

Alternativen zum Sandflächenverfahren

Fortschritte bei der Rauheitsbewertung von Betonoberflächen

Rolf-Rainer Schulz, Frankfurt

Die Rauheitsbewertung von Betonoberflächen erfolgt im Regelfall mit dem Sandflächenverfahren. Andere Prüfmethode sind zwar nach den einschlägigen Vorschriften zulässig, werden aber dort nicht näher beschrieben. Zweifel an der Relevanz des Sandflächenverfahrens gibt es kaum, weil das Verfahrensprinzip sehr plausibel erscheint. Die einfache Anwendung und die geringen Ausstattungserfordernisse erklären die hohe Akzeptanz in der Baupraxis. Allerdings eignet sich das Verfahren nur für horizontale oder schwach geneigte Flächen. Bei senkrechten Flächen und Bauteilunterseiten sind ersatzweise Vergleichsmuster heranzuziehen. Zu bemängeln sind außerdem starke Prüfeinflüsse und die begrenzte Aussagekraft der Ergebnisse. Trotz dieser Einschränkungen hält sich die Suche nach Alternativen in Grenzen. Offenbar steht die Beliebtheit und Akzeptanz des Sandflächenverfahrens der Nachfrage nach neuen, leistungsfähigeren Prüfmethode entgegen. Dieser Beitrag zeigt, dass Fortschritte bei der Rauheitsbewertung von Betonoberflächen notwendig und möglich sind.

1 Anforderungen an die Rauheit

1.1 Untergrund für Betonersatzsysteme und Beschichtungen

Die Anforderungen an die Rauheit des Untergrunds ergeben sich aus den aufzutragenden Produkten und Systemen. Nach [1] muss der Betonuntergrund für örtliche Ausbesserungen bzw. flächige Beschichtungen „eine dem zu verwendenden Stoff angepasste Rauheit aufweisen“. Gemäß [2] muss „die Oberflächenbeschaffenheit der Betonunterlage das Aufbringen einer geschlossenen annähernd

gleichmäßigen und fest haftenden Schicht ermöglichen“. Diese Formulierungen zielen vor allem auf die Einhaltung von Schichtdicken und auf die Ermittlung von Schichtdickenzuschlägen. Die Auswirkungen auf das Verbundverhalten werden nicht angesprochen.

1.2 Betonoberflächen für Schubkraftübertragung

Im Hinblick auf die Schubkraftübertragung zwischen zu unterschiedlichen Zeitpunkten

hergestellten Betonierabschnitten wird die Oberfläche des Betonuntergrunds nach [3,4] in vier Kategorien eingeteilt. Je nach Kategorie dürfen bestimmte Rauheitsbeiwerte für die Berechnung der Verbundwirkung einer nachträglich aufgetragenen Betonerfüllung in Ansatz gebracht werden. Demnach ist für den Adhäsionsanteil des Schubverbundes die Rauheit des Altbetons vor dem Aufbringen der Betonerfüllung bedeutsam, während für den Reibungsanteil bei gerissener Fuge die sich ausbildende Form und Verzahnung der

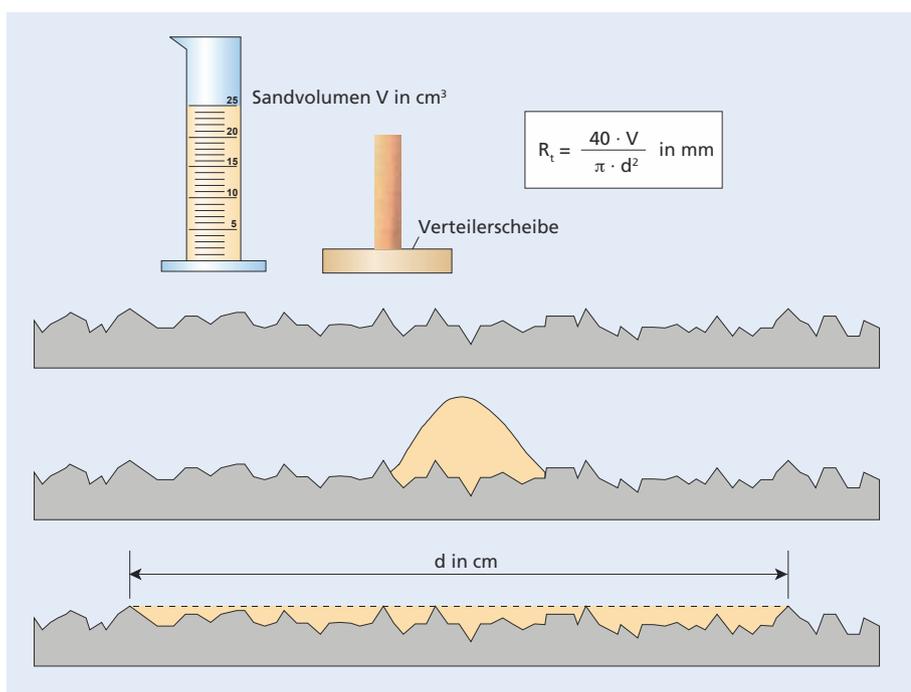


Bild 1: Das Prinzip des Sandflächenverfahrens

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Rolf-Rainer Schulz studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen. Nach der Promotion am Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen war er als Leiter der Abteilung Betoninstandsetzung am Institut für Baustoffprüfung Waldkirch tätig. Seit 1989 ist er Professor im Fachbereich 1 – Architektur, Bauingenieurwesen, Geomatik – der Frankfurt University of Applied Sciences und leitet dort u.a. das Labor für Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Rolf-Rainer Schulz ist Mitverfasser des Handbuchs Oberflächenbearbeitung Beton.



Bild 2: Beispiel eines Sandflecks für die Bestimmung der Rautiefe R_t mit Abweichungen von der Kreisform bei grobrauer Oberfläche

Rissufer maßgebend ist. Bei der Verbundwirkung im ungerissenen Zustand ist zwischen „spezifischer“ und „mechanischer“ Adhäsion zu unterscheiden. Die „spezifische“ Adhäsion wirkt unabhängig von der Oberflächengestalt des Untergrunds und beruht auf interatomaren und intermolekularen Bindungskräften. Sie kommt vor allem bei sehr glatten Oberflächen zum Tragen. Im Gegensatz dazu hängt die „mechanische“ Adhäsion vor allem von der Mikrostruktur des Untergrunds ab. Diese wird bei zunehmender Rauheit wirksam. Hierbei soll die flüssige Komponente des aufgetragenen Systems in die Poren und Vertiefungen des Substrats eindringen und sich dort im ausgehärteten Zustand verankern und verzahnen. Bei mineralischen Bindemitteln überwiegt der Einfluss der „mechanischen“ Adhäsion, welche jedoch durch die Größe der Bindemittelpartikel und deren Eindringmöglichkeit begrenzt ist [5,6]. Demnach hängt die „mechanische“ Adhäsion vor allem von der Größe, Form und Anzahl der Oberflächenporen sowie von der makroskopischen und mikroskopischen Rauheit des Untergrunds ab [5,6]. Insofern kommt sowohl der Untergrundbearbeitung und der sich daraus ergebenden Topografie der Betonoberfläche als auch der Viskosität und der makromolekularen Beschaffenheit des aufzutragenden Stoffes eine entscheidende Bedeutung zu [7]. Die Möglichkeit, solche mikrostrukturellen Gegebenheiten des Substrats messtechnisch zu erfassen, hängt von der Auflösung des Messverfahrens ab. Sie ist dadurch stets mehr oder weniger begrenzt und beim Sandflächenverfahren sogar ausgeschlossen (Bilder 1 bis 3).

Die Rauheitskategorien „sehr glatt“ und „glatt“ werden entsprechend nicht quantifiziert. Die Beiwerte für Adhäsion und die Reibung dürfen hier ohnehin nur sehr gering angesetzt werden. Für die Kategorien „rau“ und „verzahnt“, bei denen es vor allem auf den Formschluss ankommt, werden hingegen quantitative Anforderungen gestellt (Bild 4).

Die globalen Rauheitsanteile (Welligkeit mit Wellenlängen > 100 mm) tragen nach [9] wenig zur Adhäsions- und Reibungswirkung in Fugen bei. Maßgebend sind vielmehr die Texturelemente im μm - und mm -Bereich. Dazu gehören Poren ebenso wie freigelegte

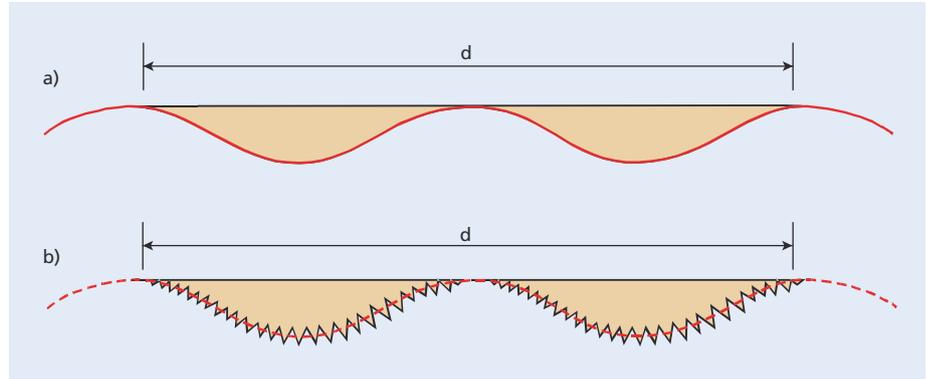


Bild 3: Völlig verschiedene Adhäsionsflächen a) und b) bei gleicher Rautiefe R_t nach dem Sandflächenverfahren [8]

Gesteinskörner und Riefen. Die Rauheit kann durch mechanische Bearbeitung gesteuert werden. Im frischen Zustand lässt sich die Oberfläche z.B. mit einem Stahlrechen aufrauen (s. Bild 4), wobei die erzeugten Rillen senkrecht zu Hauptschubrichtung verlaufen sollen. Bei steifen Betonen kommen auch rüttelraue Oberflächen in Betracht. Bei weichen Betonen ist die Oberfläche zu glatt. Im erhärteten Zustand haben sich das Strahlen mit festen Strahlmitteln und ganz besonders das Hochdruckwasserstrahlen bewährt. Hierbei spielt neben der Festigkeit des Betonuntergrunds auch die Strahlintensität eine Rolle.

2 Die Prüfung der Rauheit

2.1 Bewertungsparameter

Für die Einstufung in Rauheitskategorien nach [3,4] dürfen außer der mittleren Rautiefe R_t nach dem Sandflächenverfahren auch alternative Rauheitsparameter verwendet werden. Dazu gehört vor allem die aus der Normenreihe für geometrische Produktspezifikationen [10] bekannte Höhe der größten Profilspitze (veraltet Profilkuppenhöhe) R_p , welche der mittleren Profiltiefe MPD nach [11] entspricht, die durch Profilmessung ermittelt wird und sinngemäß mit R_t übereinstimmt. Die Umrechnung von R_p aus Profilmessungen nach Eliminierung der Welligkeit in R_t (Sandfleck) geht aus Bild 4 hervor und bezieht sich auf eine in [12] veröffentlichte Forschungsarbeit. Dazu ist allerdings anzumerken, dass diese Arbeit dem technischen Entwicklungsstand vor 20 Jahren entspricht und die Korrelation allein auf 10 Messergebnissen beruht. Neuere Untersuchungen [13,14,15,16] stimmen damit nicht überein.

2.2 Das Sandflächenverfahren

Für die Beurteilung der Rauheit von Betonoberflächen wird seit etwa fünf Jahrzehnten weltweit das „Sandflächenverfahren“ eingesetzt. Alternative Bezeichnungen sind „volumetrisches Verfahren“ oder „Sandfleckverfahren“ nach der englischen Bezeichnung „sand patch test“. Dabei wird eine abgemessene Menge von feinem Sand oder Glasperlen zu einem kreisförmigen Fleck verteilt, dessen Durchmesser zu bestimmen ist. Das Volumen des verteilten Materials dividiert durch die

bedeckte Fläche, ergibt die mittlere Rautiefe R_t [1,2] bzw. die mittlere Texturtiefe MTD [17] (s. Bilder 1 und 2). Nach [17] liegt der Gültigkeitsbereich zwischen den Rautiefen $R_t = 0,25$ mm und 5 mm. Je nach Anwendungsgebiet haben sich gegenüber den ursprünglichen Festlegungen von Kaufmann [18] einige Varianten der Prüfungsdurchführung herausgebildet, die die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beeinträchtigen. Dazu gehören unterschiedliche Arten und Durchmesser von Verteilerscheiben sowie unterschiedliche Prüfmedien (Sand oder Glaskugeln mit je nach Prüfvorschrift differierenden Korngrößenbereichen) und voneinander abweichende Prüfprozeduren.

Die Tatsache, dass sich dieses Prüfverfahren nur für horizontale bzw. schwach geneigte Flächen eignet, dürfte zu den schwerwiegendsten Nachteilen dieses Verfahrens zählen. Verfahrensvarianten wie das Zementleimverfahren [19] oder die Prüfung an Replikaten der Oberfläche [20] haben sich wegen der Auswirkungen der Saugfähigkeit des Untergrunds bzw. wegen des Aufwands und der Unzulänglichkeiten bei der Abformung der Oberfläche nicht durchgesetzt. Die Bewertung von vertikalen Flächen oder Bauteilunterseiten konnte deshalb bisher (wenn überhaupt) nur qualitativ anhand von Vergleichsmustern durchgeführt werden.

Aufgrund des pauschalen volumetrischen Ansatzes liefert der ermittelte Rautiefen-

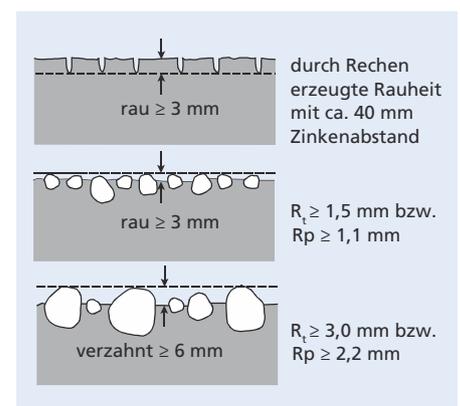


Bild 4: Auszug aus den Anforderungen gemäß DAfStb-Heft 600 [4]

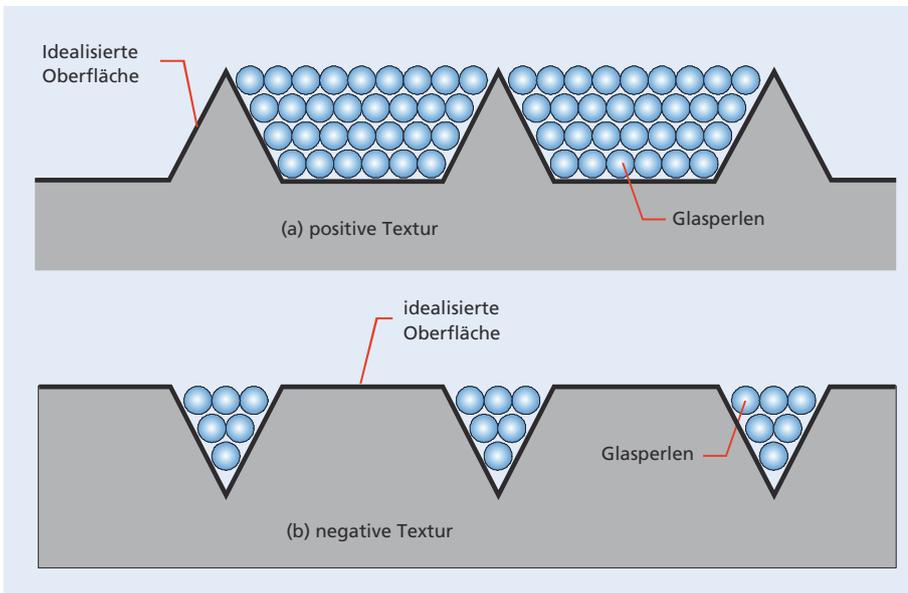


Bild 5: Auswirkungen positiver und negativer Texturen auf das Ergebnis beim Sandflächenverfahren (Prinzipdarstellung) [21]

kennwert R_t zwar brauchbare Informationen über den Materialverbrauch für Beschichtungen oder über die Aufnahmefähigkeit von Gleitschicht bildenden Medien wie Wasser, Öl oder Fett bei Fußböden, jedoch keine Aussage über die Art der Oberflächentextur.

Dafür ist das Verfahrensprinzip viel zu pauschal und undifferenziert (s. Bild 3). Aussagen über die Größe der Verbundfläche sowie über die Textur mit ihren Verzahnungseffekten sind daher nicht möglich. Die DIN EN 13036-1 [17] weist darauf hin, dass diese

Prüfmethode ausschließlich einen Mittelwert für die Tiefe der Makrotextur liefert und die Beschaffenheit der Mikrotextur nicht berücksichtigt. Besonders kritisch ist die Interpretation der Ergebnisse bei porösen Oberflächen und Oberflächen mit tiefen Rillen (vgl. negative Texturen, Bild 5) wie z.B. bei mittels Rechen erzeugten Oberflächentexturen der Kategorie „rau“ (s. Bild 4).

Für eine zuverlässige Beurteilung der mittleren Texturtiefe bei sehr ungleichmäßiger Oberfläche kann gemäß [17] innerhalb eines größeren Prüfbereichs ein recht großer Stichprobenumfang erforderlich sein. Nach [1,4] sind allerdings nur mindestens 3 Messungen je Prüfbereich vorgesehen. Bei der Auswahl der Messstellen soll darauf geachtet werden, dass diese für den Prüfbereich (Bauwerksteil) repräsentativ sind [1].

Die DIN EN 13036-1 [17] gibt an, dass sich die Standardabweichung nur um 1 % der ermittelten Texturtiefe erhöht, wenn die Prüfungen von mehreren und nicht nur von einer Person durchgeführt werden. Dies konnte weder von Zilch et al. [13] noch durch eigene Versuche bestätigt werden. Tatsächlich differieren die Ergebnisse bei verschiedenen Prüfern an ein und derselben Probeplatte z.T. um mehr als 25 %. Ursache dafür dürften neben den Einflüssen aus Verdichtung des Prüfmediums beim Befüllen des Messgefäßes sowie dem ausgeübten Druck beim Verteilen des Prüfmediums vor allem auch Unschärfen des Sandfleckrandes und Abweichungen des Sandflecks von der Kreisform (s. Bild 2) sein. Dieses Problem nimmt mit zunehmender Rauheit zu.

Die WU-Richtlinie [22] aber auch der Entwurf der neuen Instandsetzungsrichtlinie schreiben die Prüfung nach DIN EN 1766 [23] vor. Hierbei wird als Prüfmedium getrockneter Quarzsand mit einer Korngröße bis 0,1 mm eingesetzt. Vermutlich sollen durch das besonders feine Korn auch entsprechend kleine Vertiefungen erfasst werden. Dieser Korngrößenbereich unterscheidet sich gravierend von den anderen Prüfvorschriften. Nicht nur, dass diese Körnung in Deutschland im Handel schwer zu beschaffen ist – auch das Absieben aus leichter verfügbaren, benachbarten oder überlappenden Korngruppen gestaltet sich bei solchen Feinständen extrem zeitaufwendig. Außerdem sind bei derart feinen Quarzsanden gemäß den Technischen Regeln für Gefahrstoffe [24] besondere Staubschutzmaßnahmen vorzusehen. Es ist darüber hinaus anzunehmen, dass es hinsichtlich des Verteilungsverhaltens einen Unterschied macht, ob die Prüfsande aus natürlichen Vorkommen oder durch Zerkleinerungs- bzw. Mahlprozesse entstanden sind. Eigene Untersuchungen zeigen, dass bereits die Unterschiede in den Korngrößen des Sandes nach [1] (DAFStb: 0,1 – 0,3 mm) und nach [2] (ZTV-ING: 0,1 – 0,5 mm) die Prüfergebnisse bei Rautiefen unter 0,7 mm nennenswert beeinflussen können (Bild 6), während oberhalb davon keine Auswirkungen erkennbar sind. Erklärungen dafür liefert Bild 7. Bei gleichem Volumen ergeben nämlich kleinere Körner eine dünnere Schicht, die

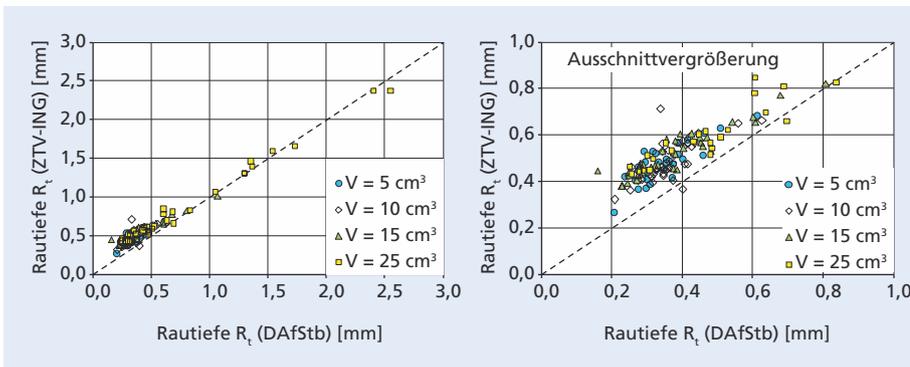


Bild 6: Vergleich der Rautiefen R_t bei Prüfung nach DAFStb-Rili SIB [1] und ZTV-ING [2]

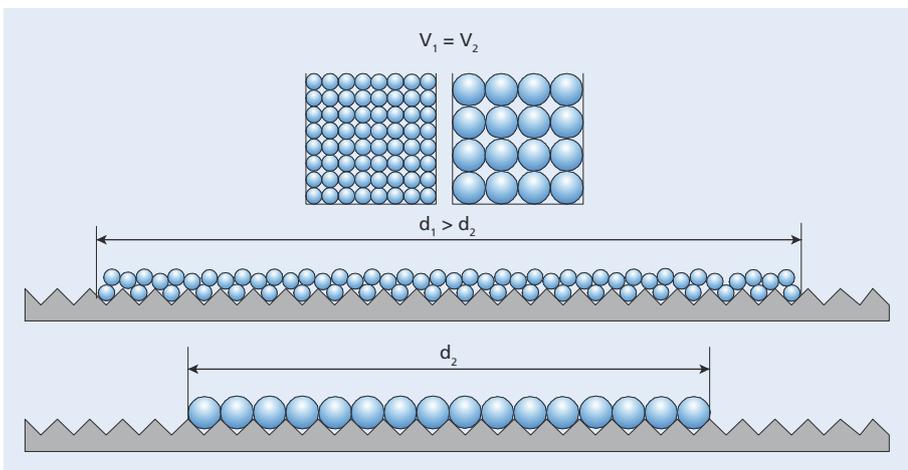


Bild 7: Auswirkungen des Korndurchmessers bei gleichem Volumen des Prüfmediums auf die Größe des Sandflecks (Prinzipdarstellung) [16]

sich auf eine größere Fläche verteilt. Daraus errechnet sich eine kleinere Rautiefe. Wenn sich die Prüfprozedur nach DIN EN 1766 [23] mit einem Größtkorn von 0,1 mm durchsetzen sollte, wird die Prüfung nicht nur schwieriger durchzuführen sein, sondern es wird auch die Vergleichbarkeit mit früheren Untersuchungen beeinträchtigt, bei denen das Größtkorn des Sandes 0,3 mm [1] bzw. 0,5 mm [2] betrug.

2.3 Elektrooptische Profilmessverfahren

Nach DIN EN ISO 13473-1 [11] können Profilmessverfahren unter bestimmten Voraussetzungen volumetrische Verfahren ersetzen. In Betracht kommen vor allem berührungslos arbeitende elektrooptische Messverfahren, insbesondere Laserprofilmessverfahren (Bilder 8 bis 10). Diese sind auch an senkrechten Flächen oder über Kopf einsetzbar. Sie unterliegen kaum subjektiven Einflüssen und sind daher weitgehend vom Prüfer unabhängig. Sie können hohe Messgenauigkeiten sowie eine hohe Wiederhol- und Vergleichspräzision erzielen und die Ergebnisse ermöglichen eine sehr detaillierte sowie vielfältige Beschreibung und Bewertung der Oberflächentextur.

Allerdings müssen auch hier einige Nachteile bzw. Einschränkungen in Kauf genommen werden. Dazu gehören: Hohe Gerätekosten, mögliche Messfehler oder Ungenauigkeiten an sehr steilen (schroffen) Profilen und Kanten durch Abschattungen, mögliche Messfehler bei glasigen durchscheinenden oder stark reflektierenden Oberflächenpartikeln (z.B. Glimmer) sowie mögliche Messfehler bei Nässe oder starken Fremdlichteinwirkungen. Darüber hinaus ist die Auswertung insbesondere wegen des großen Datenumfangs und der erforderlichen Datenfilterung zur Eliminierung des Wellenanteils aufwendiger. Hinzu kommt, dass es bisher noch keine oder nur unzureichende Standardisierungen für die Auswertung und -Interpretation der Messdaten im Hinblick auf das Verbundverhalten gibt.

Die meisten dieser Probleme sind jedoch durch entsprechende Vorkehrungen lösbar. So lassen sich die Messfehler bei transparenten oder reflektierenden Partikeln durch den Einsatz von blauen Lasern eindämmen. Die Gerätekosten werden mit zunehmender Zahl eingesetzter Einheiten sinken und zum Teil durch die schnelle und rationelle Prüfungsdurchführung wettgemacht. Für die Standardisierung müssen zwar noch einige Erfahrungen zusammengetragen werden, doch kann man vorerst auf die Standards aus dem Straßenbau [11] und auf die umfangreichen und ausgereiften Kenntnisse bei der Rauheitsbewertung in der Feinwerktechnik [10] zurückgreifen, wenn die Größenordnungen sinnvoll angepasst werden.

3 Durchgeführte Untersuchungen

3.1 Berührungslose Messverfahren im Vergleich zum Sandflächenverfahren

Da sich die Rauheitsanforderungen meist noch auf die Rautiefe nach dem Sandflächenverfahren beziehen, müssen die berührungs-

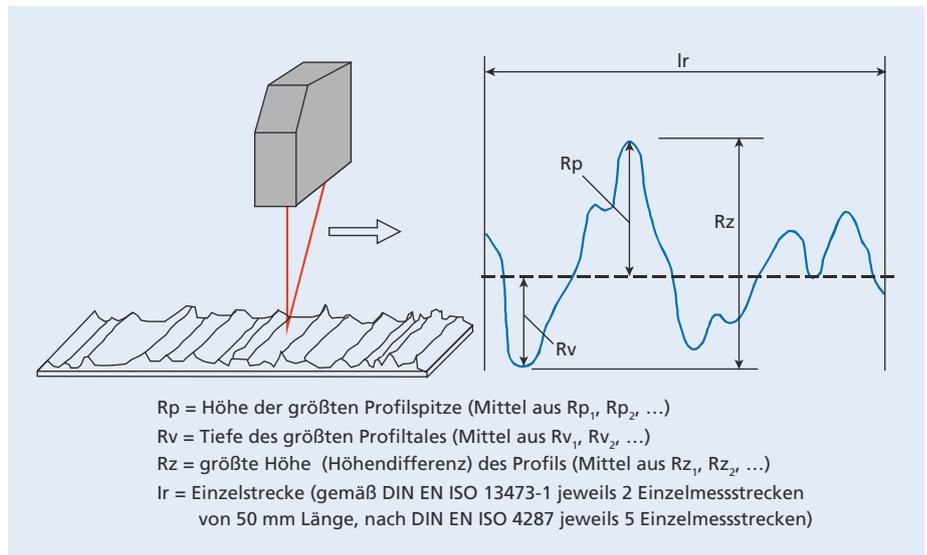


Bild 8: Messprinzip der Laser-Profilmessverfahren zur Ermittlung von Rauheitsparametern, Bezeichnungen nach DIN EN ISO 4287 [10]

los ermittelten Kennwerte Rp entsprechend Bild 4 in die maßgebenden Kennwerte R_v des volumetrischen Verfahrens übertragen werden. Gemäß DIN EN ISO 13473-1 [11] korrelieren die Parameter der Profilmessungen zwar recht gut mit den Rautiefen des volumetrischen Verfahrens, sie sind aber je nach eingesetzter Technik nicht immer untereinander vergleichbar. So muss zum Beispiel zwischen solchen Messverfahren unterschieden werden, bei denen die Profilmessung geradlinig oder entlang einer Kreisbahn erfolgt.

Beide Aspekte wurden in einem umfangreichen Praxistest untersucht [14]. Einerseits sollte herausgefunden werden, inwieweit die Ergebnisse mobiler elektrooptischer Messverfahren mit denen des Sandflächenverfahrens vergleichbar sind und ob sich durch die schnellere Prüfungsdurchführung bessere Möglichkeiten zur Kontrolle und Steuerung des Oberflächenabtrags bei der Herstellung von Straßendecken mit Waschbetontextur ergeben, andererseits wurden zu Vergleichszwecken zwei verschiedene Lasermessgeräte eingesetzt. Während der Lasersensor bei dem ELAtextur®-Gerät um eine vertikale Achse rotiert (s. Bild 9b), werden die Laser-Abstandssensoren bei dem Profilometer (s. Bild 9a) über einen Linearantrieb geradlinig geführt. Bei diesem Gerätetyp handelt es

sich um eine aus mehreren Elektronikkomponenten zusammengesetzte Eigenkonstruktion. Sie bietet unter anderem die Möglichkeit, mehrere Lasersensoren mit unterschiedlichen Messbereichen parallel einzusetzen, um eine für die jeweiligen Gegebenheiten optimal angepasste Auflösung zu erzielen. Die Prüfungsdurchführung erfolgte nach den für den Fahrbahndeckenbau maßgebenden Vorschriften DIN EN 13036-1 [17] (Sandflächenverfahren) und DIN EN ISO 13473-1 [11] (elektrooptische Messverfahren) überwiegend auf ausgewählten Autobahn-Neubaustrecken mit Waschbeton-Oberflächentextur [14]. Ein weiterer Teil der Untersuchungen wurde an Flugbetriebsflächen mit Besenstrich-Textur sowie an unterschiedlich oberflächenbearbeiteten Laborproben durchgeführt [15]. Der Vergleich zeigt sowohl für die Labor- als auch für die Praxisuntersuchungen den gleichen Trend, wonach die Parameter der Profilmessungen recht gut mit den Rautiefen des volumetrischen Verfahrens nach DIN EN 13036-1 [17] korrelieren. Die Rautiefen der volumetrischen Methode liegen nach diesen Untersuchungen etwa um 13 % (Bild 11) über denen, die mit den Laser-Messverfahren ermittelt wurden. Außerdem stimmen die Ergebnisse der beiden elektrooptischen Geräte sehr gut überein. Dies



Bild 9: Mobile Laser-Rauheitsmessgeräte: a) Profilometer, b) ELAtextur®-Gerät, c) Linienlaser



Bild 10: Laser-Rauheitsmessgeräte im Baustelleneinsatz: a) Profilometer, b) und c) ELAtextur®-Gerät, d) Linienlaser

dürfte vor allem darauf zurückzuführen sein, dass technischen Daten beider Messgeräte innerhalb der nach DIN ISO 13473-3 [25] vorgegebenen Grenzen liegen. Bei den überwiegend stochastischen Oberflächentexturen spielte die Form der Profilaufnahme – geradlinig oder kreisförmig – keine Rolle.

Der mit 204 Wertepaaren ermittelte Umrechnungsfaktor von 1,13 (Nullpunktregression) weicht erheblich von dem in [4] vorgegebenen Umrechnungsverhältnis $R_t/R_p = 3/2,2 = 1,36$ (s. Bild 4) ab. Wie in Abschnitt 3.1 angemerkt, basiert diese Angabe auf einer vergleichsweise schwachen Datenbasis von nur zehn Wertepaaren. Hinzu kommt, dass die zugehörigen Untersuchungen schon etwa 20 Jahre zurückliegen, während die zuvor beschriebenen eigenen Versuche mit aktueller Messtechnik nach heutigen Standards [11] durchgeführt wurden. Insbesondere weil das

ELAtextur®-Gerät schon häufig auf Baustellen eingesetzt wird, ist eine Revision des Umrechnungsverhältnisses dringend erforderlich, zumal die bisherigen Vorgaben [4] deutlich auf der unsicheren Seite liegen.

Eine zusätzliche Bestätigung bekommen die in Bild 11 dargestellten Ergebnisse durch neuere Untersuchungen mit einem weiteren mobilen Laser-Messverfahren, bei dem statt eines einzelnen Lichtpunktes, der über die Oberfläche bewegt wird, eine komplette Laserlinie von 100 mm Länge, bestehend aus 1280 Einzelpunkten auf die Oberfläche projiziert und als Oberflächenprofil vom Sensor erfasst (s. Bild 9c) wird. Die Horizontal- und Vertikalauflösung und demzufolge auch die Messergebnisse stimmen mit den vorgenannten Geräten weitgehend überein. Dieses Gerät bietet für den Einsatz am Bauwerk große Vorteile, insbesondere bei Messun-

gen über Kopf, weil es sehr leicht ist und sich durch eine extrem hohe Messgeschwindigkeit auszeichnet (s. Bild 10d). In Verbindung mit einem Linearantrieb können Oberflächen-texturen vergleichbar mit der Streifenlichtprojektion [26] sogar dreidimensional aufgenommen werden (Bild 12). Allerdings ist der Einsatz von 3D-Technologien für die Beurteilung von Betonoberflächen zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch verfrüht, weil es für die Filterung von Formabweichungen und Welligkeiten, die nicht zur Rauheit gehören, in den hier erforderlichen Dimensionen noch keine Anhaltswerte oder Regeln gibt.

3.2 Texturbewertung

McGhee und Flintsch [21] verdeutlichen anhand eines einfach nachzuvollziehenden Beispiels, dass die in Bild 5 dargestellten Oberflächen trotz ihrer geometrischen Ähnlichkeit sehr unterschiedlich bewertet werden. Positive Texturen erzielen viel größere Rautiefen R_t oder R_p als negative. Es darf aber bezweifelt werden, dass diese Resultate mit dem Schubverbundverhalten übereinstimmen, weil es für die Kraftübertragung auch auf einen hohen Material- bzw. Traganteil ankommt. Denn die wenigen Rauspitzen bei der positiven Textur vermögen hinsichtlich des Verbundhaltens nicht das zu leisten, was bei der spiegelbildlichen negativen Textur durch Verklammerung mit den Tälern erreicht werden kann.

Dieser gedankliche Ansatz wird auch durch die in [27] getroffenen Feststellungen gestützt, bei denen der beste Zusammenhang zwischen dem Haftverbund und den Tiefen der größten Profiltäler R_v (s. Bild 8) gefunden wurde, was zumindest für die Verbundwirkung von Beschichtungen auch logisch erscheint, weil niederviskose Systeme in die Vertiefungen eindringen können und sich dort verklammern. Ob dies auch für den Verzahnungseffekt bei Schubverbundfugen gilt, muss noch untersucht werden. Bild 13 belegt anhand eines konkreten Beispiels, dass wenige vereinzelte Rauspitzen (Beton mit Sieblinie C) rechnerisch viel höhere Werte für R_t bzw. R_p ergeben als plateauförmige Oberflächen mit tiefen Tälern (Beton mit Siebli-

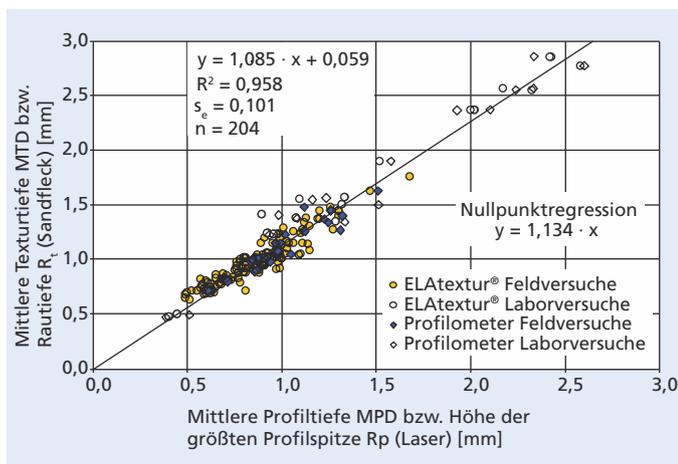


Bild 11: Korrelation der Laser-Profilmessungen mit den Ergebnissen des Sandflächenverfahrens

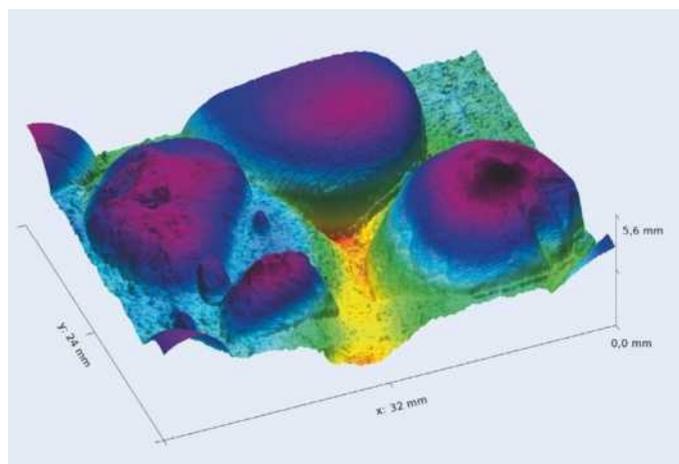


Bild 12: Ausschnitt aus einer mittels Linienlaser im Scan-Verfahren digitalisierten Waschbetonoberfläche

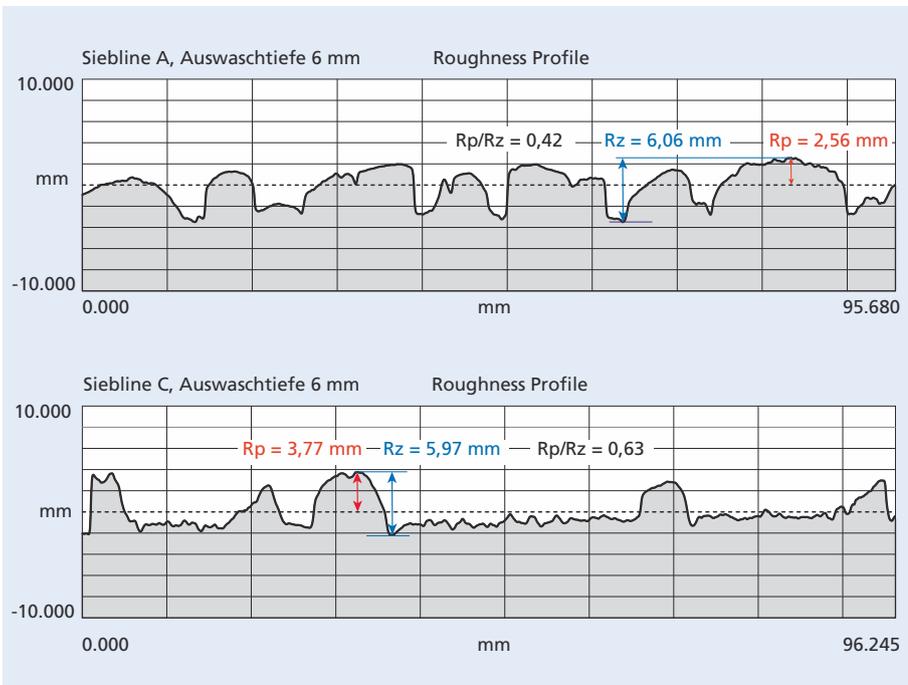


Bild 13: Bei gleicher Auswaschtiefe (Rz) sehr unterschiedliche Bewertung positiver (Sieblinie C) und negativer Texturen (Sieblinie A) mit dem Parameter Rp

nie A), obwohl die Höhendifferenz Rz zwischen den größten Profilspitzen und Profiltälern (s. Bild 8) in beiden Fällen annähernd gleich ist. Auch in diesem Fall erscheint es sehr fraglich, ob die positive Textur (Sieblinie C) mit vereinzelt herausragenden Körnern vorteilhaft für den Schubverbund sein kann, da der auf Schub beanspruchbare Material- bzw. Traganteil sehr gering ist. Diese Beispiele zeigen, dass die Anwendung der Parameter R_t bzw. R_p nur bei annähernd neutralen Texturen ($R_p/R_z \approx 0,5$ bzw. $R_p/R_v \approx 1$) sinnvoll ist. Solche Zusatzinformationen liefert das Sandflächenverfahren allerdings nicht. Deshalb sind bei ausgeprägt positiven oder negativen Texturen Fehlbeurteilungen möglich. Bei Profilmessverfahren besteht im Gegensatz dazu die Möglichkeit, zusätzliche Parameter zu ermitteln. Für die Texturbewertung ist der Rauheitsparameter Rz in Verbin-

dung mit R_p oder R_v (s. Bild 8) besonders wichtig.

Zur Untersuchung der praktischen Auswirkungen des vorgenannten Sachverhaltes auf die Bewertungsparameter wurden Versuche an Betonplatten mit unterschiedlichen Auswaschtiefen und unterschiedlichem Kornaufbau durchgeführt. Dabei kamen die drei in Bild 9 dargestellten Laser-Messverfahren sowie das Sandflächenverfahren zum Einsatz. Es wurden jeweils 3er-Serien von Betonplatten mit den Sieblinien A, B und C hergestellt und mit Hilfe eines Oberflächenverzögerers 1,5 mm, 3 mm und 6 mm tief ausgewaschen. Über die größte Höhe (Höhendifferenz) des Profils Rz ließ sich nachweisen, dass für alle 3 Sieblinien nahezu gleiche Auswaschtiefen erreicht wurden. Bild 14 lässt erkennen, dass unter den vorgenannten Voraussetzungen, d.h. gleiche Höhendifferenz Rz zwischen der größten Profilspitze und dem tiefsten Tal, innerhalb der jeweiligen Messstrecken, die herkömmlichen Parameter R_t und R_p für Betone mit der Sieblinie C tatsächlich eine viel günstigere Rauheitsbewertung ergeben als für die grobkornreicheren Betone. Hierfür beträgt das Verhältnis $R_p/R_z > 0,5$, während sich bei der grobkornreichen Sieblinie A ein Verhältnis $R_p/R_z < 0,5$ einstellt. Die Resul-

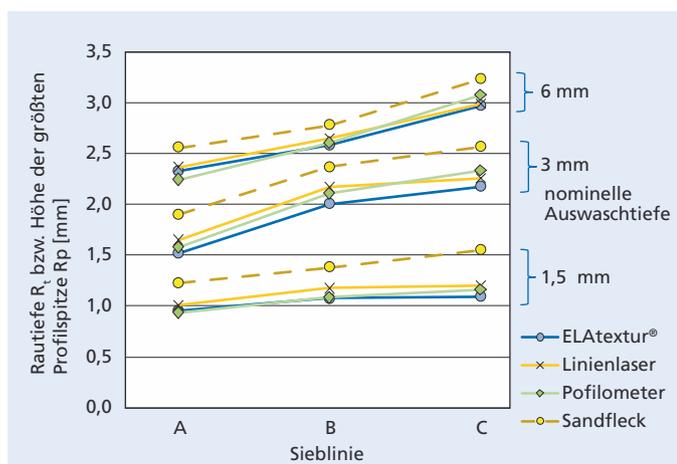


Bild 14: R_t (Sandfleck) und R_p (Laser) bei verschiedenen nominellen Auswaschtiefen, Sieblinien und Messgeräten

tate der drei Messgeräte unterschiedlicher Bauart stimmen ausgezeichnet überein. Den gleichen Trend zeigen auch die Ergebnisse des Sandflächenverfahrens.

4 Fazit

Mit zunehmender Verfügbarkeit mobiler, baustellentauglicher Profilmessverfahren ist es notwendig, die bisherige Praxis der Rauheitsbewertung von Betonoberflächen zu überdenken. Zurzeit müssen sich alternative Prüfmethoden noch an dem Sandflächenverfahren orientieren, da dieses als Referenzprüfverfahren gilt. Diesen Status hat das Sandflächenverfahren jedoch nur aufgrund seiner weiten Verbreitung und der damit erworbenen langjährigen Erfahrungen erlangt. In puncto Genauigkeit, Wiederholpräzision (Wiederholbarkeit) und Vergleichspräzision (Reproduzierbarkeit) spricht wenig für dieses Verfahren. Dies begründet sich schon allein durch die Tatsache, dass diese Prüfmethode sehr stark von Humanfaktoren abhängt. Die Prüfergebnisse differieren bei verschiedenen Prüfern an ein und derselben Probe teilweise um mehr als 25 %. Auch die Aussagekraft im Hinblick auf die Anwendungseigenschaften muss bezweifelt werden, weil damit die Textur nur sehr pauschal beschrieben wird, aber nichts über den Charakter der Oberfläche ausgesagt wird. Deshalb ist dieses Verfahren für Beurteilung des Verbundverhaltens ungeeignet und sollte künftig nur noch zur Abschätzung des Materialverbrauchs für Beschichtungen oder zur Bestimmung des Verdrängungsraums bei mit Gleitmittel belasteten Fußböden eingesetzt werden.

Die gute Korrelation zwischen R_t und R_p zeigt, dass das Sandflächenverfahren durch Laser-Profilmessungen ersetzt werden kann. Neben universellen Einsatzmöglichkeiten auch an vertikalen Flächen und über Kopf spricht für berührungslose Profilmessverfahren, dass die Ergebnisse kaum subjektiven Einflüssen unterliegen und besser reproduzierbar sind. Auch mit Profilmessgeräten unterschiedlicher Bauart lassen sich übereinstimmende Ergebnisse erzielen, wenn diese den Mindestanforderungen der DIN ISO 13473-3 [25] entsprechen. Die Gerätekalibrierung wird anhand von speziellen Kalibrieroberflächen gemäß [11] durchgeführt. Deshalb hat auch hierfür das Sandflächenverfahren als Referenzverfahren ausgedient. Für die Einordnung stochastischer Texturen in die Kategorien „rau“ und „verzahnt“ ist die Umrechnung mit $R_t = 1,1 \cdot R_p$ zu empfehlen, weil dies auf eine Dezimalstelle gerundet dem Regressionskoeffizienten entspricht, der auf der Basis aktueller Prüfgeräte und Prüfvorschriften über eine relativ große Zahl und Spannweite von Messdaten ermittelt wurde (Bild 14). Die in [4] vorgegebene Umrechnung für Schubverbundfugen mit $R_t = R_p \cdot 3/2 = R_p \cdot 1,36$ konnte nicht bestätigt werden und ist nach den nun vorliegenden Erkenntnissen nicht mehr zu verantworten, da sie deutlich auf der unsicheren Seite liegt.

Verbesserungsbedürftig bleiben die Auswertverfahren für Profilmessungen sowie

die Auswahl und Festlegung der für das Verbundverhalten relevanten Parameter, da die DIN EN ISO 13473-1 [11] zu speziell auf die Belange des Straßenbaus zugeschnitten ist.

Literatur

- [1] DAfStb-Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Beuth Verlag, Berlin 2001
- [2] ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Bundesanstalt für Straßenwesen, Stand 2013
- [3] DIN EN 1992-1-1/NA: 2013-04: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [4] DAfStb-Heft 600: Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2). Beuth Verlag, Berlin 2012
- [5] Sasse, H.-R.: Die Adhäsion zwischen Estrich und Beton. Internationaler Kongress Industriefußböden, Esslingen 1987
- [6] Sasse, H.-R.; Fiebrich, M.: Bonding of polymer materials to concrete. Materials and Structures 16 (1983) H. 94, S. 293–301
- [7] Reinecke, R.: Haftverbund und Rissverzahnung in unbewehrten Betonschubfugen. Dissertation TU München, München 2004
- [8] Feix, J.; Andreatta, A.: Verstärkung von Brückentragwerken mittels Aufbeton ohne Verdübelung. Vortrag Brückenmanagementtagung, Innsbruck 8. Mai 2008
- [9] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2). 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin 2010
- [10] DIN EN ISO 4287: 2010-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit
- [11] DIN EN ISO 13473-1: 2004-07: Charakterisierung der Textur von Fahrbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen, Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe
- [12] DAfStb-Heft 456: Schäfer, H. G.; Block, K.; Drell, R.: Oberflächenrauheit und Haftverbund. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin 1996
- [13] Zilch, K.; Reinecke, R.; Bertelmann, S.: Oberflächenrauheit von Betonschubfuge, Erzeugung, Messung und Parameter zur Bestimmung unterschiedlicher Rauheiten. Bauingenieur 78 (2003), S. 541–548
- [14] Schulz, R.-R.; Schmidt, T.; Hardt, R.; Riedl, R.: Baustellengerechte Laser-Profilmessverfahren für die Steuerung und Eigenüberwachung der Oberflächenstrukturierung von Verkehrsflächen aus Beton. Straße und Autobahn (2013) H. 12, S. 911–920
- [15] Schulz, R.-R.: Hat das Sandflächenverfahren bald ausgedient? 6. Kolloquium Parkbauten, TAE Esslingen, 28. und 29. Januar 2014
- [16] Schulz, R.-R.: Beurteilung der Rauheit von Betonoberflächen Sachstandsbericht als Grundlage für weitere Forschungen. Forschungsbericht erstellt im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe 27. August 2014
- [17] DIN EN 13036-1: 2010-10: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbelagoberfläche mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens
- [18] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. Ein einfaches Verfahren zur Messung und Beurteilung der Textur von Fahrbelagoberflächen. Straßenbau-Technik (1971) H. 3, S. 131–135
- [19] Block, K.; Drell, R.: Oberflächenrauheit und Haftverbund. beton 48 (1998) H. 2, S. 75–79
- [20] Bürkert, M.; Gauterin, F.; Unrau, H.-J.: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Straßenbau Heft S 78, Bergisch-Gladbach 2012
- [21] McGhee, K.K. and Flintsch, G.W.: High-Speed Texture Measurement of Pavements. VTRC 03-R9. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, 2003, [Zugriff am: 20. März 2014]. Verfügbar unter: http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf
- [22] DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). Beuth Verlag, Berlin 2003
- [23] DIN EN 1766: 2000-03: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Referenzbetone für Prüfungen
- [24] TRGS 559: Mineralischer Staub. Technische Regeln für Gefahrstoffe. Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG Bau – GISBAU). Frankfurt am Main, Februar 2010
- [25] DIN ISO 13473-3: 2004-07: Charakterisierung der Textur von Fahrbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen. Teil 3: Anforderungen an und Einteilung von Profilometern
- [26] Schulz, R.-R.: Rauheit und Rutschhemmung von Betonoberflächen. Elektrooptische Messsysteme zur Ermittlung von Rauheitsparametern. BFT International 74 (2008) H. 9, S. 4–15
- [27] Santos, P., Júlio, E., Silva, V.: Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface. Construction and Building Materials 21 (2007), S. 1688–1695.

LEBENSÄRÄUME GESTALTEN
SHAPING PLACES FOR PEOPLE

BETONTAGE 
CONCRETE SOLUTIONS

**Erleben Sie das 61. Gipfeltreffen
der europäischen Beton- und Fertigteilindustrie**
Experience the 61st summit of the European concrete and precast industry

14. - 16. Februar 2017
Edwin-Scharff-Haus, Neu-Ulm
www.betontage.com

© Werner Huthmacher, Berlin