

Gesa Kutschera, Jörg Blankenbach, Christoph Blut, Friedrich-Wilhelm Bolle, Christoph Effkemann, Shakti Gahlaut, Nicole Hein, Marie-Luise Jagow, Holger Schüttrumpf, Raimund Schwermann, Sina Tabatabaei und Theide Wöffler

Monitoring kleiner und mittlerer Fließgewässer mittels bemannter und unbemannter Wasserfahrzeuge – Ergebnisse des Projektes RiverView®

Monitoring of small and medium-sized water bodies using manned and unmanned surface vehicles – results of the RiverView®-project

Wasserwirtschaftliche Planungsprozesse erfordern im Zuge der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) die Kenntnis über Zustand und Veränderungen der Fließgewässer. Das Gewässermonitoring gewinnt damit als Bestandteil des Wasserressourcen-Managements auch vor dem Hintergrund des Hochwasserrisikomanagements zunehmend an Bedeutung.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Verbundvorhaben RiverView® hat zum Ziel, erstmals einen holistischen Ansatz zur Erfassung von georeferenzierten Gewässerdaten über und unter Wasser umzusetzen, welcher die zielgerichtete systematische Erhebung dieser ermöglicht. Durch die Verknüpfung moderner Erfassungsmethoden werden Daten raum-zeitlich in umfassender Weise sowie mit hoher Auflösung erhoben und für die Aufgaben der Wasserwirtschaft bereitgestellt. Die großräumige und durchgehende Erfassung des Gewässers und Gewässerumfelds erlaubt eine objektive Darstellung der Ist-Situation im Sinne der EG-WRRL. Die Datenerhebung in verschiedenen Gewässerzonen und Wassertiefen und die ortsgleiche Revision mittels Autopiloten erlaubt zudem die Beobachtung der Gewässerentwicklung über die Zeit.

Hierbei bilden 360°-Panoramabilder die maßgebliche Datengrundlage für die Visualisierung von Gewässerszenen, anlassbezogene Vermessungen in den Uferumgebungen und die Ableitung von bildbasierten 3D-Punktwolken. Eine Multiparametersonde erfasst darüber hinaus Wasserqualitätsparameter wie Wassertemperatur, pH-Wert und Sauerstoffgehalt.

Mit dem im Forschungsprojekt entwickelten modularen System können Gewässerstruktur-, Gewässergüte- und Bilddaten ganzheitlich und präzise georeferenziert erhoben werden, so dass für die Praxis repräsentative und hochaufgelöste Daten für wasserwirtschaftliche Planungs- und Überwachungsprozesse (z. B. an industriellen und kommunalen Einleitungen und von renaturierten Bereichen) bereitstehen.

In den Testbefahrungen auf kleinen und mittleren Fließgewässern, die zur Evaluierung der Hard- und Softwarekomponenten sowie zur Bereitstellung von Daten im Webportal durchgeführt wurden, erfüllte die Mapping-Sensorik grundsätzlich die in der Planungsphase aufgestellten Erwartungen. Die erforderliche Positionierungsgenauigkeit zur Georeferenzierung der Bild- und Gewässerdaten beträgt 1 bis 3 dm (Lage) bzw. 1 dm (Höhe) und kann mit dem System grundsätzlich gewährleistet werden; dies gilt für Gewässerabschnitte mit ungestörtem GNSS-Empfang nahezu durchgängig und in den übrigen Bereichen durch den komplementären Einsatz von Methoden der Visuellen Odometrie größtenteils. Für die Zukunft wird eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Technik und ihrer Anwendungen angestrebt; so sind die Integration weiterer Sensorik und der Einsatz in Anwendungsbereichen außerhalb wasserwirtschaftlicher Fragestellungen geplant.

Schlagwörter: Gewässermonitoring, Sensorik, USV, Wasserrahmenrichtlinie, Hydromorphologie, Gewässergüte

In order to implement the EU Water Framework Directive (EU WFD) effectively, information on the state of and the changes within flowing waters is essential for planning processes in water management. Water monitoring is increasingly important as an integral part of water resources management, not least with respect to flood risk management.

As the first project of its kind, the BMBF-funded joint RiverView®-project aims to establish a holistic approach to the targeted and systematic compilation of spatially referenced water data, under as well as above the water. Modern data collection techniques allow for spatially as well as temporally continuous capturing of high-resolution data. The extensive and comprehensive monitoring of the water body and its environment provides an objective representation of the present situation, as recommended by the EU WFD. By means of the built-in autopilot, water data measurements in different sections and at varying depths of the watercourse can readily be repeated, facilitating the monitoring of the development of a stretch of water. As one example, 360°-panorama images are an efficient means of visualization on the one hand, and make measurements based on 3D-point clouds possible on the other hand. In addition, a multi-parameter probe transmits water quality data such as water temperature, pH-value and oxygen content.

With the modular system developed in the research project, the comprehensive data on structure, quality and morphology of water bodies collected with the system as well as the images captured can be georeferenced with high accuracy, providing a representative set of high-resolution data for water-related planning and monitoring (e.g. at industrial and municipal discharge points and in ecologically restored areas).

Expectations regarding the mapping sensor system outlined during the planning phase were met throughout the test runs on small and medium-sized rivers. The test runs were used to evaluate the hardware and software and provided the data for a web platform. Accurate spatial referencing of images and water quality data requires a positioning accuracy of 1 to 3 dm (position) and 1 dm (height), which is guaranteed with strong GNSS reception. In case of poor reception, in most cases the additional use of visual odometry ensures the required accuracy. Technological development is expected to advance in the future. Further applications, such as the integration of additional probes and use for other than water-related purposes, will soon be developed.

Keywords: water monitoring, sensor technology, USV, Water Framework Directive, hydromorphology, water quality

1. Einleitung

Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) sieht vor, dass spätestens bis zum Jahr 2027 alle Gewässer in einen guten ökologischen und chemischen Zustand überführt werden, wodurch das Monitoring von Fließgewässern zunehmend an Bedeutung gewinnt. Bei kleinen Fließgewässern steht europaweit die Ersterfassung noch vielfach aus, bei 40 % der europäischen Fließgewässer liegen keine ausreichenden Daten für eine Zustandsbewertung vor (EU-KOMMISSION, 2015). Für die Erhebung der Gewässerstrukturgüte findet, insbesondere für kleinere Gewässer, das Übersichtsverfahren der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) Anwendung (LAWA, 1999), bei dem die Erhebungsgrößen über Luftbilder und bestehende Datenbanken klassifiziert werden. Häufig fehlen dabei Informationen, die eine Bewertung der Erhebungsgrößen unter der Wasseroberfläche zulassen. Überstehende Vegetation und geringe Sichttiefen erschweren sowohl beim Übersichtsverfahren als auch bei der Kartierung vor Ort eine objektive Einschätzung (HUNGER et al., 2016). Zusätzlich werden bei kleineren Gewässern im Allgemeinen Proben genommen und ergänzend Gewässerbegehungen durchgeführt.

Im Rahmen des Monitorings, aber auch zur Ermittlung wasserwirtschaftlicher Grundlagendaten (Beobachtung des Wasserhaushalts und die Untersuchung der Beschaffenheit von Fließgewässern, Seen und des Grundwassers), zur Regelung der Abwasserentsorgung, für Planungsprozesse sowie die Gewässerunterhaltung und das Hochwasserrisikomanagement sind räumlich und zeitlich hochaufgelöste Daten (z. B. Gewässergüte, -struktur, -vegetation, -topographie) daher von großem Interesse. Das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme „Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland (ReWaM)“ im Förderschwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement (NaWaM) im Rahmenprogramm FONA³“ geförderte Projekt RiverView[®] setzt an diesen Wissens- und Erkenntnisdefiziten an, um anhand von unterschiedlichen Mess- und Untersuchungsansätzen mit mobilen, modularen bootsgestützten Mess- und Erfassungssystemen Informationen zu den Gewässern über und unter der Wasseroberfläche bereitzustellen. Mit dem Verbundprojekt kommt damit erstmals ein holistischer Ansatz für ein gewässerzustandsbezogenes Monitoring und Management zum Einsatz, welcher die zielgerichtete systematische Erhebung synoptischer Gewässerdaten ermöglicht. Das Projektziel ist eine durchgehende, gesamtheitliche, zeitlich und räumlich referenzierte Erfassung des Gewässers und Gewässerumfelds, um darauf aufbauend positive Entwicklungen am Gewässer zu erreichen. Das entwickelte Messsystem erlaubt eine zeitlich und räumlich deutlich höher aufgelöste Datendichte als in der EG-WRRL gefordert und verbessert durch die bildgebenden Verfahren die nachvollziehbare Gewinnung von Erkenntnissen oberhalb und unterhalb des Wasserspiegels.

2. Stand der Wissenschaft und Technik

Bisherige Arbeiten zur Entwicklung von mobilen Systemen für die Aufnahme von Gewässerdaten und -strukturen kleiner und mittlerer Fließgewässer unterscheiden sich u. a. in der Messtechnik. Im Hinblick auf die Beschreibung der Überwassersituation basieren die Messtechniken im Wesentlichen auf bis zu drei verschiedenen Erfassungssensoren. So nutzt beispielsweise Air-

borne Hydromapping (AIRBORNE HYDROMAPPING GMBH, 2018) ein Laserscanning-System (LiDAR, Light Detection and Ranging) zur Datenerfassung. Beim RiverSurveyor^{®1} werden hingegen akustische Verfahren verwendet und bei SAMBA (Smartphone-based aquatic monitoring robotic platform) erfolgt die Datenerfassung kamerabasiert (WANG et al., 2015). Die Verfahren RIVERWATCH und RiverView[®] erfassen Daten mit Hilfe von allen drei Messtechniken (PINTO et al., 2014). Verschiedene Messtechniken zur Erfassung von Daten über die Gewässersohle hinaus untersuchte bspw. die HafenCity Universität Hamburg (KERSTEN et al., 2013) mit dem Messboot „Level-A“ in Rhein und Elbe.

Im Projekt RiverView[®] stellt die Überwasser-Mapping-Einheit eine wichtige Komponente dar (Kap. 3). Über Mapping-Einheiten auf dem Wasser wird in VAN RENS et al. (2007) und ALHO et al. (2009) berichtet, wobei die Anwendungen auf ufernahe Küstenbereiche und große Flüsse abzielen. BÖDER et al. (2010) schildern die Bestückung von Schiffen mit Multisensorik für die Erfassung von Uferbereichen an Fließgewässern, was im Hinblick auf das Ergebnis mit RiverView[®] wohl die größten Gemeinsamkeiten besitzt. Im Unterschied zu RiverView[®] kommen dort allerdings terrestrische Laserscanner zum Einsatz.

Zur Ermittlung der Gewässertopographie wird u. a. das Laser-Line-Scanning untersucht und eingesetzt, welches in MOORE et al. (2000) und MOORE & JAFFE (2002) beschrieben wird. YANG et al. (2013) konnten in einem Pool-Versuch zeigen, dass sich das System für Unterwasseruntersuchungen eignet und eine 3D-Unterwasser-Rekonstruktion mit Millimeter-Genauigkeit erzielt werden kann. In RiverView[®] soll dieses Messprinzip prototypisch für vorzugsweise flache Fließgewässer adaptiert und in zukünftigen Untersuchungen erprobt werden (siehe Kap. 7). Die mit diesem Verfahren flächenhaft abgeleitete Gewässertiefe erlaubt die Generierung eines hochaufgelösten digitalen Geländemodells des Wasserlaufs (DGM-W), welche insbesondere in kleinen und mittleren Fließgewässern derzeit nur durch Interpolation terrestrisch vermessener Querprofile und Uferlinien-Geometrien abgeleitet werden (HENSEN, 2017). Die Güte des DGM-W hängt hierbei stark von dem Abstand der vermessenen Querprofile (häufig bis zu 100 m) und der Hydromorphologie (Querschnittsveränderungen, Mäandrierung, Gewässerbauwerke) ab.

In dem Verbundprojekt BOOT-Monitoring wird die Morphologie mittels eines Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmessers (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP), Echolot und Laser ermittelt. Das System besteht aus einem schwenkbaren Echolot. Aufgrund der physikalischen Gegebenheiten und des gesamten Verfahrensansatzes ist die Technik für mittlere bis größere Gewässer geeignet (HELM et al., 2016).

Außerdem werden Parameter zur Bestimmung der Wasserqualität mit Hilfe von Multiparametersonden gemessen, die von verschiedenen Herstellern geführt werden. Die von einem Projektpartner entwickelte Multiparametersonde² (MPS) wurde im Zuge des Projektes für die Anforderungen an ein zeitlich und räumlich hochaufgelöstes Monitoring durch die Reduktion des Messintervalls auf 20 Sekunden sowie die Realisierung einer drahtlosen Datenübermittlung angepasst. Die Mobilität des autonomen Bootes kann dadurch effizienter genutzt werden.

1 www.quantum-hydrometrie.de/riversurveyor_g.pdf

2 www.seba-hydrometrie.com

3. Spatio-temporale Datenerfassung – USV, Nelli 2, Mapping-Plattform und Sensorik

Als Trägerplattform kann sowohl das RiverBoat, ein autonom operierender Messkatamaran (Unmanned Surface Vehicle, USV), als auch ein bemanntes Boot (Nelli 2) eingesetzt werden. Das RiverBoat hat eine Länge von etwa 1,6 m, eine Breite von etwa 1,2 m, ein Gewicht von 35 kg und wurde entsprechend der Anforderungen des Forschungsprojektes weiterentwickelt (Abb. 1, links). Durch den geringen Tiefgang (8 cm am Trägerkörper, 15 cm am Echolot) wird beim nahezu vollständigen Eintauchen der Schwimmkörper eine hohe Stabilität der Plattform im Wasser erreicht. Die beiden Schwimmkörper sind jeweils mit einem 450 W-Elektromotor ausgestattet, der über zwei Batteriepacks gespeist wird und bei normalem Messbetrieb mit einer Geschwindigkeit von 1,0 m/s mindestens sechs Stunden betrieben werden kann.

Das RiverBoat ist mit einem Seitensichtsonar und einem Single-Beam Echolot für die akustische Aufnahme der Gewässersohle bei einer Mindestwassertiefe von 35 cm ausgestattet. Für die bildhafte Erfassung des Gewässers oberhalb der Wasseroberfläche dient eine Überwasser-Mapping-Plattform. Das Herzstück dieser Plattform stellt die 360°-Panoramakamera dar (KUTSCHERA et al., 2017; ENGELS et al., 2016), die bis zu zehn Aufnahmen pro Sekunde liefert. Die sechs Einzelkameras werden zeitsynchron ausgelöst und erfassen etwa 90 % der Ufer- und Gewässerumgebung.

Die zeitliche und räumliche Referenzierung aller Daten (Bild- sowie Gewässerdaten) erfolgt ebenfalls durch die Überwasser-Mapping-Plattform, die neben der 360°-Panoramakamera mit einem Zwei-Antennen-GNSS (Global Navigation Satellite System) und einer MEMS (Micro Electromechanical System)-basierten Inertialmesseinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) (vgl. auch Kap. 4.3 und 5.1) ausgestattet ist. Beim verwendeten GNSS han-

delt es sich um ein geodätisches DGNSS (Differential GNSS), welches die Verarbeitung von Korrekturdaten eigener Referenzstationen oder – wie im vorliegenden Fall – eines Korrekturdienstes und basierend darauf die präzise Messung im Real Time Kinematik (RTK)-Modus (vgl. z. B. BAUER, 2018) ermöglicht. Zwischen den beiden Schwimmkörpern des RiverBoats wird eine Multiparametersonde (MPS) mitgeführt, um Wasserqualitätsparameter wie Temperatur, Sauerstoffgehalt, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxpotenzial und Trübung kontinuierlich während der Messfahrt zu erfassen. Über einen Trailer, der an dem RiverBoat zusätzlich befestigt werden kann, wird das Mitführen einer INN (Impuls-Neutron-Neutron)-Sonde vorbereitet, mit welcher die Zusammensetzung des Gewässeruntergrundes bis in mehrere Meter Tiefe kontinuierlich erfasst werden kann. Weiterhin ermöglicht eine Winde am Trailer, Tiefenprofile der Gewässergüteparameter, z. B. in Staubereichen von Wehren, aufzuzeichnen, indem die Multiparametersonde in verschiedene Tiefen herabgelassen wird. Eine in der MPS integrierte Drucksonde liefert dabei Auskunft über die jeweilige Tiefe der Sonde. Alle Sensordaten (Kamera, GNSS, IMU, MPS etc.) werden auf dem im Boot integrierten Messrechner gespeichert.

Derzeit wird das RiverBoat um eine Unterwasser-Mapping-Einheit erweitert, um die Gewässersohle in flachen Gewässerbereichen ergänzend zu den Echolot-Daten erfassen zu können (vgl. Kap. 7).

Die auf der Trägerplattform eingesetzte Technik ist modular, wodurch eine Skalierbarkeit des Gesamtsystems möglich ist. Während das RiverBoat vor allem für die Untersuchung von kleinen Gewässern zum Einsatz kommt, kann zur Untersuchung größerer Gewässer das bemannte Boot Nelli 2 verwendet werden. Auf diesem sind – wie beim RiverBoat – sowohl die Überwasser-Mapping-Einheit als auch die hydrophysikalischen und -chemischen Messsensoren installierbar (Abb. 1, rechts).



Abbildung 1

RiverBoat mit 360°-Panoramakamera und Zwei-Antennen- GNSS (links) und Messboot Nelli 2 (rechts).
 RiverBoat with 360° panorama camera and dual-antenna-GNSS (left) and monitoring boat Nelli 2 (right)
 (Foto: FiW e. V. (links); IWW (rechts))

Das Messboot Nelli 2 ist ein Katamaran (2-Kielgleiter) mit leichtem V-Boden aus einer seewasserbeständigen Aluminiumlegierung. Es ist 4,0 m lang, 1,7 m breit und hat einen maximalen Tiefgang von 0,2 m bei einem Eigengewicht von 190 kg. Zudem besitzt das Boot durch die beiden Seitenkiele eine hohe Seitenstabilität und Kentersicherheit. Eine Zuladung von bis zu 600 kg ist möglich. In der Mitte des Schiffs befindet sich ein durchgehender Schacht zum Einbau eines ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), welcher luftdicht durch den Doppelboden angeschweißt ist und unter Wasser über einen Abweiser gegen Verwirbelungen verfügt. Seitlich des Bootes können zusätzlich ein Sidescan Sonar und eine Multiparametersonde montiert werden. Für die Georeferenzierung und Erfassung der Bilddaten kann die Überwasser-Mapping-Einheit adaptiert werden.

Mittels der oben beschriebenen Hardware werden zahlreiche Messfahrten sowohl mit dem USV als auch der Nelli 2 als wesentlicher Bestandteil des Projektes durchgeführt, um einerseits die entwickelten Hard- und Softwarekomponenten kontinuierlich zu testen und weiter zu entwickeln sowie andererseits eine große Anzahl synoptischer Daten in verschiedenen Gewässern bei unterschiedlichen Randbedingungen (Wetter, Wasserstand, Bewuchs etc.) zu erheben, analysieren und zu Informationen für wasserwirtschaftliche Anwendungen aufzubereiten.

Hierbei eignet sich das RiverBoat für den Einsatz in kleinen bis mittelgroßen Gewässern. Um die Manövrierfähigkeit des Bootes zu sichern, sollte die Gewässerbreite mindestens zwei Meter und die Wassertiefe 35 cm betragen. Befahrungen bei geringeren Wassertiefen sind grundsätzlich bis zu einer Mindestwassertiefe von 20 cm möglich, sofern diese nicht durch Steine, Totholz o. ä. unterbrochen wird. Eine Einstiegrampe für den Einlass der Trägerplattform ist nicht notwendig, jedoch sollte das Gewässer begehbar sein. Bei einer geringen Tiefe bis etwa einen Meter wird das Boot zu Fuß begleitet, andernfalls stehen bemannte Boote in unterschiedlichen Größen für tiefere und nicht begehbare Gewässer zur Verfügung. Das gesamte System wird grundsätzlich von zwei Personen betrieben.

Das bemannte Messboot Nelli 2 ist im Gegensatz zum RiverBoat für den Einsatz in größeren Gewässern geeignet. Für die Datenerfassung auf dem Messboot ist eine Besatzung von mindestens zwei Personen notwendig. Die durchschnittliche Geschwindigkeit über Grund während eines Messeinsatzes beträgt 6 km/h. Die Energieversorgung der Messgeräte erfolgt über die Lichtmaschine des Bootes. Sämtliche Sensordaten werden im zentralen Messrechner des Bootes erfasst und gespeichert.

Mit dem Ziel eine ausreichende Datendichte zu erreichen und die Messdauer zu minimieren wurden unterschiedliche Messstrategien getestet und aus den Erkenntnissen individuelle Vorgehensweisen für verschiedene Gewässertypen entwickelt. Beim Einsatz des Bootes müssen Randbedingungen wie etwa Fließgeschwindigkeit und Bewuchs im Gewässer beachtet werden.

4. Technische Konditionierung des Monitoring-Systems

4.1 Software und Konfiguration des Gesamtsystems

Die Erfassung von zeitlich und räumlich hochaufgelösten Gewässerdaten erfordert neben der strengen Kalibrierung der Überwasser- und Unterwasser-Mapping-Einheiten auch die Ent-

wicklung spezieller Softwarekomponenten. Zu Letzterem zählen neben den Datenübertragungskomponenten auch die Implementierung eines Datenmanagementsystems auf der Basis einer (Geo-)Datenbank sowie die Entwicklung der IT-Umgebung für die Nutzbarmachung und Dissemination der Daten an fachspezifische Nutzergruppen. Nachfolgend wird auf die wichtigsten technischen Eigenschaften des Monitoring-Systems eingegangen.

4.2 Datenübertragung

Über die Software Neptus, welche zur Steuerung von unbemannten Messbooten vom LSTS³ (Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática) in Portugal entwickelt wurde und auf der Grundlage einer Open-Source-Lizenz der Europäischen Union (EUPL) im Zuge des Projektes angepasst wurde, kann die Route des Bootes überwacht bzw. geplant werden. Durch die ständige Kommunikationsverbindung zwischen RiverBoat und Messrechner können Echolot-, Seitensichtsonar- und MPS-Daten in Echtzeit verfolgt, die ordnungsgemäße Funktion der Überwasserkamera sowie die Qualität der empfangenen GNSS-Daten geprüft werden. Zudem dient der Messrechner der Überwachung von autonomen Messfahrten auf Basis der GNSS-Position.

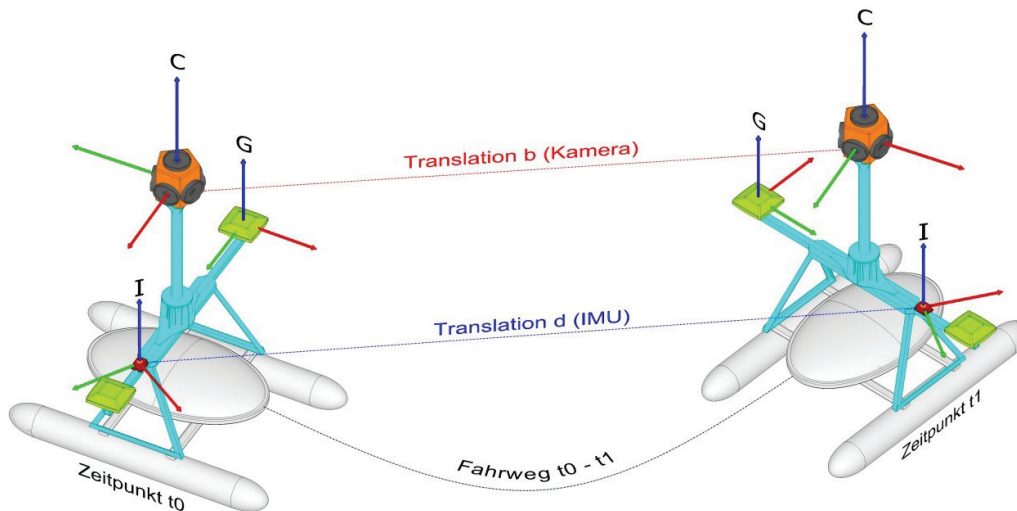
Für die Panoramakamera, den GNSS-Receiver und die IMU existiert jeweils ein Software-Development-Kit (SDK), mit dem die Sensoren konfiguriert, gesteuert und ausgelesen werden können. Basierend auf der von den Sensorherstellern gelieferten Programmierschnittstelle (Application Programming Interface, API) wurden Softwaremodule entwickelt, mit welchen alle Sensoren ausgelesen und die Daten mit einem einheitlichen Zeitstempel Universal Time Coordinated (UTC) des GNSS-Signals versehen auf einem Messrechner des Trägerboots gespeichert werden können. Die Synchronisation der Sensoruhren (z. B. IMU) erfolgt dabei soweit wie möglich über das PPS (Pulse per Second)-Signal des GNSS-Receivers. Bei Sensoren, die (noch) keinen PPS-Eingang besitzen, erfolgt die Synchronisation softwaregestützt durch Anbringen eines Uhrenoffsets, der zu Beginn jeder Messkampagne als Differenz zur GNSS-Zeit ermittelt wird. Der Datenaustausch zwischen den genannten Hardwareeinheiten und dem Messrechner basiert auf einem lokalen TCP/IP-Netzwerk mit einer Client-Server-Architektur. Bezüglich der Kamera wurden Softwarekomponenten entwickelt, welche die individuelle Einstellung der Kameraparameter, die Steuerung der Bilddatenaufzeichnung sowie die Übertragung der Bilddaten realisieren.

4.3 Kalibrierung der Überwasser-Mapping-Einheit

Für den operationellen Betrieb der beiden Mapping-Einheiten müssen die gegenseitige Lage und Ausrichtung der Sensoren zueinander bestimmt sein, damit die aufgezeichneten Daten korrekt und in einem einheitlichen System referenziert werden können. Die wesentlichen Grundprinzipien dieses als Kalibrierung bezeichneten Vorgangs werden beispielsweise in EL-SHEIMY (2005) beschrieben. Die Komponenten befinden sich grundsätzlich in starrer Anordnung zueinander. Sie sind aber demontierbar, daher sollte zumindest nach jeder Neumontage eine Kalibrierung erfolgen.

Die Überwasser-Mapping-Einheit von RiverView® besteht wie oben erwähnt aus einem Mehrkamerasystem, einem RTK-fähigen Zwei-Antennen-GNSS und einer MEMS IMU. In Abbildung 2

³ /lsts.fe.up.pt/toolchain/neptus

**Abbildung 2**

Definition der Sensorkoordinatensysteme und Kalibrierung der Überwasser-Mapping-Einheit.
Definition of sensor coordinate systems and calibration of the above-water-unit.

ist die Anordnung der Komponenten schematisch anhand der beteiligten Sensorkoordinatensysteme dargestellt. Für die Bestimmung der Beziehung zwischen Kamerasystem C und dem lokalen Antennen-Koordinatensystem G, dessen Ursprung in einem Antennenpunkt des Zwei-Antennen-GNSS liegt, genügt die Lokalisierung der beiden GNSS-Antennenpunkte im Kamerasystem C. Da die Antennen in den Aufnahmen der Kamera direkt sichtbar sind, können die Richtungen zu den Antennenzentren (Ursprung von G) durch manuelle Messung der in C orientierten Bildstrahlen bestimmt werden. Die noch fehlenden Distanzen werden durch geodätische Streckenmessung (Tachymeter) bestimmt.

Der für Kamera und IMU gewählte Ansatz definiert das Kamerasystem C als zentrales Fahrzeugsystem (Body System). Das IMU-Koordinatensystem I wird relativ hierzu translatorisch und rotatorisch bestimmt (Hebelarm (leverarm) $\mathbf{t}^c$ und Missweisung (misalignment) $\mathbf{R}_I^c$). Die Gleichungen, welche die kinematische Situation während der Bewegung von Kamera und IMU beschreiben, dienen als funktionaler Zusammenhang und ermöglichen die Bestimmung der gesuchten Größen im Rahmen einer klassischen Parameterschätzung im Gauß-Markoff-Modell. Für die Bestimmung von $\mathbf{t}^c$ und $\mathbf{R}_I^c$ können folgende Beziehungen hergeleitet werden (EFFKEMANN et al., 2017):

$$\mathbf{b}^c = \mathbf{R}_I^c \cdot \mathbf{d}^I + (\mathbf{E} - \mathbf{R}_I^c \cdot \mathbf{D}_{01} \cdot (\mathbf{R}_I^c)^T) \cdot \mathbf{t}^c$$

$$\mathbf{M}_{01} = \mathbf{R}_I^c \cdot \mathbf{D}_{01} \cdot (\mathbf{R}_I^c)^T$$

Hierbei werden ausschließlich die Relativbewegungen der Sensoren – also Verschiebung $\mathbf{b}^c$ und Drehung $\mathbf{M}_{01}$ der Kamera sowie die entsprechenden Größen $\mathbf{d}^I$ und $\mathbf{D}_{01}$ der IMU (die sich aus der Integration der Inertialmessdaten ergeben) – in einem (kurzen) Zeitabschnitt t_0 bis t_1 verwendet.

Der Kalibrierungsansatz wurde im Rahmen von Testfahrten auf Lippe, Rursee (Eifel) und Werbellinsee (Berlin) geprüft, wobei jeweils 300 bis 400 Beobachtungsdatensätze (Relativbewegungen) in die Ausgleichung einfließen. Die Ergebnisse der Kalibrierungsberechnung ergaben Unsicherheiten (Standardabweichung 1σ) für die Eulerschen Rotationswinkel ω , ϕ und κ von etwa $0,4^\circ$,

was für den Projekteinsatz ausreichend ist. Im Unterschied zu den Drehwinkeln konnte der Translationsvektor $\mathbf{t}$ nicht zufriedenstellend bestimmt werden. Weitere Untersuchungen zeigten, dass die Ursache im starken Driftverhalten der low-cost IMU begründet ist. Das Problem der Überbrückung von GNSS-Signalausfällen, für das die low-cost IMU nur bei kurzzeitigem Ausfall (2 - 3 sec.) geeignet ist, wurde schließlich im Rahmen des Postprocessings der Bilddaten gelöst, wobei Prinzipien der Visuellen Odometrie (VO) zur Anwendung kommen (Kap. 5.1).

4.4 Datenmanagement und Datenbereitstellung

Der Aufbau eines spatio-temporalen Geodatenbanksystems (Geo-DBS) bildet die Basis für die Verwaltung, Speicherung und effiziente Nutzung aller Daten, die während einer Messfahrt durch die auf den Messbooten befindliche Sensorik erfasst werden. Neben den biologischen bzw. physikalisch-chemischen Gewässerdaten werden auch die Aufnahmen des Panoramakamerasystems und die Daten des ADCP in der Datenbank persistiert.

Die Grundlage bildet ein projektspezifisches Datenmodell, bei dem die Primärreferenzierung aller Daten konsequent über Raum und Zeit erfolgt. Dazu werden die aufgezeichneten Trajektorienpunkte als übergeordnete Entität mit der räumlichen Position und Orientierung (Pose) des Bootes sowie der UTC-Zeit gespeichert. Alle weiteren Sensordaten (z. B. Echolot oder 360°-Panoramakamera) werden als separate Entitäten abgelegt und mit den jeweiligen Trajektorienpunkten in Beziehung gesetzt. Auf diese Weise kann jedem Sensormesswert eine absolute Position und Zeit sowie Trajektorie zugeordnet werden.

Für die Implementierung des Datenmodells stellte die effektive Speicherung der Bilddaten eine besondere Herausforderung dar (HEIN & BLANKENBACH, 2017). Aus diesem Grund wurde ein bimodales Datenbankmodell entwickelt, das neben dem objektrelationalen Open-Source-Datenbanksystem PostgreSQL⁴ und dessen Erweiterung PostGIS⁵ die Rasterdatenbank Rasdaman⁶ umfasst. PostgreSQL dient dabei der Verwaltung der skalaren Sensordaten sowie aller Metadaten; die Bilddaten werden dagegen als großvolumige Rasterdatenbestände im Rasdaman-DBS persistiert.

Für das Datenhandling (Import, Export, Aktualisierung, Löschen) und die Nutzerverwaltung mit Rechtemanagement und Zugriffsmechanismen wurden entsprechende Softwareapplikationen implementiert.

4 www.postgresql.org/

5 www.postgis.net/

6 www.rasdaman.org/

In Analogie zu Google's Street View⁷ wurde prototypisch für den Schnellzugriff und die Datenplausibilisierung im Geo-DBS ein RiverView®-Panoramaviewer mittels JavaScript (Three.js) entwickelt, der mit Hilfe standardisierter Schnittstellen auf das spatio-temporale Geo-DBS zugreift. Mit dem Viewer können die erfassten Gewässerdaten wie z. B. Wassertemperatur, pH-Wert, CO₂-Gehalt abgerufen und visuell sowie textlich dargestellt werden.

5. Postprocessing der erfassten Daten

5.1 Positionierungsdaten

Die Position und Orientierung des Bootes wird während einer Befahrung kontinuierlich mit dem Zwei-Antennen-GNSS (Aufzeichnungsrate: 5 Hz) und der IMU (Aufzeichnungsrate: 400 Hz) erfasst und zusammen mit der UTC-Zeit sowie Qualitätsparametern (z. B. Anzahl Satelliten, Qualität der Positionslösung) aufgezeichnet. Die Qualität der aufgezeichneten GNSS-Daten hängt jedoch stark von den örtlichen Umgebungsbedingungen ab. Bei geringer Abschattung durch Vegetation und gleichzeitig sicheren Empfangsbedingungen für die RTK-Korrekturdatensignale können die Posen der Überwasser-Mapping-Einheit in Echtzeit mit Genauigkeiten von ca. 2 cm bzw. 4 cm in Lage bzw. Höhe (Angaben AXIO-NET PED⁸) sowie besser als 1° (Angabe Datenblatt GNSS-Receiver⁹) in der räumlichen Orientierung bestimmt werden. Sofern die Mobilfunkverbindung nicht zur Verfügung steht, werden zwei Verfahren für die Verbesserung der Rohdaten im Postprocessing angewendet. Zum einen erfolgt eine klassische Nachbehandlung der Positionierungsdaten durch die Hinzunahme eines GNSS-Korrekturdatendienstes in der Offline-Anwendung (AXIO-Net ViPP¹⁰), also eine ausschließlich satellitenbasierte Nachbearbeitung. Da die Mapping-Einheit eine Kamera mitführt, kann zum anderen das Prinzip der Visuellen Odometrie angewendet werden. Unter VO versteht man die Bestimmung der Eigenbewegung eines Trägerfahrzeuges anhand von einer oder mehreren Kameras (NISTER et al., 2004; MILELLA & SIEGWART, 2006; FORSTER, 2016). Durch die hohe Bilddichte ist die Anwendung von automatischen Bildzuordnungsverfahren (Structure from Motion, Dense Image Matching) für die Generierung von bildbasierten 3D-Punktwolken gegeben. Hierbei werden neben den Punktwolken implizit auch die Orientierungsdaten der Aufnahmen und damit Angaben zu Positionen und Trajektorien berechnet (SZELISKI, 2011), also letztlich die Posen des Fahrzeugsystems C bzw. G (vgl. Kap. 4.3). Diese Posen ermöglichen wiederum die Überbrückung von GNSS-Signalunterbrechungen, vor allem wenn die Beschleunigungsdaten zu stark unter den Drifteffekten der MEMS-IMU leiden.

Für die Beurteilung des Genauigkeitspotentials der visuell-odometrischen Positionsbestimmung wurden Befahrungsdaten von

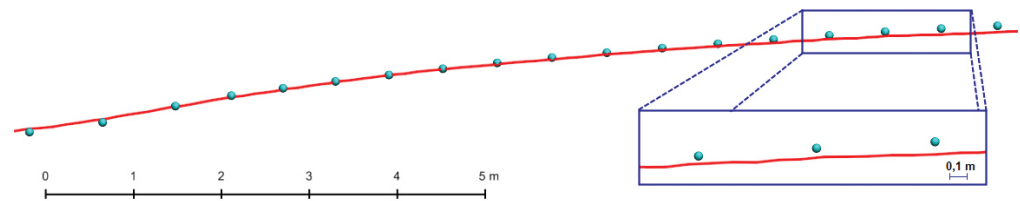


Abbildung 3

Vergleich der Positionsbestimmung durch Visuelle Odometrie (blaue Punkte) und RTK-GNSS (rote Linie) inkl. Detailausschnitt.

Comparison of positioning using visual odometry (blue dots) and RTK-GNSS (red line) incl. detail.

Gewässerabschnitten an der Erft und an der Rur untersucht. Abbildung 3 zeigt am Beispiel der Rur die Positionierungsergebnisse aus GNSS und Bilddaten im Vergleich. Der Gewässerabschnitt ist durch einen mittelhohen Uferbewuchs gekennzeichnet, so dass beide Positionierungsverfahren (GNSS und VO) begünstigt und eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben sind. Als rote Linie sieht man die durch RTK-GNSS erfasste Trajektorie des Messbootes und in blau die mittels Bildzuordnung bestimmten Positionen (nach Berücksichtigung der Offsets zwischen den Sensoren). Die absolute Orientierung des Bildverbandes erfolgte anhand von insgesamt vier ungestörten GNSS-Positionen als Stütz- bzw. Passwerte. Die Abweichungen (RMS-Werte) zwischen VO- und GNSS-Trajektorie betragen auf der etwa 80 m langen Fahrstrecke 2,5 bzw. 4,5 cm in Lage bzw. Höhe. Für die Bestimmung dieser Werte wurden jeweils die VO-Positionen orthogonal auf die GNSS-Trajektorie projiziert und schließlich für ca. 120 Wertepaare die horizontalen und vertikalen Abstände berechnet (Abb. 3 zeigt nur einen Ausschnitt). Die hohen Genauigkeiten gelten sicherlich nur unter guten Voraussetzungen. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass die VO auf die absolute Lagerung anhand von Passdaten angewiesen ist und in den hier durchgeführten Berechnungen Abhängigkeiten aufgrund der Stützung mit GNSS-Daten bestehen. Der Vergleich mit GNSS-unabhängigen Sollwerten ist bislang nicht durchgeführt worden. Wenn – zum Beispiel bei flachen Ufern – die erforderlichen Bildinhalte für die VO fehlen, sind die Positionierungsergebnisse dementsprechend schlechter. In diesem Fall liegen dann jedoch zumeist gute GNSS-Bedingungen vor, so dass i. d. R. keine Überbrückung von GNSS-Signalausfällen – mit Ausnahme von Brücken, für die wiederum VO genutzt werden kann oder aufgrund des kurzen GNSS-Ausfalls auch die IMU-Messdaten genutzt werden können – erforderlich ist. Die VO kann also in der hier betrachteten Anwendung die GNSS-Lücken zwar nie ausnahmslos, aber in vielen Fällen als alternative Georeferenzierungsmethode kompensieren. Zu bedenken ist jedoch, dass das Verfahren gegenwärtig seine Dienste nur im Zuge der Datennachverarbeitung, d. h. nicht in Echtzeit leistet, was jedoch durch die Möglichkeit der ferngesteuerten Navigation keine grundsätzliche Nutzungseinschränkung des Bootes darstellt.

5.2 Gewässergüte- und Echolotdaten

Die Übertragung der mittels MPS und Echolot aufgenommenen Daten erfolgt über eine W-LAN-Schnittstelle, die binär oder im ASCII-Format zur weiteren Bearbeitung exportiert werden können. Die Mess- und Positionsdaten werden über einen Zeitstempel miteinander verknüpft und in Datentabellen transferiert. Diese Dateien können sowohl in R¹¹ (statistische Datenanalyse)

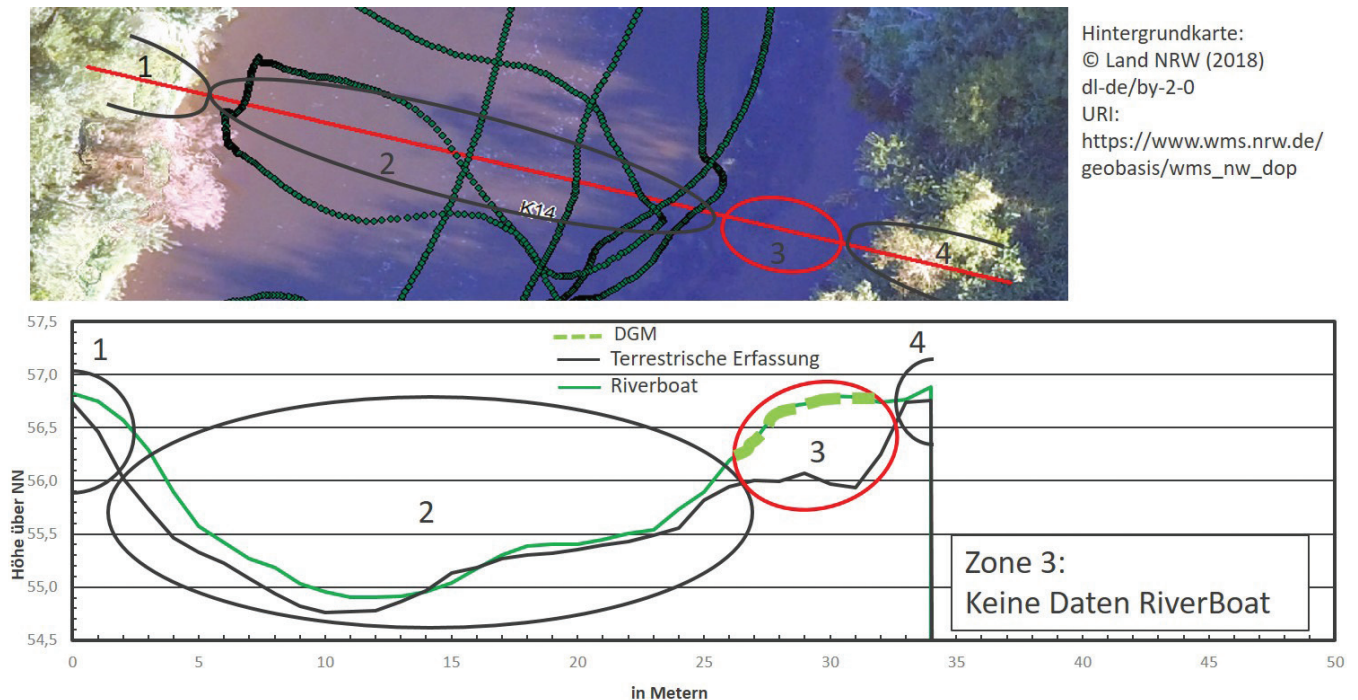
⁷ www.google.de/intl/de/streetview/

⁸ www.axio-net.eu/

⁹ www.javad.com/downloads/javadgnss/sheets/SigmaD_Datasheet.pdf

¹⁰ www.axio-net.eu/

¹¹ www.r-project.org/

**Abbildung 4**

Vergleich von Querprofilen an der Rur bei Körrenzig.
Comparison of profiles at the Rur near Körrenzig.

oder Microsoft Excel, als auch in Geographischen Informationssystemen wie ArcGIS¹² oder QGIS¹³ eingelesen und weiterverarbeitet werden.

Ein wichtiger Schritt beim Datenprocessing ist die Datenbereinigung („data cleansing“). Dabei werden die erhobenen Daten auf Ausreißer oder Lücken überprüft. In diesem Schritt werden vor allem die Referenzierungsdaten (Lage- und Höheninformationen), deren Qualität in Abhängigkeit von der Anzahl der Satelliten und den Korrekturdaten für die RTK-Positionierung abhängt, mit Hilfe von Prüfalgorithmen bereinigt. Die Parameter Vertical und Horizontal Dilution of Precision (VDOP/HDOP, vgl. z. B. BAUER, 2018), tatsächliche Anzahl der empfangenen GPS- und GLONASS-Satelliten und Qualität der Korrekturdaten (RTK) dienen als Evaluationskriterien. Anschließend erfolgt eine Korrektur der Wasserspiegellage über Normalhöhennull (mNN), die aus den Höheninformationen und dem Abstand der GNSS-Antenne zur Wasseroberfläche berechnet wird. Aus den qualitativ hochwertigsten Daten wird eine repräsentative Wasserspiegellage ermittelt und für die Berechnung der Gewässertopographie verwendet. Weitere Prüfalgorithmen, die nachfolgend beschrieben werden, dienen zur Identifizierung von Ausreißern in den Echolot- und Gewässergütedaten.

Im nächsten Schritt erfolgt die Datenanalyse, die sowohl statistisch, als auch visuell durchgeführt werden kann. Ziel ist, eine Übersicht über die Daten zu erhalten und auftretende Muster zu erkennen. Zu diesem Zweck wurden in ArcGIS und R für die Visualisierung, Datenprüfung und Feststellung von Korrelationen zwischen Parametern, Trends und Abweichungen standardisier-

te Verfahren (z. B. Standardabweichung, Quartilsabstand, Bestimmtheitsmaß) entwickelt. Insgesamt wurden mehr als 80 km Gewässerstrecke auf unterschiedlichsten Gewässern primär in Nordrhein-Westfalen befahren; als Resultat liegen ca. 143 Datensätze unterschiedlicher Größe vor, welche in die Analyse eingeflossen sind. Die entstehenden Grafiken, Karten und 3D-Modelle dienen zur Validierung und Auswertung der Daten. Die Echolotdaten wurden anhand von Pegelinformationen und Parallelmessungen (durch die im Projekt beteiligten Wasserverbände) validiert. In Abbildung 4 ist exemplarisch der Vergleich eines terrestrisch vermessenen Querprofils und der mit dem RiverBoat erhobenen Daten dargestellt. Die in der Zone 2 verglichenen Werte zeigen eine gute Übereinstimmung der Gewässertopographie, in den anderen Zonen sind vom RiverBoat keine Daten erfasst worden. Die in der Abbildung dargestellte Linie zeigt die LiDAR-Daten, welche die Wasserspiegellage abbilden und daher höher liegen als die terrestrisch erhobenen Daten.

Detaillierte Untersuchung der Abweichungen (tendenziell liegen die Höhenwerte der terrestrischen Vermessung etwas tiefer) werden derzeit durchgeführt, um die These zu belegen, dass durch die vorhandene Schlammauflage bei der terrestrischen Vermessung der Messstab tiefer eingesunken ist und dadurch im Vergleich zum Signal des Echolotes die absolute Höhenlage geringer ist.

5.3 Bilddaten

Das omnidirektionale Kamerasystem liefert primär Einzelaufnahmen, die aufgrund der fixierten Anordnung der Kameras für die Ableitung von Panoramadarstellungen optimal geeignet sind. An jedem Aufnahmestandort entlang der Gewässerlinie entsteht durch die zeitsynchrone Auslösung ein sechsteiliger Bildersatz, der die Umgebung in 360°-Rundumsicht erfasst und nach dem

12 www.arcgis.com/features/index.html

13 www.qgis.org/de/site/



Abbildung 5

Bildbasierte Punktwolke berechnet aus den Panoramaaufnahmen (Erft).
Image based point cloud generated from panorama images (Erft).

Zusammenfügen (Stitching) zu einem Panoramabild führt. Für diesen Vorgang wurde neben der vom Kamerahersteller mitgelieferten Software eine eigene Lösung implementiert, welche die Ergebnisse der Sensorkalibrierung berücksichtigt und zudem die Möglichkeit eröffnet, die Panoramen unmittelbar für photogrammetrische 3D-Objektvermessungen einzusetzen. Diese Eigenentwicklung basiert auf dem photogrammetrischen Auswertesystem PHIDIAS¹⁴ (SCHWERMANN & EFFKEMANN, 2002). Für RiverView® wurden Module entwickelt, die photogrammetrische 3D-Messfunktionen nunmehr auch für Panoramabilder verfügbar machen. Die Messgenauigkeit von Einzelpunkten hängt hierbei in erster Linie von Bildmaßstab und Güte der Orientierungsdaten (vgl. z. B. LUHMANN et al., 2014) ab. Sie beträgt in den typischen Projektszenen 3 bis 5 cm (relativ zu den Kamerastandorten), wenn die beteiligten Aufnahmen in einem lokalen Bildverband photogrammetrisch orientiert werden.

Durch den hohen Überdeckungsgrad der Panoramaaufnahmen ist die Möglichkeit gegeben, durch Anwendung der oben bereits genannten Bildzuordnungsverfahren (Kap. 5.1) bildbasierte 3D-Punktwolken zu generieren (Abb. 5). Die Grundaufgabe bei der Bildzuordnung besteht in der Bestimmung von korrespondierenden Punkten in zwei oder mehreren Aufnahmen. Wenn die Zuordnung gelöst ist, kann in Verbindung mit den Orientierungsdaten das photogrammetrische Triangulationsprinzip zur Anwendung kommen, was schließlich zu 3D-Koordinaten bzw. der Punktwolke führt (LUHMANN et al., 2014).

5.4 Datenaufbereitung für das Webportal

Im jetzigen Entwicklungsstand werden alle Sensordaten zur Darstellung im RiverView®-Webportal aus dem Geo-DBS in ein

ASCII-basiertes Dateiformat (GeoJSON) bzw. die Bildpanoramen in Rastergrafikdateien überführt. Um eine Heatmap, ein Geländemodell oder andere Verlaufsmuster darzustellen, werden den Daten zusätzlich noch Uferlinien zugeordnet. Diese Informationen können entweder aus den Metadaten bezogen oder manuell in die GeoJSON-Dateien (z. B. mittels eines Geoinformationssystems) eingefügt werden.

6. Nutzungsmöglichkeiten der RiverView®-Daten

6.1 Allgemeine Anmerkung

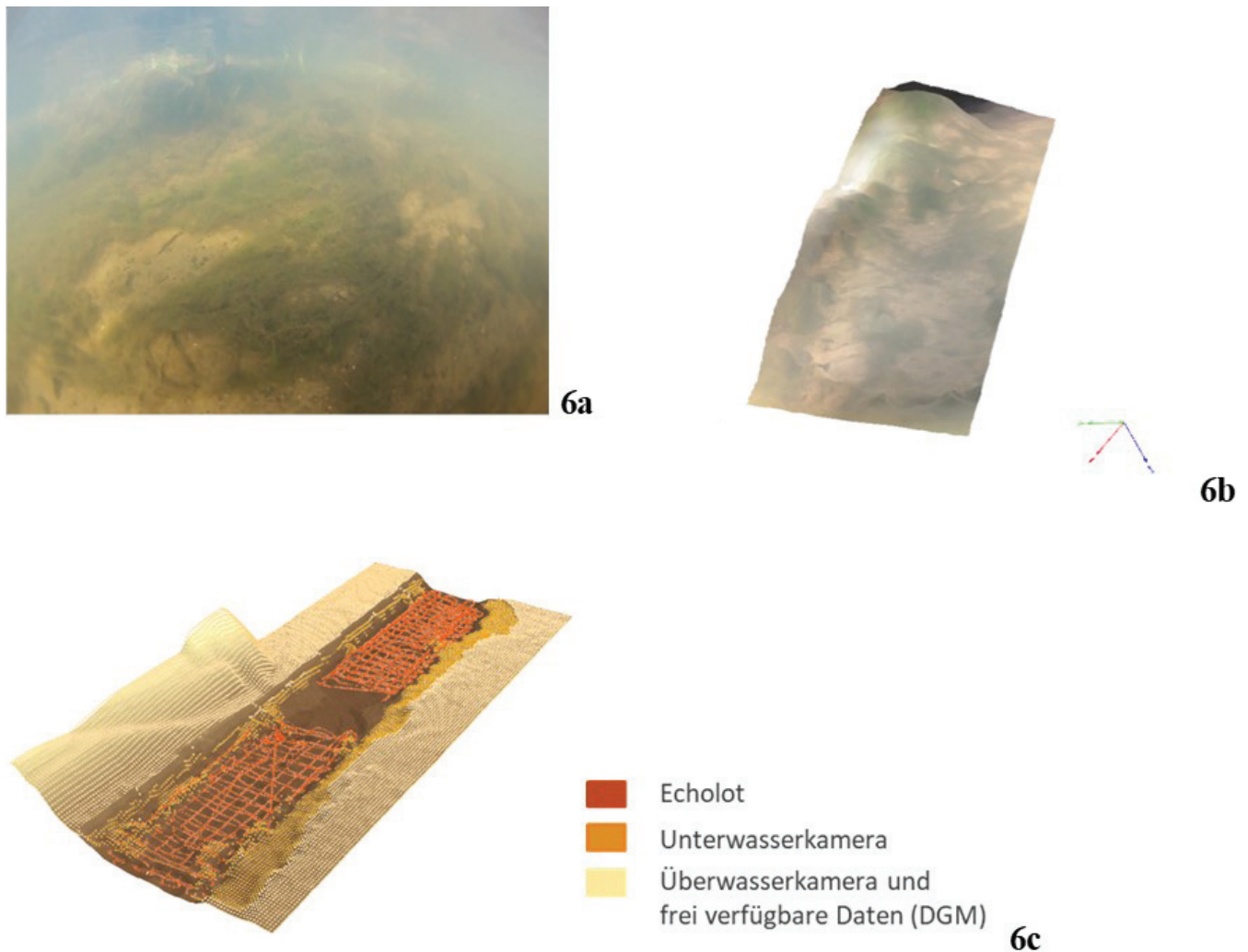
Die mit dem RiverView®-System erfassten Gewässer- und Bilddaten können auf unterschiedliche Art und Weise verwertet werden. In den nachfolgenden Kapiteln werden Beispiele für derartige Nutzungen aufgezeigt, die sich unmittelbar im Rahmen der Projektarbeiten ergaben.

6.2 Gewässertopographie und Hydromorphologie

Durch die Kombination von akustischen und optischen Verfahren kann aus den RiverView®-Daten die Topographie über und unter Wasser großmaßstäblich erfasst und (optional) zusammen mit den durch das Land Nordrhein-Westfalen frei zur Verfügung gestellten LIDAR (light detection and ranging)-Daten¹⁵ zu einem ganzheitlichen Digitalen Geländemodell des Wasserlaufs (DGM-W) vervollständigt werden. Unter Wasser liefert hierzu das im RiverBoat integrierte Single-Beam Echolot Wassertiefen (für $h > 35$ cm). Für die flächenhafte Erfassung der Gewässersohle wurde prototypisch mit Aufnahmen einer Unterwasserkamera experimentiert, wobei sich die in diesem Zusammenhang durchgeführten Arbeiten und Untersuchungen derzeit auf qualitative Tests beschränkten. Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass

¹⁴ www.phocad.de

¹⁵ www.opengeodata.nrw.de

**Abbildung 6**

Aufnahmen (6a) mit Unterwasserkamera werden mittels Structure-from-Motion zu einem 3D-Modell der Uferzone (6b) verarbeitet und mit Echolotdaten sowie Überwasser-Punktwolken (6c) zu einem durchgängigen Digitalen Geländemodell (DGM) kombiniert.

Images recorded with underwater camera (6a) are processed to a 3D-model of the littoral zone by means of Structure-from-Motion technique (6b) and combined with sonar data and above-water point clouds (6c) in order to obtain a continuous digital terrain model.

die Ufer- und Flachwasserbereiche (also für $h < 35$ cm) bei strukturiertem Untergrund durch die Anwendung der in Kapitel 5.3 erläuterten Bildzuordnungsverfahren – ähnlich wie mit den Punktwolken über Wasser – vermessen werden können (Abb. 6).

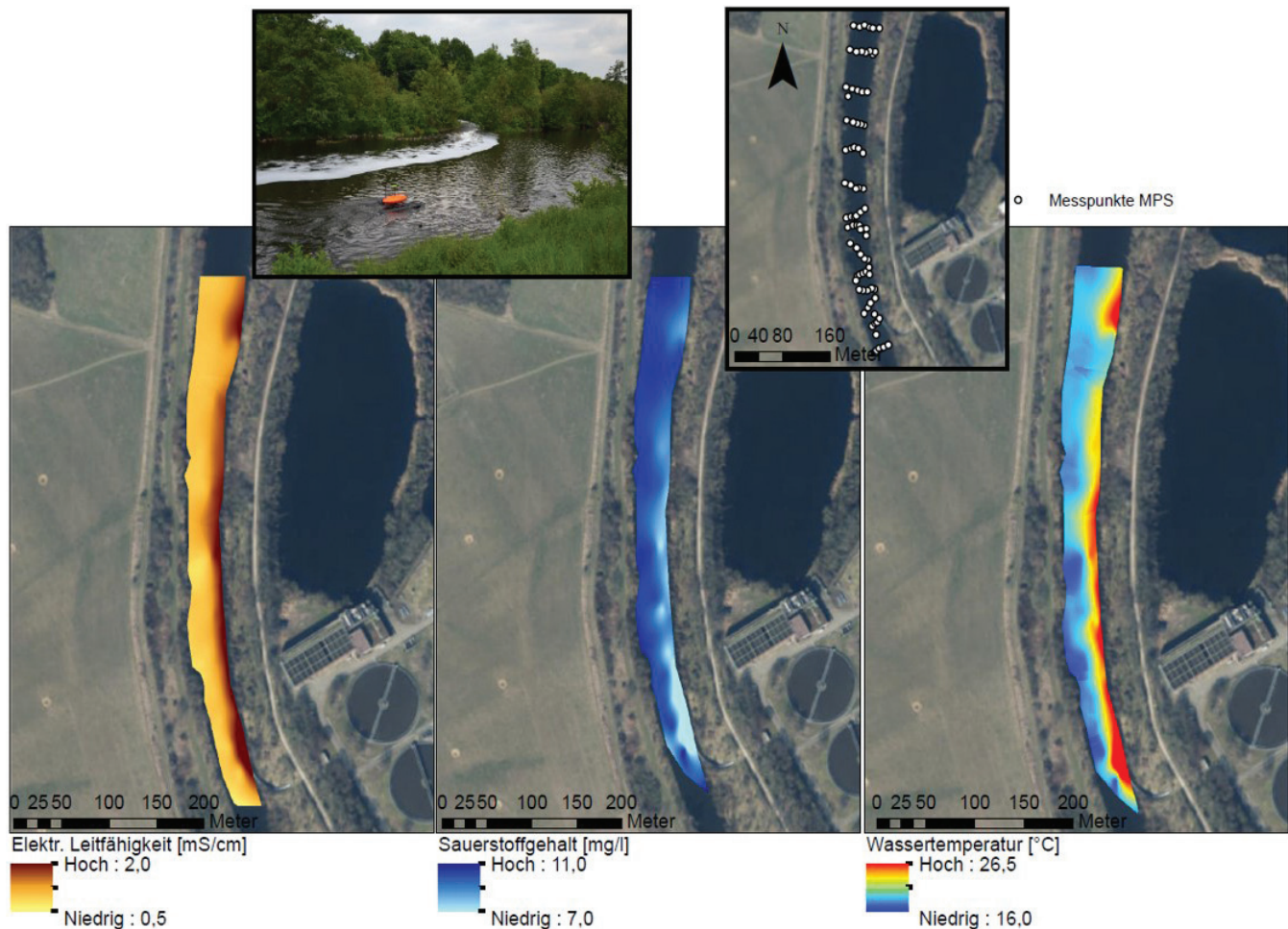
Ein weiteres Ziel des Gewässermonitorings ist es u. a., die Hydromorphologie sowie ihre Veränderungen und Entwicklungen beispielsweise nach Renaturierungen aufzuzeigen. Diese Information dient nicht ausschließlich der Ermittlung des ökologischen Zustandes vor dem Hintergrund der EG-WRRL. Insbesondere die Generierung von Tiefeninformationen zur Erstellung eines DGM-W ist mittels der im RiverBoat integrierten Technik möglich und bildet die Grundlage zur Erstellung hydrodynamischer Modelle, mit welchen die Abflusskapazität im Hochwasserfall (Flussüberschwemmungen und Starkniederschlagsereignisse) simuliert werden kann.

Abbildung 6 zeigt Unterwasserbilder (oben) sowie die zur Erzeugung eines DGM verwendeten unterschiedlichen Datenquellen (unten).

6.3 Physikalisch-chemische Gewässergüte

In Verbindung mit der mobilen Datenerfassung können mit der Multiparametersonde räumlich und zeitlich hochaufgelöste Gewässergütedaten erfasst werden. So kann beispielsweise die Durchmischung nach Einleitungen oder Zuflüssen anhand einer Temperaturfahne dargestellt werden (Abb. 7). An der Uferseite der Einleitung (rechte Uferseite) ist im Gegensatz zur linken Uferseite eine deutliche Erhöhung der Wassertemperatur und elektrischen Leitfähigkeit zu erkennen. Dementsprechend ist auch der Sauerstoffgehalt entlang der rechten Uferseite niedriger. Untersuchungen zeigen, dass sich eine vollständige Durchmischung des Gewässers erst ca. 3 km flussabwärts einstellt.

Diese Informationen sind im Hinblick auf die Europäische Fischgewässerrichtlinie (EU-Richtlinie 2006/44/EG) von Relevanz, nach welcher auf Höhe der Mischzone nach einer Einleitung in einem Cypridengewässer die Wassertemperatur nicht mehr als 3°C gegenüber der unbeeinträchtigten Wassertemperatur abweichen darf. Für den Sauerstoffgehalt gilt eine imperative Schwelle von 7 mg/l .



Hintergrundkarte: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN and the GIS User Community

Abbildung 7

Ergebnisse einer MPS-Messung (Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt) mit dem RiverBoat an der Einleitung einer Kläranlage in die Rur, Messtag: 17.5.17.

Output of RiverBoat MPS-measurement (water temperature, electric conductivity, oxygen content) at the effluent discharge point of a waste water treatment plant into Rur River, date of measurement: 17th May 2017.

Im Einzugsgebiet des Lippeverbandes (RiverView®-Praxispartner) wurden an der Einleitung eines Steinkohlekraftwerkes in die Lippe (linke Uferseite) ebenfalls MPS-Messungen durchgeführt, um die Einwirkung auf die Gewässergüte zu ermitteln (Abb. 8). Hier wird eine Erhöhung der Parameter Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit und Trübung im Bereich der Einleitung festgestellt, welche sich aber – vermutlich aufgrund der starken Mäandrierung des Flusses – im Gegensatz zu der Einleitung der kommunalen Kläranlage in die Rur (Abb. 7) zügig über den Querschnitt durchmischt. Inwieweit die Industrie-einleitung eine gleichmäßige Erwärmung des Wassers bewirkt, wird derzeit durch eine Messung in einem Gewässerabschnitt vor der Einleitung überprüft.

Abbildung 9 zeigt die im Staubereich des Wehres Hamm (Lippe) mit der MPS gemessenen, differenzierten Temperatur- oder Sauerstoffprofile über die Wassertiefe an vier Punkten. Durch den Einsatz des Trailers kann die Multiparametersonde über eine Winde in verschiedene Wassertiefen herabgelassen werden.

Trotz der erhöhten Temperaturen in den oberen Wasserschichten ist dort der Sauerstoffgehalt am höchsten. Dies ist durch den bes-

seren Austausch der oberen Wasserschichten mit der Atmosphäre zu erklären. Durch das Einstellen der sommerlichen Schichtung kann eine Durchmischung (Wind) der kälteren, schwereren tiefen Wasserschichten nicht erfolgen.

6.4 Anpassung der Vegetationsparameter für Gewässergütemodelle

Vielfach werden zur Überwachung und zur Planung von Maßnahmen im Gewässer mathematische Gewässergütemodelle eingesetzt. Ein wichtiger Eingangsparameter der Modelle ist die Beschaffenheit der Vegetation in den Uferbereichen. Sie hat einen großen Einfluss auf den ökologischen Zustand des Gewässers, dient als Lebensraum für Tiere und Kleinorganismen und beeinflusst durch Beschattung der Wasseroberfläche die Wassertemperatur und strahlungsempfindliche Parameter wie den Sauerstoffgehalt und die Algenkonzentration. In der Regel erfolgt die Bestimmung der Ufervegetation mittels Vor-Ort-Begehungen oder durch eine Abschätzung mit Hilfe von Luft- und Satellitenbildern, die allerdings mit großen Unsicherheiten verbunden ist. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird daher eine neue Methode zur Ermittlung der Ufervegetation mit einem hö-

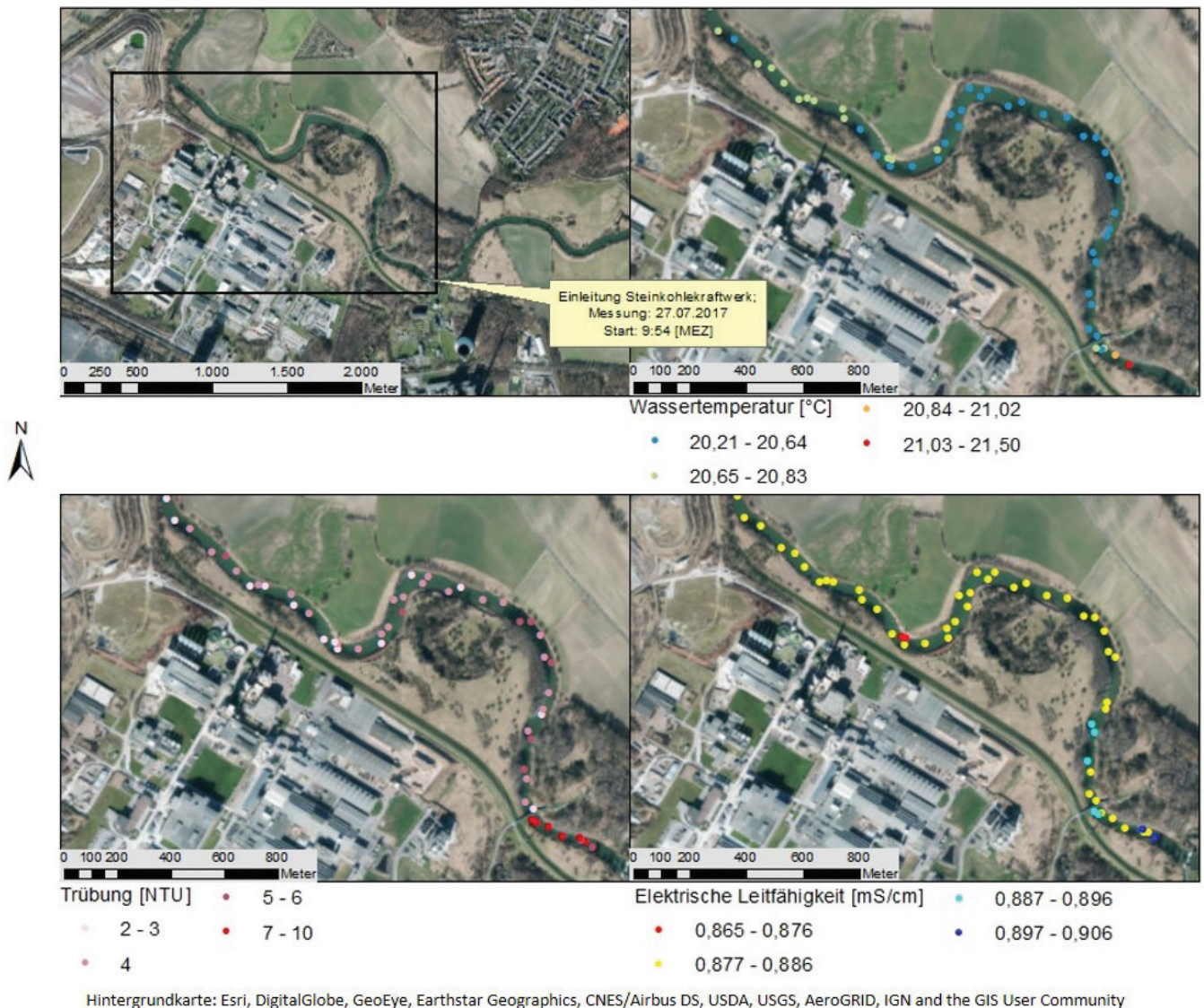


Abbildung 8

MPS-Messung an einer Einleitung eines Steinkohlekraftwerkes in der Lippe (Messtag: 27.7.2017). Ergebnisse der Parameter Wassertemperatur (oben), Trübung (unten, links) und elektrische Leitfähigkeit (unten, rechts).

MPP-measurements at the effluent discharge point of a coal-fired power plant into Lippe River (date of measurement: 27th July 2017). Output shown for water temperature (top), turbidity (bottom, left), and electric conductivity (bottom, right).

heren Detaillierungsgrad entwickelt und die Anwendbarkeit der angepassten Parameter in einer Sensitivitätsanalyse am Beispiel des DWA-Gewässergütemodells¹⁶ der Erft (Abschnitt zwischen Kerpen und Bergheim, ca. 4 km Gewässerstrecke) bestimmt. Für die Ermittlung des prozentualen Vegetationsanteils, der -höhe, der Kronenbreite und des -abstands zum Ufer werden die durch Bildzuordnungsverfahren erzeugten 3D-Punktwolken verwendet (Kap. 5.1 und 5.3).

In dem DWA-Gewässergütemodell wird zwischen sechs Pflanzenarten mit den Parametern: Höhe, Dichte im Sommer, Winter und der Übergangszeit, Abstand zum Ufer sowie Kronenbreite unterschieden. Ein Teilziel des Projektes ist die Ableitung der prozentualen Anteile des Bewuchses im Untersuchungsgebiet und damit eine realitätsgetreue Abbildung der Natur.

In einem ersten Schritt werden die standardmäßig verwendeten Vegetationshöhen als wesentliches Merkmal für die Bestimmung der prozentualen Anteile der einzelnen Vegetationsarten verwendet. Im Modell wird die Höhe auf den Wasserspiegel bezogen und eine Uferhöhe vernachlässigt. In Tabelle 1 sind die ausgewählten Höhentoleranzen für die Zuordnung der Punktinformationen angegeben.

Zusätzlich muss die Wasserspiegeldifferenz vom Startpunkt der Messungen bis zum Endpunkt, die in diesem Fall mehr als 5 m beträgt, in die Berechnungen einfließen. In der Längsschnittdarstellung des Untersuchungsraums ist die Wasserspiegelhöhen-differenz deutlich erkennbar (Abb. 10).

Die Analyse erfolgt auf einer GIS-basierten Methode: Für die Ermittlung der Anteile der Vegetationsarten wird die Gewässerstrecke in rechteckige Zellen aufgeteilt, die mit den Punktinfor-

¹⁶ www.dwa.de --> DWA Gewässergütemodell

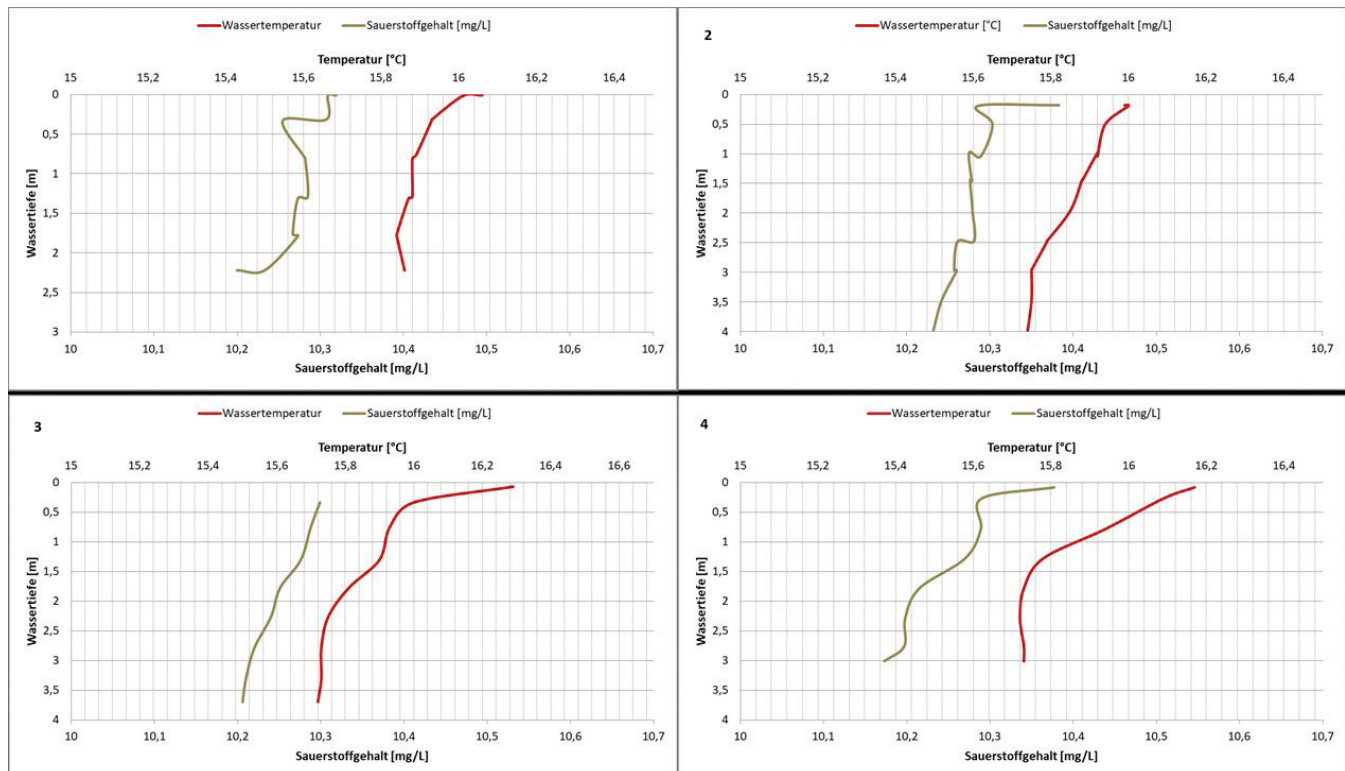


Abbildung 9

Ergebnisse einer Messung der Tiefenprofile an vier Punkten im Staubereich des Wehres Hamm (Lippe), Messtag: 24.8.17.

Depth profiles for four monitoring points along the ponding area of the Hamm Weir (Lippe River), date of measurements: 24th August 2017.

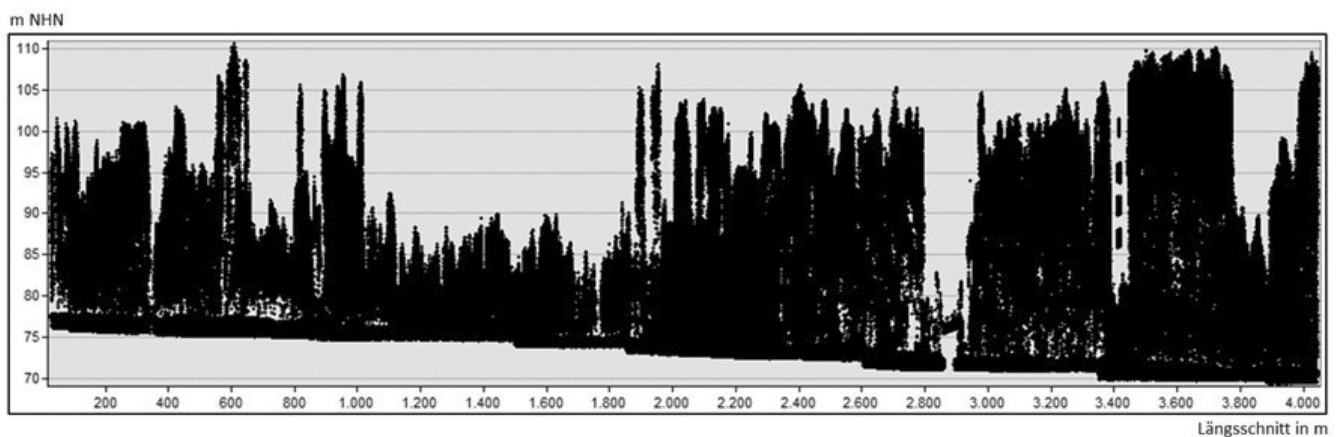


Abbildung 10

Wasserspiegelhöhendifferenz im Untersuchungsraum.

Difference of water level in the study area.

mationen (aus den 3D-Punktwolken) angereichert werden und als Datengrundlage für die Berechnung der Vegetationshöhe dienen. In jeder Zelle wird der Punkt mit dem niedrigsten Höhenwert identifiziert und als Wasserspiegellage über NHN (Wasser-Land-Grenze) festgelegt. Anschließend wird die Vegetationshöhe als wesentliches Merkmal der uferbegleitenden Vegetation ermittelt (Abb. 11).

Im DWA-Gewässergütemodell wird die Uferhöhe nicht berücksichtigt, d. h. die Höhe des Bewuchses wird auf den Wasserspiegel bezogen. Mit dem neu entwickelten Verfahren ist die Berücksich-

tigung aller Einzelhöhen für den gesamten Gewässerabschnitt möglich, wodurch ein höherer Detaillierungsgrad erreicht wird.

Daraus resultierend zeigen die Ergebnisse für den Untersuchungsraum einen deutlichen Unterschied zwischen den standardmäßig im DWA-Gewässergütemodell verwendeten und den berechneten Vegetationsanteilen, differenziert nach linkem und rechtem Ufer (siehe Tabelle 2). Erkennbar ist, dass die ermittelten Anteile der gleichen Vegetationsarten auf beiden Seiten („beidseitig“) bei der GIS-Analyse deutlich höher ausfallen. Sie beanspruchen 34 % der Gesamtstrecke, wobei als Standardwert nur

Tabelle 1

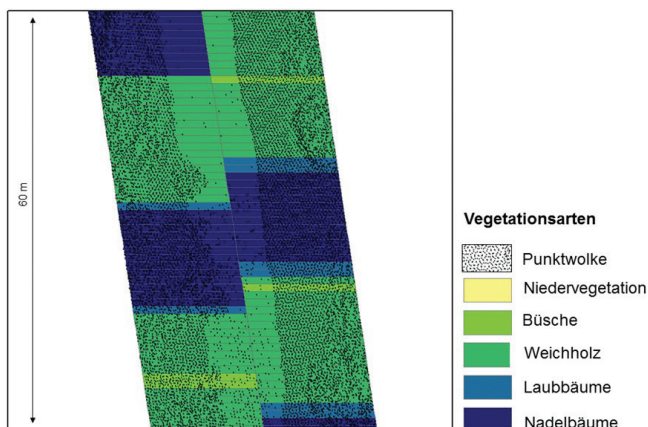
Standardmäßig vorgegebene Vegetationshöhen im DWA-Gewässergütemodell und ausgewählte Höhentoleranzen für die Zuordnung der Punktinformationen an den Vegetationstypen.
Default vegetation heights in the DWA water quality model and selected height tolerances for the classification of point information to vegetation types.

Vegetationsart	Höhe DWA-Modell (m)	Toleranz (m)
Gräser	0,8	0,5 bis 1,2
Büsche	5	1,2 bis 6,5
Weichholz	12	6,5 bis 17,0
Laubbäume	20	17,0 bis 23,0
Nadelbäume	25	23,0 bis 27,0

5 % angegeben werden. Damit sind in der GIS-Analyse automatisch die Anteile auf der rechten bzw. linken Uferseite geringer.

Diese großen Abweichungen resultieren aus zwei wesentlichen Faktoren. Erstens aus den natürlichen Verhältnissen an den Uferbereichen und zweitens aus der Tatsache, dass im DWA-Gewässergütemodell die Uferhöhe nicht berücksichtigt und damit die Vegetationshöhe ab der Wasserspiegelhöhe betrachtet wird.

Für eine erste Sensitivitätsanalyse werden zunächst ausschließlich die prozentualen Vegetationsanteile im DWA-Modell korrigiert, um die Auswirkungen der Uferbeschaffenheit auf die Gewässergüteparameter zu quantifizieren. Dabei werden die im DWA-Modell hinterlegten Standardwerte durch die neu ermittelten Vegetationsanteile ersetzt und die dadurch hervorgerufenen Änderungen von Wassertemperatur, Sauerstoffgehalt und Algenkonzentration ausgewertet. Damit können Rückschlüsse auf die Bedeutung der Ufervegetation vor allem bei kleinen bis mittleren Fließgewässern gezogen werden. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 12 dargestellt. Mit Anpassung der Vegetationsparameter konnten die positive Auswirkung einer dichten Ufervegetation auf die Güteparameter durch eine Senkung der Wassertemperatur und Algenkonzentration und Steigerung des Sauerstoffgehaltes bestätigt werden. Die Wassertemperatur wird um 0,71 °C gesenkt, die Algenkonzentration um 0,0018 mg/L und der Sauerstoffgehalt steigt um 0,46 mg/L.

**Abbildung 11**

Zuordnung der Punkte an ein Meter breiten Zellen entlang der Gewässerstrecke.

Classification of points to one meter wide cells along the river course.

Tabelle 2

Aktuell im DWA Gewässergütemodell verwendete und die in der GIS Analyse ermittelten prozentualen Vegetationsanteile der Uferbereiche.
Percentage of vegetation used by DWA water quality model and by GIS Analysis.

Bereich	Vegetationsart	DWA Gewässergütemodell (%)	GIS Analyse (%)
Linkes Ufer	Niedervegetation	15,0	3,0
	Büsche	15,0	7,0
	Weichholz	15,0	6,0
	Laubbäume	2,5	6,0
	Nadelbäume	0,0	11,0
Beidseitig	Weichholz	0,0	13,0
	Laubbäume	5,0	3,0
	Nadelbäume	0,0	18,0
Rechtes Ufer	Niedervegetation	15,0	1,0
	Büsche	15,0	9,0
	Weichholz	15,0	16,0
	Laubbäume	2,5	4,0
	Nadelbäume	0,0	3,0

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auch eine Änderung der Vegetationsanteile über eine relative kurze Strecke im DWA-Gewässergütemodell, welches beispielhaft angewendet wurde, eine erhebliche Auswirkung auf strahlungsempfindliche Parameter hat. Zukünftig sollen weitere Parameter wie Abstand zum Ufer, Kronenbreite und Dichte überprüft und Empfehlungen zur Anpassungen gegeben werden. Die optimierten Eingangsparameter können gleichermaßen in anderen Gewässergütemodellen angewendet werden.

6.5 Visualisierung der Ergebnisse

Ein weiteres Teilziel des Projektes ist die Konzepterstellung und Umsetzung eines Webportals, in welchem die erhobenen Gewässer- und Bilddaten von diversen Interessengruppen abgerufen werden können. Der Schwerpunkt des Konzeptes liegt dabei darauf, die Visualisierung so umzusetzen, dass direkte Analysen und Vergleiche der Gewässerdaten möglich werden. Je nach Anforderung des Nutzers können unterschiedliche Module ausgewählt werden (Abb. 13). Gewässerbefahrungen und -abschnitte lassen sich anhand von Metainformationen filtern. Die kartographische Darstellung und 360°-Ansicht dient der räumlichen Zuordnung der Messstelle. Zu den Messpunkten sowie zu besonders markanten Gewässerpunkten (Querbauwerken, Einleitungen und Zuflüssen) lassen sich Kontextinformationen einblenden und ein „Sprung“ zur Gewässerstelle durch einen direkten Wechsel in die 360°-Panorama-Ansicht realisieren. Die Detailansicht ermöglicht eine Analyse sowie Vergleiche von numerischen Werten z. B. in Form von Ganglinien oder Tabellen. Die Ganglinien lassen sich einzeln oder paarweise darstellen, um Korrelationen aufzuzeigen.

Technisch beruht die Umsetzung des Webportals im Wesentlichen auf mapbox¹⁷ (Kartendarstellung), der Softwarebibliothek „Total Unduplicated Reach and Frequency Analysis - turf“¹⁸ (räumliche Funktionen) und dem React-Framework¹⁹, welches

17 www.mapbox.com

18 www.surveyanalytics.com/turf

19 reactjs.org

den modularen Aufbau ermöglicht. Die Module sind über einen unidirektionalen Datenfluss miteinander verbunden. So führt die Lokalisierung von Messpunkten auf der Karte beispielsweise zu einer Hervorhebung der Punkte in der tabellarischen Darstellung. Metadaten, wie Wetterinformationen und Befahrungszeitraum, werden zur Interpretationshilfe angezeigt.

Das Design ist auch für mobile Endgeräte angepasst und verzichtet möglichst auf Eingabeformulare. Dies hat den Vorteil, dass die Anwendung schnell verständlich, leicht steuerbar und mit Fingergesten bedienbar ist. Dabei wird explizit auf die Verwendung eines Open-Source-Design-Frameworks mit einheitlichen und harmonischen Bedienelementen geachtet.

Virtual Reality (VR) erlaubt es dem Nutzer in Echtzeit in computergenerierte 3D-Umgebungen einzutauchen und aktiv damit zu interagieren (CRAIG et al., 2009; JERALD, 2015). Um die Immersion zu verstärken werden üblicherweise spezielle Head-Mounted Displays (HMD) verwendet. Für RiverView® wurde eine VR-Applikation entwickelt, die beispielsweise virtuelle Befahrungen und visuelle Untersuchungen in den Aufnahmegebieten ermöglicht.

Zur Umsetzung eines derartigen interaktiven VR-Viewers wurde eine Spiel-Engine (Unity²⁰) auf die Darstellung von Punktwolken und 360°-Panoramafotos angepasst. Dabei werden die 3D-Koordinaten der Punkte in das entsprechende Koordinatensystem der Szene transformiert. Die dazugehörigen RGB-Farbwerte werden anschließend auf das jeweilige Objekt angewendet. Zusätzlich wird auf Höhe der Uferlinie eine in Echtzeit gerenderte Wasserfläche platziert, auf der das Modell des Messbootes mit Maus und Tastatur frei bewegt werden kann. Die Ausrichtung des HMD hingegen wird direkt auf die Kamera der Szene übertragen, so dass der Nutzer freie Rundumsicht hat.

Zur Beleuchtung der Szene wird ein direktionales Licht zur Simulation der Sonne verwendet, wobei tageszeitabhängige Schattenwürfe generiert werden. Weiterhin werden atmosphärische Geräusche hinterlegt, um den Immersionseffekt zu erhöhen. Interaktionen mit den Objekten der Szene werden über einen mittig im Sichtfeld platzierten Fadenkreuzcursor ermöglicht. Mit diesem kann beispielsweise über interaktive Pfeile als Positionsmarker in eine 360°-Photopanorama- oder Unterwasseransicht gewechselt werden (Abb. 14).

7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des BMBF-Projektes RiverView® wird die Grundlage für ein nachhaltiges Gewässermanagement kleiner und mittlerer Fließgewässer geschaffen. Der auf der Vielseitigkeit der eingesetzten mobilen Messtechnik basierende holistische Ansatz von

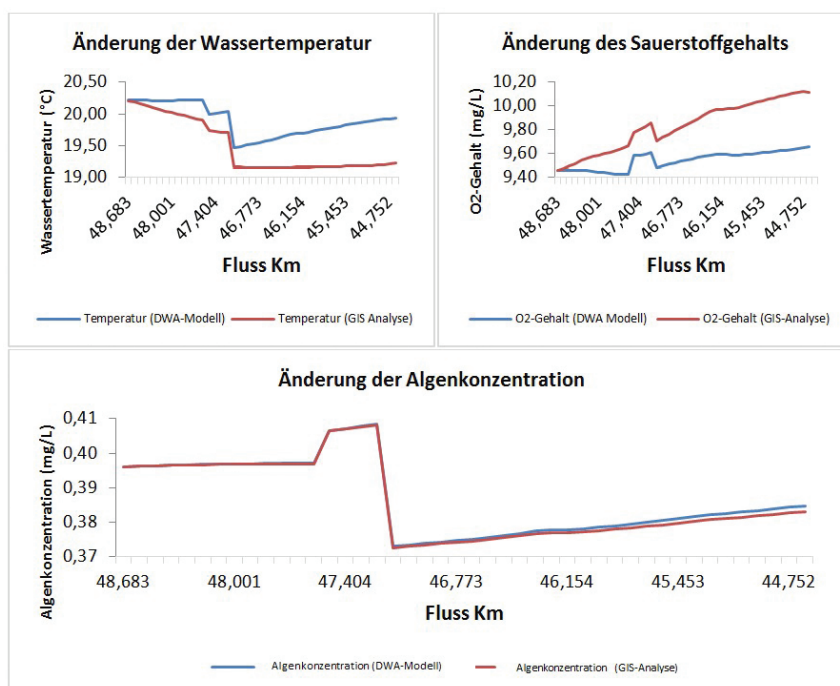


Abbildung 12

Änderung der strahlungsempfindlichen Parameter durch Anpassung der Vegetationsparameter im DWA-Gewässergütemodell.

Changes of the radiation-sensitive parameters by adaptation of the vegetation parameters in the DWA water quality model.

RiverView® vereint die gleichzeitige Aufnahme von georeferenzierten 360°-Panoramabildaufnahmen, hydrophysikalischen und -chemischen Messwerten (Gewässergüteparametern) sowie dreidimensionalen Daten der Über- und Unterwassertopographie, wodurch eine durchgehende Erfassung des Gewässers und Gewässerumfelds möglich ist.

Die Echtzeit-Positionsbestimmung des Bootes mittels RTK-GNSS gelingt mit Zentimetergenauigkeit in Abschnitten mit ungestörtem Satellitenempfang (d. h. keine dichte Vegetation oder Brückenbauwerke). Im Post-Processing kann durch Anwendung von Bildzuordnungsverfahren auf die Panoramaaufnahmen des 360°-Kamerasystems die Position (sowie die Orientierung) des Bootes auch bei fehlendem oder schlechtem GNSS-Empfang im gleichen Genauigkeitsniveau ermittelt werden, so dass der überwiegende Teil der GNSS-Ausfälle kompensierbar ist. Dies und die Verfügbarkeit eines mit einem Autopiloten ausgestatteten Trägerfahrzeuges ermöglichen jederzeit eine Wiederholungsmessung an vordefinierten Messstrecken für Vergleichsuntersuchungen. Gewässerausbaumaßnahmen, die Erfolge von Gewässerrennaturierungen und die Entwicklungen der Gewässerqualität werden damit genauso beschreibbar wie die Bereitstellung von Informationen für Gewässernutzer, beispielsweise im Wasser-sport oder in der Fischerei.

In den Testbefahrungen (u. a. auf der Lippe) erfüllte die Mapping-Sensorik grundsätzlich die in der Planungsphase aufgestellten Erwartungen, da eine flächenhafte Gewässerdatenerfassung mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung über die gesamte Messfahrt realisiert werden konnte. Die 3D-Positionierungsgenauigkeit zur Georeferenzierung der Bild- und Gewässerdaten

²⁰ unity3d.com/de

**Abbildung 13**

Konzept und modularer Aufbau des im Projekt entwickelten WebGIS Portals.
Concept and modular structure of the WebGIS platform developed as part of the project.

betrug bei diesen Befahrungen mittels kombinierter GNSS- sowie bildbasierter Trajektorienbestimmung größtenteils zwischen 2 und 5 cm und genügte damit den o. g. Projektanforderungen von 1 bis 3 dm (Lage) bzw. 1 dm (Höhe) in vollem Umfang.

Die Weiterentwicklungen der Mapping-Plattform fokussieren sich derzeit auf die Implementierung geeigneter Filtermethoden (z. B. Kalman-Filter) zur Multisensorfusion von GNSS-, IMU- und Bilddaten für die Verbesserung der Echtzeitgenauigkeit und -verfügbarkeit der Positionslösung in Gewässerbereichen mit gestörtem GNSS-Empfang. Bezüglich der topographischen Aufnahme der Gewässersohle wird derzeit ein Demonstrator eines Messsystems entwickelt, das auf einem Linienlaser und einer Unterwasserkamera basiert, um die Gewässersohle in flachen Gewässerbereichen – ergänzend zu den Echolot-Daten erfassen zu können.

In weiteren Untersuchungen soll die Leistungsfähigkeit dieses vielversprechenden Messverfahrens genauer evaluiert werden.

Die neu entwickelte Methode zur Bestimmung der Eingangsparmeter der Ufervegetation für die Gewässergütemodellierung wurde am Beispiel des DWA-Modells getestet. Die durch Bildzuordnungungsverfahren erzeugten Punktwolken lassen eine deutlich höhere Differenzierung des prozentualen Vegetationsanteils und -höhe, der Kronenbreite sowie -abstands zum Ufer zu. Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass auch eine Änderung der Vegetationsanteile über eine relative kurze Strecke eine erhebliche Auswirkung auf strahlungsempfindliche Parameter hat.

Für die Zukunft ist die Integration weiterer Sonden geplant, um tiefergehende Rückschlüsse auf die organische Belastung von

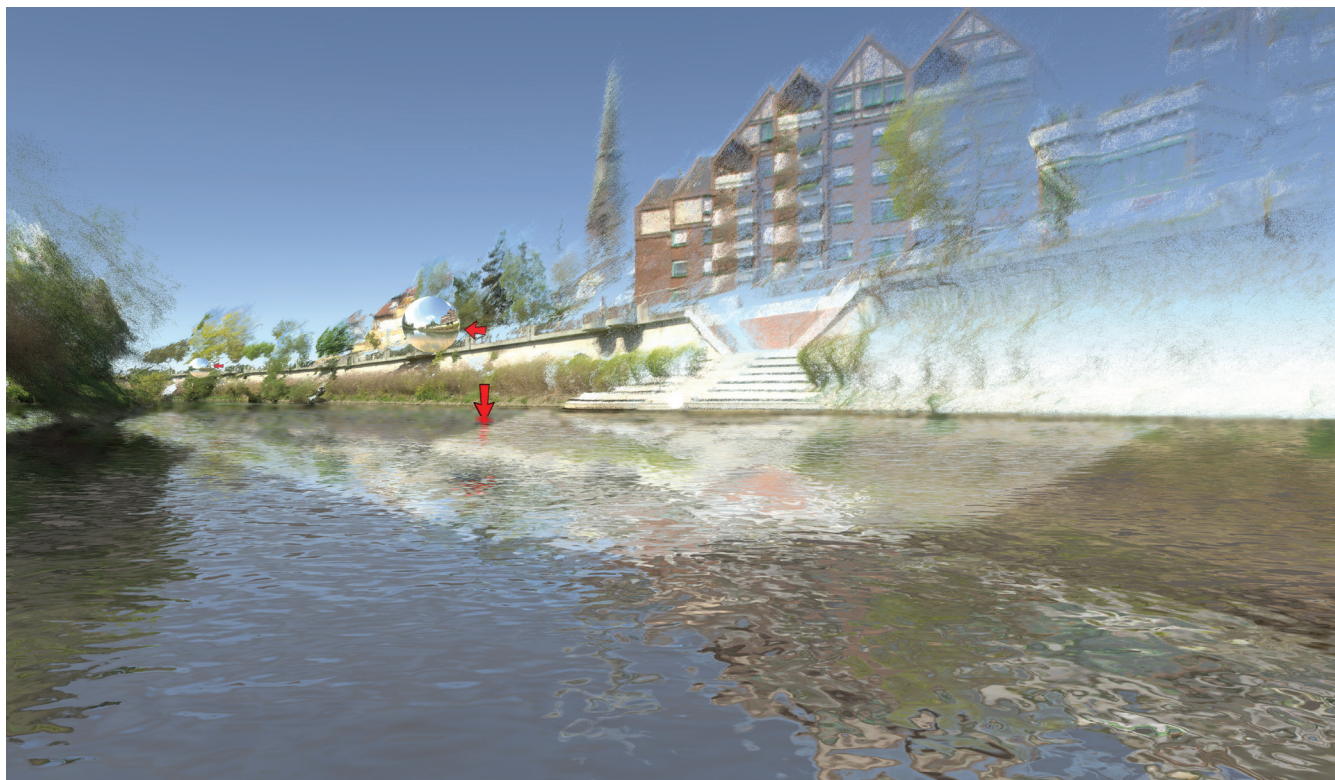


Abbildung 14

Ausschnitt aus einer gerenderten VR-Szene an der Lippe; dargestellt sind Punktwolke, Panoramasphäre und Positionsmarker.
 Detail of a rendered VR-scene at the Lippe; shown are point cloud, panorama sphere and position marker.

Fließgewässern beispielsweise an Einleitungen sowie durch diffuse Einträge aus der Landwirtschaft im gesamten Gewässer vornehmen zu können. Zudem ist die Integration eines Probennehmers in Planung, wodurch die Untersuchung des Wassers und des Sediments auf spezifische Schadstoffe erfolgen kann. Darüber hinaus ist der Einsatz der Messboote zur Klärung nicht wasserwirtschaftlicher Fragestellungen denkbar, beispielsweise zur Unterstützung bei der Suche nach kritischen Stoffen oder Gegenständen im Gewässer. Vorgesehen sind kontinuierliche Weiterentwicklungen der Technik und ihrer Anwendungen, die der Praxis schrittweise bereitgestellt werden sollen. Neben der Befahrung kleiner und mittlerer Fließgewässer, die im Rahmen des Forschungsprojektes im Fokus standen, ist der Einsatz des RiverBoats auch auf stehenden Gewässern und größeren Fließgewässern unter bestimmten Randbedingungen möglich (Fließgeschwindigkeit, Schiffsverkehr, Wellengang).

Conclusions

The BMBF's RiverView®-project provides the basis for sustainable water body management of small and medium-sized flowing waters. The holistic approach of RiverView® is based on the versatility of the measuring technology used and combines the simultaneous recording of spatially referenced 360°-panoramic images, hydrophysical and hydrochemical water quality data and surface and underwater topography, thus providing a continuous mapping of the water body and water environment.

With the in-built RTK-GNSS, real-time positioning is achieved with accuracy to the centimetre in areas of undisturbed satellite

reception (i.e. no dense vegetation or bridge structures). Even if the GNSS reception is poor, the position (and orientation) of the boat can be determined at a similar level of accuracy by correlating the images of the 360° camera system. Post-processing hence effectively compensates most GNSS failures. The image correlation in combination with the in-built autopilot allows for a repetition of measurements exactly along the same trajectories based on recordings of routes previously covered. Watercourse development, the achievements of watercourse renaturation efforts or the development of water quality can thus be mapped and made available, for example for fishery or water sports.

Expectations regarding the mapping sensor system outlined during the planning phase were met throughout the test runs on small and medium-sized rivers (including test runs on the Lippe River): water quality data was gathered with high spatial and temporal resolution throughout the monitoring runs. With a 3D positioning accuracy of 2 to 5 cm for georeferenced images and water data, the above-mentioned project requirements (1 to 3 dm with respect to the position, 1 dm with respect to the height) were well met.

Efforts regarding the further development of the mapping platform are currently directed towards the implementation of suitable filter methods (e.g. Kalman filter). The integration of GNSS, IMU and image data into one multi-sensor system is expected to optimize the availability and accuracy of the positioning approach, especially in areas with a poor GNSS reception. In order to complement the echo sounder data, a combination of a line laser and an underwater camera to map the river bed topogra-

phy in shallow waters is currently being tested. The performance of this system is highly promising and will be evaluated in further tests.

The newly developed method for determining riparian vegetation as input parameters for water quality modelling was tested based on the DWA model. The point clouds generated by image correlation allow for a significantly more precise classification of the type of vegetation, the determination of its height, the crown width and the crown distance to the shore. Modelling results indicate that a slight change in the vegetation composition over a relatively short stretch has a significant effect on radiation-sensitive parameters.

Additional probes will be installed in the future in order to draw more detailed conclusions regarding the organic pollution of flowing waters, for example at effluent discharge points or through diffuse contamination originating from agriculture. The planned integration of a sampler will allow water and sediments to be examined for specific pollutants. The RiverBoat may also be a great asset for challenges non-related to water management, such as the search for certain substances or objects in the water. The RiverView®-project thus provides unprecedented practical upgrading possibilities. Continuous further development of the technology and its applications is therefore expected and will gradually be made available for practical applications.

This research project focused on the operation of the RiverBoat in small and medium-sized running waters. However, an application is also conceivable on stagnant waters and larger running waters, provided certain boundary conditions are met (flow velocity, shipping traffic, swell).

Danksagung

Die Autoren danken den Projektpartnern vom Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e. V., Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme (gia) der RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen University, GEO-DV GmbH, DBM – Dr. Buckup e. K., EvoLogics GmbH und SEBA Hydrometrie GmbH & Co. KG sowie den Praxispartnern Wasserverband Eifel-Rur (WVER), Emschergenossenschaft und Lippeverband (EG/LV). Das Verbundprojekt ist Teil der BMBF-Fördermaßnahme „Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland“ (ReWaM) im Förderschwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement“ (NaWaM) (Förderkennzeichen 033W022).

Anschrift der Verfasser

Dr.-Ing. Gesa Kutschera
Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bolle
Marie-Luise Jagow, M.Sc.
Sina Tabatabaei, B.Sc.
Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V.
Kackertstraße 15 – 17
52072 Aachen
{kutschera | bolle | jagow | sina.tabatabaei}@fiw.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach
Dr.-Ing. Raimund Schwermann
Dipl.-Geoinf. Christoph Blut
Dipl.-Ing. Christoph Effkemann
Shaki Gahlaut, M.Sc.
Nicole Hein, M.Sc.
Geodätisches Institut und
Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme der
RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen
{blankenbach | schwermann | blut | effkemann | gahlaut | hein}@gia.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
Dr. rer. nat. Theide Wöffler
Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
der RWTH Aachen
University
Mies-van-der-Rohe-Str. 17
52074 Aachen
{schuettrumpf | woeffler}@iww.rwth-aachen.de

Literatur

- AIRBORNE HYDROMAPPING GMBH (2018): Airborne Hydro Mapping – A technical revolution to cover our waters; www.ahm.co.at; zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- ALHO P., KUKKO A., HYYPÄ H., KAARTINEN H., HYYPÄ J. & JAAKKOLA A. (2009): Application of Boat-based Laser Scanning for River Survey. *Earth Surface Processes and Landforms* 34.
- BAUER, M. (2018): Vermessung und Ortung mit Satelliten - Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme. 7. Auflage, Wichmann / VDE Verlag, Berlin/Offenbach.
- BÖDER V., KERSTEN T., HESSE C., THIES T., EHM M. & SAUER A. (2010): Scannen unter und über Wasser durch Sensorintegration von GNSS/IMU, Echolot und terrestrischem Laserscanner. DVW-Schriftenreihe, Band 63, Wißner Verlag, Augsburg.
- CRAIG A., SHERMAN W.R. & WILL J.D. (2009): Developing Virtual Reality Applications: Foundation of Effective Design. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- EFFKEMANN C., SCHWERMANN R. & BLANKENBACH J. (2017): Kalibrierung und Navigation eines Überwasser-Mapping-Systems für die Erfassung von bildhaften und sensorischen Gewässerparametern. In: Lienhart W. (Hrsg.) *Ingenieurvermessung 17. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs*, Graz, 2017. Wichmann / VDE Verlag, Berlin/Offenbach.
- EL-SHEIMY N. (2005): An overview of mobile mapping systems. In *FIG Working Week 2005 and GSDI-8*, Cairo, Egypt.
- ENGELS R., SCHÜTTRUPF H., BLANKENBACH J. & SCHWERMANN R. (2016): Die Digitalisierung der Wasserwirtschaft durch hochauflösende, raumzeitliche Informationsmodellierung. *Gewässerschutz - Wasser - Abwasser*, 2016, ISBN 978 3 938996 45 4, Essen.
- EU KOMMISSION (2006): Richtlinie 2006/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten. <http://data.europa.eu/eli/dir/2006/44/oj>, letzter Zugriff 5.02.2018.

- EU KOMMISSION (2015): Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. The Water Framework Directive and the Floods Directive: Actions towards the 'good status' of EU water and to reduce flood risks /* COM/2015/0120 final */.
- FORSTER C. (2016): Visual Inertial Odometry and Dense Reconstruction for Mobile Robots, PhD Dissertation, Faculty of Business, Economics and Informatics, University of Zuerich (UZH).
- HEIN N. & BLANKENBACH J. (2017): Vergleich von PostGIS und Rasdaman als Geodatenbank für großvolumige Bilddatenbestände eines mobile Mappingsystems. AGIT Journal für Angewandte Geoinformatik, Ausgabe 03-2017, Wichmann-Verlag.
- HELM B., WIEK S., KARRASCH P., HUNGER S., KUHN K., SIX A., KREBS P. (2016): Das Projekt BOOT-Monitoring: Entwicklung eines Messsystems für die räumlich kontinuierliche Erfassung von Hydrometrie, Morphometrie und Wasserqualität zur Bewertung der Gewässergüte. In: 39. Dresdner Wasserbaukolloquium 2016 „Gewässerentwicklung & Hochwasserrisikomanagement“.
- HENSEN, M. (2017): Entwicklung eines ArcPy-basierten Werkzeugs zur Erzeugung eines digitalen Gewässermodells aus terrestrischen Querprofilen und DGM-Daten (Masterarbeit an der Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie), www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb_v/prof_schmidt/Masterarbeit_Hensen.pdf, letzter Zugriff 08.06.2018.
- HUNGER S., KARRASCH P. & WESSOLLEK C. (2016). Evaluating the potential of image fusion of multispectral and radar remote sensing data for the assessment of water body structure. In SPIE Remote Sensing, International Society for Optics and Photonics, 999814-999814-11.
- JERALD J. (2015): The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality. Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool Publishers, New York, NY, USA.
- KERSTEN TH., BÖDER V., SCHMIDT F. (2013): Shipborn scanning – Simultane 3D-Vermessung des Flussbettes und der Uferbereiche am Hochrhein durch Bathymetrie und mobiles Laserscanning. Geomatik Schweiz, 5/2013, S. 243-246.
- KUTSCHERA G., SCHWERMANN R., BLANKENBACH J., HELLER G. & BOLLE F.-W. (2017): RiverView – Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Gewässerdatenerfassung. In: wasserwirtschaft wassertechnik (wwt), Heft 9, Jg. 67, ISSN: 14385716.
- LAWA: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (Herausgeber) (1999). Gewässerstrukturgüte-kartierung in der Bundesrepublik Deutschland: Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer.
- LUHMANN T., ROBSON S., KYLE S. & BOEHM J. (2014): Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. 2nd Edition. De Gruyter, Berlin/Boston.
- MILELLA A. & SIEGWART R. (2006): Stereo-based ego-motion estimation using pixel tracking and iterative closest point. Proceedings IEEE Int. Conference Vision Systems.
- MOORE K., JAFFE J.S. & OCHOA B. (2000): Development of a new underwater bathymetric laser imaging system: L-bath. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 17.
- MOORE K. & JAFFE J.S. (2002): Time-evolution of high-resolution topographic measurements of the sea floor using a 3-D laser line scan mapping system. IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 27.
- NISTER D., NARODITSKY O. & BERGEN J. (2004): Visual odometry. Proceedings Int. Conference Computer Vision and Pattern Recognition, Washington DC.
- PINTO E.; MARQUES F.; MENDONCA R.; SANTANA P. & BARATA J. (2014): An Autonomous Surface-Aerial Marsupial Robotic Team for Riverine Environmental Monitoring: Benefiting from Coordinated Aerial, Underwater, and Surface Level Perception: in Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO).
- SCHWERMANN R. & EFFKEMANN C. (2002): Kombiniertes Monoplotting in Laserscanner- und Bilddaten mit PHIDIAS. In: Luhmann (Hrsg.): Photogrammetrie und Laserscanning – Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management, Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- SZELISKI R. (2011): Computer Vision – Algorithms and Applications. Springer Verlag, London.
- VAN RENS J., SILVA A., CANTER P. & BRENNAN R. (2007): Surface Imaging Capabilities on Marine Hydrographic Vessels. U.S. Hydro Conference 2007, Norfolk Virginia, USA.
- WANG Y., TAN R., XING G., WANG J., TAN X., LIU X. (2015): Samba: a smart-phone-based robot system for energy-efficient aquatic environment monitoring. IPSN, 15 Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks.
- YANG Y., ZHENG B., ZHENG H., WANG Z., WU G., WANG J. (2013): 3D Reconstruction for Underwater Laser Line Scanning. IN: [IEEE 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen (2013.6.10-2013.6.14)] 2013 MTS/IEEE OCEANS – Bergen.