

Untersuchungen zur dreidimensionalen Analyse von photogrammetrisch erfassten Betonproben

ANDREAS MAXIMILIAN PITER¹

Zusammenfassung: Die Bestimmung der Luftporenkennwerte am Festbeton erfolgt in der Materialprüfung manuell mit einem Stereomikroskop in kleinen Bereichen des Betontestkörpers. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Porendetektion, ein Verfahren zur automatisierten und flächendeckenden Bestimmung der Lage von Luftporen entwickelt. Die Oberfläche des Betontestkörpers wurde mit den Methoden der Nahbereichsphotogrammetrie dreidimensional rekonstruiert. In der Porendetektion wird das Modell gefiltert, die Punktmenge anhand eines Schwellwertes klassifiziert und die klassifizierten Punkte zu Poren gruppiert. Die Validierung des Verfahrens anhand einer manuell erstellten Referenz zeigt den Einfluss der Parameter der Porendetektion auf die Ergebnisse.

1 Einleitung

Beton ist ein wichtiger Baustoff, dessen Eigenschaften bei der Herstellung durch Zugabe von verschiedenen Zusatzmitteln und Zusatzstoffen gezielt herbeigeführt werden. Dabei kann ungewollte Gasbildung die Betonfestigkeit verringern oder durch Zugabe von Luftporenbildnern der Frostwiderstand erhöht werden. In beiden Fällen muss der Luftporengehalt bereits bei der Herstellung kontrolliert werden (KAMPEN & RICHTER 2014). In Schadensfällen oder bei der Wirksamkeitsprüfung von Luftporenbildnern wird der Gehalt an Luftporen stichprobenartig am Festbeton getestet. Das in der Materialprüfung etablierte Verfahren zur Bestimmung von Luftporenkennwerten ist das Sehnenmessverfahren (BONZEL & SIEBEL 1981). Das Verfahren hat den Nachteil, dass die Bestimmung manuell erfolgt und somit nur kleine Bereiche bestimmt werden können. Deshalb ist ein Verfahren zur automatisierten und flächenhaften Detektion der Poren auf der Betonoberfläche zu entwickeln.

Poren sind Vertiefungen in der Oberfläche. Somit lässt sich anhand der Höheninformation auf Poren schließen. Zur dreidimensionalen Rekonstruktion der zu untersuchenden Betonoberfläche sind die Methoden der Nahbereichsphotogrammetrie geeignet. Für die Analyse der rekonstruierten Betonoberfläche hinsichtlich der Lage der Poren wurde keine vorhandene Funktion in gängiger Auswertesoftware gefunden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher die „Porendetektion“ zur dreidimensionalen Analyse von photogrammetrisch erfassten Betonproben entwickelt. Sie wird im Folgenden vorgestellt.

¹ Student an der Leibniz Universität Hannover, Masterstudiengang Geodäsie und Geoinformatik, E-Mail: andreas.piter@online.de

2 Methodik

2.1 Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion

Die dreidimensionale Rekonstruktion der $10\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ großen Oberfläche des Betontestkörpers erfolgte photogrammetrisch mit einem passiven und einem aktiven Triangulationsverfahren. Die beiden Datensätze werden im Folgenden als „Bündeltriangulation“ (passiv) und „Streifenprojektion“ (aktiv) bezeichnet. Sie dienen zum Test und zur Validierung der Porendetektion. Für weitere Informationen zu Messanordnung, Aufnahmeplanung und Genauigkeitsabschätzung wird auf PITER (2017) verwiesen.

2.2 Porendetektion

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Porendetektion, die die Lage der Luftporen einer dreidimensional rekonstruierten Betonoberfläche liefert. Der Porendetektion liegt die Annahme zu Grunde, dass sich die Poren in der Höhe signifikant von ihrer Umgebung unterscheiden. Das Triangulated Irregular Network (TIN) der rekonstruierten Betonoberfläche wird zunächst gefiltert, um anschließend jeden Punkt auf einen signifikanten Höhenunterschied zu seiner Umgebung zu testen. Der Ablauf ist in Abb. 1 dargestellt.

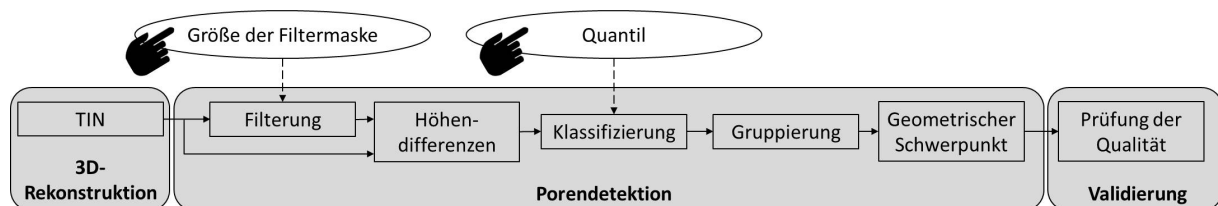


Abb. 1: Schematischer Ablauf der Porendetektion. Die Hand zeigt die vom Anwender zu wählenden Parameter.

2.2.1 Filterung

Es wird eine Kopie des TINs erstellt und geglättet (geglättetes TIN). Das Original bleibt unverändert (originales TIN). Die Umgebung, von der sich die Poren signifikant in der Höhe unterscheiden, wird durch das geglättete TIN dargestellt. Durch die Filterung wird jeder Punkt des geglätteten TINs an die Höhen in der Umgebung angepasst. Der Filter verändert die Höhe der Punkte, aber nicht die Lage. Untersuchungen haben gezeigt, dass globale Verfahren die Oberfläche schlecht approximieren. Hingegen ist ein lokaler Medianfilter für diese Anwendung am besten geeignet (PITER 2017).

Die Filteroperation wurde aus der digitalen Bildverarbeitung auf die Filterung von TINs übertragen. Hierbei ist die Größe der Filtermaske der Grad der Nachbarschaft. Alle Punkte, die mit dem betrachteten Punkt über eines der umliegenden Dreiecke verbunden sind, gehören zur ersten Nachbarschaft. Zur zweiten Nachbarschaft gehören alle Punkte, die über ein Dreieck mit der ersten Nachbarschaft verbunden sind. Weitere Nachbarschaften ergeben sich analog (siehe Abb. 2).

Der Anwender der Porendetektion greift durch die Wahl der Größe der Filtermaske in die Porendetektion ein und nimmt Einfluss auf das Ergebnis. Die Abb. 2 zeigt die Auswirkung des Parameters auf die gefilterte Oberfläche.

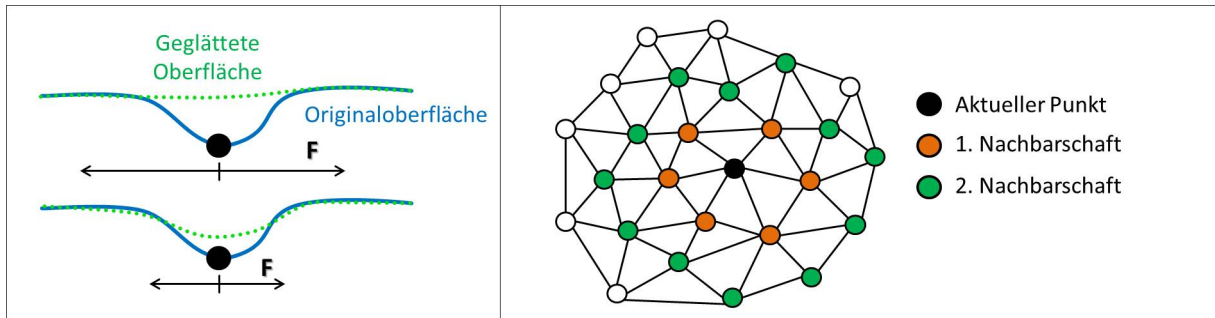


Abb. 2: Schema zur Auswirkung der Größe der Filtermaske auf die Glättung der Oberfläche im Höhenprofil (links). Schema zur Nachbarschaftsdefinition für TINs (rechts).

2.2.2 Klassifizierung

Jeder Punkt des originalen TINs wird einer von zwei Klassen zugeordnet. Alle Punkte, die zu einer Pore gehören, werden der Klasse Porenpunkt zugeordnet. Die restlichen Punkte werden der Klasse Nicht-Porenpunkt zugeordnet. Ob die Abweichung der Höhe eines Punktes von der Höhe in seiner Umgebung signifikant ist, wird auf der Grundlage der Höhendifferenzen (Gl. 1) lagegleicher Punkte des originalen und geglätteten TINs ermittelt.

$$\Delta Z_i = Z_{\text{original},i} - Z_{\text{geglättet},i} \quad (1)$$

mit dem Punktindex i

Die Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen ist annähernd normalverteilt (vgl. Abb. 3). Für die meisten Punkte wird eine Höhendifferenz von $\Delta Z = 0$ erwartet. Alle Punkte, deren Höhe signifikant von der Umgebung abweicht, liegen außerhalb des Konfidenzintervalls

$$P\{\mu - k \cdot \sigma \leq \Delta Z \leq \mu + k \cdot \sigma\} = 1 - \alpha \quad (2)$$

um den Erwartungswert μ (NIEMEIER 2008, S. 82ff., 92ff.). Nach (Gl. 1) werden bei Punkten, die zu Poren gehören, lediglich negative Differenzen erwartet. Demnach erfolgt die Klassifizierung in Porenpunkt bei $\Delta Z_i < \mu - k \cdot \sigma$ und in Nicht-Porenpunkt bei $\Delta Z_i \geq \mu - k \cdot \sigma$.

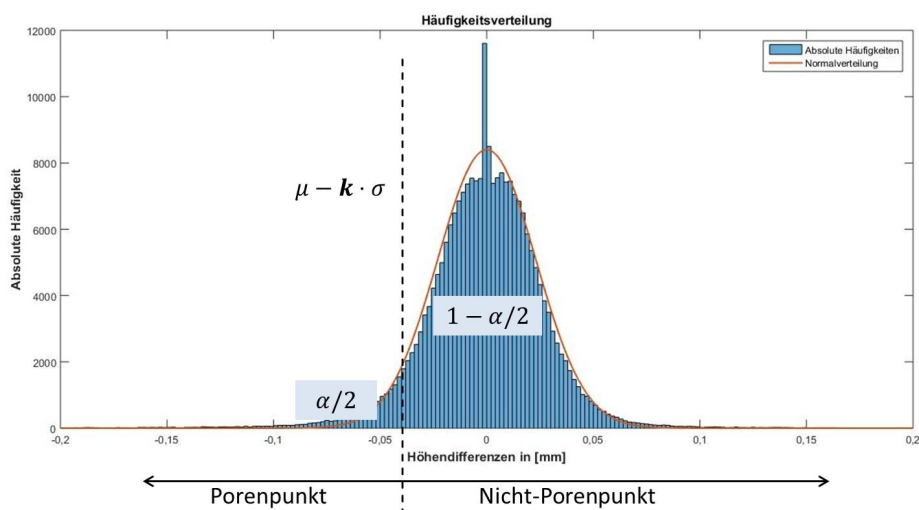


Abb. 3: Histogramm der absoluten Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen, mit angenäherter Normalverteilung und dem Schwellwert zur Klassifizierung.

Das Klassifizierungsergebnis hängt von der Wahl der Irrtumswahrscheinlichkeit ab. Das damit verbundene Quantil k wird in der Porendetektion zur Bestimmung des Schwellwertes verwendet und vom Anwender gewählt.

2.2.3 Gruppierung

Eine Pore setzt sich aus mehreren Punkten der Klasse Porenpunkt zusammen. Welche Porenpunkte zusammen eine Pore bilden, wird mit einer Heuristik ermittelt (siehe Abb. 4). Die Heuristik beginnt mit einem zufällig ausgewählten Porenpunkt als Startpunkt. Ist der Startpunkt über eine Dreiecksseite mit weiteren Porenpunkten verbunden, so werden diese Punkte rekursiv geprüft, ob sie ebenfalls mit weiteren Porenpunkten über eine Dreiecksseite verbunden sind. Miteinander verbundene Porenpunkte werden zu einer Pore gruppiert. Die Gruppierung ermöglicht eine separate Betrachtung aller Poren, sodass die konvexe Hülle in der XY-Ebene berechnet werden kann. Sie stellt den Umriss der Pore dar. Der geometrische Schwerpunkt wird aus den Punkten der konvexen Hülle berechnet. Die geometrischen Schwerpunkte der Poren sind das Ergebnis der Porendetektion.

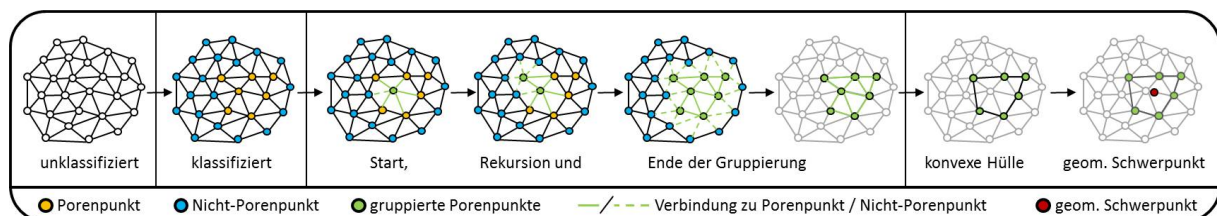


Abb. 4: Schematisches Beispiel zur Klassifizierung der Punkte im TIN, sowie der anschließenden Gruppierung und Repräsentation durch den geometrischen Schwerpunkt.

2.3 Validierung

2.3.1 Auswertestrategie

Die Porendetektion wurde mit je einer Referenz für die zwei aufgenommenen Datensätze „Bündeltriangulation“ und „Streifenprojektion“ validiert. Die Referenz entstand durch das manuelle Markieren der Poren in einem höhencodierten Rasterbild der Betonoberfläche, bei dem die Grauwerte proportional zur Höhe dargestellt werden. Die Schwerpunkte der detektierten Poren, die innerhalb eines Puffers um die jeweiligen in der Referenz enthaltenen Poren liegen, werden als True Positiv (TP) bezeichnet. Poren, die in der Referenz enthalten sind, jedoch nicht detektiert werden, heißen False Negativ (FN). Dagegen sind False Positiv (FP) die Poren, die detektiert werden, aber in der Referenz nicht vorhanden sind. Eine Bestimmung der True Negativ (TN) ist quantitativ nicht möglich.

Die Beurteilung der Porendetektion erfolgt nach HEIPKE et al. (1997) mit den Größen

$$\text{Vollständigkeit} = \frac{TP}{TP+FN} \cdot 100, \quad (3)$$

$$\text{Richtigkeit} = \frac{TP}{TP+FP} \cdot 100, \quad (4)$$

$$\text{Qualität} = \frac{TP}{TP+FP+FN} \cdot 100. \quad (5)$$

Das Ergebnis der Porendetektion ist von den zwei wählbaren Parametern „Größe der Filtermaske F“ und „Quantil k“ abhängig. Die Porendetektion wurde unter Variation der Parameter mit beiden Datensätzen mehrfach durchgeführt, um ihren Einfluss zu untersuchen.

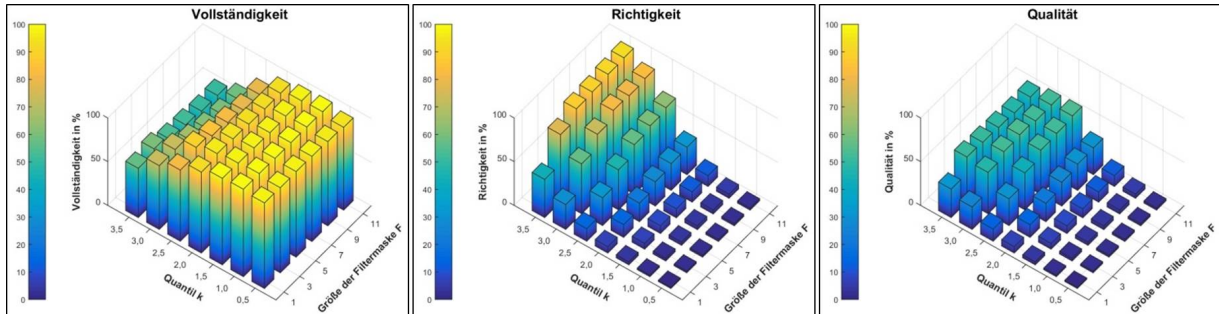


Abb. 5: Klassifizierungsergebnisse der Porendetektion in Abhängigkeit von der Größe der Filtermaske und des Quantils für den Datensatz „Bündeltriangulation“

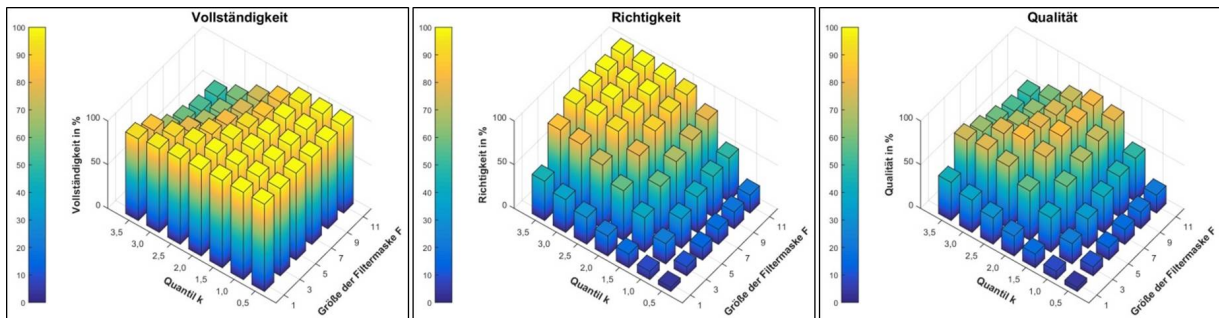


Abb. 6: Klassifizierungsergebnisse der Porendetektion in Abhängigkeit von der Größe der Filtermaske und des Quantils für den Datensatz „Streifenprojektion“

2.3.2 Ergebnisse

In den Abb. 5 und 6 sind die Vollständigkeit, Richtigkeit und Qualität für die Datensätze grafisch aufgeführt. Beide Datensätze weisen die gleichen Abhängigkeiten von den zwei Parametern auf. Auf alle drei Größen hat die Wahl des Quantils k den größten Einfluss. Je mehr Punkte zu Porenpunkten klassifiziert werden, desto höher ist die Vollständigkeit (nahe 100%). Dagegen ist dort der Anteil der richtig detektierten Poren sehr gering (nahe 0%). Mit zunehmenden Quantil k wird die Vollständigkeit geringer und die Richtigkeit höher.

Die Wahl der Größe der Filtermaske F hat einen geringeren Einfluss auf die drei Größen als das Quantil k. Jedoch nimmt die Richtigkeit gerade bei kleinen Filtermasken mit steigender Größe stark zu. Hieraus lässt sich schließen, dass die Filtermaske nicht zu klein gewählt werden sollte.

Die Qualität spiegelt die Balance aus der Vollständigkeit und Richtigkeit wider. In beiden Datensätzen ist zu erkennen, dass die Qualität bei einer bestimmten Kombination von Quantil k und Größe der Filtermaske F am höchsten ist. Der Datensatz „Streifenprojektion“ liefert mit 83,9% eine höhere maximale Qualität als der Datensatz der „Bündeltriangulation“ mit 54,5%. Ein Grund für die unterschiedliche Qualität der Ergebnisse aus den beiden Datensätzen ist die manuell erstellte Referenz. Im höhencodierten Orthomosaik aus dem

Datensatz der „Streifenprojektion“ sind die Poren aufgrund der hohen Detailauflösung und dem geringen Rauschen gut zu erkennen. Hingegen ist der Datensatz aus der „Bündeltriangulation“ stark verrauscht. Das erschwerte sowohl die automatische, als auch die manuelle Detektion der Poren.

3 Fazit & Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Porendetektion zur dreidimensionalen Analyse von photogrammetrisch erfassten Betonproben entwickelt. Als Eingangsdaten diente ein TIN, das mit Methoden der Nahbereichsphotogrammetrie rekonstruiert wurde. Es wurde gezeigt, dass die Porendetektion die Schwerpunkte der Luftporen flächenhaft mit einer Qualität von bis zu 83,9 % liefert. Eine geeignete Kombination aus Quantil k und Größe der Filtermaske F kann iterativ, unter Berücksichtigung der aufgezeigten Abhängigkeiten und einer visuellen Evaluation der Ergebnisse, auf den jeweiligen Datensatz abgestimmt werden.

Die Porendetektion liefert die Grundlage für weiterführende Analysen, wie z.B. die Bestimmung der Abmessungen der Poren. Ausgehend vom berechneten Schwerpunkt könnte die Abgrenzung jeder Pore bestimmt und anhand des Höhenverlaufs getestet werden, ob ein für eine Pore typischer Höhenverlauf vorhanden ist. Die Richtigkeit der Porendetektion könnte durch diesen Test nachträglich gesteigert werden.

Die Automatisierung des bisher verwendeten Sehnenmessverfahrens (Bonzel & Siebel 1981) könnte Bestandteil zukünftiger Arbeiten sein.

4 Literaturverzeichnis

- BONZEL, J. & SIEBEL, E., 1981: Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton. *Betontechnischer Bericht Beton*, **12**.
- HEIPKE, C., MAYER, H., WIEDEMANN, C. & JAMET, O., 1997: Evaluation of automatic road extraction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **32(3) SECT 4W2**, 151-160.
- KAMPEN, R. & RICHTER, T., 2014: Betonzusätze – Zusatzmittel und Zusatzstoffe. *Zement-Merkblatt Betontechnik B3*. www.Beton.org, letzter Zugriff 09.08.2017.
- NIEMEIER, W., 2008: Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, de Gruyter.
- PITER, A. M., 2017: Untersuchungen zur dreidimensionalen Analyse von photogrammetrisch erfassten Betonproben. Bachelorarbeit, Leibniz Universität Hannover, Deutschland.