

Ein Messsystem zur kamerabasierten Bestimmung der Rauigkeit von Bauteiloberflächen – Konzept und Evaluierung

A Measurement System for Camera-based Determination of Surface Roughness of Building Components – Concept and Evaluation

Baris Özcan, Raimund Schwermann, Jörg Blankenbach

Die Oberflächenrauigkeit von technischen Bauteilen ist eine wichtige Kenngröße in vielen ingenieurwissenschaftlichen Fachgebieten. Im Bauwesen, beispielsweise bei der Betoninstandsetzung, hat die Rauigkeit einen großen Einfluss auf die Verbundeigenschaft von Betonbauteilen. Das seit Jahrzehnten verwendete Standardverfahren für die Bestimmung der Rauigkeit von Betonoberflächen ist das Sandflächenverfahren nach Kaufmann. Das Verfahren ist einfach in der Durchführung, jedoch mit einigen Nachteilen verbunden, wie beispielsweise die fehlende Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, den starken Prüferinfluss oder die fehlende Durchführbarkeit an stark geneigten Flächen oder Decken. Daher wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts ein neuartiges kamerabasiertes Messsystem zur Bestimmung der Rauigkeit entwickelt. Im vorliegenden Beitrag wird das entwickelte Messsystem, die Untersuchungen zur Kamerakalibrierung und die Ergebnisse zur Rauigkeitsermittlung vorgestellt. Zur Beurteilung der Ergebnisse werden 18 Betonplatten mit Referenzwerten für die Rauigkeit verwendet.

Schlüsselwörter: Beton, Rauigkeit, Photogrammetrie, Oberflächenvermessung, Zerstörungsfreie Prüfung

The surface roughness of technical components is an important parameter in many engineering fields. In civil engineering, for example in concrete repair, roughness has a major influence on the adhesive properties of concrete components. The state-of-the-art measurement method for determining the roughness of concrete surfaces is the sand patch method according to Kaufmann. The measurement method is easy to perform, however, it comes with several disadvantages, such as lack of reproducibility of the results, strong user influence or the missing applicability on strongly slanted surfaces and ceilings. In a research project, a novel camera-based measurement system for the roughness determination was developed. In this article, the developed measurement system, investigations for the camera calibration and results for the roughness estimation are presented. For the evaluation of the results 18 concrete slabs with reference values for the roughness are used.

Keywords: Concrete, roughness, photogrammetry, surface metrology, non-destructive testing

1 EINLEITUNG

1.1 Motivation

Die Rauigkeit von Bauteiloberflächen stellt für die Instandhaltung und Sanierungsplanung von Bauwerken einen wichtigen Faktor dar. Soll beispielsweise ein Reparatursystem auf den Unterbeton aufgebracht werden, ist die Adhäsion zwischen Unterbeton und Reparatursystem zu gewährleisten. Neben der spezifischen Adhäsion – bestehend aus physikalischen, chemischen und thermodynamischen Wechselwirkungen der Oberflächen – spielt ebenfalls die mechanische Adhäsion eine wichtige Rolle. Der mechanischen Adhäsion liegt das Prinzip zugrunde, dass das flüssige Beschichtungsmaterial, auch Adhäsiv genannt, in die Poren und Vertiefungen des Festkörpers fließt, aushärtet und sich dort – ähnlich wie Dübel oder Druckknöpfe – mechanisch verankert /Bikermann 1968/. Einen wichtigen Einflussparameter auf die mechanische Adhäsion stellt dabei die Rauigkeit der Bauteiloberfläche dar. Darüber hinaus ist die Kenntnis der Rauigkeit ebenfalls für die Volumenabschätzung des aufzubringenden Beschichtungsmaterials erforderlich. Ein konkreter Anwendungsfall im Hochbau ist beispielsweise das Auftragen von Spritzbeton oder Putz an Wänden. Eine weitere Einflussgröße stellt die Rauigkeit im Straßenbau dar. Beispielsweise bestimmt sie hier maßgeblich den Reibungswiderstand zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn und wirkt sich somit auf die Antriebs- und Bremskraft von Fahrzeugen aus /Maurer 2007/. Daher übt die Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche neben den Reifenmerkmalen, der Geschwindigkeit eines Fahrzeugs, der Wasserfilmdicke und Verschmutzung auf der Fahrbahn einen direkten Einfluss auf die Verkehrssicherheit aus.

1.2 Stand der Technik

Das im Bauwesen verwendete Standardverfahren zur Ermittlung der Rauigkeit von Oberflächen ist das Sandflächenverfahren nach Kaufmann /Kaufmann 1971/. Hierbei wird eine definierte Menge an Sand auf der zu vermessenden Oberfläche ausgebracht und so lange kreisförmig verteilt, bis sie sich nicht weiter verteilen lässt. Anschließend kann in Abhängigkeit vom Durchmesser des Sandflecks ein Wert für die Rauigkeit abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 2.2 und Gl. (2)). Obwohl das Verfahren sehr einfach in der Durchführung ist, weist es einige maßgebliche Mängel auf. So ist beispielsweise die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses nicht gegeben. Bei jeder Durchführung des Vorgangs weichen die Ergebnisse voneinander ab. Weiterhin hängt das Ergebnis entscheidend vom Anwender ab. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ergebnisse von Anwender zu Anwender um bis zu 20 % variieren können /Mellmann & Oppat 2008/. Ein weiteres Defizit ist die Voraussetzung einer direkten Berührung mit der Objektfläche. Der Kontakt mit der zu vermessenden Oberfläche kann diese entscheidend verändern bzw. verschleifen, sodass das Ergebnis verfälscht wird. Eine wesentliche Beschränkung besteht zudem darin, dass das Verfahren nicht an stark geneigten bzw. vertikalen Flächen (z. B. Wandflächen) oder an Decken angewendet werden kann.

Eine modernere Methode zur Bestimmung der Rauigkeit ist das Profilmessverfahren mithilfe von Laser-Triangulation /Schulz 2016,

2017/. Hierbei wird mit einer Laserdiode eine Laserebene aufgespannt, die auf die zu vermessende Oberfläche projiziert wird und sich auf dieser als Linie abbildet. Schräg zur Laserquelle befindet sich ein positionsempfindlicher Detektor (PSD), welcher auf die Laserlinie ausgerichtet ist und so erfasst. Eine Änderung des Abstands zwischen Laserquelle und Messobjekt bewirkt dementsprechend auch eine Änderung der Position des Signals auf dem Detektor. Ist die relative Lage des Detektors zur Laserquelle bekannt, kann durch trigonometrische Zusammenhänge die Tiefe des Messobjekts ermittelt werden. Das Verfahren ist zwar – im Gegensatz zum Kaufmann-Verfahren – fortschrittlicher und ermöglicht eine berührungsfreie und reproduzierbare Messung der Oberfläche, jedoch wird die Oberfläche nur linienhaft und nicht in der Fläche erfasst. Laserbasierte Messsysteme sind zudem verhältnismäßig teuer.

1.3 Zielsetzung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde in Kooperation mit dem Unternehmen Nedo GmbH & Co. KG ein neuartiges Messsystem entwickelt, das die flächenhafte Bestimmung der Rauigkeit ermöglichen soll. Das kamerabasierte System besteht aus einem Kreuzschlitten mit Steuerung und Antrieb, welches eine Industriekamera über die zu vermessende Oberfläche führt (siehe Abschnitt 3). Der aufgenommene Bildverband wird mit einer eigens entwickelten Software ausgewertet, um eine dreidimensionale Punktwolke der Oberfläche zu erzeugen. Im Anschluss kann die Punktwolke für unterschiedliche Analysen genutzt werden, wie beispielsweise im vorliegenden Fall für die Ableitung von Rauigkeitsparametern.

Das Messsystem beinhaltet die folgenden Merkmale:

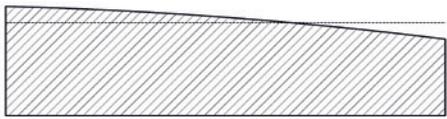
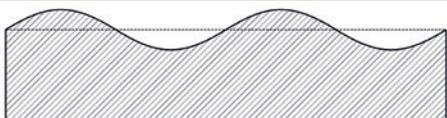
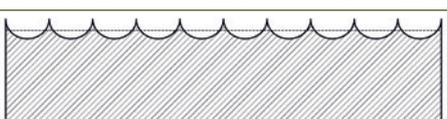
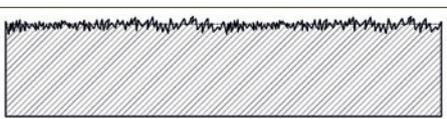
- berührungslos/zerstörungsfrei,
- passives, optisches Verfahren,
- bildbasiert,
- anwendbar auf beliebig ausgerichtete Flächen,
- portabel,
- flächenhafte Datenauswertung,
- digitales Verfahren.

Vor dem Einsatz des Messsystems ist die Kamera zu kalibrieren, um auf diese Weise die inneren Abbildungseigenschaften zu bestimmen. Der vorliegende Beitrag stellt das im Rahmen des Projekts entwickelte Verfahren für die Kalibrierung der im Messsystem eingesetzten Kamera vor und es werden erste Ergebnisse für die Ermittlung von Rauigkeitswerten präsentiert.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Gestaltabweichungen

Nach DIN 4760 werden die Abweichungen einer Ist-Oberfläche, die von einem Messgerät erfasst wurde, von einer geometrisch idealen Oberfläche als Gestaltabweichung definiert. Diese sind insgesamt in sechs Ordnungen gegliedert, die im Folgenden veranschaulicht werden (Tab. 1).

Gestaltabweichung		
1. Ordnung Formabweichung	Die Gestaltabweichung der 1. Ordnung beschreibt die Formabweichung einer Oberfläche. Diese zeichnet sich beispielsweise als Krümmung bzw. Unebenheit aus.	
2. Ordnung Welligkeit	Die 2. Ordnung der Gestaltabweichung gibt periodisch auftretende Abweichungen der Oberfläche wieder.	
3. Ordnung Rauigkeit	Die 3. Ordnung charakterisiert die Rauigkeit in Form von Rillen.	
4. Ordnung Rauigkeit	Die Rauigkeit in Form von Riefen, Schuppen oder Kuppen wird mithilfe der 4. Ordnung kenntlich gemacht.	
5. Ordnung Rauigkeit	Hier wird die Rauigkeit anhand der Gefügestruktur des Materials beschrieben.	nicht mehr auf einfache Weise bildlich darstellbar
6. Ordnung	Die letzte Ordnung gibt den Gitteraufbau des Werkstoffs an.	nicht mehr auf einfache Weise bildlich darstellbar

Tab. 1 | Übersicht der Arten von Gestaltabweichungen technischer Oberflächen (in Anlehnung an DIN 4760)

Die tatsächliche Oberfläche eines Bauteils besteht aus der Zusammensetzung aller o.g. Gestaltabweichungsarten. In *Abb. 1* ist ein zusammengesetztes Oberflächenprofil beispielhaft skizziert. Im Allgemeinen ist es für die Bestimmung einer Ist-Oberfläche daher erforderlich, alle Ordnungen von Gestaltabweichungen zu berücksichtigen. Während die ersten beiden Ordnungen die Formabweichung und Welligkeit von Oberflächen angeben, beschreiben die Abweichungsarten dritter bis fünfter Ordnung die Rauigkeit. Die Formabweichung und Welligkeit einer Oberfläche treten allerdings vornehmlich im Maschinenbau, beispielsweise in der Fertigungstechnik, auf. Während z.B. Fehler in der Führung der Werkzeugmaschine oder die Durchbiegung des Werkstücks zur Formabweichung führen, entsteht die Welligkeit beispielsweise durch Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeugs. Diese Einflüsse sind jedoch im Bauwesen bei der Betoninstandsetzung in der Regel nicht, oder zumindest nur in einem vernachlässigbaren Ausmaß, vorhanden.

Für den vorliegenden Anwendungszweck sind in der Regel daher nur die Gestaltabweichungen der dritten bis fünften Ordnung – die Rauigkeit – relevant, auf die daher im Folgenden fokussiert wird.

2.2 Kenngrößen

Für die Beschreibung der Rauigkeit dienen verschiedene Maße, wie beispielsweise der arithmetische Mittenrauwert, bei dem die absoluten Werte der Profilabweichungen über eine Bezugsstrecke aufsummiert und die Summe durch die Länge der Strecke dividiert werden. Die Berechnungsvorschrift für den arithmetischen Mittenrauwert lautet demzufolge

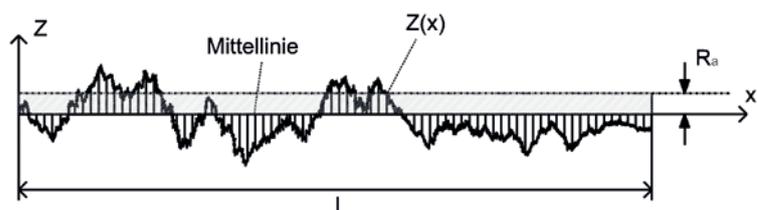


Abb. 1 | Kenngröße: Arithmetischer Mittenrauwert

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx. \quad (1)$$

Der Parameter entspricht daher dem durchschnittlichen Abstand der Profillinie zur Mittellinie. In *Abb. 1* wird der arithmetische Mittenrauwert R_a anhand einer beispielhaften Profillinie verdeutlicht.

Eine weitere Kenngröße ist aus dem Zusammenhang mit dem Sandflächenverfahren hervorgegangen. Durch die Ausführung des Sandflächenverfahrens entsteht ein Sandfleck, der als Zylinder mit einem bestimmten Durchmesser und einer unregelmäßigen Tiefe (bzw. Höhe) aufgefasst werden kann. Unter Kenntnis des Volumens V des aufgetragenen Sands und des Durchmessers d des Sandflecks kann daher mithilfe der umgeformten Formel für das

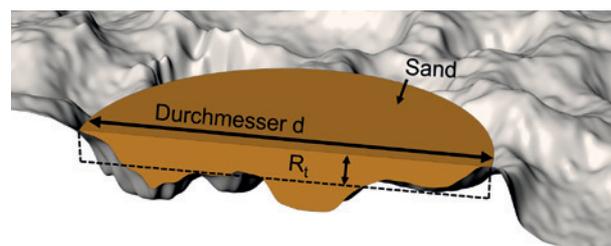


Abb. 2 | Veranschaulichung des Parameters R_t anhand eines Sandflecks

Zylindervolumen die mittlere Tiefe des Sandflecks ermittelt werden. Die mittlere Tiefe – in Verbindung mit dem Sandflächenverfahren auch als *mittlere Rautiefe* bezeichnet – wird mit dem Parameter R_t gekennzeichnet und kann auf folgende Weise berechnet werden:

$$R_t = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot d^2} \tag{2}$$

Demnach beschreibt die mittlere Rautiefe sinngemäß den durchschnittlichen Abstand der Objektoberfläche zur Ebene, welches durch die obersten „Spitzen“ aufgespannt wird (Abb. 2).

Auf weitere Kenngrößen und deren Unterschiede soll im Rahmen des Beitrags an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Für nähere Informationen sei auf die Fachliteratur verwiesen (u. a. /DIN EN ISO 4287/).

2.3 Kameramodell

Dem Prinzip der photogrammetrischen Abbildung liegt das vereinfachte Modell der Lochkamera zugrunde. Wird ein Objektpunkt P von einer Kamera aufgenommen, läuft der Bildstrahl vom Objekt geradlinig über das optische Zentrum O_{cam} der Kamera und trifft auf den Bildsensor als Bildpunkt p auf. Somit ist das optische Zentrum einer Kamera der mathematische Raumpunkt, durch den alle Bildstrahlen der abgebildeten Objektpunkte durchlaufen. Daher wird die Abbildung bekanntermaßen auch als Zentralprojektion bezeichnet (Abb. 3).

Die zentralprojektive Abbildung der Objektpunkte in die Bildpunkte (x', y') können mathematisch mit den Kollinearitätsgleichungen (Gln. (3a) und (3b)) beschrieben werden. Auf die Herleitung der wohlbekannten Zusammenhänge wird an dieser Stelle verzichtet und dafür auf die einschlägige Literatur verwiesen (vgl. u. a. /Kraus 2004/, /Luhmann 2018/).

$$x' = x'_H - c \cdot \frac{(X - X_0) r_{11} + (Y - Y_0) r_{21} + (Z - Z_0) r_{31}}{(X - X_0) r_{13} + (Y - Y_0) r_{23} + (Z - Z_0) r_{33}}, \tag{3a}$$

$$y' = y'_H - c \cdot \frac{(X - X_0) r_{12} + (Y - Y_0) r_{22} + (Z - Z_0) r_{32}}{(X - X_0) r_{13} + (Y - Y_0) r_{23} + (Z - Z_0) r_{33}}, \tag{3b}$$

mit

- x', y' : Bildpunktkoordinaten,
- x'_H, y'_H : Bildhauptpunktkoordinaten,
- c : Kamerakonstante,
- X_0, Y_0, Z_0 : Lage der Kamera,
- r_{ij} : Parameter der Rotationsmatrix,
- X, Y, Z : Objektpunktkoordinaten.

Das Lochkameramodell ist jedoch nur ein idealisiertes mathematisches Modell der photogrammetrischen Abbildung. Daneben spielt auch das physikalische Modell eine wichtige Rolle. Die Objektiv der Kameras bestehen aus mehreren Linsen, an denen die einfallenden Bildstrahlen mehrmals gebrochen werden, bevor sie auf den Bildsensor fallen. Die Brechung an den Linsen oder ein asymmetrischer Aufbau des Objektivs haben zur Folge, dass die Bildstrahlen gekrümmt auf den Bildsensor fallen und nicht mehr linear wie beim Lochkameramodell. Diese Abbildungsfehler, auch

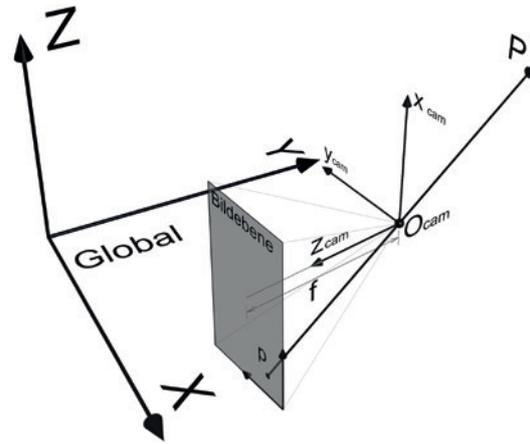


Abb. 3 | Lochkameramodell mit der Projektion eines Objektpunkts P zum Bildpunkt p

Verzeichnung genannt, bestehen größtenteils aus radial-symmetrischen und radial-asymmetrisch tangentialen Anteilen und können u. a. mit Korrekturpolynomen modelliert werden. Während sich der Einfluss der radial-symmetrischen Verzeichnung in Abhängigkeit vom Abstand r eines Bildpunkts zur Bildhauptpunktlage bemerkbar macht, wirkt sich die tangentielle Verzeichnung asymmetrisch zum Bildhauptpunkt aus.

Zur Modellierung der photogrammetrischen Abbildung unter Berücksichtigung der Abbildungsfehler werden zusätzliche Korrekturterme $\Delta x', \Delta y'$ an die Kollinearitätsgleichungen angebracht. Diese werden im Folgenden eingeführt.

Radial-symmetrische Korrekturterme:

$$\Delta x'_{rad} = x' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}, \tag{4a}$$

$$\Delta y'_{rad} = y' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}, \tag{4b}$$

mit

$$\Delta r'_{rad} = k_1 r'^3 + k_2 r'^5 + k_3 r'^7 + \dots$$

Tangentiale Korrekturterme:

$$\Delta x'_{tan} = p_1 (r'^2 + 2x'^2) + 2p_2 x' y', \tag{5a}$$

$$\Delta y'_{tan} = p_2 (r'^2 + 2y'^2) + 2p_1 x' y'. \tag{5b}$$

Gesamtkorrektur:

$$\Delta x' = \Delta x'_{rad} + \Delta x'_{tan}, \tag{6a}$$

$$\Delta y' = \Delta y'_{rad} + \Delta y'_{tan}. \tag{6b}$$

2.4 Bildbasierte 3D-Punktwolkenerzeugung

Ziel der bildbasierten 3D-Rekonstruktion ist es, ausgehend von photogrammetrischen Bildaufnahmen die abgebildete Szene in Form einer dreidimensionalen Punktwolke wiederherzustellen. Das auf Bildzuordnung basierende Verfahren besteht im Wesentlichen aus zwei Algorithmen: Structure-from-Motion (SfM) und Dense Image Matching (DIM). Beim SfM-Algorithmus werden zunächst mithilfe von sogenannten Merkmalsextraktoren /Lowe 2004/, /Bay et al.

2008/, /Calonder et al. 2010/ markante Bildpunkte (Schlüsselpunkte) in den Bildern identifiziert und einander eindeutig zugeordnet /Xia 2013/. Durch diese Bildpunkt-Korrespondenzen können u.a. die Objektkoordinaten der Bildpunkte und die äußere Orientierung der Kamera ermittelt werden. Schließlich werden im Zuge einer Bündelblockausgleichung die ermittelten Ergebnisse optimiert. Während beim SfM-Algorithmus die Objektkoordinaten nur von markanten Bildpunkten ermittelt werden, ist das Ziel des DIM, jedem Bildpunkt des einen Bildes den korrespondierenden Bildpunkt seines Nachbarbildes eindeutig zuzuordnen /Dall'Asta & Roncella 2014/, /Hirschmuller 2008/, /Remondino 2013/. Durch Vorwärtseinschneiden der korrespondierenden Bildpunkte können schließlich die Objektkoordinaten der Bildpunkte ermittelt werden. Für weitere Details sei auf weiterführende Publikationen verwiesen (vgl. u.a. /Hartley & Zisserman 2003/).

3 VORSTELLUNG DES MESSSYSTEMS

Im Folgenden werden das Konzept und die Apparatur des neuartigen kamerabasierten Messsystems vorgestellt sowie der Bildverarbeitungsablauf beschrieben.

3.1 Konzept zur Bilderfassung

Zur photogrammetrischen Datenerfassung wurde das Prinzip der Luftbildphotogrammetrie adaptiert. Die senkrecht zur Objektoberfläche ausgerichtete monokulare Kamera wird daher mäanderförmig parallel über die Aufnahmeoberfläche geführt. Dabei werden in gleichmäßigen Abständen stark überlappende Bildaufnahmen, in der Regel 60 % bis 80 %, erfasst. Das Konzept zur Bilderfassung wird in *Abb. 4* als Prinzipskizze dargestellt.

3.2 Apparatur

Die Hardwarekomponente des Messsystems besteht aus einem Kreuzschlitten mit Steuerung und Antrieb, welcher eine Industriekamera automatisch über die Aufnahmeoberfläche bewegt. Die mon-

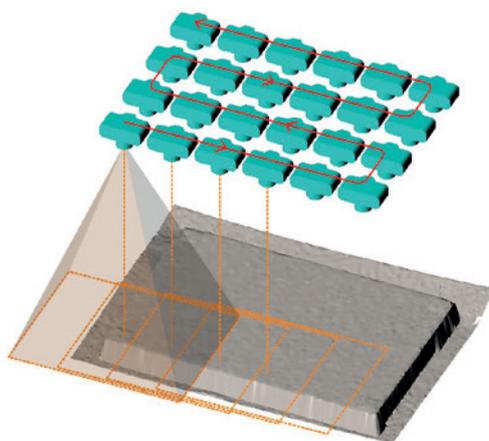


Abb. 4 | Konzept zur Bilderfassung

Spezifikation	
Auflösung ($H \times V$)	3 840 px \times 2 748 px
Pixelgröße ($H \times V$)	1,67 $\mu\text{m} \times$ 1,67 μm
Bittiefe	12 bit
Signal-Rausch-Verhältnis	32,9 dB
Mono/Farbe	Mono
Shutter-Technologie	Rolling Shutter

Tab. 2 | Spezifikationen der eingesetzten Industriekamera Basler acA3800-14um

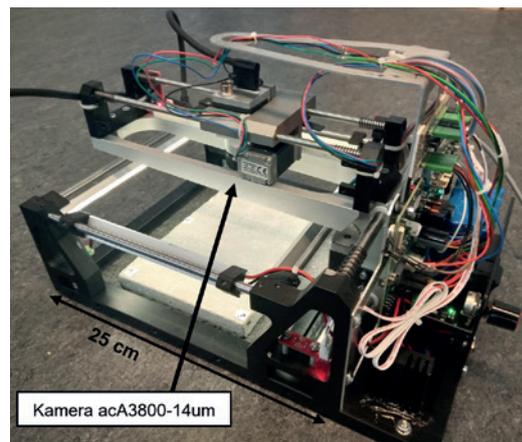


Abb. 5 | Das bildbasierte Messsystem

okulare Kamera wird hierbei auf zwei Achsen mäanderförmig über die zu vermessende Oberfläche bewegt und die Bilder werden im Stop-and-Go-Verfahren ausgelöst und dabei per USB an den Messrechner übertragen. Die gesamte Aufnahmedauer ist abhängig vom eingestellten Überlappungsgrad der Bilder bzw. von der Bildanzahl und beträgt bei insgesamt 30 Bildaufnahmen (5 Bilder in x -Richtung und 6 Bilder in y -Richtung) in der prototypischen Ausführung knapp 5 Minuten. Als Kamera kommt die monochrome Industriekamera Basler acA3800-14um zum Einsatz. Einige der wichtigsten Spezifikationen der Kamera können *Tab. 2* entnommen werden.

Für eine gleichmäßige diffuse Ausleuchtung der aufzunehmenden Fläche sind an der Apparatur ringsum LED-Lichtleisten angebracht. Die Intensität des Lichts kann nach Bedarf stufenlos gedimmt werden. Dadurch ist das Messergebnis kaum vom Tageslicht abhängig. In *Abb. 5* ist das Messsystem als Demonstrator dargestellt.

3.3 Bildauswertung

Zur Erzeugung einer dichten dreidimensionalen Punktwolke der Objektoberfläche wurde das zweistufige Bildzuordnungsverfahren, bestehend aus SfM und DIM, implementiert. Für die Realisierung des SfM werden einzelne Funktionalitäten der freien Programmiersprache OpenCV /Bradski 2000/ verwendet, während fürs DIM das Semi-Global Matching (SGM) /Hirschmuller 2008/ implementiert wurde. Der Programmablaufplan der entwickelten Software ist in *Abb. 6* dargestellt.

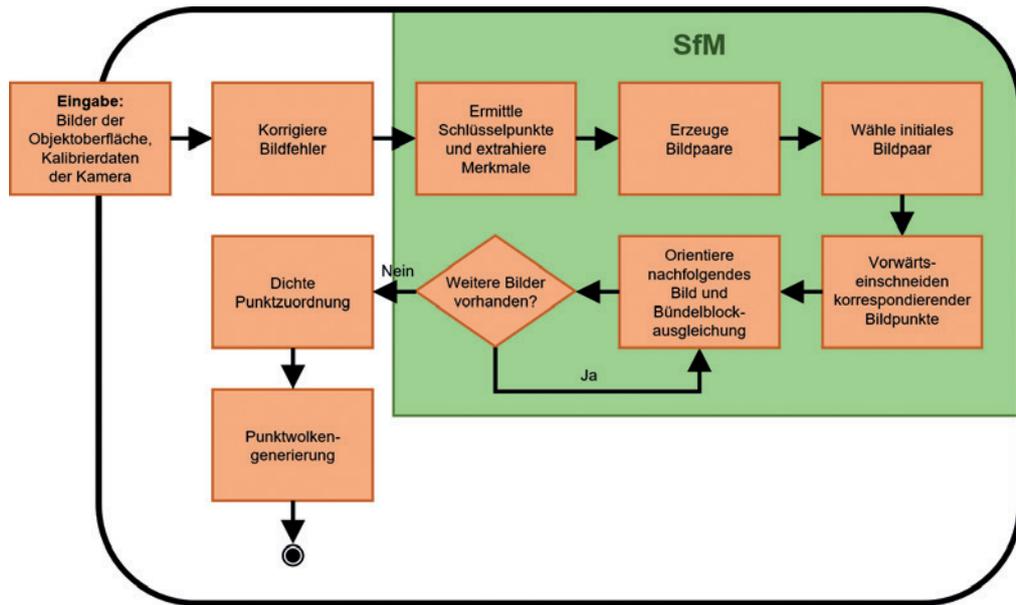


Abb. 6 | Programmablaufplan zur Erzeugung einer dichten dreidimensionalen Punktwolke

Die Software zur Bildauswertung benötigt als Eingabe Bilder der Objektoberfläche und Kalibrierparameter der Kamera. Für die gesamte Datenauswertung des Messsystems wird ein kartesisches Koordinatensystem eingeführt, bei dem die Z-Achse senkrecht auf der Objektoberfläche steht und in Richtung der Kamera zeigt.

In einem initialen Schritt werden die Bildaufnahmen korrigiert, sodass die Verzerrungen in den Bildern entfernt werden. Mit den korrigierten Bildern wird anschließend der SfM-Algorithmus durchgeführt.

In den Bildern werden zunächst mithilfe der SURF-Merkmalsextraktion /Bay et al. 2008/ markante Schlüsselpunkte identifiziert und in Form von Vektoren beschrieben. Die eindeutige Zuordnung dieser Merkmalsvektoren in unterschiedlichen Bildern ermöglicht sowohl die Ermittlung von überlappenden Bildaufnahmen und so die Generierung von Bildpaaren als auch die Bestimmung der relativen Orientierung, d. h. Drehung und Verschiebung, dieser Bildpaare. Anschließend werden – ausgehend von einem initialen Bildpaar – die Objektkoordinaten der korrespondierenden Bildpunkte durch Vorwärtseinschneiden ermittelt. Nachfolgende Bildaufnahmen werden sukzessive durch 2D-zu-3D-Punktkorrespondenzen in das vorliegende Modellkoordinatensystem orientiert und die neuen Bildpunkte mit korrespondierenden Bildpunkten der bereits orientierten Bildaufnahmen im Raum verschnitten. Nach jeder Bildorientierung wird eine Bündelblockausgleichung durchgeführt. Als Ergebnis entsteht zusätzlich zum orientierten Bildverband eine dünne Punktwolke der Objektoberfläche.

Nachdem alle Bildaufnahmen im vorliegenden Koordinatensystem orientiert wurden, erfolgt über alle Bildpaare eine dichte Punktzuordnung. Zunächst werden hierfür die Bildpaare in den Stereonormalfall transformiert. Dies ermöglicht eine Vereinfachung der Punktzuordnung, da sich nach diesem Schritt korrespondierende Bildpunkte in den Bildpaaren auf der gleichen Bildzeile befinden. Für die dichte Punktzuordnung wurde das SGM implementiert, da der Algorithmus einen guten Kompromiss zwischen Qualität und Laufzeit bietet /Poggi & Mattocchia 2016/. Die Anwendung des SGM auf Stereonormalbilder führt zu einer sogenannten Dispari-

tätskarte, in dem der Versatz der Bildpunkte im jeweiligen Bildpaar gekennzeichnet wird. Der Versatz der Bildpunkte wird schließlich genutzt, um durch Vorwärtseinschneiden der Punkte die dreidimensionalen Objektkoordinaten zu ermitteln. Das Vorwärtseinschneiden für jeden Bildpunkt führt somit zu einer dichten Punktwolke der Objektoberfläche.

4 UNTERSUCHUNGEN ZUR KAMERAKALIBRIERUNG

Für eine möglichst genaue Rekonstruktion der Objektoberfläche sind zunächst die Abbildungseigenschaften der Kamera im Rahmen einer Kalibrierung einmalig zu bestimmen.

4.1 Selbstkalibrierung

Die Kameraparameter (Innere Orientierung, vgl. Abschnitt 2.3) bestehen aus der Kamerakonstante f , der Bildhauptpunktlage in x - und y -Richtung, den radial-symmetrischen Verzerrungsparametern k_1 bis k_3 und den radial-asymmetrisch tangentialen

	f	c_x	c_y	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
f	1,00	-0,06	0,15	-1,00	0,99	-0,97	0,22	0,13
c_x		1,00	0,05	0,06	-0,06	0,06	0,04	0,01
c_y			1,00	-0,15	0,14	-0,13	0,04	-0,02
k_1				1,00	-0,99	0,97	-0,22	-0,13
k_2					1,00	-0,99	0,22	0,13
k_3						1,00	-0,21	-0,13
p_1							1,00	0,03
p_2								1,00

Tab. 3 | Abhängigkeiten der Parameter der inneren Orientierung nach der Selbstkalibrierung der Kamera anhand einer ebenen Oberfläche

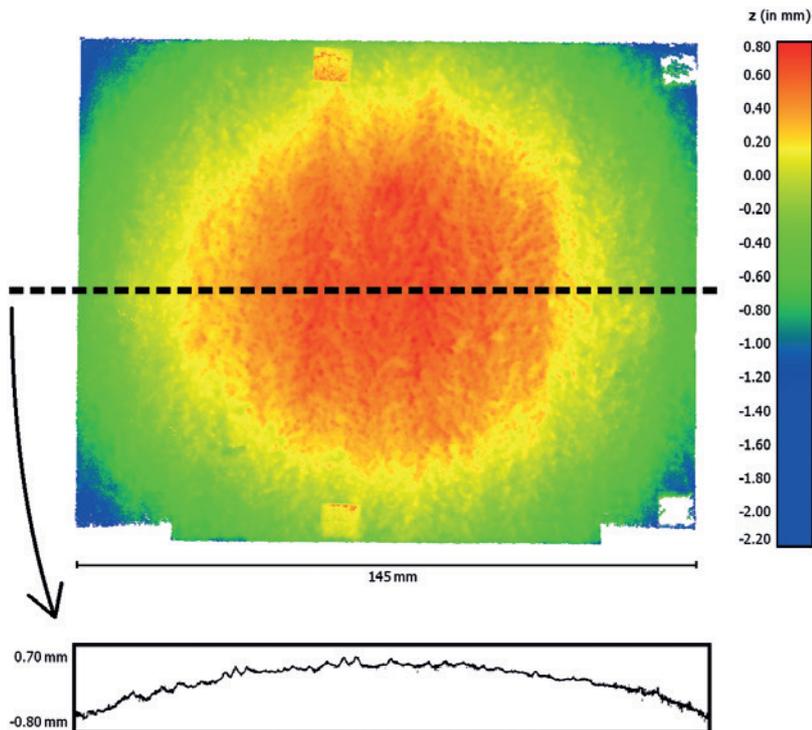


Abb. 7 | Nach der Selbstkalibrierung rekonstruierte gewölbte Punktwolke (oben), extrahierte Profillinie (unten, 10-fach überhöht dargestellt) und Histogramm der Z-Werte (rechts)

Verzeichnungsparametern p_1 , p_2 . Eine Selbstkalibrierung, bei der die Kamera ohne Passpunkte, sondern ausschließlich mit gemessenen Bildkoordinaten einer (ebenen) Betonoberfläche kalibriert wurde, führte zu unbefriedigenden Ergebnissen. Die Ursache hierfür liegt in erster Linie in der schlechten räumlichen Verteilung der Punkte und hat zur Folge, dass die inneren Abbildungsparameter der Kamera miteinander korrelieren. In Tab. 3 sind die Abhängigkeiten der Kameraparameter in Form der Korrelationskoeffizienten nach der Selbstkalibrierung dargestellt.

Anhand dieser ist deutlich zu erkennen, dass insbesondere die radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter (k_1 bis k_3) mit der Kamerakonstante (f) korrelieren. Rekonstruiert man anschließend mit diesen Kameraparametern die Betonoberfläche, enthält sowohl der wiederhergestellte Bildverband als auch die Punktwolke eine auffällige Wölbung (Abb. 7). Zur Visualisierung der Wölbung wurde durch die rekonstruierte Punktwolke ein Schnitt gelegt und eine Profillinie extrahiert. Diese Profillinie ist in 10-facher Erhöhung dargestellt (Abb. 7, unten). Im Histogramm der Punktwolke ist ebenfalls eine nach unten verschmierte Normalverteilung zu erkennen (Abb. 7, rechts).

4.2 3D-Kalibrierfeld

Da die Ursache für die unbefriedigenden Ergebnisse der Selbstkalibrierung in der fehlenden räumlichen Tiefe des Kalibrierobjekts lag, wurde ein räumliches Kalibrierfeld konzipiert. Auf dem Kalibrierfeld mit einem Grundriss von 17 cm \times 17 cm befinden sich insgesamt 144 Säulen in quadratischer Anordnung. Die Säulen haben dabei drei unterschiedliche Höhen, die in abwechselnder

Reihenfolge angeordnet sind, sodass eine gute räumliche Verteilung der Passpunkte gewährleistet ist. Die Passpunkte werden innerhalb des Kalibrierfelds verteilt, sodass auf den Säulen jeweils eine uncodierte Kreismarke und auf der Grundfläche insgesamt 121 codierte Marken angebracht sind. Der maximale Höhenunterschied der Passpunkte beträgt auf diese Weise 2,25 cm. Durch die alternierende Reihenfolge der unterschiedlich hohen Säulen wird sichergestellt, dass in jeder der Bildaufnahmen mehrere Marken aus verschiedenen Tiefen abgebildet werden. Aufgrund der vergleichsweise geringen Dimension bzw. erforderlichen Feinheit wurde die Herstellung des Kalibrierfelds mittels 3D-Druck durchgeführt. Das dafür notwendige Modell wurde hierfür mithilfe einer CAD-Software konstruiert. In Abb. 8 ist das hergestellte 3D-Kalibrierfeld dargestellt. Außen, am Rand des 3D-Kalibrierfelds, sind außerdem vier Kalibrierstäbe angebracht, auf denen sich jeweils an beiden Enden eine Marke befindet. Durch die im Vorfeld interferometrisch ermittelten

Strecken zwischen den Markenpaaren auf den einzelnen Stäben kann später der Maßstab für die Passpunkte des 3D-Kalibrierfelds eingeführt werden.

Für die Bestimmung der Soll-Koordinaten des 3D-Kalibrierfelds wurde dieses auf einem Stativ mit einer drehbaren Holzplatte befestigt und mit einer Spiegelreflexkamera (DSLR) aufgenommen (Abb. 9). Die DSLR wurde hierfür auf ein Kugelgelenk montiert, welches an zwei Achsen, parallel zum Kalibrierfeld, verfahren werden kann. Das Kalibrierfeld wurde für die Einmessung systematisch mit insgesamt 69 Fotos aus verschiedenen Richtungen erfasst und anschließend mithilfe der photogrammetrischen Software PHIDIAS ausgewertet /PHOCAD 2020/. Hierbei wurden zunächst Bildmessungen der Passpunkte durchgeführt und im nächsten Schritt

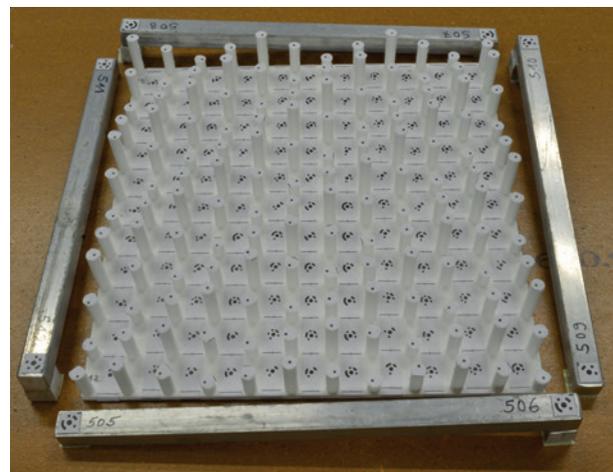


Abb. 8 | Das mittels 3D-Druck hergestellte 3D-Kalibrierfeld

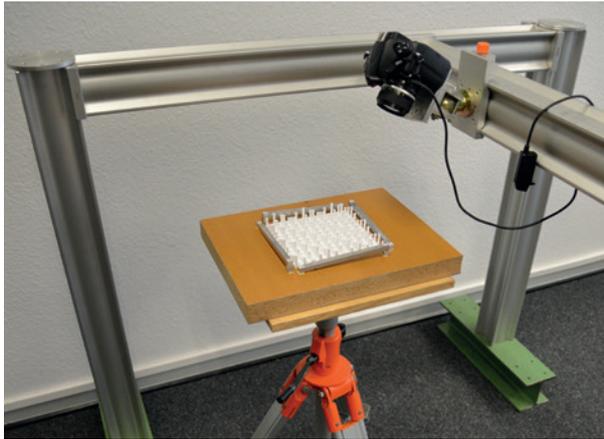


Abb. 9 | Messaufbau für die Einmessung der Passpunkte des 3D-Kalibrierfelds

mit einer Bündelblockausgleichung die Soll-Koordinaten der Passpunkte bestimmt. Im Zuge der Bündelblockausgleichung werden außerdem Angaben über die Bildmessgenauigkeit ermittelt. Diese liegt in x-Richtung bei $0,57 \mu\text{m}$ bzw. $0,12 \text{ Pixel}$ und in y-Richtung bei $0,59 \mu\text{m}$ bzw. $0,12 \text{ Pixel}$.

4.3 Kalibrierung der Industriekamera

Zur Kalibrierung der inneren Orientierung der Kamera wurden insgesamt 30 gleichmäßig über das Objekt verteilte Bilder aufgenommen. Anschließend wurde erneut in PHIDIAS mit den Bildmessungen der Passpunkte eine Bündelblockausgleichung durchgeführt, in die allerdings ausschließlich die Parameter der inneren Orientierung als Unbekannte eingeflossen sind. Die Objektmessgenauigkeit wird durch eine Kreuzvalidierung von ausgeglichenen Punktkoordinaten und Soll-Koordinaten und anschließender Berechnung des quadratischen Mittelwerts (RMS) der Abweichungen abgeschätzt. Diese beträgt für die X-Koordinate $3,40 \mu\text{m}$, für die Y-Koordinate $4,19 \mu\text{m}$ und für die Z-Koordinate $18,42 \mu\text{m}$. Die auffällig größere Abweichung für die Z-Komponente lässt sich durch die Aufnahmeconfiguration und die damit verbundenen schleifenden Schnittwinkel der Bildstrahlen begründen. Es ergeben sich für die Parameter der inneren Orientierung die in Tab. 4 angegebenen Werte und Standardabweichungen. Alle Parameter wurden dabei mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % als signifikant getestet.

Im Zuge der Parameterschätzung werden außerdem die Korrelationen der Parameter in Form der Korrelationskoeffizienten berechnet. In Tab. 5 sind diese aufgeführt.

Parameter	Wert	Standardabweichung
f	8,2545 mm	0,0007 mm
c_x	0,0737 mm	0,0012 mm
c_y	0,0051 mm	0,0007 mm
k_1	$-43,8231 \cdot 10^{-4}$	$0,2449 \cdot 10^{-4}$
k_2	$565,8091 \cdot 10^{-7}$	$36,7678 \cdot 10^{-7}$
k_3	$-10555,4693 \cdot 10^{-10}$	$1665,3598 \cdot 10^{-10}$
ρ_1	$5,1708 \cdot 10^{-5}$	$0,2624 \cdot 10^{-5}$
ρ_2	$10,2455 \cdot 10^{-5}$	$0,2549 \cdot 10^{-5}$

Tab. 4 | Mittels 3D-Kalibrierfeld ermittelte Kameradaten der inneren Orientierung

	f	c_x	c_y	k_1	k_2	k_3	ρ_1	ρ_2
f	1,00	0,00	0,01	0,03	-0,01	0,00	0,00	0,00
c_x		1,00	0,00	-0,01	0,01	-0,01	0,72	0,00
c_y			1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38
k_1				1,00	-0,98	0,93	0,01	0,00
k_2					1,00	-0,99	-0,01	0,00
k_3						1,00	0,01	0,00
ρ_1							1,00	0,00
ρ_2								1,00

Tab. 5 | Abhängigkeiten der Parameter der inneren Orientierung nach der Kalibrierung der Kamera anhand des speziellen Kalibrierfelds

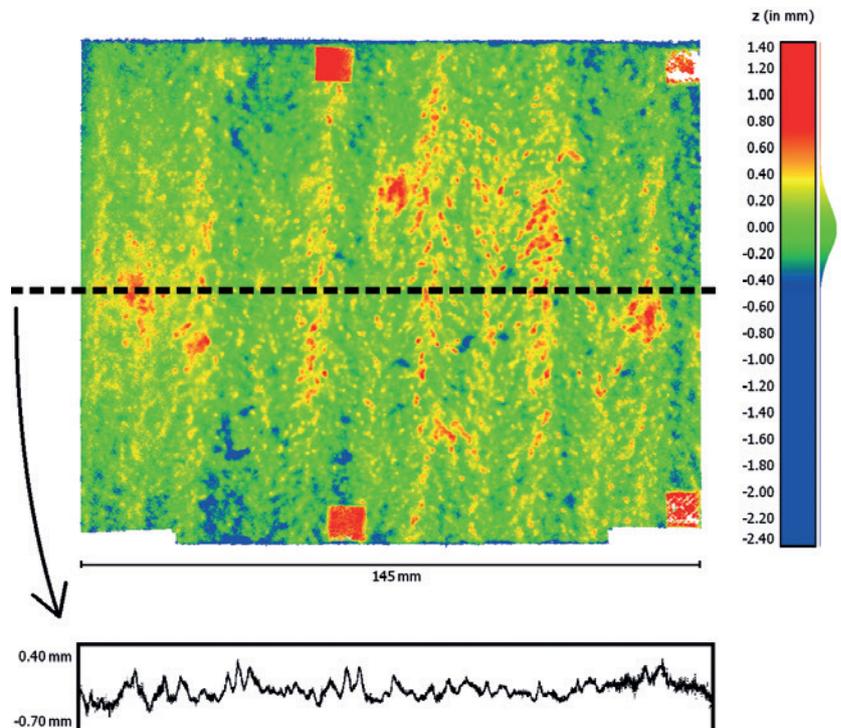


Abb. 10 | Rekonstruierte Punktwolke (oben), extrahierte Profillinie (unten, 10-fach überhöht dargestellt) und Histogramm der Z-Werte (rechts) nach Anbringung der mittels 3D-Kalibrierfeld ermittelten Parameter der inneren Orientierung

Es ist deutlich zu erkennen, dass die zuvor vorhandenen Korrelationen von Kamerakonstante und radial-symmetrischen Verzeichnungsparametern signifikant reduziert wurden. Die verbleibenden Korrelationen zwischen den k -Parametern bzw. zwischen p_1 und c_x sowie p_2 und c_y sind in den mathematisch-funktionalen Modellierungen begründet und insofern nicht zu vermeiden (vgl. z. B. auch /Luhmann 2018/).

Auch der visuelle Eindruck der mit den neuen Parametern der inneren Orientierung erzeugten Punktwolke bestätigt das deutlich verbesserte Ergebnis. Eine Wölbung der Punktwolke ist nach Rekonstruktion mit dem neuen Parametersatz nicht mehr festzustellen. Zur Veranschaulichung werden die Punktwolke und eine daraus extrahierte Profillinie (in 10-facher Überhöhung) dargestellt (Abb. 10). Darüber hinaus nähert sich das Histogramm der Punktwolke (Abb. 10, rechts) nun einer Normalverteilung an.

5 ERGEBNISSE ZUR RAUIGKEITSERMITTLUNG

Nach der Kalibrierung der Kamera mithilfe des 3D-Kalibrierfelds kann das Messsystem verwendet werden, um die Rauigkeit von Betonoberflächen nach dem im Abschnitt 3.3 beschriebenen Ablauf zu ermitteln. Die Verwendung von 3D-Punktwolken ermöglicht dabei die Bestimmung der Rauigkeit auf zwei unterschiedliche Weisen. Auf der einen Seite können aus den Punktwolken einzelne Profillinien extrahiert werden, die eine Bestimmung der Rauigkeit wie im konventionellen Fall ermöglichen (s. Abschnitt 2.2). Darüber hinaus kann auch eine flächenhafte Bestimmung der Rauigkeit durchgeführt werden, indem die gesamte Punktwolke herangezogen wird.

Für die Evaluation der Rauigkeitsermittlung wurden versuchsweise 18 Betonproben (Abb. 11) unterschiedlicher Oberflächenstruktur mit dem Messsystem erfasst und anschließend im Hinblick auf die Rauigkeit analysiert. Abb. 12 zeigt einen Ausschnitt der rekonstruierten Punktwolke einer Betonprobe. Für jede Betonprobe existieren ferner Messwerte für den Rauigkeitsparameter R_t , welche mit dem Sandflächenverfahren ermittelt wurden und als Referenzwerte dienen /Steinhoff et al. 2020/.

5.1 Flächenhafte Rauigkeitsermittlung

Aufgrund der naheliegenden Umsetzbarkeit wurde zunächst der Rauigkeitsparameter R_a auf Punktwolken adaptiert. Zu diesem Zweck werden im Rahmen einer vermittelnden Ausgleichung die



Abb. 11 | Eine repräsentative Auswahl der untersuchten Betonplatten. Links: Platte mit feiner Körnung, Mitte: Platte mit mittlerer Körnung, rechts: Platte mit grober Körnung.

Parameter einer ausgleichenden Ebene – als Bezugsebene – geschätzt. Das funktionale Modell einer Ebene π kann durch die folgende Gleichung mit den Ebenenparametern a , b und c beschrieben werden. Dabei lässt sich die Z -Koordinate jedes Punkts der Ebene durch eine Linearkombination seiner X - und Y -Koordinate darstellen:

$$\pi: a \cdot x_i + b \cdot y_i + c = z_i. \quad (7)$$

Wird für jeden Punkt eine Gleichung aufgestellt, ergibt sich daraus das folgende lineare Gleichungssystem in Matrixschreibweise:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix}}_b. \quad (8)$$

Das Gleichungssystem kann schließlich nach der Methode der kleinsten Quadrate gelöst werden, was zur Schätzung der unbekannten Parameter der Ausgleichsebene $\hat{\pi}$ führt:

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \\ \hat{c} \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b. \quad (9)$$

Die Beobachtungen (Punkte) werden dabei als gleichgenau und unkorreliert angenommen, sodass auf die Einführung eines stochastischen Modells verzichtet wird. Schließlich führt der arithmetische Mittelwert der vertikalen Punktabstände zur Ausgleichsebene $\hat{\pi}$ (die mit den Residuen \hat{e} im Parameterschätzungsprozess korrespondieren) zu einer flächenhaften Bestimmung der Rauigkeit:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{\text{vertical}}(p_i, \hat{\pi}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{e}_i. \quad (10)$$

Die mit dem Messsystem flächenhaft ermittelten Messwerte für den Parameter R_a und die Referenzwerte für den Parameter R_t sind in Abb. 13 dargestellt.

Die Ursache für die Abweichungen der beiden Parameter R_a und R_t liegt in erster Linie darin begründet, dass die beiden Parameter die Rauigkeit grundsätzlich auf unterschiedliche Weisen bewerten (vgl. Abschnitt 2.2). Insbesondere nutzen beide Parameter unterschiedliche Bezugsebenen, zu denen die absoluten Abweichungen der Oberflächenpunkte in Z -Richtung bestimmt werden. Um R_a und R_t vergleichen zu können, müsste prinzipiell eine der beiden Bezugsebenen (Ausgleichsebene bzw. Ebene durch die Maxima) auf die andere transformiert werden. Diese Transformation kann grundsätzlich mit einer Translation in der Z -Richtung und einer Rotation vorgenommen werden. Im Allgemeinen ist daher ein einfaches Hinzuzugieren eines Offsets nicht ausreichend. Liegen allerdings beide Referenzebenen (nahezu) parallel (was in der Praxis häufig der Fall sein sollte), kann die Transformation der Ebenen

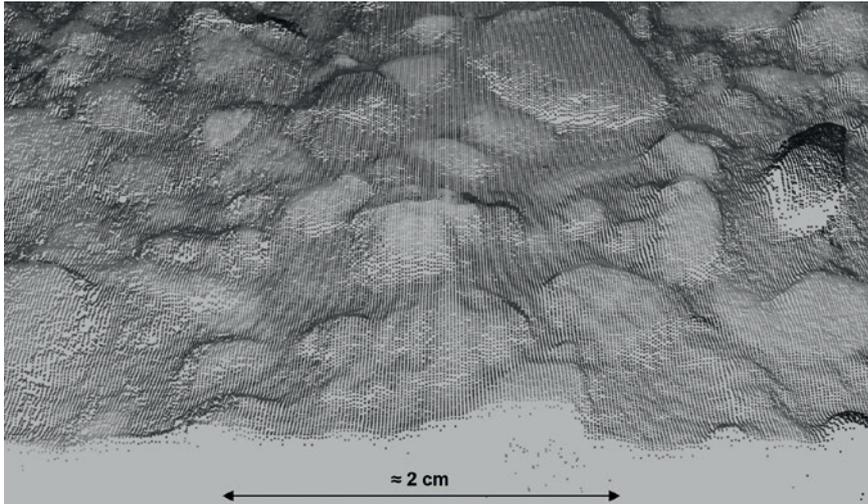


Abb. 12 | Ausschnitt der bildbasierten Punktwolke einer Betonplatte

praktisch auf eine einfache Translation (bzw. Hinzuaddieren eines Offsets) vereinfacht werden.

Um die Rauigkeitswerte R_a und R_t des vorliegenden Beispiels (Abb. 13) ineinander zu überführen, muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich um Rauigkeitsermittlungen von 18 Betonprobeoberflächen mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen (und damit Rauigkeiten) handelt und somit der Abstand der beiden Referenzebenen für jede Probe variiert. Abb. 14 (oben) zeigt exemplarisch das Histogramm der Z-Werte einer ausgewählten Betonprobe sowie die Verteilung der absoluten Abweichungen zur Ausgleichsebene (Mitte) und die absoluten Abweichungen zu einer parallelen Referenzebene als simulierte Ebene durch die Maxima (unten). Grundsätzlich kann aber angenommen werden, dass die Z-Werte der Oberflächenpunkte aller Proben derselben Verteilung (angenäherte Normalverteilung) folgen, auch wenn sie unterschiedliche Parameter, insbesondere Formparameter (= Standardabweichungen), aufweisen. Die Überführung zweier Normalverteilungen

kann mithilfe einer linearen Transformation erfolgen. Unter der weiteren Annahme, dass das Abstandsverhältnis auf der Z-Achse zwischen der Ausgleichsebene und der Maxima-Referenzebene bei allen Proben in etwa identisch ist, wurde im vorliegenden Fall eine Regressionsgerade zwischen den Datensätzen für R_a und R_t geschätzt. Abb. 15 zeigt die geschätzte Regressionsgerade mit dem ermittelten Offset (= 0,0095) sowie dem Maßstab (= 0,5061). Zur Beurteilung der Übereinstimmung wurde anschließend eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Demnach weisen beide Datenreihen einen Korrelationskoeffizienten von 0,97 auf,

was auf einen sehr starken linearen Zusammenhang hindeutet und damit die getroffenen Annahmen bestätigt.

Der ermittelte Maßstab deutet ferner darauf hin, dass die Rauigkeitswerte für den Parameter R_a in etwa doppelt so hoch sind wie die Parameter R_t , was zu folgendem Versuch einer Interpretation führt: Die Maxima-Referenzebene des Parameters R_t müsste der Definition zufolge sinngemäß durch die obersten Punkte der Oberfläche und bei gedachter perfekter Normalverteilung der Z-Werte durch das obere Extremquantil der Normalverteilung verlaufen. Tatsächlich verläuft die Maxima-Referenzebene jedoch durch ein oberes Quantil Q_x , im vorliegenden Fall in etwa $Q_{95\%}$ ($Z_{0,975} = 1,96$), was annähernd dem Maßstab von 2 entspricht. Dies ließe sich damit erklären, dass in der Praxis neben dem Vorliegen einer imperfekten Normalverteilung der Z-Werte die Maxima-Referenzebene zwar auf den obersten Punkten der Oberfläche aufliegt, aber infolge der handwerklichen Durchführung des Sandflächenverfahrens diese nicht exakt durch die „Spitzen“,

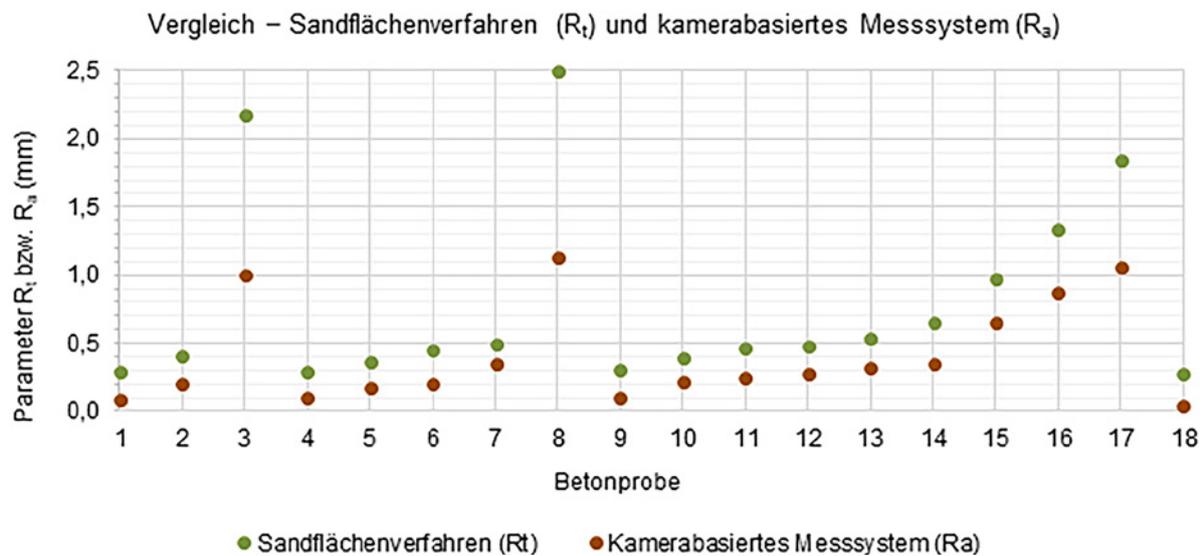


Abb. 13 | Vergleich der Messwerte für den arithmetischen Mittenrauwert R_a (ermittelt mit dem kamerabasierten Messsystem) und den Referenzwerten für die mittlere Rautiefe R_t (ermittelt mit dem Sandflächenverfahren)

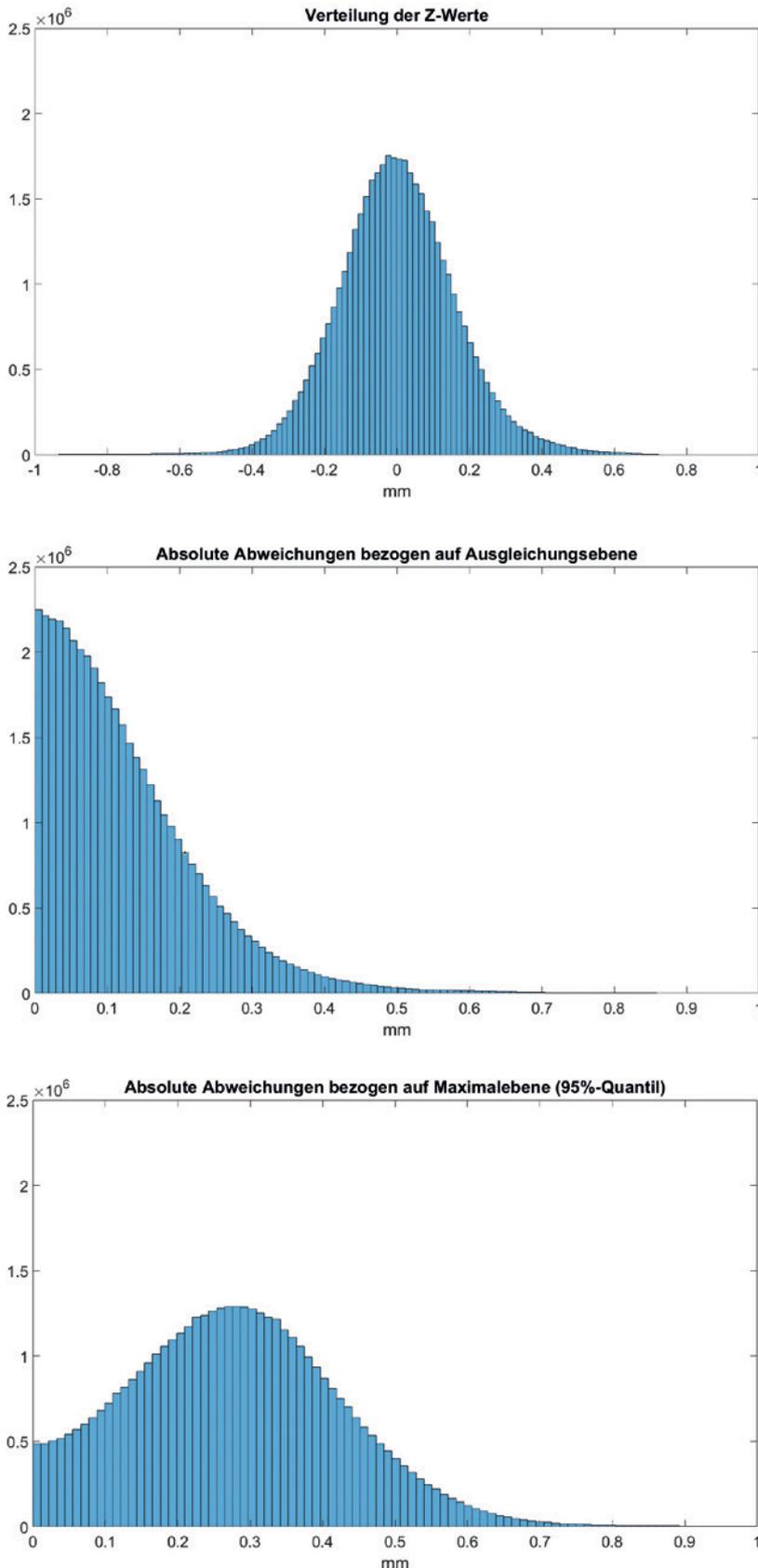


Abb. 14 | Verteilung der Z-Werte einer Betonprobe (oben), Verteilung der absoluten Abweichungen der Ausgleichsebene (Mitte) und Verteilung der absoluten Abweichungen bezogen auf eine Q95%-Referenzebene (unten)

sondern minimal darunter (z.B. bei 95 % der Maximal-Z-Werte) verläuft (da beispielsweise einige Spitzen durch den Druck der Verteilerscheibe ausgeglättet werden).

5.2 Profilweise Rauigkeitsermittlung

Für die Validierung des Verfahrens wurde neben der flächenhaften Rauigkeitsermittlung exemplarisch eine Betonprobe selektiert und eine profilweise Rauigkeitsermittlung durchgeführt. Dazu wurde diejenige Betonprobe ausgewählt, die visuell die größte und inhomogenste Oberfläche aufwies. Als Stichprobe wurden aus dieser Betonprobe jeweils elf Profillinien aus der Längs- und Querrichtung in gleichmäßigen Abständen extrahiert und die arithmetischen Mittenrauwerte R_a in diesen Profilen ermittelt. In Tab. 6 sind diese aufgeführt. Dabei beträgt für die Messreihe in Längsrichtung der arithmetische Mittelwert $\bar{x} = 0,8885$ mm mit einer Standardabweichung $s = 0,2494$ mm, für die Messreihe in Querrichtung $\bar{x} = 0,8908$ mm mit $s = 0,1989$ mm. Es zeigt sich, dass die profilweise berechneten Mittenrauwerte stark streuen, was auch durch die vergleichsweise hohe Standardabweichung zum Ausdruck kommt. Testet man in einem Hypothesentest die Einzelwerte gegenüber dem jeweiligen Mittelwert, weisen 6 der 11 Profile in Längsrichtung bzw. 4 der 11 Profile in Querrichtung signifikante Differenzen auf. Die Abweichungen dieser Linien zum Mittelwert sind somit nicht mehr rein stochastisch begründet. Dieses Ergebnis führt zu dem Schluss, dass singuläre Profillinien häufig nicht repräsentativ für die Rauigkeit einer Fläche sind und somit die flächenhafte Bestimmung der Rauigkeit ein belastbareres Ergebnis liefert. Errechnet man im Vergleich zu den profilhaften Mittenrauwerten den Mittenrauwert in der flächenhaften Ausführung zur gesamten Punktwolke, ergibt sich ein Wert von $R_a = 0,9053$ mm.

5.3 Lokale Rauigkeitsermittlung

Die flächenhafte Auswertung der Oberfläche ermöglicht außerdem, die Rauigkeit auch lokal, d.h. in einzelnen Segmenten der Oberfläche, zu ermitteln. Zur Beurteilung der

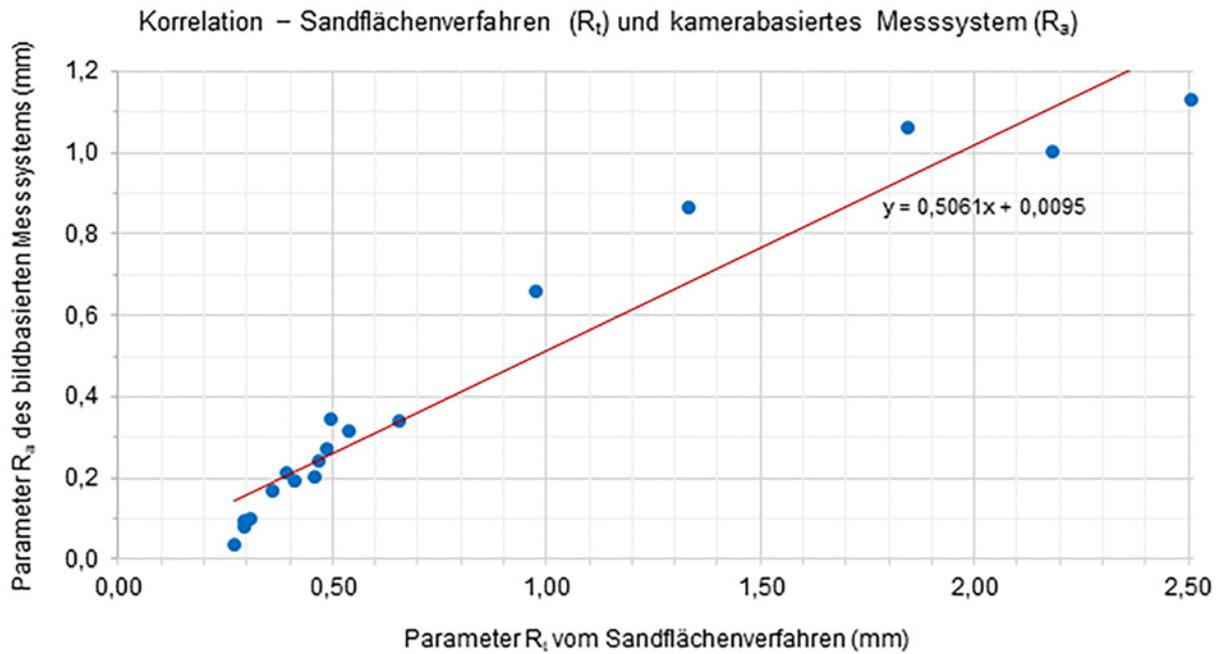


Abb. 15 | Korrelation der Messwerte für den arithmetischen Mittenrauwert R_a (ermittelt mit dem kamerabasierten Messsystem) und den Referenzwerten für die mittlere Rautiefe R_t (ermittelt mit dem Sandflächenverfahren)

lokale Rauigkeit wurde die rekonstruierte Punktwolke einer ausgewählten Betonprobe in gleichgroße Segmente unterteilt und in diesen die Rauigkeit ermittelt. Dabei wurde eine Größe von $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ für die Segmente gewählt, was bei einem Ausmaß von $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ der Punktwolke zu 25 Segmenten führt. Für die Ermittlung des arithmetischen Mittenrauwerkes in diesen Segmenten wird gemäß der Berechnungsvorschrift für die flächenhafte Rauigkeitsermittlung (s. Abschnitt 5.1) durch jedes Segment eine indivi-

duelle Referenzebene geschätzt. In Abb. 16 sind die in den Segmenten ermittelten Rauigkeitswerte für den Parameter R_a dargestellt. Der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung der Datenreihe betragen dabei $\bar{x} = 0,2985\text{ mm}$ und $s = 0,0578\text{ mm}$. Ähnlich wie bei der profilweisen Rauigkeitsermittlung streuen auch hier die Rauigkeitswerte tendenziell stark, was auf eine inhomogene Oberfläche mit variierender lokaler Rauigkeit schließen lässt. Wird die Rauigkeit im Vergleich dazu über die gesamte Punktwolke

Richtung	Linie 1	Linie 2	Linie 3	Linie 4	Linie 5	Linie 6	Linie 7	Linie 8	Linie 9	Linie 10	Linie 11
Längs	1,319 mm	0,703 mm	1,328 mm	0,701 mm	0,852 mm	0,798 mm	0,545 mm	0,894 mm	0,704 mm	0,975 mm	0,954 mm
Quer	0,763 mm	0,943 mm	0,723 mm	0,866 mm	0,824 mm	1,023 mm	0,549 mm	1,292 mm	1,082 mm	0,795 mm	0,939 mm

Tab. 6 | Arithmetische Mittenrauwerke R_a für die einzelnen extrahierten Profillinien in Längs- und Querrichtung

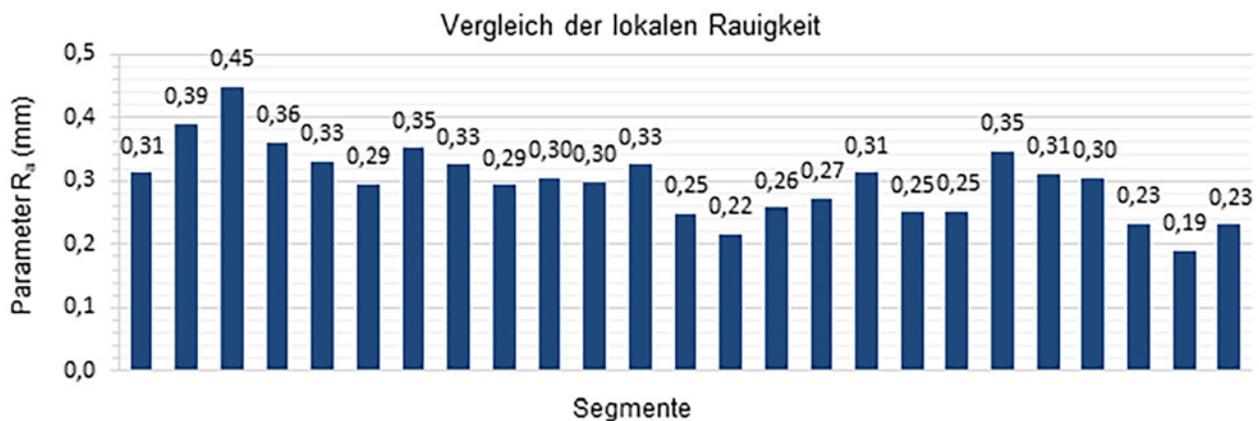


Abb. 16 | Vergleich der ermittelten Rauigkeit R_a für die einzelnen Segmente einer ausgewählten Punktwolke

ermittelt, führt dies zu $R_a = 0,343$ mm. Für die Gesamtcharakterisierung der Oberfläche sind daher – insbesondere bei einer inhomogenen Oberflächenrauigkeit – zu kleine Segmente ähnlich ungeeignet wie die linienhafte Rauigkeitsermittlung.

6 FAZIT UND AUSBLICK

Vorgestellt wurde ein neuartiges Messsystem für die flächenhafte Ermittlung der Rauigkeit von Bauteiloberflächen. Das System basiert auf einem Kreuzschlitten, der automatisiert eine Kamera über die zu vermessende Oberfläche führt. Die dabei aufgezeichneten Bildaufnahmen können in nachfolgenden Schritten zur dreidimensionalen Rekonstruktion der Oberfläche genutzt werden. Anschließend kann die rekonstruierte Oberfläche ausgewertet werden, um Rauigkeitsparameter daraus abzuleiten.

Vor dem Einsatz des Systems zu Messzwecken war zunächst die Kalibrierung der Kamera notwendig. Eine Selbstkalibrierung der verwendeten Industriekamera anhand eines Objekts ohne Passpunkte – im vorliegenden Fall einer (ebenen) Betonoberfläche – führte zu unbefriedigenden Ergebnissen. Durch die ungünstige räumliche Verteilung der Objektpunkte korrelierten die radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter mit der Kamerakonstanten, weshalb die Parameter nicht eindeutig bestimmt werden konnten. Dieser Umstand machte sich in der rekonstruierten Punktwolke in Form einer Wölbung bemerkbar. Daher wurde für eine genaue Bestimmung der inneren Orientierung ein spezielles 3D-Kalibrierfeld mit guter dreidimensionaler Punktverteilung konzipiert, hergestellt und die Kalibrierprozedur der Kamera anhand dieser durchgeführt. Durch die Kalibrierung mithilfe des 3D-Kalibrierfelds wurden die Korrelationen der Parameter der inneren Orientierung signifikant reduziert.

Um erste Ergebnisse für die Rauigkeitsermittlung zu erzielen, wurde das Berechnungsmodell für den arithmetischen Mittenrauwert R_a herangezogen und in die Software zur Auswertung integriert. In den Untersuchungen anhand von 18 Betonproben zeigte sich, dass eine sehr starke Korrelation zwischen den Messwerten für den Parameter R_a und den Referenzwerten für den Parameter R_t besteht. Ferner wurde verdeutlicht, dass die Ergebnisse einzelner Profile für die Rauigkeit nicht repräsentativ für die gesamte Fläche sind und daher eine flächenhafte Bestimmung der Rauigkeit vorzuziehen ist. Die Streuung der lokal ermittelten Rauigkeit deutet zudem darauf hin, dass Betonoberflächen grundsätzlich eine inhomogene Oberfläche mit lokal variierender Rauigkeit aufweisen, was wiederum die Notwendigkeit einer großflächigeren Auswertung unterstreicht.

Das Messsystem ist in der aktuellen Ausführung auf eine statische Aufnahmekonstellation ausgelegt. Grundsätzlich ist jedoch auch der kinematische Einsatz bei einem angepassten Hardware-setup mit entsprechender Kameratechnik (idealerweise mit Global-Shutter-Sensoren) und -anordnung (z.B. mehrere Kameras mit überlappenden Bildbereichen installiert auf einer festen Basis orthogonal zur Bewegungsrichtung) sowie angepasster Geschwindigkeit für weitere Anwendungen, z.B. für die Oberflächenerfassung von Straßenoberflächen, denkbar.

fördern • führen • inspirieren

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden

Die Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden ist eine junge Hochschule in der Mitte Europas, die ihren Studierenden in 46 Studiengängen eine zukunftsorientierte Ausbildung bietet. Über 3.500 Studierende werden in den beiden Hochschulstädten Amberg und Weiden von 94 Professorinnen und Professoren unterrichtet.

An der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden ist an der Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik, Abteilung Amberg, zum Sommersemester 2021 oder später die nachfolgende

Professur der BesGr. W 2

für folgendes Lehrgebiet zu besetzen:

- **Geoinformatik (Kennziffer 9022)**

Gesucht wird eine durch praktische und wissenschaftliche Tätigkeit ausgewiesene Persönlichkeit, die das ausgeschriebene Fachgebiet in Lehre sowie angewandter Forschung und Entwicklung vertreten kann.

Der/Die Bewerber/in (m/w/d) soll ein abgeschlossenes Hochschulstudium der Geoinformatik, der Geodäsie oder eines vergleichbaren Studiengangs aufweisen.

Erwartet werden fundierte Kenntnisse und mehrjährige praktische Erfahrungen in der Geoinformatik, dabei sind folgende Gebiete von besonderer Bedeutung:

- Prozessierung, Analyse und Visualisierung von raumbezogenen Daten
- BIM, GIS und CAD
- Geodateninfrastrukturen, Geodatenmanagement und Geodatenbanken
- Web-GIS, Webmapping und APIs

Der/die künftige Stelleninhaber/in soll u. a. Lehrveranstaltungen in dem zum Wintersemester 2018/2019 eingerichteten Studiengang „Geoinformatik und Landmanagement“ übernehmen und sich in die Ausgestaltung und Entwicklung des Studiengangs, insbesondere im Lehrgebiet Geoinformatik, einbringen.

Von dem/der Bewerber/in wird grundsätzlich erwartet, auch Lehrveranstaltungen in Grundlagenfächern bzw. in verwandten Fachgebieten und bei Bedarf am Campus Amberg und am Campus Weiden zu übernehmen.

Die Hochschule wünscht und fördert Aktivitäten auf dem Gebiet des Technologietransfers, der Durchführung von Kooperationsprojekten mit Partnern sowie die interdisziplinäre und internationale Zusammenarbeit. Hierzu gehört auch die Bereitschaft zur aktiven Einwerbung von Drittmitteln.

Die Mitarbeit in der akademischen Selbstverwaltung wird als selbstverständlich erachtet.

Bewerbungen sind mit aussagekräftigen Unterlagen (Lebenslauf, Zeugnisse, Nachweise über den beruflichen Werdegang und die wissenschaftlichen Arbeiten) bis spätestens **22.03.2021** über das Online-Formular einzureichen: www.oth-aw.de/informieren-und-entdecken/aktuelles/stellenangebote

Bitte nehmen Sie in Ihrer Bewerbung Bezug auf die Bewerbungskennziffer 9022.

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts werden ergänzende empirische Untersuchungen, u. a. Genauigkeitsuntersuchungen sowie Vergleiche mit verschiedenen anderen Verfahren (z. B. Laser-Triangulation, konfokale 3D-Laserscanmikroskopie), durchgeführt, um das Messsystem zu validieren. Zukünftig sollen auch Weiterentwicklungen, z. B. zu einem noch portableren Messsystem auf Grundlage von Tablet- oder Smartphone-Kameras, untersucht werden.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich beim Projektpartner Nedo für die sehr gute Zusammenarbeit sowie beim Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen für die Unterstützung bei den Vergleichsuntersuchungen. Gefördert wurde das Forschungsvorhaben im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen: 16KN062126).

LITERATUR

- Bay, H.; Ess, A.; Tuytelaars, T.; Van Gool, L. (2008): Speeded-Up Robust Features (SURF). In: *Computer Vision and Image Understanding* 110(2008)3, 346–359.
- Bradski, G. (2000): The OpenCV Library. In: *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*.
- Bikermann, J. J. (1968): *The Science of Adhesive Joints*. 2. Auflage. Academic Press, New York.
- Calonder, M.; Lepetit, V.; Strecha, C.; Fua, P. (2010): BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features. In: Daniilidis, K.; Maragos, P.; Paragios, N. (Hrsg.): *Computer Vision – ECCV 2010*. Springer, Berlin/Heidelberg, 778–792.
- Dall'Asta, E.; Roncella, R. (2014): A comparison of semiglobal and local dense matching algorithms for surface reconstruction. In: *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (2014)XL-5, 187–194.
- DIN 4760:1982-06: *Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem*. Ausgabe Juni 1982. Beuth, Berlin.
- DIN EN ISO 4287:2010-07: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. Ausgabe Juli 2010. Beuth, Berlin.
- Hartley, R.; Zisserman, A. (2003): *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2. Auflage. Cambridge University Press, New York.
- Hirschmuller, H. (2008): Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 30(2008)2, 328–341.
- Kaufmann, N. (1971): Das Sandflächenverfahren. Ein einfaches Verfahren zur Messung und Beurteilung der Textur von Fahrbahnoberflächen. In: *Straßenbau-Technik* 24(1971)3, 131–135.
- Kraus, K. (2004): *Photogrammetrie. Band 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 7. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin.
- Lowe, D. G. (2004): Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: *International Journal of Computer Vision* 60(2004)2, 91–110.
- Luhmann, T. (2018): *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Beispiele*. 4. Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach.
- Maurer, P. (2007): Zusammenhang zwischen gemessener Fahrbahngriffigkeit und erreichbaren Pkw-Bremsverzögerungen. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* 109(2007), 440–449.
- Mellmann, G.; Oppat, K. (2008): Maß für Maß: Rautiefen-Bestimmung von Betonoberflächen mittels Laserverfahren. In: *Bautenschutz + Bausanierung* 31(2008)2, 30–32.
- PHOCAD (2020): PHIDIAS, das digitale photogrammetrische Auswertesystem für MicroStation. <http://www.phocad.de/de/PHIDIAS/phidias.html> (30.09.2020).
- Poggi, M.; Mattoccia, S. (2016): Evaluation of variants of the SGM algorithm aimed at implementation on embedded or reconfigurable devices. In: *2016 International Conference on 3D Imaging (IC3D)*. Liege, 1–8.
- Remondino, F.; Spera, M. G.; Nocerino, E.; Menna, F.; Nex, F.; Gonizzi-Barsanti, S. (2013): Dense image matching: Comparisons and analyses. In: *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, Marseille, 47–54.
- Schulz, R.-R. (2016): Fortschritte bei der Rauheitsbewertung von Betonoberflächen. In: *beton* 66(2016), 442–448.
- Schulz, R.-R. (2017): Laser schlägt Sand – Rautiefenmessung an Betonoberflächen. In: *B+B Bauen im Bestand* 40(2016), 131–135.
- Steinhoff, A.; Holthausen, R. S.; Raupach, M.; Schulz, R.-R. (2020): Entwicklung eines Pastenverfahrens zur Bestimmung der Rautiefe an vertikalen Betonoberflächen. *Entwicklungsschwerpunkte und Ergebnisse einer Studie*. In: *beton* 70(2020), 182–186.
- Triggs, B.; McLauchlan, P. F.; Hartley, R. I.; Fitzgibbon, A. W. (2000): *Bundle Adjustment – A Modern Synthesis*. In: *Vision Algorithms: Theory and Practice*. Springer, Berlin/Heidelberg, 298–372.
- Xia, Y.; Tang, X. (2013): Extracting Method of Control Point Pairs for Remote Sensing Image Based on Regional Matching. In: *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition* 6(2013)2, 145–154.

M.Sc. Baris Özcan

RWTH AACHEN UNIVERSITY
GEODÄTISCHES INSTITUT

Mies-van-der-Rohe-Straße 1 | 52074 Aachen
oeczan@gia.rwth-aachen.de



Dr.-Ing. Raimund Schwermann

RWTH AACHEN UNIVERSITY
GEODÄTISCHES INSTITUT

Mies-van-der-Rohe-Straße 1 | 52074 Aachen
schwermann@gia.rwth-aachen.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach

RWTH AACHEN UNIVERSITY
GEODÄTISCHES INSTITUT

Mies-van-der-Rohe-Straße 1 | 52074 Aachen
blankenbach@gia.rwth-aachen.de



Manuskript eingereicht: 06. 11. 2020 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet