

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

Autor



Prof. Dr.-Ing. Rolf-Rainer Schulz (1950); Bauingenieurstudium an der RWTH Aachen; Wissenschaftlicher Mitarbeiter/ Assistent am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen; 1984 Promotion; ab 1985 Leiter der Abteilung Betoninstandsetzung am Institut für Baustoffprüfung in Waldkirch; seit 1989 Professor an der FH Frankfurt am Main, Lehrgebiete Baustoffkunde, Bauphysik und Bauwerkserhaltung sowie Leitung des Labors für Baustoffe und Bauwerkserhaltung; Mitautor des Handbuchs der Oberflächenbearbeitung Beton.

rrschulz@fb1.fh-frankfurt.de

The surface texture is the primary characteristic upon which secondary characteristics depend, such as anti-slip properties and sliding resistance [2, 3]. This texture can be determined by the type and shape of the mineral aggregates selected, the constituents of the concrete, the production process and any subsequent surface treatment. It remains to be clarified, however, what the impact of the micro- and macro-roughness thus achieved on the secondary characteristics is. It would be helpful for precast producers to be able to use roughness parameters from which the above secondary characteristics could be derived. This article describes new methods to determine surface parameters that are potentially suitable for the management of performance characteristics such as anti-slip properties and sliding resistance already during production.

In precast concrete and cast stone products, the surface plays a key role – not only in terms of its appearance but also when it comes to ensuring durability and functionality. In the case of slabs and paving stones, the latter means to provide, depending on the type and site of use, appropriate skid resistance and anti-slip properties conforming to the specification whilst also ensuring that the products are easy to clean. These characteristics are mainly influenced by the surface texture. In addition, any media used, such as water or oils, must be considered, as well as the type and characteristics of the shoes worn and the movement patterns of the users [1].

Methods and factors to determine anti-slip properties and skid resistance

Anti-slip properties

According to the rules and regulations of the Berufsgenossenschaften – the German statutory accident insurance organizations [4, 5] – and of accident insurance providers, floor coverings are grouped into different classes on the basis of a walking test performed on a ramp [6, 7]. Although other testing methods are not generally excluded, they do not provide any transferability of results to the classes mentioned above. For this reason, this classification remains linked to the ramp test. This poses considerable problems in the manufacture of floor coverings since this complex testing method is not suitable for the continuous control and management of production.

Die Oberflächentextur ist die primäre Eigenschaft, von der sekundäre Eigenschaften wie Rutschhemmung und Gleitwiderstand abhängen [2, 3]. Sie lässt sich durch die Art und Form der Gesteinskörnung, die Betonzusammensetzung, das Herstellverfahren und durch die eventuell nachfolgende Oberflächenbearbeitung steuern. Zu den ungeklärten Fragen gehört, wie sich die so erzielte Makro- und Mikrorauheit auf die sekundären Eigenschaften auswirken. Für Betonwarenhersteller wären Rauheitsparameter hilfreich, aus denen sich die genannten sekundären Eigenschaften ableiten lassen. Dieser Beitrag stellt neue Methoden zur Bestimmung von Oberflächenkenngrößen vor, mit denen sich Gebrauchseigenschaften wie Rutschhemmung und Gleitwiderstand möglicherweise bereits in der Produktion steuern lassen.

Die Oberfläche spielt bei Betonwaren und Betonwerkstein eine dominierende Rolle – nicht allein für das Aussehen, sondern auch für die Dauerhaftigkeit und Funktionalität. Letzteres bedeutet bei Platten und Pflastersteinen, je nach Verwendungszweck und Einsatzort, anforderungsgerechte Griffigkeit und Rutschhemmung bei gleichzeitig guter Reinigungsfähigkeit. Diese Eigenschaften werden in erster Linie durch die Oberflächentextur geprägt. Zu berücksichtigen sind aber auch evtl. vorhandene Zwischenmedien wie Wasser oder Öle sowie Art und Eigenschaften des Schuhwerks und nicht zuletzt auch das Bewegungsverhalten der Nutzer [1].

Verfahren und Faktoren zur Bestimmung der Rutsch- und Gleitsicherheit

Rutschhemmende Eigenschaften

Nach den Regeln der Berufsgenossenschaften [4, 5] und Unfallversicherer werden Bodenbeläge über das Begehungsverfahren mit der Schiefen Ebene [6, 7] in Bewertungsgruppen eingeteilt. Andere Prüfmethode werden zwar nicht grundsätzlich ausgeschlossen, doch ist bei diesen die Übertragbarkeit in Bewertungsgruppen in keinem Fall gesichert. Daher bleibt die Einstufung letztlich an die Prüfung mit der Schiefen Ebene gekoppelt. Bei der Herstellung von Bodenbelägen bereitet dies erhebliche Probleme, weil das aufwändige Prüfverfahren nicht für die ständige Produktionskontrolle und Produktionssteuerung in Betracht kommt.

Sliding friction

According to [8], coefficients of sliding friction determined by mobile testing methods are not transferable to the ramp test results, and cannot be used to allocate the material to one of the anti-slip classes. In addition, the applicability of these methods to very rough coverings and projecting individual particles is limited, and the results show a great degree of variance.

Skid resistance

The European standards for concrete paving blocks, flags and kerb units [9, 10, 11] prescribe the pendulum test (Fig. 1) to determine the skid resistance value of unpolished surfaces (USRV). Although this method has been designed as an in-situ testing procedure, its application appears quite complex and is subject to numerous testing impacts. For example, the temperature, age and degree of wear of the rubber must be taken into account. Another objection voiced is that the pendulum speed exceeds the average walking speed. A major issue that may lead to controversies is the fact that these measurement results are not transferable to the ramp test classes according to [6] either while also showing a large variance [12, 13, 26]. A significantly better correlation exists between the USRV and the testing of wet-loaded barefoot areas in accordance with [7].

Methods to determine the surface texture

Sand-patch method

As a volumetric procedure, the sand-patch method has been used for many years around the world to determine simple parameters characterizing the surface texture. This method is described in several standards and guidelines [14 to 18]. In this test, a mean texture depth MTD or mean roughness depth R_t is measured as the average difference in height between the valleys and the upper material interface. With its measuring range from 0.25 to 5 mm, the method provides relatively rough outcomes, which runs counter to a complete assessment of the surface texture. Hence, smooth or merely micro-rough surfaces cannot be tested using this method. In addition, the measurement results depend relatively strongly on the individual performing of the test [19]. Concerning concrete repairs, it is of great disadvantage that no measurements are possible at highly inclined or vertical areas or overhead surfaces. For these conditions, alternative solutions using paste-type compounds instead of sand have been proposed [20]. However, these methods have not yet become generally accepted.

Laser distance sensors

The laser triangulation method is a sophisticated procedure used in many technical fields for the purposes of measurement, production control and monitoring of shapes and surface geometries. To apply the triangulation principle known from surveying, two angles of a triangle and the length of one side of the triangle must be known or measured in order to calculate the remaining side lengths. For laser sensors, the baseline for measurement is defined by the distance between the radiation source and the photoelectric sensor. The laser beam is emitted perpendicular to this baseline and reflected to various positions of the photoelectric sensor depending on the distance of the object. The changes in position are used to calculate the object distance using trigonometric func-



Fig. 1 Pendulum device to determine the sliding resistance value in accordance with [9, 10, 11].

Abb. 1 Pendelgerät zur Bestimmung des Gleitwiderstandswerts nach [9, 10, 11].

Gleitreibung

Gleitreibungskoeffizienten mobiler Prüfverfahren können gemäß [8] nicht auf die Ergebnisse der Schiefen Ebene übertragen und nicht zur Einordnung in eine Bewertungsgruppe für die rutschhemmenden Eigenschaften verwendet werden. Außerdem ist die Anwendbarkeit dieser Verfahren bei sehr rauen Belägen und herausstehenden Einzelkörnern eingeschränkt und die Ergebnisse streuen stark.

Gleitwiderstand

Die Europäischen Normen für Pflastersteine, Platten und Bordsteine aus Beton [9, 10, 11] schreiben das Pendelverfahren (Abb. 1) zur Bestimmung des Gleitwiderstandswerts von unpolierten Flächen (USRV) vor. Zwar ist diese Methode als Baustellenprüfverfahren konzipiert, doch erscheint sie als solche in der Anwendung recht kompliziert und zahlreichen Prüfeinflüssen unterworfen. So sind u. a. die Temperatur, das Alter und die Abnutzung des Gummis zu beachten. Bemängelt wird auch, dass die Pendelgeschwindigkeit über der durchschnittlichen Gehgeschwindigkeit liegt. Besonders problematisch und konfliktträchtig ist, dass auch diese Messergebnisse nicht auf die Bewertungsgruppen der Schiefen Ebene nach [6] übertragbar sind und zudem stark streuen [12, 13, 26]. Ein deutlich besserer Zusammenhang besteht zwischen USVR und der Prüfung von nassbelasteten Barfußbereichen nach [7].

Verfahren zur Bestimmung der Oberflächentextur

Sandflächenverfahren

Das Sandflächenverfahren dient als volumetrisches Verfahren schon seit vielen Jahren weltweit zur Bestimmung einfacher Kennwerte für die Textur von Oberflächen und wird in mehreren Normen und Richtlinien beschrieben [14 bis 18]. Dabei wird eine mittlere Texturtiefe MTD bzw. mittlere Rautiefe R_t als durchschnittliche Höhendifferenz zwischen den Tälern und der oberen Materialgrenzfläche gemessen. Mit einem Messbereich zwischen 0,25 und 5 mm ist das Verfahren relativ grob, was einer vollständigen Bewertung der Oberflächentextur entgegensteht.

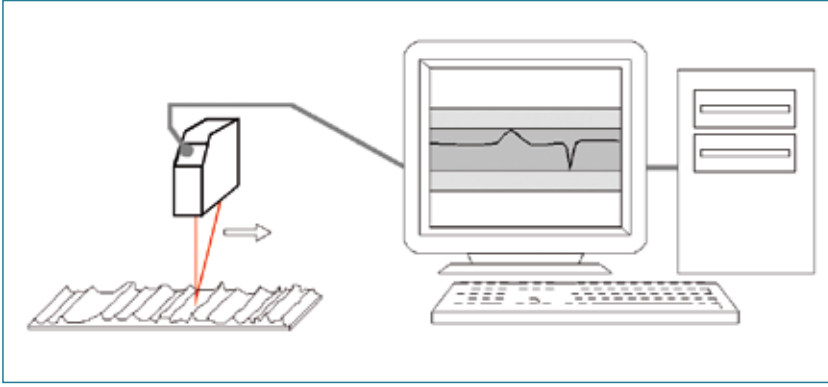


Fig. 2 Setup and working principle of the laser triangulation systems in accordance with [2].

Abb. 2 Aufbau und Arbeitsweise der Laser-Triangulationssysteme nach [2].

tions [21]. Photoelectric sensors with various measuring ranges, resolutions and measurement speeds, as well as a more or less distinct linearity pattern, are commercially available.

In order to measure the profile, the horizontal position must also be measured or the sensor be moved across the object at constant speed so as to enable the calculation of the position on the basis of the time intervals (Fig. 2). Until recently, sophisticated structures were required for this purpose that could only be used in the laboratory [22, 23]. By contrast, a cost-efficient mobile option has been identified for the series of tests described in this article: Two laser sensors have been attached to a modified flat-bed scanner, and can be moved across the object to be measured at an adjustable constant speed using a software package (Fig. 3). A notebook is used to control the scanner but also to capture profile data via an analog-digital converter equipped with a USB interface. Depending on the set measuring range (2 to 10 mm), height resolutions of 2 to 5 μm and lateral resolutions of 170 μm are achieved. The latter could still be improved if a faster A/D converter is used.

The measuring system has a very compact design – its largest components are the notebook computer and the flat-bed scanner. It is suitable for on-site use and relatively inexpensive. In principle, the system can also be used at vertical surfaces. Depending on the number of sensors,

Glatte oder nur mikrorauhe Oberflächen lassen sich damit also nicht prüfen. Die Messergebnisse hängen außerdem relativ stark von der prüfenden Person ab [19]. Für den Einsatz im Bereich Betoninstandsetzung ist es von großem Nachteil, dass keine Messungen an stark geneigten, vertikalen und über Kopf liegenden Flächen möglich ist. Dafür wurden Alternativen mit pastösen Medien statt Sand vorgeschlagen [20], die sich bislang aber nicht durchsetzen konnten.

Laser-Distanz-Sensoren

Bei der Laser-Triangulation handelt es sich um ein ausgefeiltes Verfahren, das in vielen Bereichen der Technik zur Messung, Produktionskontrolle und Überwachung von Formen und Oberflächengeometrien verwendet wird. Für das aus der Geodäsie bekannte Prinzip der Triangulation müssen zwei Winkel eines Dreiecks sowie die Länge einer Dreiecksseite bekannt sein oder gemessen werden, um die übrigen Seitenlängen berechnen zu können. Die Messbasis ist bei Lasersensoren durch den Abstand zwischen Strahlenquelle und Lichtsensor vorgegeben. Der Laserstrahl wird senkrecht zu dieser Messbasis entsendet und je nach Abstand des Objektes auf unterschiedliche Positionen des Sensors reflektiert. Aus den Positionsänderungen wird über Winkelfunktionen der Objektabstand errechnet [21]. Im Handel sind Sensoren mit unterschiedlichen Messbereichen, Auflösungen, Messgeschwindigkeiten und mehr oder weniger ausgeprägtem Linearitätsverhalten erhältlich.

Für die Profilmessung muss auch die Horizontalposition gemessen oder der Sensor mit konstanter Geschwindigkeit über das Objekt bewegt werden, damit sich die Position aus den Zeitintervallen berechnen lässt (Abb. 2). Bislang waren dafür aufwändige Konstruktionen erforderlich, die nur im Labor eingesetzt werden konnten [22, 23]. Für die hierin beschriebene Versuchsreihe wurde eine kostengünstige mobile Variante gefunden: Zwei Lasersensoren sind an einen umgebauten Flachbettscanner montiert und lassen sich softwaregestützt mit einstellbarer konstanter Geschwindigkeit über dem Messobjekt verfahren (Abb. 3). Ein Notebook übernimmt sowohl die Steuerung des Scanners als auch die Erfassung der Profildaten über einen Analog-Digital-Wandler mit USB-Schnittstelle. Je nach eingestelltem Messbereich (2 bis



Fig. 3 Mobile laser system to measure roughness.

Abb. 3 Mobiles Laser-Rauheitsmesssystem.

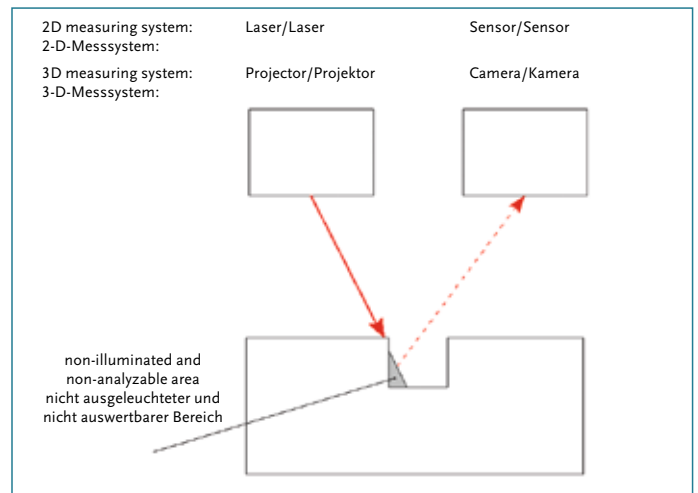
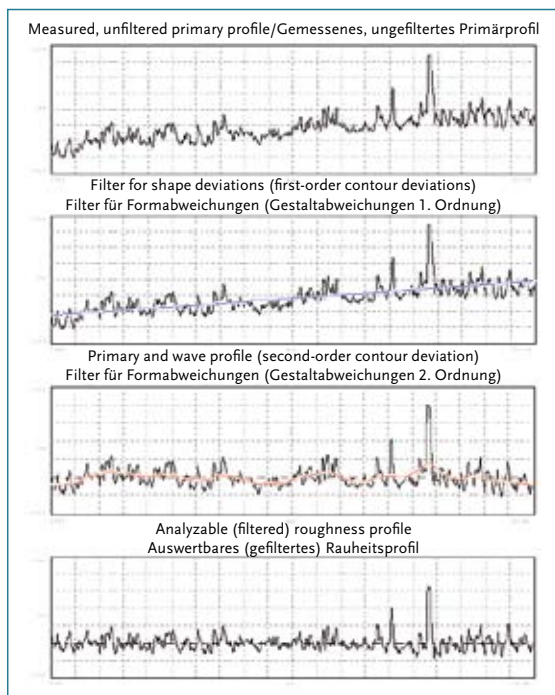


Fig. 4 Shading at edges and sharp profile elements according to [23].

Abb. 4 Abschattung an Kanten und schroffen Profilelementen nach [23].



several profile lines can be captured simultaneously. To arrive at representative conclusions, measurements must be carried out at various points of the object. Since both the scanner feed and the logging of data are controlled via the notebook in an automated fashion, the measurement process remains independent of the individuals involved and achieves a high degree of repeatability. Compromising impacts include mineral particles with a high degree of reflection and translucent particles, such as glass spheres. This is where measuring errors may occur, as well as at very steep profile elements and edges that may result in shading (Fig. 4). Profile lines can be analyzed and roughness parameters determined using commercially available software. However, some degree of prior knowledge and expertise is required for the selection of the position and wave filters, and of the filter limits (Fig. 5).

Electro-optical 3D measuring system

To capture surface topographies completely in an efficient manner, an optical 3D measuring system based on fringe projection is used (Fig. 6 to 8). This method is still relatively uncommon in the construction industry. It is mainly used to capture 3D data of decorative and sculptural features at historic buildings with a view to their reconstruction or restoration. Similar to laser distance sensors, the method relies on optical triangulation. However, the structure is not scanned point by point but rather consistently across the entire area using a system of coded strips projected onto the surface. The periodic strip pattern is deformed by the surface topography and captured at a predetermined triangulation angle by a CCD (charge-coupled device) camera. The device provided uses a constant distance between the LCD projector and the camera. The associated program uses the difference of the position from the projection pattern to calculate elevation ordinates that can be accurately allocated to the positions. The system used for the tests described in this article has been developed by the Bremer Institut für angewandte Strahltechnik (BIAS; Bremen Institute for Applied Radiation Technology) in collaboration with the Vereinigte Elektronikwerk-

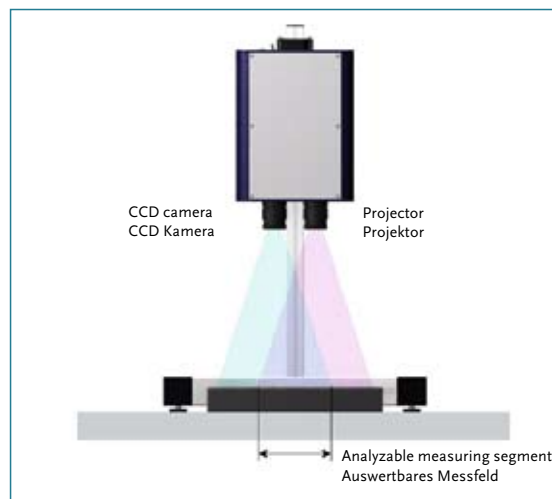


Fig. 6 Design principle of the 3D camera [26].

Abb. 6 Aufbauprinzip der 3-D-Kamera [26].

Fig. 5 Preparations to analyze a 2D roughness profile.

Abb. 5 Vorbereitungen zur Auswertung eines 2-D-Rauheitsprofils.

10 mm) werden Höhenauflösungen von 2 bis 5 μm und Lateralauflösungen von 170 μm erreicht. Letzteres ließe sich noch durch einen schnelleren AD-Wandler verbessern.

Das Messsystem ist sehr kompakt. Die größten Teile sind das Notebook und der Flachbettscanner. Es ist für den Baustelleneinsatz geeignet und verhältnismäßig preiswert. Auch der Gebrauch an vertikalen Flächen ist im Prinzip möglich. Je nach Anzahl der Sensoren können mehrere Profillinien parallel erfasst werden. Für repräsentative Aussagen sind Messvorgänge an verschiedenen Stellen des Objektes erforderlich. Da der Vorschub des Scanners und die Datenerfassung vom Notebook gesteuert werden und automatisiert sind, bleibt die Messung unabhängig von den ausführenden Personen und es werden hohe Wiederholgenauigkeiten erreicht. Störend wirken stark reflektierende Gesteinskörner oder durchscheinende Partikel wie Glaskugeln. Hier können Messfehler ebenso auftreten wie an sehr steilen Profilelementen und Kanten, die zu Abschattungen führen (Abb. 4). Die Auswertung der Profillinien und die Bestimmung der Rauheitsparameter können mit handelsüblichen Programmen erfolgen. Für die Auswahl der Lage- und Wellenfilter sowie der Filtergrenzen sind allerdings einige Vorkenntnisse und Erfahrungen erforderlich (Abb. 5).

Elektrooptisches 3-D-Messsystem

Für die rationelle flächige Erfassung von Oberflächentopografien wird ein optisches 3-D-Messsystem auf Basis der Streifenprojektion eingesetzt (Abb. 6 bis 8). Dabei handelt es sich um eine im Bauwesen noch verhältnismäßig wenig gebräuchliche Methode, die bisher im Wesentlichen nur für die 3-D-Datenerfassung von Ornamenten und Skulpturen an historischen Bauwerken im Hinblick auf die Rekonstruktion oder Restaurierung verwendet wird. Ähnlich wie bei den Laser-Distanz-Sensoren basiert die Methode auf optischer Triangulation. Im Unterschied dazu wird die Struktur nicht punktwise, sondern flächig über ein System codierter, auf die Oberfläche projizierter Streifen abgetastet. Das periodische Streifenmuster wird

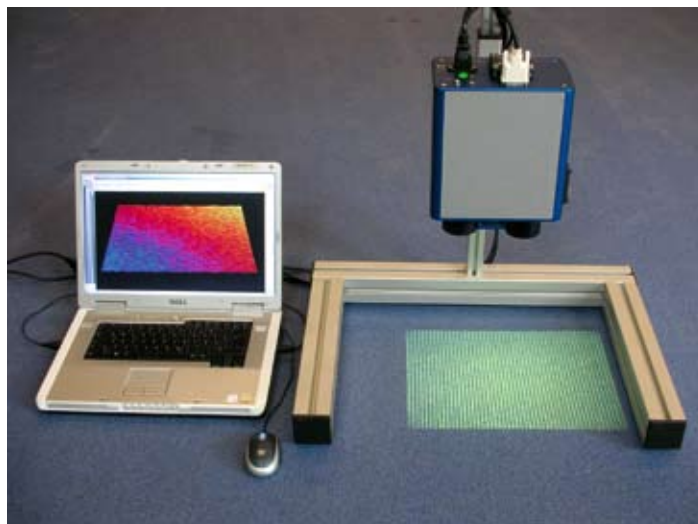


Fig. 7 Roughness measurement applying the principle of fringe projection with the 3D camera.

Abb. 7 Rauheitsmessung nach dem Prinzip der Streifenlichtprojektion mit der 3-D-Kamera.

stätten (VEW [24, 25]). It has been adjusted to the specific measurement task by a specially designed optical and calibration unit. Using this setup, approx. 1.5 million points can be measured and analyzed within only a few minutes. The system has a very compact design since both strip projector and camera are accommodated in one and the same housing. This housing has dimensions of 200 mm x 220 mm x 140 mm.

The LCD projector is controlled from a notebook computer using a standardized DVI interface (Digital Visual Interface). The camera is linked to the notebook via a Firewire interface. The compact, lightweight design enables simple, mobile use also directly at the structure to be examined.

As shown in Fig. 7, the device is currently being used to measure the surfaces of floor coverings or laboratory specimens. Using appropriate tripods, the system can also be used to examine vertical or overhead surfaces. The height resolution (z axis) is controlled via the object distance. At the recommended minimum distance of 250 mm, this resolution amounts to approx. 30 μm . In this setting, the measuring segment is 82 by 110 mm large while the lateral resolution (x-y axis) equals 80 μm . Depending on the brightness of the object surface, a measurement using the above settings may take approx. 5 minutes. Using the x, y and z coordinates for 1,392 by 1,040 pixels, files reach a size of approx. 10 MB. Data can also be exported as an ASCII file, and can then be analyzed using any software.

Using this measuring method, a high information density can be achieved within a relatively short period. The segment measured is relatively large and thus representative. The resolution is satisfactory but by one decimal power lower than in the laser measurement described above. The measurements showed a high degree of repeatability also in the presence of different individuals. Its compact design makes the device portable and suitable for on-site use. The testing sequence is software-controlled and automated. Both 2D and 3D profiles offer an almost unlimited range of analysis options. Images can be corrected by applying software filters.

3D measuring systems are still relatively expensive. As with all optical methods, shading at steep edges or pro-

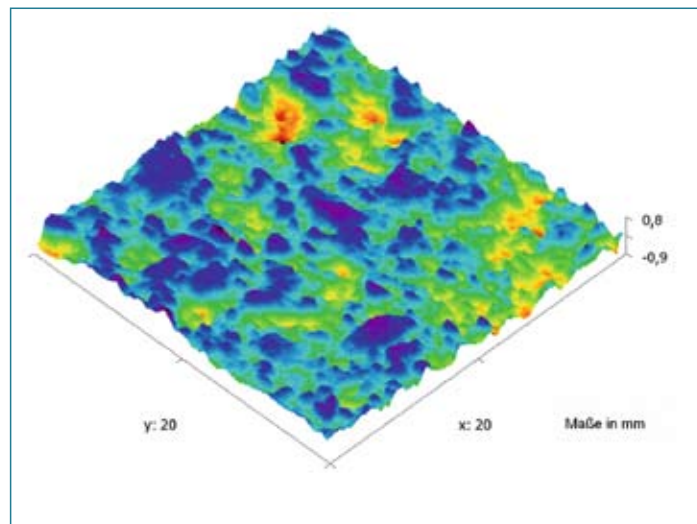


Fig. 8 Measured 3D surface profile (section).

Abb. 8 Gemessenes 3-D-Oberflächenprofil (Ausschnitt).

durch die Oberflächentopografie verformt und mittels CCD-Kamera (Charge-Coupled-Device-Kamera) unter einem festgelegten Triangulationswinkel erfasst. Bei dem zur Verfügung stehenden Gerät bleibt der Abstand zwischen LCD-Projektor und Kamera konstant. Aus den Lageunterschieden zum Projektionsmuster kann das zugehörige Programm Höhenordinaten errechnen, die sich positionsgetreu zuordnen lassen. Das für die vorliegenden Untersuchungen verwendete System wurde vom Bremer Institut für angewandte Strahlentechnik (BIAS) zusammen mit den vereinigten Elektronikwerkstätten (VEW) entwickelt [24, 25] und mit einer speziellen Optik und Kalibrierung an die spezielle Messaufgabe angepasst. Auf diese Weise können etwa 1,5 Millionen Punkte innerhalb von wenigen Minuten vermessen und ausgewertet werden. Die Unterbringung von Streifenprojektor und Kamera in einem Gehäuse macht das System sehr kompakt. Die Gehäusemaße betragen 200 mm x 220 mm x 140 mm.

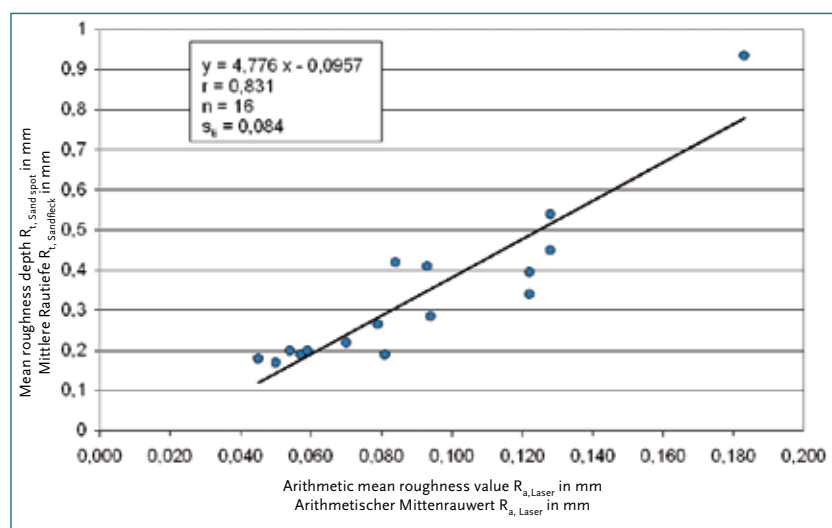


Fig. 9 Correlation between laser measuring results and values measured with the sand-patch method.

Abb. 9 Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Lasermessungen und denen des Sandflächenverfahrens.

files may result in undesirable effects (Fig. 4). However, these can be subsequently eliminated using appropriate software settings. This method is not suitable for strongly reflective, specular surfaces such as those found on some particle crystals. Nor can translucent surfaces or particles be measured using this method. Measurements are not possible under direct sunlight exposure or full lighting since such ambient light influences give rise to misinterpretation. The height resolution is currently limited to approx. 30 µm due to the microstructural noise.

Tests carried out

Specimens and testing surfaces

The specimens and surfaces used for testing are listed and characterized in Table 1. The cast-stone slabs and coating samples were generously provided by several producers. For some of these concrete products, test certificates proving their anti-slip properties and sliding resistance had been submitted. Both this information and findings of diploma theses were used for the comparisons of the electro-optical measuring methods [13, 26].

Laser profile measurements

Applying the laser method, at least 10 profile lines 200 mm in length were captured and analyzed for each specimen or test surface. Prior to the analysis, a position and wave filtering procedure was performed for each profile (Fig. 5). The results of the profile line measurements were summarized and averaged per each specimen or test

Die Ansteuerung des LCD-Projektors erfolgt über ein Notebook und eine standardisierte DVI-Schnittstelle (Digital Visual Interface). Die Kamera ist über eine Firewire-Schnittstelle mit dem Notebook verbunden. Die kompakte und leichte Bauweise ermöglicht einen unkomplizierten und mobilen Einsatz auch am Bauwerk.

Wie in Abb. 7 dargestellt, wird das Gerät zurzeit für die Oberflächenvermessung von Bodenbelägen oder Laborproben eingesetzt. Mit entsprechenden Stativen sind aber auch Untersuchungen an vertikalen Flächen oder über Kopf möglich. Die Höhenaufösung (Z-Richtung) wird über den Objektstand gesteuert. Sie beträgt bei dem empfohlenen Minimalabstand von 250 mm etwa 30 µm. Bei dieser Einstellung ist das Messfeld 82 mm x 110 mm groß und die laterale Auflösung (X-Y-Richtung) beträgt 80 µm. Je nach Helligkeit der Objektoberfläche dauert eine Messung mit den vorgenannten Einstellungen etwa 5 Minuten. Mit den X-, Y- und Z-Koordinaten für 1.392 x 1.040 Pixel ergeben sich Dateigrößen von etwa 10 MB. Die Daten können auch als ASCII-File exportiert werden und sind auf diese Weise mit beliebiger Software auswertbar.

Mit diesem Messverfahren lässt sich in verhältnismäßig kurzer Zeit eine hohe Informationsdichte erzielen. Das Messfeld ist relativ groß und entsprechend repräsentativ. Die Auflösung ist zufriedenstellend, allerdings um etwa eine Zehnerpotenz geringer als bei dem zuvor beschriebenen Lasermessverfahren. Die Messungen zeigten eine hohe Wiederholgenauigkeit auch bei unterschied-

No. Nr.	Type Art	Dimensions Maße [cm]	Surface treatment Oberflächenbearbeitung	Other characteristics Sonstige Eigenschaften
1	Slab/Platte	30x30	wet-cast/wetcast	-
2		40x40	polished/geschliffen	-
3		40x40	shot-blasted/kugelgestrahlt	-
4		40x40	gently blasted/leicht gestrahlt	-
5		40x40	gently blasted/leicht gestrahlt	Hydrophobic face mix/Vorsatzbeton hydrophobiert
6		40x40	gently blasted/leicht gestrahlt	Hydrophobic face mix, surface impregnated Vorsatzbeton hydrophobiert, Oberfläche imprägniert
7	Paving block/Pflasterstein	50x27.5	porous surface/offenporige Oberfläche	-
8	Paving block/Pflasterstein	40x25	porous surface/offenporige Oberfläche	-
9	Slab/Platte	40x40	shot-blasted/kugelgestrahlt	-
10		60x30	shot-blasted/kugelgestrahlt	Surface coated/Oberfläche beschichtet
11		40x40	shot-blasted/kugelgestrahlt	-
12		40x40	polished/geschliffen	Surface coated/Oberfläche beschichtet
13		40x40	washed/gewaschen	-
14		40x40	shot-blasted/kugelgestrahlt	Surface coated/Oberfläche beschichtet
15		40x40	wet-cast/wetcast	-
16, 17, 18		40x40	polished/geschliffen	-
19, 20	Floor/Fußboden			Epoxy resin industrial floor coating Epoxidharz-Industriebodenbeschichtung
21	Paving block/Pflasterstein	60x40	porous surface/offenporige Oberfläche	Large-format slab/Großformatplatte
22	Coating sample/Beschichtungsmuster	30x42		Epoxy resin industrial floor coating, R11 Epoxidharz-Industriebodenbeschichtung, R11
23	Coating sample/Beschichtungsmuster	30x42		Epoxy resin industrial floor coating, R12, V4 Epoxidharz-Industriebodenbeschichtung, R12, V4
24	Coating sample/Beschichtungsmuster	40x40		Polyurethane resin industrial floor coating, R12, V6 Polyurethanharz-Industriebodenbeschichtung, R12, V6
25	Coating sample/Beschichtungsmuster	40x40		Polyurethane resin industrial floor coating, R13, V10 Polyurethanharz-Industriebodenbeschichtung, R13, V10
26	Paving block/Pflasterstein	20x10	porous surface/offenporige Oberfläche	-
27	Paving block/Pflasterstein	30x30	polished/geschliffen	-
28	Paving block/Pflasterstein	30x30	polished/geschliffen	Surface protection/Oberflächenschutz

Table 1 Specimens tested. Tabelle 1 Untersuchte Proben.

surface. Of the various roughness parameters, only the arithmetic mean roughness value of the profile ordinates, R_a , was initially selected for the correlation analyses. Although this parameter is most commonly used internationally, and is relatively insensitive to extreme profile peaks and valleys, the significance ascribed to this value is limited [21]. For this reason, further analyses should be performed to investigate whether other roughness parameters can be used to establish even better correlations to the secondary characteristics. Fig. 9 shows, by way of example, the correlation between the laser measurements and the values measured using the sand-patch method.

3D measurements

In all tests, the distance between the 3D camera and the test surface was kept constant at 250 mm. As a result, the segment measured was also of identical size. Similar to the laser measurements, first- and second-order position and shape deviations were eliminated using software filters since these deviations are not exclusively attributable to roughness. The analysis program used determined several roughness parameters for the entire surface. However, following the extraction of profile lines, a larger selection of parameters becomes available. Fig. 10 and 11 show, by way of example, both useful and entirely irrelevant correlations between geometrical data captured using the electro-optical method and secondary characteristics.

Since, as mentioned before, there is no interdependence of anti-slip properties and sliding resistance, it could

lichen Prüfern. Durch die kompakte Bauart ist das Gerät transportabel und für den Einsatz vor Ort geeignet. Der Prüfablauf erfolgt softwaregesteuert und automatisch. Es bestehen nahezu beliebige Auswertungsmöglichkeiten sowohl für 3-D- als auch für 2-D-Profile. Bildkorrekturen sind über Softwarefilter möglich.

3-D-Messsysteme sind zurzeit noch relativ teuer. Wie bei allen optischen Verfahren kann es durch Abschattungen an steilen Kanten bzw. schroffen Profilen unerwünschte Effekte geben (Abb. 4), die sich allerdings nachträglich über entsprechende Softwareeinstellungen eliminieren lassen. Ungeeignet sind stark reflektierende, spiegelnde Oberflächen, wie sie an manchen Kornkristallen auftreten. Auch durchscheinende Flächen oder Partikel können mit dieser Methode nicht vermessen werden. Bei direkter Sonneneinstrahlung oder voller Beleuchtung sind Messungen nicht möglich, da solche Fremdlichteinträge fehlinterpretiert werden. Durch das mikrostrukturelle Rauschen ist die Höhengauflösung zurzeit auf etwa 30 μm begrenzt.

Durchgeführte Versuche

Proben und Prüfflächen

Die für die Untersuchungen verwendeten Proben bzw. Prüfflächen sind in Tab. 1 aufgelistet und charakterisiert. Die Betonwerksteinplatten und Beschichtungsmuster wurden dankenswerterweise von verschiedenen Herstellern zur Verfügung gestellt. Zum Teil lagen für diese Betonprodukte Prüfzeugnisse für die Rutschhemmung und

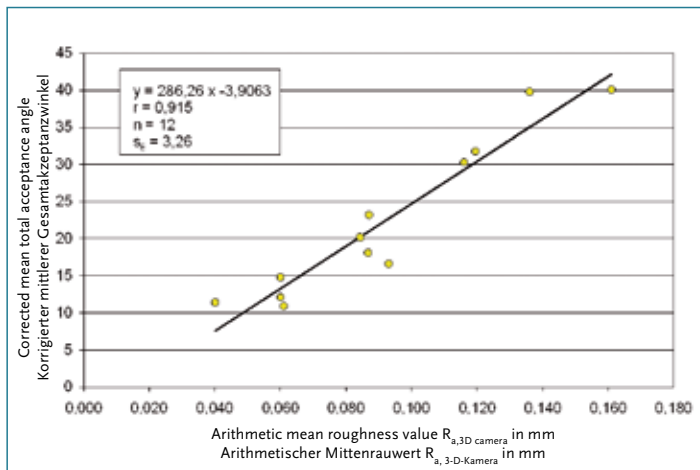


Fig. 10 Correlation between 3D camera roughness measurement results and walking test (ramp).

Abb. 10 Korrelation zwischen den Ergebnissen der Rauheitsmessung mit 3D-Kamera und dem Begehungsverfahren (Schiefe Ebene).

obviously not be expected that both characteristics would correlate equally well to a third parameter. The relatively strong correlation between the anti-slip properties (ramp test) and geometrical parameters (Fig. 10) suggests that these investigations should be continued in order to prove the correlation by additional test results. The electro-optical measuring methods also correlate quite well to each other (Fig. 12). However, the absolute roughness parameters are shifted against each other by a magnitude equivalent to the microstructural noise observed in the fringe projection method.

Conclusions

Anti-slip properties and cleanability are conflicting characteristics for which a compromise solution must be found that meets all requirements. This is not an easy task since these are secondary characteristics which can only be determined subsequently, i.e. independently of the production process. In addition, the available methods to test anti-slip properties or sliding friction include a number of testing disadvantages.

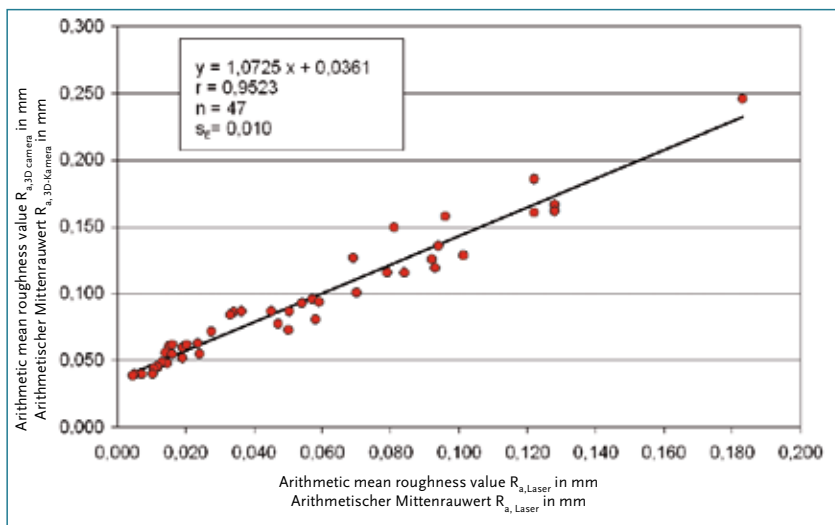


Fig. 12 Very good correlation between 2D and 3D roughness measurements (also includes test surfaces not listed in Table 1).

Abb. 12 Sehr gute Korrelation zwischen 2-D- und 3-D-Rauheitsmessung (enthält auch Probestflächen, die nicht in Tab. 1 aufgeführt sind).

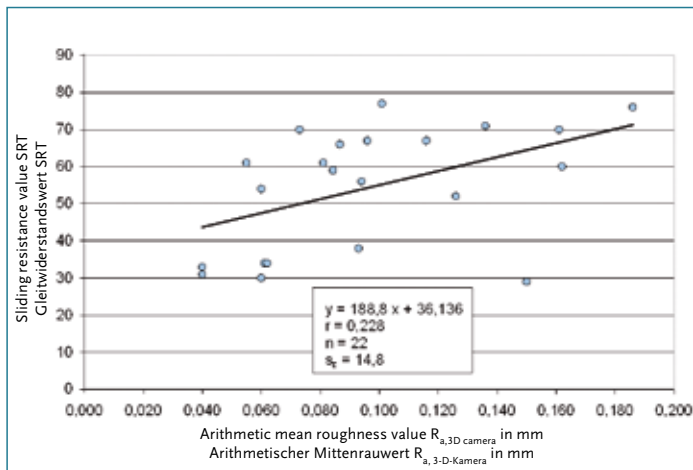


Fig. 11 Almost no correlation between roughness and sliding resistance (SRT).

Abb. 11 Nahezu keine Korrelation zwischen Rauheit und Gleitwiderstand (SRT)

den Gleitwiderstand vor. Auf diese Daten wurde bei den Vergleichsuntersuchungen mit den elektrooptischen Messverfahren ebenso zurückgegriffen wie auf Ergebnisse von Diplomarbeiten [13, 26].

Laser-Profilmessungen

Bei dem Lasermessverfahren wurden je Probe bzw. Prüffläche mindestens 10 Profillinien von 200 mm Länge erfasst und ausgewertet. Vor der Auswertung erfolgte für jedes Profil zunächst eine Lage- und eine Wellenfilterung (Abb. 5). Die Resultate der Profillinienmessungen wurden je Probe bzw. Prüffläche zusammengefasst und gemittelt. Von den verschiedenen Rauheitsparametern wurde zunächst nur der arithmetische Mittenrauwert der Profildaten R_a für die Korrelationsrechnungen ausgewählt. Dieser ist zwar der international gebräuchlichste Kennwert und er ist relativ unempfindlich gegen extreme Profilspitzen und -täler, jedoch wird ihm nur geringe Aussagekraft zugeschrieben [21]. Daher soll bei weiteren Auswertungen untersucht werden, ob sich mit anderen Rauheitskennwerten noch bessere Zusammenhänge zu den Sekundäreigenschaften finden lassen. In Abb. 9 ist als ausgewähltes Beispiel der Zusammenhang zwischen den Lasermessungen und den Messergebnissen des Sandflächenverfahrens wiedergegeben.

3-D-Messungen

Bei allen Untersuchungen blieb der Abstand zwischen 3-D-Kamera und Prüffläche, und damit auch die Größe des Messfelds konstant. Ähnlich wie bei den Lasermessungen wurden Lage- und Formabweichungen 1. und 2. Ordnung über Softwarefilter eliminiert, da sie nicht der Rauheit zuzuschreiben sind. Das verwendete Auswertungsprogramm ermittelt einige Rauheitskenngrößen für die gesamte Fläche. Nach der Extraktion von Profillinien erhält man jedoch eine größere Auswahl an Parametern. Abb. 10 und 11 zeigen beispielhaft sowohl brauchbare als auch völlig unbrauchbare Zusammenhänge zwischen elektrooptisch ermittelten Geometriedaten und Sekundäreigenschaften.

Weil wie zuvor erwähnt zwischen Rutschhemmung und Gleitwiderstand keine Abhängigkeit besteht, war auch nicht zu erwarten, dass beide Eigenschaften gleich gut mit einer dritten Größe korrelieren. Der verhältnis-

By contrast, electro-optical measuring systems can be used to capture parameters of the topography of concrete surfaces that can be reproduced very quickly. In addition, these methods achieve a high degree of accuracy. Arguments in favor of using laser triangulation sensors for profile measurement are their relatively low cost, their high optical resolution and their relatively low susceptibility to adverse effects. Although the fringe projection surface triangulation is more sensitive to ambient light and significantly more expensive, it yields much more, and thus more representative, topography data in a single pass. This also includes the option of capturing and interpreting parameters relating to directional textures, such as burrs or grooves, which would only be possible with a greater number of longitudinal and transverse profile measurements if laser triangulation were used. The results of both methods correlate very well to each other. Only a moderate correlation exists to the sand-patch method, which also yields a surface geometry parameter (the mean roughness depth R_t). However, this is mainly due to the low degree of reproducibility and to the limited resolution achieved by the sand-patch method.

A relatively good, and even better than expected, correlation exists between the anti-slip properties and the roughness parameters R_a measured with the electro-optical method. Due to the enormous amount of data and the existing analysis options that have not yet been optimized, only a certain portion of the parameters could be combined and analyzed to date. There may be even better correlations between the anti-slip properties and other roughness parameters. Further investigations in this regard are still underway.

Since texture and roughness are primary characteristics that can be influenced during the production process, the integration of electro-optical measuring systems into the manufacturing environment could not only enable a system of continuous quality control but also implement a link between electronic measurement and machine settings in order to also manage the production and finishing process in the sense of a control loop arrangement.

mäßig starke Zusammenhang zwischen Rutschhemmung (Schiefe Ebene) und Geometrie Kenngrößen (Abb. 10) legt nahe, diese Untersuchungen fortzuführen und den Nachweis des Zusammenhangs durch weitere Messwerte zu festigen. Auch untereinander korrelieren die elektrooptischen Messverfahren recht gut (Abb. 12). Die Absolutwerte der Rauheitskennwerte sind allerdings um einen konstanten Betrag gegeneinander verschoben, der in der Größenordnung des mikrostrukturellen Rauschens beim Streifenlichtverfahren liegt.

Schlussfolgerungen

Rutschhemmung und Reinigungsfähigkeit sind einander entgegenstehende Eigenschaften, zwischen denen ein Kompromiss gefunden werden muss, der allen Anforderungen genügt. Dies ist keine leichte Aufgabe, zumal es sich um Sekundäreigenschaften handelt, die sich erst im Nachhinein, d. h. abgekoppelt vom Produktionsprozess, bestimmen lassen. Hinzu kommt, dass die zur Verfügung stehenden Rutschsicherheits- oder Gleitreibungsprüfverfahren mit einer Reihe von prüftechnischen Nachteilen behaftet sind.

Im Gegensatz dazu können mit elektrooptischen Messsystemen sehr schnell reproduzierbare Kennwerte für die Topografie von Betonoberflächen gewonnen werden. Außerdem lassen sich hohe Genauigkeiten erzielen. Für die Profilmessung mit Laser-Triangulationssensoren sprechen der verhältnismäßig günstige Preis, die hohe optische Auflösung und die verhältnismäßig geringe Anfälligkeit gegen Störeinflüsse. Die Streifenlicht-Flächentriangulation ist zwar empfindlicher gegen Fremdlicht und deutlich teurer, sie liefert aber weitaus mehr und daher repräsentativere Topografiedaten in einem Arbeitsgang. So können auch Informationen über gerichtete Texturen wie Rillen oder Grate gewonnen und interpretiert werden, was bei der Laser-Triangulation nur mit einer größeren Zahl von Längs- und Querprofilmessungen möglich wäre. Die Ergebnisse beider Verfahren korrelieren sehr gut miteinander. Zum Sandflächenverfahren, das mit der mittleren Rautiefe R_t ebenfalls einen Kennwert für die Geometrie der Oberfläche liefert, bestehen nur mäßige Korrelationen, was aber in erster Linie an der geringen Reproduzierbarkeit sowie an der begrenzten Auflösung des Sandflächenverfahrens liegt.

Zwischen den rutschhemmenden Eigenschaften und den elektrooptisch gewonnenen Rauheitskennwerten R_a besteht ein verhältnismäßig guter Zusammenhang, der sogar die Erwartungen übertrifft. Wegen des immens großen Datenumfanges und noch nicht optimierter Auswertungsmöglichkeiten konnte bisher nur ein Teil der vorliegenden Kennwerte miteinander kombiniert und ausgewertet werden. Möglicherweise ergeben sich zwischen Rutschhemmung und anderen Rauheitsparametern sogar noch bessere Korrelationen. Weitergehende Untersuchungen hierzu dauern derzeit noch an.

Da es sich bei der Textur bzw. Rauheit um produktionstechnisch steuerbare Primäreigenschaften handelt, könnte durch die Integration elektrooptischer Messsysteme in die Fertigungsumgebung nicht nur eine ständige Qualitätskontrolle stattfinden, sondern über eine Kopplung von elektronischer Messung und Maschineneinstellungen auch eine Steuerung des Herstellungs- und Nachbearbeitungsprozesses im Sinne eines Regelkreises.

Rolf-Rainer Schulz, Frankfurt am Main

References/Literatur

- [1] Fischer, H.: Beurteilung der Rutschsicherheit von Fußböden. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.). Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft, 2005
- [2] Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Fahrbahndecken aus Beton – MOB, Ausgabe 2000, Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonstraßen. Aus: Straßenbau A–Z, Lfg 6/01, Berlin: Erich Schmidt Verlag
- [3] Wenzl, P.: Dauerhafte Texturgeometrien. Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Texturgeometrie von Betonfahrbahndecken. 45. Forschungskolloquium des DAfStb. Aus: 100. Jahrgang Beton- und Stahlbetonbau (2005)
- [4] Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit (BGR 181): „Fußböden in Arbeitsräumen und Arbeitsbereichen mit Rutschgefahr“, Ausgabe Okt. 1993 mit Aktualisierung Okt. 2003
- [5] Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz (GUV-R 181): „Fußböden in Arbeitsräumen und Arbeitsbereichen mit Rutschgefahr“, Ausgabe April 1994 mit Aktualisierung Okt. 2003
- [6] DIN 51130: 2004-06: Prüfung von Bodenbelägen – Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft – Arbeitsräume und Arbeitsbereiche mit Rutschgefahr, Begehungsverfahren – Schiefe Ebene
- [7] DIN 51097: 1992-11: Prüfung von Bodenbelägen; Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft; Nassbelastete Barfußbereiche; Begehungsverfahren; Schiefe Ebene
- [8] E DIN 51131: 2006-06 (Entwurf): Prüfung von Bodenbelägen – Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft – Verfahren zur Messung des Gleitreibungskoeffizienten
- [9] DIN EN 1338: 2003-08: Pflastersteine aus Beton – Anforderungen und Prüfverfahren
- [10] DIN EN 1339: 2003-08: Platten aus Beton – Anforderungen und Prüfverfahren
- [11] DIN EN 1340: 2003-08: Bordsteine aus Beton – Anforderungen und Prüfverfahren
- [12] Rohowski, H.: R-/SRT-/ μ -Werte! Was gilt wo? Neue Regeln zur Rutschhemmung bei Bodenbelägen In: opus C (2005), Nr. 3, S. 70–74
- [13] Gubeljic, A.: Verfahren zur Bestimmung der Griffigkeit bzw. Rutschsicherheit an Betonböden, Diplomarbeit FH-Frankfurt am Main, 2006 (unveröffentlicht)
- [14] DIN EN 13036-1: 2001-08 Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 1: Messung der Makroturtiefe der Fahrbahnoberfläche mithilfe eines volumetrischen Verfahrens
- [15] DIN EN 1766: 2000-03 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Referenzbetone für Prüfungen
- [16] DIN ISO 10844: 1997-05 Akustik – Anforderungen an Prüfstrecken zur Geräuschmessung an Straßenfahrzeugen
- [17] DAfStb-Richtlinie: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie). Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). Berlin und Köln: Beuth Verlag, Oktober 2001
- [18] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING). Hrsg.: Bundesminister für Verkehr, Abtlg. Straßenbau. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag Borgmann, März 2003
- [19] DIN EN ISO 13473-1: 2004-07: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe
- [20] Block, K.; Drell, R.: Oberflächenrauheit und Haftverbund. Spritzbetonverstärkte Bauteile. In: Beton 48 (1998), Nr. 2, S. 75–79 und Nr. 3, S. 132
- [21] Momber, A.; Schulz, R.-R.: Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton. Bearbeitung – Eigenschaften – Prüfung. Basel: Birkhäuser Verlag, Basel – Boston – Berlin, 2006
- [22] El-Tornachi, M. K.: Rauheit von Betonoberflächen. 3-D-Laser-Messung und Beschreibung der Rauheit von Betonoberflächen. Reibung und Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton unter nicht ruhender Belastung, Dissertation, Dortmund, 2003
- [23] Eymann, P.: 3-D-Kamera zur Formerfassung von Oberflächen – Bedienung und Anwendungsmöglichkeiten, Studienarbeit Studiengang Maschinenbau FH-Frankfurt am Main, 2007 (unveröffentlicht)
- [24] Gesierich, A.; Bothe, T.; Li, W.: Entwicklung des Streifenprojektionssystems „3-D-Kamera“, von der Idee über das Produkt zum industriellen Einsatz. Aus: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3-D-Messtechnik, Oldenburger 3-D-Tage, 2006. Luhmann, T., Müller C. (Hrsg.), Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2006
- [25] Jüptner, W.; Osten, W.: 3-D-Kamera – ein miniaturisiertes Streifenprojektionssystem. Aus: Mikrosystemtechnik Infobörse 50 (2004), Informationsreihe der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
- [26] Hofmann, K.: Elektrooptische Rauheitsmessungen an Betonoberflächen für die Betoninstandsetzung und die Bestimmung der Rutschsicherheit, Diplomarbeit FH-Frankfurt am Main, 2008 (unveröffentlicht)