# Baustellengerechte Laser-Profilmessverfahren für die Steuerung und Eigenüberwachung der Oberflächentexturierung von Verkehrsflächen aus Beton

Rolf-Rainer Schulz, Thomas Schmidt, Ralf Hardt und Ronald Riedl

Verfasseranschriften:
Prof. Dr.-Ing. R.-R. Schulz, Fachhochschule Frankfurt am Main, Fachbereich 1, Studiengang Bauingenieurwesen, Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt am Main, rrschulz@fb1.fh-frankfurt.de;
B. Eng. T. Schmidt, Gero Real Estate AG, Gewährleistungsmanagement, Goethestraße 30, 60313 Frankfurt am Main, schmidt.t7@googlemail.com;
Dipl.-Ing. R.Hardt, ralf.hardt@bilfinger.com;
Dipl.-Ing. R. Riedl, ronald.riedl@bilfinger.com, Bilfinger Construction GmbH, Zentrales Labor für Baustofftechnik, Gustav-Nachtigal-Straße 3, 65189 Wiesbaden

Für die zielsichere Herstellung der Oberflächentextur bei Waschbetonoberflächen im Straßenbau muss das Ausbürstergebnis schnell und aussagekräftig beurteilt werden. Diesen Anforderungen wird das altbewährte Sandfleckverfahren nicht ausreichend gerecht. In dem Beitrag wird untersucht, ob die heutigen mobilen Laser-Profilmessgeräte gegenüber dem Sandfleckverfahren vergleichbare oder sogar differenziertere Aussagen ermöglichen und insbesondere wegen der schnellen Prüfungsdurchführung für die zeitnahe Beurteilung der Bauausführung besser geeignet sind. Dazu werden die Ergebnisse zweier Profilmessgeräte sowohl untereinander als auch mit dem Sandfleckverfahren verglichen. Außerdem werden die Einflüsse unterschiedlicher Laser-Auflösung und Messprofilanordnung untersucht. Der Beitrag liefert darüber hinaus Vorschläge für weitere Mess- und Auswertemöglichkeiten.

For the effective production and control of the surface texture of exposed aggregate concrete pavements the results for the surface texture after brushing out have to be assessed fast and significantly. The classical sand patch method does not meet all of these requirements appropriately. This is a report about the investigations on recent mobile laser profile measuring devices in comparison to the sand patch method regarding the distinction of results and testing speed in order to prove that the modern methods are more adequate to evaluate the execution of construction work. These tests include a comparison of two different laser devices among each other as well as the comparison of Laser and sand patch method. Except this the influence of different laser resolution and profile order are tested. The contribution provides proposals for progress in the methods of measuring and interpretation of test data.

## 1 Einleitung

Die Oberflächentextur ist der prägende Faktor für die Gebrauchseigenschaften von Verkehrsflächen und steht daher besonders im Fokus der Bauausführung. Sie ist gemäß Definition des Merkblatts MOB [1] die Primäreigenschaft, aus der die für den Straßenverkehr bedeutsamen Sekundäreigenschaften folgen. Dazu zählen vor allem die Griffigkeit, das Drainagevermögen und die Geräuschentwicklung beim Befahren. Zu den wichtigsten Beurteilungskriterien von Fahrbahnoberflächen gehört seit Jahrzehnten die mit dem Sandfleckverfahren geprüfte mittlere Texturtiefe MTD. Inzwischen hat das althergebrachte Verfahren jedoch Konkurrenz bekommen, deren Vorzüge sogar den Nachteil der verhältnismäßig hohen Investitionskosten aufwiegen können.

Zur Vermeidung von Mängeln und Nachbearbeitungen wäre es von Vorteil, wenn die Bewertung der Oberflächentextur nicht erst bei der Abnahme, sondern bereits baubegleitend zur Steuerung der Herstellparameter durchgeführt werden könnte. Für die zielsichere, anforderungsgerechte Herstellung der Oberflächentextur der heute im Betonstraßenbau ausgeführten Waschbetonoberflächen genügen die im Rahmen der Erstprüfungen angefertigten Probeplatten in vielen Fällen nicht. Mit diesen Probeplatten soll die Interaktion zwischen Zusatzmittel und Zement sowie das generelle Ausbürstergebnis ermittelt werden. Die Temperatur-, Feuchte- und Windverhältnisse vor Ort weichen oftmals zu sehr von den Laborbedingungen ab. Dies verändert die Wirkung der eingesetzten Oberflächenverzögerer, sodass der optimale Zeitpunkt zum Ausbürsten nur schwer vorherbestimmt werden kann und daher unter den jeweiligen Bedingungen empirisch durch das Personal ermittelt werden muss.

Mit dem Sandfleckverfahren nach DIN EN 13036-1 [2] als volumetrische Bestimmungsmethode existiert zwar ein anerkanntes, einfaches und baustellengerechtes Prüfverfahren, welches aber hinsichtlich Prüfgeschwindigkeit, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit den heutigen Anforderungen nicht mehr in allen Belangen gerecht wird. Bei der Abnahmeprüfung werden schon seit Längerem neben dem Sandfleck- auch Laser-Messverfahren eingesetzt, die allerdings wegen der hohen Gerätekosten und wegen des erforderlichen technischen Know-hows nicht ausschließlich angewendet werden. Inzwischen gibt es aber mobile Geräte, deren Anschaffung auch für ausführende Unternehmen im Rahmen der Eigenüberwachung interessant sein könnte. Neben der hohen Arbeitsgeschwindigkeit ist z. B. die Bedienung des ELAtextur-Gerätes so einfach, dass sich damit auch das weniger technisch versierte Baustellenpersonal anfreunden kann. Quasi per Knopfdruck werden die mittlere Profiltiefe MPD und der im Hinblick auf die Übereinstimmung mit der mittleren Texturtiefe MTD berechnete Parameter ETD ausgegeben. Nach den bisherigen Erfahrungen scheint das Gerät für eine differenzierte Beurteilung der Textur während der Ausführung geeignet. Allerdings werden im Standard-

Bild 1: Zerfaserter Rand des „Sandflecks" bei Verwendung von kugeligem Glassand

Bild 2: Laser-Profilmessgerät „E" (ELATextur®, IWS Messtechnik)

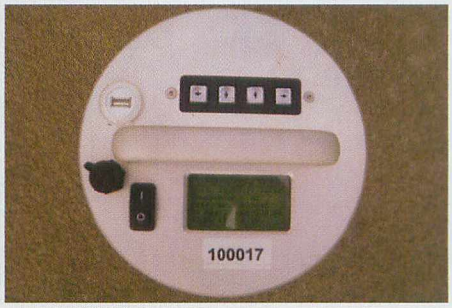



Bild 3: Bedienfeld und Anzeigeeinheit des Laser-Profilmessgeräts „E"

Messbetrieb, d. h. ohne weitergehende externe Messdatenauswertung, längst nicht alle Möglichkeiten der Messmethode zur Beurteilung der Textureigenschaften ausgeschöpft. Neben der mittleren Texturtiefe MTD, die die Textur nur sehr pauschal beschreibt, sind durchaus noch andere Merkmale interessant.

## 2 Untersuchungsziele

In diesem Beitrag wird über eine Praxiserprobung des ELAtextur-Laser-Profilmessgerätes (im Folgenden kurz Gerät „E" genannt) im Vergleich zum Sandfleckverfahren auf verschiedenen Autobahn-Neubaustrecken sowie auf Flugbetriebsflächen berichtet. Parallel dazu wurde ein aus verschiedenen Elektronikkomponenten zusammengestelltes mobiles Laser-Profilmessgerät der FH Frankfurt eingesetzt (hier „Profilometer FH FFM" bzw. kurz Gerät „P" genannt). Die Untersuchungsergebnisse entstammen einem durchgeführten berufspraktischen Studienprojekt mit einer darauf aufbauenden Bachelor Thesis [3]. Das primäre Ziel dieser Arbeit bestand darin, den Zusammenhang zwischen den laseroptischen Profilmessverfahren und dem Sandfleckverfahren nachzuweisen und die zusätzlichen Potenziale moderner Messverfahren aufzuzeigen. Des Weiteren sollte untersucht werden, inwieweit die Resultate von Messgeräten unterschiedlicher Bauart übereinstimmen. Dabei beziehen sich die möglichen Unterschiede nicht nur auf die Hardware, sondern auch auf die Auswertesoftware. Um letztgenannten Einfluss zu eliminieren, wurden die Rohmessdaten beider Geräte den gleichen Auswerteverfahren unterzogen. Das hier verwendete Programm „Omnisurf" von Digital Metrology Solutions, Inc. [4] ermöglicht neben der Ermittlung der mittleren Profiltiefe MPD, dem Pendant der mittleren Texturtiefe MTD aus dem Sandfleckverfahren, die Berechnung zahlreicher weiterer Texturparameter. Es wird erwartet, dass sich mit zusätzlichen Parametern für die Beschreibung der Oberflächentopografie (Primäreigenschaft) erweiterte Möglichkeiten zur Abschätzung der Gebrauchseigenschaften (Sekundäreigenschaften, vgl. Merkblatt MOB [1]) ergeben.

## 3 Messprinzipien, Messgeräte und Auswerteverfahren

### 3.1 Sandfleckverfahren (volumetrisches Verfahren)

Das Sandfleckverfahren (sand patch test) – auch Sandflächenverfahren genannt - wird schon seit mehr als vier Jahrzehnten weltweit zur Beurteilung der Rauheit von Betonoberflächen verwendet. Wie bereits erwähnt, handelt sich um ein volumetrisches Messverfahren, das sich durch einfache Handhabung sowie durch einen sehr geringen Geräte- und Materialaufwand auszeichnet. Je nach Anwendungsgebiet haben sich allerdings einige Varianten der Prüfungsdurchführung herausgebildet, die die Übertragbarkeit der Ergebnisse infrage stellen [5]. Dazu gehören unterschiedliche Arten und Durchmesser von Verteilerscheiben sowie unterschiedliche Prüfmedien (Sand oder Glaskugeln mit je nach Prüfvorschrift differierenden Korngrößenbereichen). Im Straßenbau erfolgt die Prüfungsdurchführung nach DIN EN 13036-1 [2] mit Glasperlen (0,18 bis 0,25 mm) und einer Verteilerscheibe von 65 mm Durchmesser, deren Unterseite aus Gummi bestehen muss, während gemäß ZTV-ING [6] bei der Prüfung an Ingenieurbauwerken des Verkehrswesens Quarzsand im Korngrößenbereich zwischen 0,1 und 0,5 mm als Prüfmedium dient, welcher mit einer Hartholzscheibe von nur 50 mm Durchmesser verteilt wird.

Geringer Prüfaufwand und hervorragende Praktikabilität dürften auch die wesentlichen Gründe dafür sein, dass alternative Prüfmethoden bisher wenig forciert wurden, obwohl das Sandfleckverfahren einige schwerwiegenden Nachteile aufweist. Dazu gehören:

- keine Texturdifferenzierung,
- erheblicher Prüfereinfluss,
- mäßige Reproduzierbarkeit.

Welchen subjektiven Einflüssen dieser Versuch ausgesetzt ist, erkennt man z. B. an dem stark zerfaserten Rand des „Sandflecks" (Bild 1), der wegen der Mobilität der Glaskugeln bei Waschbetonoberflächen praktisch unvermeidbar ist. In Einsatzgebieten außerhalb des Straßendeckenbaus wird außerdem bemängelt, dass das Verfahren auf einen Gültigkeitsbereich zwischen 0,25 und 5 mm [2] begrenzt ist und sich zudem nicht für vertikale oder stark geneigte Flächen eignet.

### 3.2 Laser-Profilmessung, Messgeräte

Elektrooptische Messverfahren unterliegen den vorgenannten Nachteilen des Sandfleckverfahrens nicht und bieten darüber hinaus eine Reihe von Vorteilen. Dazu gehören:

- schnelle Prüfungsdurchführung,
- hohe Messgenauigkeit,
- sehr gute Reproduzierbarkeit,
- nachträgliche Auswertemöglichkeiten,
- große Auswahl an Texturparametern zur Beschreibung der Oberflächencharakteristik.

Nach DIN EN ISO 13473-1 [7] können Profilmessverfahren volumetrische Verfahren ersetzen. Die Norm schränkt allerdings ein, dass die mittleren Texturtiefen verschiedener Messverfahren nicht immer untereinander vergleichbar sind. Es darf jedoch davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse im Allgemeinen gut mit dem volumetrischen Verfahren korrelieren.

Nachteilig sind:
- hohe Gerätekosten,
- Messfehler oder Ungenauigkeiten an sehr steilen (schroffen) Profilen und Kanten durch Abschattungen sowie bei durchscheinenden glasigen oder stark reflektierenden Oberflächenpartikeln (z. B. Glimmer),
- Messfehler durch Nässe oder starke Lichteinwirkungen.

Mit dem serienmäßig gefertigten „ELAtextur"-Gerät (Gerät „E", Bilder 2 und 3) der Firma IWS-Messtechnik und dem „Profilometer FH FFM" (Gerät „P", Bild 4), einem Prototyp der FH Frankfurt, kamen bei den vorliegenden Untersuchungen zwei unterschiedliche Messgeräte zum Einsatz. Wobei nicht nur die technischen Daten differieren (Tabelle 1), sondern auch die Art der Profilaufnahme. Während der Laser bei dem Gerät „E" eine Kreisbahn beschreibt, werden der bzw. die Laser bei dem Gerät „P" entlang einer Traverse linienförmig über die Oberfläche bewegt (Bild 4). Bei diesem Gerät können bis zu 8 Lasersensoren im Abstand von 12 mm gekoppelt und parallel betrieben werden. Im vorliegenden Fall wurden zwei Laser verwendet, wobei Laser 1 wegen des kleineren Messbereichs (10 mm) eine höhere Auflösung erzielte als Laser 2, welcher jedoch mit seinem größeren Messbereich von 20 mm ähnlich wie das Gerät „E" auch gröbere Texturunterschiede erfassen konnte. Während das Gerät „E" über einen eigenen Mikroprozessor verfügt, der quasi per Knopfdruck die Messung durchführt und die Auswertung vornimmt, muss bei dem Prototyp „P" die Messung per Laptop in Gang gesetzt werden. Daher erfordert das Gerät „P" gegenüber „E"
- eine anspruchsvollere Bedienung,
- eine separate Messtechnik (Hardware + Software) zur schnellen Erfassung und Speicherung des großen Datenvolumens,
- ein separates Computer-Programm zur Datenfilterung (Eliminierung von Profilneigungen und Profilwellen) und zur Berechnung der Rauheitsparameter.

Vorteilhaft ist bei dem Gerät „P", dass die Art und Anzahl der einsetzbaren Laser-Sensoren variiert werden kann. So können z. B. die Messbereiche und die davon abhängigen Vertikalauflösungen sehr flexibel den jeweiligen Erfordernissen angepasst werden. Zudem sind die Messgeschwindigkeit und damit auch die Zahl der Messpunkte je Messstrecke in weiten Grenzen frei wählbar. Durch die nachträgliche Auswertung und grafische Kontrolle des Messprofils werden Messfehler erkannt und ggf. eliminiert. Die Vielzahl der ausgegebenen Parameter eröffnet die Möglichkeit, weitere Zusammenhänge zwischen Textur- und Anwendungseigenschaften zu untersuchen. Eine separate nachträgliche Auswertung ist im Prinzip auch mit dem Gerät „E" möglich, weil sich die Rohmessdaten auch auf einen USB-Stick übertragen und in ähnlicher Weise mit externer Software verarbeiten lassen wie beim Gerät „P" (siehe auch nächster Abschnitt).

Bei den vorliegenden Untersuchungen erwies sich der Messbereich von 10 mm als ausreichend groß, sodass alle Messungen auswertbar waren. Die Parallelmessungen ermöglichten jedoch einen zusätzlichen Vergleich zwischen den Lasern mit unterschiedlicher Auflösung und eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Messungen.

Tabelle 1: Technische Daten der verwendeten Laser-Messgeräte im Vergleich zu den Anforderungen an Profilmessgeräte gemäß DIN EN ISO 13473 [7 bis 9] für die Wellenlängenbereichsklasse D (2,5 bis 50 mm)

| Gerät | ELAtextur® | Profilometer FH FFM | | Anforderungen gemäß DIN EN ISO 13473-3 |
|---|---|---|---|---|
| Kurzbezeichnung | „E" | „P" | | |
| Laser | | L1 | L2 | |
| Messbereich | 20 mm | 10 mm | 20 mm | ≥ 20 mm |
| vertikale Auflösung | 0,05 mm | 0,005 mm | 0,01 mm | ≤ 0,03 mm (≤ 0,05 mm[1]) |
| horizontale Auflösung | 0,2 mm | 0,025 mm | | ≤ 1 mm |
| Auswertelänge (auswertbare Profillänge/Messung) | 400 mm | 200 mm | | ≥ 200 mm (≥ 100 mm[1]) |
| Anzahl der Messpunkte je Messung | 2000 | 8000 | | |
| Linearitätsfehler der Laser bezogen auf den Messbereich | | 0,006...0,015 mm (0,06...0,15 %) | | ≤ 2 % |
| Messpunktdurchmesser | ≤ 1 mm | 0,2 - 0,5 mm | | ≤ 1 mm[1] |
| Dauer einer Messung | ca. 6 s | ca. 6,6 s | | |

[1] gemäß DIN EN ISO 13473-1 [7]

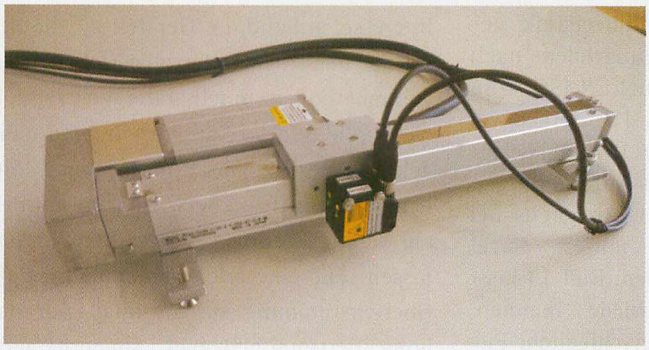


Bild 4: Laser-Profilmessgerät „P" der Fachhochschule Frankfurt am Main

### 3.3 Laser-Profilmessung, Auswerteverfahren

Bei dem Gerät „E" ist die Auswertesoftware bereits in die Geräteelektronik integriert und das Gerät zeigt am Ende eines jeden Messvorgangs die Parameter MPD und ETD als Mittelwert aus zwei Einzelmessungen an. Die Rohdaten werden gespeichert und können auf einen PC übertragen werden. Jedes Messprofil lässt sich auf diese Weise grafisch darstellen oder einer weitergehenden Auswertung unterziehen. Die zusätzlichen Auswertemöglichkeiten decken sich mit denen für das Gerät „P" und werden im Folgenden beschrieben. Das zu Forschungszwecken konzipierte Gerät „P" ist vor allem auf Offenheit des Systems ausgerichtet und daher nicht im Hinblick auf den Bedienkomfort optimiert. Deshalb sind zur Erfassung und Verarbeitung der Messdaten mehrere Arbeitsschritte erforderlich. Zunächst werden die Messdaten mittels schnellem 24 Bit A/D-Wandler direkt auf einen Laptop übertragen und vom Datenerfassungsprogramm grafisch in Form von Messprofilen dargestellt sowie in beliebigen Formaten abgespeichert. Eine Excel-VBA-Applikation übernimmt die Aufbereitung der Messprofile, d. h. das Entfernen der Vor- und Nachlaufstrecken sowie die Ausgabe in ein für die Auswertesoftware geeignetes Dateiformat. Die Ermittlung der Rauheitsparameter erfolgt durch das Programm Omnisurf [4]. Da

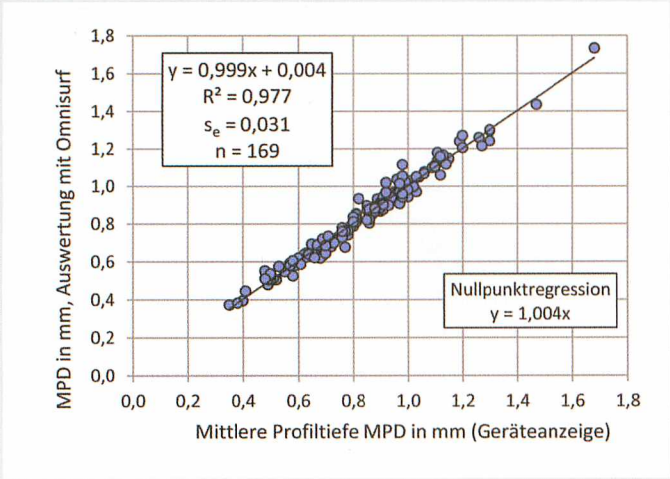



Bild 5: Vergleich der Ablesungen am Messgerät „E" mit den Resultaten einer unabhängigen Auswertung der Rohdaten nach DIN EN ISO 13473 [7], Anhang E, Möglichkeit 1, mit dem Programm Omnisurf [4]

dieses Programm vor allem auf die Ermittlung der in der Feinmechanik gebräuchlichen Rauheitskenngrößen nach DIN EN ISO 4287 [10], DIN EN ISO 4288 [11], DIN EN ISO 13565 [12, 13] sowie nach ASME B46.1-2009 [14] ausgelegt ist, musste den speziellen Anforderungen der DIN EN ISO 13473-1 [7] bereits bei der Datenaufbereitung mittels Excel Rechnung getragen werden. Bild 13 lässt die prinzipiellen Unterschiede erkennen. Hinzu kommen noch unterschiedliche Filtermethoden. Gewählt wurde die Vorgehensweise nach „Möglichkeit 1" im Ablaufdiagramm Bild E1, DIN EN ISO 13473-1, Anhang E [7]. Parallel dazu wurde auch eine Auswertung nach DIN EN ISO 4287 [10] mit einem nach der Systematik der DIN EN ISO 4288 [11] erweiterten Profilfilter von 80 mm Wellenlänge erprobt. Hierbei entfällt die Begrenzung auf eine Grundlinie von 100 mm und das Aufteilen in zwei 50 mm-Abschnitte, was die Anwendung des Programms Omnisurf [4] wesentlich erleichtert.

Wie oben erwähnt, kommt eine solche erweiterte Auswertung auch für die mit dem Gerät „E" gewonnenen Daten in Betracht. Deshalb war es von besonderem Interesse, anhand des Gerätes „E" die Resultate nach den unterschiedlichen Auswertemethoden miteinander zu vergleichen. Wie Bild 5 zeigt, korrelieren die Ergebnisse der Nachberechnung mit „Möglichkeit" 1 nach [7] hervorragend mit den am Gerät „E" direkt angezeigten Ergebnissen. Für eine auch zahlenmäßig gute Übereinstimmung spricht nicht nur das hohe Bestimmtheitsmaß, sondern auch der kaum von 1,0 abweichende Steigungsfaktor. Eine ähnlich gute Korrelation liefert auch die alternative Berechnung nach [10], [11] mit dem 80 mm Wellenfilter. Das Bestimmtheitsmaß beträgt dabei 0,978 und der Steigungsfaktor 0,989. Die Resultate der beiden externen Auswertemethoden unterscheiden sich demnach praktisch nicht von der des Mikroprozessors im Gerät „E". Da jedoch DIN EN ISO 13473-1 [7] für Fahrbahndecken maßgebend ist, wird auf die Ergebnisse der Auswertemethode nach [10, 11] in diesem Bericht nicht weiter eingegangen.

### 3.4 SRT-Messung

Für die Beeinflussung und Sicherstellung der Gebrauchseigenschaften von Verkehrsflächen müssen die Zusammenhänge zwischen Primär- und Sekundäreigenschaften bekannt und kontrollierbar sein. Deshalb wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen auch der Versuch unternommen, Textur- mit Griffigkeitsmessungen zu korrelieren. Der Skid Resistance-Tester (SRT-Pendel) nach [15], [16, 17] hat sich zur Prüfung der Sekundäreigenschaft „Griffigkeit" etabliert, die aber vor allem von der Mikrorauheit beeinflusst wird. Er wird meist in Kombination mit dem Ausflussmesser nach Moore verwendet, welcher die Makrorauheit erfassen soll. Bei den hier beschriebenen Versuchen wurde allerdings auf den Ausflussmesser verzichtet. Das SRT-Pendel ist nach Herstellerangaben für die Prüfung der Besenstrichstrukturierung geeignet und wird rechtwinklig zur Besenstrichstruktur eingesetzt. Dieser Umstand ist bei dem Vergleich mit den Texturmessverfahren zu berücksichtigen, da der Laser bei dem Gerät „E" eine Kreisbahn beschreibt und bei dem Gerät „P" dazu ein Vergleichskompromiss gesucht wurde (siehe Abschnitt 4). Die zu prüfende Fläche sollte bei Einsatz des SRT-Pendels gemäß [17] keine nennenswerten Inhomogenitäten wie z. B. Grate aufweisen (Bild 6).

### 3.5 Profilspitzenzahl

Als zusätzliches Bewertungskriterium dient in Österreich die Profilspitzenanzahl nach den österreichischen Richtlinien und Vorschriften für Betondecken und Deckenherstellung RVS 08.17.02 [18]. Dabei werden in einer Fläche von 5 cm · 5 cm = 25 cm² alle Spitzen gezählt, die von Körnern > 4 mm stammen² (Bilder 7 und 8). Als Richtwert für Waschbeton mit einem Größtkorn von 8 mm gelten 60 Profilspit-

Bild 6: Besenstrich-Textur

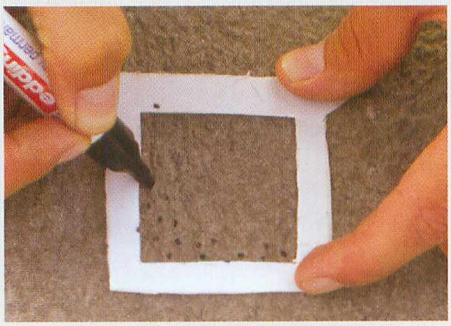


Bild 7: Markierung der Profilspitzen

Bild 8: Schwierige Ermittlung der Profilspitzenzahl

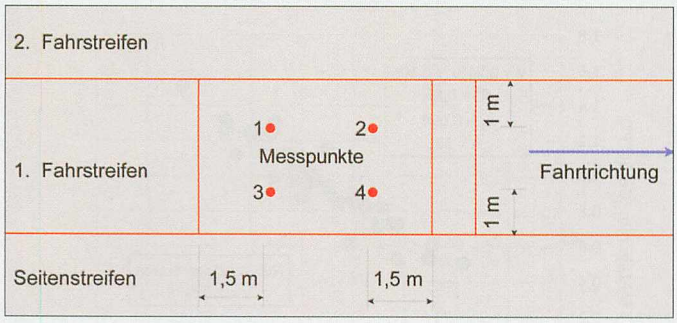



Bild 9: Beispiel für ein Messfeld zur Bestimmung der mittleren Texturtiefe MTD nach TP Beton-Stb 10 [21]

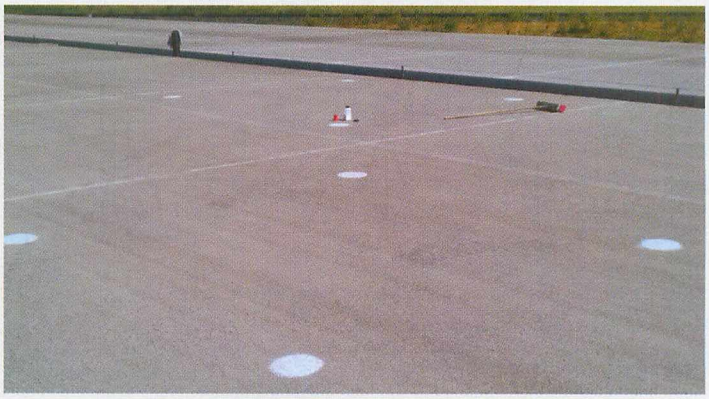


Bild 10: Anordnung der Messpunkte

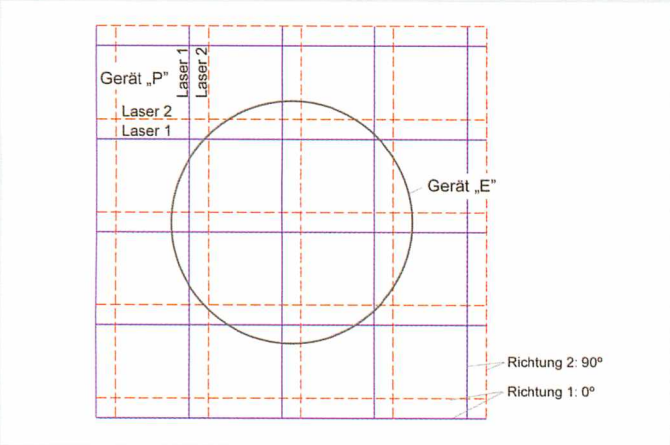



Bild 11: Idealisierte Messlinienanordnung für die Geräte „E" und „P"

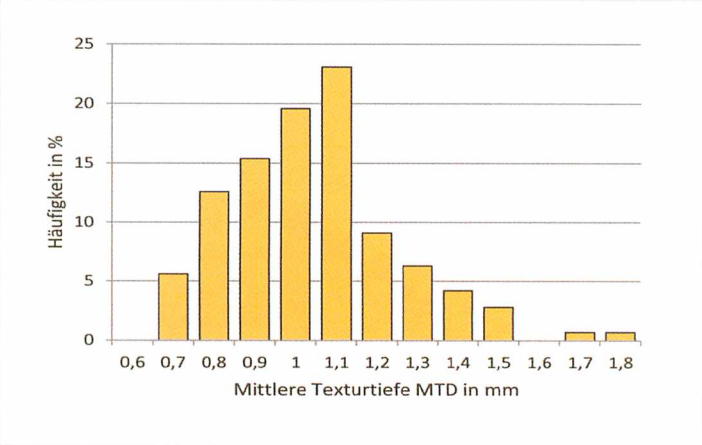



Bild 12: Häufigkeitsverteilung der mittleren Texturtiefen MTD (Sandfleckverfahren) bei Auswertung von 143 Messstellen

zen pro 25 cm². Der Mindestwert sollte bei 50/25 cm² liegen [18]. Die in [19] und [20] wiedergegebenen Untersuchungsergebnisse lassen allerdings bezweifeln, dass solche hohe Profilspitzenzahlen tatsächlich in der Praxis zuverlässig erreichbar sind. Die Ergebnisse von 21 ausgewählten Strecken lagen zwischen 30 und 64 und betrugen im Mittel 38 [19].

## 4 Durchführung der Untersuchungen

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen erfolgten auf ausgewählten Neubaustrecken von Autobahnen sowie auf Flugbetriebsflächen. Während an den Fahrbahndecken der Autobahnen Waschbeton-Oberflächentexturen mit 8 mm Größtkorn ausgeführt wurden, erhielten die Flugbetriebsflächen eine Besenstrichtextur. Gemäß [3] wurden nach dem ersten Herstellungstag an vier gleichmäßig über die gefertigte Streckenlänge verteilten Messfeldern Rautiefemessungen mit dem Sandfleckverfahren und mit dem Laser-Gerät „E" durchgeführt. Dabei wurde je Messfeld der Fahrstreifen gewechselt. Die Prüfstellenanordnung geht aus den Bildern 9 und 10 hervor. Die Sandfleck-Versuche erfolgten gemäß DIN EN 13036-1 [2]. Dabei betrug das Glasperlenvolumen für alle Versuche einheitlich 40 cm³. Die Messhäufigkeit und die Wahl der Messpunkte richteten sich nach TP Beton-StB 10 [21].

Die Ermittlung der Profilspitzenzahl erfolgte an 3 Messpunkten je Platte und die betreffenden Spitzen wurden mit einem Farbstift markiert (Bild 7). Bei der Untersuchung der Flugbetriebsflächen wurde auf Sandfleckmessungen verzichtet. Die Ermittlung der Profilspitzenzahl kam bei dieser Textur nicht in Betracht. Allerdings wurde hier als zusätzliche Messgröße die Griffigkeit mit dem SRT-Pendel bestimmt. Das Sandfleckverfahren liefert über das eingesetzte Sandvolumen und die abgedeckte Fläche eine integrale Information, welche bei den Laser-Messverfahren nur durch eine ausreichende Anzahl von Profilmessungen bzw. längere Profile unter statistischen Gesichtspunkten erreicht werden kann. In DIN EN ISO 13743-1 [7] wird eine Gesamtmessstrecke von 1 m als äquivalent angesehen. Anders als die Profilmessverfahren vermag jedoch das Ergebnis der Sandfleckmethode in keiner Weise die Art und Form der Textur zu beschreiben. Es lässt sich auch nicht nach Makro- und Mikrorauheit unterscheiden. Vermutlich werden deshalb aus Gründen der Vergleichbarkeit die Wellenlängen < 2,5 mm bei den Lasermessungen mittels Tiefpassfilter herausgefiltert. Dies wäre für andere Anwendungszwecke, wie z. B. für die Bestimmung der Mikrorauheit und der Adhäsionsfläche für Beschichtungen, ein großer Nachteil. Dies dürfte ein Grund dafür sein, warum die Auswertemethode gemäß DIN EN ISO 13743-1 [7] auf die Beurteilung von Fahrbahndecken beschränkt ist.

Für die Vergleichsuntersuchungen wurde das Profilmessgerät „E" an allen für das Sandfleckverfahren vorgesehenen Messpunkten eingesetzt. Das Prüfgerät „P" kam wegen des größeren Versuchsaufwands an den Autobahnen an sieben ausgewählten Platten zum Einsatz. Je Messstelle führt das Gerät „E" automatisch zwei Messungen (2 Umdrehungen) durch. Da sich die Position des Gerätes dabei nicht verändert, handelt es sich bei

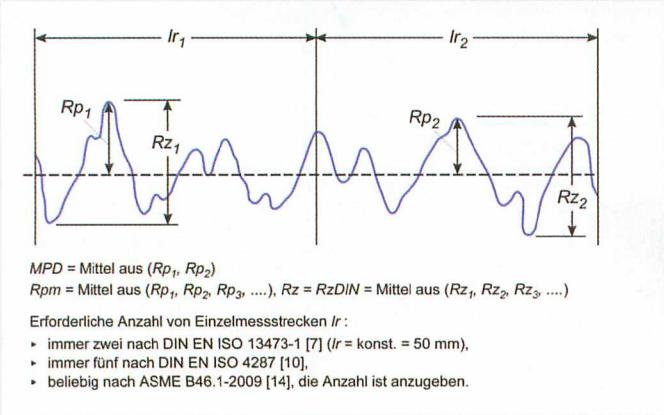



Bild 13: Definition der mittleren Profiltiefe MPD nach [7] im Vergleich zu Rpm und Rz nach [10] und [14]

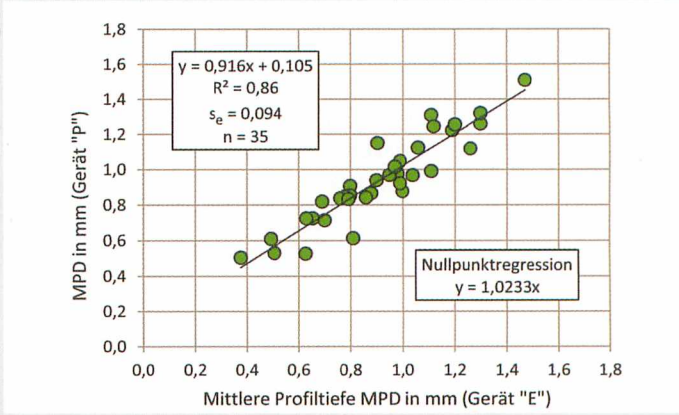



Bild 14: Korrelation zwischen den Ergebnissen beider Laser-Profilmessgeräte

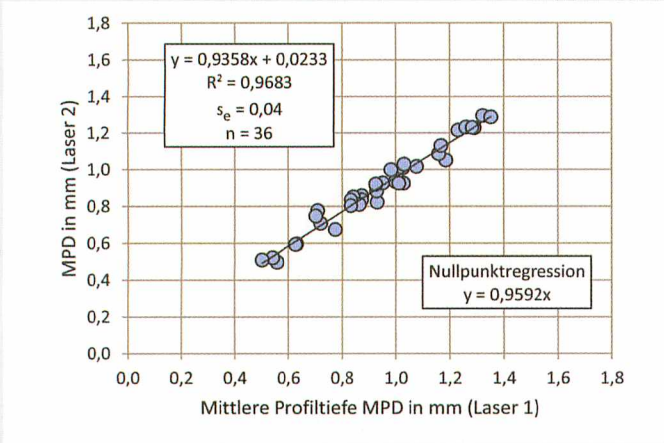



Bild 15: Laser-Profilmessgerät „P", Korrelation zwischen den Parallelmessungen der beiden Laser mit unterschiedlicher Auflösung (siehe Tabelle 1)

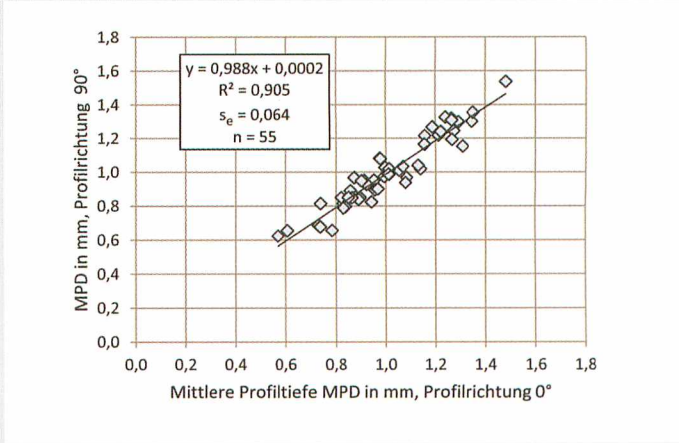



Bild 16: Laser-Profilmessgerät „P", Korrelation zwischen den beiden Prüfrichtungen 0° und 90° (vgl. Bild 11)

der 2. Messung lediglich um eine Wiederholungsmessung. Mit dem Gerät „P" erfolgten zunächst 10 Messungen (5 je Laser) parallel versetzt in eine Richtung, danach 10 weitere Messungen (5 je Laser) senkrecht zu den ersten (Bild 11). Auf diese Weise wurde ein Quadrat von etwa 200 mm · 200 mm erfasst. Mit den beiden parallel geführten Lasern ergaben sich somit 20 Messlinien und eine summierte Messtrecke von 4 m je Messpunkt. Mit dem Gerät „E" wurde je Messpunkt allerdings nur eine Messung mit einer Gesamtmessstrecke von 400 mm durchgeführt und damit der Forderung der DIN EN ISO 13473-1 [7] (Gesamtmessstrecke mindestens 1 m) nicht entsprochen. Trotz des Bestrebens, die Messungen für jedes Verfahren jeweils an den gleichen Flächen innerhalb der Messpunkte durchzuführen, waren jedoch, wie aus Bild 11 ersichtlich, gewisse verfahrensabhängige Unterschiede in der Prüfflächenabdeckung nicht zu vermeiden. An den Messpunkten P1, P2 und P4 jeder Fahrbahnplatte wurde zusätzlich die Profilspitzenzahl gemäß [18] bestimmt. An den Flugbetriebsflächen waren die Messpunkte nach einem vorhergehenden SKM-Test so ausgewählt worden, dass jeweils ein Bereich mit geringer und einer mit höherer Griffigkeit erfasst wurde. Aus Gründen der Vergleichbarkeit betrug der Abstand vom Plattenrand bis zur Prüfflächenmitte bei allen Prüfungen einheitlich 3 m. Während an Waschbetonoberflächen die Prüfrichtung der Laser-Messgeräte wegen der stochastischen Verteilung der Texturelemente an sich keine Rolle spielt (siehe Abschnitt 5.2), sind die Einflüsse der regelmäßigen Besenstrichtextur auf der Landebahn bei der Wahl der Messrichtung zu berücksichtigen (Bild 6). Da der Laser des Gerätes „E" eine Kreisbahn beschreibt und dabei das Rillenprofil sowohl parallel als auch senkrecht und schräg trifft, erfolgten die Messungen mit dem Gerät „P" aus Gründen der Vergleichbarkeit diagonal zur Rillenstruktur. Im Unterschied zu den Fahrbahndecken wurden je Messpunkt und je Laser 10 Profillinien von 200 mm Länge parallel angeordnet. Innerhalb dieser Messpunkte wurden auch jeweils 3 Messungen mit dem Gerät „E" durchgeführt.

Für den vorgesehenen Verfahrensvergleich wurde nicht nach den einzelnen Bauprojekten und Bauabschnitten unterschieden, sondern es wurden alle Daten so weit wie möglich gemeinsam ausgewertet.

## 5 Untersuchungsergebnisse

### 5.1 Volumetrisch ermittelte Texturtiefe

Das Bild 12 zeigt die Häufigkeitsverteilung der mit dem Sandfleckverfahren erzielten mittleren Texturtiefen. Insgesamt wurden 143 Ergebnisse ausgewertet. Der Mittelwert MTD über alle Untersuchungen betrug 0,99 mm, die Standardabweichung 0,21 mm. Mehr als 75 % der Resultate lagen im angestrebten Bereich zwischen 0,6 und 1,1 mm. Die extrem hohen Werte können durch einen zu frühen Ausbürstzeitpunkt verursacht worden sein.

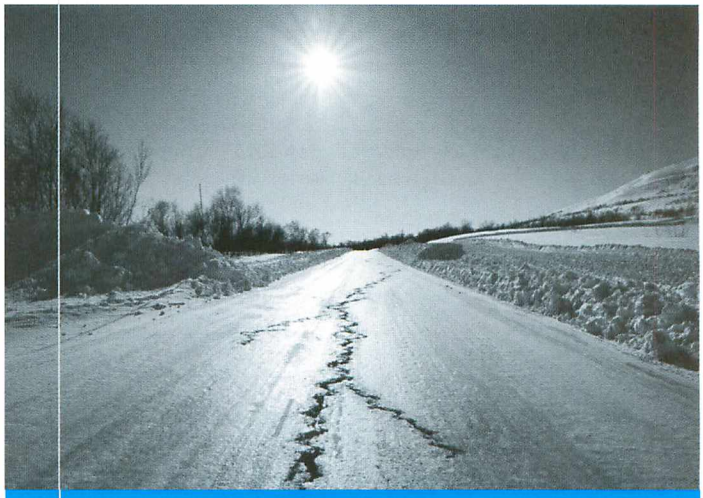
### 5.2 Profilmessverfahren – Prüfeinflüsse

Für den Vergleich der beiden Laser-Profilmessgeräte sollten zunächst etwaige Einflüsse der Auswertemethode erkundet und nach Möglichkeit vermieden werden. Deshalb wurden die Messdaten beider Messgeräte nach DIN EN ISO 13473, Anhang E, Möglichkeit 1 [7] mit dem Programm Omnisurf [4] ausgewertet (Bild 13). Zur Kontrolle wurden die so berechneten Ergebnisse des Gerätes „E" mit den durch den internen Mikroprozessor berechneten Anzeigewerten verglichen. Wie bereits in Abschnitt 3.3 ausgeführt, unterscheiden sich beide Auswertungen praktisch nicht (Bild 5). Da allerdings die Profillinien beider Lasermessgeräte unterschiedlich große Bereiche abdecken (Bild 11), waren gewisse Abweichungen zwischen den Messergebnissen der Geräte „E" und „P" unvermeidlich. Sieht man einmal von den Streuungen um die Ausgleichsgerade ab, die sich auch in dem eher mäßigen Bestimmtheitsmaß $R^2$ und Standardfehler der Schätzung $s_e$ widerspiegeln, so liefern beide Geräte beinahe den gleichen Trend (Bild 14). Die Steigung der durch Nullpunktregression berechneten Geraden liegt nahe bei 1,0. Demnach bestehen keine prinzipiellen Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Messgeräte. Trotz des größeren Messbereichs und der damit verbundenen geringeren Auflösung des Lasers 2 beim Gerät „P" unterscheiden sich die Ergebnisse kaum von denjenigen, die mit Laser 1 gewonnen wurden (Bild 15), was vor allem daran liegen dürfte, dass die Mikrorauheit, bei der sich die höhere Auflösung des Lasers 1 bemerkbar machen könnte, wegen des vorgeschriebenen Tiefpassfilters von 2,5 mm hier kaum eine Rolle spielt. Tendenziell liefert Laser 1 etwas höhere Werte als Laser 2. Bei der Profilmessung wird davon ausgegangen, dass sie bei genügender Anzahl an Profillinien von ausreichender Länge die Textur innerhalb eines Messpunktes hinreichend repräsentiert. Gemäß DIN EN ISO 13473-1 [7] genügen dafür Messprofile mit einer Gesamtlänge von 1,0 m (beim Gerät „P" entsprechend 5 Profillinien), Bei stochastischen Verteilungen wie sie bei Waschbetonoberflächen vorliegen, dürfte an sich auch die die Prüfrichtung keine Rolle spielen. Diese Annahme konnte mit dem Profilometer „P" durch Vergleich von je 5 senkrecht zueinander verlaufenden Profillinien bestätigt werden (Bild 16). Dies belegt außerdem die Reproduzierbarkeit der Versuche. Ein regelmäßiges Prüfraster wie in Bild 11 empfiehlt sich dennoch, damit Auswahl der Profillinien für die Prüffläche repräsentativ ist und nicht von subjektiven Auswahlkriterien geprägt wird.

### 5.3 MPD im Vergleich zu MTD

Die Resultate der Laser-Profilmessungen (MPD) korrelieren sehr gut mit denen der volumetrischen Texturtiefenbestimmung (MTD/Sandfleck, Bilder 17 und 18). Dies gilt für beide Laser-Messgeräte, deren gute Übereinstimmung untereinander sich bereits beim direkten Vergleich gezeigt hat (Bild 13). Die Absolutbeträge stimmen allerdings nicht ganz überein, das Niveau der MPD-Werte liegt ca. 12 % (errechnet mittels Nullpunktregression) unter dem der MTD-Werte. Eine Umrechnung in ETD (estimated texture depth) mit der in DIN EN ISO 13473-1 [7] empfohlenen Formel wurde nicht vorgenommen, weil diese nach den vorliegenden Messergebnissen völlig unzutreffend ist. Demnach müssten

forum strasse
Strassenbau-Tag Olten 2014



Asphaltstrassen - Frost und Kälte

- Frost im Unterbau
- Kälteverhalten von Asphalt (Prüftechnik, Bindemittel-Modifikation)
- Mischgutoptimierung
- Rissüberbrückende Schichten
- Internationale Referenten
- Simultan-Übersetzung

...kommen Sie am 20. März 2014 nach Olten (Schweiz)

Anmeldung und weitere Informationen:
IMP Bautest AG
CH-4625 Oberbuchsiten
Telefon +41 62 389 98 99
Fax +41 62 389 98 90
info@impbautest.ch
www.impbautest.ch

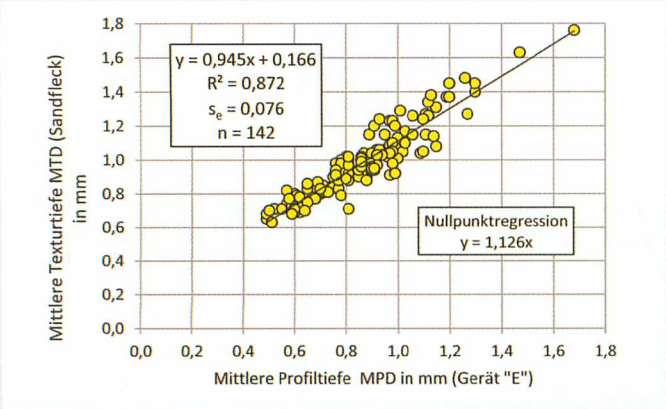



Bild 17: Korrelation zwischen den mittleren Profiltiefen MPD des Laser-Profilmessgerätes „E" und den mittleren Texturtiefen MTD des Sandfleckverfahrens

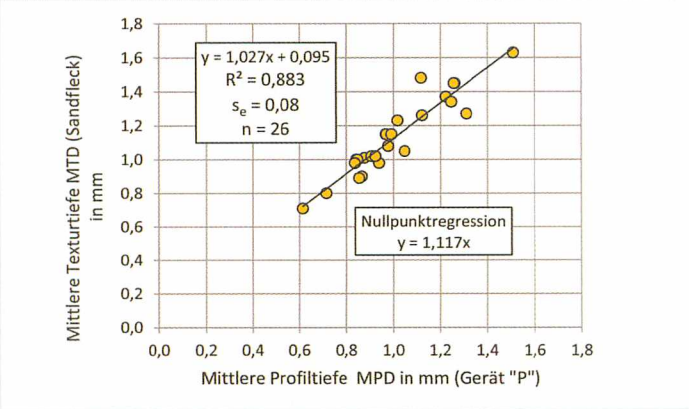



Bild 18: Korrelation zwischen den mittleren Profiltiefen MPD des Laser-Profilmessgerätes „P" und den mittleren Texturtiefen MTD des Sandfleckverfahrens

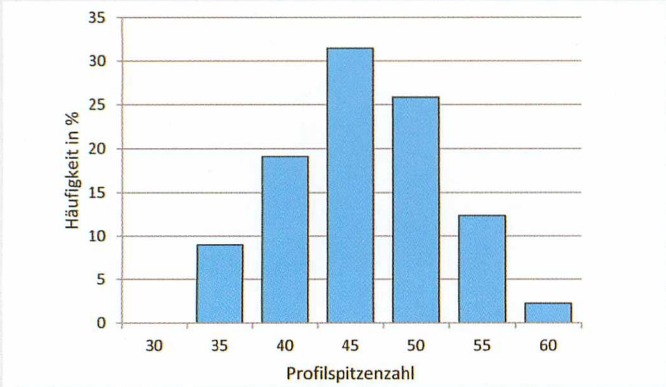



Bild 19: Häufigkeitsverteilung der Profilspitzenzahlen bei Auswertung von 89 Messstellen

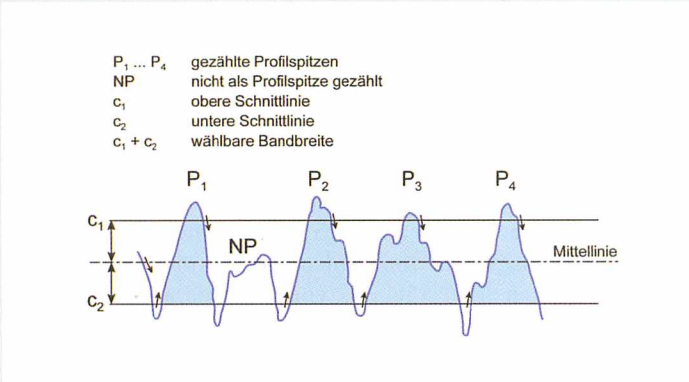



Bild 20: Anzahl der Profilspitzen auf der gesamten Auswertestrecke (Messstrecke ln) nach DIN EN 10049 [25] und ASME B46.1-2009 [14].

zur Abschätzung der mittleren Texturtiefe MTD alle MPD-Werte > 1,0 mm sogar abgemindert statt erhöht werden. Die Berechnung von ETD steht außerdem im krassen Widerspruch zu der Umrechnung von Rp in Rt gemäß Heft 600 DAfStb [22] – ein Unterschied, der viel zu groß ist, als dass er sich mit Hinweis auf differierende Prüfdetails in den unterschiedlichen Prüfvorschriften für Straßenbau und Ingenieurbau erklären ließe. Beide Umrechnungsvarianten sollten deshalb einer grundlegenden Überprüfung unterzogen werden.

### 5.4 Griffigkeit und Oberflächentextur

Wie schon in [23] festgestellt, besteht zwischen den bisher ermittelten Kennwerten für die Oberflächentextur und der mit dem Pendeltest bestimmten Griffigkeit (SRT) kein nennenswerter Zusammenhang. Abgesehen davon, dass aus den in den Abschnitten 3.4 und 4 genannten Gründen die Prüfrichtung der Lasergeräte nicht mit der des Pendels übereinstimmte, sondern mehr oder weniger schräg dazu angeordnet war, ist für die SRT-Werte auch die Mikrorauheit und die Ausprägung des Profils (rundkuppig, plateau- oder sägezahnförmig) bedeutsam. Hinzu kommt, dass die SRT-Werte sehr stark von einzelnen Profilspitzen bzw. Graten beeinflusst werden, während die Mittelwertbildung bei der Berechnung von MPD diesen Einfluss weitgehend egalisiert. Außerdem wird die von den Lasersensoren erfasste Mikrotextur durch Tiefpassfilterung nach DIN EN ISO 13473-1 [7] entfernt. Für den Vergleich mit SRT wäre die Auswertung demnach zu modifizieren. Außerdem könnten neben MPD auch andere Rauheitsparameter wie z. B. die Schiefe Rsk und die Steilheit Rku der Amplitudendichtekurve herangezogen und mittels multipler Korrelation ausgewertet werden, um besser von den Textur- auf Anwendungseigenschaften wie z. B. Griffigkeit schließen zu können. Letztgenannte Parameter nach [10] bzw. [14] beschreiben die Form des Rauheitsprofils (Rsk: z. B. zerklüftet oder füllig plateauförmig (Bild 22), Rku: scharfe Spitzen oder runde Kuppen). Vieles deutet deshalb darauf hin, dass auch in diesem Zusammenhang die Potenziale der elektrooptischen Texturmessung bei Weitem noch nicht ausgeschöpft sind.

### 5.5 Profilspitzenzahl und Möglichkeiten der elektronischen Erfassung

Das Bild 19 zeigt die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Profilspitzenzahlen. Insgesamt wurden 89 Messergebnisse ausgewertet. Der Mittelwert über alle Untersuchungen lag bei 44, und die Standardabweichung bei 6. Mit einem Minimalwert von 33 und einem Maximum von 56 betrug die Spannweite 23. Der Richtwert von 60 gemäß [18] wurde somit in keinem Fall erreicht.

Wie aus den Veröffentlichungen [19] und [20] hervorgeht, ist diese Diskrepanz kein Einzelfall, sondern eher symptomatisch für die Anwendung dieses Kriteriums in der Praxis. Die Bestimmung der Profilspitzenzahl ist nämlich nicht nur ein mühsames Unterfangen, sondern auch extrem von subjektiven Einflüssen abhängig. Die Einflussnahme des Prüfenden beginnt bereits bei der Auswahl der Prüfflächen von nur 25 cm² und erreicht ihren Höhepunkt bei der Entscheidung,

welches Korn als größer oder kleiner als 4 mm anzusehen ist, insbesondere bei solch geringem Kontrast zwischen Korn und Matrix wie es in Bild 8 gezeigt wird. Auch der Begriff „Profilspitze" ist angesichts rein visueller Entscheidungsmöglichkeiten im wahrsten Sinne des Wortes relativ. Es ist allein nach visuellen Kriterien wohl kaum möglich, z. B. eine Erhebung, die in Bild 20 mit „NP" bezeichnet wird, eindeutig von gültigen Profilspitzen abzugrenzen. So wundert es nicht, dass bei den vorliegenden Untersuchungen zwischen der Profilspitzenzahl und elektrooptisch ermittelten Profilparametern wie die Spitzenzahl RPc und mittlere Rillenbreite Rsm [24] selbst nach verschiedenen Varianten der Tiefpassfilterung zum Entfernen von Profilelementen kleiner 4 mm praktisch keine Korrelation zu erkennen war. Dabei wäre es von großem Vorteil, wenn die mit der Profilspitzenzahl angestrebte Oberflächencharakterisierung objektiv, schnell und sozusagen als Beigabe zur Texturtiefenbestimmung vorgenommen werden könnte. Sehr gute Möglichkeiten bestehen dafür bei 3-D-Texturmessungen z. B. mittels Streifenlichtprojektion (vgl. [23]), weil hiermit auch die flächige Ausdehnung von Texturelementen erfasst wird. Wenn es jedoch vor allem darauf ankommt, plateauförmige Oberflächen oder zerklüftete Flächen mit nur vereinzelten Spitzen zu detektieren und zu unterscheiden, so liefern auch die zweidimensional z. B. von Omnisurf standardmäßig berechneten Parameter Rpm, Rz (Bild 13) und Rsk (Bilder 21 und 22) brauchbare Aussagen. In Bild 21 sind 3 Profilbeispiele aufgeführt, die im Bereich Rpm/Rz < 0,5, 0,5 und > 0,5 liegen. Dabei ist zu erkennen, dass ein Verhältniswert deutlich unter 0,5 plateauförmige Oberflächen beschreibt und ein Verhältniswert deutlich größer 0,5 auf vereinzelte Profilspitzen schließen lässt [24]. Ähnliche Aussagen können mit dem Parameter Rsk getroffen werden (Bilder 21 und 22). Anzustreben sind Resultate von Rpm/Rz < 0,5 bzw. Rsk < 0, weil damit bei ausreichendem MPD plateauförmige Profile mit hohem Traganteil und trotzdem ausreichender Drainagewirkung erzielt werden.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Hinsichtlich Kompaktheit und Bedienungsfreundlichkeit sind Laser-Profilmessgeräte inzwischen eine echte Alternative zum Sandfleckverfahren. Wie in diesem Beitrag gezeigt werden konnte, korrelieren die Ergebnisse sehr gut mit denen des Sandfleckverfahrens, unterliegen zudem kaum Prüfereinflüssen, sind sehr gut reproduzierbar und liefern eine Reihe weiterer Informationen sowie Anwendungs- und Auswertemöglichkeiten. Da sich die Messungen in Sekundenschnelle durchführen lassen, eignen sie sich hervorragend für die Steuerung der Oberflächentextur in der Erstprüfung und während der Bauausführung. Bei vergleichbaren technischen Daten und Auswertemethoden stimmen auch die Resultate unterschiedlicher Messgeräte recht gut überein. Auf Waschbetonoberflächen spielt die Bewegungsrichtung der Laser (ob kreis- oder linienförmig) keine Rolle, bei rillenförmiger Textur ist die Interpretation der kreisförmigen Profile schwieriger. Angesichts der Zeitersparnis, Messge-

All roads lead to Kielce!

14-16 may 2014, Kielce, Poland

TargiKielce
EXHIBITION & CONGRESS CENTRE

AUTOSTRADA-POLSKA
20th International Fair of Road Construction Industry

III SALON KRUSZYW
Salon Kruszyw
in a co-operation with IMBiGS

MASZBUD
www.maszbud.com

Dynamic shows of construction machinery
SHOW AFTER FAIR
17.05.2014

ROTRA
www.rotra.targikielce.pl

TRAFFIC -EXPO-TIL
www.traffic-expo.pl

CO-OPERATION
Road and Bridge Research Institute
www.ibdim.edu.pl

www.autostrada-polska.pl

TARGI KIELCE SA, ul. Zakładowa 1, 25-672 Kielce - Poland

Projects Director - Bogusława Grzechowska
tel. +4841 365 12 10, grzechowska.b@targikielce.pl

SPECIAL PRICE
UNTIL 31st JANUARY 2014

Bild 21: Bewertung von drei unterschiedlichen Texturprofilen mit dem Parameter Rsk und dem Parameterverhältnis Rpm/Rz

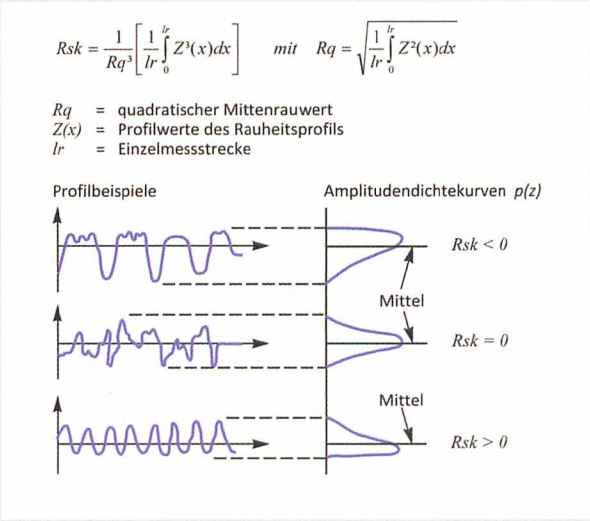



Bild 22: Schiefe Rsk der Amplitudendichtekurven nach DIN EN ISO 4287 [10] und ASME B46.1-2009 [14]

nauigkeit und möglichen zusätzlichen Informationen handelt es sich um eine sinnvolle Investition zur Qualitätssicherung auf der Baustelle. Es hat sich gezeigt, dass die Umrechnungsfaktoren für MPD in ETD [7] bzw. Rp in Rt [22] einer grundlegenden Überprüfung bedürfen. Die Profilspitzenzahl oder wichtige Gebrauchseigenschaften wie die Griffigkeit (SRT) können bei Auswertung nach DIN EN ISO 13473-1 [7] zurzeit noch nicht aus den Laser-Texturprofilen abgeleitet werden. Die Möglichkeiten dieser Messmethode und der zugehörigen Auswerteverfahren beinhalten aber große Potenziale, die noch längst nicht ausgeschöpft sind.

### Literaturverzeichnis


1 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Verkehrsflächen aus Beton. Köln: FGSV Verlag, 2009.

2 DIN EN 13036-1: 2010-10: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mithilfe eines volumetrischen Verfahrens.

3 Schmidt, T.: Verfahren zur Bestimmung von Textur- und Griffigkeitskennwerten von Fahrbahndecken aus Beton, Bachelor-Thesis (unveröffentlicht), Fachhochschule Frankfurt am Main, 2012.

4 Digital Metrology Solutions, Inc.: www.digitalmetrology.com.

5 Gluth, G. J. G.; Vogler, N.; Gardei, A.; Kühne H.-C.: Laserbasiertes Messverfahren zur Rautiefe-Bestimmung. 52. DAfStb-Forschungskolloquium, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, 2011.

6 Bundesanstalt für Straßenwesen, ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Stand 12/2012.

7 DIN EN ISO 13473-1: 2004-07: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen, Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe.

8 DIN EN ISO 13473-2: 2004-07: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen. Teil 2: Begriffe und grundlegende Anforderungen für die Analyse von Fahrbahntexturprofilen.

9 DIN ISO 13473-3: 2004-07: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen. Teil 3: Anforderungen an und Einteilung von Profilometern.

10 DIN EN ISO 4287: 2010-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit.

11 DIN EN ISO 4288: 1998-04: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit.

12 DIN EN ISO 13565-1: 1998-04: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 1: Filterung und allgemeine Messbedingungen.

13 DIN EN ISO 13565-2: 1998-04: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung.

14 ASME B46.1-2009: Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay), Date of Issuance: August 20, 2010.

15 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: ZTV Beton-StB 07: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndekken aus Beton. Köln: FGSV Verlag, 2007.

16 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: TP Griff-StB (SRT): Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Messverfahren SRT. Köln: FGSV Verlag, 2004.

17 DIN EN 13036-4: 2011-12: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 4: Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen: Der Pendeltest.

18 RVS 08.17.02: Betondecken, Deckenherstellung, Wien: FSV-Verlag, Ausgabe 03/2007.

19 Wieland, M.; Ehrlich, N.: Betondecken mit CEM II/CEM III-Zementen - Zustandsbewertung. In: Griffig (2009), Nr. 2, S. 2-9.

20 Wieland, M.: Waschbeton - Resümee und Perspektiven. In: Straße und Autobahn, 63 (2012), Nr. 9, S. 569-580.

21 TP Beton-StB 10: Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. Köln: FGSV Verlag, 2010.

22 DAfStb-Heft 600: Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2), 2012.

23 Schulz, R.-R.: Roughness and anti-slip properties of concrete surfaces. Electro-optical measuring systems to determine roughness parameters. (Rauheit und Rutschhemmung von Betonoberflächen. Elektrooptische Messsysteme zur Ermittlung von Rauheitsparametern). In: BFT International, 74 (2008), Nr. 9, S. 4-15.

24 Volk, R.: Rauheitsmessung - Theorie und Praxis. Berlin - Wien - Zürich: Beuth-Verlag, 2013.

25 DIN EN 10049: 2006-02: Messung des arithmetischen Mittenrauwertes Ra und der Spitzenzahl RPc an metallischen Flacherzeugnissen.