

Sohltopographische Vermessung im wasserbaulichen Versuchswesen mittels Kinect

Tobias Liepert, Mathias Schlagenhauser, Franz Weiß, Elena von der Straten und Mark Rochlus

Zusammenfassung

Anlässlich des studentischen Praktikums an der Versuchsanstalt für Wasserbau in Oberrach konnte mit der Kinect von Microsoft ein flächiges, kostengünstiges und robustes sohltopographisches Vermessungssystem eruiert werden. Der Kinect-Sensor, gedacht um die Mensch-Maschine-Interaktion mit der Spielekonsole Xbox zu verbessern, liefert einen fortlaufenden Datenstrom an Tiefeninformationen. Die Kinect nutzt hierzu ein modifiziertes strukturiertes Lichtverfahren auf Infrarotbasis, so kann sie unabhängig von der Tageslichtsituation agieren. Im optimalen Messbereich (Entfernungen von 0,6 bis 3 m) erreicht die Kinect sogar Messgenauigkeiten die bislang nur mit sehr viel teureren Messtechniksystemen möglich waren. Auch im Bereich der Messwertverarbeitung setzt Microsoft mit KinectFusion neue Maßstäbe, indem die fortlaufenden Tiefeninformationen der Kinect sukzessive in ein Gesamtmodell integriert werden. So lassen sich selbst komplexe Situationen problemlos aufnehmen.

An einem studentischen Versuchstand wurden die Erosion und Auflandung infolge der Umströmung eines Brückenpfeilers, der in bewegliches Sohlmaterial eingebettet ist, mit der Kinect aufgenommen und ausgewertet. Drei sehr ähnliche Versuchsreihen wurden durch dimensionslose Kenngrößen (dimensionsloser Ab- und Auftrag und dimensionslose Kolkentiefe sowie Auflandungshöhe) miteinander verglichen. Sie zeigten eine gute Übereinstimmung. Die abschließende Fehlerbetrachtung lässt erkennen, dass der Kinect-Sensor durchaus für den Einsatz im wasserbaulichen Versuchswesen geeignet ist.

1 Einleitung

Mit dem Praktikumstag an der Versuchsanstalt für Wasserbau in Oberrach, der im Rahmen der studentischen Grundausbildung angeboten wird, bekommen die Studierenden einen Einblick in das wasserbauliche Versuchswesen. Sie durchlaufen verschiedene Stationen, die thematisch und methodisch an den Vorlesungsinhalten anknüpfen. Gelerntes kann durch die Veranschaulichung besser verstanden und verinnerlicht werden.

In der Konzeptionsphase des Versuchsprogramms wurde darauf geachtet, dass die Versuche möglichst einfach und robust aufgebaut sind und auch der finanzielle Aufwand gering gehalten wird. Gleichzeitig sollten die auftretenden Effekte bzw. Phänomene klar erkennbar sein. Zudem sollten die Versuche innerhalb von 30 Minuten durchführbar sein. Den Überlegungen hierzu entsprang unter anderem die Idee des Brückenpfeiler-Kolkversuchs.

Die Realisierung des Brückenpfeiler-Kolkversuchs erfolgte in einem Ausschnittsmodell mit beweglicher Sohle und einem mittig angeordneten Brückenpfeiler. Je nach Anströmsituation ergibt sich eine mehr oder weniger starke lokale Sohlveränderung. Im Rahmen des Praktikums untersucht jede Gruppe eine andere Anströmsituation und dokumentiert die damit einhergehende sohltopographische Änderung.

Zu Visualisierungszwecken bestand darüber hinaus der Wunsch einer 3D sohltopographischen Vermessung. Die eingangs formulierten Anforderungen schlossen eine zeitaufwendige sowie

teure Messwerterfassung (etwa Laserscanning) kategorisch aus. Eine andere Möglichkeit musste gefunden werden. Die Kinect bot eine kostengünstige und einfach handhabbare Alternative. Die ersten sohltopographischen Aufnahmen mit dem Kinect-Sensor offenbarten das Potential, das weit über eine reine Visualisierung hinaus zu reichen schien. Dies bot den Anlass, die Möglichkeiten der Kinect im Rahmen von Abschlussarbeiten (Rochlus 2014; Weiß 2015; Straten 2015), die auch die Datengrundlage dieser Veröffentlichung bilden, tiefergehend zu untersuchen.

Im Folgenden dieser Veröffentlichung werden der Aufbau und die Funktionsweise des Kinect-Sensors beschrieben. Des Weiteren wird auf die Messwertqualität eingegangen und das Aufnahmeverfahren durch KinectFusion kurz erläutert. Es folgt eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Versuchsdurchführung sowie die abschließende Ergebnisvorstellung.

2 Kinect-Sensor

Mit dem Kinect-Sensor wollte Microsoft die Mensch-Maschine Interaktion in der Unterhaltungsindustrie revolutionieren. Schnell entwickelte sich eine sehr aktive und rasch wachsende Gemeinschaft, die den preiswerten 3D Sensor für ihre Vorhaben zweckentfremdete und die Softwareentwicklung vorantrieb. Die Anwendungen, die daraus hervorgingen, reichen vom einfachen 3D Tischscanner bis hin zur virtuellen Kleideranprobe.

2.1 Aufbau

Der Kinect-Sensor ist mit einer RGB-Kamera, einem 3D-Tiefensensor und ein Mikrophon-Array bestückt (siehe Abb. 1 links). Die Audio-Komponenten leisten keinen Beitrag zur Erstellung der 3D-Punktwolken, deshalb werden sie im Folgenden nicht näher betrachtet. Das Herzstück des Kinect-Sensors bildet der 3D-Tiefensensor, der nach dem Prinzip des strukturierten Lichts arbeitet (Han et al. 2013; Freedman et al. 2010). Er besteht aus einem Infrarotprojektor und einer Infrarotkamera (Khoshelham und Elberink 2012; Schares et al. 2012). Durch die Nutzung des Infrarotspektrums arbeitet der 3D-Tiefensensor in einem für das menschliche Auge unsichtbaren Bereich. Eine gleichmäßige Ausleuchtung des aufzunehmenden Bereichs, wie es z. B. Photogrammetrie-Systeme verlangen, ist nicht notwendig (Newcombe et al. 2011a). Probleme bereiten lediglich Wärmequellen, die Strahlung im Nahinfrarotbereich emittieren, z. B. Halogenlampen.



Abb. 1 links: Der Kinect-Sensor mit seinen Bestandteilen (Microsoft); rechts: Beispiel eines projizierten Infrarotmusters (Reichinger 2011)

2.2 Funktionsweise des Kinect 3D-Tiefensensors

Die Bestimmung der räumlichen Koordinaten basiert auf einer Triangulation von Punktverschiebungen (Freedman et al. 2010). Als Referenzpunktmuster dient die Aufnahme einer Ebene mit

definiertem Abstand (Khoshelham und Elberink 2012). Bei der Aufnahme eines Objekts, welches sich vor oder hinter der Referenzebene befindet, kommt es auf Grund der Stereoanordnung von Projektor und Kamera zu einer Verschiebung des aufgezeichneten Punktemusters. Aus der Gegenüberstellung des infrarot projizierten Musters und dem Referenzmuster lassen sich die Verschiebungen der einzelnen Punkte bestimmen, diese werden in sogenannten Disparitätenkarten (engl. disparity maps) gespeichert. In Abb. 2 findet sich das von Khoshelham vorgestellte Disparitäten-Tiefen-Modell der Kinect.

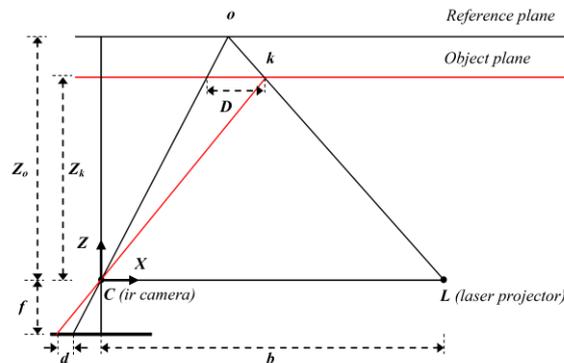


Abb. 2 Disparitäten-Tiefen-Modell der Kinect (Khoshelham und Elberink 2012)

Das pseudozufällige Infrarotprojektionsmuster, welches von zwei Beugungsgittern (engl. diffraction grating) aufgespannt wird, bildet die Grundlage eines modifizierten strukturierten Lichtverfahrens. Als Basis dient ein regelmäßiges orthogonales Gitter (Schaes et al. 2012) welches unregelmäßig ausgedünnt wird. Das Muster muss so aufgebaut sein, dass Ausschnitte daraus auf kleinster Ebene eindeutig zuordenbar bzw. erkennbar sind (Reichinger 2011). Weiter wird vermutet, dass eine geschickte Auswertung der Nachbarschaftsbeziehungen eine globale Identifikation der Punkte-ID und die Bestimmung der Punktlage im Sub-Pixelbereich ermöglicht. Die Vermutungen von Reichinger werden durch die Tatsache bestärkt, dass die Infrarotkamera eine native Auflösung von 1280 x 1024 besitzt (Smisek et al. 2011), der Tiefensensor jedoch nur ein Tiefenbild mit 640 x 480 Pixel liefert (Han et al. 2013).

Der Aufbau der Kinect gestattet es, die Tiefeninformationen zugleich mit dem realen Farbwert zu texturieren, indem synchronisierte Aufnahmen gemacht werden. Die zusätzliche Farbinformation, die über die RGB-Kamera eingespielt werden kann, dient nicht nur dem Verständnis des Betrachters, sondern kann auch von Algorithmen bei der Verarbeitung der Punktwolken genutzt werden (Smisek et al. 2011).

2.2.1 Auflösung und Messwertqualität

Der Abstand vom Tiefensensor ist indirekt proportional zum Quadrat der Auflösung (Khoshelham und Elberink 2012), d. h. mit zunehmenden Abstand zum Sensor reduziert sich die räumliche Auflösung und damit einhergehend auch die Messgenauigkeit und -qualität (Chin et al. 2015; Mallick et al. 2014).

Um die Distanzgenauigkeit und das Rauschverhalten der eingesetzten Kinect zu ermitteln, wurde eine ebene Holzplatte in verschiedenen Abständen zur Kinect aufgenommen und im Anschluss hinsichtlich der zu erreichenden Tiefengenauigkeit und Messqualität ausgewertet. Bei der Ausrichtung der Ebenen wurde darauf geachtet, dass die Bildebene parallel zur Ebene der Holzplatten orientiert ist. Für die Bestimmung der Tiefengenauigkeit wurde aus den

aufgenommenen Ebenen jeweils ein 40 cm² großer Bereich herausgeschnitten, so ließen sich etwaige Störeffekte der Randbereiche entfernen. Sodann erfolgte die Bestimmung des Flächenschwerpunktes des Ebenenausschnitts. Die in Abb. 3 dargestellte Fehlerabweichung des Tiefenbildes ergibt sich aus der Differenz des Flächenschwerpunktes zum tatsächlichen Abstand der Ebene. Zu ähnlichen Erkenntnissen gelangt auch Schares et al. 2012. Im Rahmen der hier vorgestellten Anwendung ist von einem Abstand zwischen Sensor und Aufnahmeobjekt unter eineinhalb Metern auszugehen. Der Messfehler liegt folglich im Millimeterbereich. Ferner ließ sich mit einer verbesserten Kalibrierung des Kinect-Sensors die Messgenauigkeit verbessern (Smisek et al. 2011; Khoshelham und Elberink 2012), was jedoch im Rahmen der aktuellen Untersuchungen nicht versucht wurde.

Des Weiteren wurde das Messrauschen, das durch die Standardabweichung (siehe Abb. 3) charakterisiert wird, bestimmt. Auch hier zeigt sich, dass eine Zunahme des Abstands zwischen Sensor und Objekt mit einer Zunahme des Messwertrauschens verbunden ist, ergo die Messwertqualität abnimmt.

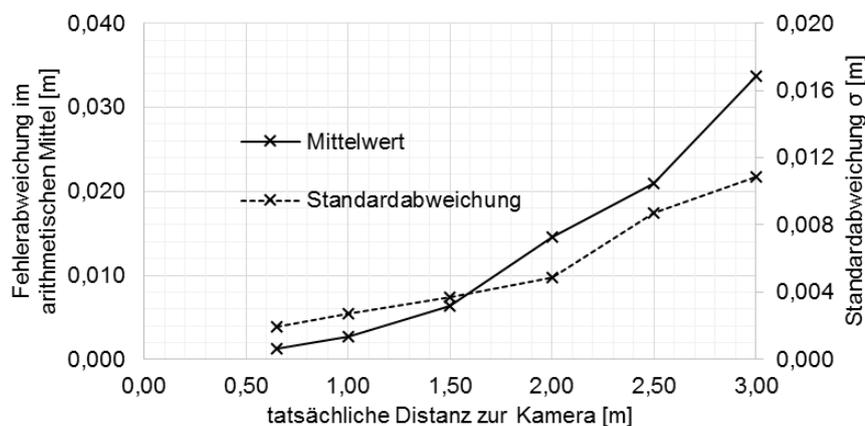


Abb. 3 Bewertung der Distanzgenauigkeit durch Fehlerabweichung im arithmetischen Mittel und Quantifizierung des Rauschverhaltens durch die Standardabweichung

2.3 KinectFusion

Aus den Daten des Tiefensensors lässt sich für jede Aufnahme eine 3D-Punktwolke des aktuell einsehbaren Raumausschnitts erzeugen. Verdeckungen bzw. Abschattungen und außerhalb des Sichtfelds liegende Bereiche, die sich aus der gegenwärtigen Sensorposition ergeben, können demnach nur durch eine Neupositionierung des Sensors sichtbar werden. Mit KinectFusion gelingt es, Punktwolken von unterschiedlichen Aufnahmepositionen des Kinect-Sensors in einem Modell zu vereinen, indem die fortlaufend aufgenommenen Tiefeninformationen praktisch verzögerungsfrei in ein räumliches Gesamtmodell eingebaut werden (Newcombe et al. 2011b). Zur Einarbeitung einer Punktwolke in das Gesamtmodell benötigt KinectFusion vier Arbeitsschritte (Newcombe et al. 2011a; Newcombe et al. 2011b).

1. Konvertierung der Tiefeninformation: Die von der Kinect fortlaufend aufgenommenen Tiefeninformation werden in räumliche Punktkoordinaten umgewandelt und unter Einbeziehung der Nachbarpunkte mit Normalen versehen.
2. Sensorpositionsbestimmung: Zur Bestimmung der räumlichen Sensorposition und -ausrichtung dient ein ICP-Algorithmus (engl. Iterative Closest Point). Dieser richtet die aktuelle Punktwolke an der Vorausgegangen so aus, dass der Abstandsfehler zwischen den beiden Punktwolken minimiert wird. Sofern zwischen zwei Aufnahmen keine allzu

- großen Änderungen auftreten, arbeitet die gewählte Implementierung sehr robust. Als Ergebnis liefert der ICP-Algorithmus die Transformationsmatrix der Sensorposition, wodurch auch die globale Kameraposition festgelegt ist.
3. Volumetrische Integration: Anstelle die Punktwolken direkt oder als Netz zu verarbeiten, werden sie in ein volumetrisches Oberflächenmodell überführt. Im zugehörigen Voxelgitter ist für jeden Voxel ein Abstandswert (von außen positiv und von innen negativ) zur Oberfläche hinterlegt, welcher sich aus dem fortlaufenden gewichteten Mittelwert aller Messungen ergibt. Darüber hinaus lässt sich die Gewichtung durch einen extern vorgegebenen Benutzerparameter beeinflussen. Die Lage der Oberfläche ist durch den Nulldurchgang gekennzeichnet.
 4. Raycasting: Dieses Verfahren wird genutzt, um aus der impliziten Oberflächenbeschreibung Ansichten für die graphische Ausgabe zu rendern. Zudem prädestiniert sich das so gewonnene Modell dank seiner Konsistenz und seinem geringen Rauschverhalten als Referenz für den ICP-Algorithmus.

Die GPU-basierte Implementierung von KinectFusion macht sich die hochparallelisierte Architektur moderner Grafikkarten zu Nutze, was eine Bewältigung der sehr umfangreichen Berechnungen innerhalb weniger Millisekunden ermöglicht. Einziger Nachteil ist der immense Speicherplatzbedarf (Newcombe et al. 2011b). Kinect Fusion ist Bestandteil des KinectSDKs und wird von Microsoft bereitgestellt.

3 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Kolkversuch ist in einem 0,525 m breiten und 8,30 m langen horizontalen Gerinne situiert. Im Vorlauf der Untersuchungsstrecke gewährleistet eine Anlaufstrecke aus erosionsstabilem Kleinschotter den kontinuierlichen Übergang zur Sandsohle. Der Bereich der beweglichen Sandsohle ist 2,2 m lang. Dort ist der Brückenpfeiler mittig platziert. Im Anschluss daran befinden sich ein Sandfang und die Unterwasserklappe. Die strömungsungünstige Pfeilergometrie des eingebauten Querellipsoids (Hauptachse 64 mm und Nebenachse 32 mm) ist dem Lehrzweck zuzuschreiben, da für die studentische Grundausbildung eine markant wahrnehmbare Sohländerung innerhalb kürzester Zeit sichtbar werden soll. Zudem wurde der Pfeiler so ausgeführt, dass er kurz oberhalb der Sohle teilbar ist, um die messtechnische Zugänglichkeit zu erleichtern.

Beschreibung der Versuchsdurchführung: Vor jedem Versuch wurde die Sohle eben und mit annähernd gleichem Verdichtungsgrad eingebaut. Zudem wurde im Vorfeld jedes Versuchs auf eine ausreichende Durchmischung geachtet, um der Heterogenität der Kornverteilung, verursacht durch Sortiervorgänge während der Kolkung, entgegenzuwirken. Das Anfahren des Versuchs geschah bei geschlossener Unterwasserklappe und einem Durchfluss von etwa 2-3 l/s, so ließen sich etwaige Einlaufeffekte minimieren. Mit steigendem Wasserspiegel wurde auch der Durchfluss sukzessive erhöht und bis auf 20 l/s gesteigert. Um die Kolkung in Gang zu setzen, wurde die Unterwasserklappe langsam bis zum Erreichen des gewünschten Pegelwerts abgesenkt. Die Bandbreite der Fließgeschwindigkeiten wurde so gewählt, dass einerseits die Sedimentbewegung am Pfeiler einsetzte und andererseits gerade noch keine Flächenerosion auftrat. Die im Folgenden verwendete Angabe der Geschwindigkeit im Versuch bezeichnet stets die mittlere Geschwindigkeit im ungestörten Bereich.

Ausgangs- und Endzustand der Sohltopographie wurden mit dem Kinect-Sensor aufgenommen. Als Aufnahmesoftware kam KinectFusion zum Einsatz. Die räumliche Auflösung, die

Größe des Aufnahme Fensters und der volumetrische Gewichtungsfaktor wurden an die Gegebenheiten des Versuchs angepasst. Zudem war während den Aufnahmen achtzugeben, dass die Sensorposition nicht abrupt geändert wurde, denn sonst schlug die Sensorpositionsbestimmung von KinectFusion fehl.

4 Messungen

Die in diesem Paper vorgestellten Messungen entstammen drei unterschiedlichen Messreihen (Rochlus 2014; Weiß 2015; Straten 2015). Diese unterscheiden sich geringfügig in den Versuchsrandbedingungen sowie den erhobenen Daten (siehe Tab. 1).

Tab. 1 Versuchsreihen und ihre Besonderheiten

Versuchsreihenbezeichnung	Besonderheit
Rochlus	Brückenpfeiler war nicht teilbar.
Weiß	Keine Aufnahme des Ausgangszustands.
Straten	Das obere Ende der Versuchsreihe ist auf Grund des zu klein gewählten Aufnahmeausschnitts nur bedingt brauchbar.

4.1 Auswertung

Grundlage der folgenden Auswertung bilden die mit KinectFusion aufgenommenen Punktwolken. Diese wurden in einem ersten Arbeitsschritt horizontriert, von Aufnahmeartefakten befreit und auf den Untersuchungsraum zugeschnitten.

Für die Versuche der Messreihen Rochlus und Straten existieren je zwei Aufnahmen, einerseits der Referenzzustand mit glatter Sohle und andererseits der dokumentierte Endzustand mit dem Kolk. Das Versuchsprogramm wurde so konzeptioniert, dass die Sedimentbewegungen nur im unmittelbaren Umfeld des Brückenpfeilers auftreten, dementsprechend kann von einem lokalen Ereignis ausgegangen werden. Diese Tatsache ließ sich bei der Registrierung (d. h. das zueinander Ausrichten) der Punktwolken nutzen, indem für diesen Vorgang ausschließlich die unveränderten Bereiche herangezogen wurden (d.h. die veränderten Bereiche des Endzustands wurden für die Registrierung ausgeblendet). Die Registrierung erfolgte in zwei Schritten: Zuerst wurde eine manuelle Grobausrichtung vorgenommen, um im Anschluss eine Feinregistrierung (ICP-Algorithmus) durchführen zu können. Zur Erleichterung der manuellen Ausrichtung und besseren Feinregistrierung der sohltopographischen Aufnahmen wurden klar definierte, im Scan gut erkennbare Körper (z.B. Würfel, Rechtecke) im Gerinne befestigt.

Für die Datensätze von Weiß standen keine sohltopographischen Aufnahmen der Ausgangszustände zur Verfügung, weshalb auf ein Ersatzverfahren ausgewichen werden musste. Da der Ausgangszustand der Sohle als Ebene hergestellt worden war, konnte im ungestörten Bereich eine virtuelle Ebene an die Punktwolke angepasst (Methode der geringsten Fehlerquadrate) und die Ausgangssohlle so bestmöglich nachgebildet werden.

4.1.1 Bestimmung der Differenzvolumina, max. Kolktiefe und max. Auflandungshöhe

Nachdem die Punktwolken horizontriert, zugeschnitten und registriert worden waren, konnte mit der Bestimmung der Differenzvolumina begonnen werden. Hierzu wurde mit dem in CloudCompare als Plug-In enthaltenen M3C2-Algorithmus (Lague et al. 2013) der vorzeichenbehaftete, vertikale Abstand zwischen Ausgangs- und Endsohlage errechnet (negativer Abstand: Erosion; positiver Abstand: Auflandung). Als Ergebnis lag dann für jeden Punkt des Ausgangszustandes die vertikale Differenz (Endzustandes minus Ausgangszustand) als zusätzliches Attribut vor. Jedoch musste das Ergebnis der Abstandsbestimmung im Bereich des Pfeilers nachbearbeitet werden, da die zu unpräzise Erfassung der komplexen Geometrie keine saubere, eindeutige Abstandsbestimmung ermöglichte. Die vertikalen Wände des Pfeilers führten zu unsinnigen Abstandswerten, woraufhin der Bereich des Pfeilers manuell zu Null gesetzt wurde.

Im Anschluss daran wurde die Punktwolke mit den Differenzinformationen gleichmäßig (1mm) gerastert und das entstandene 2,5D Feld (X, Y, Differenzinformation) über das gesamte Gebiet integriert. Hierbei wurde zwischen negativen und positiven Differenzvolumina unterschieden, um die Erosion und Auflandung getrennt quantifizieren zu können. Die in Abb. 4 a) dimensionslos aufgetragenen Ab- und Auftragsvolumina vermitteln ein konsistentes Bild. Die bewegten Volumina wachsen quadratisch mit Zunahme der Fließgeschwindigkeit.

Es ist anzumerken, dass durch die Festlegung der Vertikalen als Richtung bei der Differenzbildung Informationen über etwaige, zwischen den Aufnahmen entstandene überhängende Bereiche oder senkrechte Wände, verloren gehen. Solche Geländeformen treten bei den untersuchten Kolkvorgängen jedoch praktisch nicht auf, so dass dies keine Einschränkung darstellt.

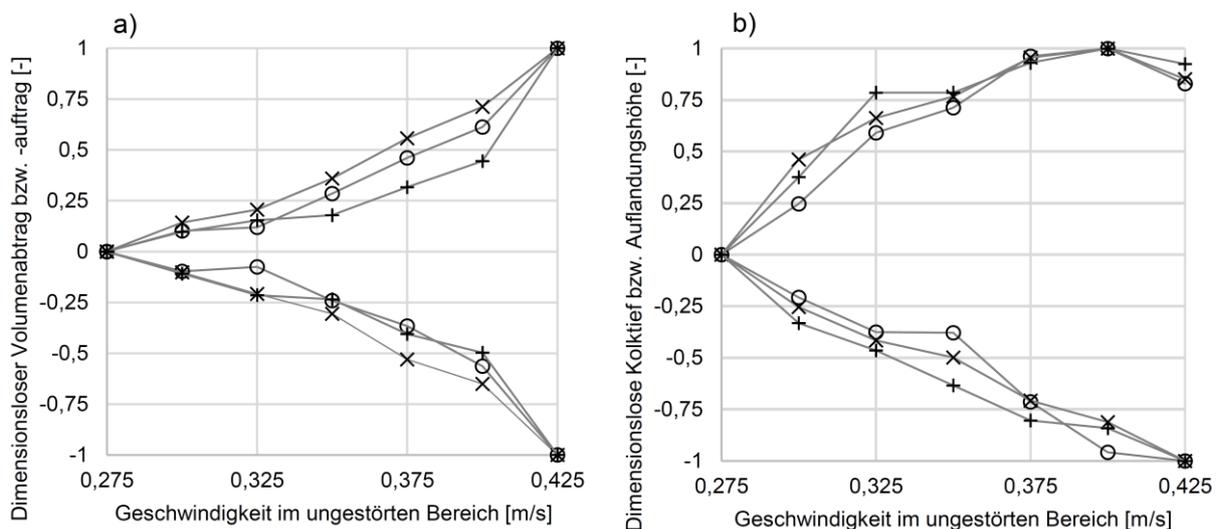


Abb. 4 Ergebnisse aus den Versuchsreihen von Rochlus, Weiß und Straten: a) Dimensionslose Ab- und Auftragsvolumina b) Dimensionslose Kolktiefe und Auflandungshöhe

Als weitere Messgrößen lassen sich aus der Abstandsermittlungen die maximalen Kolkiefen sowie die maximalen Auflandungshöhen entnehmen, dimensionslos dargestellt in Abb. 4 b). Auch hier zeigen alle Versuchsreihen ein ähnliches Verhalten. Die Kolktiefe wächst linear mit Zunahme der Geschwindigkeit. Anders verhält sich hingegen die Auflandung, die ihr Maximum bereits bei einer Geschwindigkeit von 0,4 m/s erreicht.

Kolkungsprozesse an Pfeilern, insbesondere an zylindrischen Pfeilern, waren und sind des Öfteren Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen (Diab et al. 2010). Im Allgemeinen hat es sich bewährt, für die Ergebnisdarstellung dimensionslose Kenngrößen zu benutzen. In Abb. 5 sind die Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchungen in dimensionsloser Form wiedergegeben. Belastbare Aussagen lassen sich hieraus jedoch nur schwerlich ableiten, da die Anzahl der Versuche zu gering ist.

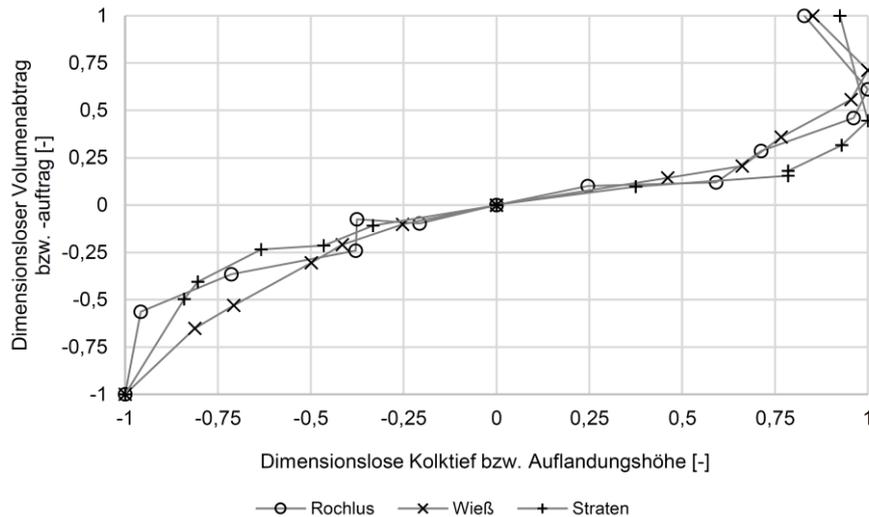


Abb. 5 Dimensionslose Volumina (Ab- bzw. Auftrag) aufgetragen über die korrespondierenden dimensionslosen Höhen (Kolk tiefe bzw. Auflandung)

4.1.2 Quantifizierung des Messfehlers

Im Weiteren soll die Frage, inwieweit der Kinect-Sensor zur sohltopographischen Vermessung im wasserbaulichen Versuchswesen geeignet ist, beleuchtet werden. Als Beurteilungskriterium wird das Differenzvolumen von Erosion und Auflandung im ungestörten Bereich herangezogen. Bei dem untersuchten Kolkvorgang handelt es sich um ein lokales, auf die unmittelbare Umgebung des Pfeilers begrenztes Phänomen. Demzufolge existiert aber auch ein ungestörter Bereich, in dem weder Auflandung noch Abtrag stattfinden. Aufgrund von Messungenauigkeiten und einer fehlerbehafteten Registrierung kommt es jedoch auch dort zu virtuellen Sohlveränderungen.

Die absoluten Unterschiede sind in Abb. 6 a) dargestellt. Die Untersuchungen von Rochlus zeigen die größten Abweichungen und sind fast doppelt so groß, wie die der beiden anderen Versuchsreihen. Die Ursache war der in den Untersuchungsraum hineinragende Pfeiler, der massive Abschattungen hervorrief. Im Nachgang wurde der Versuchsaufbau deshalb so modifiziert, dass der Pfeiler nunmehr kurz oberhalb der Sohle abgetrennt werden kann. Ferner lässt die Auswertung des absoluten Messfehlers darauf schließen, dass bei einer sorgfältigen Aufnahme und Auswertung der absolute Fehler nahezu konstant bleibt.

Der relative Fehler, aufgetragen in Abb. 6 b), fällt mit Zunahme des Kolkvolumens. Ob die Qualität der sohltopographischen Aufnahme der Kinect ausreicht, dürfte stark von der Anwendung und jeweiligen Zielvorstellung abhängen

5 Ausblick

Die Kinect ermöglicht eine schnelle und relativ präzise Vermessung. Es ist geplant eine erneute Versuchsreihe mit einer kalibrierten Kinect durchzuführen. Zudem soll auch das Nachfolgegerät, die KinectOne, näher untersucht werden, verspricht diese doch eine noch präzisere Tiefenmessung.

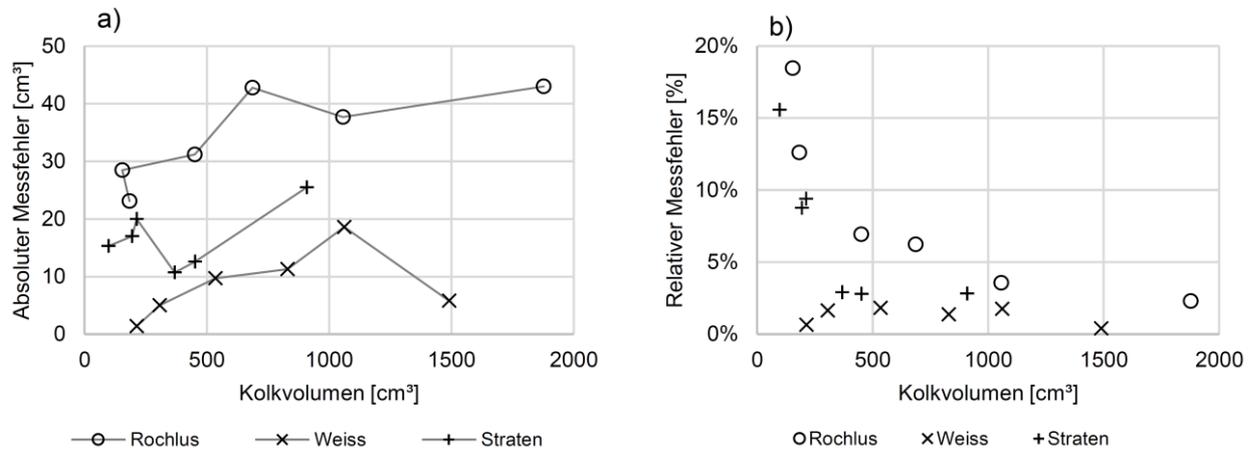


Abb. 6 a) Absoluter Messfehler und b) Relativer Messfehler aufgetragen über das Kolkvolumen

6 Literaturverzeichnis

Chin, Lim Chee; Basah, Shafriza Nisha; Yaacob, Sazali; Din, Mohamad Yazid; Juan, Yeap Ewe (2015): Accuracy and reliability of optimum distance for high performance Kinect Sensor. In: 2nd International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE). Penang, Malaysia, S. 1–7.

Diab, Reda; Link, Oscar; Zanke, Ulrich (2010): Geometry of developing and equilibrium scour holes at bridge piers in gravel. In: *Can. J. Civ. Eng.* 37 (4), S. 544–552. DOI: 10.1139/L09-176.

Freedman, Barak; Shpunt, Alexander; Machline, Meir; Arieli, Yoel (2010): DEPTH MAPPING USING PROJECTED PATTERNS. Angemeldet durch PRIME SENSE LTD (Tel Aviv, IL). Veröffentlichungsnr: 20100118123.

Han, Jungong; Shao, Ling; Xu, Dong; Shotton, Jamie (2013): Enhanced computer vision with Microsoft Kinect sensor: a review. In: *IEEE transactions on cybernetics* 43 (5), S. 1318–1334. DOI: 10.1109/TCYB.2013.2265378.

Khoshelham, Kourosh; Elberink, Sander Oude (2012): Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 12 (2), S. 1437–1454. DOI: 10.3390/s120201437.

Lague, Dimitri; Brodu, Nicolas; Leroux, Jérôme (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, S. 10–26. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.

Mallick, Tanwi; Das, Partha Pratim; Majumdar, Arun Kumar (2014): Characterizations of Noise in Kinect Depth Images: A Review. In: *IEEE Sensors J.* 14 (6), S. 1731–1740. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2309987.

Microsoft (Hg.): Kinect for Windows Sensor Components and Specifications.

Newcombe, Richard A.; Davison, Andrew J.; Izadi, Shahram; Kohli, Pushmeet; Hilliges, Otmar; Shotton, Jamie et al. (2011a): KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking. In: 2011 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Basel, S. 127–136.

Newcombe, Richard A.; Izadi, Shahram; Hilliges, Otmar; Molyneaux, David; Kim, David; Davison, Andrew J. et al. (2011b): KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera. In: Jeff Pierce (Hg.): Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology. New York, NY: ACM.

Reichinger, Andreas (2011): Kinect Pattern Uncovered. Online verfügbar unter <https://azttm.wordpress.com/2011/04/03/kinect-pattern-uncovered/>.

Rochlus, Mark (2014): Entwicklung und Tauglichkeitsuntersuchung eines Verfahrens zur quantitativen Bestimmung von Kolkereignissen im physikalischen Modell mit Hilfe der Kinect. Bachelor Thesis. Technische Universität München.

Schares, Jean-Marc; Hoegner, Ludwig; Stilla, Uwe (2012): Geometrische Untersuchung zur Tiefengenaugigkeit Geometrische Untersuchung zur Tiefengenaugigkeit des Kinect-Sensorsystems. In: 32. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. Erdblicke – Perspektiven für die Geowissenschaften. Unter Mitarbeit von Eckhardt Seyfert (Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V., 21), S. 372–380.

Smisek, Jan; Jancosek, Michal; Pajdla, Tomas (2011): 3D with Kinect. In: 2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, S. 1154–1160.

Straten, Elena von der (2015): Vergleich des durch die Kinect 1 und Kinect 2 aufgenommenen Brückenkolkvolumens an zwei physikalischen Modellen und ihre Skalierbarkeit. Bachelor Thesis. Technische Universität München, München.

Weiß, Franz (2015): Vergleichsanalyse der Kinect 1 und Kinect 2 in Bezug auf die Volumenbestimmung von Kolkereignissen im physikalischen Modell. Bachelor Thesis. Technische Universität München, München.

Anschrift der Verfasser

Tobias Liepert
Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München
Arcisstraße 21, D-80333 München
tobias.liepert@tum.de

Mathias Schlagenhauser
Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München
Oberrach 59 1/3, D-82432 Walchensee
mathias.schlagenhauser@tum.de