

Erfassung von Geometriedaten kleiner Flüsse mit einem unbemannten Wasserfahrzeug als Multisensor-Plattform

HANNES SARDEMANN¹, ANETTE ELTNER¹ & HANS-GERD MAAS¹

Zusammenfassung: In den letzten Jahren treten an Flüssen mit kleinen und mittleren Einzugsgebieten vermehrt Sturzfluten auf. In dem interdisziplinären Forschungsprojekt EXTRUSO werden hydro-logische Modelle entwickelt, mit denen diese starkregeninduzierten Hochwasserereignisse besser modelliert und vorhergesagt werden können. Dafür werden u.a. hochaufgelöste Geländemodelle der Uferbereiche und des Gewässerbettes benötigt. Des Weiteren kann durch eine Analyse der landschaftlichen Veränderungen der Uferbereiche im Anschluss an ein Hochwasserereignis das Ausmaß des Ereignisses erfasst und somit das Verständnis über das Ereignis verbessert werden, um somit Vorsorgemaßnahmen abzuleiten. Für die Aufnahme von Geländemodellen im Flussbereich wird dabei neben der Befliegung mit einem UAV das Gewässer mit einem unbemannten Wasserfahrzeug (unmanned water vehicle – UWV) befahren. Das UWV dient als Multisensorplattform und digitalisiert sein Umfeld über Wasser mit einer 360°-Kamera und einem mobilen Laserscanner. Die vom Laserscanner aufgenommene Punktwolke der Ufer kann mit den Panoramabildern der 360°-Kamera koloriert werden. Unter Wasser wird das Gerinne mit einem Echolot aufgenommen. Das UWV ist außerdem mit einer Positionierungseinheit aus GNSS-gestützter IMU ausgestattet.

Im Beitrag wird das Konzept des Multisensor-UWV vorgestellt, und es werden Resultate aus ersten Pilotstudien gezeigt.

1 Einleitung

Innerhalb der letzten Jahrzehnte ist eine Zunahme von Starkregenereignissen, welche sich durch eine große Niederschlagsmenge in kurzer Zeit auszeichnen, zu beobachten (MÜLLER & PFISTER 2011). Dies erhöht das Risiko für Sturzfluten, die nach kurzen, kleinräumigen Starkregenereignissen insbesondere in Flüssen mit kleinen Einzugsgebieten auftreten (BRONSTERT et al. 2017). Kleine Flüsse reagieren auf Niederschlag mit schnell ansteigendem Wasserstand und es kommt zu plötzlichen Sturzfluten mit oft schweren Folgen. Gerade Flüsse mit kleinen und mittleren Einzugsgebieten werden aber kaum durch Pegelstationen überwacht. Diese Umstände erfordern neue Ansätze zur Sturzflutvorhersage.

In dem Forschungsprojekt EXTRUSO werden neue Methoden zur Modellierung und Vorhersage von Extremereignissen in kleinen und mittleren Einzugsgebieten entwickelt. Dazu werden zum einen die Messnetze für meteorologische, hydrologische und hydro-morphologische Parameter mit kostengünstigen Sensoren verdichtet. Neben low-cost Regensensoren werden kamerabasierte Pegel entwickelt (ELTNER et al. 2018). Außerdem werden neue hydrologische und hydrodynamische Modelle entwickelt und bestehende angepasst, um den Anforderungen für die Sturzflutvorhersage zu entsprechen. Für die Modellierung werden digitale Geländemodelle (DGM) sowohl

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstr. 10, D-01069 Dresden, E-Mail: [hannes.sardemann, anette.eltner, hans-gerd.maas]@tu-dresden.de

der Ufer als auch des Flussprofils benötigt. U.a. wird im Rahmen des Projekts der Einfluss der Auflösung der Geländemodelle auf die Modellierungsergebnisse untersucht. Neben den vom Amt verfügbaren DGMs mit 0,5 m Auflösung werden eigene, hochaufgelöste DGMs von Flussabschnitten erzeugt. Dafür werden eine Drohne (UAV, unmanned aerial vehicle) und ein ferngesteuertes Messboot (UWV, unmanned water vehicle) eingesetzt. Vom UAV werden mit einer Kamera Bilder des Geländes im Uferbereich aufgenommen und daraus mittels Structure-from-Motion (SfM) eine Punktwolke berechnet. Die Ufer und das Flussprofil sind für die hydrologische und hydrodynamische Modellierung von besonderer Bedeutung und werden vom Wasser aus mit einem UWV aufgenommen. Anschließend sollen die Punktwolken, die mit UAV und UWV generiert wurden, fusioniert und ein gerastertes DGM inklusive Flussprofil erstellt werden.

In diesem Beitrag wird das Konzept eines Multisensor-UWV mit mobilem Laserscanner und 360° Kamera für die Kartierung über Wasser und einem Echolot für die Kartierung unter Wasser vorgestellt. Ergebnisse aus ersten Pilotstudien zeigen das Potential des Systems.

2 Das unbemannte Wasserfahrzeug

Als Plattform für die Vermessung der Ufer und des Flussprofils vom Wasser aus wird das ferngesteuerte Messboot HyDrone von Seafloor Systems verwendet. Das Katamaran wurde vom Hersteller für bathymetrische Messungen mit einem Echolot entwickelt und von den Autoren zu einem Multisensorsystem umgebaut (Abb. 1).

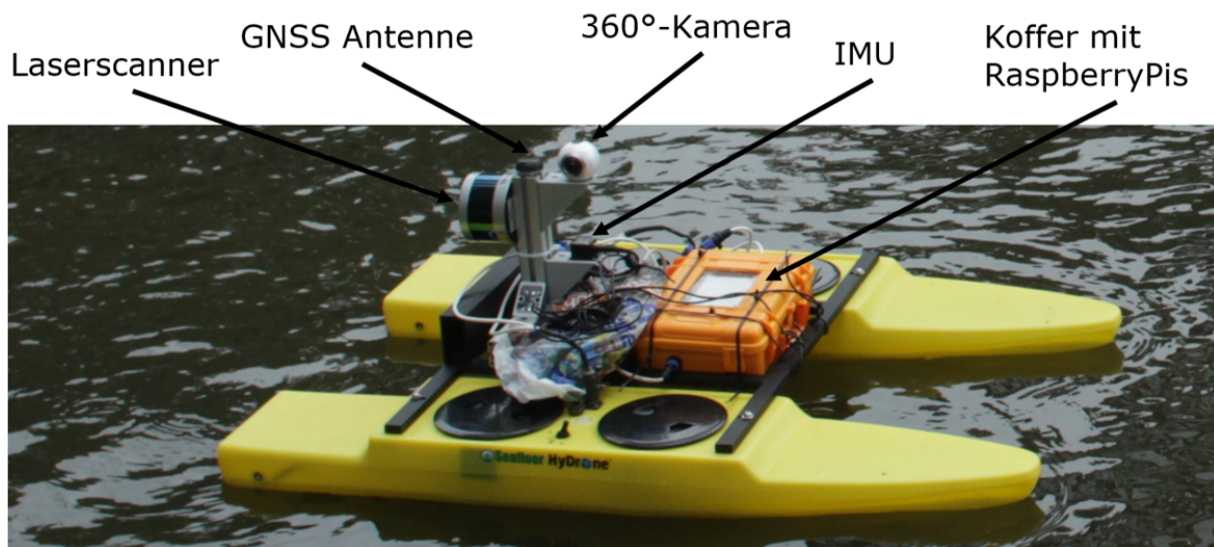


Abb. 1: UWV mit Sensorik. Über Wasser werden Laserscanner und 360°-Kamera eingesetzt. Unter Wasser wird ein Echolot verwendet (in dieser Abbildung verdeckt). Die Positionierung geschieht durch eine IMU mit GPS-Empfänger. Als Recheneinheit sind zwei RaspberryPi Einplatinenrechner an Bord

Über Wasser tastet ein Velodyne Puck Laserscanner die Ufer ab. Der Laserscanner zeichnet parallel 16 Profile mit 0,3 Millionen Punkten pro Sekunde und einer maximalen Reichweite von 100 m auf. Die Messgenauigkeit des Laserscanners beträgt ± 3 cm. Mit einer Samsung Gear

360 wird ein Panoramavideo der Messfahrt aufgenommen, welches zur Kolorierung der Laserscanner-Punktwolke genutzt werden kann. Die 360°-Kamera besteht aus zwei Fisheye-Objektiven mit Öffnungswinkeln $>180^\circ$, die in entgegengesetzte Richtungen ausgerichtet sind und ein vollsphärisches Panorama mit 7,3 MP aufnehmen. Für die Positionierung wird die GNSS-gestützte inertielle Messeinheit (IMU, inertial measurement unit) Spatial von Advanced Navigation verwendet. Wassertiefen werden mit dem Einzelpunkt-Echolot ECT400 von Echologer mit einer maximalen Aufnahmezeit von 10 Hz gemessen. Durch die modulare Bauweise können weitere Sensoren integriert werden. Die Ansteuerung der Sensoren und die Datenspeicherung werden von zwei RaspberryPi Einplatinenrechnern durchgeführt.

2.1 Zeitliche Synchronisierung der Sensoren

Für eine Fusion der Daten aller Sensoren müssen diese zeitlich synchronisiert bzw. im gleichen Zeitsystem aufgenommen werden. Als Referenz wird die Uhr der IMU genutzt, die mit der GPS-Zeit synchronisiert ist und eine Genauigkeit von 50 ns besitzt. Über eine RS232 Schnittstelle sendet die IMU ihre Zeit und Position per NMEA \$GPRMC-Protokoll mit 1 Hz an den Laserscanner. Die interne Uhr des Laserscanners ist bei einer aktiven GPS-Synchronisierung $\pm 0,05$ ns genau und gibt zu jedem gemessenen 3D-Punkt einen Zeitstempel an. Die Messwerte des Echolots werden, ebenfalls über eine RS232 Schnittstelle, direkt an die IMU gesendet, die diese zusammen mit den Messungen der IMU abspeichert und mit einem Zeitstempel versieht. Die Samsung Gear 360 wurde als Consumer-Kamera für die Anwendung mit einem Smartphone entwickelt und kann nicht von der IMU oder einem Computer getriggert werden. Um die Bilder trotzdem zu synchronisieren, ist ein Display auf dem Boot angebracht, auf dem der aktuelle Zeitstempel der IMU mit 20 Hz Aktualisierungsrate angezeigt wird. Der Bildschirm ist während der kompletten Messfahrt im Sichtbereich der 360° Kamera. So kann für jede Aufnahme die Zeit (per Texterkennung oder manuell) abgelesen werden.

2.2 Kalibrierung der relativen Orientierungen

Für die Fusion der Sensordaten im gleichen Koordinatensystem muss die relative Orientierung der einzelnen Sensoren kalibriert werden. Die Kalibrierung wird mit dem in MADER et al. (2014) vorgestellten Verfahren durchgeführt. Das Kalibrierfeld wird aus Kegeln, die mit Messmarken beklebt wurden, aufgebaut und mit photogrammetrischer Mehrbildauswertung eingemessen (Referenzmessung, Abb. 2a). Das UWV wird in der Mitte des Kalibrierfelds platziert, so dass die Kegel sowohl von der 360° Kamera (Abb. 2b) als auch vom Laserscanner (Abb. 2c) aufgenommen werden. Mit einem räumlichen Rückwärtsschnitt mit Fisheye-Kameramodell kann die äußere Orientierung der beiden Bilder der 360° Kamera bestimmt werden. Die Abbildung von Objektpunkten im Referenzsystem (\mathbf{X}_{ref}) setzt sich aus einer Transformation M_{ref}^{gear} in das Kamerakoordinatensystem und einer Projektion in den Bildraum zusammen. Die Transformation besteht aus drei Rotationen (ausgedrückt durch die Rotationsmatrix R_{Ref}^{gear}) und drei Translationen (Translationsvektor T_{Ref}^{gear}):

$$(1) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{Kam} = \begin{bmatrix} R_{ref}^{gear} & T_{ref}^{gear} \\ [0 \ 0 \ 0] & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{ref} = M_{ref}^{gear} \cdot \mathbf{X}_{ref}$$

Das Kamerakoordinatensystem hat seinen Ursprung im Projektionszentrum der Kamera und liegt parallel zum Bildraum. Entsprechend eines äquidistanten Fisheye-Modells werden die Kamerakordinaten in den Bildraum projiziert:

$$(2) \quad x_{Bild} = x_H + c \cdot \alpha \cdot \frac{x_{Kam}}{r_{obj}} + \Delta x \quad (3) \quad y_{Bild} = y_H + c \cdot \alpha \cdot \frac{y_{Kam}}{r_{obj}} + \Delta y$$

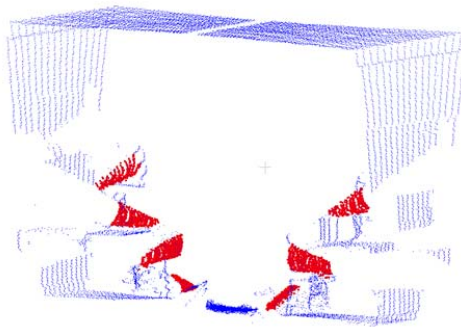
Dabei ist (x_H, y_H) die Hauptpunktlage, c die Kamerakonstante, α der Einfallswinkel des Bildstrahls und $r_{obj} = \sqrt{X_{Kam}^2 + Y_{Kam}^2}$ der Objektpunktradius im Kamerakoordinatensystem.



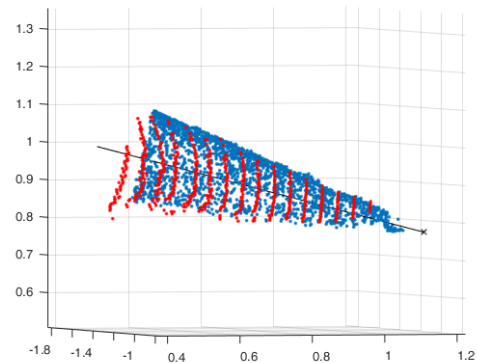
(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 2: Kalibrierung der relativen Orientierung zwischen Laserscanner und 360°-Kamera. Das Kegel-Kalibrierfeld wurde mit einer Spiegelreflexkamera als Referenz eingemessen (a). In den Bildern der 360°-Kamera (b) werden die Marken gemessen und die äußere Orientierung mit RRS bestimmt. In der Punktwolke des Laserscanners (c) werden Kegel eingepasst und mit den Kegeln der Referenzpunktwolke zur Übereinstimmung gebracht (d)

Die Kalibrierung der Lage und Orientierung des Laserscanners im Referenzsystem wird über Kegel-Fits durchgeführt (Abb. 2d). Dafür werden in den Punktwolken der Referenzmessung und des Laserscanners Kegel eingepasst. In einer Ausgleichung wird die Transformation M_{ref}^{Puck} vom Referenzsystem in das Laserscannersystem bestimmt, indem die Parameter entsprechender Kegel

gleichsetzt werden. Die Kegel werden dabei durch die Lage der Kegelspitze, die Orientierung der Kegelachse und den Öffnungswinkel des Kegels parametrisiert.

Für die Kalibrierung des Boresight-Alignments (drei Rotationen) und Lever-Arms (drei Translationen) zwischen dem Laserscanner und der IMU wird das Boot um 180° gedreht und das Kegel-Kalibrierfeld erneut mit dem Laserscanner aufgenommen. Aus der relativen Bewegung zwischen beiden Positionen, die mit der IMU gemessen wurden und der Position und Orientierung des Laserscanners in beiden Epochen lässt sich die Transformation M_{Puck}^{IMU} vom Laserscannersystem in das System der IMU bestimmen. Da das Echolot und die IMU am gleichen senkrechten Alu-Profil angebracht sind, besteht nur ein Offset auf der Z-Achse. Für erste Untersuchungen wurde dieser Offset mit einem Zollstock gemessen. Im weiteren Verlauf des Projekts soll ein kombiniertes Kalibrierverfahren für über und unter Wasser entwickelt werden.

Nach der Kalibrierung können die Aufnahmen des Laserscanners, der 360° -Kamera und des Echolots in das System der IMU und somit in ein übergeordnetes Koordinatensystem (z.B. UTM) transformiert werden.

3 Messfahrten mit dem UWV

Das UWV wurde in ersten Messfahrten auf kleinen und mittleren Flüssen in Sachsen getestet. Im Folgenden werden Aufnahmen von Befahrungen eines ca. 1,5 km langen Abschnitts der Freiburger Mulde bei Leisning zwischen Dresden und Chemnitz vorgestellt.

3.1 Auswertung der Laserscanner-Daten

Die Auswertung der Laserscannerdaten erfolgt im Post-Processing. Die einzelnen Streifen werden zu einer gesamten Punktwolke vereinigt. Dazu werden die mit dem Laserscanner gemessenen 3D-Punkte (X_{Puck}) zuerst entsprechend des Boresight-Alignments und Lever-Arms in das Koordinatensystem der IMU transformiert:

$$(4) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{IMU} = M_{Puck}^{IMU} \cdot X_{Puck}$$

Da zu jedem 3D-Punkt ein Zeitstempel in der IMU-Zeit vorliegt, kann jeweils die Position (T_{IMU}^{global}) und Orientierung (R_{IMU}^{global}) der IMU zugeordnet werden. Die geographischen Längen und Breiten werden für die weitere Prozessierung zunächst in UTM-Koordinaten umgerechnet. Anschließend werden die 3D-Laserscanner-Punkte in das globale Koordinatensystem transformiert:

$$(5) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{global} = \begin{bmatrix} R_{IMU}^{global} & T_{IMU}^{global} \\ [0 & 0 & 0] & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{IMU} = M_{IMU}^{global} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{IMU}$$

Abb. 3 zeigt die gesamte Punktwolke, die durch die Transformation der einzelnen Profile in das globale Koordinatensystem generiert wurde.

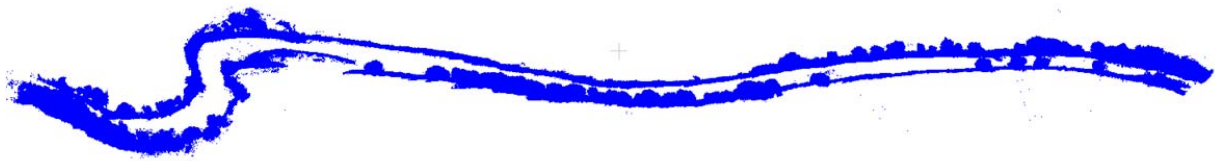


Abb. 3: 3D Punktwolke der Ufer. Die Punktwolke wurde mit dem mobilen Laserscanner generiert.

3.2 Auswertung der Echotmessungen

Die Echotmessungen werden ebenfalls im Post-Processing ausgewertet. Um möglichst viel Informationen über die Gewässerbettgeometrie mit dem Einzelpunkt-Echot zu gewinnen, muss eine Befahrungsstrategie gewählt werden, die sich für eine Interpolation auf das gesamte Gerinne eignet. Nach SANTILLAN et al. (2016) ist eine Befahrung in einzelnen, dicht beieinanderliegenden Querprofilen am besten geeignet. Da aber in einer Messfahrt gleichzeitig die Wassertiefe und die Ufergeometrie mit Laserscanner und Kamera erfasst werden soll, ist eine Befahrung senkrecht zum Ufer ungeeignet. Stattdessen wird eine Zick-Zack-Befahrung durchgeführt und die Interpolation zusätzlich mit 3D-Laserscannermessungen des Übergangs von Wasser zu Ufer unterstützt. Dies kommt der Befahrungsstrategie sehr nah, die von SANTILLAN et al. (2016) am zweitbesten bewertet wurde.

Bei der Interpolation mäandrierender Flüsse kann es im Kurvenbereich passieren, dass Messwerte zwar geographisch nah beieinanderliegen und daher für die Interpolation berücksichtigt werden, obwohl keine topologische Nachbarschaft entlang des Flusses besteht. Um diese Einflüsse zu vermeiden, werden die Tiefenmessungen abgewickelt und in ein flussorientiertes Koordinatensystem mit einer Koordinatenachse entlang der Flussachse überführt. Dieses Koordinatensystem wird als anisotropes Koordinatensystem bezeichnet. Die Interpolation wird mit anisotropem Ordinary Kriging durchgeführt (MERWADE et al. 2006). In Abb. 4 ist das Interpolationsergebnis an dem Abschnitt der Freiburger Mulde zu sehen. Auf der westlichen Seite schließt sich ein Wehr an, so dass die Wassertiefe in diesem Bereich am tiefsten ist. Eine weitere tiefe Stelle ist am schmalsten Stück des Abschnitts zu beobachten.

3.3 Fusion der Punktwolken mit UAV-Daten

Abschließend wird die Laserscanner-Punktwolke der Ufer mit dem interpolierten Flussprofil und einer mit SfM aus UAV-Aufnahmen generierten Punktwolke der angrenzenden Bereiche fusioniert. In Abb. 4 sind die Daten der drei Quellen in UTM-Koordinaten dargestellt. Im weiteren Verlauf des Projekts soll daraus ein gerastertes DGM entstehen.

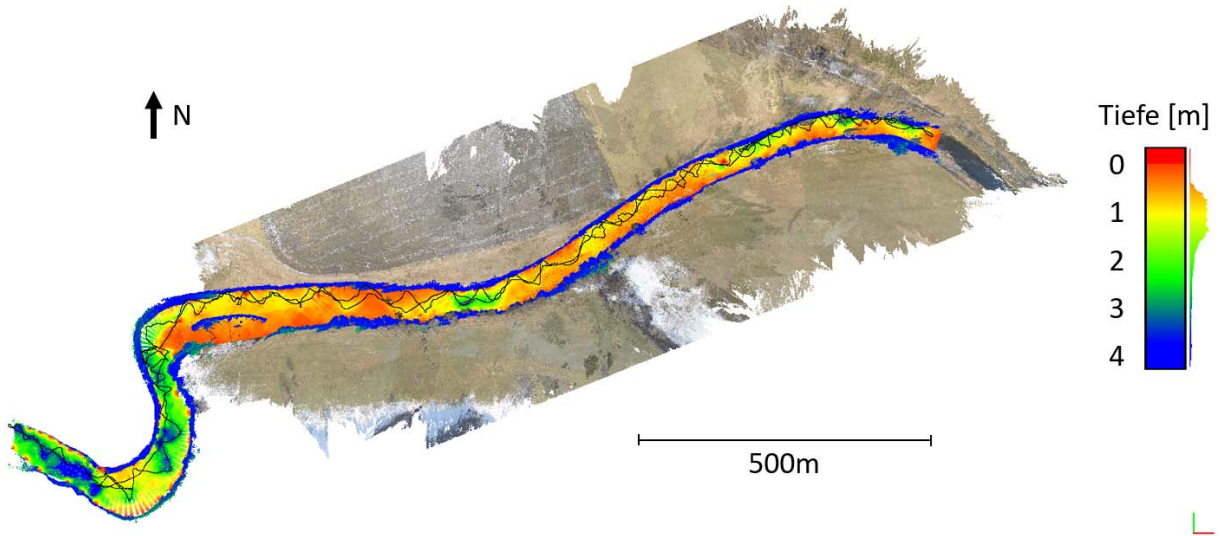


Abb. 4: Ergebnisse einer Testfahrt mit dem UWV und einer UAV-Befliegung. Die Laserscanner Punktwolke deckt ausschließlich die Ufer ab und ist blau eingefärbt. Die Echolotmessungen wurden mit anisotropem Ordinary Kriging interpoliert und sind entsprechend ihrer Tiefe eingefärbt. Die Schwarze Linie zeigt den Track der Befahrung in einem Zick-Zack-Muster auf Hin- und Rückweg. Das Teileinzugsgebiet, das die Ufer umgibt wurde mit einer UAV befliegen eine SfM-Punktwolke erzeugt.

4 Fazit & Ausblick

In diesem Beitrag wurde das Konzept, die Kalibrierung und erste Messungen mit einem UWV als Multisensorplattform vorgestellt. Das UWV ist mit einem Laserscanner und einer 360°-Kamera für die Vermessung der Ufer ausgestattet. Die Sensoren werden zeitlich synchronisiert und relativ zueinander und relativ zur IMU kalibriert. Das Flussprofil wird mit einem Echolot gemessen. Durch geeignete Befahrungsstrategien lässt sich aus den gemessenen Tiefen ein komplettes Gerinneprofil interpolieren. Die Punktwolken Über- und Unterwasser wurden im gleichen Koordinatensystem aufgenommen und lassen sich fusionieren. Es ist ebenfalls möglich, diese mit einer UAV-Punktwolke zu kombinieren.

Die Daten müssen in den folgenden Arbeitsschritten noch für eine hydrologische Modellierung nutzbar gemacht werden. Dafür muss unter anderem die Vegetation aus den Daten gefiltert werden. Es wird analysiert, in wie weit sich die Multi-Pulse Eigenschaft des Laserscanners dafür eignet. Die Zuverlässigkeit der Interpolation von Echolotmessungen ist stark abhängig von der Datenmenge. Zukünftig sollte daher eine dichtere Punktmenge erzeugt werden. Dies gelingt zum Beispiel durch Befahrung in Querprofilen. Alternativ wird ein Triangulations-Sensor aus Linienlaser und Unterwasserkamera entwickelt, der breitere Profile misst.

5 Danksagung

Diese Untersuchungen wurden im Forschungsprojekt "Extremereignisse in kleinen und mittleren Einzugsgebieten (EXTRUSO)" durchgeführt, welches durch das EU ESF Programm „Nach-

wuchsforschergruppen“ unter der Fördernummer 100270097 unterstützt wird. Die UAV-Punktwolke wurde von der Professur für Geoinformatik der TU Dresden bereitgestellt und ist im Rahmen des Forschungsprojekts „Bootgestütztes Messsystem für longitudinale Gewässerprofile (BOOT-Monitoring)“ entstanden, welches Teil der BMBF-Fördermaßnahme „Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland (ReWaM)“ ist.

6 Literaturverzeichnis

- BRONSTERT, A., AGARWAL, A., BOESSENKOOL, B., FISCHER, M., HEISTERMANN, M., KÖHNREICH, L., MORAN, T. & WENDI, D., 2017: Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, **61**, 150-162.
- ELTNER, A., SARDEMANN, H., KRÖHNERT, M. & MAAS, H.-G., 2018: Entwicklung eines Low-Cost Kamerapegels zur Erfassung hydrologischer Extremereignisse. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band 27, 38. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF und PFGK, 07.-09. März 2018 in München.
- MADER, D., WESTFELD, P. & MAAS, H.-G., 2014: An Integrated Flexible Self-Calibration Approach for 2D Laser Scanning Range Finders Applied to the Hokuyo UTM-30LX-EW. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **40**(5), 385-393.
- MERWADE, V.M., MAIDMENT, D.R. & GOFF, J.A., 2006: Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. *Journal of Hydrology*, **331**(3-4), 731-741.
- MUELLER, E. N. & PFISTER, A., 2011: Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. *Journal of Hydrology*, **411**(3), 266-278.
- SANTILLAN, J.R., SERVIANO, J.L., MAKINANO-SANTILLAN, M. & MARQUESO, J.T., 2016: Influence of River Bed Elevation Survey Configurations and Interpolation Methods on the Accuracy of Lidar DTM-based River Flow Simulations. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42**(4/W1), 225-235.