch geprüft. Die Oberflächen dieser Beläge wurden vor und nach dem Staubsaugen gemessen.

Die Messreihen der Tabelle 5 mit dem Index „MB1“, „MB2“ werden zur Bestimmung der Messbediener- und mit dem Index „vor“, „nach“ zur Bestimmung der Transporteinflüsse auf die Wiederholgenauigkeit der Texturmessungen bzw. auf die Reproduzierbarkeit der Texturkenngrößen herangezogen.

Die Ermittlung der Unsicherheitsbeiträge wird dabei unter Vergleichsbedingungen für sieben unterschiedliche Beläge durchgeführt.

Die Mindestzahl der Wiederholungsmessungen  $N$  wird aus der Formel (23) ermittelt. Sie wurde von der Gleichung (3.16) [30] abgeleitet, die mit vorgegebener Genauigkeit  $d$  und vorgegebener statistischer Sicherheit die minimalen Stichprobenumfänge [30, 31] zur Schätzung des Mittelwertes  $\bar{x}_n$  gibt.

$$N \geq z_{\alpha}^2 \left( \frac{v}{k_{vor}} \right)^2 c \quad (23)$$

Bezeichnung der Testfelder		Texturkenngrößen											
		Makrotextur										BAST-Bericht [3]	
		nach ISO 13473		nach ISO 4287 (λ = 100 mm)				oWLS		Material-anteilkurve			
		MPD <sub>i</sub>	ETD <sub>i</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>max</sub>	TD1	A <sub>max</sub>	W <sub>max</sub>	g	gL	GF <sub>5/95</sub>	TD <sub>5/95</sub>
A1 OPA 4/8	MW	1,235	1,188	0,743	4,252	5,097	4,346	0,381	12,5	80,3	1004	71,7	3,080
	Sa1	0,001	0,001	0,0	0,005	0,012	0,005	0,0	0,0	0,04	1	0,04	0,002
A1 OPA 4/8-S	MW	1,229	1,183	0,744	4,242	5,074	4,335	0,380	12,5	80,3	1004	71,7	3,081
	Sa1s	0,001	0,001	0,0	0,005	0,009	0,005	0,0	0,0	0,05	1	0,03	0,002
A4 AB 0/8	MW	0,376	0,501	0,206	1,397	1,781	1,437	0,109	12,5	83,1	1039	72,1	0,935
	Sa4	0,002	0,002	0,001	0,004	0,008	0,005	0,0004	0,0	0,2	2	0,2	0,002
A4 AB 0/8-S	MW	0,374	0,499	0,208	1,410	1,804	1,449	0,110	12,5	83,6	1045	72,6	0,943
	Sa4s	0,001	0,001	0,001	0,005	0,008	0,006	0,001	0,0	0,2	2	0,2	0,003
A5 SMA 0/3	MW	0,313	0,450	0,124	0,852	1,015	0,894	0,066	5,6	69,9	390	61,5	0,548
	Sa5	0,002	0,001	0,001	0,003	0,006	0,004	0,001	0,6	0,2	44	0,1	0,002
A 5 SMA 0/3-S	MW	0,312	0,450	0,124	0,854	1,015	0,896	0,066	5,3	70,3	375	61,8	0,550
	Sa5s	0,001	0,001	0,001	0,003	0,004	0,003	0,001	0,6	0,2	40	0,1	0,001

Tab. 4: Zusammenfassung der Auswertergebnisse von 30 Wiederholungsmessungen

mit:

$k_{vor}$  = prozentual vorgegebene Genauigkeit d

$Z_{\alpha}$  = Schranke der Standardnormalverteilung, die aus der Tabelle 29 [30] für die gewünschte Vertrauenswahrscheinlichkeit  $(1-\alpha)$  zu entnehmen ist

$v$  = Variationskoeffizient (%)

$C$  = Korrekturfaktor nach SHIFFLER-ADAMS ( $n = 40, C = 1,017; n = 20, C = 1,036$  [30, 32])

Das Vertrauensniveau  $(1-\alpha)$  bzw. die statistische Sicherheit (%) muss nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten vor Beginn der Untersuchungen festgelegt werden. Im Bauwesen werden die Werte der Aussagewahrscheinlichkeit  $(1-\alpha) = 0,95$  und  $(1-\alpha) = 0,99$  gefordert, was der statistischen Sicherheit von 95 % und 99 % entspricht. In diesem Fall beträgt die zweiseitige Schranke  $Z_{\alpha} = 1,960$  und  $Z_{\alpha} = 2,576$ .

$$v = \frac{S_n}{\bar{x}_n} 100 \tag{24}$$

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2} \tag{25}$$

Die Parameter  $Z_{\alpha}, v, C$  sind Parameter des „wahren“ Wertes  $\bar{x}_n$ , unter dem der Mittelwert einer Stichprobe vom Umfang  $n$  (mindestens  $n = 30$ ) verstanden wird. Die Streuung oder die Standardabweichung der Stichprobe vom gleichen Umfang  $S_n$  ist die Wiederholgenauigkeit des „wahren“ Wertes. Sein Vertrauensbereich VB wird durch die Wiederholungsgrenzen charakterisiert und kann bei zweiseitiger Abgrenzung und statistischer Sicherheit von 95 % nach folgenden Gleichungen berechnet werden [27, 30]:

$$VB = 2 W \text{ und } W = t_{v; 1-\alpha/2} \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \tag{26}$$

wobei  $W$  der Abstand der Wiederhol- bzw. der Vertrauensgrenzen vom Mittelwert  $\bar{x}_n$  der Stichprobe  $n$  ist:

$$\bar{x}_n - W \leq x \leq \bar{x}_n + W \tag{27}$$

Der Quotient  $t_{v; 1-\alpha/2}$  der Studentischen t-Verteilung in der rechten Gleichung (26) kann aus der Tabelle 2 [27] oder aus der Tabelle 49 [30] in Abhängigkeit von der Zahl der Freiheitsgrade  $v = n - 1$  entnommen werden. Die dabei erreichte Genauigkeit kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$k_{vor}^{max} \geq k_{vor} = t_{v; 1-\alpha/2} \frac{S_n}{\bar{x}_n \sqrt{n}} 100 \tag{28}$$

Bezeichnung der Testfelder		Texturkenngrößen											
		Makrotextur											
		nach ISO 13473		nach ISO 4287 ( $\lambda = 100 \text{ mm}$ )				oWLS		Materialanteilkurve		BAST-Bericht [3]	
		MPD <sub>i</sub>	ETD <sub>i</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>max</sub>	TD1	A <sub>max</sub>	W <sub>max</sub>	g	gL	GF <sub>5/95</sub>	TD <sub>5/95</sub>
A1 (MB1) OPA 4/8	MW.	1,183	1,146	0,718	4,092	4,853	4,185	0,364	12,7	80,5	1.023	71,9	2,981
	Sa1k	0,037	0,030	0,022	0,122	0,158	0,123	0,012	1,2	0,4	97	0,3	0,092
A1 (MB2) OPA 4/8	MW.	1,176	1,141	0,718	4,086	4,847	4,179	0,364	12,7	80,7	1.024	72,0	2,981
	Sa1m	0,038	0,030	0,022	0,122	0,157	0,122	0,012	1,2	0,4	97	0,3	0,092
A4 (MB1) AB 0/8	MW.	0,368	0,494	0,203	1,388	1,759	1,428	0,109	12,5	85,0	1.062	76,0	0,900
	Sa4k	0,019	0,015	0,014	0,082	0,109	0,083	0,008	0,0	0,6	8	1,0	0,062
A4 (MB2) AB 0/8	MW.	0,368	0,495	0,203	1,399	1,797	1,439	0,109	12,5	85,0	1.062	76,0	0,901
	Sa4m	0,019	0,015	0,014	0,082	0,115	0,083	0,008	0,0	0,7	8	1,0	0,061
FTVA (vor) AB 0/8	MW.	0,349	0,479	0,188	1,281	1,635	1,315	0,098	13,9	84,1	1.167	75,6	0,836
	Svor	0,023	0,018	0,015	0,096	0,123	0,097	0,008	2,9	0,9	251	1,0	0,069
FTVA (nach) AB 0/8	MW.	0,356	0,484	0,192	1,305	1,658	1,340	0,100	13,6	84,1	1.146	75,6	0,851
	Snach	0,022	0,018	0,016	0,096	0,120	0,097	0,009	2,7	0,8	230	0,9	0,069
A5 (MB1) SMA 0/3	MW.	0,318	0,454	0,128	0,873	1,046	0,915	0,070	11,0	70,7	758	61,5	0,565
	Sa5k	0,012	0,010	0,006	0,035	0,057	0,036	0,006	21,3	1,1	1.427	1,5	0,033
A5 (MB2) SMA 0/3	MW.	0,319	0,455	0,128	0,872	1,040	0,914	0,070	10,8	70,4	748	61,4	0,566
	Sa5m	0,010	0,008	0,006	0,032	0,058	0,032	0,006	21,3	1,0	1.458	1,4	0,031
A7 (MB1) SMA 0/8-1/3	MW.	0,749	0,799	0,431	2,452	2,943	2,500	0,209	14,1	78,1	1.100	70,3	1,796
	Sa7k	0,034	0,027	0,029	0,169	0,220	0,171	0,035	3,1	1,6	250	1,5	0,125
A7 (MB2) SMA 0/8-1/3	MW.	0,750	0,800	0,433	2,461	2,961	2,510	0,215	14,3	78,2	1.116	70,4	1,785
	Sa7m	0,035	0,028	0,029	0,175	0,230	0,176	0,017	3,2	1,6	255	1,5	0,174
B2 (MB1) Planschliff	MW.	0,108	0,286	0,044	0,275	0,348	0,287	0,025	77,2	60,6	4.678	55,7	0,187
	Sb2k	0,009	0,007	0,004	0,025	0,048	0,026	0,004	30,2	2,0	1.830	1,4	0,015
B2 (MB2) Planschliff	MW.	0,109	0,287	0,044	0,275	0,344	0,286	0,026	79,2	60,5	4.781	55,6	0,188
	Sb2m	0,010	0,008	0,004	0,026	0,038	0,027	0,005	30,4	1,8	1.844	1,4	0,016
B11 (MB1) KH 3/5	MW.	1,991	1,793	0,804	4,150	4,853	4,328	0,381	12,9	45,4	581	47,2	3,284
	Sb11k	0,085	0,068	0,058	0,485	0,152	0,166	0,022	1,7	4,4	56	4,1	0,172
B11 (MB2) KH 3/5	MW.	1,987	1,789	0,803	4,238	4,852	4,327	0,379	12,5	45,4	583,6	47,3	3,281
	Sb11m	0,087	0,070	0,058	0,166	0,153	0,171	0,022	0,0	4,5	54,5	4,1	0,173
GA6 (MB1) GA 0/11-1/3	MW.	0,392	0,513	0,143	0,854	1,002	0,887	0,065	43,4	44,1	1.914	45,4	0,608
	Sga6k	0,046	0,036	0,016	0,092	0,100	0,108	0,010	33,8	1,2	1.488	0,9	0,067
GA6 (MB2) GA 0/11-1/3	MW.	0,393	0,514	0,144	0,855	1,002	0,881	0,065	41,2	44,1	1.817	45,4	0,609
	Sga6m	0,047	0,037	0,016	0,093	0,103	0,095	0,009	34,8	1,3	1.536	0,9	0,068

Tab. 5: Zusammenfassung der Auswertergebnisse von 38 Wiederholungsmessungen

Dabei gilt, dass  $k_{\text{vor}}$  eine statistische Grenze in Höhe von  $k_{\text{vor}}^{\text{max}} = 1\text{-}2\%$  [30] bzw.  $k_{\text{vor}}^{\text{max}} = 3\text{-}10\%$  [11, 31, 33] nicht überschreiten darf. Letztere wird im Bereich des Bauwesens für ausreichend gehalten. In diesem Fall liegt jeder Messwert im vor dem

Beginn der Untersuchungen festgelegten Vertrauensbereich und weicht vom „wahren“ Wert um maximal 10 % ab. Dies bedeutet, dass die vorgegebene Genauigkeit  $k_{\text{vor}}^{\text{max}}$  einer Messung bei N Wiederholungen mit statistischer Sicherheit von mindes-

tens 95 % einen Differenzbetrag in % zwischen dem „wahren“ Wert  $\bar{x}_n$  und dem erwarteten Messwert  $x$  bezeichnet. Der Zahlenwert dieses Differenzbeitrags ist die vorgegebene Genauigkeit  $d$ , die gleich  $VB = 2W$  ist.

In den Tabellen der Anlage 5 und 6 sind die Ergebnisse der Bestimmung der Mindestzahl der Messungen in jeder Position und auf dem Gesamtbelag dargestellt, die sich nach der statistischen Bearbeitung der Tabellenwerte (s. Tabelle 4 und 5) inkl. Ausreißertest der Auswerteergebnisse für den Gesamtbelag ergeben.

Aufgrund der Ergebnisse der statistischen Untersuchungen ist es aus der Anlage 5 offensichtlich, dass eine Wiederholungsmessung in jeder Messposition unabhängig vom Belagstyp oder der Texturgestalt der Fahrbahnoberfläche ausreichend ist. Die 2%ige Grenze der Wiederholgenauigkeit wird dabei mit einer statistischen Sicherheit von 99 % nicht überschritten. Für Messungen mit dem T3Dg werden also vertrauenswürdige Ergebnisse erreicht. Dies spricht für gute Reproduzierbarkeit der geometrisch relevanten Texturkenngößen, wie  $MPD_i$ ,  $ETD_i$ ,  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  und  $TD1$ .

Die beste Reproduzierbarkeit der akustisch relevanten Texturkenngößen weisen die beiden Gestaltfaktoren  $g$  und  $GF_{5/95}$  sowie die Texturtiefe  $TD_{5/95}$  und die maximale Amplitude des Wellenlängenspektrums  $A_{max}$  auf. Ihre maximale Abweichung vom „wahren“ Wert liegt dabei bei 1-6 %. Die Reproduzierbarkeit der zwei weiteren akustisch relevanten Texturkenngößen  $W_{max}$  und  $gL$  ist bei einer Wiederholungsmessung wesentlich schlechter und entspricht mit einer statistischen Sicherheit von 95 % einer Genauigkeit von 23 %. Erst bei fünf Wiederholungsmessungen kann die geforderte Genauigkeit von 10 % beim Messen in einer Position erreicht werden.

Um die reproduzierbaren Messwerte von geometrisch relevanten Texturkenngößen mit statistischer Sicherheit von 95 % auf die Genauigkeit bis zu 10 % des „wahren“ Wertes zu erreichen, sind beim Messen von offenporigen, dichten und abgestreuten Belägen in kompletter Länge mindestens drei Wiederholungen pro 20 m erforderlich. Auf den stark inhomogenen Fahrbahnoberflächen, wie dem Belag des Testfeldes B2 „Planschliff“, sind im Vergleich dazu vier Wiederholungsmessungen notwendig. Die Reproduzierbarkeit der akustisch relevanten Texturkenngößen bei gleicher Mindestzahl

der Wiederholungsmessungen entspricht dabei einer Genauigkeit von 15 % auf den Testfeldern A1, A4, A5, A7, GA6 und einer Genauigkeit von 23 % für Planschliff. Die reproduzierbaren Messwerte im Bereich der geforderten Genauigkeit von 10 % können für die offenporigen und dichten Beläge ab fünf Wiederholungen, für Beläge mit Abstreuerung ab sieben und für die Planschliffdeckschicht sogar erst ab 17 Wiederholungen gewährleistet werden. Die beste Reproduzierbarkeit auf allen Belägen weisen bei den akustisch relevanten Texturkenngößen der Gestaltfaktor  $GF_{5/95}$  und bei geometrisch relevanten Texturkenngößen die geschätzte Texturtiefe  $ETD_i$  auf.

Zusammengefasst wird für die Praxis festgelegt, dass eine Wiederholung in jeder Messposition und vier Wiederholungen je 20 m auf dem Gesamtbelag für das Erreichen von vertrauenswürdigen Ergebnissen der Messungen mit T3Dg durchgeführt werden müssen. Die Streuung um den „wahren“ Wert  $S_n$  ist dabei die Wiederholpräzision der Texturmessungen. Der Vertrauensbereich  $W$  bzw.  $d(k_{vor})$  charakterisiert ihre Reproduzierbarkeit bzw. die Reproduzierbarkeit der Texturkenngößen, die mit statistischer Sicherheit von 95 % die 10- bis 12%ige Grenze der Wiederholgenauigkeit mit Ausnahme der Planschliffdeckschicht nicht überschreiten.

### 6.2.3 Ermittlung der Unsicherheitsbeiträge der Messunsicherheit

Die Ermittlung der Unsicherheitsbeiträge der Einzelkomponenten bzw. die Ermittlung des Einflusses von dominierenden Hauptquellen der Unsicherheit auf die Genauigkeit der Messergebnisse ( $U_E$ ) wird mit der Bestimmung der Messunsicherheit des Transporteinflusses begonnen.

Für die Ermittlung des Transporteinflusses wurden unter Vergleichsbedingungen an gleicher Stelle vor und nach dem Transport des T3Dg-Messgerätes  $n = 38$  Wiederholungsmessungen entlang einer Markierungslinie (je 0,5 m Abstand) durchgeführt, sodass der Referenzbelag vollständig und ohne Lücken aufgenommen wurde. Die Auswerteergebnisse sind in der Tabelle 6 unter Bezeichnung „vor“ und „nach“ dargestellt. Die Messreihe mit dem Index „vor“ entspricht der Messung vor dem Transport des Messgerätes zum Versuchsgelände in Sperenberg. Die Messreihe mit der Bezeichnung „nach“ entspricht der Messung nach der Rückkehr aus Sperenberg (ca. 1.200 km). Für die Kontrolle wurde auch das Stufennormal mit  $n = 30$  Wieder-

holungen gemessen. Da ab einen Stichprobenumfang  $n = 30$  eine Normalverteilung zugrunde gelegt werden darf [26, 30], wurde, wie im Kapitel 6.1 beschrieben, der Ausreißertest für beide Messreihen durchgeführt. Im nächsten Schritt wurden sie auf eine gleiche Anzahl der Wiederholungsmessungen gebracht, um statistisch gesehen den Fall gleicher Stichprobenumfänge zu erzielen. In diesem Fall darf die Nullhypothese ( $\bar{x}_{vor} = \bar{x}_{nach}$ ) auf Gleichheit zweier Erwartungswerte gegen die Alternativhypothese vor  $\bar{x}_{vor} \neq \bar{x}_{nach}$  bei unbekanntem Varianzen ( $S^2_{vor}, S^2_{nach}$ ), die möglicherweise ungleich sind, nach der folgenden Formel für die Berechnung des Quotienten  $t$  geprüft werden [30]:

$$t = \frac{|\bar{x}_{vor} - \bar{x}_{nach}|}{\sqrt{\frac{S^2_{vor} + S^2_{nach}}{n}}} \quad (29)$$

mit  $v = n - 1$  Freiheitsgraden.

Der Vertrauensbereich für die Differenz zweier Erwartungswerte  $\delta$  und die im Bauwesen geforderte Aussagewahrscheinlichkeit  $(1-\alpha) = 0,95$  (entspricht der statistischen Sicherheit von 95 %) kann wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} & \left( \bar{x}_{vor} - \bar{x}_{nach} \right) - t_{v;\alpha;zweis.} * \sqrt{\frac{S^2_{vor} + S^2_{nach}}{n}} \leq \delta \leq \\ & \left( \bar{x}_{vor} - \bar{x}_{nach} \right) + t_{v;\alpha;zweis.} * \sqrt{\frac{S^2_{vor} + S^2_{nach}}{n}} \end{aligned} \quad (30)$$

wobei die Signifikanzschranke  $t_{v;\alpha;zweis.}$  aus der Tabelle 49 [30] entnommen werden kann.

Die Ergebnisse der Ermittlung des Transporteinflusses sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Da der in der Tabelle 6 dargestellte Prüfquotient  $t$  kleiner als die Schranke  $t_v$  (s. Tabelle 49 in [30]) ist, kann die Nullhypothese für jede Texturkenngöße nicht abgelehnt werden. Dies weist darauf hin, dass kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten aller Texturkenngößen  $\bar{x}_{vor}$  und  $\bar{x}_{nach}$  vor und nach vorliegt. Diese insignifikanten Unterschiede sind damit ein Hinweis darauf, dass der Transport die Genauigkeit der Messergebnisse nicht beeinflusst hat und die getroffenen Vorbereitungen zum Transport des Messgerätes als zufrieden stellend charakterisiert werden können. Aus diesem Grund wird der Unsicherheitsbeitrag, der

Bezeichnung der Testfelder		Texturkenngößen											
		Makrotextur											
		nach ISO 13473		nach ISO 4287 ( $\lambda = 100$ mm)				oWLS		Materialanteilkurve		BAST-Bericht [3]	
		MPD <sub>i</sub>	ETD <sub>i</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>max</sub>	TD1	A <sub>max</sub>	W <sub>max</sub>	g	gL	GF <sub>5/95</sub>	TD <sub>5/95</sub>
FTVA (vor) AB 0/8 ISO	$\bar{x}_{vor}$	0.352	0.482	0.190	1.281	1.635	1.315	0.098	13.9	84.1	1167.4	75.6	0.841
	S <sub>vor</sub>	0.017	0.014	0.014	0.096	0.123	0.097	0.008	2.9	0.7	250.9	1.0	0.062
FTVA (nach) AB 0/8 ISO	$\bar{x}_{nach}$	0.359	0.487	0.195	1.301	1.653	1.336	0.100	13.5	84.3	1134.2	75.7	0.863
	S <sub>nach</sub>	0.016	0.013	0.012	0.095	0.118	0.096	0.009	2.6	0.6	216.8	0.8	0.056
	n	36.0	36.0	37.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	37.0	38.0	38.0	37.0
	S <sup>2</sup> <sub>vor</sub>	0.00029	0.00018	0.00019	0.00927	0.01511	0.00950	0.00007	8.68	0.558	62942.0	0.953	0.00383
	S <sup>2</sup> <sub>nach</sub>	0.00027	0.00017	0.00015	0.00900	0.01403	0.00919	0.00008	6.60	0.388	46984.6	0.665	0.00308
	A*	0.00396	0.00314	0.00305	0.02193	0.02769	0.02218	0.00197	0.6342	0.160	53.8	0.206	0.01367
	B*	0.00628	0.00500	0.00505	0.01976	0.01858	0.02079	0.00234	0.3947	0.119	33.2	0.129	0.02262
	v	35.0	35.0	36.0	37.0	37.0	37.0	37.0	37.0	36.0	37.0	37.0	36.0
	t	1.587	1.591	1.660	0.901	0.671	0.937	1.187	0.622	0.744	0.618	0.625	1.655
	t <sub>v</sub>	2.030	2.030	2.028	2.026	2.026	2.026	2.026	2.026	2.028	2.026	2.026	2.028

\*)  $A = \sqrt{(S^2_{vor} + S^2_{nach})/n}$ ,  $B = \left| \bar{x}_{vor} - \bar{x}_{nach} \right|$

Tab. 6: Berechnungsergebnisse zur Ermittlung des Transporteinflusses U<sub>U3</sub>

durch den Transport des Messgerätes zum Messort  $U_{U3}$  entstanden ist, gleich null angenommen.

In der Tabelle 4 sind die Auswertergebnisse der T3Dg-Messungen auf drei unterschiedlichen Belägen dargestellt, die unter Vergleichsbedingungen zur Bestimmung des Einflusses von Fahrbahnverschmutzungen auf die Genauigkeit der Messergebnisse erfasst wurden. Auf jedem Belag wurden an gleicher Stelle  $n = 30$  Wiederholungsmessungen vor und nach der Reinigung ihrer Oberflächen mittels eines Staubsaugers durchgeführt. Die in der Tabelle 4 dargestellten Messreihen mit dem Index „S“ entsprechen den Messungen nach der Oberflächenreinigung der Beläge (ohne Index „S“ = Messungen vor der Reinigung). Um der Einfluss von Fahrbahnverschmutzungen festzustellen, wurde das statistische Verfahren „Mittelwertvergleich“ eingesetzt. Dabei wurde die Nullhypothese auf Gleichheit zweier Erwartungswerte unter den Voraussetzungen, dass die Messwerte für jede Messreihe einzeln normalverteilt, die Varianzen nicht gleich und die Stichprobenumfänge gleich ( $n = n_1 = n_2$ ) sind, nach der Formel (29) geprüft. Die Ablehnung bzw. Nichtablehnung der Nullhypothese lässt die Unterschiede von Mittelwerten und dadurch den Einfluss von Fahrbahnverschmutzungen auf die Messunsicherheit feststellen und quantifizieren. Werden Unterschiede der Messungen vor und nach der Reinigung festgestellt, können die 95%-Vertrauensbereiche nach der Formel (30) für alle drei Beläge ermittelt und angegeben werden.

Die Ergebnisse der Ermittlung des Einflusses von Fahrbahnverschmutzungen sind in Tabelle 7 dargestellt. Um diese Ergebnisse nicht zu verfälschen, wurde bei normalverteilten Messwerten das Verfahren von GRUBBS durchgeführt (gilt für größere Stichprobenumfänge  $n \geq 30$  [27]). Mit diesem Verfahren wurde geprüft, ob der größte und der kleinste Messwert der Tabelle 4 für jede Messreihe einzeln als Ausreißer angesehen werden kann.

Ein großer Teil von den in der Tabelle 7 dargestellten Prüfquotienten  $t$  überschreitet die Signifikanzschanke. In Fällen, bei denen der Prüfquotient die Signifikanzschanke überschreitet, wird die Nullhypothese anhand der vorliegenden Messreihen auf dem 5%-Niveau abgelehnt und die Alternativhypothese vor  $\bar{x}_{\text{vor}} \neq \bar{x}_{\text{nach}}$  akzeptiert. Das bedeutet, dass ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten  $\bar{x}_{\text{vor}}$  und  $\bar{x}_{\text{nach}}$  derjenigen Texturkenngößen vorliegt, für die der Prüfquotient größer als die Signifikanzschanke ist.

Der Umstand, dass die Nullhypothese nicht für jede Texturkenngöße erfüllt wurde, weist darauf hin, dass die Texturkenngößen unterschiedlich auf die Fahrbahnverschmutzung reagieren. Ihre Sensibilität ist dabei vom Belag erkennbar abhängig (s. Tabelle 7). Für den offenporigen Belag OPA 4/8 sind z. B. die akustisch relevanten Texturkenngößen  $W_{\text{max}}$ ,  $g$ ,  $g_L$ ,  $GF_{5/95}$  und  $TD_{5/95}$ , im Vergleich zu den geometrisch relevanten Texturkenngößen  $MPD_i$ ,  $ETD_i$ ,  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{\text{max}}$  und  $TD1$  unempfindlicher. Für den dichten Belag AB 0/8 reagieren alle Texturkenngößen auf die Fahrbahnverschmutzungen gleich. Dies lässt sich durch die Strukturunterschiede erklären. Im Vergleich zu dem AB 0/8 (geschlossene Textur) bleiben beim offenporigen Asphalt 4/8 (offene Textur) nach der Reinigung die kleinen Steinchen nicht nur teilweise auf der Oberfläche, sondern auch zusätzlich zu einem großen Anteil in den Profilvertiefungen liegen. Die Beläge mit einer geschlossenen Textur lassen sich dementsprechend einwandfreier und zuverlässiger durch Absaugen reinigen als Beläge mit einer offenen Textur. Dadurch wird das Oberflächenprofil des Asphaltbetons 0/8 signifikanter als des offenporigen Asphalts 4/8 geändert. Dementsprechend nehmen die Werte der Texturkenngößen für den Asphaltbeton 0/8 nach der Reinigung zu und für den OPA 4/8 ab. Bemerkenswert ist dabei, dass die Kenngröße  $TD_{5/95}$  im Vergleich zu der ähnlichen Kenngröße  $TD1$  unverändert bleibt, was auch logischerweise der Physik der Texturkenngöße  $TD_{5/95}$  entspricht, welche zu den nicht texturrelevanten zufälligen Abweichungen im Rauheitsprofil unempfindlich sein soll (s. Kapitel 5.1.2.1).

Der dichte Belag SMA 0/3 hat auch die geschlossene Textur wie der AB 0/8, ist jedoch aufgrund seiner Zusammensetzung bzw. Korngröße wesentlich feiner (s. Bilder 2 und 3 der Anlage 4). Er besitzt dadurch im Rauheitsprofil kleinere Vertiefungen als der AB 0/8. Aus diesem Grund reagieren die Texturkenngößen des Splitt-Mastix-Asphaltes 0/3 auf die Oberflächensauberkeit weniger als die des Asphaltbetons 0/8. Hauptsächlich reagieren seine akustisch relevanten Texturkenngößen  $g$ ,  $GF_{5/95}$  und  $TD_{5/95}$  sensibler auf die Verschmutzung als seine Rauheitskenngößen  $MPD_i$ ,  $ETD_i$ ,  $R_a$  und  $R_{\text{max}}$ . Für den Asphaltbeton 0/8 reagieren die geometrisch und akustisch relevanten Texturkenngößen gleichartig sensibel.

Für die Praxis bedeutet dies, dass die zu messende Oberfläche unabhängig von der Belagsart während der Messungen sauber und frei von jeglichen Fremdkörpern sein muss.

Bezeichnung der Testfelder		Texturkenngrößen												
		Makrotextur												
		nach ISO 13473		nach ISO 4287 (λ = 100 mm)				oWLS		Material- anteilkurve		BAST-Bericht [3]		
		MPD <sub>i</sub>	ETD <sub>i</sub>	R <sub>a</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>max</sub>	TD1	A <sub>max</sub>	W <sub>max</sub>	g	gL	GF <sub>5/95</sub>	TD <sub>5/95</sub>	
<b>A1</b> OPA 4/8	$\bar{x}_{vor}$	1.235	1.188	0.743	4.252	5.097	4.345	0.381	12.5	80.3	1003.8	71.7	3.080	
	S <sub>vor</sub>	0.001	0.001	0.00048	0.006	0.012	0.005	0.00045	0.00	0.045	0.61	0.00	0.002	
<b>A1 (S)</b> OPA 4/8	$\bar{x}_{nach}$	1.229	1.183	0.744	4.242	5.074	4.335	0.380	12.5	80.3	1004,0	71.7	3.081	
	S <sub>nach</sub>	0.001	0.001	0.00047	0.004	0.009	0.004	0.00037	0.00	0.046	0.59	0.00	0.002	
	n	28.0	29.0	30.0	30.0	30.0	29.0	30.0	30.0	30.0	30.0	26.0	30.0	
	S <sub>vor</sub> <sup>2</sup>	0.000001	0.000001	0.0000002	0.000025	0.00014	0.00003	0.0000002	0.00	0.002	0.37	0.00	0.000004	
	S <sub>nach</sub> <sup>2</sup>	0.000001	0.000001	0.0000002	0.000016	0.00008	0.00002	0.0000001	0.00	0.002	0.35	0.00	0.000004	
	A*	0.00027	0.00026	0.00012	0.00117	0.00274	0.00119	0.00011	0.00	0.012	0.15	0.00	0.00052	
	B*	0.006	0.005	0.001	0.010	0.023	0.010	0.001	0.00	0.0	0.20	0.00	0.001	
	υ	27.0	28.0	29.0	29.0	29.0	28.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	25.0	29.0
	<b>t</b>	<b>22.45</b>	<b>19.04</b>	<b>8.15</b>	<b>8.554</b>	<b>8.398</b>	<b>8.410</b>	<b>9.402</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>1.291</b>	<b>0.000</b>	<b>1.936</b>	
	<b>t<sub>v</sub></b>	<b>2.052</b>	<b>2.048</b>	<b>2.045</b>	<b>2.045</b>	<b>2.045</b>	<b>2.048</b>	<b>2.045</b>	<b>2.045</b>	<b>2.045</b>	<b>2.045</b>	<b>2.060</b>	<b>2.045</b>	
<b>A4</b> AB 0/8	$\bar{x}_{vor}$	0.376	0.501	0.206	1.397	1.779	1.437	0.109	12.5	83.0	1038	72.1	0.935	
	S <sub>vor</sub>	0.002	0.002	0.0004	0.003	0.005	0.004	0.000	0.00	0.080	0.08	0.080	0.002	
<b>A4 (S)</b> AB 0/8	$\bar{x}_{nach}$	0.374	0.499	0.208	1.411	1.806	1.451	0.110	12.5	83.6	1046	72.6	0.944	
	S <sub>nach</sub>	0.001	0.001	0.000	0.003	0.003	0.003	0.0004	0.00	0.074	0.08	0.079	0.001	
	n	27.0	29.0	28.0	28.0	28.0	28.0	27.0	30.0	28.0	27.0	28.0	28.0	
	S <sub>vor</sub> <sup>2</sup>	0.000004	0.000004	0.0000002	0.00001	0.00003	0.00002	0.0000000	0.00	0.006	0.01	0.006	0.000002	
	S <sub>nach</sub> <sup>2</sup>	0.000001	0.000001	0.000000	0.00001	0.00001	0.00001	0.0000002	0.00	0.005	0.01	0.006	0.000001	
	A*	0.00043	0.00042	0.00008	0.00080	0.00110	0.00094	0.00008	0.00	0.021	0.02	0.021	0.00035	
	B*	0.002	0.002	0.002	0.014	0.027	0.014	0.001	0.00	0.6	8.0	0.5	0.009	
	υ	26.0	28.0	27.0	27.0	27.0	27.0	26.0	29.0	27.0	26.0	27.0	27.0	
	<b>t</b>	<b>4.648</b>	<b>4.817</b>	<b>26.46</b>	<b>17.46</b>	<b>24.50</b>	<b>14.82</b>	<b>12.99</b>	<b>0.000</b>	<b>29.13</b>	<b>358.4</b>	<b>23.50</b>	<b>25.60</b>	
	<b>t<sub>v</sub></b>	<b>2.056</b>	<b>2.048</b>	<b>2.052</b>	<b>2.052</b>	<b>2.052</b>	<b>2.052</b>	<b>2.056</b>	<b>2.045</b>	<b>2.052</b>	<b>2.056</b>	<b>2.052</b>	<b>2.052</b>	
<b>A5</b> SMA 0/3	$\bar{x}_{vor}$	0.312	0.450	0.124	0.852	1.015	0.893	0.066	5.6	69.9	390	61.5	0.548	
	S <sub>vor</sub>	0.0011	0.0009	0.000	0.002	0.005	0.002	0.0007	0.63	0.189	44	0.092	0.0011	
<b>A5 (S)</b> SMA 0/3	$\bar{x}_{nach}$	0.312	0.450	0.124	0.854	1.015	0.895	0.066	5.3	70.3	375	61.9	0.550	
	S <sub>nach</sub>	0.0010	0.0008	0.0005	0.002	0.004	0.002	0.0006	0.56	0.197	40	0.117	0.0011	
	n	29.0	29.0	26.0	29.0	29.0	29.0	29.0	30.0	29.0	30.0	28.0	28.0	
	S <sub>vor</sub> <sup>2</sup>	0.000001	0.000001	0.000000	0.000004	0.00003	0.000004	0.0000005	0.397	0.036	1936	0.008	0.000001	
	S <sub>nach</sub> <sup>2</sup>	0.000001	0.000001	0.000003	0.000004	0.00002	0.000004	0.000004	0.314	0.039	1600	0.014	0.000001	
	A*	0.00028	0.00022	0.0001	0.00053	0.00119	0.00053	0.00017	0.154	0.051	10.9	0.028	0.00029	
	B*	0.00000	0.00000	0.0000	0.002	0.00000	0.002	0.00000	0.300	0.400	15.0	0.400	0.002	
	υ	28.0	28.0	25.0	28.0	28.0	28.0	28.0	29.0	28.0	29.0	27.0	27.0	
	<b>t</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>3.808</b>	<b>0.000</b>	<b>3.808</b>	<b>0.000</b>	<b>1.949</b>	<b>7.890</b>	<b>1.382</b>	<b>14.22</b>	<b>6.803</b>	
	<b>t<sub>v</sub></b>	<b>2.048</b>	<b>2.048</b>	<b>2.060</b>	<b>2.048</b>	<b>2.048</b>	<b>2.048</b>	<b>2.048</b>	<b>2.045</b>	<b>2.048</b>	<b>2.045</b>	<b>2.052</b>	<b>2.052</b>	

\*)  $A = \sqrt{(S_{vor}^2 + S_{nach}^2) / n}$ ,  $B = \left| \begin{matrix} - & - \\ x_{vor} & - x_{nach} \end{matrix} \right|$

Tab. 7: Ermittlung des Einflusses von Fahrbahnverschmutzungen U<sub>U2</sub>

Die festgestellten Unterschiede weisen darauf hin, dass die Fahrbahnverschmutzung die Genauigkeit der Messergebnisse beeinflussen und bei der Ermittlung der Messunsicherheit berücksichtigt werden müssen. Der Unsicherheitsbeitrag, der durch die Fahrbahnverschmutzung  $U_{U2}$  entsteht, kann aus diesem Grund, in Bezug auf die ermittelten Differenzen zwischen den Stichprobenmittelwerten  $B^*$  (s. Tabelle 7), für die Rauheitskenngrößen aus dem Intervall von 0 bzw. 0,001 mm bis 0,027 mm und für die akustisch relevanten Texturkenngrößen, wie Gestaltfaktoren  $g$  und  $GF_{5/95}$ , aus dem Intervall von 0 bzw. 0,4 % bis 0,6 % angenommen werden.

In der Tabelle 1 der Anlage 7 sind die Ergebnisse zur Ermittlung der Messbedienereinflüsse  $U_B$  und der Einflüsse des Messobjektes  $U_O$  bzw. der Inhomogenität der Messoberfläche  $U_{hom}$  (s. auch Anlage 6) auf die Wiederholgenauigkeit der Texturmessungen bzw. auf die Reproduzierbarkeit der Texturkenngrößen dargestellt.

Die Ermittlung der Unsicherheitsbeiträge wurde unter Vergleichsbedingungen für sieben unterschiedliche Beläge durchgeführt. Auf jedem Belag wurden die Texturmessungen alle 0,5 m von zwei Messbedienern MB1 und MB2 in Fahrtrichtung lückenlos ausgeführt, um die Oberflächeneigenschaften des Gesamtbelages (Inhomogenität) repräsentativ zu erfassen.

Unter Annahme der Normalverteilung von Messwerten und nichtgleicher Varianzen wurde die Nullhypothese eingesetzt (s. Formel (29)), um mittels des Vergleiches von Mittelwerten die Unterschiede der Messungen von zwei Messbedienern festzustellen.

Die Unterschiede der Inhomogenität der Beläge können dabei für jeden Belag mittels des Mittelwertes von Standardabweichungen  $S_{1j}$  und  $S_{2j}$  bezogen auf eine bestimmte Texturkenngröße quantitativ beschrieben werden.

Vor dem Einsatz der Nullhypothese wurden alle Messreihen der Anlage 7 auf Ausreißer geprüft und für jeden Belag einzeln auf gleiche Anzahl der Messungen  $n$  gebracht. Für praktische Zwecke wurden die t-Test-Schranken  $t_{v;\alpha;zweis.}$  durch die Schranke der Standardnormalvariable  $Z_{\alpha;zweis.} = 1,96$  ersetzt. Grundsätzlich hängt  $t_{v;\alpha;zweis.}$  vom gewünschten Vertrauensniveau ab: Je sicherer man sein möchte, dass der Vertrauensbereich den „wahren“ Wert für

enthält, desto breiter muss der Bereich sein, d. h., desto größer ist  $t_{v;\alpha;zweis.}$  [30].

Da die in der Tabelle 1 der Anlage 7 ermittelten Prüfquotienten  $t$  kleiner als die Signifikanzschranke  $Z_{\alpha;zweis.}$  sind, kann nicht die Nullhypothese für jede Texturkenngröße abgelehnt werden. Dies weist darauf hin, dass kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten aller Texturkenngrößen  $\bar{X}_{1j}$  und  $\bar{X}_{2j}$  vorliegt. Diese insignifikanten Unterschiede sind damit ein Hinweis darauf, dass die Messbediener die Genauigkeit der Messergebnisse nicht beeinflusst haben. Unter der Voraussetzung, dass lediglich angewiesenes Personal die Messungen ausführen darf, wird deshalb der Unsicherheitsbeitrag, der von Messbedienern  $U_B$  entstanden ist, gleich null angenommen.

Der Unsicherheitsbeitrag  $U_O$  bzw.  $U_{hom}$ , der durch Einflüsse des Messobjektes, wie z. B. die Ausprägung der Fahrbahnstruktur, die Farbe, der Reflexionsgrad und die Inhomogenität der Messoberflächen verursacht wird, wird für die weiteren Berechnungen der Messunsicherheit des T3Dg aus der Anlage 7 als Mittelwert der Standardabweichungen  $S_{1j}$  und  $S_{2j}$  bezogen auf eine bestimmte Kenngröße bestimmt.

In der Tabelle 1 der Anlage 8 sind die Ergebnisse der Ermittlung der weiteren Umgebungseinflüsse  $U_U$ , wie z. B. die Temperatur  $U_{U1}$ , zusammengestellt, die sich nach der statistischen Bearbeitung von Eingangsgrößen inkl. Ausreißertest ergaben. Als Eingangsgrößen für die Bestimmung des Unsicherheitsbeitrages der Temperatur  $U_{U1}$  dienten die ausgewerteten Texturkenngrößen von vier Messreihen, deren Messwerte auf dem Testfeld A4 erfasst wurden. Jede Messreihe bestand aus  $n = 30$  Wiederholungsmessungen, die unter Vergleichsbedingungen an gleicher Stelle des Messfeldes A4 durchgeführt wurden. Vor der ersten Messreihe wurde die Oberfläche an dieser Stelle mittels eines Staubsaugers gereinigt. Nach der ersten, zweiten und dritten Messreihe wurde jeweils eine Pause von 2 Stunden gemacht. Das Messgerät wurde dabei im Betriebszustand die ganze Zeit an der Messposition gehalten, also auch in den Pausen zwischen den Messreihen.

Aufgrund der erzielten Ergebnisse des varianzanalytischen Vergleichs zweier Erwartungswerte, der zur quantitativen Untersuchung von Einflussgrößen auf Versuchsergebnisse dient, wurde festgestellt (s. Anlage 8), dass die Mittelwerte  $\bar{X}$  mit statistischer Sicherheit von 95 % gleich sind und die Un-

sicherheitsbeiträge, die aufgrund der Temperatureinflüsse entstehen, unwesentlich sind, weshalb sie bei der Berechnung der Messunsicherheit der Makrotexturaufnahmen mit dem T3Dg nicht berücksichtigt werden müssen. Beim Vergleich der ersten  $\bar{X}_1$ - und der letzten  $\bar{X}_4$ -Messreihen wurde z. B. für die beiden akustisch relevanten Texturkenngrößen Gestaltfaktor  $g$  und Gestaltlänge  $g_L$  ein statistischer Unterschied festgestellt, der 0,06 % für den Gestaltfaktor und 0,9 mm für die Gestaltlänge beträgt. Für die praktische Anwendung hat dieser Unterschied aufgrund seiner unwesentlichen Größe keine Bedeutung und muss nicht berücksichtigt werden. Nur die Rauheitskenngrößen  $R_z$ ,  $R_{max}$  und  $TD1$  reagieren sensibel auf die Temperatureinflüsse. Diese Einflüsse müssen bei der Berechnung der erweiterten Messunsicherheit in einer dem Intervall von 0,002 mm bis 0,014 mm entsprechender Höhe einkalkuliert werden (s. letzten Differenzbeitrag  $B^*$  in der Anlage 8).

An dieser Stelle kann aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse die erweiterte Messunsicherheit  $U_E$  wie folgt ermittelt werden:

$$\begin{aligned} U_E &= 2 * \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2} \\ &= 2 * \sqrt{U_{hom}^2 + U_{U1}^2 + U_{U2}^2} \\ &= 2 * \sqrt{0,7^2 + 0,06^2 + 0,6^2} = 1,84 \approx 2 \end{aligned} \quad (31)$$

$$g = \bar{g} \pm U_E = 83 \pm 2 \quad (32)$$

Hierbei wurden zunächst nach der Gleichung (20) für  $n < 20$  die bereits bekannten und in der Tabelle 7 sowie in der Anlage 7 und in der Anlage 8 dargestellten Unsicherheitsbeiträge  $U_i$ , die entweder in der Form von Differenzbeiträgen  $B^*$  (s. Tabelle 7 und Anlage 8) oder in der Form von Standardabweichungen  $S_{1j}$ ,  $S_{1j}$  (s. Anlage 7) quantitativ ermittelt wurden, in die Standardmessunsicherheiten der Einzelkomponenten (Einflussgrößen) umgerechnet und danach von Einzelkomponenten zur kombinierten Standardmessunsicherheit  $U_c$  zusammengefasst. Ein auf diese Weise ermitteltes Ergebnis wird Messunsicherheitsbudget genannt. Zum Schluss wurde nach der Gleichung (21) die erweiterte Messunsicherheit beim Messen des Asphaltbetons 0/8 bezogen auf den Gestaltfaktor  $g$  errechnet. Die erweiterte Messunsicherheit für die weiteren Tex-

turkenngrößen ist in der Anlage 9 dargestellt und für die nachfolgende Analyse in der Tabelle 8 zusammengestellt.

## 7 Untersuchung der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen

Die ermittelten Werte der erweiterten Messunsicherheit ändern sich laut Tabelle 8 für die geometrisch relevante Texturkenngrößen wie  $MPD_i$ ,  $ETD_i$ ,  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $TD1$ ,  $TD_{5/95}$  und einschließlich  $A_{max}$  im Intervall von 0,006 mm bis 0,456 mm sowie für die Gruppe der akustisch relevanten Texturkenngrößen ( $g$  und  $GF_{5/95}$ ) im Intervall von 0,6 % bis 9 %. Es ist wichtig, an dieser Stelle zu betonen, dass die Unsicherheitskomponenten  $U_{\Delta Z}$  und  $U_{hom}$  in diesen Intervallen die zwei Hauptquellen der Messunsicherheit sind. Der Anteil der Messunsicherheitskomponente  $U_{\Delta Z}$  beträgt dabei 0,066 mm. Dies bedeutet, dass mit dem T3Dg systematisch um bis zu 0,066 mm zu groß gemessen wird. Da dieser Wert als bekannte systematische Messabweichung durch die technische Verbesserung des Messgerätes verringert werden kann und die Unsicherheitskomponente  $U_u$  im Messunsicherheitsbudget als Einflussgröße unwesentlich ist, ist der Unsicherheitsbeitrag  $U_{hom}$  die wichtigste Messunsicherheitsquelle. Die höchsten Werte der Messunsicherheitsintervalle von geometrisch relevanten Texturkenngrößen sind nach der Tabelle 8 den Rauheitskenngrößen  $R_{max}$  und  $R_z$  zuzuordnen. Obwohl sie sensibel auf die Fahrbahnverschmutzungen reagieren, werden diese zwei Texturkenngrößen in weiteren Untersuchungen nicht berücksichtigt, da sie aufgrund ihrer Physik die extremalen Werte des Rauheitsprofils und die Oberflächeneigenschaften beschreiben, die eine mangelnde Messunsicherheit besitzen und dadurch nicht aussagefähig bzw. klassifizierungskräftig sind. Zudem ist der  $R_z$ -Wert dem  $MPD_i$ - bzw.  $ETD_i$ -Wert ähnlich, aber Letztere weisen eine viel geringere Messunsicherheit auf. Der  $TD1$ -Wert ist dem  $TD_{5/95}$ -Wert ähnlich, reagiert aber auf die zufälligen Abweichungen im Rauheitsprofil, wie z. B. kleine Steine oder ein Loch in der Fahrbahnoberfläche, sensibler als  $TD_{5/95}$  und ist dadurch weniger robust bzw. klassifizierungskräftig. Die Gestaltlänge  $g_L$  ist gegenüber Profilunvollkommenheiten empfindlich, nimmt aber als zusammengesetzte Kenngröße ( $g$  und  $W_{max}$ ) extrem hohe Werte für Beläge wie z. B. B2, B11 an

Texturkenngrößen	Messunsicherheitsintervalle (alle Beläge)				Messunsicherheitsintervalle (außer B2 und B11)			
	min. Wert	Testfeld	max. Wert	Testfeld	min. Wert	Testfeld	max. Wert	Testfeld
MPD <sub>i</sub>	0,068	B2	0,184	B11	0,068	A5	0,100	A1
ETD <sub>i</sub>	0,067	B2	0,153	B11	0,067	A5	0,090	A1
R <sub>a</sub>	0,066	B2	0,133	B11	0,066	A5	0,088	A7
R <sub>z</sub>	0,080	B2	0,350	A7	0,080	A5	0,350	A7
R <sub>max</sub>	0,093	B2	0,456	A7	0,093	A5	0,456	A7
TD1	0,082	B2	0,354	A7	0,082	A5	0,354	A7
A <sub>max</sub>	0,006	B2	0,044	B11	0,006	A5	0,034	A7
W <sub>max</sub>	0,0	A1	35,6	B2	0,0	A1	1,34	A5
g	0,7	A1	9,0	B11	0,7	A1	3,2	A7
gL	10,0	A1	2194,0	B2	10,0	A1	85,0	A5
GF <sub>5/95</sub>	0,6	A1	8,2	B11	0,6	A1	3,0	A7
TD <sub>5/95</sub>	0,072	B2	0,352	B11	0,121	GA6	0,195	A1
V <sub>z0</sub>	0,074	A1	7,9	B11	0,074	A1	1,280	GA6

Tab. 8: Zusammenstellung der für alle Beläge ermittelten Werte der erweiterten Messunsicherheit

(s. Tabelle 8) und ist aus diesem Grund weniger klassifizierungsfreundlich als z. B. die beiden Gestaltfaktoren g und GF<sub>5/95</sub>. Unter den verbliebenen Texturkenngrößen fehlt aber ein Kennwert, der die Oberflächenhomogenität bzw. Gleichmäßigkeit von Oberflächenprofilen beschreibt. Eine Texturkenngröße, die auf die Änderung der Gleichmäßigkeit von Straßenoberflächenprofilen reagiert, wurde im Rahmen der oben durchgeführten Untersuchungen der Messunsicherheit von BAST-Texturmessgeräten entwickelt. Es handelt sich dabei um die Kenngröße V<sub>z0</sub>. Sie ist in der Tabelle 8 dargestellt und wird nachfolgend beschrieben. Mathematisch beschreibt sie die Streuung der Profilorinate Z<sub>5/95</sub> bei der flächenhaften Berechnung des Gestaltfaktors GF<sub>5/95</sub> aus den zu generierenden Oberflächenprofilen, die alle 0,4 mm gebildet werden (s. Kapitel 5.1.2.1). Je stärker sich die Profile der gemessenen Oberfläche unterscheiden, desto höher sind die Streuungen der Profilorinate Z<sub>5/95</sub> und der Koeffizient V<sub>z0</sub>. Dies bedeutet also, dass, mit steigendem Kennwert V<sub>z0</sub>, die Inhomogenität der gemessenen Oberfläche und damit die Anregung der Reifen durch die Oberflächentextur in der Aufstandsfläche zunehmen. Umgekehrt gilt, dass, je kleiner der Kennwert V<sub>z0</sub> ist, desto schwächer die Anregung der Reifen ist und desto „leiser“ die Fahrbahnoberfläche ist. Diese logischen Schlussfolgerungen werden grafisch bestätigt. Bild 14 zeigt, dass die Er-

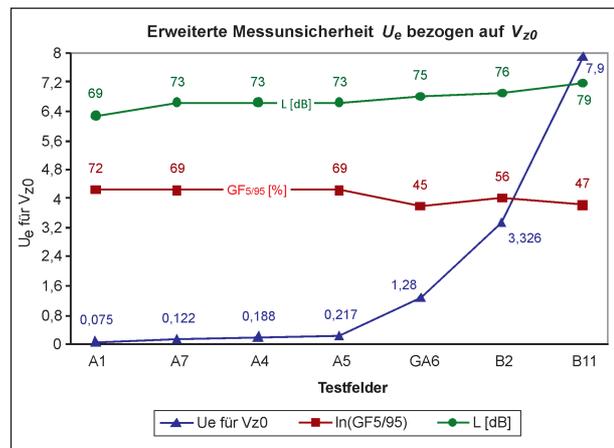


Bild 14: Erweiterte Messunsicherheit für Beläge mit unterschiedlicher Oberflächenhomogenität

höhung der Oberflächeninhomogenität zur Erhöhung der Messunsicherheit der Texturmessungen führt. Die Ausnahme ist der Belag des Messfeldes GA6, der aus dieser logischen Reihe ausfällt. Obwohl der Gestaltfaktor GF<sub>5/95</sub> bzw. g der kleinste ist, ist der zugehörige V<sub>z0</sub>-Wert nur der drittkleinste.

Durch die Untersuchungen konnte aufgezeigt werden, dass die Texturkenngrößen MPD<sub>i</sub> bzw. ETD<sub>i</sub>, A<sub>max</sub>, g bzw. GF<sub>5/95</sub> und V<sub>z0</sub> die wichtigsten geometrischen und akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen beschreiben und aufgrund ihrer Aussagefähigkeit zur Klassifizierung von

Belagsgruppe (Testfeld)	Texturkenngrößen				Vorbeirollpegel, Mittelwert [29]
	$V_{z0}$ [-]	$GF_{5/95}$ [%]	$A_{max}$ [mm]	$ETD_i$ [mm]	$\bar{L}$ [dB]
Offenporigere Beläge (A1)	< 0,85	> 72	0,40 - 0,30	> 0,90	69,0 (67,0-71,0)
Dichte Beläge (A4, A5, A7)	0,85 - 2,50	74 - 60	0,30 - 0,05	0,90 - 0,35	73,0 (68,5-77,0)
Geschliffene Beläge (B2)	2,50 - 16,0	60 - 52	0,05 - 0,02	0,35 - 0,20	76,0 (72,5-79,0)
Grobabgestreute Beläge (B11)	> 16,0	55 - 40	> 0,35	> 1,5	79,0 (76,0-81,5)
Sondergruppe (Beläge wie GA6)	< 3,0	< 45	> 0,06	0,6 - 0,4	75,0 (73,0-77,5)

\*) Bei der Gruppeneinteilung wurden alle Messwerte berücksichtigt bzw. als Nichtausreißer betrachtet

Tab. 9: Aufteilung von Straßenbelägen mittels der Texturkenngrößen\*)

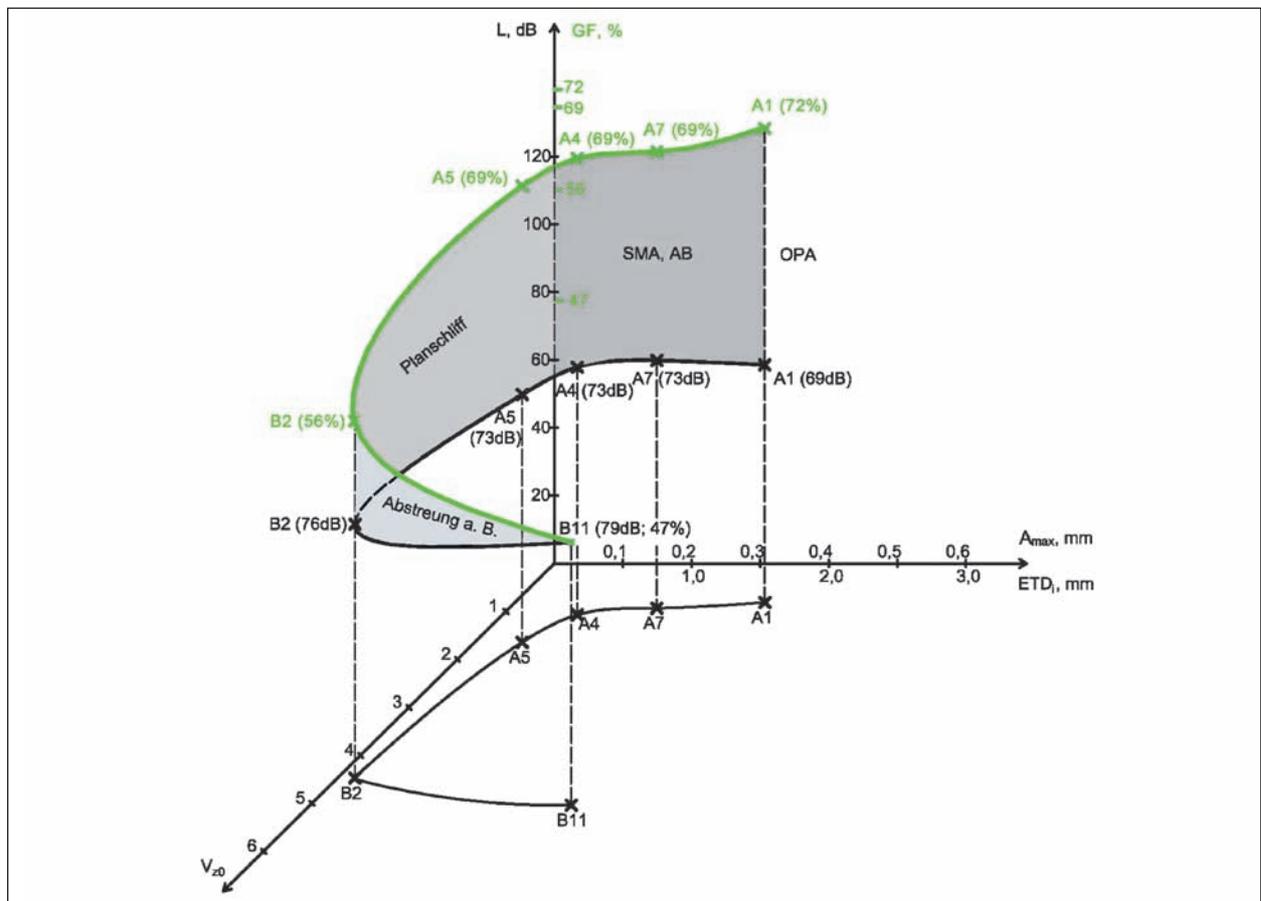


Bild 15: Zusammenhänge der wichtigsten Oberflächeneigenschaften bezogen auf die geometrisch und akustisch relevanten Texturkenngrößen:  $ETD_i$  – geschätzte Texturtiefe in mm,  $A_{max}$  – maximale spektrale Rauheitstiefe in mm,  $GF_{5/95}$  – bewährter Gestaltfaktor in %,  $V_{z0}$  – Oberflächenprofilgleichmäßigkeitskoeffizient,  $\bar{L}$  – Mittelwert des Vorbeirollpegels für Pkw-Reifen bei 80 km/h in dB [29]

Straßenbelägen herangezogen werden können. Die Zusammenhänge dieser wichtigsten Oberflächeneigenschaften sind im Bild 15 nach der Verknüpfung mit Reifen-Fahrbahn-Geräuschen, die für alle Testfelder des Versuchsgeländes nach der

Methode der kontrollierten Vorbeifahrt gemessen wurden [29], grafisch dargestellt und erlauben, alle gemessenen Beläge in vier Haupt- und eine Sondergruppe aufzuteilen (s. Tabelle 9).

Die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen erzielten Erkenntnisse, die in den Bildern 14 und 15 sowie in der Tabelle 9 dargestellt sind, können für die praktischen Zwecke bei der Bewertung der gemessenen Fahrbahnoberflächen eingesetzt werden, um einen ersten Einblick in die akustischen Eigenschaften aufgrund von Texturmessungen zu erhalten. Der theoretisch mögliche Vorbeiröllpegel, der z. B. aus dem Bild 14 oder 15 mittels des  $V_{20}$ -Wertes abgeschätzt werden kann, ist dabei ein Maß für die akustischen Eigenschaften. Eine weitere Möglichkeit ist die gleichzeitige Erfassung der Textur und der Reifen-Fahrbahn-Geräusche unmittelbar am hinteren Rad des Messfahrzeuges. Diese Methode, die sich durch die internationalen Erfahrungen bewährt hat (s. Kapitel 4.4), kann die Erfassung und die Bewertung der akustisch und geometrisch relevanten Textureigenschaften von Fahrbahnbelägen wirtschaftlich optimieren.

## 8 Zusammenfassung

Die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens gestellten Ziele sind aus wissenschaftlicher und praktischer Sicht erreicht. Es wurde dabei folgende Ergebnisse festgestellt:

### Erweiterung der Auswerteprogramme, evtl. Definition weiterer Texturkenngrößen

1) Aus der Vielzahl verschiedener Oberflächenkenngrößen wurden folgende geometrisch und akustisch relevante Kenngrößen zur Bestimmung der Messunsicherheit von BAST-Texturmessgeräten und zur Untersuchung der Klassifizierungsmöglichkeit von Straßenoberflächentexturen ausgewählt:

- $g$  – Gestaltfaktor: Der Gestaltfaktor  $g$  ist eine akustisch relevante Kenngröße, die die Rauheit von Straßenoberflächen berücksichtigt und ein Maß für die Texturgestalt ist.
  - $gL$  – Gestaltlänge: Die Gestaltlänge  $gL$  ist eine weitere akustisch relevante Texturkenngröße, die zu den so genannten zusammengesetzten Kenngrößen gehört. Sie ist ein Maß für die Abhängigkeit der Geräuschentstehung von der Profilform und von Profilvergleichmäßigkeiten einer Fahrbahnoberfläche.
  - $A_{\max}$  – maximale Amplitude des Wellenlängenspektrums.
  - $W_{\max}$  – dem  $A_{\max}$ -Wert entsprechende Wellenlänge.
  - $GF_{5/95}$  – bewährter Gestaltfaktor und  $TD_{5/95}$  – bewährte Texturprofilltiefe: Der Gestaltfaktor  $GF_{5/95}$  und die Texturtiefe  $TD_{5/95}$  sind weitere geometrisch und akustisch relevante Texturkenngrößen, die unempfindlich bezüglich der nicht texturrelevanten zufälligen Abweichungen im Rauheitsprofil, wie z. B. kleine Steine oder ein Loch in der Fahrbahnoberfläche, sind.
  - MPD – mittlere Profilltiefe und ETD – geschätzte Texturtiefe: Die mittlere Profilltiefe MPD (Mean Profile Depth) und die geschätzte Texturtiefe ETD (Estimated Texture Depth) sind die bedeutendsten geometrisch relevanten Texturkenngrößen, die mit dem ISO-Standard 13473 für die Beurteilung von Straßenoberflächeneigenschaften eingeführt wurden.
- 2) Zur flächenhaften Berechnung der in die BATex-Auswerteprogramme umgesetzten Texturkenngrößen wurden die Grenzwellenlängen für das Filterverfahren der Texturdaten sowie für die Berechnung und Darstellung des Wellenlängenspektrums und des Spektrums der Texturdaten (DFT) ermittelt. Es wurde dabei gezeigt, dass alle, mit Ausnahme der aus dem Wellenlängen- und DFT-Spektrum abgeleiteten, geometrisch und akustisch relevanten Texturkenngrößen aus einem gefilterten Ist-Profil berechnet werden müssen. Das gefilterte Ist-Profil soll in fünf gleiche Bezugsabschnitte bzw. Einzelmessabschnitte  $L_r$  unterteilt werden. Die obere Filtergrenzwellenlänge  $L_o$  und die Länge des Einzelmessabschnittes  $L_r$  sind dabei stets gleich lang zu wählen. Ihre Zuordnung und die Größe der unteren Filtergrenzwellenlänge sind in dem ISO-Standard 13473 verbindlich festgelegt und im Rahmen der BATex-Auswerteprogramme nach diesem Grundprinzip umgesetzt.
- 3) Es wurde gezeigt, dass für die quantitative Abschätzung der Grenzwellenlängen die Länge von Auswerteprofilen bekannt werden muss. Idealerweise wird nach ISO 13473-1 empfohlen, Messungen und Auswertungen entlang der gesamten Versuchsstrecke kontinuierlich durchzuführen. Um den Aufwand zu reduzieren, kann in der praktischen Anwendung jedoch davon abgewichen werden. Dazu wurde eine minimale zulässige Mess- und Auswertelänge festgelegt,

die einem 1,0 m langen Profil entspricht. Dieses muss dabei aus 10 gleichmäßig verteilten Profilen bestehen, die alle 100 m gemessen werden. Für Oberflächen mit periodischen Texturen muss zusätzlich die gesamte Profillänge mindestens 10 Perioden der Textur umfassen.

Bei inhomogenen Oberflächen wird in der ISO-13473 von den Ausführenden der Messungen verlangt, die Mindestzahl der Messungen selbst zu bestimmen. Die Anzahl der Messungen muss dabei ausreichend sein, um solche Oberflächen möglichst genauer zu beschreiben.

In Übereinstimmung mit den o. g. Mindestanforderungen und unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten der BAST-Texturmessgeräte wurden für die Bestimmung aussagekräftiger und vertrauenswürdiger Texturkenngößen folgende Längen der Auswertprofile festgelegt:

- statisches Laserprofilometer TL-5 – ein Auswertprofil von 5.303 mm Länge, das der kompletten Messlänge des Profilometers entspricht und damit 40.174 Werte mit dem Abstand von 0,132 mm enthält,
- mobiles Laserprofilometer TMF – ein Profil von 4.096 mm Länge (8.192 Messwerte, Messwertenabstand 0,5 mm). Im Bezug auf dieses Profil wird im BATex-Auswertprogramm jede gemessene Strecke komplett und kontinuierlich ausgewertet,
- 3D-Messsystem T3D (kleines und großes Messfeld) – Auswertprofile von 50 mm und 500 mm Länge, die aus den gemessenen Oberflächen von 1.294 x 1.024 Messwerten gebildet werden. Der Messwertenabstand von 0,038 mm und 0,384 mm entspricht dabei der horizontalen Auflösung der Messgeräte.

#### **Untersuchungen der Reproduzierbarkeit von Texturmessungen (wann ist ein Messergebnis für eine ermittelte Texturkenngöße repräsentativ?) und zur Verifizierung der Messgenauigkeit der Texturmessgeräte**

Zur Abklärung dieser Fragestellung wurde ein Untersuchungsprogramm bestehend aus drei Teilen erarbeitet. Hierbei wurden die Texturmessungen auf den folgenden 9 Testfeldern durchgeführt: A1 (1-lagiger offenporiger Asphalt 4/8), A4 (Asphaltbeton 0/8 ISO), A5 (Splitt-Mastix-Asphalt 0/3), A7

(Splitt-Mastix-Asphalt 0/8 abgestreut mit Sand 1/3), B2 (Planschliff der Betonunterlage), B11 (Beton mit Kunstharzbeschichtung und Abstreuerung 3/5 rundkörnig), B15 (Beton mit Kunstharzbeschichtung und Abstreuerung 1/3 scharfkantig), B17 (1-lagiger offenporiger Beton) und GA6 (Gussasphalt 0/11 mit Abstreuerung Quarzporphyr 1/3).

#### 1) Ermittlung der Mindestzahl der Messungen:

Für die praktische Anwendung wurde aufgrund der Ergebnisse der statistischen Untersuchungen festgelegt, dass eine Wiederholung in jeder Messposition und vier Wiederholungen je 20 m auf dem Gesamtbelag für die vertrauenswürdigen Ergebnisse der T3Dg-Messungen durchgeführt werden müssen. Die Wiederholpräzision der Texturmessungen ist dabei die Streuung um den „wahren“ Wert  $S_n$ . Der Vertrauensbereich  $W$  bzw.  $d(k_{vor})$  charakterisiert die Reproduzierbarkeit der Messungen bzw. die Reproduzierbarkeit der Texturkenngößen, die mit statistischer Sicherheit von 95 % die 10- bis 12%ige Grenze der Wiederholgenauigkeit (mit Ausnahme für die Planschliffdeckschicht) nicht überschreiten.

Im ersten Teil des Untersuchungsprogramms wurde unter Wiederholbedingungen die Mindestzahl der Messungen ermittelt und dadurch festgestellt, wann eine Texturkenngöße repräsentativ ist. Um z. B. die reproduzierbaren Messwerte von geometrisch relevanten Texturkenngößen mit statistischer Sicherheit von 95 % auf die Genauigkeit bis zu 10 % des „wahren“ Wertes zu erreichen, sind beim Messen von offenporigen, dichten und abgestreuten Belägen in kompletter Länge mindestens drei Wiederholungen pro 20 m erforderlich. Auf den stark inhomogenen Fahrbahnoberflächen, wie z. B. dem Belag des Testfeldes B2 „Planschliff“, sind im Vergleich dazu vier Wiederholungsmessungen notwendig. Die Reproduzierbarkeit der akustisch relevanten Texturkenngößen bei gleicher Mindestzahl der Wiederholungsmessungen entspricht dabei der Genauigkeit von 15 % auf den Testfeldern A1, A4, A5, A7, GA6 und 23 % für das Testfeld „Planschliff“. Die reproduzierbaren Messwerte im Bereich der geforderten Genauigkeit von 10 % können für die offenporigen und dichten Beläge ab 5 Wiederholungen, für Beläge mit Abstreuerung ab 7 und für die Planschliffdeckschicht sogar erst ab 17 Wiederholungen gewährleistet werden. Die beste Reproduzierbarkeit auf allen Belägen wiesen bei

den akustisch relevanten Texturkenngrößen der Gestaltfaktor  $GF_{5/95}$  und bei geometrisch relevanten Texturkenngrößen die geschätzte Texturtiefe  $ETD_i$  auf.

## 2) Ermittlung der Unsicherheitsbeiträge der Messunsicherheit:

In diesem Teil des Untersuchungsprogramms wurde gezeigt, dass es verschiedene Normen und Richtlinien gibt, die die Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit enthalten. Sie stammen überwiegend aus dem Bereich des Maschinenbaus und sind im Straßenbau nicht genormt und somit nicht zu 100 % realisierbar, da die Straßenoberflächen als Prüfobjekte unterschiedlichste Profilhöhen sowie verschiedenste Materialien aufweisen und keine genormten Toleranzgrenzen der Rauheitsstrukturen besitzen. Zudem werden spezielle Normale bzw. Raunormale benötigt. Aus diesem Grund sind in ISO 13473-3 hohe Anforderungen an die technischen Daten der Fahrbahnbelagetechnik festgelegt. Um einen ersten Einblick zu gewinnen, ob das optische T3Dg-Messsystem der BASt für die Messung von Straßenoberflächentexturen geeignet ist, wurde die Prüfung der Messgerätefähigkeit in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst wurde, wie in ISO 13473-3 verlangt, die Auflösung des Messgerätes geprüft, danach, wie in der Industrie gefordert, die Streuung des Messgerätes anhand der Messung eines Stufennormals ermittelt und abschließend das ermittelte Ergebnis mit einem vom Messgerätehersteller vorgegebenen Grenzwert der Messgenauigkeit verifiziert.

Im zweiten Teil des Programms wurden unter Vergleichsbedingungen die wichtigsten Unsicherheitsbeiträge ermittelt. Durch ihre Bestimmung wurde geklärt, ob das Messgerät nach dem Transport zum Messort vor Beginn der Messungen nochmals vor Ort kalibriert werden muss und inwieweit die Inhomogenität der zu messenden Oberfläche, die Temperatur, die Fahrbahnverschmutzung und der Messbediener die Genauigkeit der Messergebnisse beeinflussen. Dabei wurden die Standardmessunsicherheiten für die wichtigsten Texturkenngrößen nach Gleichungen (21) und (22) quantitativ bestimmt.

Ergebnis der Untersuchungen war, dass der Transport die Genauigkeit der Messergebnisse

nicht beeinflusst hat. Die Einflüsse der Messbediener wurden auch als unwesentlich festgestellt. Die Unsicherheitsbeiträge, die durch die Temperatureinflüsse entstehen, wurden für zwei akustisch relevante Texturkenngrößen Gestaltfaktor  $g$  und Gestaltlänge  $gL$  in Höhe von 0,06 % für den Gestaltfaktor und 0,9 mm für die Gestaltlänge festgestellt. In der Praxis haben diese Unterschiede aufgrund ihrer unwesentlichen Größe keine Bedeutung und wurden daher nicht berücksichtigt. Lediglich die Rauheitskenngrößen  $R_z$ ,  $R_{max}$  und  $TD1$  haben auf die Temperatureinflüsse sensibel reagiert. Diese Einflüsse wurden bei der Berechnung der erweiterten Messunsicherheit in einer dem Intervall von 0,002 mm bis 0,014 mm entsprechender Höhe einkalkuliert. Es wurde auch festgestellt, dass die Texturkenngrößen unterschiedlich auf die Fahrbahnverschmutzung reagieren. Ihre Sensibilität war dabei vom Belag erkennbar abhängig. Bei dem offenporigen Belag OPA 4/8 waren die akustisch relevanten Texturkenngrößen  $W_{max}$ ,  $g$ ,  $gL$ ,  $GF_{5/95}$ , und  $TD_{5/95}$  im Vergleich zu den geometrisch relevanten Texturkenngrößen  $MPD_i$ ,  $ETD_i$ ,  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  und  $TD1$  unempfindlicher. Bei dem dichten Belag AB 0/8 haben dagegen alle Texturkenngrößen gleich auf die Fahrbahnverschmutzungen reagiert. Dies ist in den Strukturunterschieden begründet. So lässt die geschlossene Textur des Asphaltbetons 0/8 die kleinen Steinchen nicht nur auf der Oberfläche, sondern auch größtenteils in den Profilvertiefungen liegen. Bei der Reinigung der Messoberfläche werden sie einwandfreier und zuverlässiger abgesaugt als beim offenporigen Belag. Daher nahmen die Werte der Texturkenngrößen für den Asphaltbeton 0/8 nach der Reinigung zu und für den OPA 4/8 ab. Bemerkenswert war dabei, dass die Kenngröße  $TD_{5/95}$  im Vergleich zu der ähnlichen Kenngröße  $TD1$  unverändert blieb, was auch logischerweise der Physik der Texturkenngröße  $TD_{5/95}$  entspricht, die zu den nicht texturrelevanten zufälligen Abweichungen im Rauheitsprofil unempfindlich sein soll. Der dichte Belag SMA 0/3 hat auch die geschlossene Textur wie der AB 0/8, ist aber aufgrund seiner Zusammensetzung bzw. Korngröße wesentlich feiner. Er besitzt dadurch im Rauheitsprofil kleinere Vertiefungen als der AB 0/8. Aus diesem Grund haben die Texturkenngrößen des Splitt-Mastix-Asphaltes 0/3 auf die Oberflächensauberkeit weniger reagiert als die des Asphaltbetons 0/8. Hauptsächlich haben

seine akustisch relevanten Texturkenngrößen  $g$ ,  $GF_{5/95}$  und  $TD_{5/95}$  sensibler auf die Verschmutzung reagiert als seine Rauheitskenngrößen  $MPD_i$ ,  $ETD_i$ ,  $R_a$  und  $R_{max}$ . Bei dem Asphaltbeton 0/8 reagierten die geometrisch und akustisch relevanten Texturkenngrößen gleichartig sensibel. Für die Praxis bedeutet dies, dass die zu messende Oberfläche unabhängig von der Belagsart während der Messungen sauber und frei von jeglichen Fremdkörpern sein muss und die Fahrbahnverschmutzungen bei der Ermittlung der Messunsicherheit berücksichtigt werden müssen. Ihr Unsicherheitsbeitrag wurde für die Rauheitskenngrößen im Intervall von 0 bzw. 0,001 mm bis 0,027 mm und für die akustisch relevanten Texturkenngrößen, wie z. B. Gestaltfaktoren  $g$  und  $GF_{5/95}$ , im Intervall von 0 bzw. 0,4 % bis 0,6 % festgestellt.

Die Ergebnisse der Berechnungen der erweiterten Messunsicherheit für alle gemessenen Beläge sind in Bezug auf die untersuchten Texturkenngrößen in der Anlage 9 dargestellt.

### **Bewertung der Texturkenngrößen hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit beim Vergleich der Oberflächeneigenschaften von Straßen unterschiedlicher Bauweisen und Untersuchung der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen mittels der akustisch relevanten Texturkenngrößen**

Im letzten dritten Teil des Untersuchungsprogramms wurde festgestellt, dass die Texturkenngrößen  $MPD_i$  bzw.  $ETD_i$ ,  $A_{max}$ ,  $g$  bzw.  $GF_{5/95}$  und  $V_{z0}$  die wichtigsten geometrischen und akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen beschreiben und aufgrund ihrer Aussagefähigkeit zur Klassifizierung von Straßenbelägen herangezogen wurden.

Die Kenngröße  $V_{z0}$  beschreibt mathematisch die Streuung der Profildinate  $Z_{5/95}$ , die bei der Berechnung des Gestaltfaktors  $GF_{5/95}$  aus den alle 0,4 mm zu generierenden Oberflächenprofilen flächenhaft ermittelt wird. Sie reagiert empfindlich auf Änderungen der Gleichmäßigkeit von Straßenoberflächenprofilen. Je stärker sich die Profile der gemessenen Oberfläche unterscheiden, umso höher sind die Streuungen der Profildinate  $Z_{5/95}$  und der Koeffizient  $V_{z0}$ . Ein großer Kennwert  $V_{z0}$  ist somit ein Zeichen für eine hohe Inhomogenität der gemessenen Oberfläche und gleichzeitig ein Zeichen für die Zunahme des Einflusses der Ungleich-

mäßigkeit der Textur auf die Anregung der Reifen. Je kleiner hingegen der Kennwert  $V_{z0}$  ist, desto schwächer ist der Einfluss der Textur auf die Anregung der Reifen und desto „leiser“ ist die Fahrbahnoberfläche. Ein theoretisch möglicher Vorbeirollpegel, der z. B. aus dem Bild 14 oder 15 mittels des  $V_{z0}$ -Wertes abgeschätzt werden kann, ist dabei ein Maß für die akustischen Eigenschaften. Diese Texturkenngröße ( $V_{z0}$ ) kann daher für die praktischen Bewertungszwecke eingesetzt werden, um einen ersten Einblick in die akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen aufgrund der Texturmessungen zu gewinnen.

Die Aufteilung der gemessenen Beläge bzw. ihre Klassifizierung in vier Haupt- und eine Sondergruppe wurde in Abhängigkeit von den ermittelten Werten der wichtigsten Texturkenngrößen durchgeführt und ist in der Tabelle 9 dargestellt.

## **9 Literatur**

- [1] JACOT, A.: Gute Oberflächeneigenschaften für sichere Fahreigenschaften, Straße und Verkehr, S. 16-21, 11/2006
- [2] HUSCHEK, S.; BÖCK, M.; GOTHIE, M.; DO, M.-T.; MARSAC, P.; Wasner, S.: Straßengriffbarkeit im Rahmen der Deutsch-Französischen Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Straßenwesens, TU Berlin, FE-Nr. 04.192/ 2003/ CRB, Bericht Nr. 664, Berlin, 2005
- [3] MÜLLER, I.; BARTOLOMAEUS, W.: Erfassung und Bewertung der Texturen von Fahrbahnoberflächen, Bundesanstalt für Straßenwesen, AP 03 330/S3 (unveröffentlicht), Bergisch Gladbach, 2003
- [4] Optisches 3-D-Messsystem auf Basis der digitalen Streifenprojektion mit Mikrosiegeln, GF Messtechnik GmbH, Handbuch, Teltow, 2006
- [5] Leitfaden zu Grundlagen der optischen 3-D-Messtechnik, 6. Version, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., Erlangen, 2003
- [6] Leitfaden zur Inspektion von Oberflächen mit Bildverarbeitung, 9. Version, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., Erlangen, 2006

- [7] MÜLLER, I.: Innovative Messmethoden zur Erfassung von Fahrbahnoberflächen, Griffig, 2/2008
- [8] Evaluation of the TRRL High-Speed Profilometer, P. B. STILL and P. G. JORDAN, TRRL Laboratory Report 922, 1980
- [9] M5/LED, M5/LASER Serie M5 Optische Abstandssensoren, MEL Mikroelektronik GmbH
- [10] VOLK, R.: Rauheitsmessung – Theorie und Praxis, DIN, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005
- [11] ISO 13473-1, 2, 3 Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen (deutsche Fassung, 1999)
- [12] Rauheitsmesssysteme von Hommel – Etamic. Oberflächenkenngrößen in der Praxis, Jenoptik, 10/2008
- [13] DIN EN ISO 4287 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (deutsche Fassung, 1998)
- [14] DIN ISO 10844 Anforderungen an Prüfstreifen zur Geräuschmessung an Straßenfahrzeugen (deutsche Fassung, 1994)
- [15] KRIEGER, B.; SULTEN, P.: Stand der Entwicklung von lärmarmen Betondecken, Straße und Autobahn, 9/1999
- [16] KÖLLMANN, A.; STEVEN, H.; HABERKORN, U.: Ausprägung von Mega- und Makrotextur auf Fahrbahnoberflächen, TÜV-Automotive GmbH, Herzogenrath, 1999
- [17] BECKENBAUER, T.: Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch, FE 03.293/1995/MRB, m Auftrag der BAST, 2001
- [18] SCHMIDT, U.; BODSCHWINNA, H.; SCHNEIDER, U.: Mikro-EHD: Funktionsgerechte Rauheitskennwerte durch Auswerten der Abbott-Kurve, Teil 1: Grundlagen, Antriebstechnik 26, S. 65-69, 9/1987
- [19] SCHMIDT, U.; BODSCHWINNA, H.; SCHNEIDER, U.: Mikro-EHD: Funktionsgerechte Rauheitskennwerte durch Auswerten der Abbott-Kurve, Teil 2: Entwicklung von Rauheitskennwerten, Antriebstechnik 26, S. 55-59, 10/1987
- [20] DUTSCHKE, W.; KEFERSTEIN, C., P.: Fertigungsmesstechnik. Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren, 5. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2005
- [21] BRINKMEIER, M.: Dynamik rollender Reifen-Texturanregung, TU Hannover, Institut für Baumechanik und Numerische Mechanik, Forschungsbericht, im Auftrag der BAST, 2004
- [22] Leitfaden für die Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM). Deutsche Übersetzung des Guide, 1. Ausgabe, Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich, 1995
- [23] Qualität und Zuverlässigkeit (QZ). Jahrgang 51, Carl Hanser Verlag, München, S. 82-83, 3/2006
- [24] DIETRICH, E.; SCHULZE, A.: Prüfprozess-eignung. Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld, 3. aktualisierte und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag, München-Wien, 2007
- [25] DIETRICH, E.; SCHULZE, A.; CONRAD, S.: Eignungsnachweis von Messsystemen, 2. aktualisierte Auflage, Carl Hanser Verlag, München-Wien, 2005
- [26] SACHS, M.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München-Wien, 2003
- [27] DIN-Taschenbuch 224 – Statistik. Auswertungen und Genauigkeitsanalysen. 2. Ausgabe, Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich, 1998
- [28] DIN 1319 Grundbegriffe der Messtechnik, Teil 3: Begriffe für die Messunsicherheit und für die Beurteilung von Messgeräten und Messeinrichtungen (deutsche Fassung, 1983)
- [29] KRIEGER, B.: Leise Straßenbeläge. Ein Beitrag zur Reduzierung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen, Bundesanstalt für Straßenwesen, Vortrag in Essen, Bergisch Gladbach, 2006
- [30] SACHS, L.: Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden, 11. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2004

- 
- [31] Царёв, И.: Создание конструкции и определение взаимосвязи параметров гидропневмоударной трамбовки с регулируемым числом ударов, Диссертация (05.05.04), ВНИИСДМ Москва, 1990
- [32] SHIFFLER, R. E.; ADAMS, A. J.: A Correction for Biasing Effects of Pilot Sample Size on Sample Size Determination, *Journal of Marketing Research*, S. 319-321, Vol. XXIV, 1987
- [33] HUSCHEK, S.; MERZOUG, D.-P.: Zusammenhang zwischen Rauheit und Griffigkeit, TU Berlin, *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 735, Bonn, 1997
- [34] MÜLLER, I.: Übersicht der Texturkenngößen. Ein Beitrag im Arbeitskreis AK 4.3.5 „Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen“, FGSV, Bergisch Gladbach, 2008
- [35] MÜLLER, I.: Texturmessung und -auswertung. Ein Beitrag im Arbeitskreis AK 4.3.3 „Rauheit“, FGSV, Bergisch Gladbach, 2010
- [36] GLATTKI, W.: Erfassung und Analyse von Rauheitsprofilen. Bundesanstalt für Straßenwesen, AP 95 311/S1 (unveröffentlicht), Bergisch Gladbach, 1999

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

### 2000

S 20: 36. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 14,00

S 21: Walzbeton: Ergebnisse aus neuester Forschung und lang-  
jähriger Praxis – Kompendium  
Birmann, Burger, Weingart, Westermann

Teil 1: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von  
Walzbeton auf die Gebrauchseigenschaften (1)  
Schmidt, Bohlmann, Vogel, Westermann

Teil 2: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von  
Walzbeton auf die Gebrauchseigenschaften (2)  
Weingart, Dreßler

Teil 3: Messungen an einer Versuchsstrecke mit Walzbeton-Trag-  
schicht an der B54 bei Stein-Neukirch  
Eisenmann, Birmann

Teil 4: Temperaturdehnung, Schichtenverbund, vertikaler Dichte-  
verlauf und Ebenheit von Walzbeton  
Burger € 17,00

### 2001

S 22: 3. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen  
Straßenerhaltung – Nutzen der systematischen Straßenerhaltung  
€ 19,50

S 23: Prüfen von Gesteinskörnungen für das Bauwesen  
Ballmann, Collins, Delalande, Mishellany,  
v. d. Elshout, Sym € 10,50

### 2002

S 24: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem  
Untergrund - Konsolidationsverfahren -

Teil 1: Vergleichende Betrachtung von Konsolidationsverfahren  
beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund

Teil 2: Erfahrungsberichte über ausgeführte Straßenbauprojekte auf  
wenig tragfähigem Untergrund unter Verwendung von Konsolida-  
tionsverfahren  
Koch € 17,50

S 25: 37. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 16,50

### 2003

S 26: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Unter-  
grund - Aufgeständerte Gründungspolster  
Rogner, Stelter € 14,00

S 27: Neue Methoden für die Mustergleichheitsprüfung von  
Markierungsstoffen – Neuentwicklung im Rahmen der Einführung  
der ZTV-M 02  
Killing, Hirsch, Boubaker, Krotmann € 11,50

S 28: Rechtsfragen der Bundesauftragsverwaltung bei Bundes-  
fernstraßen – Referate eines Forschungsseminars der Universität  
des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am  
25./26. September 2000 in Saarbrücken € 13,00

S 29: Nichtverkehrliche Straßennutzung – Referate eines For-  
schungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeits-  
ausschusses „Straßenrecht“ am 24./25. September 2001 in Saar-  
brücken € 13,50

### 2004

S 30: 4. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen  
Straßenerhaltung – Workshop Straßenerhaltung mit System –  
€ 19,50

S 31: Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewin-  
nung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues  
Golkowski € 13,50

S 32: Straßenbaufinanzierung und -verwaltung in neuen Formen  
– Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saar-  
landes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 23. und  
24. September 2002 in Saarbrücken € 13,50

S 33: 38. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 17,50

S 34: Untersuchungen zum Einsatz von EPS-Hartschaumstoffen  
beim Bau von Straßendämmen  
Hillmann, Koch, Wolf € 14,00

### 2005

S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Unter-  
grund – Bodenersatzverfahren  
Grundhoff, Kahl € 17,50

S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht  
– Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saar-  
landes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und  
23. September 2003 in Saarbrücken € 13,50

S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-  
Fahrbahn-Geräusche“  
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

### 2006

S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate  
eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des  
Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft  
für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in  
Saarbrücken € 16,50

S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Ver-  
formungswiderstandes von Asphalt  
Renken, Büchler € 16,00

S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 17,50

S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Boden-  
kontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben  
Schröder € 13,50

S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und  
RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymer-  
modifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-  
Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt  
Wörner, Metz € 17,50

S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk  
Krajewski, Kuhl € 14,00

S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem  
Untergrund  
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

### 2007

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstan-  
des und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen  
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl,  
Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00

- S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen  
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00
- S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hase, Oelkers € 24,50
- S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

## 2008

- S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise  
Ripke € 12,50
- S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses "Straßenrecht" der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden  
€ 15,50
- S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Killing, Hirsch € 14,50
- S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hirsch € 16,00
- S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50
- S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton  
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50
- S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)  
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

## 2009

- S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00
- S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen  
Ripke € 13,50
- S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt  
Ludwig € 15,50
- S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode  
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

## 2010

- S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50
- S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes  
Wolf, Fielenbach € 16,50
- S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

- S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten  
Blume € 16,00
- S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA) Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöllner, Pöppel-Decker € 23,00
- S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus  
Freudenstein, Birmann € 14,00
- S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen  
Breitenbücher, Youn € 14,50
- S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalerkennung im Rahmen des TP3  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Canzler, Winkler € 16,50
- S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hb-nrw.de/> heruntergeladen werden.  
Ripke
- S 69: Untersuchung der Mesunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen  
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

---

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

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

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.