# Digitale Bestimmung der Rauheit – Potenziale für Schubfugen

P. Lenz, K. Zilch

**Zusammenfassung** Die aktuelle Normung berücksichtigt nicht vollumfänglich die Potenziale des Beton-Beton-Verbundes mit der Folge, dass Schubfugen nicht wirtschaftlich bemessen werden können. Es wird nicht zwischen den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit unterschieden. Als Folge werden Traganteile, die unterschiedliche Verformungszustände der Fugenufer zueinander bedingen, ohne Würdigung dieser miteinander addiert. Betontechnologische Einflussfaktoren, mit Ausnahme der Betondruckfestigkeit, werden nicht berücksichtigt. Ebenso wird der Einfluss der Aufrauungsmethode nicht bewertet; verzahnte Oberflächen, ob geschalt, durch Stemmen oder mittels Hochdruckwasserstrahlen aufbereitet, werden gleichbehandelt.

Neben der Menge und Lage der die Fuge kreuzenden Bewehrung und der Zugfestigkeit der verwendeten Betone, wird der rechnerische Schubwiderstand nur über die durch die Rauheit der Fuge bestimmten Parameter *c* und  $\omega$  festgelegt. Die Rauheit wird qualitativ beschrieben und in vier Stufen eingeteilt: sehr glatt, glatt, rau und verzahnt. Durch die qualitative und gestufte Festlegung der Rauheitsparameter können Tragwiderstände, vor allem an den Stufenübergängen zur nächst höheren Rauheitskategorie überschätzt werden. Im Umkehrschluss kann zur Erreichung des geforderten Tragwiderstands ein zu hoher und daher unwirtschaftlicher Aufrauungsaufwand gefordert sein.

Als Zwischenziel sollte zumindest die Rauheit exakt beschreibbar sein, um eine direkte funktionale Beziehung zwischen Tragwiderstand der Fuge und der Rauheit herstellen zu können. Im Rahmen des Artikels wird daher ein baupraktisches Verfahren zur Digitalisierung von Betonoberflächen und der Auswertung dieser Oberflächen hinsichtlich der Rauheit vorgestellt.

# Digital measurement of roughness – potentials for interface shear

**Abstract** Current codes do not consider the potentialities of bond between concretes cast at different times to its full extent resulting in an uneconomic design in many cases. There is no differentiation between serviceability and ultimate limit states. Capacities of various mechanisms are imposed not considering the different slip behavior. Factors resulting from concrete technology, with the exception of the compressive strength, as well as the effect of the method of roughening are not appreciated. Intended interfaces, produced by formwork, by chiseling or by waterjetting are treated equally. Besides the area and the position of the transverse reinforcement and the tension strength of concrete the parameters c and  $\mu$  characterizing the roughness of the interface determine the calculated interface shear resistance. The roughness is qualitatively described in four levels: very smooth, smooth, rough, and indented. Capaci-

#### Dr.-Ing. Peter Lenz

Zilch + Müller Ingenieure GmbH Erika–Mann–Straße 63, 80636 München Ienz@zm-i.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch

Zilch + Müller Ingenieure GmbH

Erika–Mann–Straße 63, 80636 München zilch@zm-i.de

ties especially close to the transitions between the different levels may be overestimated. On the other hand to obtain the necessary capacity an excessive and therefore uneconomic roughening effort may be required.

The intermediate objective should at least be an exact description for the roughness to get a direct relationship between capacity of the interface and the roughness. This paper gives a method usable in the building praxis to digitize interfaces and to evaluate their roughnesses.

#### 1 Ausgangssituation und Motivation

Der Verbund zwischen Betonen unterschiedlichen Alters spielt in der Baupraxis eine immer wichtigere Rolle. In diesem Sinne sind nicht nur "klassische" Verbundfugen zwischen Fertigteil und Ergänzungsbeton von Bedeutung, sondern jede Fuge bei der nicht "frisch in frisch" betoniert wird.

Angesichts des steigenden Vorfertigungsgrades und des erhöhten Ertüchtigungsbedarfs (Bauen im Bestand) gewinnen nachträglich ergänzte Bauteile immer mehr an Bedeutung, da durch Vorfertigung die Bauzeit beschleunigt werden kann. Auch vor dem Hintergrund der sich verknappenden Ressourcen und in Hinblick auf ökologische und energieeffiziente Gebäude bieten zum Beispiel Betonergänzungen Vorteile, indem Bestandsbauwerke hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit ertüchtigt werden können. **Bild 1** stellt prinzipiell das Tragverhalten einer Schubverbundfuge dar.

Neben der Menge und Lage der die Fuge kreuzenden Bewehrung und der Zugfestigkeit der verwendeten Betone, wird der Schubwiderstand nach aktuellem Bemessungskonzept [1], [2] vor allem über die durch die Rauheit des Altbetons bestimmten Parameter *c* und  $\mu$  festgelegt (Gl. 6.25). Zusätzliche zum Beispiel betontechnologische Einflussfaktoren nach [3] oder die Unterscheidung zwischen starrem und verschieblichem Verbund nach [4], [5] werden nicht berücksichtigt.

$$\begin{aligned} v_{Rdi} &= c \cdot f_{ctd} - \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (1, 2 \cdot \mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \\ &\leq 0, 5 \cdot v \cdot f_{cd} \end{aligned}$$
 DIN EN 1992-1-1 (6.25)

mit:

 $v_{Rdi}$  Bemessungswert der Schubtragfähigkeit in der Fuge *c* Rauigkeitsbeiwert für Adhäsionstraganteil

- $f_{ctd}$  Bemessungswert der Betonzugfestigkeit
- $\mu$  Rauigkeitsbeiwert für Reibtraganteil
- $\sigma_n$  die Spannung infolge der Normalkraft rechtwinklig zur Fuge, die gleichzeitig mit der Querkraft wirken kann
- $\rho = A_s/A$
- $A_s$  die Querschnittsfläche der die Fuge kreuzenden Verbundbewehrung mit ausreichender Verankerung auf beiden Seiten der Fuge einschließlich vorhandener Querbewehrung
- *A<sub>i</sub>* die Fläche der Fuge, über die Schub übertragen wird
- *α* Neigungswinkel der Verbundbewehrung
- v Rauigkeitsbeiwert zur Abminderung der Betondruckfestigkeit



Bild 1. Versagensschema der Fuge bei zunehmender Fugenverschiebung; Links: Adhäsionstragwiderstand; Mitte: Reibungstragwiderstand; Rechts: Bewehrungstragwiderstand

Fig. 1. Failure mechanism of interface with increasing slip; Left: Capacity by adhesion; Central: Capacity by friction; Right: Capacity by reinforcement



Die Oberflächen der Altbetone werden unabhängig von der Art ihrer Bearbeitung und Herstellung in vier Kategorien unterteilt (**Tabelle 1**). Die Eingruppierung in die jeweiligen Kategorien erfolgt einerseits qualitativ durch Beschreibung der Herstellungsbedingungen und andererseits durch Bestimmung von Rauheitsparametern, zum Beispiel der Rautiefe R<sub>t</sub> nach Kaufmann [6].

In der DIN EN 1992–1–1 [1] wird die Rauheit nur qualitativ beschrieben, als Messverfahren wird das Sandflächenverfahren nach Kaufmann [6] genannt. In der Praxis ist das Sandflächenverfahren nur bedingt einsetzbar, unter anderem kann es beispielsweise nicht an stark geneigten Flächen durchgeführt werden. Wird anstelle des definierten Sandvolumens Gips verwendet, sind die Randbedingungen (Korngröße, usw.) nicht eingehalten.

Nach DIN-Fachbericht 102 [7] war zudem eine "definierte Rauheit" als Profilkuppenhöhe angegeben. Diese war in einer Fußnote folgendermaßen definiert:

"Bezüglich der Definition der Oberflächenrauigkeit siehe auch DAfStb-Heft 525. Die Rauigkeitsparameter für die Zuordnung der Kategorie "rau" sollten als mittlere Rautiefe nach dem Sandflächenverfahren von Kaufmann  $R_t \ge 1,5$  mm bzw. als maximale Profilkuppenhöhe  $R_p \ge 1,1$  mm betragen. Die Rauigkeitsparameter für die Zuordnung der Kategorie verzahnt sollten als mittlere Rautiefe  $R_t \ge 3,0$  mm bzw. als maximale Profilkuppenhöhe  $R_p \ge 2,2$  mm betragen. Die Werte sollten als Mittelwerte von mindestens drei Messungen nachgewiesen werden." Entsprechende Ausführungen sind direkt in DIN EN 1992–2 [8] und DIN EN 1992–2/NA [9] nicht mehr gegeben. In [10] finden sich Skizzen (**Bild 2**) zu den aufgeführten Parametern  $R_t$  und  $R_p$ .

Es verbleibt zur exakten, normativen Beschreibung der Rauheit offensichtlich nur die Profilkuppenhöhe  $R_p$ . Nach [11] ist die maximale Profilkuppenhöhe der Abstand des höchsten Punktes des Profils von der Mittellinie innerhalb der Bezugsstrecke (Bild 2). Die Mittellinie ist dabei eine horizontale Linie, die innerhalb der Bezugsstrecke das Profil so durchschneidet, dass die Summe der Quadrate der Profilabweichungen von dieser Linie ein Minimum ist.

In [12] wird weiter ausgeführt, dass "die zusätzlich angegebenen Rauigkeitsparameter mittlere Rautiefe R<sub>t</sub>, nach Kaufmann (...) bzw. maximale Profilkuppenhöhe R<sub>p</sub> nach Schäfer (...) ... als abschätzende Konformitätskriterien in Zweifelsfällen oder für Kontrollen im Fertigteilwerk gedacht"





**Bild 3. Betonage "frisch in frisch"** Fig. 3. Placing concrete "fresh to fresh"



**Bild 4. Betonage nach Erstarren des Altbetons** Fig. 4. Placing concrete after stiffening of the older part



**Bild 5. Ausgewählte Schubfugen** Fig. 5. Selected shear interfaces

sind. "Die Frage, ab welcher Messlänge in Längs- und Querrichtung und mit welcher Anzahl ein repräsentatives Ergebnis erzielt werden kann, ist offen."

#### 2 Was sind Fugen?

Generell kann zwischen kraftschlüssigen und nicht-kraftschlüssigen Fugen unterschieden werden. Nicht-kraftschlüssige Fugen werden planmäßig angeordnet, um zum Beispiel ein unterschiedliches Setzungs- und oder Dehnungsverhalten von Bauteilen schadfrei aufnehmen zu können. Ungewollte Fugen entstehen, falls eigentlich monolithisch bemessene Bauteile nicht als Eingussystem (aus einem Guss) hergestellt werden können. Generell wären diese Fugen bemessungsrelevant und sollten kraftschlüssig sein.

Falls in kurzer zeitlicher Abfolge Beton lagen- oder abschnittsweise eingebracht werden kann und durch das Verdichten der Lagen sowie der Abschnitte die Betone homogenisiert werden können, wird von einer Betonage "frisch in frisch" gesprochen. Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass das Durchstoßen der Schüttfuge zwischen den unterschiedlich alten Betonen zu einer homogenen Vermischung der beiden Betone führt [13]. Bild 3 stellt die Vermischung des Alt- mit dem Neubeton im Bereich der Schüttfuge schematisch dar. Wegen der zeitlichen Abfolge der Betonage wird zwischen Alt- und Neubeton unterschieden.

Zeitlich wird die Betonage "frisch in frisch" durch den Erhärtungsbeginn des Altbetons begrenzt. Dieser wird zum Beispiel durch sich nicht mehr schließende Rüttelgassen gekennzeichnet, da mit beginnender Erhärtung der Beton an Festigkeit gewinnt. Eine Vermischung der Betone ist somit nicht mehr möglich (**Bild 4**).

Der Betonquerschnitt kann nicht mehr "homogenisiert" werden, zwischen Alt- und Neubeton liegt somit eine Fuge vor. Es stellt sich die Frage, ob die Adhäsionsfestigkeit zwischen Alt- und Neubeton der Zugfestigkeit der beiden Betone entspricht. Zudem entwickeln die beiden Betone durch den zeitlichen Versatz voneinander abweichende Materialparameter. In der Fuge treten daher neben den planmäßigen Einwirkungen somit zusätzliche ungewollte auf, für die die Fuge bemessen werden muss. Generell wird davon ausgegangen, dass mit wachsendem Altersunterschied zwischen Alt- und Neubeton die ungewollten Einwirkungen (z. B. durch wachsende Schwindunterschiede) zunehmen. Normativ wird die Problematik von Fugen zwischen unter-

schiedlich alten Betonen in der Regel nur bei sogenannten "Schubfugen" betrachtet. Als "Schubfugen" werden Fugen bezeichnet, wenn längs der Bauteilachse im Wesentlichen



**Bild 6. Einseitig belastete nachträglich ergänzte Stützenkonsole** Fig. 6. Excentrically loaded corbel added to a column

### <u>Hauptaufsatz</u>



Bild 7. Oberflächen unterschiedlicher Rauheit (v. l. n. r. globale bis mikroskopische Rauheit) Fig. 7. Surfaces with different roughness (left to right: Global to microscopic roughness)

Schubkräfte übertragen werden. Dies trifft beispielsweise (**Bild 5**) auf nachträglich ergänzte Platten- und Balkentragwerke zu.

In der Praxis werden die Bemessungsregeln für "Schubfugen" oftmals für den Nachweis von Fugen herangezogen ohne zusätzliche Spannungszustände senkrecht zur Fugenfläche zu beachten. Neben den Schubspannungen längs der Fuge werden Normalspannungen aus Biegung und Torsion senkrecht und längs zur Fuge (**Bild 6**) meist nicht zum Ansatz gebracht. In Verbindung mit dem nicht treffenden Nachweisformat kann dies zum Verlust der Tragfähigkeit führen. Als Beispiel kann hier eine nachträglich an eine Stütze montierte Konsole dienen. Dabei soll der Riegel nur einseitig aufliegen und seine Belastung daher exzentrisch übertragen. Hier muss entweder der Einfluss der Torsion berücksichtigt werden oder die Übertragungsfläche so reduziert werden, dass der Last- und der Widerstandsschwerpunkt übereinstimmen.

#### 3 Was ist Rauheit?

Der Begriff der Rauheit entstammt der Oberflächenphysik und bezeichnet die Unebenheit einer Oberfläche. Generell kann zwischen globaler und lokaler, makroskopischer und mikroskopischer Rauheit unterschieden werden, wobei die betrachteten Maßstäbe sehr unterschiedlich sein können (**Bild 7**). Eine einheitliche absolute Kenngröße zur Beschreibung der Rauheit existiert jedoch nicht. In der Regel wird die Rauheit durch die Welligkeit (Stichwort: Fourier Analyse, Abschätzung von Wellenlängen, Amplituden, usw.) mathematisch beschreibbar.

Als Verfahren zur Beurteilung der Rauheit bietet sich die Messung von Profillängen einzelner Profilschnitte (**Bild 8**) an.

Im Gegensatz zu geometrischen Figuren (Kreis, Ellipse, usw.) kann die Länge eines Profilschnittes jedoch nicht exakt bestimmt werden. Wird eine bekannte Eichlänge (Lineal) an die jeweiligen Profilschnitte angelegt, dann kann durch Addition der Eichlängen die tatsächliche Länge des Profilschnittes abgeschätzt werden (**Bild 9**, links). Durch Variation der Eichlänge ergeben sich für dieselben Profilschnitte unterschiedliche Profillängen (Bild 9, rechts). Neben der gewählten Messlänge hängt die Bestimmung der Rauheit zudem von der Genauigkeit der Verfahren ab, mit denen die Oberfläche und der Profilschnitt gemessen wurden.

Aus dem in Bild 9 dargestellten Ausschnitt könnte wiederum ein Ausschnitt mit entsprechender Makro- und Mikrorauheit mit anderem Maßstab dargestellt werden, bis letzt-



Bild 8. Raue Oberfläche mit Profilschnitt; Profilschnitt; Ausschnitt (v. l. n. r.) Fig. 8. Rough surface with profile section; profile section; cutout (left to right)



**Bild 9. Variation der Messlängen** Fig. 9. Variation of measuring lengths

endlich die Kristallstruktur der Oberfläche vermessen würde.

Es wird deutlich, dass aufgrund der angesprochenen Maßstabseffekte der Begriff der Rauheit für nachträglich ergänzte Betonoberflächen näher eingegrenzt werden muss. In Anlehnung an [14] schlägt Reinecke [15] vier Ordnungsklassen für Oberflächen nachträglich ergänzter Betonbauteile vor (**Tabelle 2**).

Für den Beton-Beton-Verbund sind Rauheiten der 1. Ordnung und 2. Ordnung relevant. Die Rauheit 0. Ordnung ist für die betrachteten Effekte nicht relevant, da die großwelligen Formabweichungen weder eine effektive Steigerung der Verbundfläche noch effektive Verzahnungseffekte bieten. Formabweichungen der 3. Ordnung, das heißt im submikroskopischen Bereich, sind ebenso nicht von Bedeutung, zumal sie technisch nur mit erhöhtem Aufwand zu erfassen sind.

Für das Bauwesen wurde bereits in [16] ein "quantitatives" Verfahren zur Bestimmung der Oberflächengeometrie vorgeschlagen, um anhand dieser Kennwerte einen Rauheitsbeiwert zu bestimmen. Es sieht vor, in einem Messraster von 5 mm die relativen Höhenkoten von rauen Oberflächen zu erfassen und statistisch auszuwerten.

# Tabelle 2. Ordnungssystem für Gestaltabweichungen nach Reinecke [15] Table 2. Classification system for variations of shape according to Reinecke [15]

Gestaltabweichung	Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
0. Ordnung: Globale Rauheit	Großwellige Abweichung von der idealen Geometrie ( $\lambda^{1}$ ) > 10 cm und R <sub>t</sub> <sup>2</sup> ) < 3,5 mm)	Ungenauigkeiten beim Betonieren oder bei Herstellung der Rauheit
1. Ordnung: Makrorauheit	Abweichungen variabler Geometrie (im Bereich 0,5 mm $< R_t^{2} < 3,5$ mm)	Freigelegte Zuschlagkörner
2. Ordnung: MikrorauheXit	Abweichungen variabler Geometrie (im Bereich $10 \mu m < R_t^{2)} < 500 \mu m$ )	Oberflächenstruktur der Zuschläge, Verformung beim Sandstrahlen
3. Ordnung:	Abweichungen bei der Kristallbildung	Kristallisationsvorgänge

<sup>1)</sup> Die Wellenlänge der Gestaltabweichung

<sup>2)</sup> Die rechnerische mittlere Rautiefe R<sub>t</sub> als Amplitude der Gestaltsabweichung



**Bild 10. Prinzipskizze Wenzel 'scher Quotient** Fig. 10. Principle of "Wenzel Quotient"



**Bild 11. Durchführung des Sandflächenverfahrens nach Kaufmann** Fig. 11. Execution of the sand patch method according to Kaufmann

Reinecke [15] vergleicht verschiedenste Ansätze und Verfahren zur Bestimmung der Rauheit. Es wird deutlich, dass berührungslose Verfahren gegenüber tastenden Verfahren eine höhere Auflösung ermöglichen und deshalb zu bevorzugen sind.

Auf der Grundlage von aufgenommenen Profilschnitten untersuchte Reinecke [15] verschiedene Verfahren, um einen möglichst quantitativ bestimmbaren Parameter zur Beschreibung der Bauteiloberflächen zu finden. Neben anderen empfiehlt Reinecke [15] den "Wenzel'schen Quotienten" als brauchbaren Parameter zur Beschreibung rauer Oberflächen.

Eine eindeutige Reproduktion von Profilschnitten durch den Wenzel'schen Quotienten ist jedoch nicht möglich. Die beiden Funktionen  $z = 2 \cdot \sin y$  und  $z = \sin (2 \cdot y)$  besitzen zum Beispiel auf die Basislänge von  $2\pi$  bezogen denselben Wenzel'schen Quotienten, obwohl sie sich in der Wellenlänge sowie der Amplitude um dem Faktor 2 voneinander unterscheiden. Hinzu kommt der Einfluss des Messrasters, das heißt wie viele Stützpunkte hat das aufgenommene Profil, und die Wahl der Basislänge l für die Bestimmung des Wenzel'schen Quotienten (**Bild 10**). Die Wenzel'schen Quotienten können streng genommen nur dann quantitativ miteinander verglichen werden, wenn die gewählte Basislänge  $\Delta x$  und das gewählte Messraster übereinstimmen. Es stellt sich daher die Frage, ob Rauheitswerte anhand von Profilschnitten gewonnen werden sollten. Eine flächige Auswertung der Rauheit sollte einzelnen Profilschnitten vorgezogen werden. Erste Ansätze hierzu sind bereits in [17] dokumentiert.

#### 4 Messverfahren in der Praxis

#### 4.1 Das Sandflächenverfahren nach Kaufmann

Das Sandflächenverfahren nach Kaufmann ist das in Praxis am häufigsten eingesetzte Verfahren. Es lie-

fert den Rauheitsparameter R<sub>t</sub> und ist in [6] ausführlich dokumentiert. Eine definierte Menge Sand mit definiertem Korndurchmesser (trockener Quarzsand, Korngröße 0,1 mm bis 0,5 mm) wird auf der Fläche möglichst kreisförmig (**Bild 11**) ohne nennenswerten Druck mit einer Hartholzscheibe (Ø 50 mm, Dicke 10 mm) verteilt, wobei anhand der Kreisfläche auf die Rautiefe R<sub>t</sub> geschlossen werden kann (Gl. 8.1).

$$R_t = \frac{4 \cdot V}{d_m^2 \cdot \pi} \tag{Gl. 8.1}$$

mit:

- $R_t$  Rautiefe nach Kaufmann
- V Verwendetes Sandvolumen
- $d_m$  Kreisdurchmesser, bzw. mittlerer Ellipsendurchmesser

Das beschriebene Verfahren ist baupraktisch einfach an horizontalen bis wenig geneigten Flächen durchführbar. Das Ergebnis ist jedoch im hohen Maße von Humanfaktoren abhängig.

Neben den Humanfaktoren stellt sich auch die Frage des Maßstabfaktors. Die maximale Korngröße des verwendeten Sandes wird auf 0,5 mm festgelegt. Gemäß [1] und [10] (Tabelle H6.1) sollen "raue" Oberflächen eine Rautiefe R<sub>t</sub> von mindestens 1,5 mm aufweisen. Soll die Oberfläche als "verzahnt" eingestuft werden, dann muss eine minimale Rautiefe R<sub>t</sub> von 3,0 mm vorliegen. Die geforderten Werte R<sub>t</sub> entsprechen dabei dem 3-fachen und dem 6-fachen Korndurchmesser. Aus technischer Sicht sind diese Größenordnungen als zu klein anzusehen. Noch kleinere Rautiefen als R<sub>t</sub> = 1,5 mm durch das Sandflächenverfahren zu bestimmen wird als technisch unsinnig angesehen, da über 1,5 mm Profilhöhe nur 3 Sandkörner angeordnet werden könnten.

#### 4.2 Reifenprofilmesser

Nach [12] war "als praxistaugliches Messmittel auf der Baustelle für die Rautiefen freigelegter Gesteinskörnungen 3 mm ("raue" Fuge) bzw. 6 mm ("verzahnte" Fuge) (...) z. B. ein Reifenprofilmesser" angesehen. Detaillierte Spezifikationen zum "Messverfahren" sind nicht gegeben. Es fehlten Angaben zur notwendigen Anzahl der Messpunkte, Angaben zur zu verwendenden Basislinie sowie Angaben zur Auswertung der Messergebnisse. Die Messung der freigelegten Zuschlagskörner mit einem derartigen Verfahren kann daher nur bedingt als praxistauglich eingestuft werden (**Bild 12**).



**Bild 12. Rauheitsmessung mit Profilmesser Links: Basislänge ca. 20 mm; Rechts: Basislänge ca. 110 mm** Fig. 12. Measuring the roughness with a skid depth gage Left: Measuring length ca. 20 mm; Right: Measuring length ca. 110 mm

In [10] sind entsprechende Ausführungen nicht übernommen.

#### 5 Digitalisierung von Oberflächen

Neben den oben beschriebenen Verfahren können Oberflächen digitalisiert werden, um ausgehend von diesen Daten geeignete Parameter für die jeweiligen zu bewertenden Oberflächen zu bestimmen. In **Bild 13** ist beispielsweise eine digitalisierte Grundplatte für Verbundversuche dargestellt.

Ausgehend von einer digitalen Datenbasis (Punktewolke) können verschiedenste Parameter bezüglich der Betonoberfläche gewonnen werden. Die eingesetzten Verfahren (Streifenlichtprojektion, Lasertriangulation, usw.) stammen zumeist aus dem Maschinen-, Fahrzeug- oder Flugzeugbau und werden vor allem in der Qualitätssicherung sowie im Reverse Engineering eingesetzt. Kosten und Komplexität der Systeme beschränkten den Einsatz der Digitalisierung daher meist auf Laboruntersuchungen für Forschungszwecke. Die weitere Verarbeitung der Daten war zudem oft zu komplex, um auf Baustellen eingesetzt zu werden. Mittlerweile haben sich aufgrund des technischen Fortschritts Systeme auf dem Markt etabliert, die hinsichtlich der geforderten Genauigkeit und der Handhabbarkeit unter Baustellenbedingungen nutzbar sind.

#### 6 Digitalisierung von Oberflächen – Baupraktische Anwendung

#### 6.1 Aufnahme der Oberflächen

**Bild 14** zeigt eine aufgeraute Fläche von circa 1,6 m Höhe und 2 m Breite. Es handelt sich um eine vertikale Fläche, die Zugänglichkeit wird durch zum Teil vorhandene Anschlußbewehrung eingeschränkt.

Zur Digitalisierung der Oberfläche wurde das System EXASCAN der Firma Creaform ([18]) eingesetzt. Dieses basiert auf Lasertriangulation, wobei die Ortsbestimmung des Scanners im Raum durch Fotogrammmetrie bewerkstelligt wird. Im Prinzip bestimmt der Laser den Abstand des Geräts zur Oberfläche. Der Laser beschreibt dabei in einzelnen Messschritten eine Dreiecksebene mit festem Öffnungswinkel, deren Schnitt mit der aufzunehmenden Oberfläche eine Profillinie beschreibt (blaue Linie in Bild 14).



#### Bild 13. Verfeinerte Rauheitsbestimmung

1. v. L: Gesamte Platte mit Einzelkörpern; 2. v. L: Gerasterte Einzelkörperoberfläche; 3. v. L: Detail mit Einzelraster; 4. v. L: Verteilung der Wenzel schen Quotienten über die Körperoberfläche

#### Fig. 13. Refined determination of roughness

1<sup>st</sup> from left: Complete slab with single part; 2<sup>nd</sup> from left: Grided surface part; 3<sup>rd</sup> from left: Detail with grid; 4<sup>th</sup> from left: Distribution of "Wenzel Quotient" over the different surface parts



Bild 14. Messstelle mit aufgenommenen Teilflächen Fig. 14. Measuring site and measured subarea

Diese Linie wird nun analog zu einem "Anstreichvorgang" frei Hand über die Bauteiloberfläche geführt. Damit beim Messvorgang die Lage des Scanners zur Oberfläche bestimmt werden kann, wurden "Messrahmen" mit Referenzpunkten auf die Bauteiloberfläche aufgeklebt.

Das Ergebnis der Digitalisierung stellt eine Punktewolke der Oberfläche mit einem orthogonalen, quadratischen Raster mit einem Punktabstand von 0,5 mm dar. Die Auflösung der z-Koordinate betrug dabei 0,050 mm ([18]) bei einer volumetrischen Genauigkeit von 0,020 mm + 0,100 mm/m. Für die vorliegende Messfeldgröße bedeutet dies, eine maximale Abweichung (in der Rasterebene) von  $\pm$  0,035 mm.

Als erstes Ergebnis der Messung wird ein "Falschfarbenbild" (**Bild 15**) ausgegeben. Es wird die Abweichung der z-Koordinaten der Messpunkte zu einer beliebigen Ebene angegeben.

Um eine einheitliche Bezugsgröße zur Auswertung der Daten zu erhalten wurde anhand der minimalen Summe der Fehlerquadrate der z-Koordinaten in die Punktewolke eine "Best-Fit-Ebene" eingefügt. Diese Ebene entspricht einem Ausgleich der einzelnen Punktabstände des gewählten Messvolumens analog Bild 2.

#### 6.2 Auswertung der Profilkuppenhöhe an Profilschnitten

[12] sieht vor, anhand des Mittelwertes von mindestens drei Profilschnitten die Profilkuppenhöhe zu bestimmen. Angaben zur Länge der Profilschnitte fehlen. Im Folgenden wird deshalb kurz auf die Probleme bei der Auswertung eingegangen.

Unklar ist, auf welche Ausgleichsgerade oder Ebene die erzeugten Schnitte zu beziehen sind. **Bild 16**, links zeigt drei Schnitte im Abstand von 50 mm zueinander.

Die dargestellten Verläufe sind auf die "globale" Best-Fit-Ebene (Bild 16, links) der gesamten aufgenommenen Fläche bezogen. Jeder der drei Schnitte besitzt eine eigene, nicht in der Best-Fit-Ebene liegende Korrelationsgerade (Geraden in Bild 16, links).

Für Bild 16, rechts wurden die Verläufe aus Bild 16, links auf die jeweiligen Korrelationsgeraden bezogen, wodurch sich die zugehörigen Profilkuppenhöhen ändern. Durch dieses Vorgehen werden die Beträge der Profilkuppenhöhen der einzelnen Schnitte reduziert.

Für die hier vorgestellte Beispielfläche ergibt sich für alle in x-Richtung der Platte ausgewerteten Schnitte eine mittlere mini-/maximale Profilkuppenhöhe von -2,19 mm/ +1,26 mm, bei Auswertung der Schnitte bezüglich der Best-



**Bild 15. Teilfläche nach 3. Aufrauungsschritt (Bez: T\_3\_4) mit Messrahmen** Fig. 15. Subarea after 3<sup>rd</sup> roughening step including measurement frame



Bild 16. Auswertung von Profilschnitten im Abstand von 50 mm zueinander; Links: Schnitte mit Korrelationsgeraden, auf Best-Fit-Ebene bezogen; Rechts: Schnitte auf jeweilige Korrelationsgerade bezogen

Fig. 16. Evaluation of profile sections spacing 50 mm; Left: Section with line of correlation based on best fit plane; Right: Section based on respective line of correlation

Fit-Ebene. Erfolgt die Auswertung der Schnitte bezüglich der jeweiligen Regressionsgeraden, dann ergibt sich für die gleiche Anzahl von Schnitten eine mittlere mini-/maximale Profilkuppenhöhe von - 1,95 mm/+ 1,40 mm.

Wird der vorher gewählte Profilschnitt (Bild 16, links) in drei Profilschnitte von circa 100 mm Länge unterteilt, wird also die Basislänge variiert, dann erhält man drei Korrelationsgeraden mit unterschiedlichen Neigungen (**Bild 17**, links). In Bild 17, rechts ist der auf die Best-Fit-Ebene bezogene Profilschnitt als schwarzer Verlauf, der auf die Korrelationsgerade bezogene Profilschnitt als grauer Verlauf und die auf die jeweilige Korrelationsgerade bezogenen drei Teilschnitte als rote Verläufe dargestellt.

Erfolgt die Auswertung anhand der vorgestellten Teilschnitte, dann ergibt sich für die dreifache Anzahl von Schnitten eine mittlere minimale/maximale Profilkuppenhöhe von -1,42 mm und von +1,04 mm. "Globale" Extremwerte beeinflussen die Auswertung der unterteilten Profilschnitte weniger stark.

Ein Nachteil der Unterteilung besteht jedoch darin, dass das vormals stetige Rauheitsprofil in drei Profile mit Sprüngen zwischen den einzelnen Teilprofilen zerlegt wird. Würde die Länge der Profilschnitte weiter verkleinert, dann würden sich die Profilkuppenhöhen dem unteren Grenzwert von Null annähern.

#### 6.3 Auswertung der Profilkuppenhöhe von Best-Fit-Ebenen

Um den "Maßstabseffekt" bei der Auswertung der Profilkuppenhöhen zu umgehen wird vorgeschlagen, die Profilkuppenhöhe der aufgenommenen Fläche zur jeweiligen "Best-Fit-Ebene" zu bestimmen. Aufgrund der Größe der aufgenommenen Teilfläche von je circa 300 mm Kantenlänge und einem Verhältnis der Kantenlänge zum Durchmesser des Größtkorns von circa 20:1 erschien die Teilfläche als ausreichend klein dimensioniert, um keine negativen globalen Einflüsse zu beinhalten, aber groß genug um lokale Extremwerte nicht zu überschätzen. Wichtiger als der Mittelwert der maximalen Profilkuppenhöhe aller Profilschnitte ist dabei der Anteil von Punkten, welche die geforderte Profilkuppenhöhe überschreiten.

**Bild 18** zeigt beispielhaft die Verteilung der z-Koordinaten der Punktewolke bezüglich der "Best-Fit-Ebene" (entspricht den Profilkuppenhöhen  $R_p$ ). Neben der Verteilung ist das zugehörige "Falschfarbenbild" der betrachteten Fläche dargestellt.

Die Verteilung der Profilkuppenhöhen gemäß Bild 18 erscheint normalverteilt, wegen der Bezugsebene mit einem



Bild 17. Auswertung eines Profilschnitts in Teilabschnitten (0 mm–100 mm, 100 mm–200 mm, 200 mm–300 mm); Links: Korrelationsgeraden der einzelnen Abschnitte; Rechts: Auf die Korrelationsgerade bezogene Profilschnitte (rote Verläufe), Schnitt auf Best-Fit-Ebene bezogen (schwarzer Verlauf), Schnitt auf die Korrelationsgerade bezogen (gesamter Schnitt 0 mm–300 mm, grauer Verlauf)

Fig. 17. Evaluation of a profile section in parts (0 mm-100 mm, 100 mm-200 mm, 200 mm-300 mm); Left: Line of correlation of the single parts; Right: Section profiles based on the correlation line (red), Section profiles based on best fit plane (black), Section profiles base on correlation line of total section (0 mm-300 mm, grey)

### Hauptaufsatz



Bild 18. Links: Verteilung der z-Koordinate über die betrachtete Fläche; Rechts: Falschfarbenbild der Oberfläche Fig. 18. Left: Distribution of z-coordinate of the area considered; Right: False color image of the surface

Maximum der relativen Häufigkeit bei null. Im Beispiel wurden betragsmäßig eher größere negative Werte beobachtet. Dies muss auf den Abtragvorgang (Sandstrahlen) zurückgeführt werden, da positive exponierte Spitzen nicht erhalten bleiben sondern, abgetragen werden. Punktuelle Vertiefungen bleiben dagegen eher erhalten. Anhand der Auswertung des gesamten Messvolumens kann festgestellt werden, dass die für die Eingruppierung der Oberfläche in die Kategorie "rau" notwendige Profilkuppenhöhe von 1,1 mm bei der Aufrauung eingehalten wurde. Sogar Profilkuppenhöhen von mehr als 2,2mm wurden gemessen, die als Grenze zur Eingruppierung in die Rauheitsklasse "verzahnt" dienen. Es stellt sich an dieser Stelle die Frage, ob

die geforderten Anforderungen auf Extremwerte sowie auf notwendige Quantilwerte bezogen werden sollten.

#### 6.4 Schrittweise Aufrauung – Erhöhung der Rauheit

Das Vorgehen ist in Bild 19 dargestellt. Nach Aufnahme der ursprünglichen Oberfläche wurde in mehreren Arbeitsgängen gestrahlt und anschließend die Oberfläche aufgenommen. Die Einmessung der Flächen erfolgte über Referenzmarken. Durch Abzug der durch die Referenzfläche begrenzten Oberfläche konnte das jeweilige Abtragsvolumen ermittelt sowie die Steigerung der Aufrauung bestimmt werden.



Bild 19. Bestimmung des Volumenabtrags/Aufrauungsgrads

- o. links: Aufrauungsschritt\_0 (geschalte Oberfläche)
- o. Mitte: Aufnahme der geschalten Oberfläche
- o. rechts: Aufrauungsschritt\_1 (einfacher Sandstrahldurchgang)
- Aufrauungsschritt\_2: (zusätzlicher einfacher Sandstrahldurchgang) u. links: Aufrauungsschritt\_3: (zwei zusätzliche, Sandstrahldurchgänge))
- u. Mitte:

u. rechts: Rahmen und Oberfläche

Fig. 19. Determination of removal volume/roughening grade;

- Top left: Roughening step 0 (formwork)
- Top central: Measuring the concrete surface (formwork) Top right:
- Roughening step 1 (single round of sandblasting)
- Roughening step 2 ( additional single round of sandblasting) Bot. left: Bot. central: Roughening step 3 (two additional single rounds of sandblasting)
- Bot. right: Measuring frame and surface T3 4

## <u>Hauptaufsatz</u>





Neben der Ermittlung des Abtragvolumens, wurde die Veränderung der Profilkuppenhöhen der jeweiligen Bearbeitungsschritte bestimmt. Die Ergebnisse sind **Bild 20** zu entnehmen. Es wird deutlich, dass anhand der Auswertung der dargestellten relativen Häufigkeit der Profilkuppenhöhen sowie der Summenkurve die Rauheit mithilfe der Profilkuppenhöhe sehr gut wiedergegeben werden kann.

Mit fortschreitender Aufrauung nimmt die betragsmäßige Größe der Profilkuppen zu. Die Häufigkeitsverteilung wird gedrungener, die Summenkurve nähert sich einer Geraden mit konstanter Steigung an. Die Auswertung zeigt, dass durch die statistische Auswertung der Profilkuppenhöhe die Rauheit gut beschrieben werden kann.

#### 7 Zusammenfassung und Fazit

Wegen des fraktalen Charakters rauer Oberflächen erscheint die Bestimmung absoluter Rauheitskennwerte nicht möglich. Vor diesem Hintergrund müssen zur eindeutigen Bestimmung von Rauheitsbeiwerten die Randbedingungen der Erfassung sowie der Auswertung der Oberfläche bekannt sein.

Das in der Praxis eingesetzte Verfahren – das Sandflächenverfahren nach Kaufmann – ist neben Humanfaktoren ebenfalls mit Maßstabsfaktoren (z. B. die Sieblinie des Sandes) behaftet und nur für wenig geneigte Flächen geeignet. Aus diesem Grund sollten hinsichtlich einer eindeutigen Beschreibung von Rauheitsparametern einheitliche quantifizierbare Verfahren mit eindeutigen Randbedingungen definiert werden.

Zur Anwendung in der Baupraxis bietet sich inzwischen, aufgrund der technischen Weiterentwicklung von berührungslosen Verfahren, die Digitalisierung von Bauteiloberflächen an. Die Rauheit der Oberfläche kann anhand der relativen Häufigkeit der Profilkuppenhöhe gut charakterisiert werden. Um den Maßstabseffekt der aufgenommenen Flächen zu eliminieren muss die Punktedichte innerhalb der digitalisierten Fläche konstant sein, der Punkteabstand in der Fläche ist gleich.

Die digitale Bestimmung der Rauheit führt zu reproduzierbaren Rauheitsparametern und ermöglicht somit eine funktionalen Beziehung zur Bestimmung der rechnerischen Schubfugentragfähigkeit. Zudem kann der erforderliche Aufrauungsgrad exakter beschrieben und besser überwacht werden. In der Folge können Schubfugen wirtschaftlicher bei gleichbleibender Sicherheit ausgebildet werden.

#### Literatur

- [1] DIN EN 1992–1–1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Brüssel: Europäisches Komitee für Normung, 2010; \*inkl.\*
- [2] DIN EN 1992–1–1/NA:2013–04 Nationaler Anhang National Festgelegte Parameter – Eurocode 2; DIN Deutsches Institut f
  ür Normung e. V.; 2013.
- [3] Lenz, P.: Beton-Beton-Verbund Potentiale f
  ür Schubfugen. M
  ünchen, Technische Universit
  ät M
  ünchen, Lehrstuhl f
  ür Massivbau, Dissertation, 2012.
- [4] Schnell, J.; Zilch, K.; Weber, M.; Mühlbauer, C.: Bauen im Bestand/ Verstärken von Betonbauteilen. In: Hegger, J.; Mark, P. (Hrsg.): Stahlbeton aktuell. Beuth Verlag, Berlin, 2016.
- [5] Randl, N.: Design recommendations for interface shear transfer in fib MC2010. In: Structural Concrete, Vol. 14 (2013), Iss. 3, pp. 230–241.
- [6] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. In: Straßenbautechnik 24 (1971), Heft 3, S. 131-135.
- [7] DIN-Fachbericht 102: Betonbrücken. Deutsches Institut f
  ür Normung e. V., 2009–03.
- [8] DIN EN 1992–2: Betonbrücken Bemessungs- und Konstruktionsregeln. Brüssel: Europäisches Komitee für Normung, 2008; \*inkl. \*
- [9] DIN EN 1992–2/NA:2013–04 Nationaler Anhang National Festgelegte Parameter – Eurocode 2; DIN Deutsches Institut f
  ür Normung e. V.; 2013.

- [10] DAfStb Heft 600: Erläuterungen zu DIN EN 1992–1–1 und DIN EN 1992–1–1/NA. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2012.
- [11] Schäfer, H. G.; Block, K.; Drell, R.: Oberflächenrauheit und Haftverbund. Beuth, Berlin, 1996 (Hefte des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton 456).
- [12] DAfStb Heft 525: Erläuterungen zu DIN 1045–1. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2010.
- [13] VDZ (Hrsg.): Bereiten und Verarbeiten von Beton. Zement-Merkblatt Betontechnik B7, 2002.
- [14] DIN 4760: Gestaltabweichungen Begriffe Ordnungssystem. Deutsches Institut f
  ür Normung e. V., 1982–06
- [15] Reinecke, R.: Haftverbund und Rissverzahnung in unbewehrten Betonschubfugen. München, Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau, Dissertation, 2004.
- [16] FIP: Shear at the interface of precast and in situ concrete: Guide to good practice. Wexham Springs, Slough, 1982.
- [17] Zilch, K.; Lenz, P.: Beton-Beton-Verbund Potenziale f
  ür Neubau und Ert
  üchtigung. In: Bauingenieur 84 (2009), Heft 11, S. 466–471.
- [18] Creaform: Handyscan3D\_Datenblatt: Handyscan3D\_Datenblatt 2011.