



BMBF-Fördermaßnahme „Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland“ (ReWaM) im Förderschwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement“ (NaWaM)

RiverView®

Gewässerzustandsbezogenes Monitoring und Management

Gemeinsamer Schlussbericht des Verbundvorhabens

Förderkennzeichen: 033W022A-F
Projektlaufzeit: 01.06.2015 bis 31.12.2019

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Impressum

Verbundkoordination



Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e. V.
Kackertstraße 15 – 17
52072 Aachen
David Wehmeyer, M.Sc.
Dr. sc. Dipl.-Ing. Frank-Andreas Weber

Projektpartner



Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e. V.
David Wehmeyer, M.Sc.
Dr.-Ing. Paul Wermter
Dr.-Ing. Gesa Kutschera
Dr. sc. Dipl.-Ing.
Frank-Andreas Weber



Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme (gia), RWTH Aachen University
Dr.-Ing. Raimund Schwermann
Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Jörg Blankenbach



Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW), RWTH Aachen University
Christiane Eichmanns, M.Sc.
Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Holger Schüttrumpf

Zitierhinweis:

Wehmeyer, D., Wermter, P., Kutschera, G., Weber, F.-A., Bolle, F.-W., Engels, R., Kirchhof, W., Weingärtner, D., Stecking, M., Jagow, M.-L., Tabatabaei, S., Klatt, L., Kasper, K., Sivicki, T., Blankenbach, J., Schwermann, R., Effkemann, C., Hein, N., Gahlaut, S., Schüttrumpf, H., Eichmanns, C., Wöffler, T., Sattler, M., Grimmeisen, F., Hansen, I., Bannasch, R., Lange, I., Tietz, T., Heller, G., Buckup, K. †, Goedeking, A., Kemper-Böninghausen, R. (2020): Gewässerzustandsbezogenes Monitoring und Management. Abschlussbericht des BMBF-Verbundvorhaben RiverView®, Förderkennzeichen 033W022A-F, FiW e. V., Aachen

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium für Bildung und Forschung

IM RAHMEN DES BMBF-PROGRAMMS



BETREUT DURCH



EvoLogics GmbH
Dr. Ilja Lange,
Dr. Rudolf Bannasch
Thomas Tietz



GEO-DV GmbH Ingenieurbüro für Datenmanagement und Vermessung
Gerd Heller



SEBA Hydrometrie GmbH & Co. KG, Kaufbeuren
Felix Grimmeisen



DBM – Dr. Buckup e. K.



Emschergenossenschaft / Lippeverband
Dipl.-Ing.
Rolf Kemper-Böninghausen



Wasserverband Eifel-Rur
Dr. Antje Goedeking

Förderkennzeichen:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033W022A-F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

<https://www.river-view.de/>

Aachen, September 2020

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
1 Einleitung und Zielsetzung.....	17
2 Planung und Ablauf des Vorhabens	20
3 Wissenschaftlicher und technischer Stand	23
3.1 Prozesse in Gewässerökosystemen – aktuelle Zustandsbeschreibung und - bewertung	23
3.2 Gewässerbewirtschaftung – aktuelle Instrumente und Methoden	26
3.3 Überblick der entwickelten Lösungen aus RiverView®	30
3.3.1 Trägerplattform RiverBoat	30
3.3.2 RiverScan - Überwassermappingeinheit.....	31
3.3.3 RiverDetect - Wassergütemessungen	31
3.3.4 Modularität des Gesamtsystems	32
3.3.5 Einsatzbereiche der Systeme	32
3.3.6 Technische Ausgestaltung und Entwicklung des Systems.....	33
3.3.7 Postprocessing der erfassten Daten.....	35
3.3.8 Nutzungsmöglichkeiten der RiverView®-Daten	40
3.4 Zusammenfassung.....	45
4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	46
5 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen	48
5.1 RiverView® - Gewässerzustandsbezogenes Management und Monitoring	48
5.1.1 Hintergrund	48
5.2 RiverBoat - Die Trägerplattform des Systems.....	50
5.2.1 Konzeptionierung des Systems	50
5.2.2 Aufbau der Montageplattform der Mappingeinheit	52
5.2.3 Integration der Systeme	53
5.2.4 Aufbau des modularen Anhängermoduls.....	54
5.2.5 Feinabstimmungen und Weiterentwicklungen	55
5.2.6 Digitale Datenflüsse	57
5.2.7 Evaluierung des Systems	58
5.3 RiverDetect – Erfassung der Gewässergüte.....	62
5.3.1 Konzeptionierung der MPS- und INN-Sensorik.....	62
5.3.2 Hardware- und softwareseitige Integration der Sensorik	64
5.3.3 Anpassung und Integration der Energieversorgung mittels Hochleistungsbatterien.....	65
5.3.4 Konzeptionierung einer drahtlosen Kommunikation.....	65

5.3.5	Tests des Systems im Labor	67
5.3.6	Tests des Systems in Gewässern	71
5.3.7	Anpassungen der MPS	84
5.3.8	Anpassungen der INN-Technik	86
5.4	Weiterentwicklungen der Gewässergütesensorik im Rahmen der RiverView-Aufstockung	88
5.4.1	Systemdefinition Formfaktoren und Schnittstellen	89
5.4.2	Entwicklung Energiekonzept	93
5.4.3	Datenspeicherung und -fernübertragung	94
5.4.4	Fertigung und Umrüstung der zwei Multiparametersonden.....	94
5.4.5	Bootintegration der Sonden und Funktionstests	98
5.4.6	Tests des Systems in natürlichen Gewässern	99
5.4.7	Evaluierung der Zustandserfassungs-Sensorik	100
5.5	RiverScan – Überwassermapping mittels Panoramakamera	104
5.5.1	Aufbau und Kalibrierung des bildgebenden Systems.....	105
5.5.2	Softwareentwicklung für Sensorsteuerung und Messdatenaufzeichnung	106
5.5.3	Konfiguration der Sensoren und terrestrische Tests	106
5.5.4	Kalibrierung	109
5.5.5	Testfahrten	116
5.5.6	Aufbereitung der Aufnahmen für die Panoramadarstellung	120
5.5.7	Sonar – Unterwasseraufnahmen	129
5.5.8	Evaluierung der bildgebenden und verarbeitenden Verfahren und Systeme	142
5.6	Unterwasserkamerabasierte Bathymetrie	145
5.6.1	Systemkonfigurationen	145
5.6.2	Kalibrierung des bathymetrischen Kamera-Laserlinien-Messsystems	147
5.7	Datenfusion zur Positionsschätzung	161
5.8	RiverAdmin – Datenmanagement	185
5.8.1	Konzeptionierung und Layout der Datenschnittstellen und Übertragung	186
5.8.2	Praxisanwendung der Datenübertragung mit Flussgebietsinformationssystemen der Praxispartner.....	187
5.8.3	Aufbau des spatio-temporalen Datenbanksystems für Mess- und Bilddaten	192
5.9	360°-Viewer	195
5.9.1	Schnittstellen 360°-Viewer-Umgebung und Steuerung	195
5.9.2	Entwicklung und Anwendung der Plausibilisierungsalgorithmen.....	199
5.10	RiverWorks – Datenvermittlung.....	206

5.10.1	Abstimmung Kommunikationskonzept.....	206
5.10.2	Entwicklung des Web-Portals.....	207
5.10.3	Kopplung des Systems mit dem Portal/GIS.....	211
5.10.4	Pflege des Webportals und Anwendung River-App	212
5.10.5	Kommunikation mit externen Gruppen, Wissensmanagement, Dissemination der abgestimmten Vorhabensergebnisse und Empfehlungen	217
5.11	Projektkoordination	220
6	Erfolge und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	222
	Literatur	225

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Die fünf Säulen von RiverView®	20
Abbildung 2:	Das RiverBoat (links) und das Messboot Nelli 2 (rechts) des IWW RWTH Aachen.....	30
Abbildung 3:	Das RiverBoat mit zwei Multiparametersonden	31
Abbildung 4:	Definition der Sensorkoordinatensysteme und Kalibrierung der Überwasser-Mapping-Einheit	34
Abbildung 5:	Vergleich der Positionsbestimmung durch Visuelle Odometrie (blaue Punkte) und RTK-GNSS (rote Linie) inkl. Detailausschnitt.....	36
Abbildung 6:	Vergleich von Querprofilen an der Rur bei Körrenzig	38
Abbildung 7:	Bildbasierte Punktwolke berechnet aus den Panoramaaufnahmen (Erft) ..	39
Abbildung 8:	Das Kamera-Linienlaser-System während den Kalibrierungsarbeiten. Links: das RiverBoat mit angebautem Kamera-Laser-System. Rechts: die zur Kalibrierung angefertigte Kalibrierkulisse.	40
Abbildung 9:	Durchgängiges digitales Geländemodell (DGM) eines Gewässers mit farblicher Differenzierung der unterschiedlichen Informationsquellen.....	41
Abbildung 10:	Ergebnisse einer MPS-Messung an der Einleitung einer Kläranlage in die Rur.....	42
Abbildung 11:	Ein Ausschnitt aus einer gerenderten VR-Szene an der Lippe auf dem die Punktwolke, Panoramaspäre und Positionsmarker dargestellt sind.....	44
Abbildung 12:	Messrechner AAEON NANO-001N	52
Abbildung 13:	RiverBoat mit aufgesetztem 360° Kameramodul und MPS.....	53
Abbildung 14:	RiverBoat mit Trailer/Winde	54
Abbildung 15:	RiverBoat mit Reflektor und automatischer Verfolgung mit einem Tachymeter	55
Abbildung 16:	RiverBoat mit 360°-Kamera, MPS und ADCP auf der Rur.....	59
Abbildung 17:	Vergleich der aufgenommenen Datenpunkte zwischen terrestrischer Erfassung (links) und Peilung RiverBoat (rechts). Koenzen 2018.....	60
Abbildung 18:	Vergleich der Datensätze zwischen RiverBoat und terrestrischer Vermessung. Grün: RiverBoat, Schwarz: terrestrische Vermessung. Links: Querprofil K33, rechts: Querprofil K14.....	61
Abbildung 19:	Digitales Geländemodell des Wasserlaufs und des Gewässerumfelds.....	61
Abbildung 20:	Foto mit Ausschnitt der Winde mit integriertem SEBA Bluetooth-Modul	66
Abbildung 21:	Versuchsaufbau in der Kiprinne des IWW bei einem Anstellwinkel der Multiparametersonde (MPS) von 0° (a) und einem Anstellwinkel von 45° (b)	67
Abbildung 22:	Ergebnisse der Laboruntersuchungen zum Einfluss des Anströmwinkels auf die Parameter der Leitfähigkeit (a), Trübung (b), O ₂ -Konzentration (c) und den pH-Wert (d)	68
Abbildung 23:	Wassertemperatur in der Kiprinne während der Versuchsdurchführung....	69
Abbildung 24:	Querschnitt der Strömungsrinne am IWW	69
Abbildung 25:	RiverBoat mit ADCP und MPS auf der Wertach	71

Abbildung 26:	Darstellung der Messung einer Temperaturfahne nach Einleitung einer kommunalen Kläranlage	72
Abbildung 27:	Entwicklung von chemisch-physikalischen Parametern nach Einleitung eines Steinkohlekraftwerks.....	73
Abbildung 28:	Ergebnisse der MPS im Naturschutzgebiet Lippeaue.....	74
Abbildung 29:	Streckenverlauf der Testfahrt auf der Ruhr am 14.04.2017	75
Abbildung 30:	Messergebnisse für die Temperatur (links) und die Dichte (rechts) auf der Ruhr am 14.04.2017	76
Abbildung 31:	Messergebnisse für die O ₂ -Konzentration (links) und die O ₂ -Sättigung (rechts) auf der Ruhr am 14.04.2017	77
Abbildung 32:	Messergebnisse für die Leitfähigkeit (links) und die Salinität (rechts) auf der Ruhr am 14.04.2017	78
Abbildung 33:	Messergebnisse für den pH-Wert (links) und die gelösten Stoffe (rechts) auf der Ruhr am 14.04.2017	79
Abbildung 34:	Messergebnisse für die Trübung (links) und die suspendierten Stoffe (rechts) auf der Ruhr am 14.04.2017	80
Abbildung 35:	Lage der Messpunkte an der Rurtalsperre (20.07.2016)	82
Abbildung 36:	Abklingkurven für Messpunkt 3 (Rurtalsperre, 20.07.2016).....	82
Abbildung 37:	Modularer Anhänger "Trailer" mit fernsteuerbarer Winde zum Herablassen der MPS in verschiedene Wassertiefen.....	84
Abbildung 38:	Wassertemperatur und Sauerstoffgehalt im Staubereich Wehr Hamm (24.08.2017). Gemessen mittels MPS (Trailer).	85
Abbildung 39:	Sondenkonstruktion im Labortest	86
Abbildung 40:	INN-Sonde in Tow-Fish Bauweise.....	87
Abbildung 41:	SEBA-Multiparametersonde Typ MPS-D8 mit bis zu acht Wasserqualitätssensoren: (a) Sondengehäuse aus Edelstahl sowie Schutzkorb mit Schlitz und Löchern im Bereich der Sensorik für bessere Anströmbedingungen. (b) MPS ohne Schutzkorb und mit sichtbaren Sensoren	89
Abbildung 42:	MPS am RiverBoat fixiert mittels Schutzkocher (grau) sowie integrierte Akkuversorgung und Bluetooth-Modul.....	91
Abbildung 43:	Bluetooth-Modul integriert im Schutzkocher für den fixierten Sondenbetrieb.....	91
Abbildung 44:	Foto mit Ausschnitt der Kabelwindenaufsatz mit integriertem SEBA Bluetooth-Modul.....	91
Abbildung 45:	Trägersystem mit Kabelwinde sowie SEBA-MPS.....	92
Abbildung 46:	(a) Kunststoffkocher mit Befestigungsvorrichtung zur Fixierung der SEBA MPS am RiverBoat. (b) Integriertes Bluetooth-Modul im Schutzkocher. Unterhalb des Moduls befindet sich die integrierte Akkuversorgung (nicht sichtbar) der MPS. (c) Zubehör zur Befestigung.....	93
Abbildung 47:	(a) PEEK-Kunststoff-Bauteile für den Sondenkörper mit Sondenrohr, Trägerteil und Stecker. (b) PEEK-Trägerteil mit Extension für Chlorophyll-	

	oder Trübungssensor. (c) SEBA MPS mit Trübungssensor, Sauerstoffsensor, pH-Elektrode und Nitratsensor und schwarzen PVC96
Abbildung 48:	Seitenansicht der Konstruktionszeichnung der MPS mit Chlorophyll-a-Sensor97
Abbildung 49:	RiverBoat mit beiden SEBA Multiparametersonden parallel fixiert.....97
Abbildung 50:	RiverBoat mit Überwassermappingeinheit und den beiden MPS.....98
Abbildung 51:	Sauerstoffkonzentration [mg/l] in einem Abschnitt der Rur99
Abbildung 52:	Chlorophyll-a-Konzentration [$\mu\text{g/l}$] 100
Abbildung 53:	Das RiveBoat mit integriertem Trailer mit Winde, um die MPS (SEBA) in verschiedene Wassertiefen herabzulassen. 101
Abbildung 54:	Mit ADCP gemessenes Geschwindigkeitsprofil 101
Abbildung 55:	RiverBoat mit ADCP Anhänger 101
Abbildung 56:	Montageplattform mit den Sensorkomponenten; rechts als Schemazeichnung..... 105
Abbildung 57:	Darstellung der Trajektorie aus Satellitenpositionierung, Qualität der Messung farbig codiert..... 108
Abbildung 58:	GNSS-Empfänger von JAVAD 108
Abbildung 59:	Passpunktfeld in der IWW-Versuchshalle (Ausschnitt); rechts Beispiel für eine Zielmarke 109
Abbildung 60:	Links: Rekonstruktion der Bildstrahlen als 3D-Raumgeraden im lokalen Kamerakoordinatensystem, rechts: Einpassung des 3D-Geraden-bündels auf das Passpunktfeld..... 110
Abbildung 61:	Experimentelle Überprüfung der Kamerapositionierung 111
Abbildung 62:	Relativbewegungen von Kamera und IMU in schematischer Darstellung anhand von Sensorkoordinatensystemen 113
Abbildung 63:	Trajektorie der Lippe-Testbefahrung 114
Abbildung 64:	Abweichungen bei der Positionsbestimmung aus IMU-Daten und GNSS (RTK) 115
Abbildung 65:	Handwagen für Untersuchungen ohne Boot..... 116
Abbildung 66:	Testfahrt auf dem Werbellinsee..... 117
Abbildung 67:	Testfahrt auf dem Rursee..... 117
Abbildung 68:	Rursee: GNSS-Positionen ohne Korrektur (grau) und mit Korrektur (grün) 118
Abbildung 69:	Testfahrt auf der Lippe 119
Abbildung 70:	GNSS-Positionen ohne Korrektur (grau) und mit Korrektur (grün)..... 119
Abbildung 71:	Panoramadarstellung im photogrammetrischen Auswertesystem PHIDIAS 121
Abbildung 72:	Photogrammetrische 3D-Messfunktionen in PHIDIAS-Pano 122
Abbildung 73:	Bildbasierte Punktwolke aus Panoramaaufnahmen..... 123
Abbildung 74:	Aus Bilddaten generierte Punktwolke und Uferquerschnitt an einem Gewässerabschnitt der Erft 125

Abbildung 75:	Bestimmung der Messbootposition durch Visuelle Odometrie (blau) und Vergleich mit RTK-GNSS-Messungen (rot)	126
Abbildung 76:	Zugeordnete Feature Points eines Bildpaares beim SfM (Feature Matches)	127
Abbildung 77:	3D-Flächenmodell (Speicherbecken Borna) (Geo-DV)	129
Abbildung 78:	Höhenlinienmodell eines bergrechtlich gesperrten Böschungsbereiches mit Integration einer Sidescanaufnahme zum Erkennen von Rutschungsgefahren (Speicherbecken Borna) Geo-DV	130
Abbildung 79:	Sidescan-Sonarbilder der Rheinsohle	131
Abbildung 80:	Sidescan-Sonarbilder der Rheinsohle	132
Abbildung 81:	Sidescan-Sonarbilder der Rheinsohle	133
Abbildung 82:	Sidescan-Sonarbilder der Rheinsohle	134
Abbildung 83:	Sidescanaufnahmen des RiverBoats	135
Abbildung 84:	Mittels bildgebender und sonarbasierter Technik erzeugtes Digitales Höhenmodell des Flussverlaufes der Rur in Koerrenzig.	136
Abbildung 85:	Uferpunktwolke und Bathymetrie eines Sees an der Weser. Datengrundlage von Single-Beam Peilung und Überwassermappingeinheit	136
Abbildung 86:	Klassifikation von Uferbewuchs nach Höhe	137
Abbildung 87:	Wasserspiegelhöhendifferenz im Untersuchungsraum	138
Abbildung 88:	Änderung der strahlungsempfindlichen Parameter durch Anpassung der Vegetationsparameter im DWA-Gewässergütemodell. Tabatabaei 2018	139
Abbildung 89:	Echogramm von einem flachen Gewässerbereich mit vielen multiplen Reflexionen	140
Abbildung 90:	Echogramm einer Befahrung eines Sees mit starkem Aufkommen von Wasserpflanzen	140
Abbildung 91:	Ermittlung des Sohlsubstrats mittels am RiverBoat befestigten Unterwasserkameras.	141
Abbildung 92:	Überwasseraufnahmen an der Wurm zu zwei verschiedenen Zeitpunkten (LandyBug 5).	142
Abbildung 93:	360°-Panoramaaufnahme auf der Lippe (Lünen, 04.05.2016)	143
Abbildung 94:	Punktwolke eines Abschnitts der Lippe (Draufsicht)	143
Abbildung 95:	DGM einer Gewässersohle, abgeleitet ausschließlich aus der Aufnahmen einer einzelnen Unterwasserkamera (Überhöhte Darstellung)	146
Abbildung 96:	Bathymetrische Messung mit einem Linienlaser und einer Einzelkamera (Messprinzip)	146
Abbildung 97:	Unterwasserkamera mit Umhausung	147
Abbildung 98:	Unterwasserkulisse mit Passpunkten (Dimensionen in Millimeter)	148
Abbildung 99:	Erfassung von Laserlinie und Passpunkten mit der Unterwasserkamera	149
Abbildung 100:	Vorwärtsschnitt von Linienbeobachtungen für die intrinsische Kalibrierung	151
Abbildung 101:	Extrinsische Kalibrierung	152

Abbildung 102:	Vorbecken in der Versuchsrinne des IWW mit der für die Kalibrierfahrt platzierten Kalibrierkulissee.....	153
Abbildung 103:	Objektlinien G1 bis G7 auf den Teilebenen der Unterwasserkulissee	154
Abbildung 104:	Passpunkte über (violett) und unter Wasser (blau) im einheitlichen Koordinatensystem	155
Abbildung 105:	Gemessene Passpunkte in einem Bild der Unterwasserkamera	156
Abbildung 106:	Automatisch gemessene Laserprofilpunkte (rot)	157
Abbildung 107:	Vergleich zwischen Laserscan mit Tachymeter (grau) und Laserlinienauswertung (braun)	159
Abbildung 108:	Histogramm der räumlichen Abstände zwischen Punkten aus der Laserlinienauswertung zur Oberfläche aus der Laserscanaufnahme	160
Abbildung 109:	Der Instrumentenrahmen Xsens MTi-300 AHRS (links) und NovaTel SPAN CPT7 (rechts).....	162
Abbildung 110:	Strapdown-Trägheitsnavigationsalgorithmus zur Berechnung von Position und Orientierung aus Gyroskop- und Accelerometer-Signalen. Woodman, O. J. 2007	163
Abbildung 111:	Plot, der die durch Sensorfehler verursachte Positionsdrift zeigt.....	163
Abbildung 112:	Die Allan-Abweichungsdiagramme der statischen Daten von NovaTel-INS-Beschleunigungsmessern und -Gyroskopen	164
Abbildung 113:	Die Allan-Abweichungsdiagramme der statischen Daten von Xsens-INS-Beschleunigungsmessern und -Gyroskopen	165
Abbildung 114:	Die Welch PSD der statischen Novatel IMU	166
Abbildung 115:	Die Welch PSD der statischen Xsens IMU	167
Abbildung 116:	Schematischer, lose gekoppelter (LC) Erweiterter Kalman-Filter (EKF) Navigationsalgorithmus für ein INS. Groves 2013	168
Abbildung 117:	Schema der INS ECEF-Rahmenmechanisierung. Groves 2013.....	169
Abbildung 118:	Geräteaufbau für die Testfahrten	170
Abbildung 119:	RWTH-Testflugbahn 1 auf Google Earth (links) und UTM-Koordinaten (rechts).....	171
Abbildung 120:	RWTH-Testflugbahn 1; 3D-Position RMS-Fehler Vergleich w.r.t Tachymeter-Ground Truth.....	171
Abbildung 121:	RWTH-Testbahn 2 auf Google Earth (links) und UTM-Koordinaten (rechts).....	172
Abbildung 122:	RWTH-Testbahn 2 mit GNSS-Datenausfällen.....	172
Abbildung 123:	66 Sekunden (1,1 Minuten) GNSS-Ausfall; Endpositionsvergleich Novatel Solution-Kalman UTM (oben) und Novatel Solution-Kalman ECEF (rechts).....	173
Abbildung 124:	20 Sekunden (0,33 Minuten) GNSS-Ausfall; Endpositionsvergleich Novatel Solution-Kalman UTM (oben) und Novatel Solution-Kalman ECEF (unten)	174

Abbildung 125:	77 Sekunden (1,28 Minuten) GNSS-Ausfall; Endpositionsvergleich Novatel Solution-Kalman UTM (oben) und Novatel Solution-Kalman ECEF (unten)	175
Abbildung 126:	GNSS-Ausfall 1 (66 Sekunden); Endpositionsvergleich Bezug auf den Tachymeter Ground Truth	176
Abbildung 127:	GNSS-Ausfall 1 [66 Sekunden]; 3D-Positions-RMS-Fehler-Vergleich in Bezug auf die Tachymeter-Ground Truth	177
Abbildung 128:	GNSS-Ausfall 1 (20 Sekunden); Endpositionsvergleich in Bezug auf die Tachymeter-Ground Truth.....	178
Abbildung 129:	GNSS-Ausfall 2 [20 Sekunden]; 3D-Positions-RMS-Fehler-Vergleich in Bezug auf die Tachymeter-Ground Truth	179
Abbildung 130:	GNSS-Ausfall 1 (77 Sekunden); Endpositionsvergleich in Bezug auf die Tachymeter-Ground Truth.....	180
Abbildung 131:	GNSS-Ausfall 3 [77 Sekunden]; 3D-Positions-RMS-Fehler-Vergleich in Bezug auf die Tachymeter-Ground Truth	181
Abbildung 132:	GNSS-Ausfall 1 (66 Sekunden); Orientierungvergleich in Bezug auf die Waypoint software.....	182
Abbildung 133:	GNSS-Ausfall 2 (20 Sekunden); Orientierungvergleich in Bezug auf die Waypoint software.....	183
Abbildung 134:	GNSS-Ausfall 3 (20 Sekunden); Orientierungvergleich in Bezug auf die Waypoint software.....	184
Abbildung 135:	RiverView Tool 2017 v0.3	186
Abbildung 136:	ERM gekürzt	193
Abbildung 137:	Datenhaltung RiverView.....	196
Abbildung 138:	Panorama-Viewer	196
Abbildung 139:	Bildpyramide	197
Abbildung 140:	Aligned Tiling	198
Abbildung 141:	Tiefenverlauf der Signalstärke des Echolots für die Vermessung an der Rur im Vergleich alle Einzelversuche. Shariati 2019.....	202
Abbildung 143:	Überlagerung der Seitensichtsonarbilder mit einem Satellitenbild, rechts: mit GNSS eingemessene Uferpunkte mit Gegenüberstellung der im Seitensichtsonar zu sehenden Uferlinie (weisse Linie). Kasper 2019, unveröffentlicht.....	203
Abbildung 143:	Ausgewertete Uferpunkte des Untersuchten Gewässerabschnittes. Kasper 2019, unveröffentlicht.....	203
Abbildung 144:	Darstellung der semantischen Bildsegmentierung. Knollmann 2020 (unveröffentlicht)	204
Abbildung 145:	Unterwasseraufnahme des Makrophytenbestand einer stillgelegten Kiesgrube.....	204
Abbildung 146:	Echogramm mit intensivem Makrophytenbestand ohne/mit Markierung (Pflanzen sind grün markiert, Gewässergrund ist blau markiert), vereinfachte Darstellung	205
Abbildung 147:	Konzept des Webportals.....	207

Abbildung 148:	Screenshot des WebPortals, dargestellter Parameter Wassertiefe	209
Abbildung 149:	Screenshot des WebPortals, dargestellter Parameter Sohlhöhe über NHN	209
Abbildung 150:	Screenshot des Webportals. Entfernungsmessungsfunktion	210
Abbildung 151:	Screenshot des Webportals, dargestellter Parameter: interpolierte Sohlhöhe über NHN	210
Abbildung 152:	Screenshot des WebPortals, aufgeklappte Anzeige der MPS- Messwerte	211
Abbildung 153:	Webportal mit aufgeklapptem Pop-Up.....	211
Abbildung 154:	Verteilung der Antworten bezüglich der Implementierung von einer Google Street View (GSV) ähnlichen Funktion (links) und Augmented Reality (rechts).....	213
Abbildung 155:	Anteil der Teilnehmenden, die die abgebildeten Parameter in Echtzeit als relevant erachten	213
Abbildung 156:	Anteil der Teilnehmenden, die die abgebildeten Parameter als historische Daten als relevant erachten	214
Abbildung 157:	Verteilung der Antworten bezüglich der Zielgruppe der RiverView-App...	215
Abbildung 158:	Screenshots aus der RiverView-App. Links: Menü, Rechts: Karte.....	216
Abbildung 159:	Fernsehaufttritt am Rhein.....	217
Abbildung 160:	RiverView auf dem Stand des BMBF bei der IFAT 2018	219
Abbildung 161:	Zahlreiche Projekttreffen wurden durch das FiW organisiert.	220
Abbildung 162:	ReWaM-Workshop in Dresden.....	221

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Projektpartner von RiverView mit den entsprechenden Bearbeitern	46
Tabelle 2:	Positionierungsdaten des RiverBoats.....	57
Tabelle 3:	Parameter der Multiparametersonde MPS-D8, die für den Einsatz am RiverBoat angepasst wurde	63
Tabelle 4:	Ergebnisse einer MPS-Vergleichsmessung des IWW mit dem FiW in der Wurm (10.07.2017)	81
Tabelle 5:	Ergebnisse der INN-Messung auf der Rurtalsperre (20.07.2016)	83
Tabelle 6:	Übersicht zu technischen Spezifikationen der Multiparametersonde Qualilog-8	90
Tabelle 7:	Übersicht zur Systemdefinition der Gewässergüte-Parameter die mittels MPS erfasst werden.....	92
Tabelle 8:	Beschreibung der Multiparametersonden und Messverfahren der Sensorik.....	94
Tabelle 9:	Wassergüteparameter der MPS	102
Tabelle 10:	Ergebnisse der Positionsbestimmung der Panoramakamera im Passpunktfeld	112
Tabelle 11:	Kalibrierungsergebnisse aus der Lippe-Befahrung (300 Messzyklen, nur Misalignment).....	115
Tabelle 12:	Ergebnis der relativen Orientierung vom Bildkoordinatensystem der Panoramakamera ins Bildkoordinatensystem der Unterwasserkamera ...	157
Tabelle 13:	Messrauschen Allan-Abweichung für das INS Xsens MTi 300	165
Tabelle 14:	PSD-Steilheitswerte des Messrauschens für Xsens und NovaTel INS	166
Tabelle 15:	GNSS-Ausfall 1; Endpositionsabweichungen in Bezug auf das Tachymeter-Ground-Truth	176
Tabelle 16:	3D-Positions-RMS-Fehler in Bezug auf das Tachymeter.....	177
Tabelle 17:	GNSS-Ausfall 2; Endpositionsabweichungen in Bezug auf das Tachymeter.....	178
Tabelle 18:	3D-Positions-RMS-Fehler in Bezug auf das Tachymeter.....	179
Tabelle 19:	GNSS-Ausfall 3; Endpositionsabweichungen in Bezug auf das Tachymeter	180
Tabelle 20:	3D-Positions-RMS-Fehler in Bezug auf das Tachymeter.....	181
Tabelle 21:	RMS-Fehler GNSS-Ausfall 1 Bezug auf das Waypoint software	182
Tabelle 22:	RMS-Fehler für den GNSS-Ausfall 2 in Bezug auf die Waypoint-Software.....	182
Tabelle 23:	RMS-Fehler für den GNSS-Ausfall 3 in Bezug auf die Waypoint-Software.....	183
Tabelle 24:	Ergebnisse der biologischen Qualitätskomponenten	187
Tabelle 25:	Ergebnisse hydromorphologische Qualitätskomponenten(Morphologie) .	188
Tabelle 26:	Ergebnisse hydromorphologische Qualitätskomponenten (Durchgängigkeit und Wasserhaushalt)	189

Tabelle 27: Ergebnisse physikal.-chem. und chem. Qualitätskomponenten..... 190

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
API	Application Programming Interface
ASV	Autonomous Surface Vessel
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DGM	Digitales Geländemodell
DGNSS	Differential GNSS
DIM	Dense Image Matching
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DOP	Dilution of Precision
ERM	Entity Relationship Model
EUPL	Open-Source-Lizenz der Europäischen Union
EU-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
FONA	Forschung für nachhaltige Entwicklungen
Geo-DBS	Spatio-temporales Geodatenbanksystem
GIS	Geoinformationssystem
GLONASS	Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HMD	Head-Mounted Displays

IMU	Inertial Measuring Unit
INN	Impuls-Neutron-Neutron
INS	Inertial Navigation System
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LSTS	Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MPS	Multiparametersonde
NaWaM	Nachhaltiges Wassermanagement
NHN	Normalhöhennull
NMEA	National Marine Electronics Association
PPS	Pulse per Second
ReWaM	Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland
RMS	Root mean square
RTK	Real-Time-Kinematic (Echtzeitkinematik)
RÜB	Regenüberlaufbecken
SDK	Software-Development-Kit
SfM	Structure from Motion
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TRL	Technology Readiness Level
Turf	Total Unduplicated Reach and Frequency Analysis
UDP	User Datagram Protocol
USV	Unmanned Surface Vehicle
UTC	Universal Time Coordinated

VDOP	Virtual Dilution of Precision
VO	Visuelle Odometrie
VR	Virtual Reality
VRS	Virtual Reference Station

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) sieht vor, dass spätestens bis zum Jahr 2027 alle Gewässer in einen guten ökologischen und chemischen Zustand überführt werden sollen, wodurch das Monitoring von Fließgewässern zunehmend an Bedeutung gewinnt. Innerhalb der Europäischen Union werden für nur 8 % der Oberflächenwasserkörper alle, von der WRRL geforderten, hydro-morphologischen Daten im Monitoring einbezogen (Stand: 2016, EU-Kommission 2019, EG, 2000). Für die Erhebung der Gewässerstruktur findet, insbesondere für kleinere Gewässer, das Übersichtsverfahren der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) Anwendung (LAWA, 1999) Anwendung. Hier werden die Erhebungsgrößen über Luftbilder und bestehende Datenbanken klassifiziert. Häufig sind die bestehenden Informationen zum Zustand des Gewässers unzureichend, sodass eine Bewertung der Erhebungsgrößen unter der Wasseroberfläche nicht erfolgen kann. 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 Wasserproben genommen und anschließend in Hinblick auf Grenzwerte von Gewässergüteparametern analysiert. Ergänzend wird eine Gewässerbegehung durchgeführt.

Der gute Zustand eines Gewässers, nach WRRL, ist von vielen Einflussfaktoren abhängig. So beeinflussen organische, chemische sowie strukturelle Eigenschaften die Bedingungen für Flora und Fauna im bzw. am Gewässer, was die nachhaltige Verfügbarkeit der Wasserressourcen beeinträchtigt.

Die Aufnahme und das Monitoring von Gewässerparametern bildet eine wesentliche Grundlage für die Bewirtschaftung von Gewässern und somit für das Erreichen von Zielvorgaben. Dies dient insbesondere der Festlegung von Gewässermaßnahmen. Bisher erfolgen Datenerhebungen im Wesentlichen an stationären Messstellen oder in sogenannten Gewässerstrukturkartierungen, die häufig per Hand vorgenommen werden.

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) notwendig. RiverView® ist ein vom 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“ gefördertes Projekt. Dieses Projekt knüpft an den oben aufgeführten Wissens- und Erkenntnisdefiziten an, um anhand von unterschiedlichen Mess- und Untersuchungsansätzen mit mobilen, modularen

bootsgestützten Mess- und Erfassungssystemen Informationen über Gewässer zu sammeln und Daten ober- wie unterhalb der Wasseroberfläche bereitzustellen.

Damit wird eine neue, innovative Lösung angestrebt, die eine umfassende synoptische Datenerfassung, -visualisierung und -auswertung beinhaltet. Das Ziel ist, Fachplaner und Akteure der Wasserwirtschaft gezielt bei ihren vielfältigen Aufgaben zu unterstützen, nachhaltige Maßnahmen zu ermöglichen und die Öffentlichkeit bei der Gestaltung von Gewässern – im Sinne des Open Access – beteiligen zu können.

Das Trägerboot ist mit dem Ziel entwickelt worden, ferngesteuert kleine und mittlere Flussläufe zu befahren, dabei die Gewässertopographie sowie die Uferbereiche zu erfassen, chemische und physikalische Parameter zu erheben und diese Daten zeitlich und räumlich referenziert in einer Datenbank zu speichern. Die Datenbank kann über Datenschnittstellen in Flussgebietsgeoinformationssysteme integriert und über eine Web-Schnittstelle von interessierten Usern genutzt werden. Damit bietet das System, im Gegensatz zu herkömmlichen Monitoring-Systemen, erstmals die Möglichkeit ein synoptisches Gewässermonitoring im Längsschnitt durchzuführen und interdisziplinäre Prozesse im Gewässerlängsschnitt miteinander zu verknüpfen. Das System ist nicht nur für ein Routine-Monitoring vorgesehen, sondern auch zur Messdatenerfassung während und nach Hochwasserereignissen, zur Fernwirkungsanalyse von Gewässerbelastungen z. B. nach Schadstoffeinträgen, Störfällen oder Havarien, zur Erfassung von Gewässerdaten in unzugänglichen oder gefährlichen Gewässerbereichen (z. B. im Nahfeld von Wehren und Turbinen) und zur schnellen Messdatenerfassung als Grundlage für numerische Modelle.

Durch regelmäßige Einsätze des RiverBoats können Entwicklungen des Gewässerökosystems (Messreihen) sowie der Gewässerstruktur georeferenziert dargestellt, verglichen und bewertet werden. Hierdurch entsteht eine erhebliche Verbesserung des Prozessverständnisses und des Gewässermanagements sowie neuartige Möglichkeiten zur Bereitstellung innovativer Dienstleistungen.

Die zentralen anvisierten Ziele beziehen sich im Wesentlichen auf die beiden Themenfelder „Prozesse in Gewässerökosystemen“ und „Instrumente der Gewässerbewirtschaftung“ der BMBF-Bekanntmachung „ReWaM – Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland“.

Zeitlich und räumlich hochauflösende hydrodynamische, hydromorphologische, hydrochemische, hydrophysikalische und hydrobiologische Gewässerdaten bilden hierbei das Grundgerüst des innovativen Ansatzes. Eine nachhaltige Bewirtschaftung der Gewässer steht ebenfalls in einem übergeordneten Fokus.

Mit dem RiverView®-Projekt ist ein holistischer Ansatz für ein gewässerzustandsbezogenes Monitoring und Management geschaffen worden, der die zielgerichtete systematische Erhebung von synoptischen bildlichen, hydromorphologischen, - chemischen und -physikalischen Gewässerdaten ermöglicht und auf fünf Teilzielen basiert:

1. Entwicklung einer neuartigen, technischen Systemlösung mit modaler Architektur
2. Implementierung von automatischen Messsystemen zur Gewässergüteüberwachung
3. Entwicklung eines mobilen, multisensoralen Überwasser-Mappingsystems für automatische Bildanalyse und –messung
4. Implementierung eines Geodatenbanksystems
5. Prüfung des Systems auf Funktionstüchtigkeit

Das Projekt zielt darauf ab, durch effiziente und synoptische Datenerhebung und -bereitstellung einen wesentlichen Beitrag zu einem verbesserten Verständnis der Prozesse in Gewässerökosystemen (synchrone Erfassung komplexer Über- und Unterwasserdaten) zu liefern. Es werden innovative Instrumente zum Monitoring und zur Analyse der Gewässerprozesse zur Verfügung gestellt und (kosten-) effiziente Lösungen für ein nachhaltiges Wasserressourcen-Management präsentiert.

2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeit ist entsprechend der oben beschriebenen Aufgabenstellung und den dargestellten Hauptzielen durchgeführt worden. Die fünf elementaren Säulen des Projektes sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Hauptarbeitspakete gliedern sich in die Entwicklungen eines ferngesteuerten Messkatamarans (RiverBoat), eine optische und sonarbasierte 360°-Gewässerscanning-Unit (RiverScan) sowie die Realisierung von hydrophysikalischen und –chemischen Messsensoren (RiverDetect). Nachfolgend sind die umfangreichen Gewässerdaten in ein GIS-basiertes Gewässerdatenmanagementsystem (RiverAdmin) überführt worden und können über verschiedene Schnittstellen (RiverApp, WebPortal, Metadatenschnittstellen) den End-Nutzern aus Wasserwirtschaft, Industrie, Verwaltung und Bevölkerung zur Verfügung gestellt werden (RiverWorks).



Abbildung 1: Die fünf Säulen von RiverView®

Aus den aufeinander aufbauenden und sich gegenseitig bedingenden Arbeitspaketen kann der zeitliche und organisatorische Ablauf des Vorhabens abgeleitet werden.

Das Projekt besteht aus den Arbeitspaketen:

1. RiverBoat

Erarbeitung des Systemlayouts und hardware- sowie softwareseitige Implementierung der notwendigen Schnittstellen.

2. RiverScan

Aufbau einer modularen Überwassermappingeinheit zur Erfassung von hochwertigen Panoramaaufnahmen und der exakten Georeferenzierung des Gesamtsystems.

3. RiverDetect

Entwicklung von modular einsetzbarer Wasserqualitätssensorik zur mobilen Verwendung auf dem RiverBoat. Hier wurden Multiparametersonden (MPS) in das System integriert, sowie die Anwendung des Impuls-Neutron-Neutron (INN) Verfahrens zur Erfassung von Daten über die Sedimentzusammensetzung und –schichtung geprüft.

4. RiverAdmin

Um die mit den genannten Sensoren erfassten Daten konsistent und effizient speichern und abrufen zu können, wurde ein entsprechendes Datenbanksystem aufgebaut, welches über benutzerfreundliche Schnittstellen bedient werden kann.

5. RiverWorks

Aufbauend auf den erhobenen Daten, bzw. dem genannten Datenbanksystem wurden Kommunikations- und Disseminationstools entwickelt, um die erhobenen Daten sowie die gewonnenen Erkenntnisse einer breiten (Fach-)Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Über die genannten Arbeitspakete hinaus ergänzte eine Aufstockung die oben genannten Arbeiten wie folgt:

i. Unterwasserkamerabasierte Bathymetrie (RiverScan)

Das RiverScan-System wurde um ein Unterwasserkamerasystem ergänzt, welches entweder unter Nutzung der Prinzipien der visuellen Odometrie oder des Prinzips der Lasertriangulation eine geometrische Erfassung der Gewässersohle in sehr flachen Bereichen ermöglicht.

ii. Datenfusion zur Positionsschätzung (RiverScan)

Um die Positionierungsgenauigkeit des im Arbeitspaket RiverScan entwickelten GNSS auch im Falle einer Abschattung der Satellitensignale zu erhalten, wurde ein mathematisches Modell zur Fusion von Satelliten- und Inertialsensorik entwickelt.

iii. Erweiterung der Multiparametersensorik (RiverDetect)

Im Arbeitspaket RiverDetect wurde bereits eine Multiparametersonde in das RiverBoat implementiert. Zur Erweiterung des erfassbaren Parameterkanons, wurde das System weiterentwickelt und um eine zweite Multiparametersonde ergänzt.

iv. Entwicklung eines 360°-Bildviewers (RiverWorks)

Um die erhobenen Datensätze, speziell aber die aufgezeichneten Panoramabilder, niedrigschwellig zugänglich und präsentierbar zu machen, wurde ein 360°-Bildviewer entwickelt.

v. Entwicklung eines Marketingkonzeptes

Um einen langfristig wirksamen Transfer der Forschungsergebnisse in die (wasserwirtschaftliche) Praxis zu gewährleisten und abzusichern, wurde die Gründung eines Unternehmens vorbereitet. Diese Ausgründung soll sich dauerhaft mit den hier entwickelten Lösungen am Markt positionieren und damit einen Beitrag zur Weiterentwicklung der in der Wasserwirtschaft eingesetzten Methoden und Instrumente leisten.

Diese Arbeitspakete wurden unter Berücksichtigung der sich gegenseitig bedingenden Aufgaben bearbeitet. Modular entwickelte Sensorik wurde vor der Implementierung in das Gesamtsystem getestet, um einen effizienten Projektverlauf zu ermöglichen.

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

3.1 Prozesse in Gewässerökosystemen – aktuelle Zustandsbeschreibung und -bewertung

Geoinformationssysteme sind vielfach bei Verantwortlichen der lokalen Wasserwirtschaft im Einsatz und weisen einen hohen Datenbestand auf. Die Auswahl, die Dichte und die Frequenz der gespeicherten Parameter erfolgt nach den Regeln der Bestandsaufnahme im Rahmen der WRRL, dem jeweiligen Bedarf der datenerfassenden Institution sowie der zufälligen Verfügbarkeit weiterer Daten. Insbesondere Bilddaten werden bisher nicht flächendeckend systematisch erfasst bzw. verknüpft, obwohl sie direkt bzw. indirekt Rückschlüsse auf viele Gewässerparameter (z. B. morphologische und ökologische Parameter) und damit auf Veränderungen in und am Gewässer ermöglichen.

Die oftmals punktuellen Probennahmen sind selten repräsentativ für ein Gewässer. Es lassen sich Ursache-Wirkungs-Beziehungen, über die in einem Gewässer ablaufenden Prozesse, bei herkömmlicher Aufnahmehäufigkeiten und -dichte von Gewässern, nur schwer ableiten.

Die Grundlage für bisherige Planungsvorhaben ist somit ausbaufähig. Der kombinierte Ansatz der Wasserrahmenrichtlinie erfordert eine zeitliche und räumlich höhere Auflösung bei stofflichen Parametern, um Eintragspfade in Gewässer schneller und genauer identifizieren zu können.

In den biologischen Routineuntersuchungen, entsprechend den Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie, welche ca. alle 3 Jahre stattfinden (MUNLV, 2009a+b), wird der Zustand von Oberflächengewässern untersucht, was jedoch keine Aussage über die originären Belastungspfade ermöglicht.

Die in ca. zehnjährigen Zyklen durchgeführten Gewässerstrukturkartierungen erfassen Gewässer anhand einer Vielzahl von Parametern (Sohlsubstrat, Windungen, Ufergehölze etc.) in 100 - 1000 m Abschnitten. Die langen, zeitlichen Intervalle zwischen den Aufnahmen verhindern eine objektive Darstellung der Gewässerentwicklung. Auch stationäre Messstationen ermöglichen keine hochaufgelöste Verfolgung von Entwicklungsprozessen. In Nordrhein-Westfalen sind insgesamt 215 Landespegel verteilt, was in etwa einem Pegel pro 158 km² Fläche bzw. pro 232 km entspricht.

Die Gewässergüte wird an rund 15 Stationen und die Wassertemperatur an 89 Temperaturmessstationen gemessen (Quelle: LANUV¹). Erhebungen erfolgen oftmals sektorenspezifisch, was zu Konflikten zwischen Disziplinen wie Wasser-, Hochwasser- und Naturschutz führt. Eine

¹ <http://luadb.it.nrw.de/LUA/hygon/pegel.php>

gemeinsame Datengrundlage und Bereitstellung für Stakeholder ist eine Voraussetzung zur Schaffung von Synergien.

So sind in der Praxis Begehungen und Kartierungen nur mit hohem zeitlichen und finanziellen Aufwand möglich (z. B. Gewässerstrukturgütekartierung in NRW nach Erstkartierung im Jahr 2000 erst wieder in einer Aktualisierungskampagne von 2011 bis 2013). Eine vollständige, regelmäßige und zeitgleiche Aktualisierung der Daten ist (finanziell und personell) bislang nicht möglich, obwohl sie für die Zustandsbewertung, die darauf aufbauende Maßnahmenplanung und die Beweissicherung sowie eine Erfolgskontrolle auch mit Blick auf die geforderte Kosteneffizienz dringend erforderlich wäre. Veränderungen am Gewässer werden häufig nur „zufällig“ erkannt und eindeutige Ursache-Wirkungs-Beziehungen oder Kausalketten sind nicht nachvollziehbar bzw. können nicht rechtzeitig erkannt und berücksichtigt werden.

Gewässerökosysteme werden geprägt durch und interagieren kontinuierlich mit ihren Einzugsgebieten. Für eine Zustandsbeschreibung der Gewässerökosysteme ist diese Dynamik und Komplexität zu erfassen. Bei unregelmäßiger Beprobung (biologisch, physikalisch, chemisch) der Gewässer unterliegen aufgenommene Daten einer eingeschränkten „fachlichen Haltbarkeit“ sowie Verknüpfbarkeit bzw. Verfügbarkeit und können nur kurzfristig als Grundlage von Planungsvorhaben dienen. Weiterhin sind punktuelle Probenahmen zumeist weder zeitlich noch räumlich repräsentativ für das Gewässer. Bei einem zu kleinen Bilanzierungsraum aufzunehmender Randbedingungen kann keine multivariate Analyse zur fundierten Identifizierung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen erfolgen, was einen kosteneffizienten Schutz der Fließgewässer und deren Entwicklung grundsätzlich in Frage stellt. Diese Aspekte aufgreifend wird im Folgenden der Status Quo der Zustandsbeschreibung und -bewertung an ausgewählten Beispielen skizziert.

Praxiserfahrungen über die Wirkungen von Misch- und Niederschlagswasserbehandlungsanlagen im Gewässer veranschaulichen die aktuelle Problematik hinsichtlich Messdaten und deren Nutzung zur Aufstellung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Die Wasserrahmenrichtlinie fordert einen kombinierten Ansatz für die Verringerung von Gewässerbelastungen, der sowohl Emissions- als auch Immissionsuntersuchungen vorsieht. In diesem Zusammenhang drängen sich hinsichtlich der Probenahme die Fragen auf, wo – in Relation zur Lage der siedlungswasserwirtschaftlichen Einleitung – Proben im Gewässer zu ziehen sind, wann – vor, nach oder während eines Überlaufereignisses eines Behandlungsbauwerks – diese aufzunehmen sind und in welchen Zeitabständen diese zu wiederholen sind, um Entwicklungen der Gewässerökologie abzubilden. In der Praxis kann diesbezüglich konstatiert werden, dass die Positionierung der Probenahmestellen zumeist unabhängig von der Lage siedlungswasserwirtschaftlicher Sonderbauwerke erfolgt. Dies ist dadurch begründet, dass biologische Routineuntersuchungen zwar den Zustand der Oberflächengewässer, aber zumindest nicht originär die Beeinflussung der Gewässerbiozönose durch siedlungswasserwirtschaftliche Einleitungen do-

kumentieren sollen. Des Weiteren erfolgt i. d. R. auch keine zeitliche Koordinierung mit Überlastungen von Regenüberlaufbecken. Entscheidend für die Aufstellung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen ist jedoch der zeitliche Abstand zwischen den (Routine)-Aufnahmen der Gewässerökologie bzw. -biozönose. Finden diese nur halbjährlich bzw. jährlich statt, ist angesichts dynamischer Entwicklungen der Siedlungseinflüsse und des Gewässers eine fundierte Aufstellung einer Ursache-Wirkungs-Beziehung nicht möglich.

Wermter et al. (2013) beschreiben in ihren Ausführungen multivariate Analysen von 172 Beobachtungsstrecken, die keine aussagekräftigen statistischen Zusammenhänge zwischen Behandlungsintensität von Regenüberlaufbecken (RÜB) und dem ökologischen Zustand der Gewässer zuließen. Bei den multivariaten Analysen wurde neben siedlungswasserwirtschaftlichen Parametern auch die Landnutzung für eine Einzugsgebietsbeschreibung herangezogen, um die Beeinflussung der Gewässerökologie anhand des Makrozoobenthos zu bewerten. Die Landnutzung wurde durch ATKIS-Basis-DLM-Daten beschrieben.

Bei solch aggregierten Daten hängt die Aussagekraft stark vom Aufnahmedatum sowie der Objektartendefinition ab. Auch hier zeigt sich das aktuelle Manko des Stands der Praxis, dass aktuelle Gewässerprozess- und Zustandsbeschreibungen auf zeitlich wie auch räumlich gering aufgelösten Daten basieren. Weder der Oberflächenwasserkörper noch das Einzugsgebiet werden durch zeitlich und räumlich hochaufgelöste Daten repräsentiert, so dass eine integrierende Bewertung der Beeinflussung der Gewässerökologie – was für die Implementierung kosteneffizienter Maßnahmen zum Schutz des Gewässers zwingend erforderlich ist – aktuell nicht möglich ist.

Jenes Beispiel stofflicher und hydraulischer Belastungen aus Siedlungsgebieten gilt auch für hydrologische sowie morphologische Daten. Nach den Vorgaben der WRRL (EG 2000) sollen die Umweltziele der Gewässer („chemisch und ökologisch guter Zustand“ bzw. „gutes ökologisches Potential“) über biologische Komponenten sowie hydromorphologische und chemische unterstützende Komponenten bewertet und bis 2015 umgesetzt werden. Dieses Ziel ist überwiegend nicht erreicht worden. Neben praktischen Gründen wie Finanzierungsengpässen und geringer Flächenverfügbarkeit wurde auch mangelndes Prozessverständnis identifiziert (BMU, 2013). Einen maßgeblichen Einfluss auf die Gewässerökologie von Fließgewässern haben hydrologische Größen. Diese sind bisher bei der Bewertung des Gewässerzustands und somit auch beim Gewässerschutz kaum betrachtet worden (Leibundgut & Hildebrand, 1999; Leibundgut et al., 2001). Hoch- und Niedrigwasserereignisse formen die Gewässer nicht nur morphologisch und sedimentologisch durch Erosion und Sedimentation, sondern haben indirekt auch einen Einfluss auf Flora und Fauna, zum Beispiel durch die Dynamik im Kies-Lücken-Systemen, Prallhängen, Sedimentablagerung in Überschwemmungsflächen und weitere vielfältige Prozesse. Wenn zum Beispiel das Monitoring erst in einem Abstand von mehreren Monaten nach dem Hochwasser durchgeführt wird, können morphologische Änderungen ggf. nicht mehr erkannt bzw. zugeordnet werden.

Die ganzheitliche Bewertung von Fließgewässern inklusive hydrologischer Parameter zur Bewertung von Abflussmenge und -dynamik (vgl. Richter et al., 1996/1997) ist notwendig, um die Gewässerbewirtschaftung aus ökologischer Sicht nachhaltig zu gestalten. In der Praxis sind hydrologische Bewertungsindikatoren weiterhin nicht operationalisiert und damit nicht selbstverständlicher Bestandteil des wasserwirtschaftlichen Vollzugs. Werden zusätzlich Parameter für die hydrologische Charakterisierung von Fließgewässern eingeführt, ist für deren Abbildung der Einsatz hydrologischer bzw. hydraulischer Modelle erforderlich. Die Aussagekraft synthetischer Nachbildungen ausgewählter Indikatoren wird durch eine Kalibrierung der Modelle und Plausibilisierungen der Ergebnisse anhand von Messwerten gewährleistet. Ohne geeignete Messdaten sind modellgestützte Bilanzierungen von Strömen, qualitativ und quantitativ, zur funktions- und leistungsorientierten Bewertung von aquatischen Ökosystemen nicht aussagekräftig.

Finanzielle und personelle Ressourcen begrenzen in der Praxis zusätzlich Begehungen und Kartierungen, die nur mit hohem Aufwand möglich sind. Eine vollständige, regelmäßige und zeitgleiche Aktualisierung unterschiedlicher Datenbestände ist daher bislang nicht Stand der Praxis. Insbesondere Bilddaten werden bislang nicht flächendeckend systematisch erfasst bzw. verknüpft, obwohl diese indirekt und direkt Rückschlüsse auf viele Gewässerparameter und damit auf Veränderungen in und am Gewässer mit einhergehender Plausibilisierung ermöglichen.

Veränderungen am Gewässer werden daher häufig nur „zufällig“ erkannt und eindeutige Ursache-Wirkungs-Beziehungen oder Kausalketten nicht rechtzeitig identifiziert und bei einer etwaigen Maßnahmenplanung berücksichtigt werden. Ein Verständnis für die komplexen Vorgänge im Gewässer ist folglich nur spärlich zu entwickeln.

3.2 Gewässerbewirtschaftung – aktuelle Instrumente und Methoden

Am Beispiel der Gewässerstruktur wird deutlich, dass eine Vielzahl von Daten (48 Einzelparameter wie Sohlsubstrat, Windungen, Böschungsstrukturen, Ufergehölze usw.) durch Gewässerkartierer, die vor Ort tätig sind, erfasst werden. Die Erfassung erfolgt derzeit z. B. in einer aggregierenden Erfassung der Einzelparameter für 100 m- bzw. 1.000 m-Abschnitte für kleine und mittelgroße Fließgewässer bzw. große Flüsse. Eine Einschätzung der Fernwirkung einzelner Stressoren (z. B. Einleitungen aus Überlaufbauwerken, wasserbauliche Maßnahmen) kann demnach nur anhand der aggregierten und Punktmessungen erfolgen. Wenn die Anzahl der Messungen erhöht würde, würde der personelle Aufwand entsprechend steigen. Mangels zumeist begrenzter finanzieller Mittel der Gewässerunterhaltungspflichtigen führt dies dazu, dass der Einfluss von Gewässerbelastungen auf Basis von aggregierten Daten mit zu geringer und räumlicher Auflösung, nicht im Längsprofil (Fernwirkung) bewertet wird.

Darüber hinaus ist eine schnelle Zustandserkundung und Erfassung unter Beachtung der erforderlichen Sicherheitsbelange bei Havarien, wie beim Austritt toxischer Stoffe, nicht möglich.

Eine Automatisierung solcher Messroutinen – für ein situationsangepasstes Monitoring – steht aktuell noch aus.

Die Datenakquise und Informationsgenerierung erfolgt aktuell i. d. R. sektorenspezifisch. Zur Auflösung des Maßnahmenstaus (BMU, 2013) – zur Erreichung der nach WRRL geforderten Ziele – und zur (kosten-)effizienten Maßnahmengestaltung sind sektorübergreifende Ansätze zu forcieren (Rehfeld-Klein et al., 2009). Dies gilt nicht nur für die Erreichung der nach WRRL formulierten Ziele, sondern auch für Ziele des Natur- und Hochwasserschutzes. Linnenweber und Mirbach (2013) stellen Synergien und Konflikte zwischen diesen Teildisziplinen bzw. Schutzziele vor und resümieren, dass eine koordinierte Umsetzung große Potentiale biete. Dies betrifft sowohl die Identifizierung und Ausnutzung von Synergien als auch die frühzeitige Feststellung von Zielkonflikten. Ein solch koordiniertes, integriertes Vorgehen setzt eine gemeinsame Datenbasis und Datenerfassung voraus, auf die alle relevanten Stakeholder jederzeit niedrigschwellig zugreifen können.

Zur Datenerfassung kommen immer häufiger automatisierte Datenerfassungssysteme zum Einsatz. Die Durchführung von gezielten hydrographischen Untersuchungen und bathymetrischen Vermessungen beinhaltet eine Fülle von Einzelaufgaben, die durch den kombinierten Einsatz von unterschiedlichen Spezialgeräten gelöst werden. Gängige Praxis ist, dass die Anwender respektive Auftragnehmer aus dem reichhaltigen Marktangebot eine für die jeweilige Aufgabenstellung geeignete Gerätekonfiguration auswählen, selbständig die Hard- und Software-seitige Integration zu einem funktionierenden Gesamtsystem durchführen und selbiges dann auf ein für die Einsatzbedingungen geeignetes mobiles Trägersystem (Schiff, Boot etc.) installieren. Dazu bedarf es spezieller Fachexperten, die dann auch zur Handhabung der Gerätschaften in der praktischen Messdurchführung präsent sein müssen.

Der Einsatz bemannter Messfahrzeuge hat sich in größeren Gewässern (befahrbare Seen und Flussläufe, Küstengewässer und offenes Meer) gut bewährt. Er ist jedoch mit einem vergleichsweise hohen personellen, technischen und logistischen Aufwand verbunden (kostenintensiv) und für diverse andere Einsatzgebiete (kleinere bzw. schwer zugängliche Gewässer, Sperrzonen, nicht schiffbare Zuläufe, Flussnebenarme etc.) nicht geeignet. Hierfür zeichnen sich neuerdings interessante Alternativen auf der Basis von unbemannten Wasserfahrzeugen ab. Als unbemannte Wasserfahrzeuge werden Boote bezeichnet, die autonom oder ferngesteuert und ohne eigene Mannschaft operieren. In der Fachwelt sind die englischsprachigen Begriffe „Unmanned Surface Vehicle (USV)“ oder „Autonomous Surface Vessel (ASV)“ etabliert, die oftmals auch als Synonyme verwendet werden.

Die mobile terrestrische Datenerfassung erfolgt über kinematische, photogrammetrische Erfassung mittels sogenannter Mobile-Mapping-Systeme, die für den professionellen Einsatz im Rahmen der Straßenraumerfassung (z. B. EagleEye Erfassungssystem) oder auch zur Datenerfassung für die EarthViewer von Google (StreetView) bzw. Microsoft (StreetSide) in ähnli-

cher Bauart (z. B. TopCon IP-S2) verwendet werden. Die Systeme bestehen im Kern aus mehreren hochwertigen Kameras zur 360°-Rundumsicht sowie ggf. geodätischen Laserscannern, auf speziellen Trägersystemen zur kinematischen 3D-Erfassung. Die Georeferenzierung der Daten wird mit geodätischen DGNS-Empfängern sowie Inertialmesssystemen durchgeführt. Aufgrund der Größe und des Gewichts der Systeme werden diese auf Kraftfahrzeugen montiert.

Von Bojen getragene Wasserqualitätsmesssysteme werden von einigen Herstellern aus Deutschland und den USA angeboten. Diese sind jedoch für den stationären Einsatz in Flüssen, Seen oder im Offshore-Bereich konzipiert und entsprechend montiert bzw. verankert. Für Anwendungen im Offshore-Bereich werden zudem sowohl ferngesteuerte als auch automatisch navigierende Geräteträger und Unterwasserfahrzeuge eingesetzt, die zur Ermittlung von bestimmten Wasserqualitätsparametern dienen (Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, Trübung und Chlorophyll).

Die im Hause SEBA Hydrometrie standardmäßig hergestellten MPS zur Erfassung unterschiedlicher Wasserqualitätsparameter stehen in drei unterschiedlichen Grundvarianten zur Verfügung:

- MPS-D 3 zur Aufnahme von einem Sensor für Druck (zur Tiefenermittlung), einem Sensor für Wassertemperatur sowie einem weiteren Sensor aus dem MPS-Baukastensystem
- MPS-D 8 zur Aufnahme von insgesamt acht unterschiedlichen hydrochemischen bzw. hydrophysikalischen Sensoren entsprechend der Vorgaben aus der Aufgabenstellung
- MPS-D 16 zur Aufnahme von insgesamt 16 unterschiedlichen hydrochemischen bzw. hydrophysikalischen Sensoren entsprechend der Aufgabenstellung.

Grundsätzlich können Sensoren für die Messung folgender Parameter in den oben genannten Grundtypen eingebaut werden: Wasserstand, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Konzentration gelöster Stoffe, Salinität, Dichte des Wassers, Sauerstoffgehalt, Sauerstoffsättigung, pH-Wert, Redoxpotential, sowie die Konzentration von Ammoniak, Nitrat, Chlorid, Ammonium, Natrium, Calcium, Fluorid, Kalium, Chlorophyll-a und Cyanobakterien.

An verschiedenen Stellen wurden Systeme für eine mobile bzw. teil-autonome Datenerfassung an Gewässern entwickelt. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre Einsatzbereiche und die verwendete Sensorik. Im Hinblick auf die Beschreibung der Überwassersituation basieren die Messtechniken im Wesentlichen auf bis zu drei verschiedenen Erfassungssensoren. So nutzt beispielsweise Airborne Hydromapping (Airborne Hydromapping GmbH, 2018) ein Laserscanning-System (LiDAR, Light Detection and Ranging) zur Datenerfassung. Beim RiverSurveyor® werden hingegen akustische Verfahren verwendet und bei SAMBA (Smartphonebased aquatic monitoring robotic platform) erfolgt die Datenerfassung kamerabasiert

(Wang et al., 2015). Das Verfahren RIVERWATCH erfasst 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 (Kapitel 5.5). Mapping-Einheiten auf dem Wasser werden in Van Rens et al. (2007) und Alho et al. (2009) beschrieben, 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. Die in Bröder et al. (2010) beschriebenen Forschungsergebnisse haben die wohl weitreichendsten Gemeinsamkeiten mit dem Forschungsprojekt RiverView. Im Unterschied zu RiverView® kommen dort allerdings terrestrische Laserscanner zum Einsatz.

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).

3.3 Überblick der entwickelten Lösungen aus RiverView®

Im Ergebnis aus den o.g. technischen Randbedingung, dem identifizierten Datenbedarf und vorhandenen technischen Lösungen wurde in RiverView ein ganzheitlicher Ansatz entwickelt, um die beschriebenen Probleme zu adressieren.

3.3.1 Trägerplattform RiverBoat

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 (Abbildung 2, 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. Das Messboot Nelli 2 (Abbildung 2, rechts) 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.



Abbildung 2: Das RiverBoat (links) und das Messboot Nelli 2 (rechts) des IWW RWTH Aachen

3.3.2 RiverScan - Überwassermappingeinheit

Für die bildhafte Erfassung des Gewässers oberhalb der Wasseroberfläche dient eine Überwasser-Mapping-Plattform. Das Grundgerüst 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-Global Navigation Satellite System (GNSS) und einer Micro Electro-mechanical System (MEMS)-basierten Inertialmesseinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) (vgl. Kapitel 5.5) ausgestattet ist. Beim verwendeten GNSS handelt es sich um ein geodätisches DGNSS (Differential GNSS), welches die Verarbeitung von Korrekturdaten eigener Referenzstationen oder – wie im vorliegenden Fall – eines Korrekturdatendienstes und basierend darauf die präzise Messung im Real Time Kinematik (RTK)-Modus (vgl. z. B. Bauer 2018) ermöglicht.

3.3.3 RiverDetect - Wassergütemessungen

Zwischen den beiden Schwimmkörpern des RiverBoats werden zwei MPS mitgeführt, um Wasserqualitätsparameter wie Temperatur, Sauerstoffgehalt, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotenzial, Trübung und die Konzentration von Nitrat, Ammonium und Chlorophyll kontinuierlich während der Messfahrt zu erfassen (Abbildung 3). Über einen Trailer, der an dem RiverBoat zusätzlich befestigt werden kann, wird das Mitführen einer Impuls-Neutron-Neutron (INN) Sonde ermöglicht, mit welcher die Zusammensetzung des Gewässeruntergrundes bis in mehrere Meter Tiefe kontinuierlich ermittelt werden kann. Weiterhin ermöglicht eine



Abbildung 3: Das RiverBoat mit zwei Multiparametersonden

Winde am Trailer, Tiefenprofile der Gewässergüteparameter aufzuzeichnen, z. B. in Staubeichen von Wehren, 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.

3.3.4 Modularität des Gesamtsystems

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

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 wurden 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 weiterzuentwickeln sowie andererseits eine große Anzahl synoptischer Daten in verschiedenen Gewässern bei unterschiedlichen Randbedingungen (Wetter, Wasserstand, Bewuchs etc.) zu erheben, zu analysieren und als Informationen für wasserwirtschaftliche Anwendungen aufzubereiten.

3.3.5 Einsatzbereiche der Systeme

Hierbei eignet sich das RiverBoat für den Einsatz in kleinen bis mittelgroße 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 ist. Eine Einstiegsrampe für den Einlass der Trägerplattform ist nicht notwendig, jedoch sollte das Gewässer begehbar sein. Bei einer geringen Tiefe bis etwa einem 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 min-

destens 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.

3.3.6 Technische Ausgestaltung und Entwicklung des Systems

Software und Konfiguration des Gesamtsystems

Die Erfassung von zeitlich und räumlich hochaufgelösten Gewässerdaten erforderte neben der strengen Kalibrierung der Überwasser- und Unterwasser-Mapping-Einheiten auch die Entwicklung 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 Nutzarmachung und Dissemination der Daten an fachspezifische Nutzergruppen. Nachfolgend wird auf die wichtigsten technischen Eigenschaften des Monitoring-Systems eingegangen.

Datenübertragung

Über die Software Neptus, welche zur Steuerung von unbemannten Messbooten vom Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática (LSTS) 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. Unter Nutzung der von den Sensorherstellern bereitgestellten 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 werden können. Die Daten werden kontinuierlich auf dem Messrechner des Trägerboots gespeichert. Die Synchronisation der Sensoruhren (z. B. IMU) erfolgt dabei soweit wie möglich über das PPS (Pulse per Second)-Signal des GNSS-Receiver. 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.

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.

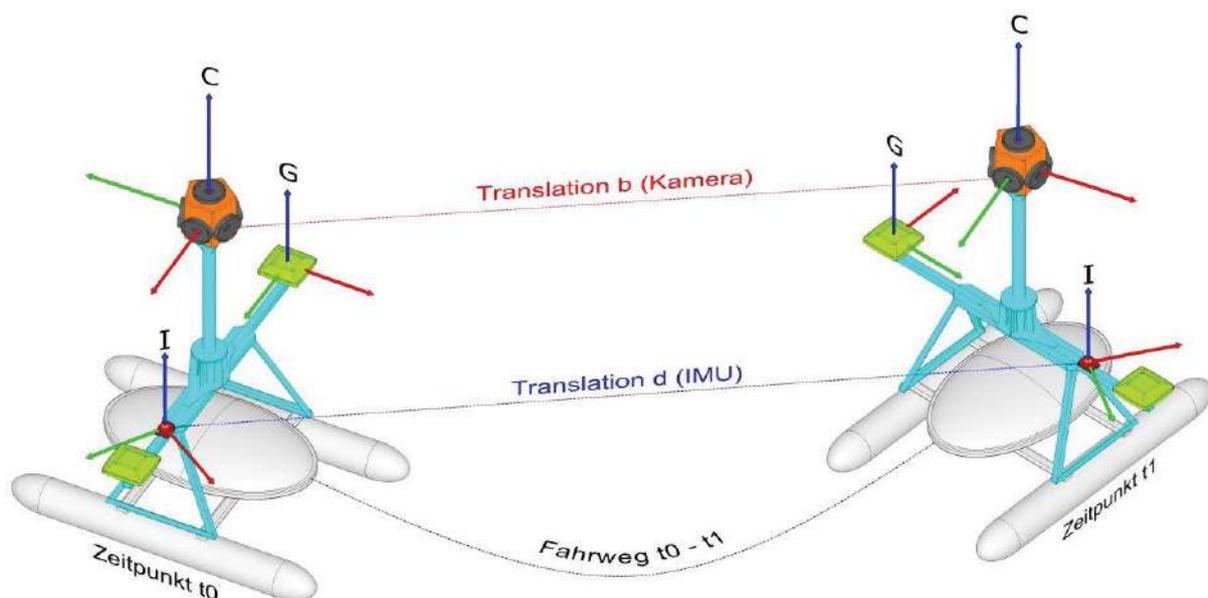


Abbildung 4: Definition der Sensorkoordinatensysteme und Kalibrierung der Überwasser-Mapping-Einheit

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 4 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). Details hierzu sind in Kapitel 5.5.4 zu finden.

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 montierte 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 PostgreSQL und dessen Erweiterung PostGIS die Rasterdatenbank Rasdaman 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.

In Analogie zu Google's „Street View“ wurde 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, Sauerstoff-Gehalt abgerufen und visuell sowie textlich dargestellt werden.

3.3.7 Postprocessing der erfassten Daten

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 PED) sowie besser als 1° (Angabe Datenblatt GNSS-Receiver) 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 ViPP), also eine ausschließlich satellitenbasierte Nachbearbeitung, da die Mapping-Einheit eine Kamera mitführt. Zum anderen kann das Prinzip der Visuellen Odometrie (VO) angewendet werden. Unter VO versteht man die Bestimmung der Eigenbewegung eines Trägerfahrzeuges anhand von einer oder mehreren Kameras (Nister et al., 2004; Milella & Siegart, 2006; Forster, 2016). Durch die hohe Bildichte 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 auch die Orientierungsdaten der Aufnahmen und damit Angaben zu Positionen und Trajektorien berechnet (Szeliski, 2011), also letztlich die Posen des Fahrzeugsystems. Diese Posen ermöglichen wiederum die Überbrückung von GNSS-Signalunterbrechungen, vor allem wenn die Beschleunigungsdaten zu stark unter den Drifteffekten der MEMS-IMU leiden.

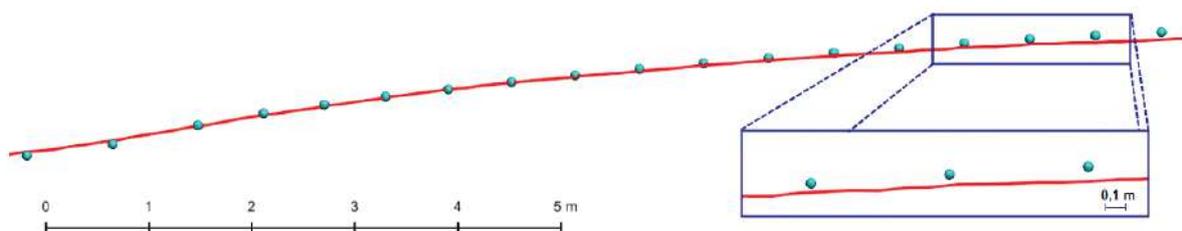


Abbildung 5: Vergleich der Positionsbestimmung durch Visuelle Odometrie (blaue Punkte) und RTK-GNSS (rote Linie) inkl. Detailausschnitt

Für die Beurteilung der Genauigkeit der visuell-odometrischen Positionsbestimmung wurden Befahrungsdaten von Gewässerabschnitten an der Erft und an der Rur untersucht. Abbildung 5 zeigt am Beispiel der Rur die Positionierungsergebnisse aus GNSS und Bilddaten im Vergleich. Der Gewässerabschnitt ist durch einen mittelhohen Uferbewuchs gekennzeichnet, sodass beide Positionierungsverfahren (GNSS und VO) anwendbar sind und eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist. 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 (Root Mean Square, 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 (Abbildung 5 zeigt nur einen Ausschnitt). Die hohen Genauigkeiten gelten 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 meist jedoch gute GNSS-Bedingungen vor, sodass i. d. R. keine Überbrückungen von GNSS-Signalausfällen, mit Ausnahme von Brücken, für die wiederum VO oder aufgrund des kurzen GNSS-Ausfalls auch die IMU-Messdaten genutzt werden können, erforderlich sind. Die VO kann also, in der hier betrachteten Anwendung, die GNSS-Lücken nicht ausnahmslos, aber in vielen Fällen als alternative Georeferenzierungsmethode kompensieren. Zu bedenken ist, dass das Verfahren gegenwärtig seine Dienste nur im Zuge der Datennachverarbeitung, d. h. nicht in Echtzeit, leistet. Dies stellt, durch die Möglichkeit der ferngesteuerten Navigation, keine grundsätzliche Nutzungseinschränkung des Bootes dar.

Gewässergüte- und Echolotdaten

Die Übertragung der mittels MPS und Echolot aufgenommenen Daten erfolgt über eine WLAN-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 *R* (statistische Datenanalyse) oder Microsoft Excel, als auch in Geographischen Informationssystemen wie ArcGIS oder QGIS eingelesen und weiterverarbeitet werden.

Ein wichtiger Schritt beim Datenprocessing ist die Datenbereinigung („data cleaning“). Dabei werden die erhobenen Daten auf Ausreißer oder Lücken überprüft. In diesem Teil 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 (2008)), die tatsächliche Anzahl der empfangenen GPS- und GLONASS-Satelliten und die Qualität der Korrekturdaten (RTK) dienen als Evaluationskriterien. Anschließend erfolgt eine Korrektur der Wasserspiegellage über Normalhöhennull (m NHN), 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.

Im nächsten Schritt erfolgt die Datenanalyse, die sowohl statistisch, als auch visuell durchgeführt werden kann. Das Ziel ist es 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 standardisierte Verfahren (z. B. Standardabweichung, Quartilsabstand, Bestimmtheitsmaß) entwickelt und in eine umfassende Analyse eingebunden. Diese Analyse wurde unter der Nutzung zahlreicher Datensätze unterschiedlicher Größe durchgeführt. Die entstandenen 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 6 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. Aufgrund methodischer Unterschiede zwischen Echolotpeilung und Höhenmessung mittels Peilstange, liegt die Vermutung nahe, dass die Differenzen aus einer Schlammauflage und damit einhergehenden Eindringung des Messstabs resultieren (tendenziell liegen die Höhenwerte der terrestrischen Vermessung etwas tiefer).

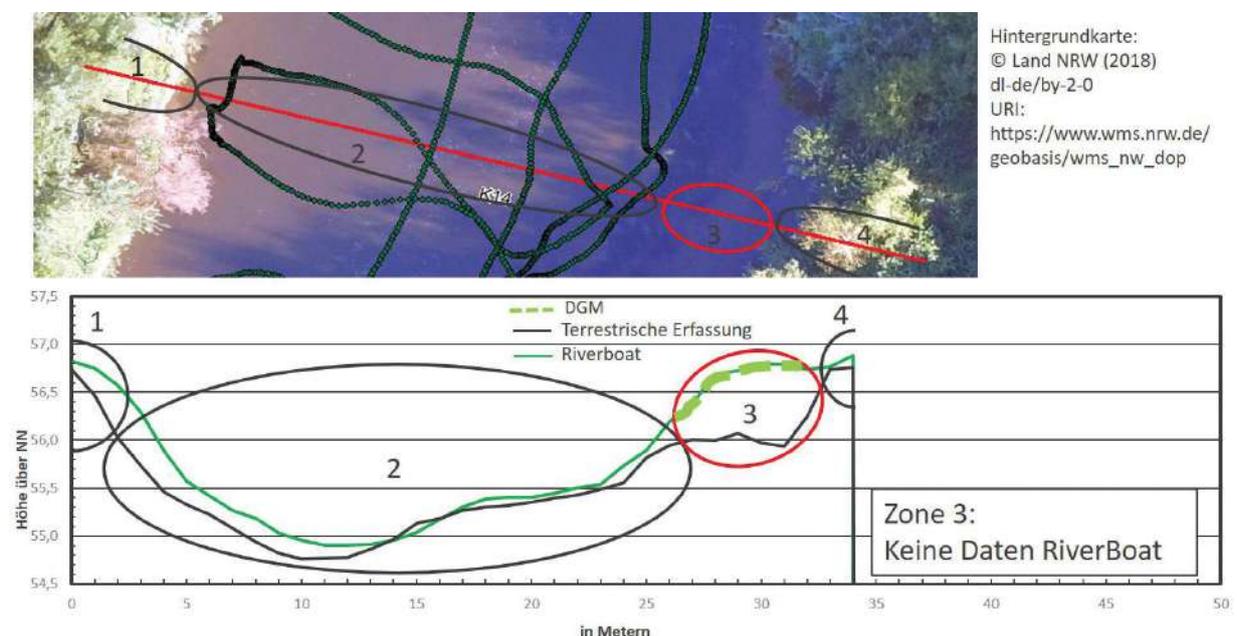


Abbildung 6: Vergleich von Querprofilen an der Rur bei Körrenzig

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 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 PHIDIAS (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 Projektsszenen 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 (Kapitel 3.3.7), bildbasierte 3D-Punktwolken zu generieren (Abbildung 7). 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).



Abbildung 7: Bildbasierte Punktwolke berechnet aus den Panoramaaufnahmen (Erft)

Datenaufbereitung für das Webportal

Die Sensordaten werden 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.

3.3.8 Nutzungsmöglichkeiten der RiverView®-Daten

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.

Gewässertopographie

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)-Daten 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 ein Unterwasserkamera-System mit einem Linienlaser entwickelt. Dieses ermöglicht die Erfassung der Sohlgeometrie auch in sehr flachen Bereichen. Dieses Verfahren ist im Detail in Kapitel 5.6 beschrieben. Das System ist in Abbildung 8 dargestellt.

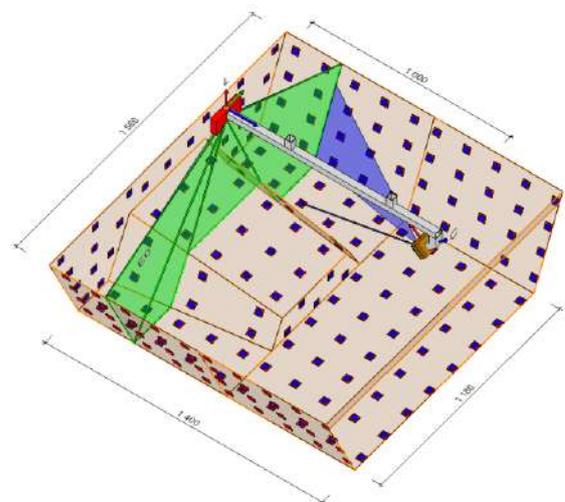
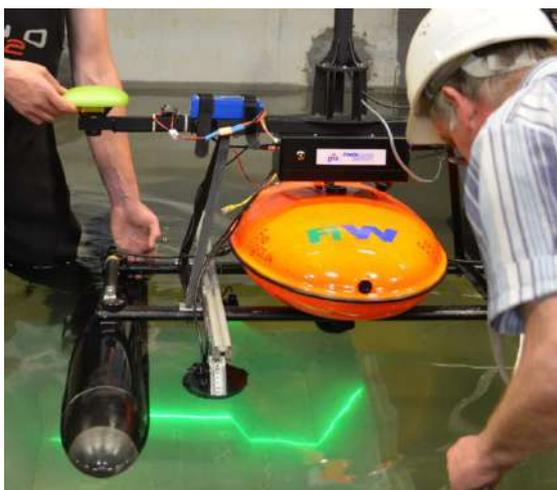


Abbildung 8: Das Kamera-Linienlaser-System während den Kalibrierungsarbeiten. Links: das RiverBoat mit angebautem Kamera-Laser-System. Rechts: die zur Kalibrierung angefertigte Kalibrierkulissee.

Hydromorphologie

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 WRRL. Insbesondere die Generierung von Tiefeninformationen zur Er-

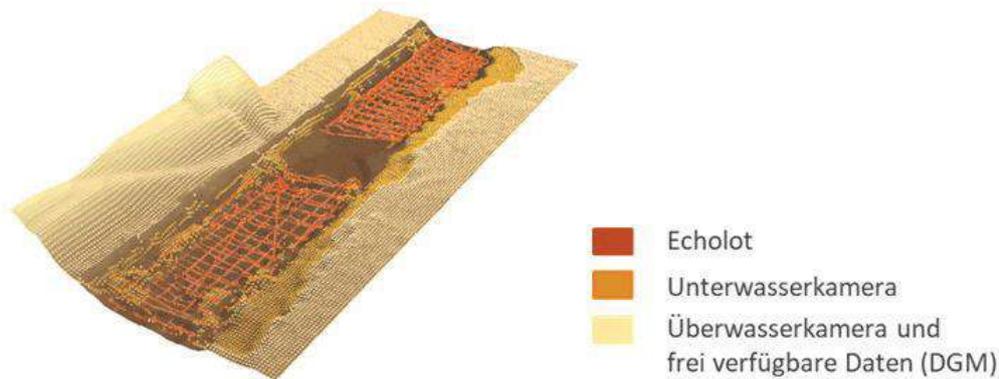


Abbildung 9: Durchgängiges digitales Geländemodell (DGM) eines Gewässers mit farblicher Differenzierung der unterschiedlichen Informationsquellen.

stellung 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 9 zeigt ein DGM eines Gewässerabschnitts, farblich dargestellt sind die jeweiligen, zur Erzeugung des DGM, verwendeten unterschiedlichen Datenquellen.

Physikalisch-chemische Gewässergüte

In Verbindung mit der mobilen Datenerfassung können mit der MPS räumlich und zeitlich hochaufgelöste Gewässergütedaten erfasst werden. So kann bspw. die Durchmischung nach Einleitungen oder Zuflüssen anhand einer Temperaturfahne dargestellt werden (Abbildung 10). 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 in diesem Bereich erst ca. 3 km flussabwärts einstellt.

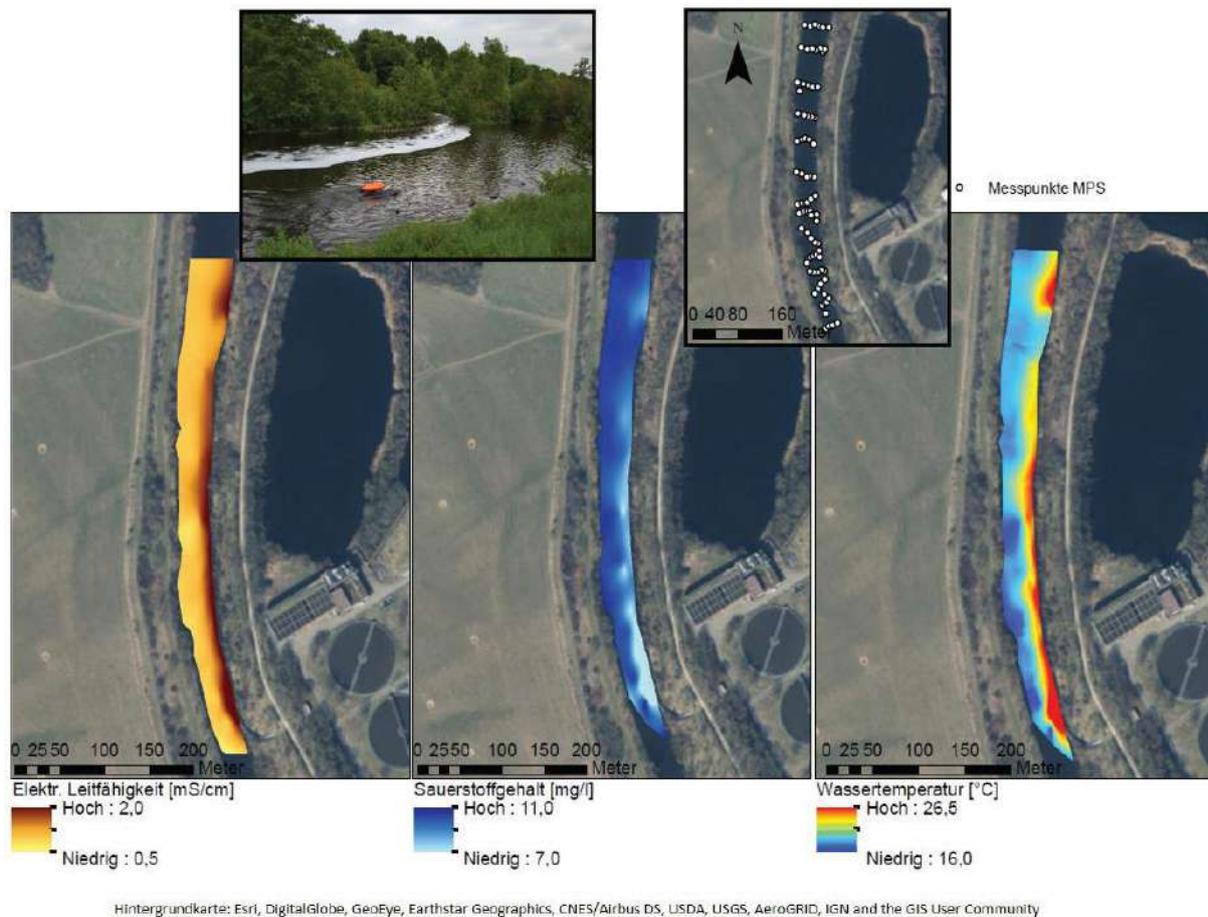


Abbildung 10: Ergebnisse einer MPS-Messung an der Einleitung einer Kläranlage in die Rur

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 .

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 sind.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde daher eine neue Methode zur Ermittlung der Ufervegetation mit einem höheren Detaillierungsgrad entwickelt und die Anwendbarkeit der angepassten Parameter in einer Sensitivitätsanalyse am Beispiel des DWA-Gewässergütemodells 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.

Visualisierung der Ergebnisse

Ein weiteres Teilziel des Projektes war 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. 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 (Querbauwerke, Einleitungen und Zuflüsse) 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 mapbox (Kartendarstellung), der Softwarebibliothek „Total Unduplicated Reach and Frequency Analysis - turf“ (räumliche Funktionen) und dem React-Framework, welches 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 zusätzlich 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. Eine detailliertere Beschreibung des Konzeptes und der Umsetzung findet sich in Kapitel 5.10.2.

Virtual Reality (VR) erlaubt es dem Nutzer in Echtzeit in computergenerierte 3D-Umgebungen einzutauchen und aktiv mit diesen 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 (Unity) 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.



Abbildung 11: Ein Ausschnitt aus einer gerenderten VR-Szene an der Lippe auf dem die Punktwolke, Panoramaspähre und Positionsmarker dargestellt sind.

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 (Abbildung 11).

3.4 Zusammenfassung

Im Rahmen des BMBF-Projektes RiverView® wurde die Grundlage für ein nachhaltiges Gewässermanagement kleiner und mittlerer Fließgewässer geschaffen. Der auf der Vielseitigkeit der eingesetzten mobilen Messtechnik basierende holistische Ansatz von 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 in Abschnitten mit ungestörtem Satellitenempfang (d. h. keine dichte Vegetation oder Brückenbauwerke) mit Genauigkeit im Zentimeterbereich. 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 Gewässerrenaturierungen und die Entwicklungen der Gewässerqualität werden damit genauso beschreibbar wie die Bereitstellung von Informationen für Gewässernutzer, beispielsweise im Wassersport 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 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.

Weiterentwicklungen der Mapping-Plattform fokussierten sich 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 (siehe Kapitel 5.7).

Bezüglich der topographischen Aufnahme der Gewässersohle wurde 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 (Kapitel 5.6).

4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die wichtigste Zusammenarbeit bestand aus den am Forschungsprojekt beteiligten Partnern und deren Mitarbeitern, wie in der untenstehenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 1: Projektpartner von RiverView mit den entsprechenden Bearbeitern

Institution	Bearbeiter
DBM – Dr. Buckup e.K.	Dr. Klaus Buckup
Emschergenossenschaft / Lippeverband	Rolf Kemper-Böninghausen
EvoLogics GmbH	Dr. Rudolf Bannasch Dr. Ilja Lange Thomas Tietz
Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V.	Dr.-Ing. F.-W. Bolle Dr.-Ing. Gesa Kutschera Dr.-Ing. Paul Wermter Dr.-Ing. Ralf Engels Dr.-Ing. Wolfgang Kirchhof Dr. sc. F.-A. Weber Dorothea Weingärtner Michaela Stecking David Wehmeyer Marie-Luise Jagow Sina Tabatabaei Lukas Klatt Katharina Kasper Tomas Sivicki
GEO-DV GmbH	Gerd Heller

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RTWH Aachen University	Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf Dr. rer. nat. Theide Wöffler Christiane Eichmanns
Lehrstuhl für Bauinformatik und Geoinformationssysteme (gia) der RWTH Aachen University	Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach Dr.-Ing. Raimund Schwermann Christoph Effkemann Nicole Hein Shakti Gahlaut
SEBA Hydrometrie GmbH & Co. KG	Markus Sattler Felix Grimmeisen Dr.-Ing. Issa Hansen
Wasserverband Eifel-Rur	Dr. Antje Goedeking

Darüber hinaus wurde noch mit weiteren Stellen zusammengearbeitet. Hier sei insbesondere das Vernetzungs- und Transfervorhaben ReWaMnet, geleitet von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zu nennen. Hier wurden zahlreiche Workshops organisiert und es hat regelmäßiger Erfahrungsaustausch stattgefunden. Mehr Informationen hierzu sind bspw. unter <https://bmbf.nawam-rewam.de/rewam/das-ernetzungs-und-transfervorhaben-rewamnet/> zu finden.

5 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

5.1 RiverView® - Gewässerzustandsbezogenes Management und Monitoring

Im Dezember 2019 wurde das BMBF-Forschungsprojekt „RiverView®“ durch ein Forschungskonsortium unter der Leitung des Forschungsinstituts für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RTWH Aachen (FiW) e.V. abgeschlossen. Das Forschungsteam bestand aus dem Geodätischen Institut (gia) und dem Institut für Wasserwirtschaft und Wasserbau (IWW) der RWTH Aachen University, den Partnern aus der Wirtschaft EvoLogics GmbH, SEBA Hydrometrie GmbH & Co. KG, DBM Dr. Buckup e.K. und Geo-DV GmbH sowie den Praxispartnern Wasserverband Eifel-Rur und Emschergenossenschaft/Lippeverband.

RiverView® ist eines von 15 Verbundprojekten in der BMBF-Fördermaßnahme „Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland“ (ReWaM). ReWaM ist Teil des BMBF-Förderschwerpunktes „Nachhaltiges Wassermanagement“ (NaWaM) im Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA3).

5.1.1 Hintergrund

Der Schutz, und wo erforderlich, die (Wieder-)Herstellung von ökologisch intakten Gewässern ist ein übergeordnetes Ziel in Europa. Technisch formuliert meint dies die Herstellung eines guten ökologischen wie chemischen Zustands der Gewässer. Mit Hilfe der Wasserrahmenrichtlinie soll dieser Zustand in allen Mitgliedstaaten, durch Bestandsaufnahmen, Überwachungsprogramme und Bewirtschaftungspläne, erreicht werden. Dabei sollen die Gewässer weiterhin für verschiedene Nutzungen, wie die Schifffahrt, den Tourismus aber auch der Energiegewinnung und der Landwirtschaft, zur Verfügung stehen. Diese, teils kontroversen, Ansprüche stellen die Zielerreichung eines guten ökologischen wie chemischen Zustands der Gewässer vor besondere Herausforderungen.

Eine gute Informations- und Datengrundlage ist für den Gewässerschutz nicht nur erwünscht, sondern unbedingt notwendig. Das RiverBoat, ein kleiner unbemannter Messkatamaran, dient als Trägerplattform zur Aufnahme von Gewässerdaten und verfügt hierzu über eine sowohl modulare als auch exakte Sensorik. Das Boot liefert somit eine effektive Ergänzung zu bestehenden Monitoringverfahren, da zeitlich und räumlich hochaufgelöste Daten effizienter als mit herkömmlichen Methoden erhoben werden können.

Die in RiverView® entwickelten Ergänzungen zu bestehenden Monitoringverfahren zielen bisher auf die Befahrung von kleinen und mittelgroßen Fließgewässern sowie schwer zugänglicher Gewässerabschnitte ab, bei denen eine Erfassung mittels herkömmlicher Monitoringverfahren nur mit großem Aufwand erfolgen kann. Folglich liefert das RiverBoat die Datenbasis

für die Ableitung von Aussagen über den ökologischen und chemischen Zustand der Gewässer und stellt eine detaillierte, ergänzende Planungsgrundlage in Hinblick auf die WRRL dar.

So können durch Echolot, Multiparametersonde und verschiedene Kamerasysteme die Formen der Fließgewässer und deren Umgebung erfasst werden. Zum einen können Daten des limnischen Ökosystems detektiert werden, zum anderen können anthropogene Auswirkungen auf die Gewässergüte, etwa durch Einleitungen von Kläranlagen, der Industrie oder Landwirtschaft, mit dem RiverBoat verfolgt werden. Mit dem Einsatz von Multiparametersonden werden Veränderungen der Qualitätsparameter, wie Temperatur, Salzgehalt, pH-Wert oder Ammonium- und Nitratwert, in Echtzeit überprüft. Mit einer 360°-Panoramakamera werden Überwasseraufnahmen gemacht, die unter anderem zur Vermessung des Umfelds dienen und anschließend mit Web-Anwendungen oder Virtual Reality/Augmented Reality-Lösungen sichtbar gemacht werden. Diese stehen nicht nur Experten, sondern auch interessierten Bürger/-innen zur Verfügung.

5.2 RiverBoat - Die Trägerplattform des Systems

Das Grundkonzept von RiverView umfasst Hard-, Software und Methoden zur integrierten Erfassung, Analyse und Bereitstellung von umfassenden Gewässermonitoringdaten. Das Herz dieses Konzepts beruht auf der Idee des RiverBoats. Es ist konzipiert als ein robuster Messkatamaran zur Aufnahme von Sensorikmodulen, die einzeln oder gemeinsam auf dieser Trägerplattform auf kleinen und mittleren Gewässern eingesetzt werden.

Um die eingangs beschriebenen, vielseitigen Monitoringaufgaben realisieren zu können, wurde, wie im Antrag beschrieben, der Sonobot (Fa. EvoLogics) für das Projekt zu einer Forschungsplattform weiterentwickelt. Entsprechende Anpassungen und Weiterentwicklungen wurden vorgenommen, wie im Folgenden im Detail beschrieben. Die einzelnen Module, welche implementiert wurden, sind in den jeweiligen Arbeitspaketen beschrieben.

Das RiverBoat verfügt über die notwendigen Voraussetzungen, um die einzusetzende Sensorik zum einen tragen zu können, zum anderen werden im RiverBoat alle Datenströme zusammengeführt und zentral abgelegt. Die Ablage der aufgezeichneten Daten auf der bootsinternen Festplatte sorgt für eine große Ausfallsicherheit, da ein Abriss der WLAN-Verbindung von Feldrechner nicht zu Datenverlust führt.

Ebenfalls sorgt das RiverBoat für die Kommunikation zwischen Feldrechner und interner Bordelektronik, so dass die Messdaten während der Messfahrt vom Feldrechner aus überwacht werden können. Dort sind ebenfalls umfangreiche Informationen über den internen Zustand des RiverBoats einzusehen, wie Ladezustand der Akkus, Luftfeuchtigkeit in den Schwimmern und im Bootskörper, Drehzahl der Rotoren und weitere. So lässt sich, während der gesamten Fahrt der Zustand des Bootes in Echtzeit mitverfolgen, um frühzeitig eingreifen zu können, falls die Batterien während einer Messfahrt eine zu geringe Ladung aufweisen, die Wassertiefe zu gering wird oder andere Faktoren eintreten.

5.2.1 Konzeptionierung des Systems

In diesem Arbeitspaket wurde eine Auswahl der zu implementierenden Sensorik für die verschiedenen Arbeitspakete, sowie Gerätespezifikationen und Randbedingungen ausgewählt bzw. abgesteckt.

Die Vermessung der Gewässersohle als eines der grundlegenden Elemente muss insbesondere in Flachwasserbereichen funktionstüchtig und performant sein. Das am Sonobot eingesetzte Singlebeam-Echolot des Projektpartners EvoLogics wurde hierfür als geeignet identifiziert. Um den Einsatzbereich zu erweitern, wurde eine Verringerung der Mindestwassertiefe, des s.g. Blankings, auf 35 cm angestrebt, wofür seitens EvoLogics eine Weiterentwicklung der Sensorik erforderlich wurde.

Ergänzend zu der punktwisen Vermessung der Gewässersohle, wird in der Hydrographie regelmäßig auch ein Seitensichtsonar (Sidescan-Sonar) eingesetzt, um eine flächendeckende

visuelle Repräsentation des Gewässerbodens, bspw. zur Identifikation von besonderen Strukturen, zu ermöglichen. Hier wurde vereinbart, ein Sidescan-Sonar der Fa. DeepVision zu implementieren.

Für die Georeferenzierung legte das Projektteam zwei unterschiedliche Modi fest. Um die Modularität des Systems zu gewährleisten, wurde das RiverBoat, wie auch der Sonobot mit einem eigenständigen GNSS inkl. RTK und IMU ausgestattet. Dieses bietet mit nur einer GNSS-Antenne nicht die vollständigen Möglichkeiten eines 2-Antennen-GNSS, ermöglicht aber dennoch im RTK-Fix-Modus eine Positionierung auf wenige Zentimeter genau. Bei der Überwassermappingeinheit (siehe Arbeitspaket 3) wurde darüber hinaus – unter anderem, da für die Verwendung der Panoramabilder notwendigerweise True Heading benötigt wird - entschieden, ein 2-Antennen-GNSS mit eigenem RTK-Receiver und eigener IMU zu implementieren.

Für die Untersuchung von Gewässergüte (Arbeitspaket 2) wurde die Adaption von Multiparametersonden (MPS) des Projektpartners SEBA in das Gesamtsystem vorgesehen. Wesentliche Abstimmungen der auszuwählenden Sensoren waren die zu beantwortenden Fragestellungen der Gewässergüte und der mögliche Payload (Zuladung der Trägereinheit). Das System sollte geeignet sein, Auswirkungen von Einleitungen in das Gewässer verschiedener Art, wie Beeinflussung der Temperatur durch Einleitung von Kühlwasser und stoffliche Beeinflussung des Gewässers durch Kläranlageneinleitungen oder Mischwasserabschläge zu detektieren. Hierzu wurde eine Multiparametersonde Qualilog D8 ausgewählt und in der Aufstockung von RiverView um eine zweite baugleiche MPS ergänzt.

Ergänzend zu der Erfassung chemisch-physikalischer Parameter mittels MPS wurde die Einbindung eines Acoustic Doppler Current Profilers festgelegt, um zusätzlich zu den Güteparametern noch die Fließgeschwindigkeiten zeitgleich erfassen zu können.

Eine weitere Sondentechnik zur Erfassung von qualitativen Aspekten des Gewässers ist die INN-Sonde. Ziel der Verwendung dieser Technik war es, Sedimentschichtungen bzw. -ausprägungen zu differenzieren. Damit werden eine Ansprache der Sedimentarten und eine quantitative Verteilung ermittelbar.

Bei der eingesetzten Version der INN handelt es sich um eine Modifikation mit einer niederfrequenten kontrollierbaren physikalischen Quelle bei einer Neutronenemission auf Basis einer Deuterium-Tritium-Fusion. Der Informationsträger ist die Neutronenabklingkurve. Bei einer Neutronenemission von 10^8 Neutronen in der Sekunde wird die Neutronenanzahl über 2 ms in Schritten von 32 μ s gemessen (Buckup et al. 2016).

Diese umfangreiche und sehr unterschiedlich gestaltete Technik wurde im Projektverlauf in das Gesamtkonzept des RiverBoats eingebunden. Hierzu wurden jeweils entsprechende Vorarbeiten der Adaption der verschiedenen Sensorik durchgeführt, welche im Detail in den jeweiligen Arbeitspaketen beschrieben sind.

5.2.2 Aufbau der Montageplattform der Mappingeinheit

Der oben beschriebene Bestandteil der Sensorik der Überwassermappingeinheit besteht aus verschiedenen Einzelkomponenten. Das „Herzstück“ dieser Einheit stellt die 360°-Kamera dar. Diese ist sowohl Hardware- als auch Softwareseitig in das RiverBoat implementiert. Hier beschrieben ist zunächst die hardwareseitige Implementierung.

Als 360° Kamerasystem wurde die Vermessungskamera LadyBug 5 (Fa. Pointgrey Ltd.) ausgewählt. Diese Kamera entspricht den benötigten Qualitätsmerkmalen, insbesondere zu nennen sind hier ein „global shutter“ und eine minimale Verzeichnung. Diese Merkmale von Vermessungskameras sind selten in Panoramakameras zu finden, die LadyBug stellt hiermit die optimale Hardware dar. Für die Positionierung und Lagebestimmung des Kameramoduls wird ein Doppel-GNSS-Receiver (Fa. Javad) und ein Inertialmesssystem (INS, Fa. XSens) verwendet.

Das Gesamtsystem ist auf einen Aluminiumrahmen montiert worden, welcher auf die Querträger des RiverBoats aufgesetzt wird. Zu Beginn der Konstruktion des Rahmens wurden die Anforderungen an die Konstruktion wie folgt definiert:

- Geringes Gewicht bei maximaler Steifigkeit,
- Möglichst großer Abstand zwischen den GNSS-Antennen für hohe Messgenauigkeit, jedoch nicht zu groß für gute Handhabbarkeit und Befahrbarkeit bewachsener Uferzonen und enger Gewässer,
- Möglichst hohe Position der Kamera über der Wasseroberfläche, um Einsicht in das Hinterland zu gewinnen, jedoch nicht zu hoch, um die Stabilität des Messfahrzeuges nicht zu beeinträchtigen oder ein zu starkes Schwanken der Kamera in welligen Gewässern zu verhindern.
- Sowohl die Positionierungselektronik, als auch ein embedded PC mit angeschlossenen SSD-Festplatten für die Datenspeicherung werden in einer wasserdichten (IP67) Blackbox an diesem Rahmen montiert.

Die Ausgestaltung der Hardware wurde mit einem lüfterlosen PC der Fa. AAEON (Modell NANO-001N mit einem Intel i5 Prozessor, 2.9 GHz, 2 GB RAM) realisiert, siehe Abbildung 12.



Abbildung 12: Messrechner AAEON NANO-001N

Als Ergebnis des TAP 1.2 liegt das Kamerasystem als ein vollständiges, eigenständiges Modul vor, welches so auch auf anderen Messfahrzeugen betrieben werden kann. Auf dem RiverBoat ersetzt das Modul die GNSS-Antenne und ist mit dem Boot über ein Datenkabel und eine Stromversorgung verbunden. Über das Datenkabel werden einerseits Steuerbefehle vom RiverBoat (via WLAN von der Landstation) an das Kameramodul übertragen, andererseits werden die Positionsdaten der Kamerapositionierung als NMEA-Protokoll in die RiverBoat-Bordelektronik, als auch Statusdaten und reduzierte Bilddaten in Echtzeit über das RiverBoat an die Landstation geleitet. Die fertige Überwassermappingeinheit ist, auf dem RiverBoat montiert, in Abbildung 13 zu sehen.



Abbildung 13: RiverBoat mit aufgesetztem 360° Kameramodul und MPS

5.2.3 Integration der Systeme

Das Grundsystem für die Erarbeitung des RiverBoats bildet der Sonobot des Projektpartners EvoLogics. Dieser wurde entsprechend der geänderten Ansprüchen angepasst. Erforderliche Anpassungen waren insb. die physische Beschaffenheit, wie Auftrieb und Lagestabilität. Außerdem wurde eine Anpassung der Software des Sonobots vorgenommen, sodass diese als Grundlage für die Integration weiterer Sensoren dienen kann.

Die Ausstattung des Bootes mit verschiedenen Sensoren erhöht die Zuladungslast, die die Stabilität und Leistung der Trägerform beeinträchtigen. Um der höheren Zuladung (Payload) gerecht zu werden und die erforderliche Stabilität zu gewährleisten, wurden die Schwimmer des RiverBoat im Vergleich zum Sonobot um 23 cm verlängert und die Spurbreite um 15 cm erhöht. In Übereinstimmung mit den Anforderungen konnte der Auftrieb und damit die Nutzlast um 8 kg gesteigert werden. Entsprechend wurden die Kabelverbindungen zwischen Bootskörper und Schwimmern und die Einbaukomponenten der Schwimmer angepasst. Letzteres erforderte eine Neudimensionierung der Batterie- und Elektronikaufnahmen, um eine optimale Lastverteilung zu gewährleisten und zukünftige modulare Erweiterungen zu ermöglichen. Darüber hinaus wurde die Antriebseinheit für den höheren Leistungsbedarf optimiert.

Die Bordelektronik des Sonobots wurde neu konzeptioniert. Damit ist das RiverBoat mit verschiedenen Anpassungen, wie Hinzunahme von weiteren Bordrechnern, verbesserten Anschlüssen etc. den Anforderungen entsprechend ausgestattet.

5.2.4 Aufbau des modularen Anhängermoduls

Zur Aufnahme schwererer bzw. absenkbarer Sensorik (MPS, INN) wurde ein Anhängermodul, im Folgenden als Trailer bezeichnet, mit einer fernsteuerbaren Kabelwinde erstellt. Dieser Trailer besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten:

- Schwimmersatz mit einem hohen hydrostatischen Auftrieb (35 kg)
- Grundplatte mit Antriebseinheit (Motor), Steuerungselektronik, WLAN-Modul, Kabelführung mit Kabellängenmesser, Endabschaltung (magnetisch und mechanisch) und diversen Sicherungseinrichtungen, Stromversorgung,
- Autonomes Trommel-Aufsatzmodul mit integrierter spezifischer Sensorelektronik, eigener Stromversorgung und WLAN-Modul.

Die Konzeption des Trailers zum Schleppen mittels RiverBoat ist in Abbildung 14 dargestellt.



Abbildung 14: RiverBoat mit Trailer/Winde

Das Anhänger/Trommel-Modul (Trailer) ermöglicht damit die Erfassung von Tiefenprofilen mittels Multiparametersonde bzw. den Einsatz schwererer Sensorik wie der INN-Sonde. Der Einsatz der entsprechenden Sensorik mittels Trailer ist in den jeweiligen Arbeitspaketen beschrieben.

5.2.5 Feinabstimmungen und Weiterentwicklungen

Zusätzlich zu der ursprünglichen Entwicklung des RiverBoats wurden einzelne Teilaspekte ergänzt bzw. optimiert. Dies umfasst zum einen vielfältige kleinere Anpassungen der Handhabung etc., welche hier nicht weiter beschrieben werden. Hierdurch ist eine große Anwenderfreundlichkeit und Stabilität der Funktion gewährleistet.

Als eine zusätzliche Weiterentwicklung des Gesamtsystems wurde eine Möglichkeit zur Positionierung über Tachymetertracking implementiert. Das Tachymetertracking beruht auf dem Prinzip der optischen Distanzmessung, hierbei werden mit einem elektronischen Tachymeter kontinuierlich sowohl die verschiedenen Winkel, als auch die Entfernung zwischen Tachymeter und RiverBoat ermittelt. Aus diesen Daten wird die geographische Position des RiverBoats errechnet und an das RiverBoat in Form eines (pseudo-)NMEA-Strings, dem Standardaus-tauschformat für Satelliten-Positionierungsinformationen, übergeben. Hierdurch wird die eigene Satellitennavigation des RiverBoats ersetzt.



Abbildung 15: RiverBoat mit Reflektor und automatischer Verfolgung mit einem Tachymeter

Hiermit steht eine alternative, optische Positionierungsmöglichkeit zur Verfügung, die den Einsatzbereich des Messsystems deutlich erweitert. So sind Messfahrten in Bereichen wie unter Bauwerken (Brücken etc.) oder unter Bäumen in Uferregionen bzw. schmalen Gewässern möglich, in denen aufgrund fehlender Satellitensignale bisher keine ausreichenden Positionsinformationen verfügbar waren. Das Konzept, sowie Einbau und Betrieb der Schnittstelle des Tachymetertrackings wurde kontinuierlich weiterentwickelt. Die wesentlichen Merkmale der Implementierung des Tachymetertrackings sind:

- Eine automatische Umschaltung von GNSS zu Tachymeter und wieder zurück ist möglich
- alle Tachymeter, die ein Pseudo-NMEA-Protokoll ausgeben, können verwendet werden
- die Funktionsweise des Autopilots bleibt erhalten

Mit den o. g. Aspekten ist eine modulare Verwendung von RiverBoat ohne Mappingeinheit, RiverBoat mit Mappingeinheit, sowie eine ergänzende Positionierung des Systems via Tachymetertracking möglich, womit für jeden Anwendungsfall eine Einsatzfähigkeit des RiverBoats gegeben ist.

Zur weiteren Verbesserung der Verwertbarkeit der Datensätze wurden im Projektverlauf kontinuierlich Funktionen in Neptus erweitert. So wurde zusätzlich zur Ausgabe der Echolot-Tiefenwerte inkl. der dazugehörigen Metadaten wie Koordinaten in verschiedenen Bezugssystemen, Kennwerten zur Lage- und Höhengenaugigkeit etc. noch der Export der Echolot-Rohdaten implementiert. Hiermit können für jedes aufgezeichnete Echolot-Signal die Intensität des Signals in jedem Zeitfenster ausgegeben werden, sowie die maximale Intensität des Signals. Hierdurch ergeben sich vielseitige Möglichkeiten für eine weitergehende Datenauswertung und eine Korrektur der Daten im Postprocessing. Die verfügbaren Positionierungsdaten, die aufgezeichnet werden und im Postprocessing für Filterung und Korrektur der Datenpunkte verwendet werden können, sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Positionierungsdaten des RiverBoats

1	TIME	Time	-	%t	x
2		Timestamp	s	%T	
3	COORDINATES	Longitude	deg	%L	x
4		Latitude	deg	%l	x
5	UTM COORDINATES	UTM Zone Number	-	%N	
6		UTM Zone Letter	-	%Z	
7		UTM Coordinates	-	%U	x
8		UTM Easting	m	%X	x
9		UTM Northing	m	%Y	x
10	HEIGHT ABOVE MSL	GPS Antenne Altitude above MSL	m	%A	
11		Water Level Altitude above MSL	m	%W	x
12	HEIGHT ABOVE WGS84	GPS Antenne Altitude above WGS84 Ellipsoid	m	%a	
13		Water Level above WGS84 Ellipsoid	m	%w	x
14	ECHOSOUNDER	Distance	m	%D	
15		Water Depth	m	%d	x
16	GNSS QUALITY	Sattelites	-	%s	x
17		HDOP (Horizontal Dilution of Precision)	-	%h	x
18		VDOP (Vertical Dilution of Precision)	-	%v	x
19		Fix Typ (RTK)	-	%f	x
20		Horizontal Position RMS	m	%H	x
21		Vertical Position RMS	m	%V	x
22	SPEED	Speed Over Ground	m/s	%S	

Nach einem ähnlichen Schema wurde ebenfalls der Export der Sidescan-Sonardaten-Rohdaten implementiert. Zuvor konnten die Sidescan-Sonar-Bilder georeferenziert exportiert werden und mit Kartendarstellungen überlagert werden. Durch den Export der Rohdaten lassen sich gezielte Untersuchungen der Signalverläufe vornehmen. Die Daten werden in einer separaten Spalte der Export-Tabellen angelegt und können gemeinsam mit den Lage- und Höheninformationen des GNSS und den entsprechenden Drehwinkeln der IMU ausgegeben werden.

5.2.6 Digitale Datenflüsse

Dieses Arbeitspaket hatte die Entwicklung von Softwarekomponenten für die Sensorsteuerung und Datenaufzeichnung (Positionierungsdaten, Bilddaten) zum Gegenstand, wobei die Implementierung aller Einzelkomponenten auf einen außendiensttauglichen Messrechner vorgenommen wurde.

Die softwareseitigen Umsetzungen der Ansteuerung der Kamera sowie die Kommunikation zwischen den Sensoren (Kamera, GNSS und IMU) und Trägerboot (Sonobot) wurden in der Programmiersprache C/C++ umgesetzt.

Der Datenaustausch zwischen den genannten Hardwareeinheiten basiert auf einem kleinen TCP/IP-Netzwerk mit einer Client-Server-Architektur. Die Informationen des GNSS-Receiver,

also Daten wie etwa Satellitenstatus, Position, Bewegungsrichtung, Geschwindigkeit, Zeitstempel und Genauigkeit, werden laufend in Form von NMEA-Datensätze per UDP (*User Datagram Protocol*; ungesichertes Übertragungsprotokoll mit höherer Datenrate als TCP/IP) übermittelt. Bezüglich der Kamera wurden Programmmodule entwickelt, die die individuelle Einstellung der Kameraparameter und die Steuerung der Bilddatenaufzeichnung realisieren. Neben dem Austausch von Statusinformationen wurde die Übertragung der Bilddaten von der Panoramakamera auf den Festplattenspeicher umgesetzt. Außerdem kann ein automatischer Start der Kommunikationssoftware als Netzwerkdienst ohne ein Benutzerinterface geschehen.

5.2.7 Evaluierung des Systems

Im Ergebnis des AP 1 liegt nach Abschluss der Arbeiten das vollständige und einsatzfähige RiverBoat entsprechend der definierten Anforderungen und der im Verlauf identifizierten Weiterentwicklungspotentiale vor.

Die Evaluierung des Gesamtsystems bezieht sich an dieser Stelle primär auf die Stabilität der Funktionstüchtigkeit und Einsatzfähigkeit auf verschiedenen Gewässern. Die Evaluierung der Einzelmodule ist in den jeweiligen Kapiteln beschrieben.

Es wurden ca. 150 Messkampagnen unter anderem auf den Fließgewässern Erft, Rur, Lippe, Niers und Wurm sowie Rhein und weiteren Gewässern wie der Ohre und verschiedenen Standgewässern durchgeführt und kontinuierlich neue Verbesserungsvorschläge an Software und Hardware an die Projektpartner zurückgemeldet.

Das RiverBoat verfügt hiernach über alle erforderlichen Schnittstellen, um eine präzise Steuerung auf verschiedenen Gewässertypen gewährleisten zu können. Die Steuerung findet je nach Anwendungsfall automatisch/programmiert oder per Fernsteuerung statt. Insbesondere in Bereichen, in denen mit Abschattung von Satellitensignalen zu rechnen ist, ist ein schnelles Umschalten von Autopilot auf Fernsteuerung von hoher Relevanz.

Die vielfältige Sensorik (siehe Kapitel 5.3 und Kapitel 5.5) ist integriert und modular einsetzbar. In zahlreichen Testfahrten wurde die vielseitige Einsetzbarkeit und Funktionstüchtigkeit der verschiedenen Module bewiesen.

Insbesondere die Leistungsfähigkeit des RiverBoats ist auf verschiedenen Gewässern nachgewiesen. Die Laufzeit des RiverBoats und die Funktionalität des Autopiloten führt zu einer enormen Steigerung der Effizienz von Vermessungsaufgaben im Vergleich mit herkömmlichen Verfahren. Bei der beschriebenen Vergleichsmessung zwischen RiverBoat und terrestrischer Vermessung wurden terrestrisch 34 Querprofile mit insgesamt 926 Einzelpunkten aufgenommen. Das RiverBoat lieferte 76.623 Punkte.

Zudem wurde nicht nur das RiverBoat mit der entsprechenden Messtechnik ausgestattet, sondern ebenfalls das Messboot Nelli 2 des IWW, wodurch auch große Gewässer, je nach Fragestellung, befahren werden können.

Das Gesamtsystem mit Mappingeinheit, MPS und ADCP im Einsatz ist in Abbildung 16 zu sehen.



Abbildung 16: RiverBoat mit 360°-Kamera, MPS und ADCP auf der Rur

Das RiverBoat verfügt, zusätzlich zur händischen Auswahl eines erwarteten Tiefenbereichs der Echolotmessungen, über eine Autorange-Funktion. Dies bedeutet, dass das RiverBoat, entsprechend der zum jeweiligen Zeitpunkt gemessenen Tiefenwerte, die dazugehörige „Range“ (d.h. erwarteter Tiefenbereich) selbstständig anpasst. Diese Funktion wurde durch Geo-DV im Tiefenbereich von 0,5 m – 45 m erfolgreich getestet.

Um die Genauigkeit der Tiefenmessungen mittels Echolot zu untersuchen, wurden sowohl von Seiten des FiWs aus, als auch von Geo-DV Vergleichsmessungen durchgeführt. Geo-DV führte eine Validierung der Sonardaten mit herkömmlichen Peilstangenmessungen durch, in deren Ergebnis eine hohe Übereinstimmung festgestellt wurde.

Die Validierung der Vermessungsgenauigkeit RiverBoats wurde am FiW in einem Unterauftrag durch das Büro Koenzen zusätzlich unterstützt. Hier wurde ein Gewässerabschnitt (Renaturierung der Rur bei Körrenzig) zeitgleich vermessen und ein detaillierter Vergleich der erzielten Ergebnisse vorgenommen.

In Abbildung 17 ist der verglichene Gewässerabschnitt gezeigt. Links dargestellt sind die terrestrisch eingemessenen Querprofile, rechts dargestellt sind die mit dem RiverBoat gemessenen Tiefenwerte. Die farbige Kennzeichnung bezieht sich auf den Zustand der GNSS-Lösung des jeweiligen Einzelpunktes. Die grünen Punkte wurden mit RTK-Fix (Genauigkeit < 2 cm), die gelben Punkte mit RTK-Float (Genauigkeit < 12 cm) und die roten Punkte ohne RTK (Genauigkeit < 20 cm) aufgezeichnet.

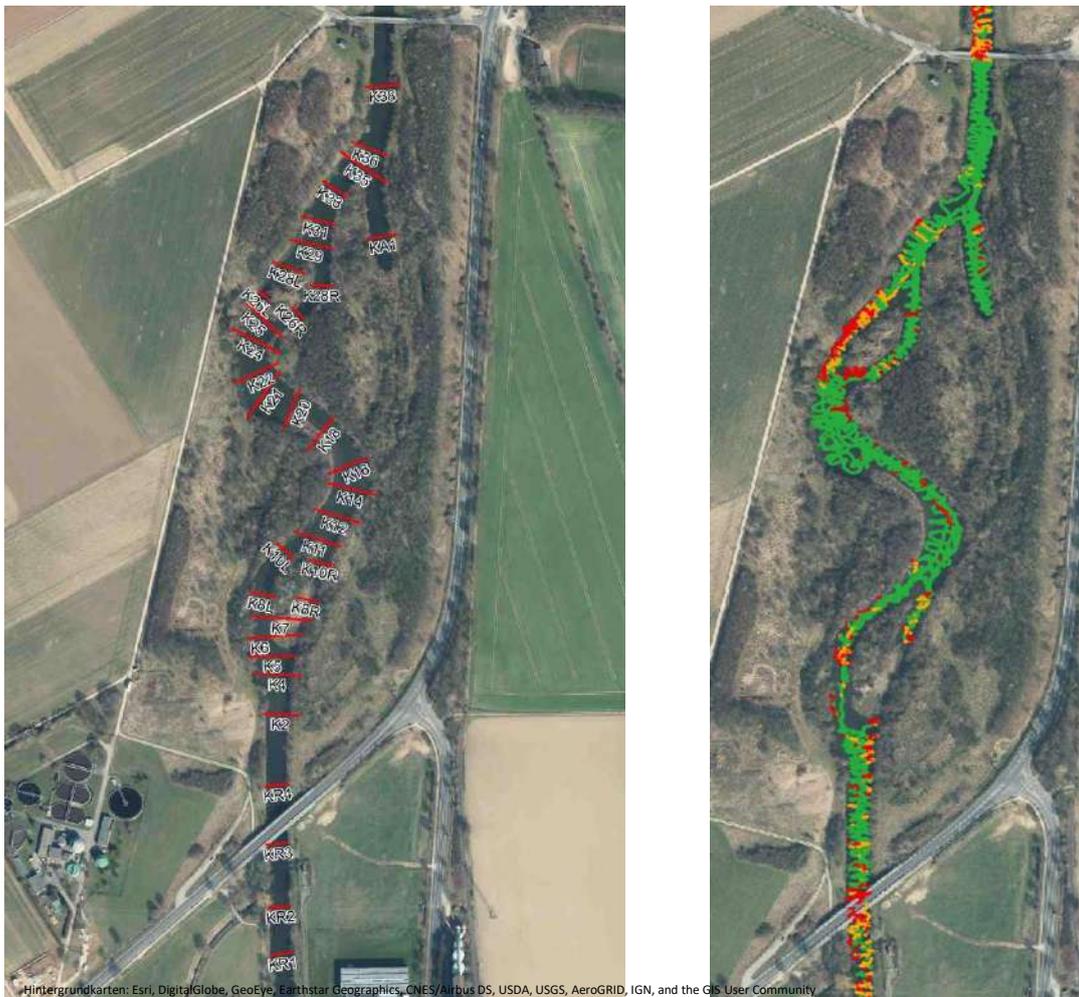


Abbildung 17: Vergleich der aufgenommenen Datenpunkte zwischen terrestrischer Erfassung (links) und Peilung RiverBoat (rechts). Koenzen 2018

Aufgrund der hohen Punktdichte konnte aus den RiverView-Datensätzen sofort ein geschlossenes digitales Geländemodell erzeugt werden. Der Vergleich mit den terrestrisch eingemessenen Querprofilen erfolgte dann auf Grundlage des vollständigen DGMs. Für die Uferbereiche wurde das digitale Geländemodell des Landes NRW hinzugenommen.

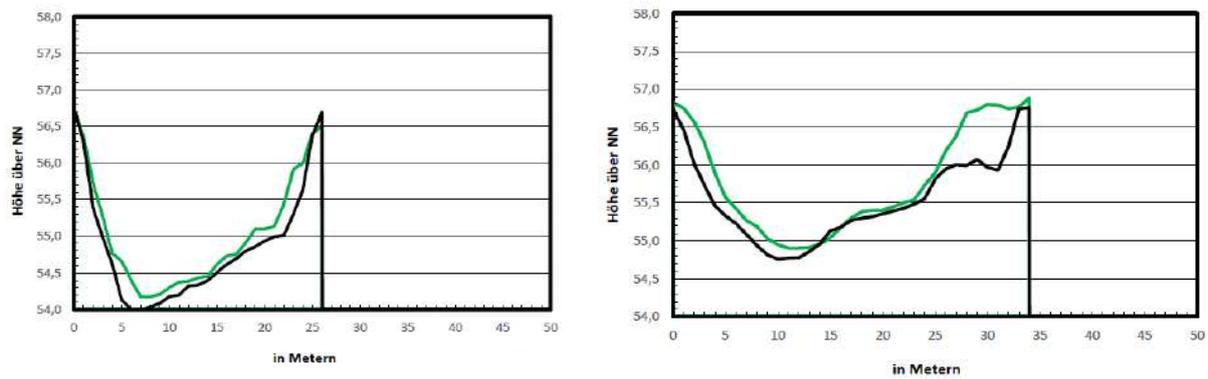


Abbildung 18: Vergleich der Datensätze zwischen RiverBoat und terrestrischer Vermessung. Grün: RiverBoat, Schwarz: terrestrische Vermessung. Links: Querprofil K33, rechts: Querprofil K14

Im Vergleich der Querprofile zeigte sich grundsätzlich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Jedoch wurden insb. in den Uferbereichen, bei denen in der RiverView-Methode z.T. Interpolationen vorgenommen werden mussten, Abweichungen festgestellt. Dies betrifft insbesondere Gewässerbereiche mit sehr geringer Wassertiefe (< 30 cm), da hier das Echolot keine Tiefenwerte mehr aufzeichnen kann. An diesen Stellen liefert die terrestrische Methode in den 30 Querprofilen bessere Werte.

In diesem Vergleichsprojekt wurden zusätzlich noch weitere Datensätze erhoben und verglichen (Sohlsubstrat, chemisch-physikalische Parameter). Genauere Informationen hierzu sind in einem separaten Bericht (Planungsbüro Koenzen 2018) zu finden.

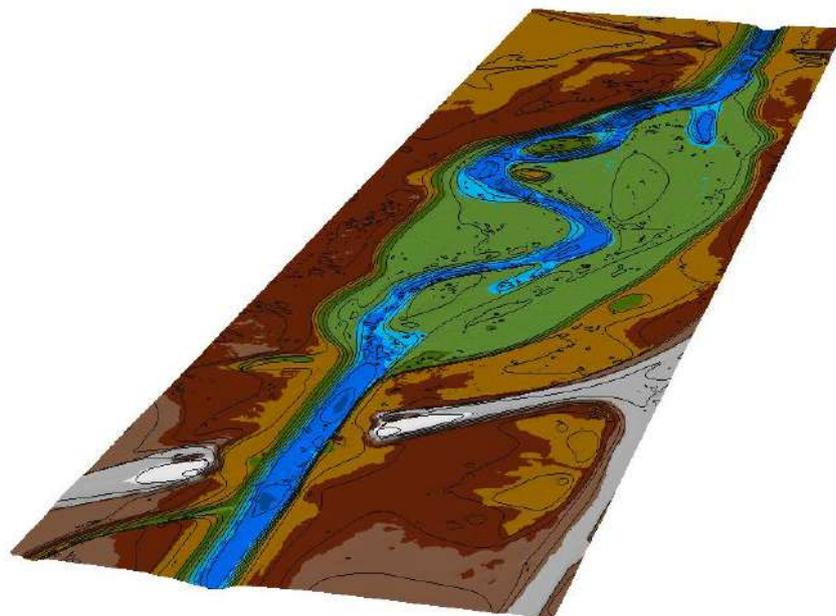


Abbildung 19: Digitales Geländemodell des Wasserlaufs und des Gewässerumfelds

5.3 RiverDetect – Erfassung der Gewässergüte

In der Gewässerbewirtschaftung werden regelmäßig detaillierte Datensätze der Gewässergüte für die Zustandserfassung benötigt. Diesen liegen standardmäßig als Punktmessungen von festinstallierten Messstation vor. Ziel des Arbeitspaketes RiverDetect war die Implementierung und Adaptation von bestehenden Sensoren zur mobilen Gewässergüteüberwachung. Hierdurch kann eine hochaufgelöste Aufnahme von Gewässergütedaten entweder im Längsverlauf eines Gewässers, oder in engmaschigen Querprofilen an interessanten Positionen im Gewässer (wie Einleitungen oder ähnlichem) aufgenommen werden.

Diese Sensoren wurden in das RiverBoat implementiert und messen während der Fahrt automatisch. Die MPS kann ebenfalls an einer Kabeltrommel abgelassen werden, um Tiefenprofile aufzunehmen.

Aufgrund der Vielzahl von grundsätzlich denkbaren Gewässergüteparametern erfolgte im Vorhaben vorerst eine Beschränkung auf wesentliche Parameter (siehe unten), um die hard- und softwaretechnischen Grundlagen für die Systemintegration zu erarbeiten und die verfahrenstechnischen Abläufe im Gesamtkontext zu erproben. Dabei wurden die Schnittstellen bereits so ausgelegt, dass bei Bedarf (im Projektverlauf oder ggf. auch in einem zukünftigen Projekt) weitere Sensoren modular ergänzt werden können. Dies erfolgte bspw. im Rahmen der Aufstockung von RiverView, in der eine zweite Multiparametersonde ergänzt wurde.

5.3.1 Konzeptionierung der MPS- und INN-Sensorik

Wie weiter oben beschrieben, ist die Einbindung von Gewässergütesensorik ein wesentlicher Bestandteil von RiverView. Die beiden wesentlichen Komponenten für diese Erfassung sind:

- Multiparametersonden der Fa. SEBA zur Erfassung chemisch-physikalischer Eigenschaften des Wassers
- Die Impuls-Neutron-Neutron-Sonde der Fa. DBM Dr. Buckup zur Erfassung von Sedimenteigenschaften
- Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) zur Erfassung von Fließgeschwindigkeiten

Die zu implementierende Sensorik wurde bei den jeweiligen Projektpartnern entwickelt und die grundlegende Funktionstüchtigkeit wurde bereits durch die Partner durch Vorarbeiten nachgewiesen und in RiverView durch weitere Tests belegt. In RiverView wurde im Wesentlichen eine Anpassung der Sensorik an die Herausforderungen des mobilen Einsatzes an einem USV umgesetzt.

Hierbei sind die wichtigsten Herausforderungen

- Die physische Gestaltung des Sensors (Gewicht, Größe) zur Implementierung an der Trägereinheit. Unbemannte Systeme zeichnen sich insb. durch ihre Kompaktheit und Handlichkeit aus, wodurch sich besondere Herausforderungen für die anzubringende Sensorik ergeben. Diese muss vor allem leicht sein, da ein zu großes Gewicht die Manövrierbarkeit des USVs einschränken würde.
- Die Stromversorgung der Sensorik, insb. im Hinblick auf mögliche Einsatzdauer bei möglichst geringem Gewicht der Batterien
- Kommunikation der Einzelsensoren mit der Trägereinheit zur Steuerung der Messung und Überwachung der Ergebnisse

Multiparametersonde

Für die Multiparametersonde ist eine Auswahl der Parameter erforderlich, da sich die Multiparametersonden aus dem Hause SEBA grundsätzlich mit einer Vielzahl von Elektroden für verschiedene Parameter ausstatten lassen.

Hier wurden aus wasserwirtschaftlicher Sicht Anforderungen bzw. Zielparameter definiert, welche Parameter zu erfassen sind. Im weiteren Projektverlauf wurde das System um eine zweite, baugleiche, MPS erweitert, wodurch der Parameterkanon ergänzt werden konnte.

Der erste Schritt der Konzeptionierung der MPS-Technik, die Eingrenzung der in Tabelle 3:

Parameter der Multiparametersonde MPS-D8, die für den Einsatz am RiverBoat angepasst wurde Tabelle 3 dargestellten zu erfassenden Parameter, führte dazu, dass aus den zur Verfügung stehenden MPS der Firma SEBA die **MPS-D8** (© SEBA Hydrometrie GmbH & Co. KG) ausgewählt wurde, mit der bis zu 8 Parameter gleichzeitig erfasst werden können.

Tabelle 3: Parameter der Multiparametersonde MPS-D8, die für den Einsatz am RiverBoat angepasst wurde

Parameter	Einheit
Wasserstand (bzw. Eintauchtiefe)	mWs
Temperatur	°C
Leitfähigkeit	µS/cm
Trübung (optisch) mit Wischer	NTU
Sauerstoffkonzentration (optisch)	mg/L
pH-Wert	-
gelöste Stoffe	mg/L
Salinität	-
Wasserdichte	g/L

Auf Grundlage der hier definierten Anforderungen erfolgte im Hause SEBA ein Umbau der entsprechenden Sonde, sowie eine Ausstattung mit der erforderlichen Stromversorgung und Kommunikationsschnittstelle. Dies wird in den folgenden Kapiteln ausführlicher beschrieben.

INN-Sonde

Da es sich bei der INN-Sonde der Fa. Backup e.K. um ein, für den Einsatz mittels USV, großes und schweres Gerät handelt, wurde der Einsatz der INN-Sonde von einem Anhänger (Trailer) aus vorgesehen. Es waren verschiedene Umbauarbeiten an der Sonde notwendig, um die Sonde in Bezug auf Gewicht, Ansteuerung und Datenspeicherung zu optimieren. Hierzu stimmte das Konsortium die erforderlichen Randbedingungen, die einen Einsatz an dem entwickelten Trailermodul beeinflussen, von Seiten der Fa. Backup wurden wiederum die physischen Rahmenbedingungen der Sonde kommuniziert und auf dieser Grundlage die notwendigen Umbauarbeiten abgestimmt.

Die Untersuchungen erfolgten in zwei Richtungen:

- konstruktive Änderungen der Hardware zur Verringerung von Gewicht und Maßen,
- Maßnahmen zur Erhöhung der Effektivität durch Test neuer Bauteile und Komponenten.

Es wurden verschiedene Zuarbeiten geliefert, die die Arbeitsweise des Gerätes zeigten und auf die Möglichkeiten des Verfahrens hinwiesen. Vorrangig wurde untersucht, wie eine Kombination mit dem GPS bestmöglich erfolgt und welchen Anforderungen bei praktischen Einsätzen entsprochen werden muss.

Zusätzlich wurde Altmaterial von früheren INN-Messungen der Fa. Backup aufgearbeitet, um die verschiedenen Einsatzbedingungen zu studieren und Schlussfolgerungen für den Geräteeinsatz zu definieren. Dabei wurden Untersuchungen angestellt, die verfügbaren externen Daten in die Ergebnisermittlung einzubeziehen.

Da die INN-Sonde ursprünglich über keine Möglichkeit der Georeferenzierung verfügte, musste eine solche Funktion entwickelt und implementiert werden. Hier wurde ein entsprechendes GNSS-Gerät angeschafft und die Software angepasst, um eine Kombination von Messwerten mit GNSS-Daten optimal zu gestalten.

5.3.2 Hardware- und softwareseitige Integration der Sensorik

Die Übertragungsschnittstellen der Multiparametersonde (MPS-D8/Qualilog8) wurden von SEBA in enger Abstimmung mit den anderen APs entwickelt. Die Datenübertragung vom Logger der MPS auf die zentrale Rechereinheit ist drahtlos via Bluetooth umgesetzt.

Die Firmware der für das Projekt verwendeten MPS wurde zusätzlich um eine Logger-Engine erweitert. Dadurch ist es möglich, die Messdaten in einem nichtflüchtigen Speicher in der Sonde zu speichern. Dies hat den Vorteil, dass sowohl während der Entwicklungsphase als

auch bei der späteren Messphase die gemessenen Daten redundant gehalten werden können. Zusätzlich ist es mit dieser erweiterten Firmware-Funktion möglich, die gemessenen Daten in Verbindung mit der Ausleseinheit auf dem RiverBoat sowohl zu vergleichen als auch mit anderen Messdaten zu validieren. Somit wird sichergestellt, dass die gemessenen Daten validierbar und belastbar sind. Weiterhin dienen diese Daten als Grundlage für weitere Übertragungstests hinsichtlich höheren Datenraten und -geschwindigkeiten. Des Weiteren wird die Erweiterung dazu verwendet, die Daten im Falle eines Ausfalls der Datenverbindung zwischen MPS und RiverBoat zwischen zu speichern, sodass es zu keinem Messdatenverlust während einer Messkampagne kommt.

Zudem wurden zusätzliche Funktionen implementiert, die die Kopplung zwischen unterschiedlichen Geräten (bspw. PC, Tablet, Smartphone) und Betriebssystemen (bspw. Windows, Linux, Android) vereinfachen. Somit ist eine einfache und sichere Synchronisation zwischen den unterschiedlichen Schnittstellen gewährleistet.

Um die Multiparametersonde für den Einsatz am RiverBoat vorzubereiten, mussten verschiedene Anpassungen vorgenommen werden. Diese betrafen zum einen die softwareseitige Ausstattung der Sonde (Firmware) und zum anderen physische Aspekte wie Größe und Gewicht, was insbesondere die Energieversorgung betraf.

5.3.3 Anpassung und Integration der Energieversorgung mittels Hochleistungsbatterien

Es wurden unterschiedliche Akku/Batterie-Typen evaluiert und deren Vor-/Nachteile erfasst. Ausgehend betrachtet von Alkali/Mangan- über Lithium/Ionen-Technologie bis zu Lithium/Eisen. Diese Technologien wurden einerseits hinsichtlich Umweltverträglichkeit, andererseits hinsichtlich Preis/Leistung geprüft. Der Evaluierungsprozess war hierbei kompliziert, da sich die tatsächliche Leistung der Batterien z.T. deutlich von den Herstellerangaben unterschieden.

Um zu verhindern, dass das Projekt nicht in Verzug geriet, wurde entschieden, während des Entwicklungsprozesses die aktuelle Lithium-Ionen-Technologie zu verwenden. Zusätzlich wurden die Schnittstellen für die Stromversorgung definiert, sodass ein einfacher Übergang von der jetzt verwendeten Stromversorgung zu einer anderen möglich ist. Somit kann das Ziel, d.h. der Einsatz einer Hochleistungsbatterie, erreicht werden.

5.3.4 Konzeptionierung einer drahtlosen Kommunikation

Das ausgewählte Bluetooth-Modul wurde evaluiert, getestet und der Integrationsaufwand in einem vorläufigen Lastenheft definiert. Hierbei zeigte sich, dass sich die Anbindung dieses Moduls an anderen Schnittstellen unterschiedlich verhält als vorher vom Hersteller zugesagt. Dies gestaltete den Integrationsaufwand wesentlich aufwendiger als geplant. Erste entwickelte

Testprozeduren zeigten jedoch, dass die prinzipielle Datenübertagung zwischen MPS und RiverBoat für den beabsichtigten Verwendungszweck ausreichend stabil und sicher ist. Um dies zuverlässig validieren zu können, wurden Testfunktionen implementiert, damit die Beeinflussung der Reichweite und deren Störungen aus der Umgebung erkannt und ggf. herausgefiltert werden können.

Der in AP 1 entwickelte Trailer für den Einsatz der Winde wurde von SEBA mit Elektronik und dem Bluetooth-Modul zur Fernbedienung einer tiefenorientierten Wasserqualitätsmessung ausgestattet, um eine Speicherung der Daten und eine Kommunikation der Datensätze an das RiverBoat umzusetzen (Abbildung 20).



Abbildung 20: Foto mit Ausschnitt der Winde mit integriertem SEBA Bluetooth-Modul

Die drahtlose Kommunikation über die Bluetooth-Schnittstelle ermöglicht eine Verbindung zu den Systemkomponenten, welche die Messwerte empfangen sowie Steuerungsaufgaben übernehmen können. Durch den Verzicht auf ein Kabel kann außerdem eine deutlich kleinere und leichtere Winde zum Abfahren dieses Profils eingesetzt werden.

5.3.5 Tests des Systems im Labor

Innerhalb des Arbeitspakts 2 „RiverDetect“ wurden die auf dem RiverBoat implementierten Messsonden durch das IWW im Labor auf ihre Funktionsfähigkeit getestet.

Insbesondere der Einfluss des Anströmwinkels der Multiparametersonde wurde unter Laborbedingungen untersucht, um Rückschlüsse auf das Verhalten der Sonde im geschleppten Betrieb auf dem Riverboat zu erhalten. Die Untersuchungen wurden in der Kipprinne des IWW durchgeführt. Diese weist eine Länge von 30 m bei einer Breite von 1 m auf. Betrieben wird die Kipprinne von 3 Pumpen mit einem maximal möglichen Durchfluss von 600 l/s. Zusätzlich kann die Neigung der Sohle zwischen -2 % und +5 % variiert werden. Für die Untersuchungen werden in der Kipprinne zwei verschiedene Strömungsszenarien generiert. Die Strömungsgeschwindigkeit v_1 beträgt 0,18 m/s und die Strömungsgeschwindigkeit v_2 beträgt 0,33 m/s. Der Anstellwinkel der Multiparametersonde wird in den Stufen 0°, 45° und 90° variiert. Abbildung 21 zeigt die Versuchsanordnung in der Kipprinne bei den Anstellwinkeln 0° (a) und 45° (b). Die jeweils vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeiten werden mit zwei Acoustic Doppler Velocimetern (ADV) gemessen.

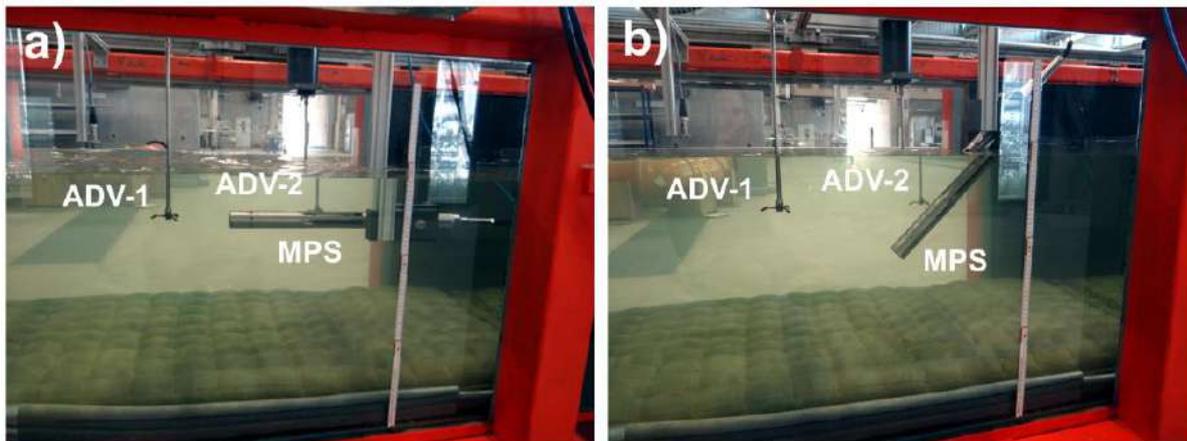


Abbildung 21: Versuchsaufbau in der Kipprinne des IWW bei einem Anstellwinkel der Multiparametersonde (MPS) von 0° (a) und einem Anstellwinkel von 45° (b)

Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zum Einfluss des Anströmwinkels auf die Parameter Leitfähigkeit (a), Trübung (b), O₂-Konzentration (c) und pH-Wert (d). Bei den Werten der Leitfähigkeit ist bei einer Vergrößerung des Anströmwinkels der Sonde eine Verringerung der Messwerte festzustellen. Allerdings beträgt die Differenz aller gemessenen Werte lediglich 0,00045 mS/cm. Ein Einfluss der Strömungsgeschwindigkeiten ist nicht eindeutig feststellbar. Während bei einem Anströmwinkel von 0° die größeren Werte der Leitfähigkeit bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,33 m/s gemessen werden, verhält es sich bei den Anströmwinkeln von 45° und 90° genau umgekehrt. Die Werte der Trübung lassen keinen signifikanten Einfluss des Anströmwinkels erkennen. Es fällt jedoch auf, dass beim Anströmwinkel von 90° und einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,33 m/s die Werte der Trübung eine

größere Spannweite aufweisen. Bei der O₂-Konzentration ist ebenfalls bei einer Sondenstellung von 90° mit 0,62 mg/l die größte Spannweite der Messwerte zu beobachten. Auch beim pH-Wert ist ein Einfluss des Anströmwinkels zu verzeichnen. Die geringsten pH-Werte im Bereich zwischen 8,435 und 8,44 sind bei einem Anströmwinkel von 45° gemessen worden. Bei einem Anströmwinkel von 0° sind die höchsten pH-Werte mit bis zu 8,462 gemessen worden. Die größte Spannweite der Werte tritt wiederum bei einem Anströmwinkel von 90° auf.

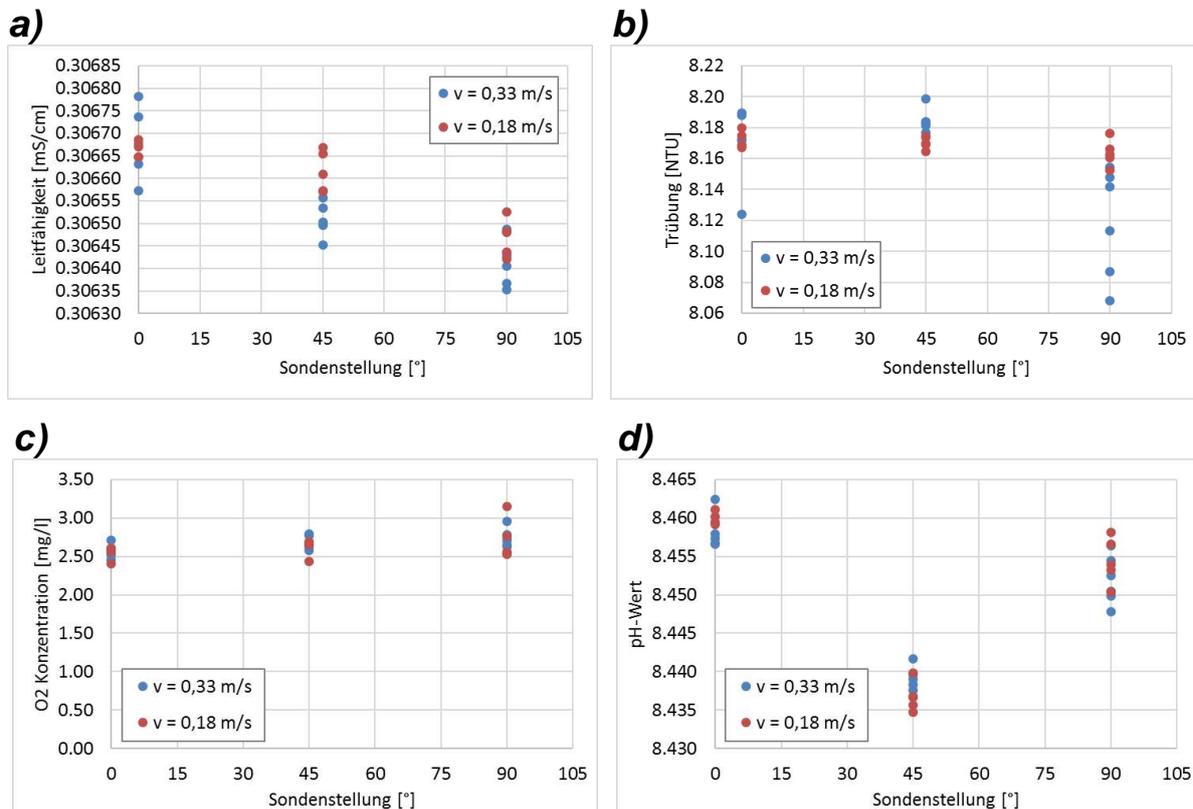


Abbildung 22: Ergebnisse der Laboruntersuchungen zum Einfluss des Anströmwinkels auf die Parameter der Leitfähigkeit (a), Trübung (b), O₂-Konzentration (c) und den pH-Wert (d)

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Anströmwinkel der Multiparametersonde einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Messergebnisse ausübt. Die Ergebnisse liegen im Bereich der zu erwartenden Messungenauigkeiten. Zudem scheint der Einfluss je nach Parameter unterschiedlich zu sein, so dass keine generelle Empfehlung für einen optimalen Anströmwinkel gegeben werden kann. Auch konnten während der Versuche die Randbedingungen in der Kipprinne nicht vollständig konstant gehalten werden. So ist während der durchgeführten Versuche durch den Betrieb der Pumpen die Temperatur von 20,95°C auf 21,25°C angestiegen (vgl. Abbildung 23).

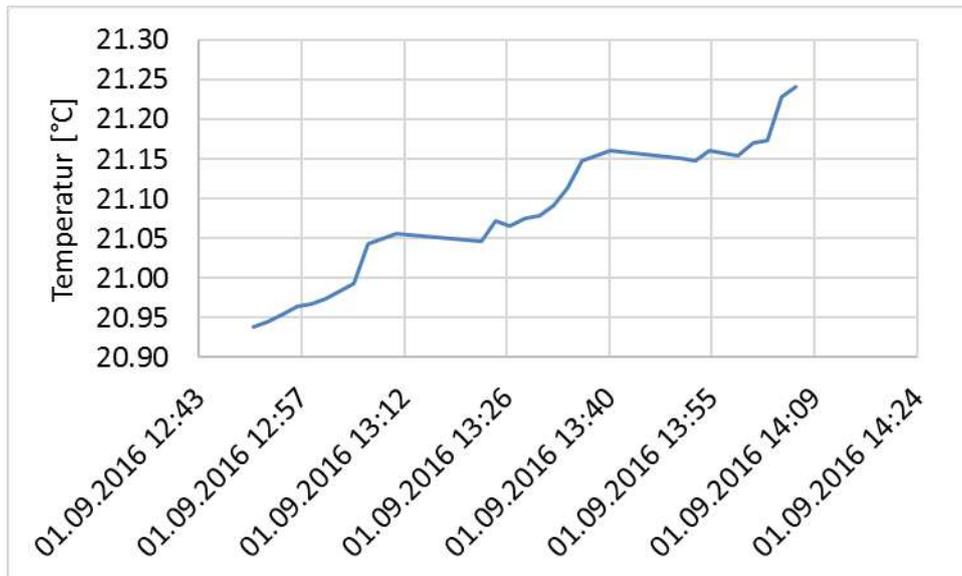


Abbildung 23: Wassertemperatur in der Kippine während der Versuchsdurchführung

Um die Genauigkeiten des ADCPs und des Echolots zur Gewinnung von Bathymetriedaten im Flachwasserbereich unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen, wurden diese Geräte ebenfalls in die Strömungsrinne des IWW eingesetzt. Im Folgenden wird ausschließlich die Geometrie der Hauptrinne beschrieben, in der die Versuche stattfanden. Der Bypass ist für die durchzuführenden Untersuchungen nur in seiner Höhe relevant, welche die maximale Einstauhöhe in der Hauptrinne begrenzt. Die Versuchsrinne ist aus Beton-Fertigelementen und einer gegossenen Betonsohle gefertigt, welche keine Neigung aufweist. Die Gesamtlänge der Hauptrinne beträgt 32 m, davon sind 4 m Länge dem Einlaufbereich, 21 m Länge der Fließstrecke und 7 m Länge dem Auslaufbereich zuzuordnen. Die Innenmaße betragen 1,7 m Höhe und 1,8 m Breite an der Oberkante, welche sich zur Sohle auf 1,7 m verjüngt (vgl. Abbildung 24). Die Außenbreite und Höhe vom Hallenboden betragen jeweils 2 m.

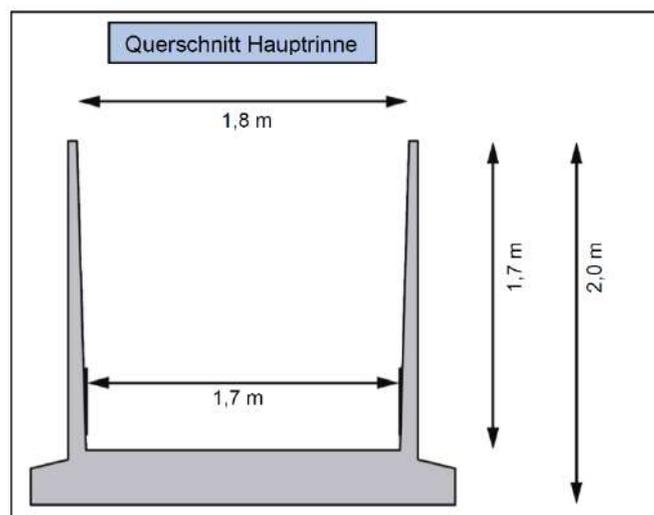


Abbildung 24: Querschnitt der Strömungsrinne am IWW

Die Beaufschlagung der Versuchsrinne im Einlaufbereich erfolgt über den Pumpenkreislauf der Versuchshalle mit zwei separat steuerbaren Zulaufrohren DN500. In diesen sind elektrisch verstellbare Schieber installiert, mittels welchen der Durchfluss auf einen Zielwert reguliert werden kann. Diese Feinststeuerung ermöglicht unabhängig von weiteren, parallel mit dem Pumpenkreislauf der Versuchshalle betriebenen Modellversuchen, eine geringe Schwankungsbreite des Durchflusses von $\pm 5\%$ um den Zielwert. Durch den Einsatz eines Strömungsgleichrichters mit angeschlossenem Oberflächenberuhiger am Beginn der Fließstrecke wird in deren Verlauf eine gleichgerichtete, gleichförmige Strömung erzielt. Turbulenzen und Oberflächenwellen werden auch bei hohen Durchflüssen soweit wie möglich minimiert. Die Einstellung des Wasserstandes in der Versuchsrinne erfolgt über eine unmittelbar vor dem Auslaufbereich installierte Wehrklappe. Diese ist stufenlos elektrisch verstellbar und reguliert so den Aufstau bzw. Wasserstand in der Fließstrecke. Das Wasser wird schließlich über zwei Boden- und zwei Seitenöffnungen im Auslaufbereich über Rücklaufrinnen in den Pumpenkreislauf zurückgeführt. Der Einsatz der Geräte erfolgte bei dem höchsten einstaubaren Wasserstand, welcher anschließend schrittweise reduziert wurde, um so die Entwicklung der Messdaten mit sinkendem Wasserstand dokumentieren zu können.

5.3.6 Tests des Systems in Gewässern

Das System wurde im Anschluss an die Tests unter Laborbedingungen auf zahlreichen Testfahrten evaluiert und auf verschiedene Aspekte hin untersucht. Zu Beginn der Tests standen grundlegende Fragestellungen wie Stabilität der Verbindungen, Einflüsse der eingesetzten Sensorik auf das Fahrverhalten und andere zur Debatte. In späteren Testfahrten wurde der Schwerpunkt auf die tatsächliche Datenerhebung gelegt. Dabei wurden vom FiW insgesamt acht Gewässer und rund 80 Gewässerkilometer in 143 Messfahrten befahren. Parallel dazu wurden vom Projektpartner IWW ebenfalls ausführliche Testfahrten mit dem Messboot Nelli 2 durchgeführt. Es wurden insgesamt 8 Fließgewässer bzw. Kanäle und ein See befahren mit einer zurückgelegten Strecke von ca. 170 km. Nachfolgend werden exemplarisch einige Ergebnisse der Testfahrten vorgestellt.

Wertach

Am 19. und 20.10.2016 wurde ein Test an der Wertach (in der Nähe von Kaufbeuren) von SEBA und FiW durchgeführt. Im Rahmen des Tests wurden die Vorabversion der MPS-D8-Sonde sowie der ADCP-Sensor von SEBA (RiverPro) an das RiverBoat angeschlossen (Abbildung 25). Ziel des Tests war zu untersuchen, ob die Anwendung von einem ADCP-Gerät auf dem im Rahmen des RiverView-Projektes entwickelten Messboot eine Wirkung/Beeinträchtigung auf das eingesetzte Echolot hat und gleichzeitig die Steuerung des Messboots mit den angeschlossenen Sensoren zu prüfen. Der Test zeigte, dass eine negative Auswirkung vom ADCP-Sensor auf das Echolot auszuschließen ist und dass das Messboot mit den angeschlossenen Sensoren gut steuerbar war, obwohl der ADCP-Sensor im eigenen Boot eingebaut war. Darüber hinaus konnten im Rahmen des Tests erste Messdaten für Wasserquantität, Wassertiefe und Wasserqualität erfasst werden.



Abbildung 25: RiverBoat mit ADCP und MPS auf der Wertach

Rur

Im Anschluss an die Feststellung der grundlegenden Einsatzfähigkeit des RiverDetect-Systems wurden gezielte Messfahrten zur Prüfung des wasserwirtschaftlichen Einsatzes des Systems durchgeführt. Hierzu wurde beispielsweise eine Kläranlageneinleitung hinsichtlich der Erfassung der resultierenden Temperaturfahne durchgeführt. Das Ergebnis ist Abbildung 26 in dargestellt.

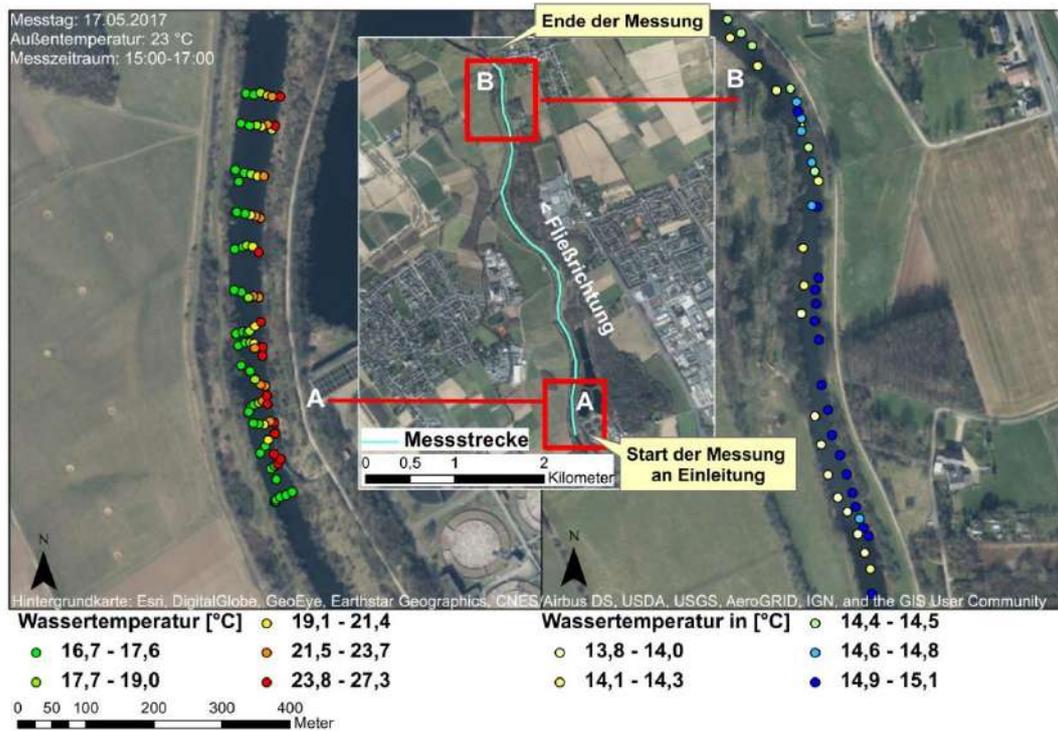
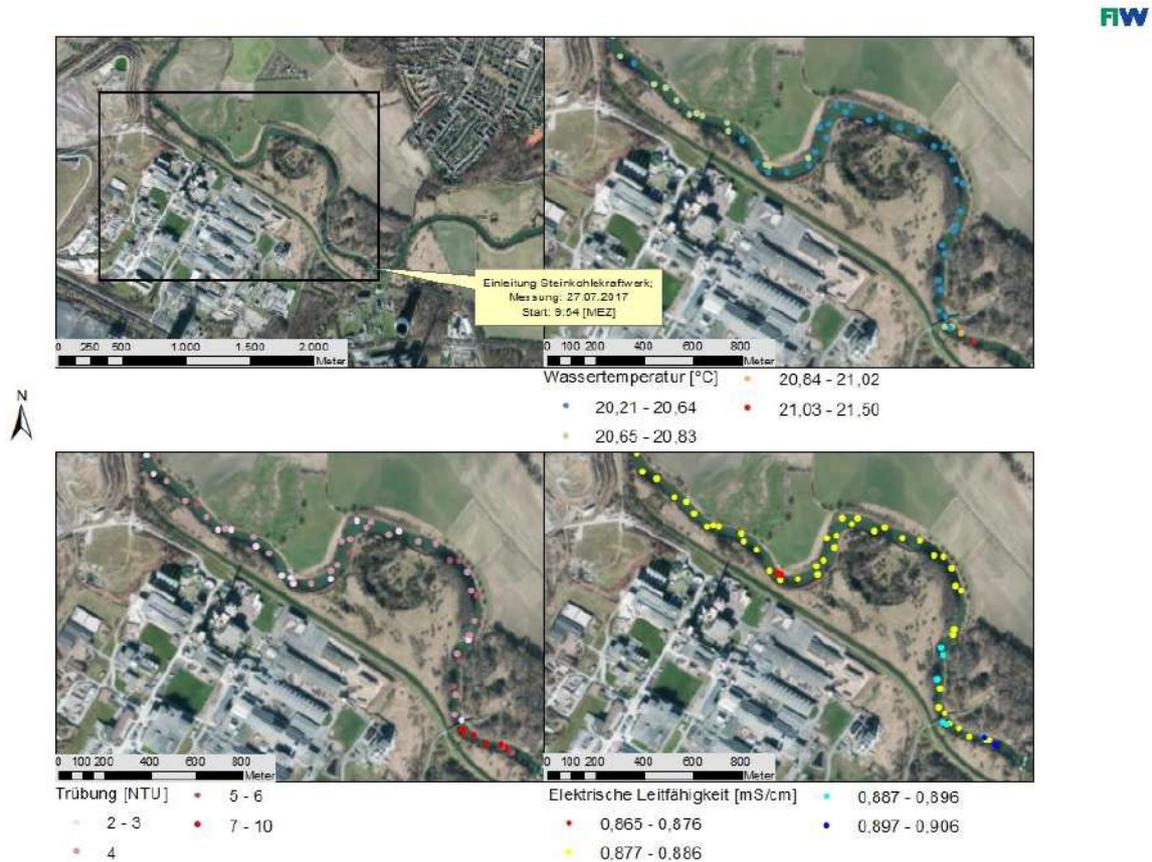


Abbildung 26: Darstellung der Messung einer Temperaturfahne nach Einleitung einer kommunalen Kläranlage

Lippe

Ein weiteres Beispiel der Verfolgung von Einleitungsfahnen mittels RiverView ist in Abbildung 27 dargestellt. Hier wurde die Beeinflussung der chemisch-physikalischen Eigenschaften des Wassers durch die Einleitung von Abwässern eines Steinkohlekraftwerks in die Lippe untersucht.



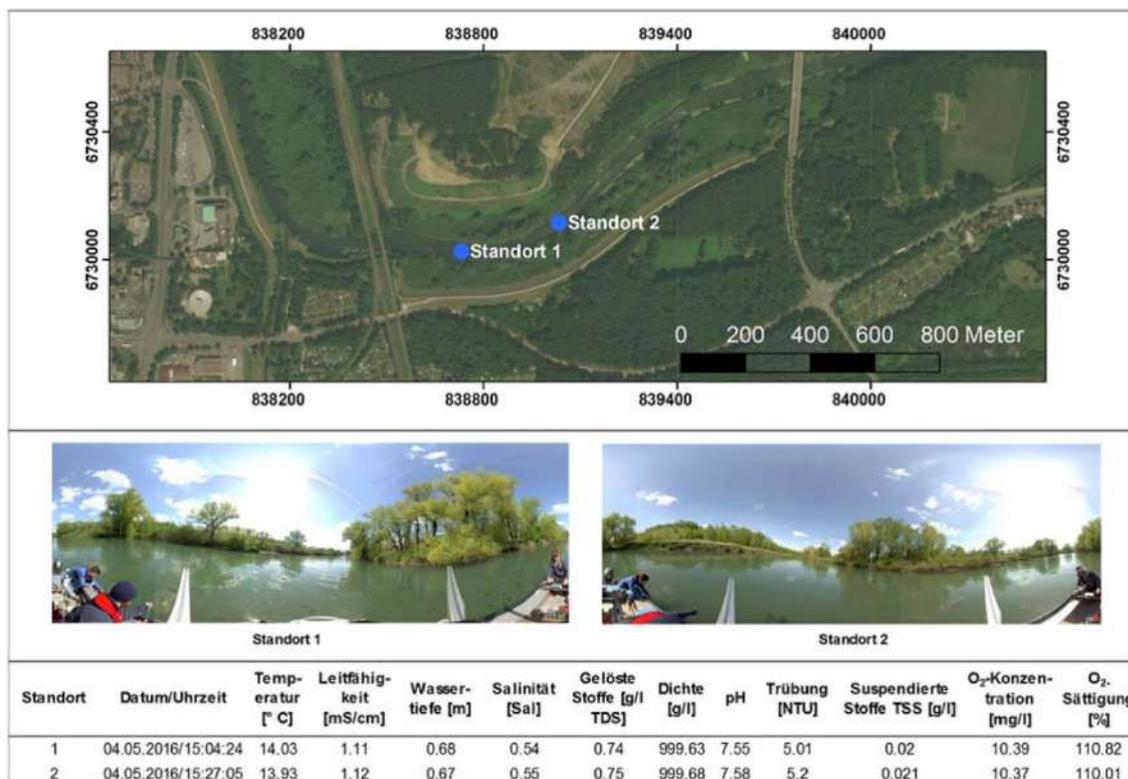
Hintergrundkarten: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

Abbildung 27: Entwicklung von chemisch-physikalischen Parametern nach Einleitung eines Steinkohlekraftwerks

Lippeaue und Ruhr

Ergänzend zum Einsatz von Multiparametersonden am RiverBoat wurden ebenfalls Multiparametersonden am Messboot des IWW eingesetzt. Aufgrund der Größe des Bootes lassen sich hierdurch längere Gewässerabschnitte auch auf größeren Gewässern problemlos erfassen.

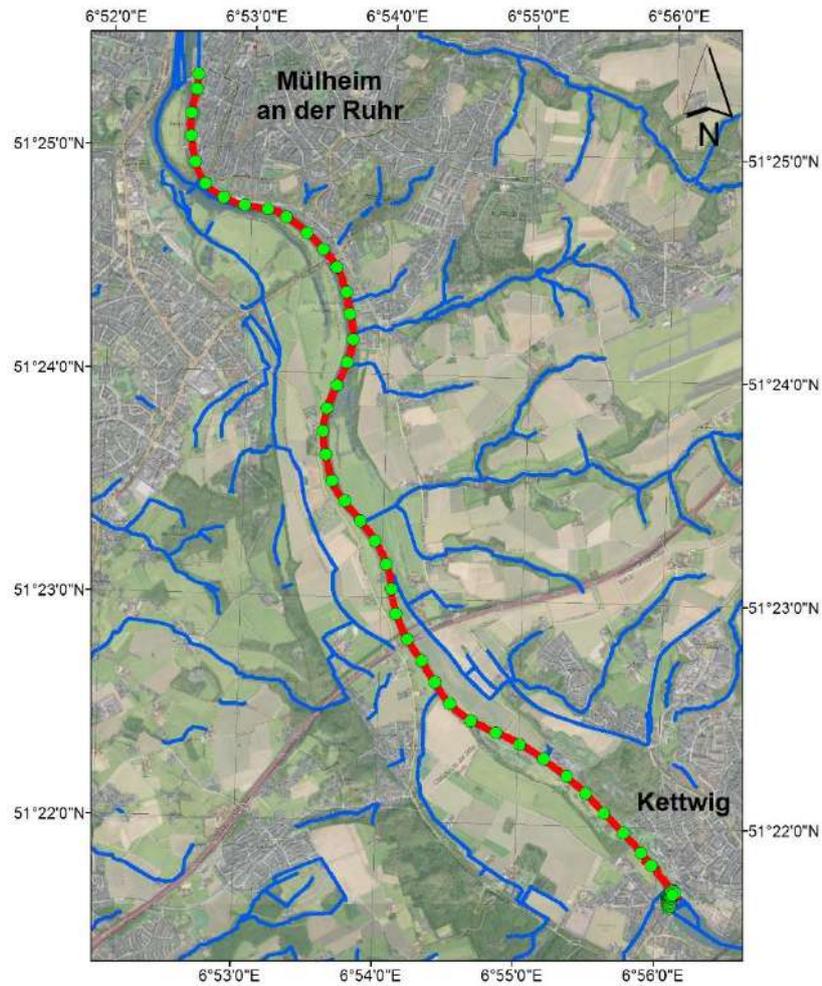
Einsätze wurden unter anderem im Naturschutzgebiet Lippeaue (Abbildung 28) und auf der Ruhr (Abbildung 29) durchgeführt, die Testfahrten und die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.



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

Abbildung 28: Ergebnisse der MPS im Naturschutzgebiet Lippeaue

Die Testfahrt auf der Ruhr wurde am 14.04.2017 durchgeführt. Die gefahrene Strecke beträgt 19 km. In Abbildung 29 ist der Verlauf der Strecke zwischen Mülheim an der Ruhr und Kettwig dargestellt.



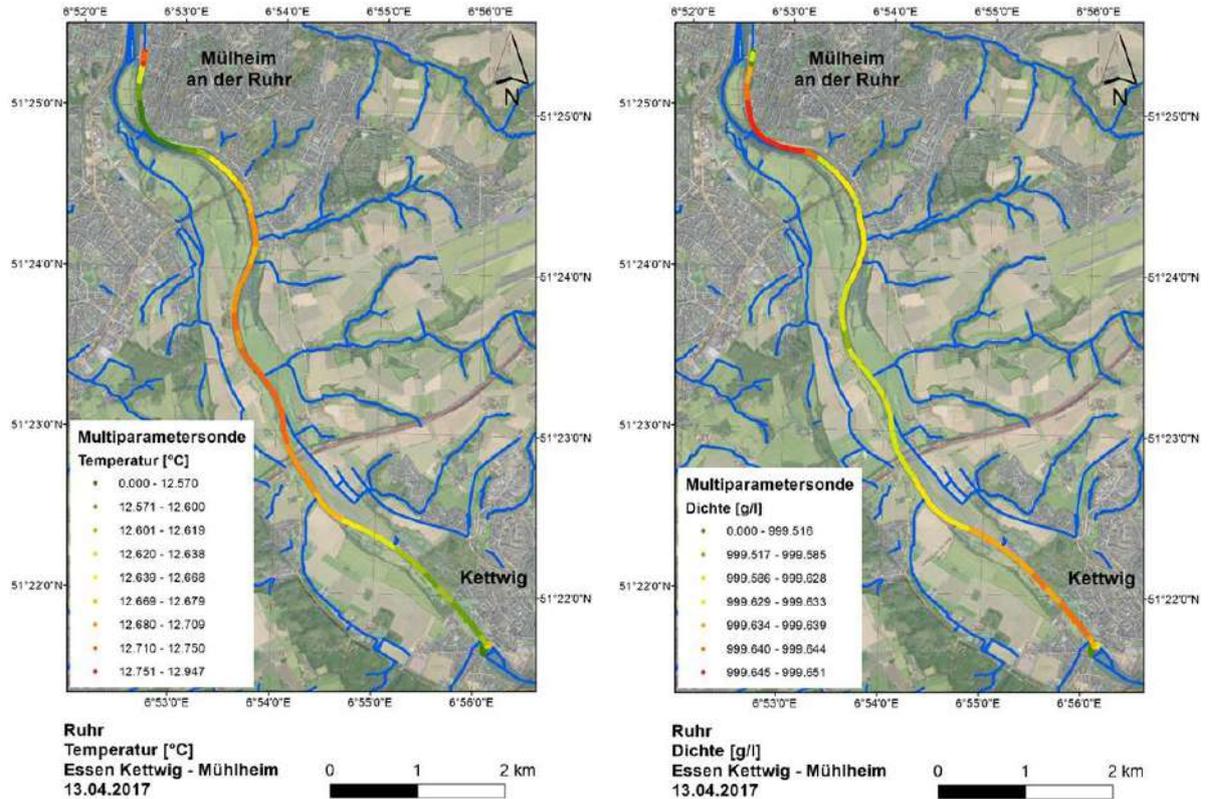
Hintergrundkarten: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

Abbildung 29: Streckenverlauf der Testfahrt auf der Ruhr am 14.04.2017

Das Boot fuhr die Strecke mit ca. 6 km/h ab, während die MPS in einem zweiminütigen Intervall Messungen durchführte.

Ergebnisse der Messungen mit Multiparametersonde

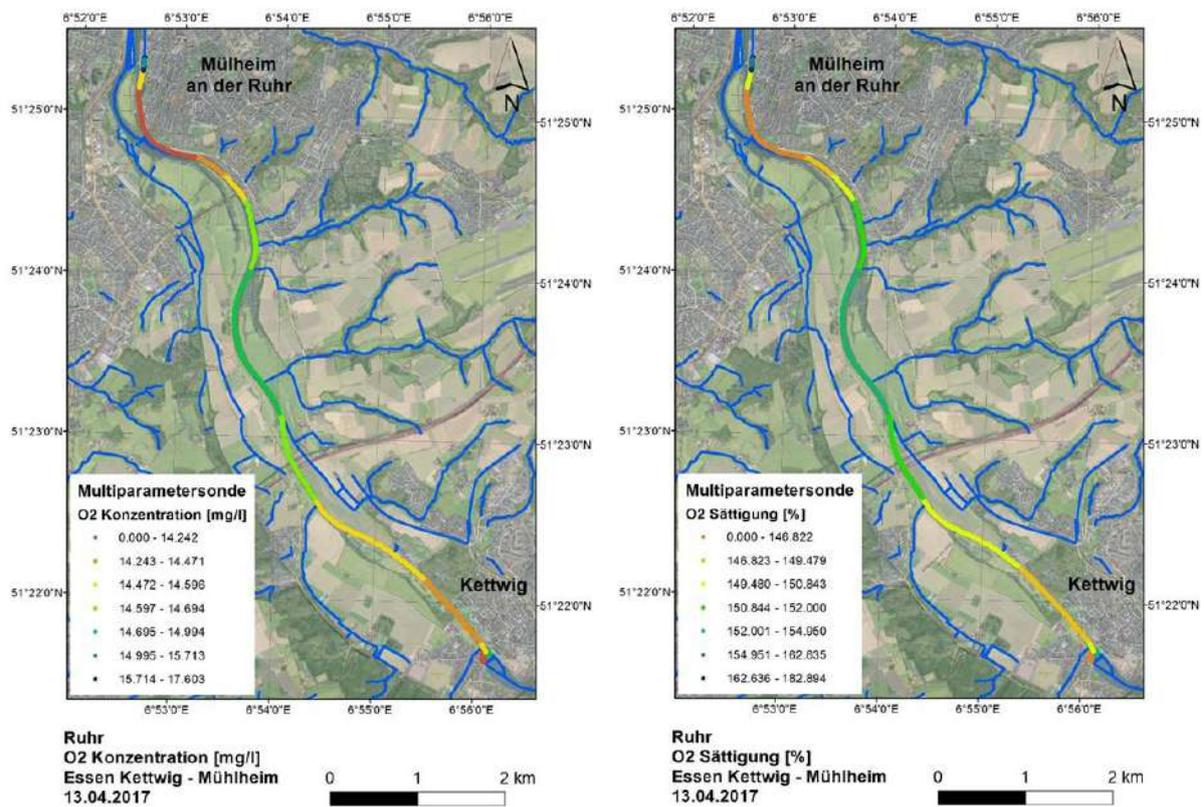
Abbildung 30 zeigt die Messergebnisse der Temperatur und der Dichte mit der Multiparametersonde im Verlauf der Ruhr. Die Temperatur rangiert zwischen ca. 12,5 °C und 13 °C. Die Dichte beträgt ca. 999,6 kg/m³.



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

Abbildung 30: Messergebnisse für die Temperatur (links) und die Dichte (rechts) auf der Ruhr am 14.04.2017

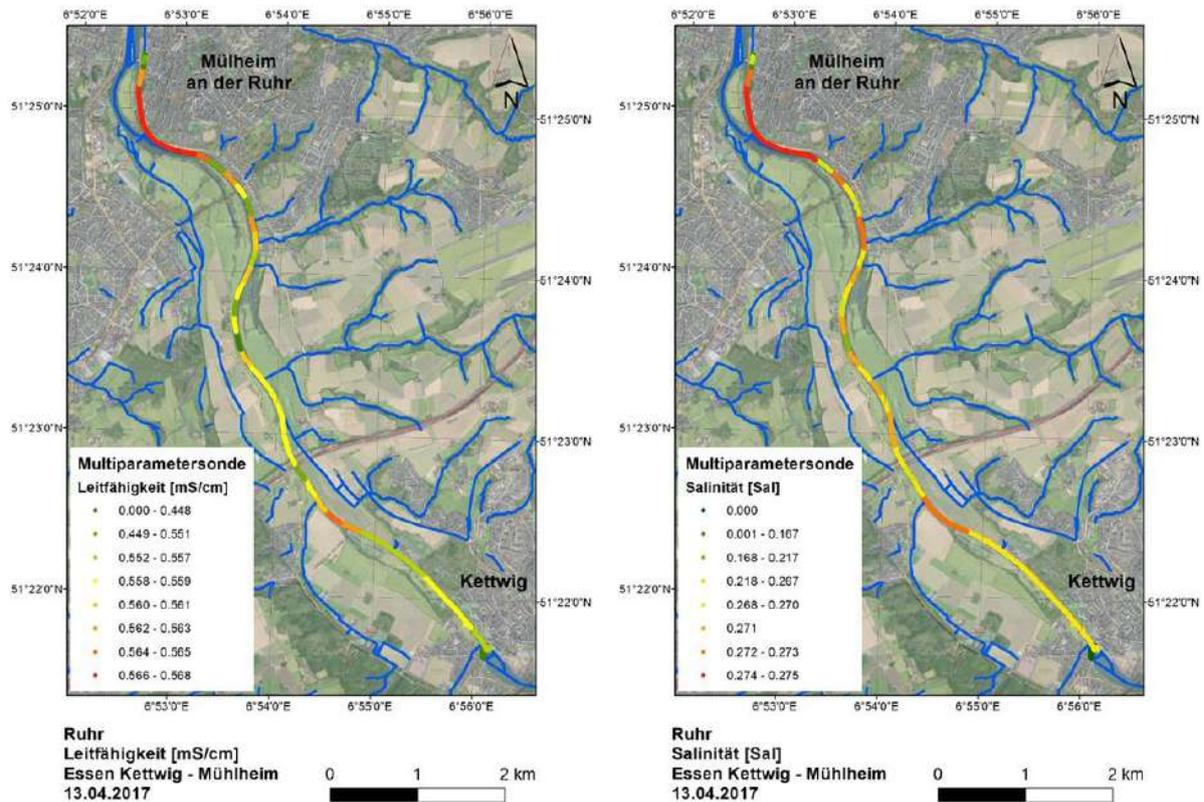
Abbildung 31 zeigt Messergebnisse für die O₂-Konzentration (links) und die O₂-Sättigung (rechts) im Verlauf des Messabschnittes der Ruhr am 14.04.2017. Die Sauerstoffkonzentration variiert über den Abschnitt zwischen etwa 14 mg/l und 18 mg/l. Daraus ergibt sich eine Sättigung zwischen 147 % und 183 %



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

Abbildung 31: Messergebnisse für die O₂-Konzentration (links) und die O₂-Sättigung (rechts) auf der Ruhr am 14.04.2017

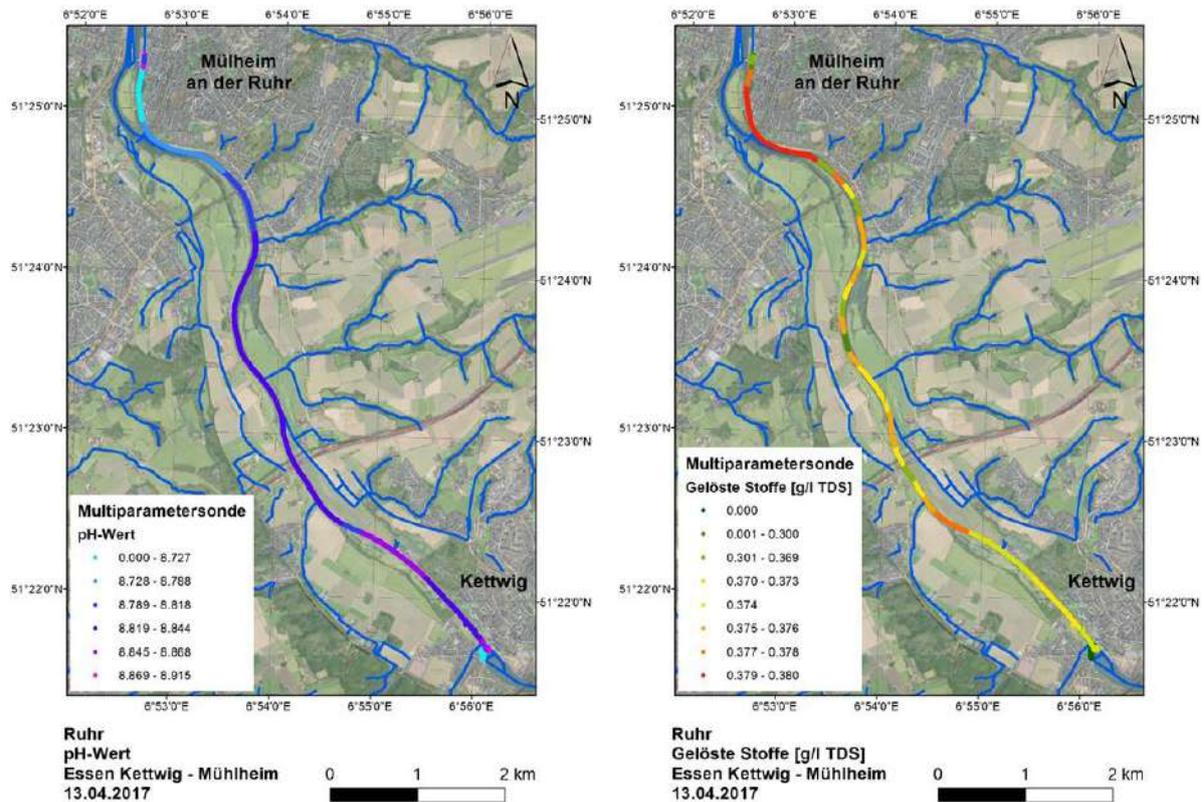
Abbildung 32 zeigt Messergebnisse für die Leitfähigkeit (links) und die Salinität (rechts) im Verlauf des Messabschnittes der Ruhr am 14.04.2017. Die Leitfähigkeit beträgt zwischen 0,45 mS/cm und 0,57 mS/cm. Die Salinität liegt im Bereich zwischen 0,17 Sal und 0,28 Sal.



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

Abbildung 32: Messergebnisse für die Leitfähigkeit (links) und die Salinität (rechts) auf der Ruhr am 14.04.2017

Abbildung 33 zeigt Messergebnisse für den pH-Wert (links) und die gelösten Stoffe (rechts) im Verlauf des Messabschnittes der Ruhr am 14.04.2017. Der pH-Wert liegt bei knapp 9 und die gelösten Stoffe bei 0,3 g/l TDS bis 0,38 g/l TDS.



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

Abbildung 33: Messergebnisse für den pH-Wert (links) und die gelösten Stoffe (rechts) auf der Ruhr am 14.04.2017

Abbildung 34 zeigt Messergebnisse für die Trübung (links) und die suspendierten Stoffe (rechts) im Verlauf des Messabschnittes der Ruhr am 14.04.2017. Die Trübung variiert sehr stark zwischen 7 NTU und 130 NTU. Entsprechend verhalten sich die Werte der suspendierten Stoffe. Sie liegen im Bereich zwischen 0,03 g/l und 0,52 g/l.

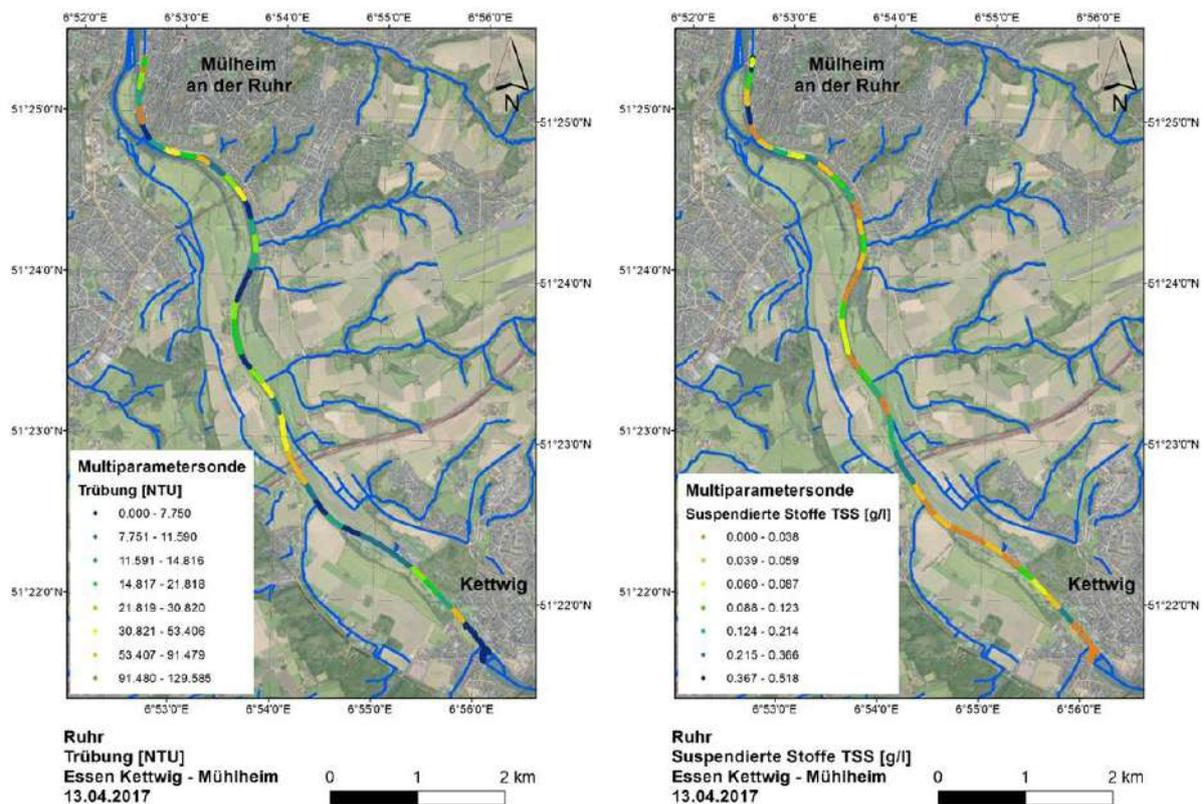


Abbildung 34: Messergebnisse für die Trübung (links) und die suspendierten Stoffe (rechts) auf der Ruhr am 14.04.2017

Parallelmessung zur Validierung der Daten

Eine zusätzliche Validierung wurde in Parallelmessungen zwischen FiW und IWW durchgeführt. Die Temperaturwerte der Parallelmessungen wichen im Schnitt 0,05 °C voneinander ab, für die elektrische Leitfähigkeit liegt diese Abweichung bei 0,01 mS/cm. Der Sauerstoffgehalt unterschied sich etwas deutlicher, im Schnitt 0,59 mg/l. Die Trübungswerte schwankten stark.

Tabelle 4: Ergebnisse einer MPS-Vergleichsmessung des IWW mit dem FiW in der Wurm (10.07.2017)

FiW Uhrzeit	Temperatur [° C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Wasserstand [m]	Salinität [Sal]	Gelöststoffe [g/l TDS]	Dichte [g/l]	O2 Konzentration [mg/l]	Trübung [NTU]
11:47:28	20,69	0,58	-0,59	0,28	0,39	998,28	9,60	4,38
11:48:28	20,61	0,57	-0,59	0,28	0,39	998,29	9,72	4,86
11:49:28	20,60	0,58	-0,59	0,29	0,39	998,30	9,73	4,99
11:50:28	20,59	0,58	-0,59	0,29	0,39	998,30	9,71	3,33
11:51:28	20,60	0,58	-0,59	0,29	0,39	998,30	9,71	3,79
11:52:28	20,58	0,59	-0,59	0,29	0,39	998,30	9,69	11,31
IWW Uhrzeit	Temperatur [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Wasserstand [m]	Salinität [Sal]	Gelöststoffe [g/l TDS]	Dichte [g/l]	O2 Konzentration [mg/l]	Trübung [NTU]
11:47:07	20,63	0,57	-0,56	0,28	0,38	998,29	9,02	8,46
11:48:07	20,56	0,57	-0,56	0,28	0,38	998,30	9,10	8,33
11:49:07	20,54	0,58	-0,55	0,28	0,39	998,31	9,12	4,94
11:50:07	20,55	0,58	-0,55	0,28	0,39	998,31	9,14	3,62
11:51:07	20,54	0,58	-0,55	0,28	0,39	998,31	9,12	4,23
11:52:07	20,55	0,58	-0,55	0,28	0,39	998,31	9,13	3,14
Mittelwert der Abweichung	0,05	0,01	-0,04	0,00	0,00	-0,01	0,59	-0,01

Zwischenfazit

Mit diesen Tests konnte gezeigt werden, dass der Einsatz mobiler Gewässergütesensorik eine wesentliche Verbesserung der Datenerhebung für wasserwirtschaftliche Fragestellungen darstellt; eine solche hochaufgelöste Erfassung von Gewässergüteparametern kann mit herkömmlichen Verfahren, wie eingangs beschrieben, nicht erfolgen.

Rurtalsperre

Die INN-Sonde wurde unter anderem am 20.07.2016 auf der Rurtalsperre eingesetzt. Im Bereich möglicher Sedimentation (Vorstauer) wurden auf sechs ausgesuchten Punkten stationäre Messungen mit der Dauer von jeweils einer Minute ausgeführt. Die Punktpositionen wurden mittels GPS eingemessen. Die Sonde wurde auf der Sohle abgelegt und zu jeder Punktmessung wurden Abklingkurven aufgenommen und anschließend bearbeitet. Die Lage der Messpunkte ist in Abbildung 35 dargestellt, die Abklingkurve für einen der Messpunkte ist in Abbildung 36 dargestellt.

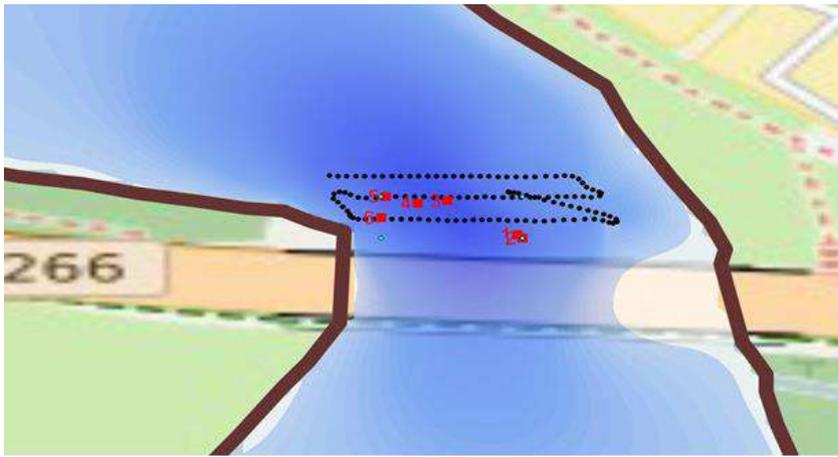


Abbildung 35: Lage der Messpunkte an der Rurtalsperre (20.07.2016)

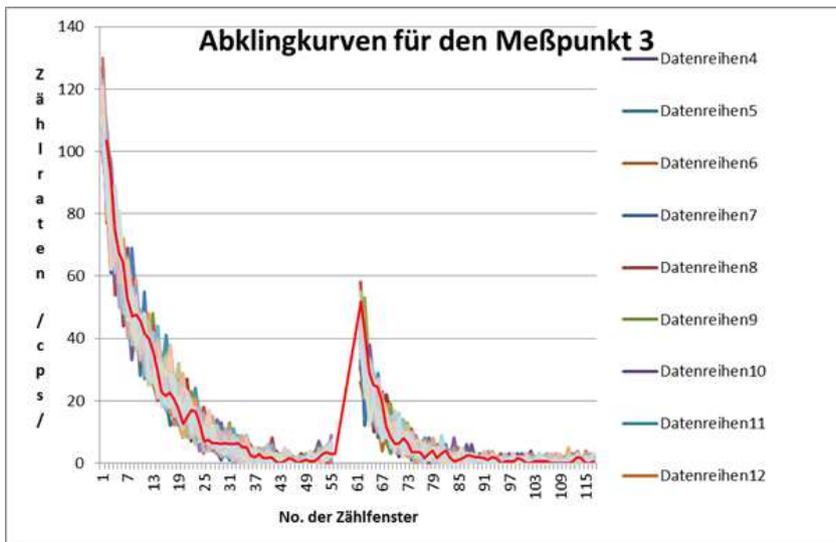


Abbildung 36: Abklingkurven für Messpunkt 3 (Rurtalsperre, 20.07.2016)

Im Bereich des Registrierfensters 40 werden für Kanal 1 nur noch zufällige Impulse registriert, so dass für Messpunkt 3 von einer Eindringtiefe von 3,5 - 4 m ausgegangen werden kann. In den Fenstern ab Nr. 50 wird eine geringe Impulszunahme vermerkt, damit kann auch eine

organische Komponente im Sediment angenommen werden. Die Abklingkurven der anderen Messpunkte fielen vergleichbar aus. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Ergebnisse der INN-Messung auf der Rurtalsperre (20.07.2016)

Messpunkt	1	2	3	4	5	6
Zusammensetzung	sandig	Sandig bis schluffig	Sandig bis tonig	schluffig	Sandig bis schluffig	Sandig
Dicke /m/	1,85	2,1	1,9	2,2	2,1	1,9
Verdichtung	Ab 20 cm zunehmend	Ab 50 cm konstant	Ab 70 cm Fraktionswechsel	Ab 30 cm zunehmend	Ab 60 cm zunehmend	Fraktionswechsel bei 1 m
Besonderheiten	Fraktionswechsel	Bis 1m überwiegend sandig, danach schluffig	Leichte Organikindikation, im Sedimenttieften tonig	Differenzierung im Grund	Schichtung Sand/Schluff/Ton	Feinfraktion dominierend

5.3.7 Anpassungen der MPS

Während der Projektlaufzeit wurden weitere Anpassungen wie die Reduzierung der Messintervalle der optischen Sonden der MPS von 60 auf 20 Sekunden umgesetzt, um zeitlich noch hochaufgelöstere Gewässerparameter zu erhalten. Zudem wurde an einer Gewichtsreduzierung der MPS von Seiten SEBA gearbeitet, um die Gesamt-Gewichtsbelastung des Bootes zu reduzieren.

Um bspw. in Staubereichen festzustellen, ob sich eine seenähnliche Temperaturschichtung eingestellt hat, wurde der weiter oben beschriebene Anhänger entwickelt, um die Multiparametersonde in verschiedene genau-definierbare Tiefen herablassen zu können (vgl. Kapitel 5.2.4). Mit dem Trailer sind Wassertiefen von bis zu 10 m erreichbar. Der Trailer ist in Abbildung 37 zu sehen.



Abbildung 37: Modularer Anhänger "Trailer" mit fernsteuerbarer Winde zum Herablassen der MPS in verschiedene Wassertiefen.

Dieses System wurde ebenfalls ausgiebig getestet. Hier wurde im Staubereich eines Wehrs an der Lippe an vier verschiedenen Stellen über eine Tiefe von etwa 3,5 m der Tiefenverlauf der verschiedenen Parameter verfolgt. Abbildung 38 zeigt die differenzierten Temperatur- oder Sauerstoffprofile über die Wassertiefe an den vier Punkten. Trotz der erhöhten Temperaturen in den oberen Wasserschichten ist dort der Sauerstoffgehalt am höchsten. Dies ist durch den besseren 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.

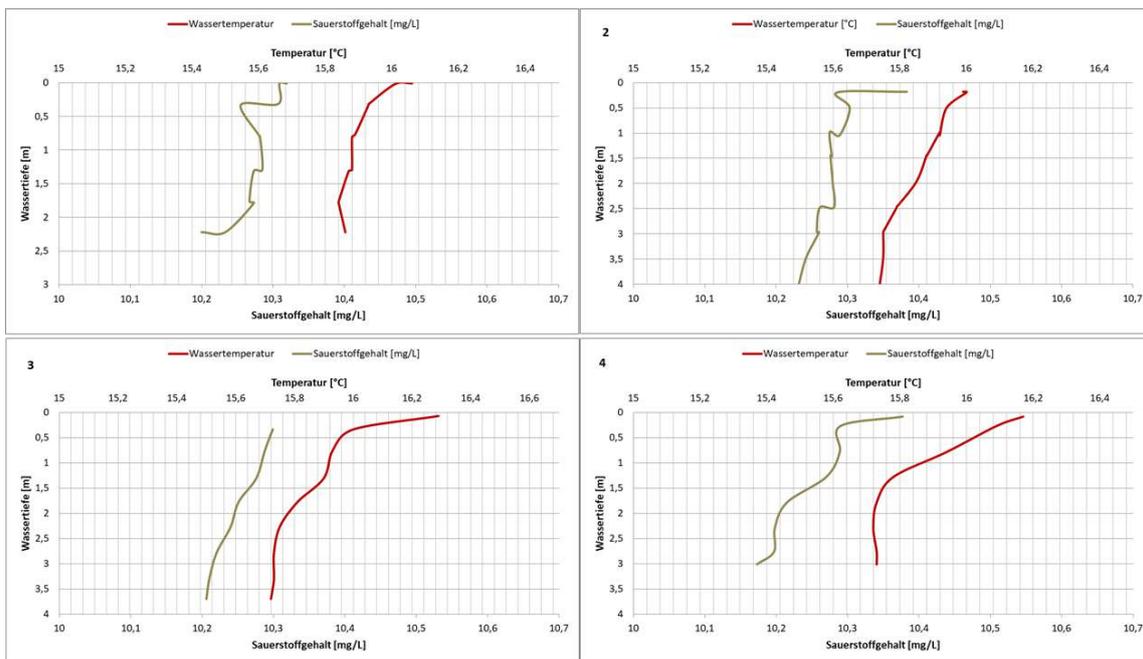


Abbildung 38: Wassertemperatur und Sauerstoffgehalt im Staubereich Wehr Hamm (24.08.2017). Gemessen mittels MPS (Trailer).

5.3.8 Anpassungen der INN-Technik

Im Projektverlauf wurden verschiedene Anpassungsarbeiten an der INN-Sonde vorgenommen. Dabei wurde unter anderem eine neue Generation von Mikroprozessoren implementiert, die eine Einsparung von Platz ermöglicht und damit eine Verkleinerung der Sonde ermöglicht.

Ebenfalls wurde die Bediensoftware kontinuierlich ausgebaut und erweitert um die Bedienbarkeit zu erleichtern.

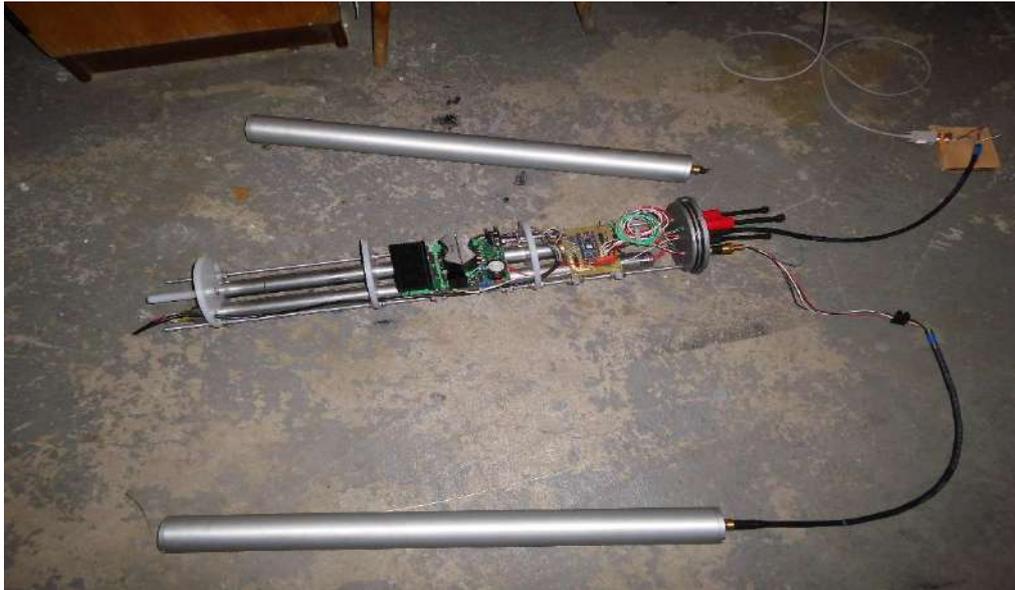


Abbildung 39: Sondenkonstruktion im Labortest

Bei methodischen Arbeiten wurde festgestellt, dass der interpretative Aufwand ungerechtfertigt hoch ist, wenn es nicht ermöglicht wird, die Sonde automatisch auf einem fixierten Abstand zum Grund zu halten. Bei Schleparbeiten erfolgt die Orientierung deshalb an einer qualitativen Aussage, quantitative Aussagen werden durch Punktmessungen abgesichert. Mit dieser Arbeitsthese wurden die weiteren Arbeiten angegangen. Mit einem Testgerät fanden in diesem Muster Tests statt, gleichzeitig wurden laufend Anpassungen der Software vorgenommen.

Es wurden verschiedene Bauweisen erprobt, die sich für unterschiedliche Zwecke eignen. Eine dieser Modifikationen ist in Abbildung 40 dargestellt.

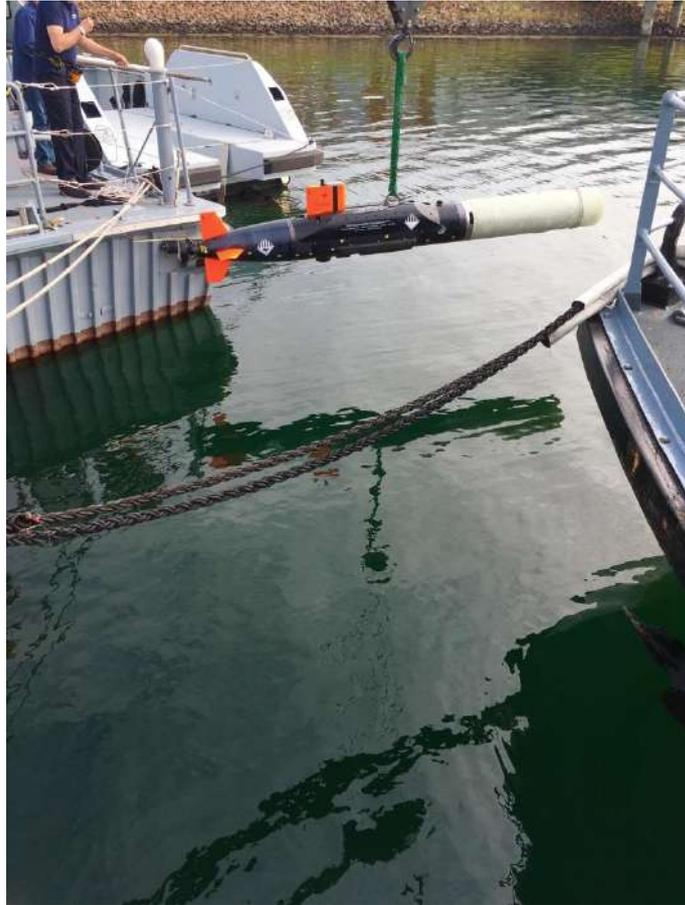


Abbildung 40: INN-Sonde in Tow-Fish Bauweise

5.4 Weiterentwicklungen der Gewässergütesensorik im Rahmen der River-View-Aufstockung

Mit der im ursprünglichen Antrag vorgesehen und erfolgreich im Einsatz befindlichen Multiparametersonde - MPS-D8 können die Gewässergüteparameter Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffkonzentration, pH-Wert, Trübung und Redoxpotential aufgenommen werden. Diese Leitparameter werden i.d.R. für eine allgemeine und standardmäßige Beschreibung der Gewässergüte verwendet. Im Gegensatz zu den Leitparametern können einzelne Hauptionenkonzentrationen (z.B. Chlorid, Nitrat und Ammonium) kritische Fremdeinflüsse im Rohwasser meist besser und eindeutig anzeigen. Die Nitratkonzentration ist beispielsweise ein relevanter Parameter, da eine erhöhte Konzentration (fast) immer eine direkte Assoziation mit anthropogenen Einträgen zulässt (z.B. Gülle aus der Landwirtschaft).

Um das Spektrum der Gewässergüte-Begutachtung mittels des RiverBoats hinsichtlich spezifischer Parameter wie Nitrat zu erweitern, wurde im Rahmen des Aufstockungsantrags eine technische Lösung entwickelt, um zusätzliche Wasserqualitätssensoren zu integrieren.

Da das bestehende Setup der MPS-D8 keine optimale Erweiterung ermöglicht und der Einsatz einer größeren Anbindungsoption von Sensoren durch beispielsweise eine MPS-K16 aufgrund des Payloads sowie einer dann kaum mehr ausbalancierten Trägerplattform sich nicht anbietet, ist das Ziel die Integration einer weiteren elektrotechnisch baugleichen MPS mit zusätzlicher Sensorik in das RiverBoat.

5.4.1 Systemdefinition Formfaktoren und Schnittstellen

Zur Integration von Sensorik zur Erfassung der Gewässergüte umfasste eine erste und frühe Projektphase die Festlegung zweier unterschiedlicher Anwendungsszenarien:

- (1) Als Standard die fixierte Einbindung einer SEBA MPS am Trägerboot bzw. RiverBoat für die Messung von Längsprofilen im Wasserkörper, sowie
- (2) die Einbindung einer Multiparametersonde im separatem Trailersystem integriert an einer Seilwinde für Tiefensondierungen im Wasserkörper.

Das Konzept der eingesetzten MPS (vgl. Abbildung 41) entspricht dabei einem Multisensorsystem das mit maximal acht Wasserqualitätssensoren ausgestattet ist und somit bis zu 13 Messparameter erfassen kann.



Abbildung 41: SEBA-Multiparametersonde Typ MPS-D8 mit bis zu acht Wasserqualitätssensoren:
(a) Sondengehäuse aus Edelstahl sowie Schutzkorb mit Schlitz und Löchern im Bereich der Sensorik für bessere Anströmbedingungen.
(b) MPS ohne Schutzkorb und mit sichtbaren Sensoren

Für den Piloteinsatz wurde festgelegt, dass das Sondengehäuse aus Edelstahl, trotz des relativ hohen Gewichts von etwa 3 kg, aus Gründen der Robustheit zunächst beizubehalten wird. Zur Erfassung und Speicherung der Messdaten der einzelnen Sensoren wurde die Ausführung einer sondenseitigen Messdatenspeicherung festgelegt, d.h. eine SEBA-MPS des Typs Qualilog-8 mit integrierter Flashspeicherfunktion. Detaillierte technische Spezifikationen der eingesetzten Qualilog-8 sind in Tabelle 1 einzusehen.

Im Rahmen des ersten Piloteinsatzes der Qualilog-8 wurden folgende fünf Sensoren und entsprechende Parameter für die Erfassung der Gewässergüte ausgewählt:

- Drucksensor: Wasserstand [m]
- Leitfähigkeitselektrode: Temperatur [°C] und elektrische Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
- pH-Elektrode: pH-Wert
- Optischer Sauerstoffsensoren: Sauerstoffkonzentration [mg/l]
- Optischer Trübungssensoren: Trübung [FTU]

Tabelle 6: Übersicht zu technischen Spezifikationen der Multiparametersonde Qualilog-8

Sondentyp	SEBA Qualilog-8 Multiparametersonde
Durchmesser	48 mm
Grundlänge	493 mm +81 mm Stecksystem (Sensoren) +185 mm mit Trübungssensor
Grundgewicht	mit Stecksystem 2,4 kg mit Trübungssensor +0,95 kg
Material Sondenkörper	1.4404 Edelstahl
Max. Anzahl Sensoren	8
Max. Betriebsdruck	50 bar
Betriebstemperatur	-5°C...+50°C (nicht gefrierend)
Messdatenspeicher	Integrierter Flashspeicher 1 Mbyte für ca. 70.000 Messwerte
Speicherart	Ringspeicher
Schnittstelle	RS485 (SEBA Protokoll)
Versorgungsspannung	8 – 15VDC mit optischen Sensoren
Spannungsquelle	Batteriefach

Als Schnittstelle zum Trägerboot wurde festgelegt, auf eine Bluetooth-Anbindung zurückzugreifen, damit ein berührungsloser Datentransfer zum Trägerboot-Rechner ermöglicht wird. Die Integration des Bluetooth-Moduls an den Multiparametersonden orientiert sich dabei an den beiden Anwendungsszenarien (siehe oben):

- (1) Für die fixierte Standardanbindung einer MPS wird das Bluetooth-Modul im Schutzköcher angelegt, wobei der Schutzköcher gleichsam die Befestigung am Trägerboot bildet (vgl. Abbildung 42 und Abbildung 43)
- (2) Für die Anwendung am Trailersystem wird das Bluetooth-Modul im Kabelwindenaufsatz integriert (vgl. Abbildung 44 und Abbildung 45).

Um das Spektrum der Gewässergüte-Begutachtung mittels des *RiverBoat* hinsichtlich spezifischer Parameter wie z.B. Nitrat oder Ammonium zu erweitern, wurde in der verlängerten Projektphase festgelegt, zusätzliche Wasserqualitätssensoren zu integrieren. Ziel war es daher, zwei elektrotechnisch baugleiche Multiparametersonde Typ Qualilog-8 in das *RiverBoat* zu

integrieren, wobei die zweite MPS auf der gegenüberliegenden Seite der Trägerplattform auch für einen Ausgleich hinsichtlich Gewichtsverteilung sorgt. Weiterhin sollten für die Entlastung des Trägersystems bezüglich des Gewichtes beide Sonden aus hochwertigen und leichteren Kunststoff bestehen. Die Multiparametersonden sollten daher aus PEEK-Kunststoff (Polyetherketon) angefertigt werden, um das Gewicht möglichst zu reduzieren.



Abbildung 42: MPS am RiverBoat fixiert mittels Schutzköcher (grau) sowie integrierte Akkuversorgung und Bluetooth-Modul

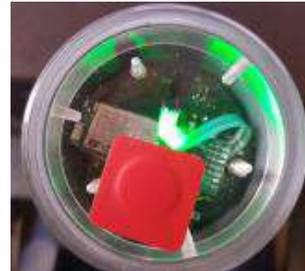


Abbildung 43: Bluetooth-Modul integriert im Schutzköcher für den fixierten Sondenbetrieb.



Abbildung 44: Foto mit Ausschnitt der Kabelwindenaufsatz mit integriertem SEBA Bluetooth-Modul



Abbildung 45: Trägersystem mit Kabelwinde sowie SEBA-MPS

Folgende Parameter-Konzeption der beiden MPS sowie jeweils integrierten Sensoren wurden festgelegt und sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Übersicht zur Systemdefinition der Gewässergüte-Parameter die mittels MPS erfasst werden

Gewässergüte-Messgerät	Parameter / Sensorik
SEBA Multiparametersonde 1	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserstand • pH • Sauerstoffkonzentration • Temperatur • Nitratkonzentration • Trübung
SEBA Multiparametersonde 2	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserstand • Redoxpotential • Ammoniumkonzentration • Chlorophyll-a • Temperatur • Elektrische Leitfähigkeit

5.4.2 Entwicklung Energiekonzept

Es wurde festgelegt die Gewässergüte-Sensorik mit einer eigenständigen Energieversorgung auszustatten, da eine Verknüpfung der primären Bootversorgung ungünstige konstruktive Folgen hätte. Mittels integrierten Akkus nahe an den MPS kann ein autonomer Messbetrieb erfolgen. Beide Anwendungen (1) und (2) können jeweils über Bluetooth aktiviert werden. Für den Fall (2) ist eine Fernsteuerung und eine Absenkung auf die gewünschte Wassertiefe mittels einer Seilwinde möglich. Die Energieversorgung muss somit nicht nur das Messsystem selbst, sondern auch die Bluetooth-Module versorgen.

Für den fixierten Einsatz (1) der SEBA Multiparametersonde wird der sogenannte Kunststoff-Schutzköcher (vgl. Abbildung 46) als Befestigung am RiverBoat genutzt sowie für die jeweiligen Bluetooth-Module an beiden Sonden. Der Schutzköcher wurde demnach so angefertigt, dass unterhalb des Bluetooth-Moduls eine vollintegrierte Energieversorgung mit 7.4 V Lithium-Ionenakku das jeweilige System autark versorgen kann. Im Kabelwindenaufsatz (2) wurde dasselbe Energieversorgungskonzept zentral im Windenaufsatz integriert.



Abbildung 46: (a) Kunststoffköcher mit Befestigungsvorrichtung zur Fixierung der SEBA MPS am RiverBoat. (b) Integriertes Bluetooth-Modul im Schutzköcher. Unterhalb des Moduls befindet sich die integrierte Akkuversorgung (nicht sichtbar) der MPS. (c) Zubehör zur Befestigung

Multiparametersonde 2 (naturfarbener PEEK)	<p>der Lumineszenz. <i>Messbereich:</i> 0,008 – 25 mg/l (25°C) <i>Genauigkeit:</i> +/- 1 %</p>
	<p>Nitratkonzentration: Mit ionenselektiven Elektroden (ISE) können eine Vielzahl von Ionen quantitativ erfasst werden. In Abhängigkeit von der Konzentration eines bestimmten Ions verschiebt sich das Potential an der ionenselektiven Membran. Das Gegenpotential bildet das Referenzsystem der pH- oder Redoxelektrode. Mit der gemessenen Spannung kann mit Hilfe der Nernst-Gleichung auf die Konzentration geschlossen werden. <i>Messbereich:</i> 0,4 – 60.000 mg/l <i>Genauigkeit:</i> +/-5 %</p>
	<p>Trübung: Die Trübungsmessung erfasst die im Wasser ungelösten suspendierten Partikel. Die Streustrahlung wird im 90°-Winkel zur Anregungsquelle bei 880 nm gemäß DIN EN 27027 gemessen. Die Kalibrierung erfolgt mit Formazinstandards. In Bezug zu diesen wird der Messwert in NTU ausgegeben. <i>Messbereich:</i> 0 – 5.000 NTU <i>Genauigkeit:</i> +/-1 %</p>
	<p>Wasserstand (siehe oben) <i>Messbereich:</i> 0 – 10 m <i>Genauigkeit:</i> +/-0,1 %</p>
	<p>elektrische Leitfähigkeit / Temperatur: Der Verstärkerkreis arbeitet mit einer Vier-Elektroden-Messzelle (jeweils zwei Strom- und Spannungselektroden). Aus Strom- und Spannungsmessung wird der Leitwert der Flüssigkeit ermittelt. Für die Bestimmung der Leitfähigkeit natürlicher Gewässer ist der Temperaturgang nach der Europeanorm EN27888:1994 einprogrammiert. <i>Messbereich:</i> 0 – 200 mS/cm <i>Genauigkeit:</i> +/-0,5 %</p>
<p>Redoxpotential: Der Verstärkerkreis arbeitet mit einer Redox-Elektrode, die als Einstabmesskette ausgeführt ist. Als Bezugs-elektrode dient ein Ag/AgCl-System. Eine elektrische Potentialtrennung und die interne Versorgung des Eingangsverstärkers sorgen für schnelles Ansprechverhalten. <i>Messbereich:</i> -1.200 mV – 1.200 mV <i>Genauigkeit:</i> +/- 10 mV</p>	
<p>Ammoniumkonzentration (siehe oben Nitratkonzentration) <i>Messbereich:</i> 0,2 – 18.000 mg/l <i>Genauigkeit:</i> +/-5 %</p>	
<p>Chlorophyll-a: Fluoreszierende Stoffe werden mit Hilfe eines miniaturisierten Fluorometer erfasst. Diese werden unterhalb der stoffspezifischen Fluoreszenzwellenlänge angeregt. Das emittierte Licht wird mittels Filter selektiert und von einem Photodetektor erfasst. Die Menge des emittierten Lichts ist ein Maß für die Konzentration für Chlorophyll-a. <i>Messbereich:</i> 0,03 – 500 µg/l <i>Genauigkeit:</i> +/-3 %</p>	

Die bereits für den ersten Piloteinsatz angefertigte erste MPS-1 aus Edelstahlgehäuse mit Sensorik für Wasserstand, Temperatur, Leitfähigkeit, Sauerstoffkonzentration und Trübung wurde erneut neu angefertigt und um die Sensorik für Nitratkonzentration erweitert. Für beide neuen Multiparametersonden wurden die Bauteile nun aus leichtem und Kunststoff-Gehäuse aus dem Hochleistungsverbundkunststoff Polyetherketon (PEEK) angefertigt (vgl. Abbildung

47 a - b). Ergänzend für die MPS-1 mit Trübungssensorik wurde der Sonden-Schutzkorb aus schwarzem PVC angefertigt, da der optische Sensor mit 90°-Streulichtverfahren schwarze Oberflächen benötigt, um mögliche Reflektionen in der Messumgebung zu vermeiden (vgl. Abbildung 47 c - d). Für die zweite MPS-2 wurde der Schutzkorb aus gleichem naturfarbenen PEEK angefertigt (vgl. Abbildung 47 d).

Weiterhin wurde für die MPS-2 die Integration eines Chlorophyll-a-Sensors als Extension (verlängerte Erweiterung) angelegt (Abbildung 48), um die angedachte Anzahl an Sensoren integrieren zu können. In Abbildung 49 ist das RiverBoat mit beiden neuen Multiparametersonden im Synchronbetrieb als fixierte Anwendung ersichtlich. Für die Anwendung an der Kabelwinde können beide Geräte im Wechselbetrieb eingesetzt werden.



Abbildung 47: (a) PEEK-Kunststoff-Bauteile für den Sondenkörper mit Sondenrohr, Trägerteil und Stecker. (b) PEEK-Trägerteil mit Extension für Chlorophyll- oder Trübungssensor. (c) SEBA MPS mit Trübungssensor, Sauerstoffsensor, pH-Elektrode und Nitratsensor und schwarzem PVC

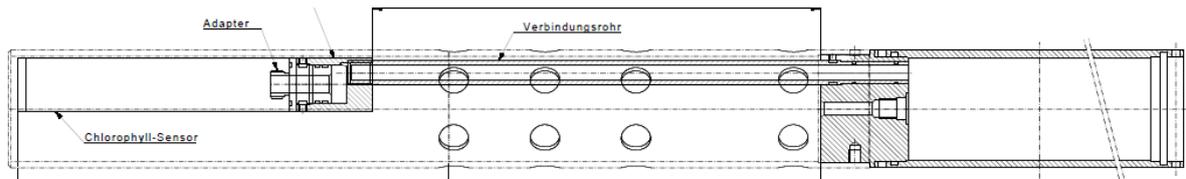


Abbildung 48: Seitenansicht der Konstruktionszeichnung der MPS mit Chlorophyll-a-Sensor



Abbildung 49: RiverBoat mit beiden SEBA Multiparametersonden parallel fixiert

Die neu eingesetzten ionenselektiven Elektroden zur Erfassung der Nitrat- und Ammoniumkonzentration bedürfen einer regelmäßigen monatlichen Kalibrierung mittels Laborstandards. Die pH- bzw. Redox-Elektroden benötigen eine Kalibrierung im 3-Monatszyklus. Die restliche Sensorik kann mittels jährlicher Überprüfung genutzt werden. Mittels Auslesekabel können die entsprechenden Kalibrierungsvorgänge nach Abmontieren der jeweiligen MPS in Verbindung mit einem PC sowie der SEBAConfig-Software vorgenommen werden.

5.4.5 Bootintegration der Sonden und Funktionstests

In verschiedenen Testfahrten wurde die Funktionalität der einzelnen Sonden, der Befestigung am RiverBoat sowie die Kommunikation mit dem Boots-internen Rechner überprüft. Die Schnittstelle wurde über zwei separate Bluetoothmodule realisiert. Die MPS sind mit einer kombinierten Batterieversorgungs- und Kommunikationseinheit versehen. Die beiden MPS verfügen jeweils über eine eigene Kommunikationsschnittstelle. Für die Kommunikation zwischen MPS und Hauptrechner des RiverBoats wurde das RiverBoat mit einer weiteren Bluetooth-Schnittstelle ausgerüstet.

Die Datenaufzeichnung erfolgt hiermit redundant, zum einen auf dem Datalogger der MPS, zum anderen in den Rohdatenstreams der Command and Control Software des Bootes Neptus. In Neptus wird hiermit ebenfalls die Zusammenführung der MPS-Werte mit Zeitstempel und Koordinaten der Bootseinheit realisiert.

Der Export der aufgezeichneten Güteparameter über Neptus funktioniert hiermit ebenfalls einwandfrei und liefert eine csv-Tabelle mit Gütemesswerten, einem Header mit Bezeichnung der Parameter und den jeweiligen Koordinaten des Messpunktes. Die Kopplung der MPS mit dem RiverBoat und die Datenaufzeichnung funktionierte in den Tests einwandfrei. In Abbildung 50 ist das RiverBoat bei einem der Tests zu sehen.



Abbildung 50: RiverBoat mit Überwassermappingeinheit und den beiden MPS

5.4.6 Tests des Systems in natürlichen Gewässern

An verschiedenen Befahrungsorten wurden Tests der Multiparametersonden nach der Umrüstung durchgeführt.

An der Rur in der Nähe von Aachen wurden die beiden Multiparametersonden parallel am RiverBoat eingesetzt. Es galt hier zum einen die Funktionstüchtigkeit aller Bestandteile nach erfolgter Umrüstung sicherzustellen, und die hierdurch erhobenen Daten zu verifizieren.

In Abbildung 51 und Abbildung 52 sind beispielhaft zwei Parameter der Multiparametersonden dargestellt. Der Parameter Chlorophyll-a, als Indikator für das Vorhandensein von Phytoplankton, stellt einen wichtigen Baustein der gesamtheitlichen Analyse der Wasserqualität dar. Darüber hinaus liefern die Parameter Nitrat und Ammonium wichtige Erkenntnisse über Einleitungen von organischen Verunreinigungen.

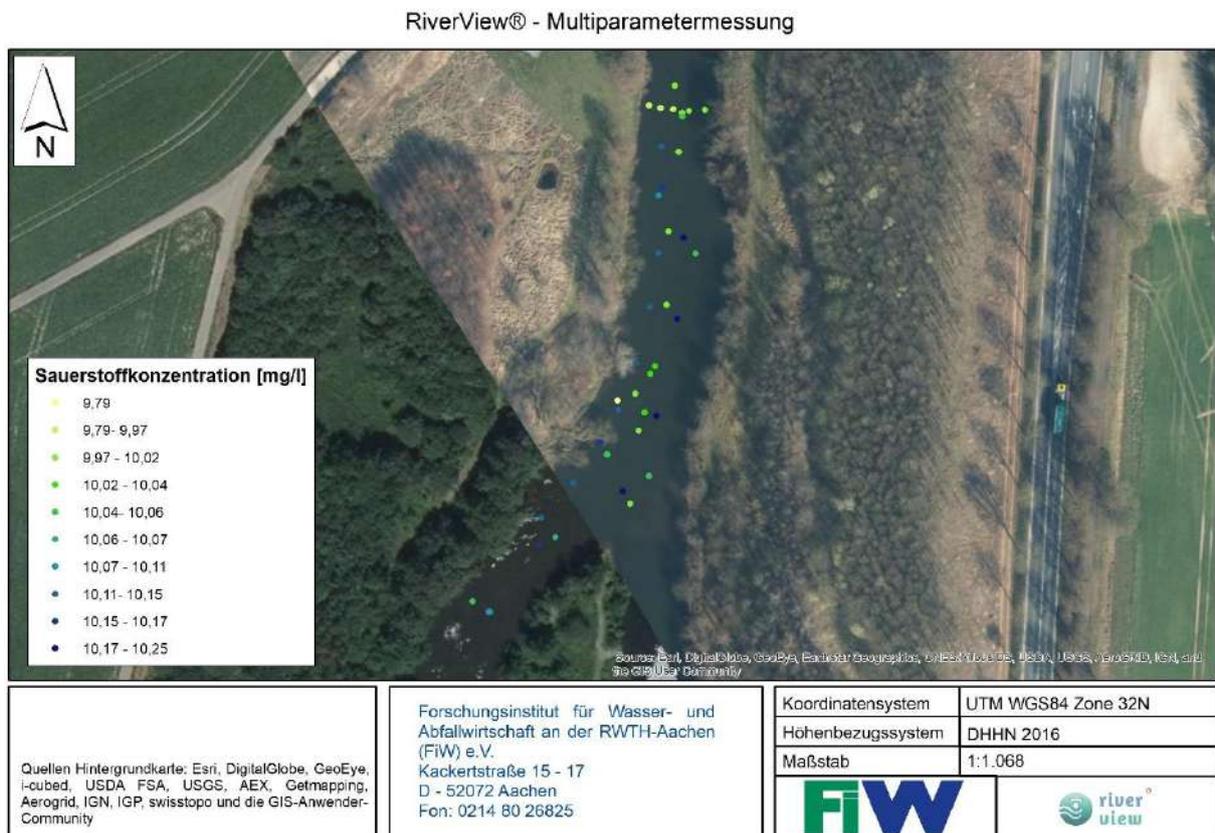


Abbildung 51: Sauerstoffkonzentration [mg/l] in einem Abschnitt der Rur

RiverView® - Multiparametermessung



Abbildung 52: Cholorphyll-a-Konzentration [µg/l]

5.4.7 Evaluierung der Zustandserfassungs-Sensorik

Anpassungsmaßnahmen, wie die Verkürzung des Messintervalls und die Reduzierung des Gewichts, wurden durch die Partner umgesetzt.

Mit der entwickelten Multiparametersonde und dem entwickelten Trailer, der es ermöglicht die Multiparametersonde in verschiedene Wassertiefen herabzulassen und so bspw. Temperaturprofile im Wehrstau zu messen, wurden verschiedenste Tests durchgeführt. Die Sonden inkl. der drahtlosen Kommunikation mit dem RiverBoat funktionieren stabil und sind einsetzbar.

Testmessungen zu Temperaturprofilen wurden bereits in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner EGLV und dem Landesumweltamt NRW durchgeführt.



Abbildung 53: Das RiveBoat mit integriertem Trailer mit Winde, um die MPS (SEBA) in verschiedene Wassertiefen herabzulassen.

Das vollständige RiverBoat inkl. Trailer ist in Abbildung 53 bei einer Testfahrt auf einem Standgewässer zu sehen.

Darüber hinaus kann ein ADCP-Messgerät zur Erfassung der Fließgeschwindigkeit und des Abflusses auf dem Trailer montiert werden, siehe Abbildung 55.



Abbildung 55: RiverBoat mit ADCP Anhänger

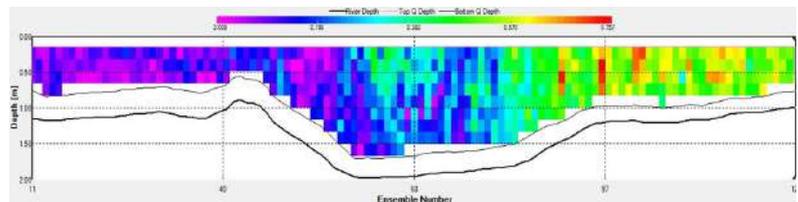


Abbildung 54: Mit ADCP gemessenes Geschwindigkeitsprofil

Im Berichtszeitraum wurden ca. 130 Gewässerkilometer auf zahlreichen verschiedenen Gewässern vom FiW und IWW mit dem RiverBoat und der Nelli 2 zurückgelegt. Ziel war es, sowohl Erfahrungen mit dem Einsatz der Messboote zu sammeln, sowie die Qualität der gewonnenen Daten zu bewerten. Somit kann eine erste Einschätzung hinsichtlich der Dauer- und Kosten gemacht werden. Hierzu wurde eine ganzheitliche Messung inkl. INN-Sonde auf der Lippe durchgeführt. Parallelmessungen der Projektpartner FiW und IWW führten darüber hinaus zur Validierung der gemessenen Güteparameter.

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass die entwickelte modulare Zustandserfassungssensorik gut für die geplanten Anwendungsfälle geeignet ist. In zahlreichen Tests wurde die Funktionstüchtigkeit gezeigt und die Präzision der Messwerte bewertet.

Die INN-Sonde wurde intensiv weiterentwickelt und in Tests evaluiert. Die Ergebnisse sind vielversprechend und zeigen die Möglichkeiten der Technik auf. Der Integrationsgrad dieser Technik konnte allerdings nicht so weit vorangetrieben werden wie derjenige der Multiparametersonden, da das Gerät insgesamt deutlich komplexer aufgebaut ist und auf einem niedrigeren Technologiereifegrad anzusiedeln ist. Der Einsatz der INN-Sonde vom Trailer des River-Boats ist möglich, jedoch nach wie vor mit recht hohem logistischen Aufwand verbunden

Der vollständige Parameterkanon umfasst zum Zeitpunkt des Projektabschlusses folgende Parameter:

Tabelle 9: Wassergüteparameter der MPS

Parameter	Einheit	Genauigkeit
Wasserstand	mWs	+/- 0,1 %
Temperatur	°C	+/- 0,1 °C
Leitfähigkeit	µS/cm	+/- 1 µS/cm
Gelöststoffe	mg/l	Abgeleitet von Leitfähigkeit
Salinität	-	+/- 0,2
Wasserdichte	g/l	Abgeleitet von Leitfähigkeit
pH-Wert	-	0,1 pH
Trübung	NTU	0,3 NTU
Sauerstoffgehalt	mg/l	+/- 0,02 mg/l
Sauerstoffsättigung	%	+/- 0,5 %
Ammonium	mg/l	+/- 2 mg/l
Nitrat	mg/l	+/- 2 mg/l
Chlorophyll-a	µg/l	+/- 3 %

Die Georeferenzierung und die Datenspeicherung erfolgt über den internen Messrechner des RiverBoats und wird in den Neptus-Logs vorgehalten. Eine eigens implementierte Exportfunktion ermöglicht das Auslesen der Datensätze.

Damit ist eine umfassende Erfassung von Gewässergüte auf der mobilen Plattform des RiverBoat für unterschiedlichste Fragestellungen gegeben: Längsprofile entlang von Fließgewässern, räumlich hochaufgelöste Erfassung von Temperaturprofilen an Kühlwassereinleitungen oder zeitliche Veränderungen von Parametern an einer festen Position sind Beispiele für die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten.

Die wasserwirtschaftlichen Fragestellungen, die hiermit bedient werden können, sind ebenfalls vielseitig. Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft oder Abschlüge aus der Siedlungsentwässerung, Temperaturschichtungen an Standgewässern, Entwicklungen der Temperatur im Tagesverlauf, Sauerstoffentwicklungen im Tagesverlauf und andere Fragestellungen lassen sich unkompliziert und mit wenig zeitlichem Aufwand aufzeichnen.

5.5 RiverScan – Überwassermapping mittels Panoramakamera

Das Ziel des Arbeitspaketes RiverScan war die Entwicklung eines mobilen multisensoralen Überwasser-Mappingsystems für die (halb)automatische Bildanalyse und -messung. Die Grundlage bildet ein omnidirektionales Mehrkammersystem (Panoramakamerasystem), das auf der Montageplattform installiert ist, so dass die komplette Raumumgebung bei Messfahrten mit hoher zeitlicher Auflösung photographisch erfasst werden kann. Zusammen mit der Sonarsensorik des RiverBoats kann die geometrische Situation somit unter und über Wasser vollständig und lückenlos entlang des Flusslaufes kartiert werden. Alle Aufnahmen werden zusammen mit den Zeit- und Navigationsdaten, die u. a. für die zeitliche und räumliche Referenzierung der Bilddaten benötigt werden, sowie den übrigen Gewässerparametern in der Datenelementkomponente von RiverAdmin (AP 4) gespeichert. Die Bilddaten bildeten die Basis für die Verwirklichung folgender Teilziele:

- Verarbeitung und Aufbereitung der Bildaufnahmen, so dass ein Anwender die Gewässer- und Ufersituation an jedem beliebigen Ort in Form von Panoramadarstellungen in einem Viewer visuell sichten und in fachliche Verbindung mit den übrigen Gewässerparametern von AP 2 (RiverDetect) setzen kann.
- Einbeziehung der Bildaufnahmen für die lückenlose Positions- und Orientierungsbestimmung des Messbootes während einer Messfahrt. Durch die dichte zeitliche Folge von Bildaufnahmen kann mit Matchingverfahren automatisch die Position und Orientierung der Kamera für jede Bildaufnahme rekonstruiert werden. Daraus resultieren indirekt Zusatzbeobachtungen für die Navigationsdaten, die bspw. bei der Überbrückung von Lücken während der GNSS-Messung oder zur Minimierung von GNSS-Fehlern bzw. Driftfehlern der Inertialsensorik genutzt werden können.
- Viewersystem zur Betrachtung der Überwassertopographie. Basierend auf den orientierten Bildern kann der Anwender darüber hinaus in der Ufertopographie (Querprofilstruktur, Böschungs- und Umfeldbewuchs und Bebauung) photogrammetrische Messungen durchführen. Durch den Einsatz von Verfahren der digitalen Bildverarbeitung soll darüber hinaus die weitgehend automatische 3D-Modellierung der Gewässerumgebung durch texturierte digitale Oberflächenmodelle (DOM) stattfinden, die mit entsprechenden Betrachtungswerkzeugen (VRML, X3D o. ä.) virtuell begebar sind.
- Gleichmaßen werden auch die Sonardaten so aufgearbeitet, dass die Topographie des Unterwasserterrains in den betreffenden Gewässerabschnitten / Uferbereichen sowohl visuell (in Form von akustischen Bildern) als auch kartographisch korrekt (GIS-integriert) dargestellt und im Verbund mit den Überwasserszenarien betrachtet und analysiert werden können. Damit wird es möglich, z. B. Bauwerksveränderungen, Hangabrutschungen, Auskolkungen etc. zu diagnostizieren bevor sich die Auswirkungen im Überwasserbereich manifestieren.

5.5.1 Aufbau und Kalibrierung des bildgebenden Systems

Als wichtige Kernkomponente von RiverView® war in AP 3 die mobile Überwasser-Mapping-Einheit zu entwickeln, die auf einem omnidirektionalen Mehrkameranystem basiert. Während einer Messfahrt wird damit die Gewässerumgebung in Form von georeferenzierten Aufnahmen photographisch erfasst.

Montageplattform und Sensorik

Für das Überwasser-Mapping-System wurde von der Fa. EvoLogics eine Montageplattform in Aluminium gefertigt (Abbildung 56). Diese Plattform dient für die Aufnahme der Sensorik für Positionierung und Bilddatenerfassung und wurde so konzipiert, dass sie auf den im Projekt vorgesehenen Trägerfahrzeugen Sonobot/RiverBoat und Nelli 2 unmittelbar eingesetzt werden konnte.

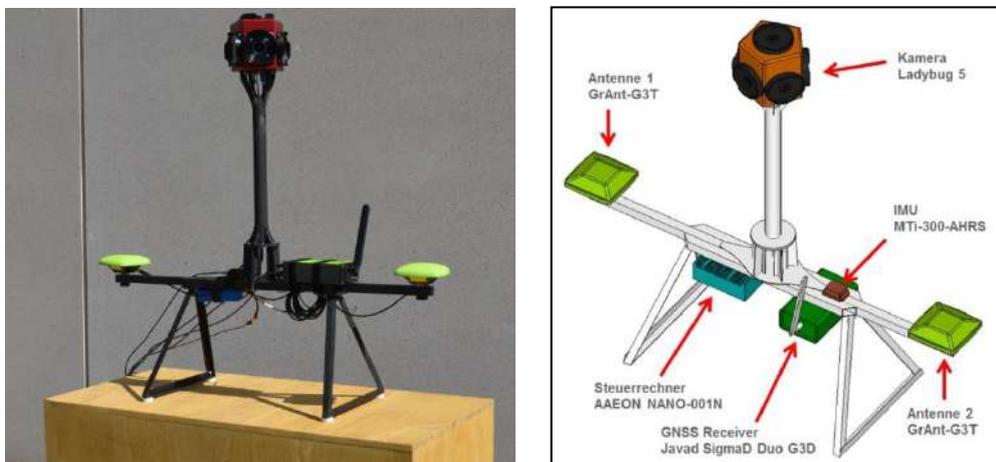


Abbildung 56: Montageplattform mit den Sensorkomponenten; rechts als Schemazeichnung

In Übereinstimmung mit dem Forschungsantrag wurde folgende Hardware beschafft:

- Panoramakamera PointGrey Ladybug 5**
 Kamerasystem bestehend aus 6 Kameras mit CCD-Sensor Sony ICX655, Auflösung jeweils 2048 x 2448 Pixel, max. 10 Hz
- GNSS-Receiver Javad Sigma Duo-G3D**
 2-Frequenz-Empfänger, 216 Kanäle, GPS, GLONASS, Galileo, Dual-Antennensystem, GSM-Modul für Korrekturdatendienste, Messfrequenz max. 5 Hz
- Inertialmesssystem Xsens MTI-300 AHRS**
 MEMS-Inertialmesseinheit (IMU) mit Magnetfeldsensor und Barometer, AHRS (Attitude Heading Reference System), Messfrequenz max. 400 Hz
- Messrechner AAEON NANO-001N**
 Lüfterloser PC, Intel i5 Prozessor, 2.9 GHz, 2 GB RAM

Die Hardwarekomponenten sind in Abbildung 56 dargestellt.

Die softwareseitigen Entwicklungsarbeiten befassten sich mit der Entwicklung von Modulen für die Kommunikation zwischen den Sensoren (Kamera, GNSS und IMU) und Trägerboot (Sonobot/RiverBoat).

5.5.2 Softwareentwicklung für Sensorsteuerung und Messdatenaufzeichnung

Für die Panoramakamera, den GNSS-Receiver und die IMU existiert jeweils ein eigenes SDK (Software-Development-Kit), mit dem die Sensoren konfiguriert, gesteuert und ausgelesen werden können. Basierend auf dem von den Sensorherstellern gelieferten API (Application Programming Interface) wurde eine Windows-Software in den Programmiersprachen C und C++ entwickelt, mit der alle Sensoren synchron ausgelesen und die Daten mit einem einheitlichen Zeitstempel, der UTC (Universal Time Coordinated)-Zeit des Satellitensignals, versehen werden können.

Die Festlegung des Kommunikationsprotokolls erfolgte in Abstimmung mit der Fa. EvoLogics. Der Datenaustausch zwischen den genannten Hardwareeinheiten basiert auf einem kleinen TCP/IP-Netzwerk mit einer Client-Server-Architektur. Die Informationen des GNSS-Receivers, also Daten wie etwa Satellitenstatus, Position, Bewegungsrichtung, Geschwindigkeit, Zeitstempel und Genauigkeit, werden laufend in Form von NMEA-Datensätze per UDP (User Datagram Protocol; ungesichertes Übertragungsprotokoll mit höherer Datenrate TCP/IP) übermittelt. Bezüglich der Kamera wurden Programmmodule entwickelt, die die individuelle Einstellung der Kameraparameter und die Steuerung der Bilddatenaufzeichnung realisieren. Neben dem Austausch von Statusinformationen wurde die Übertragung der Bilddaten von der Panoramakamera auf den Festplattenspeicher umgesetzt. Außerdem kann ein automatischer Start der Kommunikationssoftware als Netzwerkdienst ohne ein Benutzerinterface geschehen.

Ein weiteres Programm zur Datenauswertung wurde als Anwendung für das CAD-System MicroStation in der Programmiersprache MDL entwickelt. Die aufgezeichneten Rohdaten werden damit auf Plausibilität und Qualität geprüft, gefiltert, vom geografischen WGS84- in das amtliche UTM-Koordinatensystem transformiert und grafisch dargestellt.

5.5.3 Konfiguration der Sensoren und terrestrische Tests

Des Weiteren wurden die Komponenten einzeln getestet, um die optimale Konfiguration zu ermitteln. Für die Panoramakamera wurden Testaufnahmen mit unterschiedlichen Belichtungseinstellungen durchgeführt, damit das Optimum zwischen Bildrauschen und Bewegungsunschärfe bei der zu erwartenden Geschwindigkeit bestimmt werden konnte. Die Aufnahmefrequenz wurde optimiert, um einerseits noch eine gute Überlappung für das spätere Image Matching (Bildzuordnung) zu gewährleisten, andererseits aber auch die Datenmengen und

Rechenzeiten zu begrenzen. Der GNSS-Receiver musste für die Verwendung eines Korrekturdatendienstes konfiguriert werden, damit auch ohne eigene Basisstation im RTK (Real Time Kinematic)-Modus gearbeitet werden kann und Positionierungsgenauigkeiten von wenigen Zentimetern erreichbar sind. Zur Verfügung stand dem *gia* für die Entwicklungsarbeiten im Rahmen des Projektes RiverView ein kostenloser Zugang zum Korrekturdienst AXIO-NET², womit eine hochgenaue Positionierung europaweit ohne Basisstation prinzipiell möglich wurde. Im Regelbetrieb einer Messfahrt erfolgte der Empfang von Korrekturdaten über den Dienst AXIO-NET PED im GSM-Netz.

Um zu ermitteln, unter welchen Bedingungen die Satellitenpositionierung im RTK-Modus noch zuverlässige Koordinaten liefert bzw. wie häufig die Satellitenpositionierung ausfällt und durch die IMU überbrückt werden muss, wurden terrestrische Testaufnahmen auf freier Fläche, in der Nähe von Böschungen, an Gebäuden unter Brücken und unter Bäumen durchgeführt. Die Abbildung 57 zeigt einen Test auf einem Sportplatz in bebauter Umgebung, bei dem die Umrandung der Laufbahn als Soll-Linie diente. Die orthogonalen Abweichungen (Querabweichungen) betragen im Mittel 2-3 cm, so dass die Tauglichkeit des Systems für den Projektzweck bestätigt werden konnte. Es traten vereinzelt größere Positionsabweichungen (Ausreißer) auf, deren Ursache nicht geklärt werden konnte.

² <http://www.axio-net.eu/>

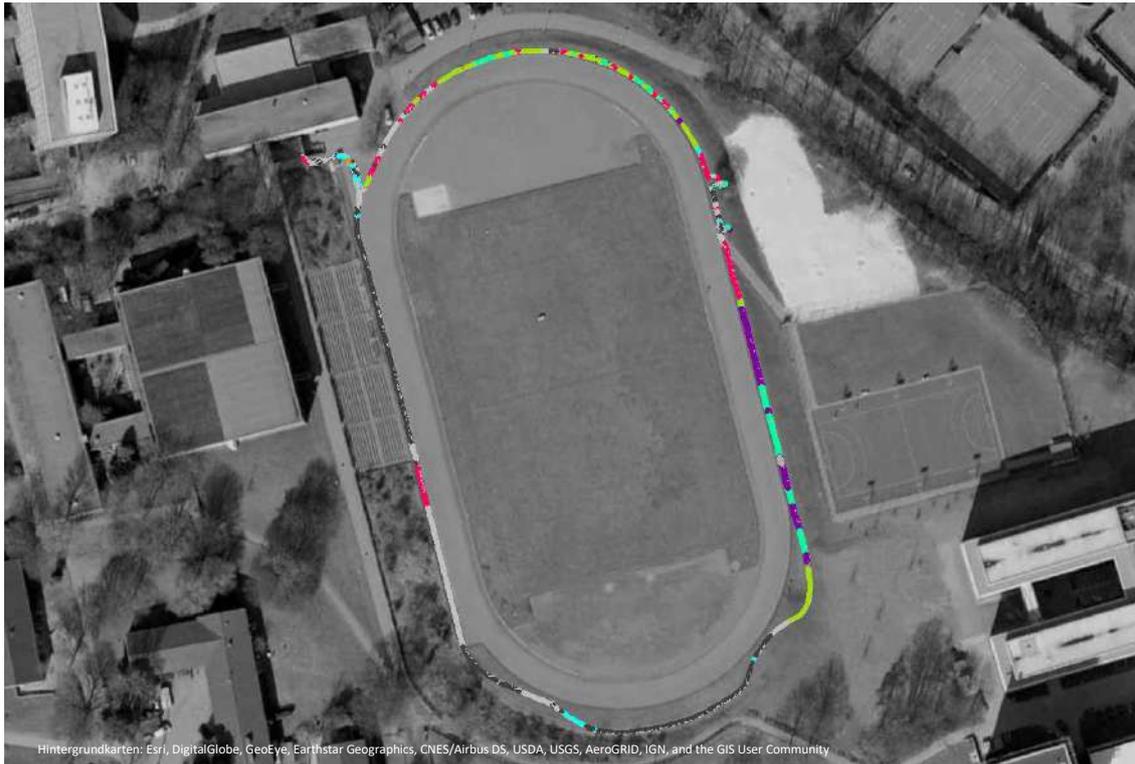


Abbildung 57: Darstellung der Trajektorie aus Satellitenpositionierung, Qualität der Messung farbig codiert

Darüber hinaus fanden Tests bezüglich des GNSS-Systems (Abbildung 58) mit der Postprocessing-Software Javad Justin zur Auswertung von Daten in denjenigen Fällen, in denen Korrekturdaten nicht online über das GSM-Netz empfangen werden konnten, statt. Die Korrekturdaten werden über die Dienste AXIO-NET ViPP oder Trimble VRS Now heruntergeladen und ermöglichen die nachträgliche Positionsbestimmung des Mapping-Systems. Auch diese Funktionalität konnte erfolgreich umgesetzt werden, so dass das System gleichfalls einsatzfähig ist, wenn Korrekturdaten während einer Messfahrt komplett oder teilweise nicht zur Verfügung stehen.



Abbildung 58: GNSS-Empfänger von JAVAD

5.5.4 Kalibrierung

Als Voraussetzung für die (direkte) Georeferenzierung der Gewässer- und Bilddaten müssen Kamerasystem, GNSS und IMU als Mapping-System kalibriert werden. Nachdem die Kalibrierung des Aufnahmesystems in der Anfangsphase des Projektes zunächst in Gestalt von Näherungslösungen durchgeführt wurde, erfolgte die Lösung der Kalibrierungsaufgaben auf der Grundlage von wissenschaftlich fundierten Ansätzen. In dem für das RiverView-Projekt realisierten Kalibriermodell spielt die Panoramakamera eine zentrale Rolle. Zwar besteht das Kamerasystem aus sechs Einzelkameras in herkömmlicher Bauweise, durch die stabile Montage in Panoramaaanordnung über Horizont und Zenit besteht jedoch die Möglichkeit, eine photogrammetrische Positionierung anhand von Referenzpunkten mit hoher Genauigkeit durchzuführen. Im Prinzip wird hierbei die Aufgabe des photogrammetrischen Rückwärtsschnittes gelöst, nun aber übertragen auf die Besonderheiten einer omnidirektionalen Kamera wie im vorliegenden Fall.

Einrichtung eines Passpunktfeldes

Für die wiederholte Durchführung von Kalibrierungen wurde in der Versuchshalle des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen ein dauerhaftes Testfeld mit signalisierten Passpunkten eingerichtet (Abbildung 59). Genutzt wurde der Vorraum mit rechteckigem Grundriss, an dessen Decke sowie drei vertikalen Außenwänden insgesamt ca. 80 ko-dierte Zielmarken angebracht werden konnten. Die Einmessung erfolgte kombiniert durch Tachymetrie und photogrammetrischen Bildverband mit einer Standardabweichung von 0,4 mm in allen drei Koordinatenrichtungen. Damit stand ein räumliches Passpunktfeld mit einer Ausdehnung von ca. 7 m x 4 m x 4 m zur Verfügung.

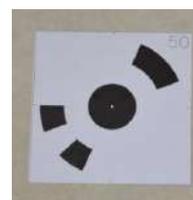
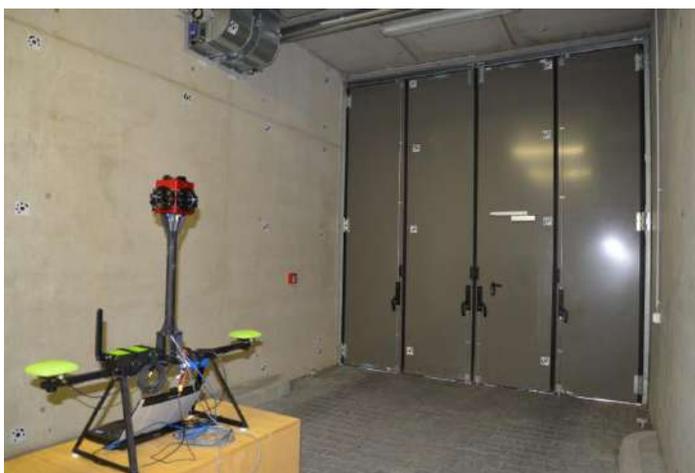


Abbildung 59: Passpunktfeld in der IWW-Versuchshalle (Ausschnitt); rechts Beispiel für eine Zielmarke

Mathematisches Modell der photogrammetrischen Positionierung

Der mathematische Ansatz geht hierbei wegen der Besonderheit des Mehrkameranasytems nicht vom klassischen Lochkameramodell in Verbindung mit den photogrammetrischen Kollinearitätsgleichungen aus, sondern rekonstruiert aus den Bildbeobachtungen die verzeichnungskorrigierten, räumlichen Bildstrahlen in einem lokalen Kamerakoordinatensystem (Abbildung 60) (Effkemann et al. 2017). Das Strahlenbündel ist über den gesamten Horizont verteilt und wird im weiteren Verlauf als starres Bündel von 3D-Geraden ohne ein gemeinsames Projektionszentrum benutzt. Das Geradenbündel wird schließlich durch Ausgleichsrechnung auf die gegebenen Passpunkte eingepasst, wodurch die Kameraposition und -rotation mit hoher Stabilität ermittelt werden.

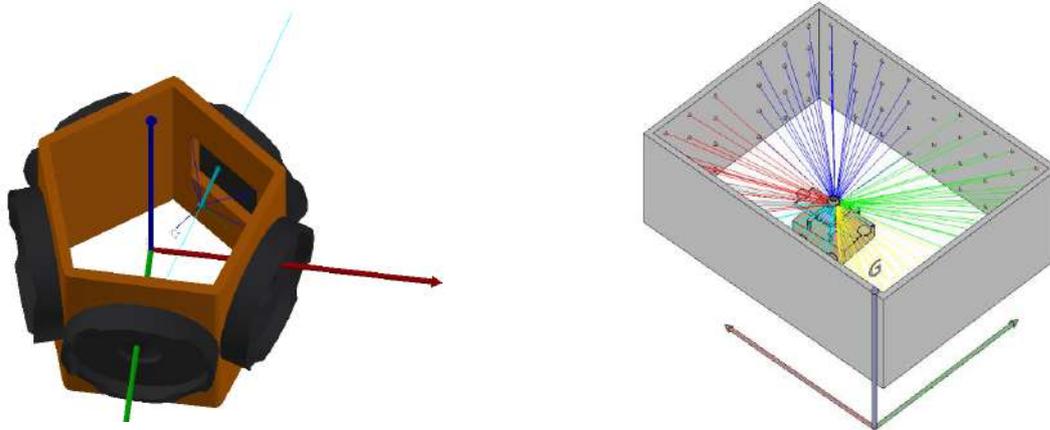


Abbildung 60: Links: Rekonstruktion der Bildstrahlen als 3D-Raumgeraden im lokalen Kamerakoordinatensystem, rechts: Einpassung des 3D-Geradenbündels auf das Passpunktfeld

Für die Kamerapositionierung muss die Aufgabe des photogrammetrischen Rückwärtsschnittes gelöst werden, hier aber übertragen auf die Besonderheiten der im Projekt eingesetzten omnidirektionalen Kamera. Der mathematische Ansatz basiert auf der Parametrisierung der Raumgeraden durch eine Zweitafelprojektion (vgl. Blankenbach & Schwermann 2014). Die Beobachtungsgleichungen für die Ausgleichsrechnung sind dann zwei skalare Gleichungen der folgenden Art:

$$0 = \alpha \cdot (tx + r11 \cdot X + r12 \cdot Y + r13 \cdot Z) + \gamma - (ty + r21 \cdot X + r22 \cdot Y + r23 \cdot Z)$$

$$0 = \beta \cdot (tx + r11 \cdot X + r12 \cdot Y + r13 \cdot Z) + \delta - (tz + r31 \cdot X + r32 \cdot Y + r33 \cdot Z)$$

wobei die Bezeichnungen folgende Bedeutung haben:

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: räumliche Parameter der Bildstrahlen (abgeleitet aus den Bildmessungen der Einzelkameras)

tx, ty, tz : unbekannte Komponenten des gesuchten Translationsvektors

r_{ij} : Komponenten der gesuchten Rotationsmatrix R ; sie sind eine Funktion der unbekanntem Drehwinkel ω , φ und κ

X, Y, Z : gegebene Koordinaten der Passpunkte, dargestellt im Objektkoordinatensystem

Mit den Gleichungen stehen geeignete Beziehungen für die Berechnung der unbekanntem Transformationsparameter zur Verfügung, so dass eine Ausgleichung im Gauß-Markoff-Modell mit der linken Seite als Pseudobeobachtung stattfinden kann. Alle Beobachtungen werden stochastisch gleich genau in die Ausgleichung eingeführt und die Passpunktkoordinaten als fehlerfrei angenommen. Da die Drehwinkel allerdings in den r_{ij} nicht linear sind, müssen die Gleichungen diesbezüglich linearisiert und Näherungswerte bestimmt werden.

Überprüfung der Kamerapositionierung

Für die Überprüfung der Positionierung wurde die Ladybug-Kamera mittig auf einen 1,20 m x 0,60 m x 0,40 m großen Hohlkasten als Plattform montiert, der innerhalb des Passpunktfeldes (s.o.) im Stop-and-Go-Verfahren auf 20 verschiedene Standorte mit jeweils unterschiedlichen Drehrichtungen verschoben wurde (Abbildung 61). Auf jedem dieser Standorte erfolgten die Registrierung eines Panorama-Bildsatzes sowie die dreidimensionale Einmessung der Plattform. Das Tracking des Hohlkastens erfolgte anhand von vier Fixpunkten (Reflektorprismen) mit übergeordneter Genauigkeit durch einen Lasertracker Leica AT960. Die relative Lage der Kamera gegenüber den Fixpunkten, die theoretisch unveränderlich war, wurde für die Beurteilung der Messunsicherheit der Kamerapositionierung gemäß der obigen Gleichungen herangezogen. Tabelle 10 dokumentiert die Überprüfung der Relativpositionen zwischen Kamera- und Fixpunktsystem anhand von 20 Messungen.

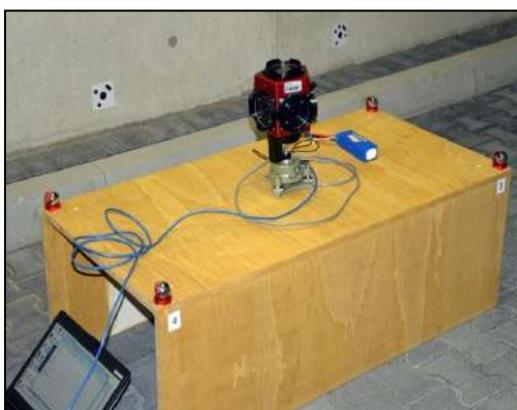


Abbildung 61: Experimentelle Überprüfung der Kamerapositionierung

Die Kontrollmessung mit dem Lasertracker bestätigt die photogrammetrische Positionsbestimmung. Für die Parameter der Äußeren Orientierung ergaben sich Messunsicherheiten (1 Sigma) von etwa 0,5 mm für die Lage und 13 mgon für die Drehwinkel. Die Genauigkeit der

Kamerarotation entspricht ca. 0,25 Pixel im Bild und ist im Vergleich zu den Restklaffungen der Einzelpunkte im Bild, die im Bereich von 0,9 bis 1,7 Pixeln liegen, vergleichsweise hoch, weil durchschnittlich 70 Passpunkte für jede Position verwendet wurden. Bei optimaler Bildqualität wäre eine Bildmessgenauigkeit von deutlich unter einem Pixel zu erwarten gewesen. Das Bildrauschen aufgrund der schwachen Beleuchtung führte aber zu einer eingeschränkten Einzelpunktgenauigkeit. Eine zunächst vermutete unvollständige Verzeichnungskorrektur hat sich nicht bestätigt. Die Restklaffungen in den Bildern zeigen insgesamt keine systematischen Abweichungen.

Tabelle 10: Ergebnisse der Positionsbestimmung der Panoramakamera im Passpunktfeld

	Std.abw. der Unbekannten nach der Ausgleichung (Mittelwerte)	Abweichung der Kamerapose (Mittelwerte)
Position X	0,54 mm	1,0 mm
Position Y	0,54 mm	0,8 mm
Position Z	0,51 mm	0,7 mm
Rotation ω	13,5 mgon	18,8 mgon
Rotation φ	13,5 mgon	13,1 mgon
Rotation κ	10,4 mgon	14,1 mgon

Kalibrierung des Kamera-GNSS-IMU-Systems

Die Multisensorplattform von RiverView besteht aus Mehrkammersystem, GNSS und IMU. Für den Betrieb als Mapping-System müssen gegenseitige Lage und Ausrichtung dieser Sensoren zueinander bestimmt sein, damit die aufgezeichneten Daten referenziert werden können und eine optionale Navigation des Messbootes möglich ist.

- **Beziehung zwischen Kamerasystem und Plattformsystem**

Für die Bestimmung der Beziehung zwischen Kamerasystem SC und dem Plattform-System SG genügt die Lokalisierung der beiden Antennenpunkte im Kamerasystem SC. Der Ursprung von SG ist identisch mit dem vom Hersteller definierten Phasenzentrum der ersten GNSS-Antenne (Masterantenne). Da die Antennen in den Aufnahmen der Kamera direkt sichtbar sind, können die Richtungen zu den Antennenzentren durch manuelle Bildmessungen bestimmt werden. Die in SC orientierten Bildstrahlen zeigen auf die Antennenpunkte, so dass die richtungsmäßige Festlegung hierdurch gegeben ist. Die noch fehlenden Distanzen, die für die Vervollständigung von 3D-Polarkoordinaten notwendig sind, werden durch direkte Streckenmessung bestimmt. Damit sind Offset bzw. Hebelarm zu beiden Antennen in SC bestimmt.

Die Genauigkeit der so bestimmten Antennenpositionen in SC ist besser als 2 Millimeter, was für den o.g. Einsatzzweck ausreichend ist. Der Ursprung des Koordinatensystems SG befindet sich dann in Antenne 1 und die positive X-Achse verläuft durch Antenne 2. Der sechste Freiheitsgrad von SG erhält seine Fixierung durch die Vereinbarung, dass die Z-Achsen von SG und SC parallel sein sollen.

- **Beziehung zwischen Kamerasystem und IMU-System**

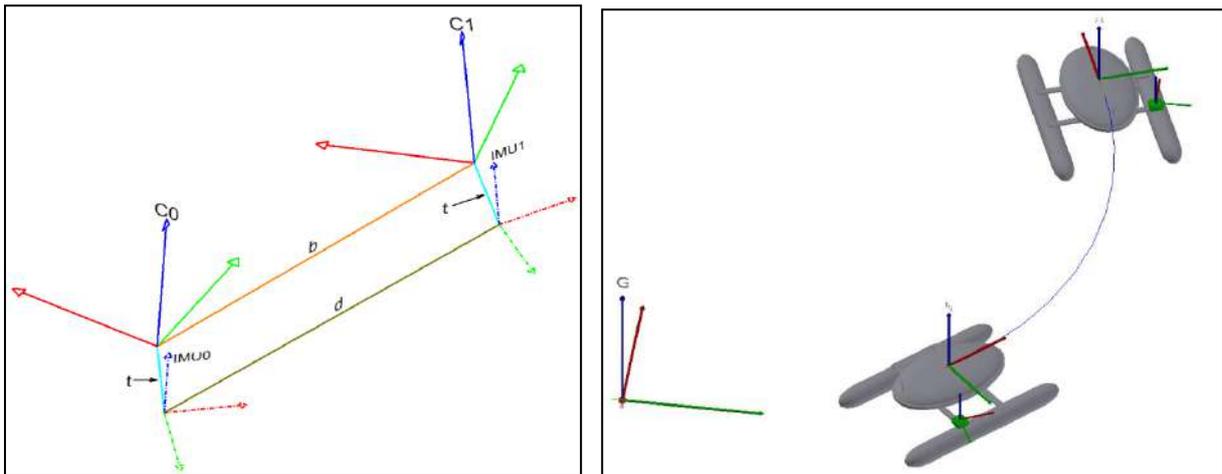


Abbildung 62: Relativbewegungen von Kamera und IMU in schematischer Darstellung anhand von Sensorkoordinatensystemen

Der für Kamera und IMU gewählte Ansatz definiert das Kamerasystem als zentrales Fahrzeugsystem (Body System). Das IMU-Koordinatensystem wird relativ hierzu translatorisch und rotatorisch bestimmt (Leverarm und Misalignment). 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 Ausgleichsrechnung. Aus den geometrischen Zusammenhängen können für Translation t und Rotation R unter den genannten Annahmen folgende Beziehungen abgeleitet werden:

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

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

Hierbei werden ausschließlich die Relativbewegungen der Sensoren (\mathbf{b} und \mathbf{M}) in einem (kurzen) Zeitabschnitt t_0 bis t_1 betrachtet und wir verwenden nur zwei Koordinatensysteme (Abbildung 62): das Plattform-System, was zum Beispiel das Kamerasystem SC sein kann, und das IMU-System SI.

Der o.a. Kalibrierungsansatz wurde im Rahmen von Testfahrten geprüft. Aus einem Datensatz von einer Befahrung der Lippe wurden 300 Abschnitte mit einer Dauer von 2 Sekunden ausgewählt, an denen eine optimale Satellitenpositionierung im RTK-Modus möglich war (Abbildung 63). Die Positionen und Rotationen sowohl aus der GNSS-Aufzeichnung als auch aus der Integration der IMU-Daten flossen als Beobachtungen in die Ausgleichsrechnung ein.

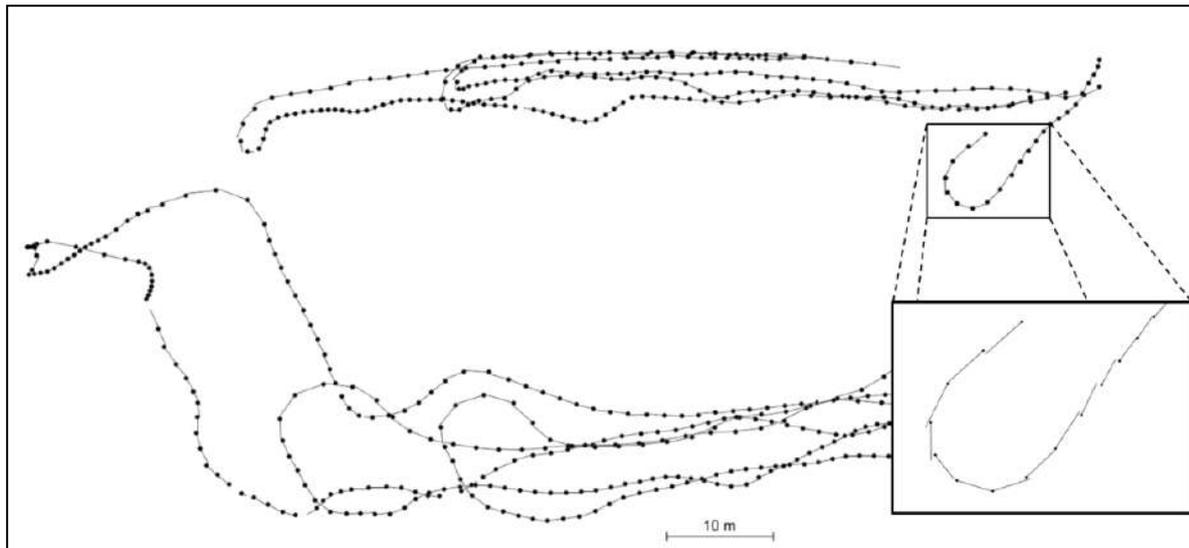


Abbildung 63: Trajektorie der Lippe-Testbefahrung

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierungsberechnung, und zwar die Rotationswinkel ω , φ und κ zwischen den Systemen SC und SI (Misalignment). Die Ergebnisse ergaben Unsicherheiten für die Rotationswinkel ω , φ und κ von etwa 0,5 gon, was für den Projekteinsatz ausreichend ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Winkelbeobachtungen der IMU nicht als Rohdaten, sondern in Form von magnetfeldgestützten, werkskalibrierten Messdaten in die Berechnung eingeführt wurden. Das IMU-Koordinatensystem SI liegt aus den oben geschilderten Gründen im Allgemeinfall nicht parallel zum Sensorgehäuse und der Winkel κ kann deutlich von Null verschieden sein. Im Unterschied zu den Drehwinkeln konnte mit den Daten der Messfahrt der Translationsvektor nicht zufriedenstellend bestimmt werden. Die Standardabweichung des Offsets betrug 5 cm; eine alternative Bestimmung beispielsweise durch direkte Streckenmessung ist somit mit höherer Genauigkeit möglich. Die Komponente in Z-Richtung konnte versuchsbedingt nicht bestimmt werden, weil die ausschließlich horizontalen Bewegungen des Messbootes dazu führten, dass die Beobachtungen in vertikaler Richtung zu wenig Signifikanz zeigten.

Tabelle 11: Kalibrierungsergebnisse aus der Lippe-Befahrung (300 Messzyklen, nur Misalignment)

Drehwinkel	Ausgleichungsergebnis [gon]	Std.abw. [gon]
ω	0.97	0.71
φ	1.06	0.46
κ	7.45	0.40

Veranlasst durch die unzureichenden Ergebnisse vor allem bei der translatorischen Kalibrierung (d.h. der Leverarm-Bestimmung) wurde die IMU näher untersucht, um das Driftverhalten zu quantifizieren. Die Stabilisierung bzw. die Kompensation der Drift durch Magnetfeldsensoren wirkt sich nur auf die rotatorischen Bewegungsmessungen aus. Die Unsicherheit der Lagebestimmung, die auf der doppelten Integration von Beschleunigungswerten basiert, steigt ungünstigerweise mit dem Quadrat der Zeit.

Abbildung 64 vergleicht exemplarisch anhand von zwei Versuchsaufzeichnungen die lagemäßige Positionsbestimmung aus der Integration der IMU-Beschleunigungsdaten mit den GNSS-Messungen im RTK-Modus. Die Abweichung beträgt nach 2 Sekunden im Mittel etwa 0,3 m; nach 10 Sekunden steigen die Differenzen auf mehr als 3 Meter an. Die Überbrückung von GNSS-Signalausfällen kann demnach mit der IMU nur dann bewerkstelligt werden, wenn die Unterbrechungszeiträume auf wenige Sekunden begrenzt sind. Andernfalls muss mit größeren Abweichungen bei der Georeferenzierung der Überwasserdaten gerechnet werden.

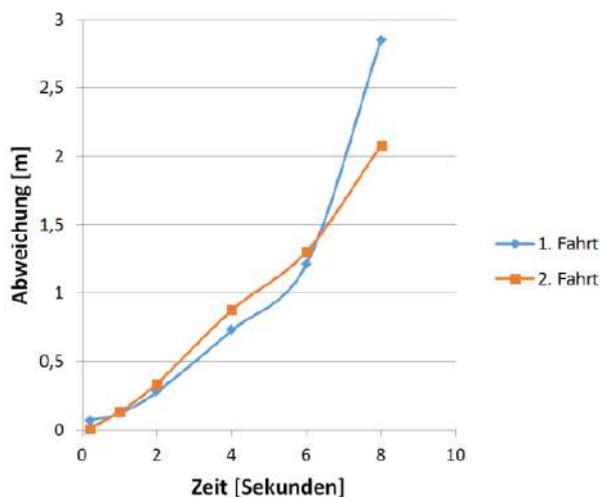


Abbildung 64: Abweichungen bei der Positionsbestimmung aus IMU-Daten und GNSS (RTK)

5.5.5 Testfahrten

Im Zusammenhang mit dem Aufbau und der Kalibrierung des Überwasser-Mapping-Systems wurde eine Reihe von Testfahrten durchgeführt, die nachfolgend aufgezählt sind. Über die operativen Einsätze des Systems im Zuge von Messkampagnen wird in anderen Teilprojekten berichtet.

Testfahrten mit Handwagen

Für Untersuchungen zum Sensorsystem ohne ein Boot als Trägerfahrzeug wurde in Übereinstimmung mit dem Projektantrag ein Handwagen beschafft (Abbildung 65). Dieser diente neben den Arbeiten zur Kalibrierung zusätzlich zur Überprüfung der Genauigkeit der Satellitenpositionierung unter verschiedenen Bedingungen. Im Außenbereich erfolgten Untersuchungen zur Satellitensichtbarkeit im Fall von Abschattungen durch Gebäude, hohe Böschungen, Bäume o.ä. und deren Auswirkungen auf den Messmodus.



Abbildung 65: Handwagen für Untersuchungen ohne Boot

Testfahrt auf dem Werbellinsee



Abbildung 66: Testfahrt auf dem Werbellinsee

Im Rahmen des Projekttreffens im Mai 2016 fand eine Testfahrt des (damals) prototypischen Sonobot zusammen mit der Sensorplattform auf dem Werbellinsee bei Berlin statt (Abbildung 66). Unter anderem wurde getestet, ob sich das Fahrverhalten des Bootes durch das zusätzliche Gewicht ändert. Das Gesamtgewicht des Kameragestells mit allen Sensoren fiel aufgrund des verwendeten Notebook-Computers mit einem zusätzlichen Akku für die Kamera ca. 2 kg höher aus als im endgültigen Systemdesign geplant. Dennoch erwies sich das Boot in allen Situationen stabil. Lediglich der nach hinten verschobene Schwerpunkt musste durch entsprechende Trimmung optimiert werden.

Testfahrt auf dem Rursee (Eifel)

Am 20.07.2016 fand eine weitere Testfahrt auf dem Rursee statt (Abbildung 67). Während der Messung mit der INN-Sonde wurde gleichzeitig das Kamerasystem auf einem Elektroboot des



Abbildung 67: Testfahrt auf dem Rursee

WVER mitgeführt. Innerhalb ca. einer Stunde erfolgte die Aufnahme von 1270 Panoramabil-
dern (6 GB).

Aufgrund einer fehlenden Mobilfunkverbindung konnten keine Korrekturdaten während der
Fahrt empfangen werden, so dass die Positionsbestimmung im RTK-Modus nicht möglich war.
Die Genauigkeit der Positionierung betrug daher im günstigsten Fall – trotz überwiegend guter
Satellitensichtbarkeit – nur ca. 1-2 m. Da jedoch auch die Rohdaten der Messung aufgezeich-
net wurden, konnte aber im Post-Processing die Genauigkeit auf 2-3 cm gesteigert werden.
Nur in der Nähe und unter der Brücke war die Präzision deutlich schlechter (siehe auch Abbil-
dung 68).

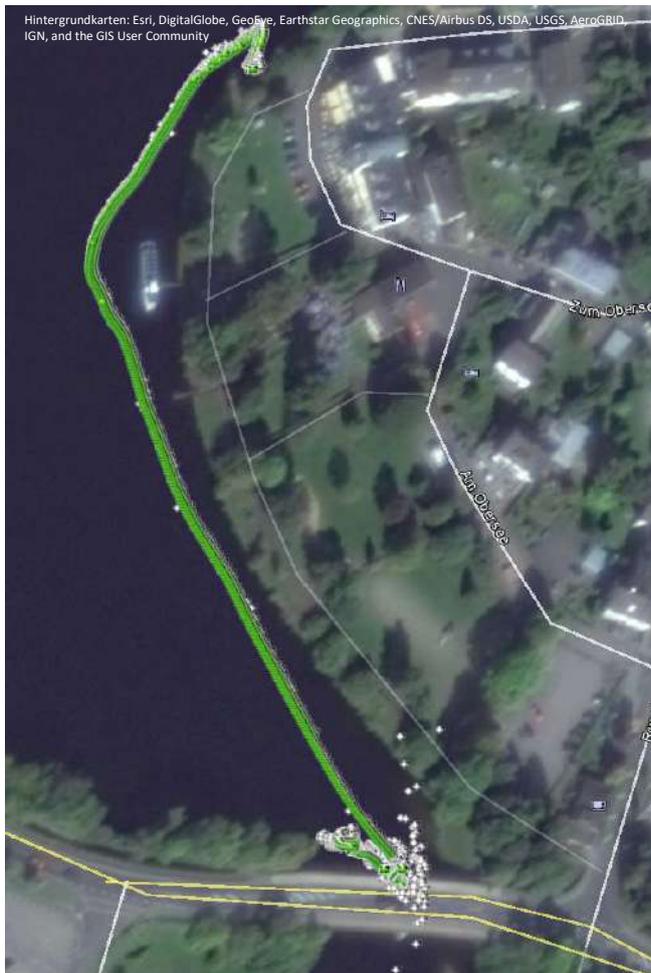


Abbildung 68: Rursee: GNSS-Positionen ohne Korrektur (grau) und mit Kor-
rektur (grün)

Testfahrt auf der Lippe

Am 02.11.2016 wurde die Sensorplattform während einer Testfahrt mit dem Sonobot auf einem Abschnitt der Lippe eingesetzt (Abbildung 69 und Abbildung 70). Die Testfahrten erfolgten sowohl ferngesteuert als auch mit autonomer Steuerung. In 45 Minuten wurden 1180 Panoramabilder mit einer Gesamtdatenmenge von ca. 5 GB aufgezeichnet.



Abbildung 69: Testfahrt auf der Lippe

Wie zu erwarten war unter der Brücke aufgrund der eingeschränkten Satellitensichtbarkeit die Navigationslösung nur unzureichend. Der Satellitenreceiver fiel für jeweils ca. 30 Sekunden vom RTK-Modus in einen ungenaueren Modus zurück. Für diese Abschnitte konnten allerdings im Post-Processing mit Hilfe der Bildorientierung gute Orientierungsdaten mit einer Genauigkeit von wenigen cm bestimmt werden, so dass die Fahrzeugpositionen auch in diesen Bereichen indirekt rekonstruierbar waren.



Abbildung 70: GNSS-Positionen ohne Korrektur (grau) und mit Korrektur (grün)

5.5.6 Aufbereitung der Aufnahmen für die Panoramadarstellung

Das omnidirektionale Kamerasystem liefert primär Einzelaufnahmen, die aufgrund der fixierten Anordnung der Kameras für die Ableitung von Panoramadarstellungen verwendet werden können. An jedem Aufnahmestandort entlang der Gewässerlinie entsteht durch die zeitsynchrone Auslösung ein sechsteiliger Bildersatz, der die Umgebung in 360° Rundumsicht erfasst. Das Zusammenfügen der Einzelbilder führt zu einem Panoramabild

Aufbereitung der Panoramaaufnahmen

Bei der Aufbereitung der aufgezeichneten Bilddaten hat sich die Erkenntnis ergeben, dass sich das Structure from Motion (SfM)-Prinzip (s.u. Kapitel Bildzuordnung) sehr gut mit der RTK-GNSS gestützten Positionsbestimmung ergänzt. In Gewässerbereichen mit eher offenem Uferbewuchs liegen die Korrektursignale für die Satellitenortung zumeist zuverlässig vor und die Position des Messbootes kann mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern ermittelt werden. Dies sind dann gleichzeitig auch diejenigen Uferabschnitte, in denen ausreichende Muster für die Bildzuordnung eher spärlich gegeben sind und die Positionsbestimmung der Kamera bzw. des Messbootes anhand der Bilddaten demzufolge nur mit Metergenauigkeit gelingt. Umgekehrt fehlen zum Beispiel in überwachsenen Uferbereichen ausreichende GNSS-Korrektursignale; die Positionsbestimmung nach dem SfM-Prinzip dagegen, die ein Anwendungsfall der sog. Visuellen Odometrie (VO, s.u.) ist, zeichnet sich aber gerade hier durch eine hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit aus.

Panoramadarstellungen in PHIDIAS

Für das Zusammenfügen der Einzelbilder (Stitching) zu Panoramabildern steht grundsätzlich eine vom Kamerahersteller mitgelieferte Software zur Verfügung, die für rein visuelle Untersuchungen ausreichend ist. Wie im Projektantrag formuliert wurde allerdings eine eigene Lösung implementiert, die die Ergebnisse der Sensorkalibrierung berücksichtigt und darüber hinaus die Möglichkeit eröffnet, die Panoramen unmittelbar für photogrammetrische 3D-Objektvermessungen einzusetzen.



Abbildung 71: Panoramadarstellung im photogrammetrischen Auswertesystem PHIDIAS

Diese Eigenentwicklung basiert auf dem photogrammetrischen Auswertesystem *PHIDIAS*. *PHIDIAS* ist ursprünglich für die Auswertung von Einzelaufnahmen konzipiert, deren Abbildungsmodell auf dem klassischen Lochkameraprinzip beruht. Als Besonderheit von *PHIDIAS* ist die vollständige Integration in das CAD-System *MicroStation* zu nennen, wodurch das graphische Auswertergebnis durch kongruente Überlagerung unmittelbar zusammen mit den Bildern dargestellt werden kann (Superimposition). Für die Verwendung im Projekt wurden Softwaremodule entwickelt, die dieses Prinzip nun auch für Panoramabilder verfügbar machen. Diese Softwaremodule beinhalten zum einen Funktionen für die automatische Zusammensetzung der Einzelbilder zu einem einzigen Panoramabild, das dann wie gewöhnliche Einzelaufnahmen im Auswerteprogramm benutzt werden kann. Zum anderen wurden die photogrammetrischen 3D-Messfunktionen erweitert. Das photogrammetrische Triangulationsprinzip, dem bekanntlich die Bestimmung von 3D-Koordinaten einzelner Objektpunkten zu Grunde liegt, kann somit nun auch in den Panoramabildern zur Anwendung kommen. Die Panoramen können in *PHIDIAS* ähnlich wie in einem gewöhnlichen Bildviewer mit Richtungsschwenks usw. betrachtet werden. Außerdem wurde die Superimposition der graphischen Daten realisiert, so dass die Messungen in den Panoramaaufnahmen ständig auf Richtigkeit kontrolliert werden können (Abbildung 71).

Implementierung von photogrammetrischen 3D-Messfunktionen

Durch die Integration der Panoramaaufnahmen in das Auswertesystem PHIDIAS wurden die Voraussetzungen geschaffen, um das photogrammetrische Triangulationsprinzip, dem die Bestimmung von 3D-Koordinaten einzelner Objektpunkten zu Grunde liegt, auch in den Panoramabildern von RiverView® anzuwenden. Die Panoramen können in PHIDIAS ähnlich wie in einem gewöhnlichen Bildviewer anhand von Maus- oder Tastaturaktionen mit Richtungsschwenks usw. betrachtet werden. Außerdem wurde das Superimpositionsprinzip realisiert, so dass graphisches Auswertergebnis und Panoramabild kongruent überlagert werden und somit auf einfache Weise die Richtigkeit der Messungen visuell geprüft werden kann. In Abbildung 72 sind die für RiverView® implementierten Anwendungsbeispiele für photogrammetrische Messfunktionalitäten dargestellt:

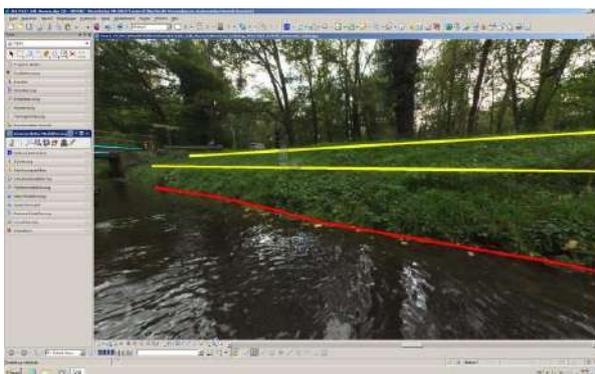
- Einfache Abstandmessungen
- Profilmessungen
- Bestimmung von Uferlinie und Böschungskanten
- Stereomessungen



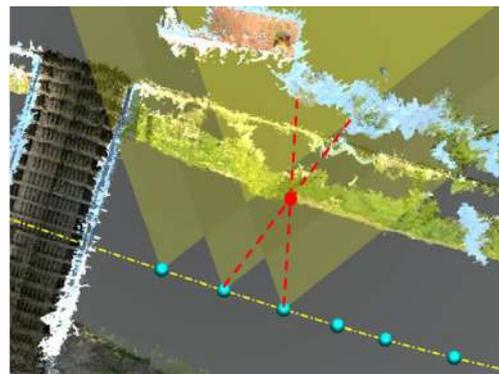
a) Abstandsmessungen



b) Profilmessungen



c) Messung von Uferlinie und Böschungskante



d) Stereomessung

Abbildung 72: Photogrammetrische 3D-Messfunktionen in PHIDIAS-Pano

Bildbasierte Punktwolken aus Panoramaaufnahmen

Durch den hohen Überdeckungsgrad der Panoramaaufnahmen ist die Möglichkeit gegeben, durch Anwendung von Bildzuordnungsverfahren (Image Matching) bildbasierte 3D-Punktwolken zu generieren (Abbildung 73). Hierbei fallen neben den Punktwolken implizit auch die Orientierungsdaten der Aufnahmen und damit Angaben zu Positionen und Trajektorien an. Mit den Daten von Gewässerbefahrungen, insbesondere der Messfahrten auf der Lippe, wurden Untersuchungen zu verschiedenen Verfahren für die Bestimmung von 3D-Punktwolken aus den aufgezeichneten Bildern durchgeführt. Diese Untersuchungen fanden im Zusammenhang mit den Arbeiten zur Bildzuordnung (s.u.) statt.

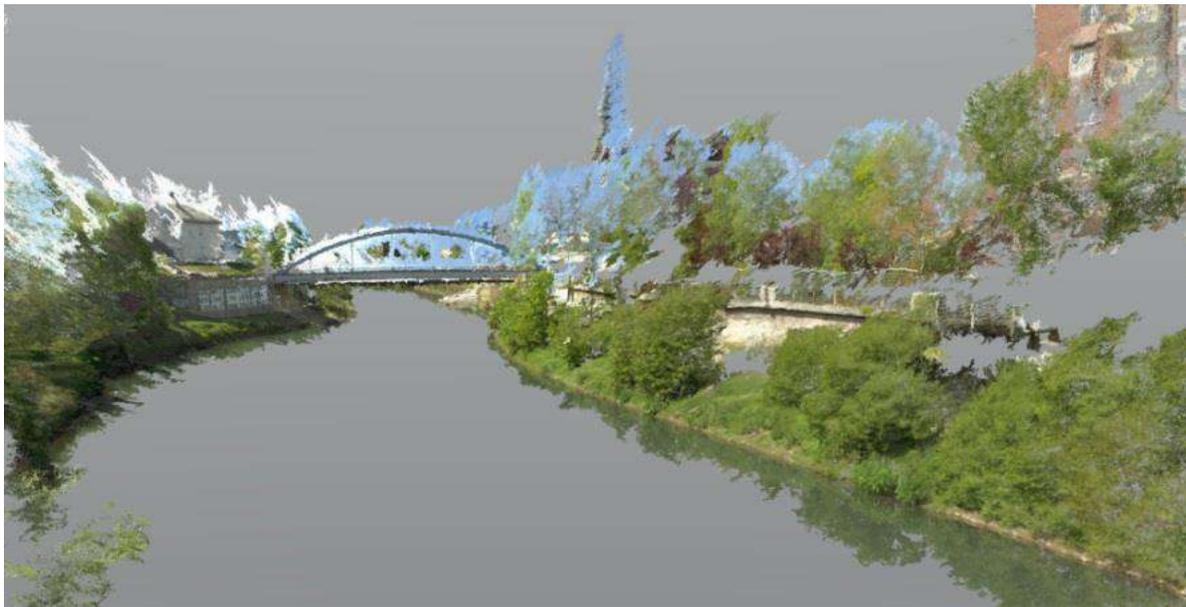


Abbildung 73: Bildbasierte Punktwolke aus Panoramaaufnahmen

Es fand ein Vergleich der Berechnungsgeschwindigkeit, Qualität, Genauigkeit und Abdeckung der Punktwolken aus Einzelbildern und sphärischen Panoramabildern mit der Software Agisoft PhotoScan statt. Dabei hat sich herausgestellt, dass die 3D-Punktwolken aus Panoramabildern eine geringere Genauigkeit bzw. stärkeres Rauschen aufweisen als Punktwolken aus Einzelbildern. Die Ursache liegt darin, dass die aus 6 Einzelbildern zusammengesetzten Panoramabilder aufgrund der unterschiedlichen Projektionszentren nicht parallaxenfrei sind. Die Panoramabilder besitzen dagegen den Vorteil, dass die Bestimmung der Bildorientierung aus automatisch gefundenen Verknüpfungspunkten wesentlich einfacher ist als mit Einzelbildern und dadurch in den meisten Fällen der gesamte Bildverband ohne manuelle Korrekturen orientiert werden kann. Es kommt in den Szenen des Forschungsprojektes häufig vor, dass in einer langen Serie von Bildern einzelner Kameras kaum Verknüpfungspunkte gefunden werden können, weil überwiegend Wasseroberfläche und Himmel abgebildet sind. Brauchbare Muster für die Bildzuordnung sind überwiegend nur in Bildern vom Uferbereich enthalten. Optimal wäre ein spezielles SfM-Verfahren (Structure from Motion), das die unterschiedlichen

Projektionszentren von Multikamerasystemen berücksichtigt und keine parallaxenfreien sphärischen Panoramabilder voraussetzt.

Bildzuordnung

Mit dem Vorliegen von Bild- und Gewässerdaten aus unterschiedlichen Befahrungen, die im Laufe des Projektzeitraums mit dem RiverView-System durchgeführt worden sind, konnten zunehmend Erfahrungen mit der Auswertung und Verarbeitung der Bilddaten gewonnen werden. Hierbei wurde u.a. die Erkenntnis gewonnen, dass aufgrund der gewässertypischen Situation in den Szenen des Forschungsprojektes mit langen Serien von Bildern der Einzelkameras häufig wenig Verknüpfungspunkte gefunden werden können, weil naturgemäß überwiegend Wasseroberfläche und Himmel abgebildet sind. Brauchbare Muster für die Bildzuordnung sind größtenteils nur in Bildern vom Uferbereich enthalten. Diese speziellen Rahmenbedingungen wurden bei den Entwicklungsarbeiten im Zusammenhang mit der Bildauswertung berücksichtigt.

Die gleichförmige Bewegung des Trägerbootes mit einer planmäßigen Geschwindigkeit von ca. 1 m/s und die zumeist gewählte Aufnahmefrequenz von 1 Hz führen zu einem (gewünscht) hohen Überdeckungsgrad der Panoramaaufnahmen. Hierdurch ist die Möglichkeit gegeben, durch Anwendung von Bildzuordnungsverfahren (Image Matching) bildbasierte 3D-Punktwolken zu generieren. Mit der Software Agisoft PhotoScan wurden vergleichende Untersuchungen zu Berechnungsgeschwindigkeit, Qualität, Genauigkeit und Abdeckung der Punktwolken aus Einzelbildern und sphärischen Panoramabildern durchgeführt (s.o.).

Bildbasierte 3D-Punktwolken können aus den Aufnahmen mit Hilfe von Structure from Motion (SfM)-Verfahren bzw. automatisierten Bildzuordnungsverfahren generiert werden. Wesentliche Voraussetzung hierfür ist ein hoher Überdeckungsgrad der Bildaufnahmen, was bei den Messfahrten von RiverView wie erwähnt regelmäßig gegeben ist. Bei der Bildzuordnung werden jeweils korrespondierende (homologe) Punkte in zwei oder mehr Bildern bestimmt, um anschließend durch Anwendung des photogrammetrischen Triangulationsprinzips zu den 3D-Koordinaten zu gelangen. Die Punktwolken stellen als Sekundärprodukt der Bilddaten eine gute Ergänzung der Gewässerdokumentation dar, denn sie liefern Informationen in der dritten Dimension. Die nachträgliche Ermittlung von Gewässerquerschnitten etwa für Erhebungen zur Gewässerstrukturgüte ist somit auch nachträglich ohne explizite Vorortvermessung möglich.

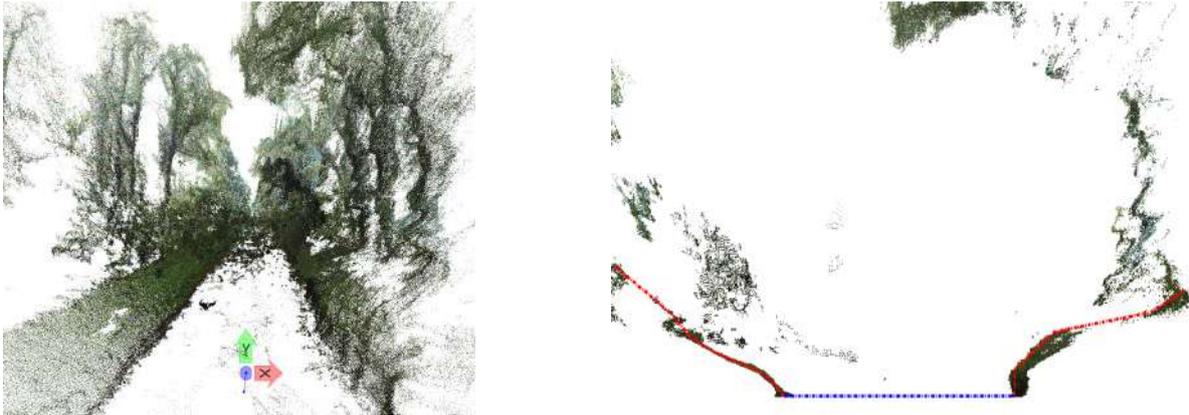


Abbildung 74: Aus Bilddaten generierte Punktwolke und Uferquerschnitt an einem Gewässerabschnitt der Erft

Abbildung 74 zeigt ein Beispiel eines Uferabschnitts an der Erft; hier wurde der Uferquerschnitt aus den Punktwolkendaten ermittelt. Wie sich bei der praktischen Umsetzung anhand der RiverView®-Aufnahmen gezeigt hat, muss man in den Punktwolken zwingend zwischen den eigentlichen Uferböschungen und der Wasseroberfläche unterscheiden. Die Punkte im Wasserbereich unterliegen leicht Fehlzuordnungen aufgrund der Spiegelungen, was im Ergebnis zu fehlerhaften Punktkoordinaten führen würde.

Visuelle Odometrie

Wie die Gewässerbefahrungen zeigten, sind die Posen – also die Positionen und Orientierungen – des Bootes im Regelfall mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von ca. 2 cm in der Lage bzw. 4 cm in der Höhe sowie besser als 1° in der räumlichen Orientierung bestimmbar. Dies ist im Hinblick auf die Projektanforderungen als ausreichend zu bewerten. Allerdings können zum einen beispielsweise Abschattungen durch Vegetation die Empfangsbedingungen für die RTK-Korrekturdatensignale verschlechtern. Zum anderen zeigte sich, dass die – relativ kostengünstige – MEMS-basierte Inertialmesseinheit die GNSS-Signalausfälle aufgrund der starken Drifteffekte in den Beschleunigungsmessungen nicht über einen längeren Zeitraum (d.h. mehr als 20 sec.) ausreichend genau überbrücken kann. Dieses Problem konnte alternativ durch Anwendung von Prinzipien der Visuellen Odometrie (VO) gelöst werden. Bei der Visuellen Odometrie bestimmt man die Eigenbewegung eines Trägerfahrzeuges anhand der Bilddaten, die von einer mitgeführten Kamera aufgezeichnet werden. Die visuell-odometrische Auswertung der Aufnahmen liefert als Ergebnis nicht nur die (zumeist dünnen) Punktwolken, sondern – gewissermaßen als Nebenprodukt – auch die Orientierungsdaten der Aufnahmen und somit mittelbar die Posen des mit der Kamera starr verbundenen Messbootes.

In einer Untersuchung wurde das Genauigkeitspotential der VO in den typischen Gewässerszenen von RiverView überprüft (Abbildung 75). Dazu wurde die Trajektorie des Trägerbootes wie beschrieben mit Visueller Odometrie bestimmt und den zentimetergenauen Positi-

onsdaten einer ungestörten, RTK-korrigierten GNSS-Aufzeichnung, die parallel vorlag, gegenübergestellt. Die Abweichungen betragen in Lage und Höhe im Durchschnitt 2 bis 4 cm und bestätigen damit das hohe Genauigkeitspotential des Prinzips.

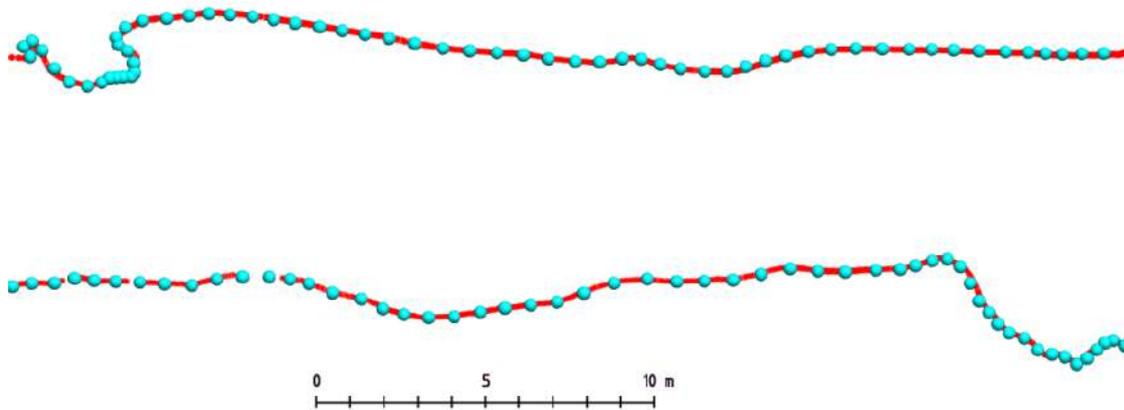


Abbildung 75: Bestimmung der Messbootposition durch Visuelle Odometrie (blau) und Vergleich mit RTK-GNSS-Messungen (rot)

Point Cloud On Demand

Die Generierung der Punktwolken (Point Cloud) und die Umsetzung des Prinzips der Visuellen Odometrie wurden in RiverView zunächst auf der Grundlage einer kommerziellen Softwarelösung realisiert (Agisoft PhotoScan). Weitere Entwicklungen im Berichtszeitraum zielten darauf ab, die Bildzuordnungsverfahren, die zum Beispiel für die oben geschilderten visuell-odometrischen Anwendungen benötigt werden, durch Nutzung von openCV-Bibliotheken³ als eigenständige Lösung in das Softwaresystem von RiverView[®] zu integrieren. Hierdurch kann der Nutzer beispielsweise während einer Datenrecherche anlassbezogen für ausgesuchte Uferabschnitte bildbasierte Punktwolken generieren und sich auf diese Weise dreidimensionale Informationen verfügbar machen (hier als *Point Cloud On Demand* bezeichnet).

Die Umsetzung von Point Cloud On Demand findet unter Verwendung der openCV-Bibliothek statt. Zu unterscheiden sind grundsätzlich die Algorithmen für Structure from Motion (SfM) und für das eigentliche Dense Image Matching (DIM), bei dem aus überlappenden Bildpaaren eine dichte Punktwolke erzeugt wird. Die wesentlichen Schritte dieser beiden Teilverfahren werden nachfolgend kurz geschildert:

³ <https://opencv.org/>

SfM – Structure from Motion

Der erste Schritt des Structure-from-Motion-Algorithmus ist die Extraktion und Detektion von markanten Punkten (sog. Feature Points) in den Bildern. Anschließend werden die Feature Points eines Bildes denjenigen eines anderen Bildes zugeordnet; dies gelingt immer dann, wenn das Bildpaar ein ausreichendes Maß an Überlappung aufweist (mindestens 50 %, besser 80 – 90 %). Wenn die Zuordnung für eine ausreichende Anzahl an Punkten gefunden ist, kann anhand dieser Feature Matches auch die relative Orientierung des Bildpaares berechnet werden, so dass die gegenseitige Lage der Aufnahmen zueinander bekannt ist. In Abbildung 76 sind die Feature Matches bei einem Bildpaar aus einer RiverView-Szene dargestellt.

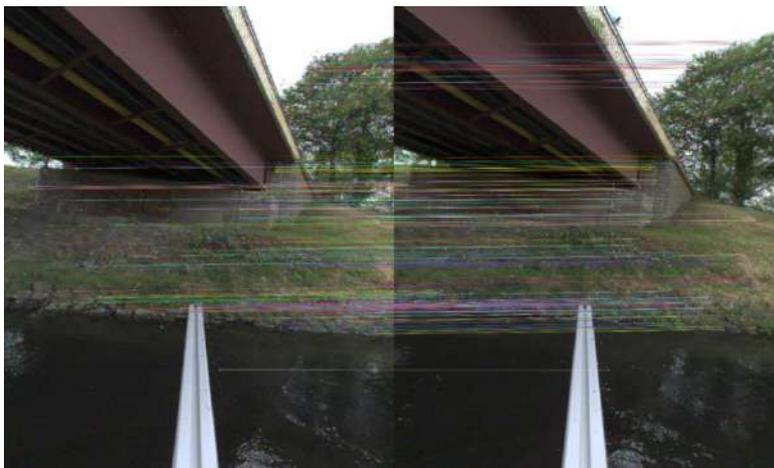


Abbildung 76: Zugeordnete Feature Points eines Bildpaares beim SfM (Feature Matches)

Die Bildung von relativ orientierten Bildpaaren findet in allen möglichen Kombinationen statt, so dass die Aufnahmen des Bildverbandes implizit untereinander verkettet sind. Der komplette Bildverband kann schließlich einer Bündelblockausgleichung unterzogen werden, wobei neben den Kameraposen (Daten der äußeren Orientierungen) auch die dreidimensionalen Koordinaten der Feature Points – also eine erste (zunächst noch dünne) Punktwolke – als Ergebnis anfallen.

DIM – Dense Image Matching

Die Punktwolke aus dem SfM ist noch relativ dünn, da das primäre Bestimmungsziel die Orientierungsdaten der Aufnahmen ist. Mit dem Dense Image Matching (DIM) findet die Erzeugung einer dichten 3D-Punktwolke statt. Beim DIM wird zunächst für jedes Pixel eines Bildes ein Tiefenwert berechnet, wobei auch hierbei die Zuordnungsaufgabe möglichst fehlerfrei gelöst werden muss. Um die Korrespondenzsuche in den Bildpaaren zu vereinfachen und zu

beschleunigen, werden die Bilder zu Normalbildern rektifiziert, so dass sich der Suchraum jeweils auf eine Bildzeile einschränkt und die Komplexität des Verfahrens damit deutlich verringert wird.

Das rektifizierte Bildpaar wird verwendet, um eine Tiefenkarte basierend auf den x-Differenzen der Bildkoordinaten homologer Pixel (sog. Parallaxen) zu generieren. Aus der Tiefenkarte wird schließlich die dichte Punktwolke abgeleitet, indem man durch Anwendung des photogrammetrischen Vorwärtsschnittprinzips zu 3D-Koordinaten gelangt. Zur Beschleunigung der überwiegend rechenintensiven Prozesse wird ein Teil der Algorithmen parallelisiert und mithilfe der CUDA-Schnittstelle⁴ auf einer Grafikeinheit (GPU) implementiert.

⁴ <http://www.nvidia.de/object/cuda-parallel-computing-de.html>

5.5.7 Sonar – Unterwasseraufnahmen

Die erhobenen Datensätze der verschiedenen Sensoren können auf vielfältige Weise genutzt werden. Ein wichtiger Anwendungsfall ist die Erzeugung von Geodaten-Produkten wie Kartendarstellungen, Schnitten und Visualisierungen.

In diesem Arbeitspaket wurden verschiedene Möglichkeiten der Erstellung von ingenieurtechnischen Produkten und Visualisierung erarbeitet und getestet.

So ist es im Ergebnis möglich, auf Grundlage der erhobenen Echolotpeildaten Längsschnitte von Gewässern über mehrere Kilometer zu erzeugen, wobei eine durchgängige Darstellung der Morphologie der Gewässersohle unter Integration der georeferenzierten Tiefenmessung erzeugt wird.

Außerdem war es vorgesehen, im Rahmen des Projekts eine Überführung der Ergebnisse der photogrammetrischen Vermessung der Kamerabefahrungen in Form von Punktwolken in ingenieurtechnische Darstellungen (z.B. bei Brücken: Schnitte, Ansichten, Flussverlauf: Böschungslinien, 3D-Darstellung in Form von DGM usw.) vorzunehmen. Hierzu wurde von Geo-DV eine Methodik entwickelt.

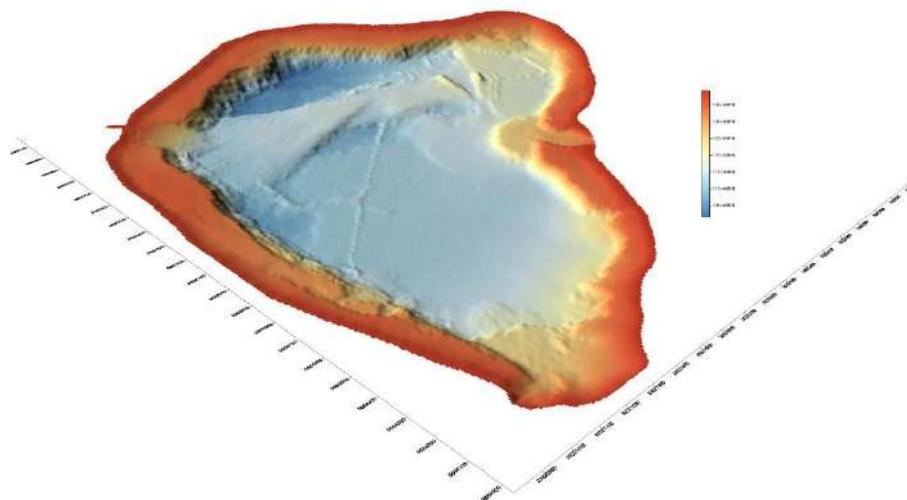


Abbildung 77: 3D-Flächenmodell (Speicherbecken Borna) (Geo-DV)

Sidescan-Sonar

Ebenso wie für die Peilungen mit Echolot, wurden für die Aufnahmen von Sidescan-Sonar-Daten vielfältige Anwendungsfälle identifiziert.



Abbildung 78: Höhenlinienmodell eines bergrechtlich gesperrten Böschungsbereiches mit Integration einer Sidescanaufnahme zum Erkennen von Rutschungsgefahren (Speicherbecken Borna) Geo-DV

Das IWW hat u.a. an der Erzeugung und Interpretation der aufgenommenen Sidescan-Sonardaten gearbeitet. Die folgenden Abbildung 79 bis Abbildung 82 zeigen Aufnahmen des am Messboot des IWW angebrachten Sidescan-Sonars einer Testfahrt auf dem Rhein. Auf diesen sind die Sohlstruktur und Objekte auf der Sohle zu erkennen. So können Dünenstrukturen, Rippelmarken, subaquatische Pflanzen sowie anthropogene Einflüsse wie Ankerspuren erkannt werden.

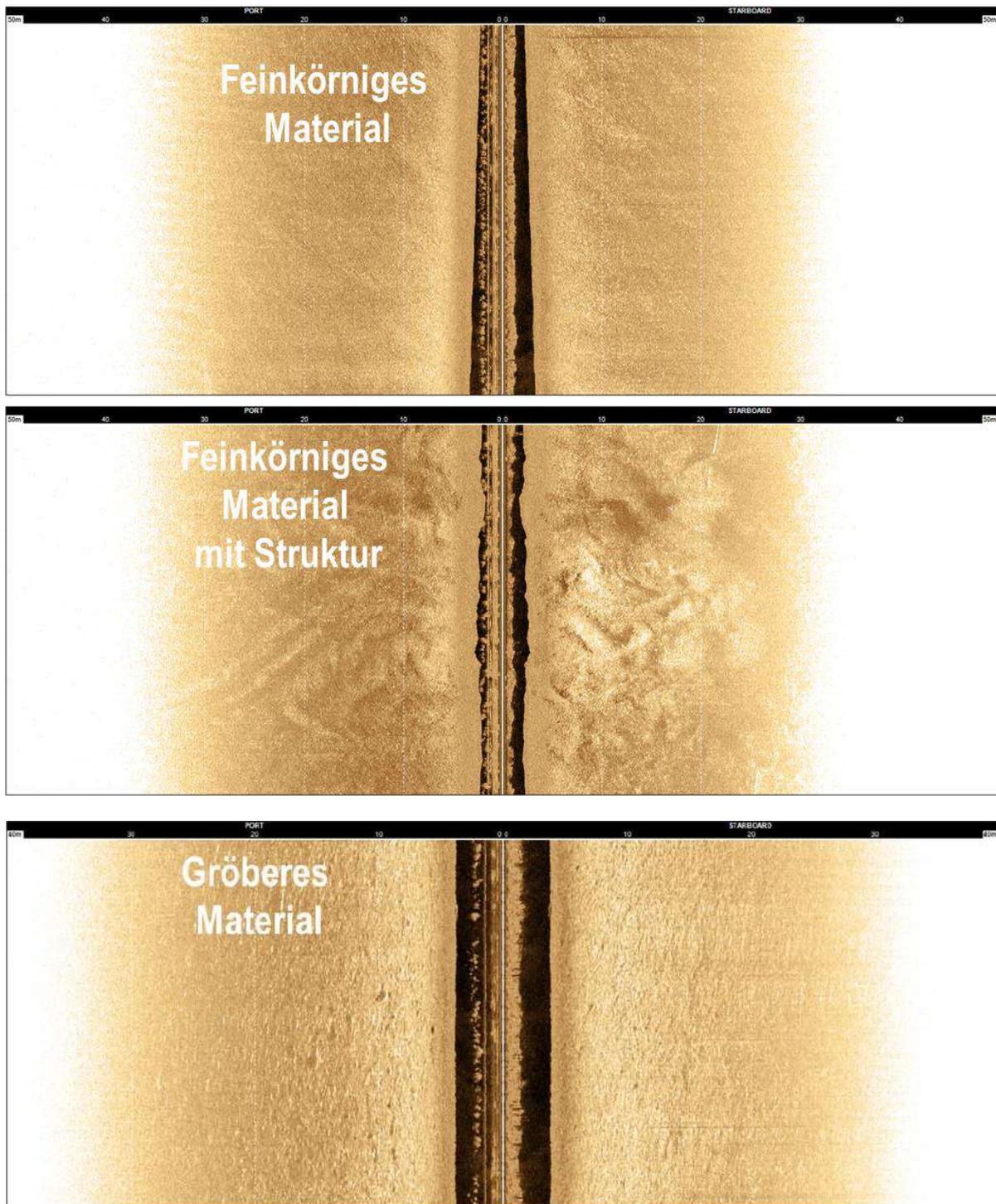


Abbildung 79: Sidescan-Sonarbilder der Rheinsohle

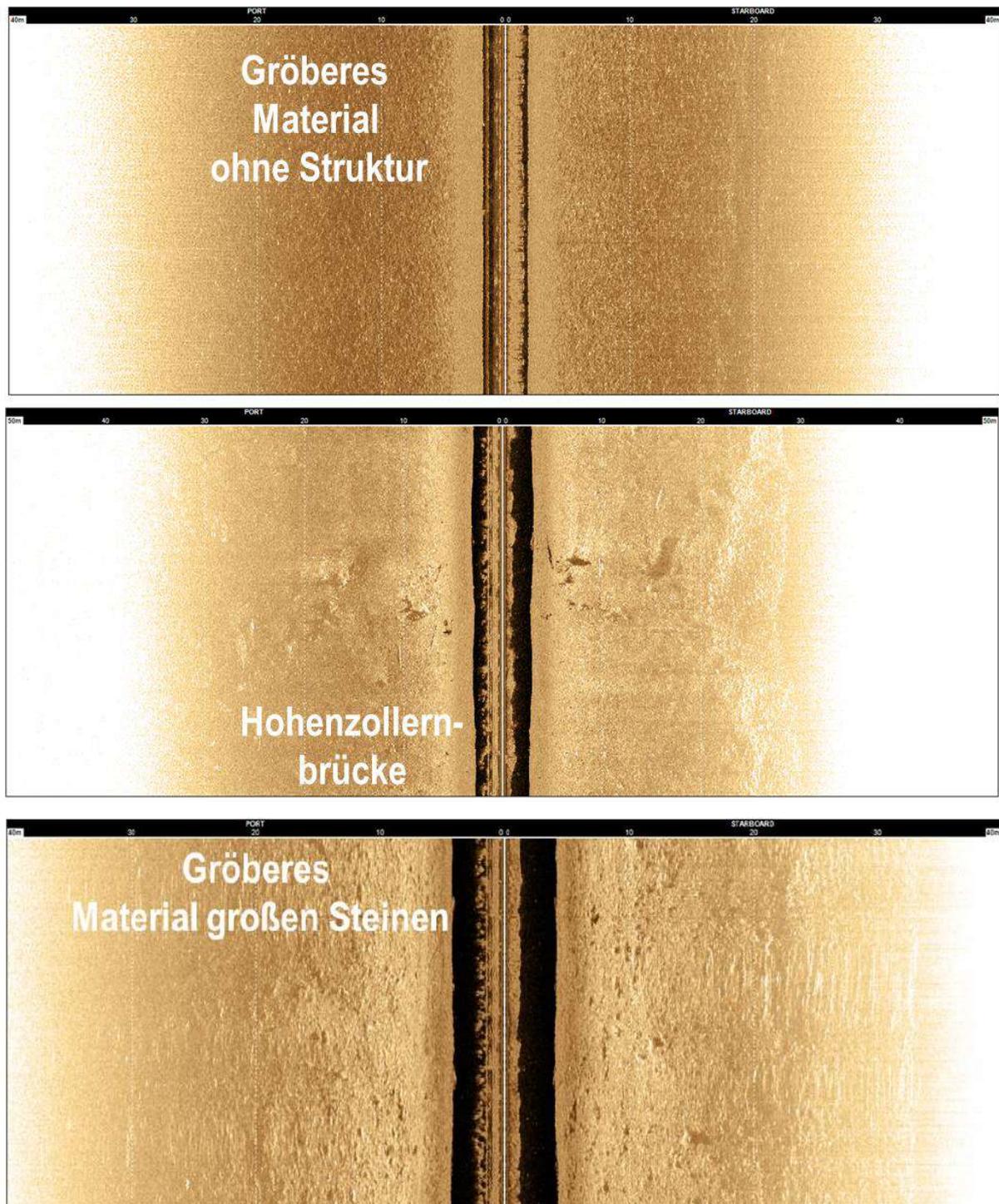


Abbildung 80: Sidescan-Sonarbilder der Rheinsohle

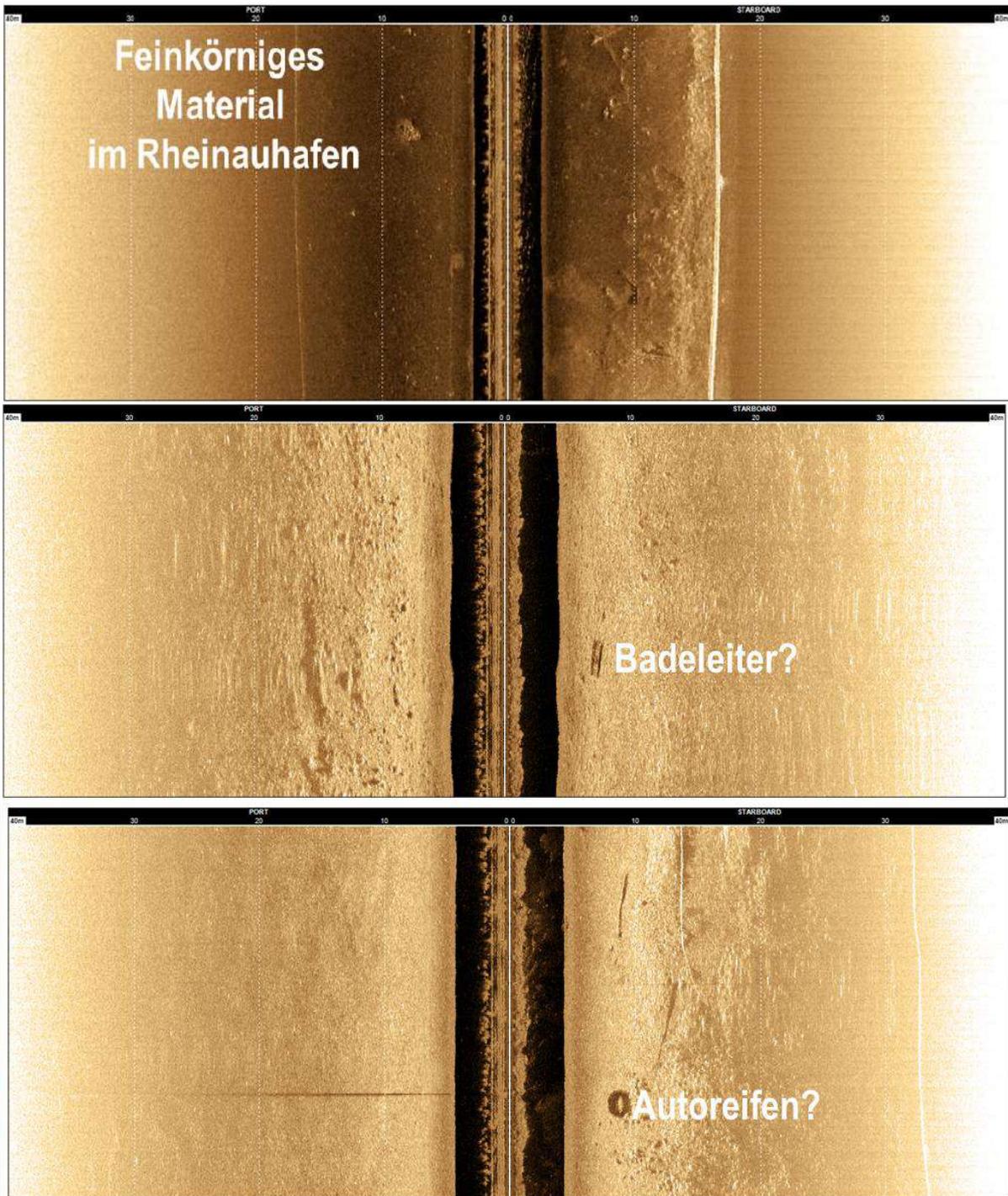


Abbildung 81: Sidescan-Sonarbilder der Rheinsohle

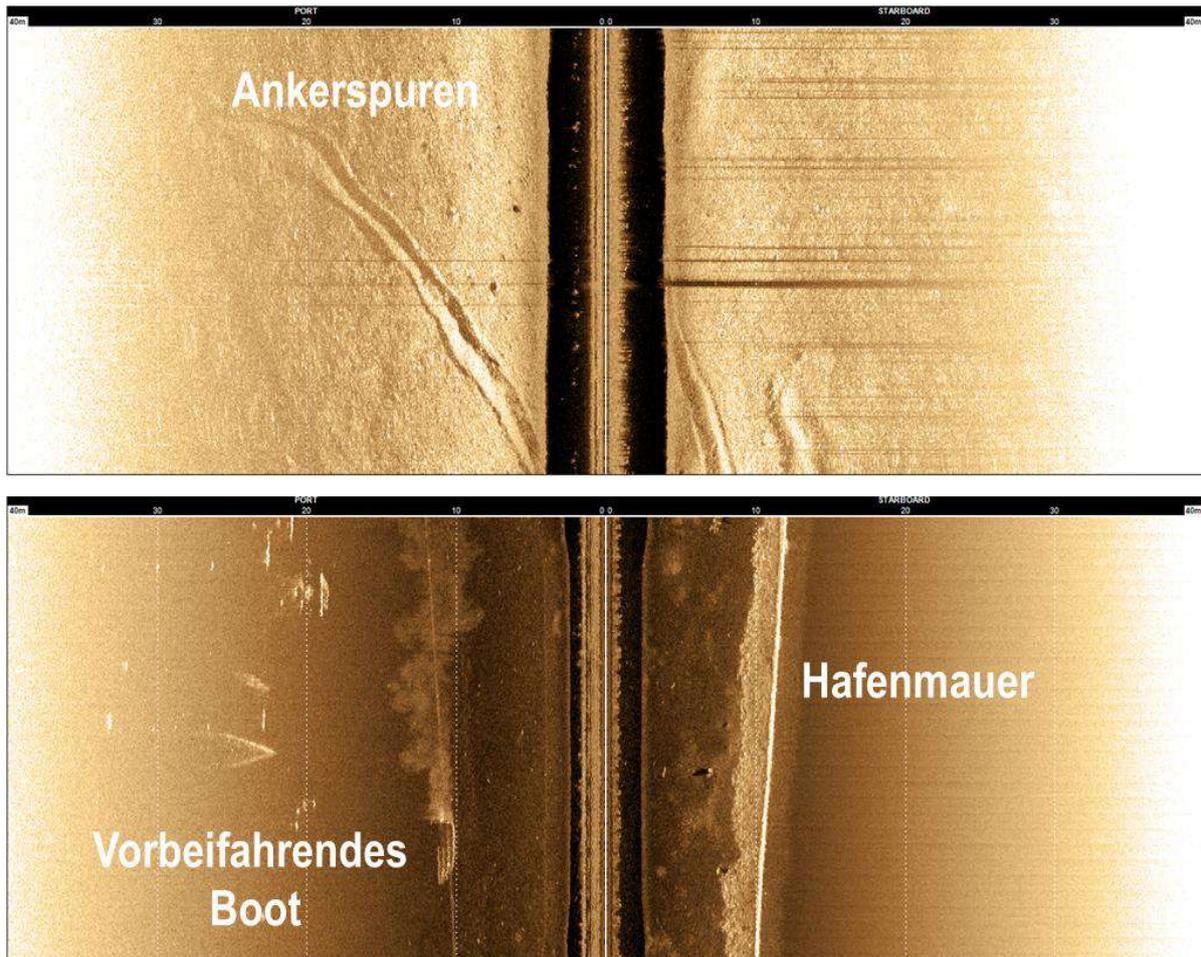


Abbildung 82: Sidescan-Sonarbilder der Rheinsohle

Im Rahmen der Datenauswertung der Unterwassersensorik wurden auch eigene Darstellungsweisen der Sidescan-Aufnahmen getestet. Analog zur Export-Funktion der Echolot-Rohdaten, bietet das RiverBoat ebenfalls die Möglichkeit, die Sidescan-Rohdaten zu exportieren. Hierdurch eröffnen sich vielfältige Möglichkeiten der weitergehenden Datenauswertung. Beispiele für die Darstellung verschiedener Sidescan-Sonar-Aufnahmen sind in Abbildung 83 zu sehen.

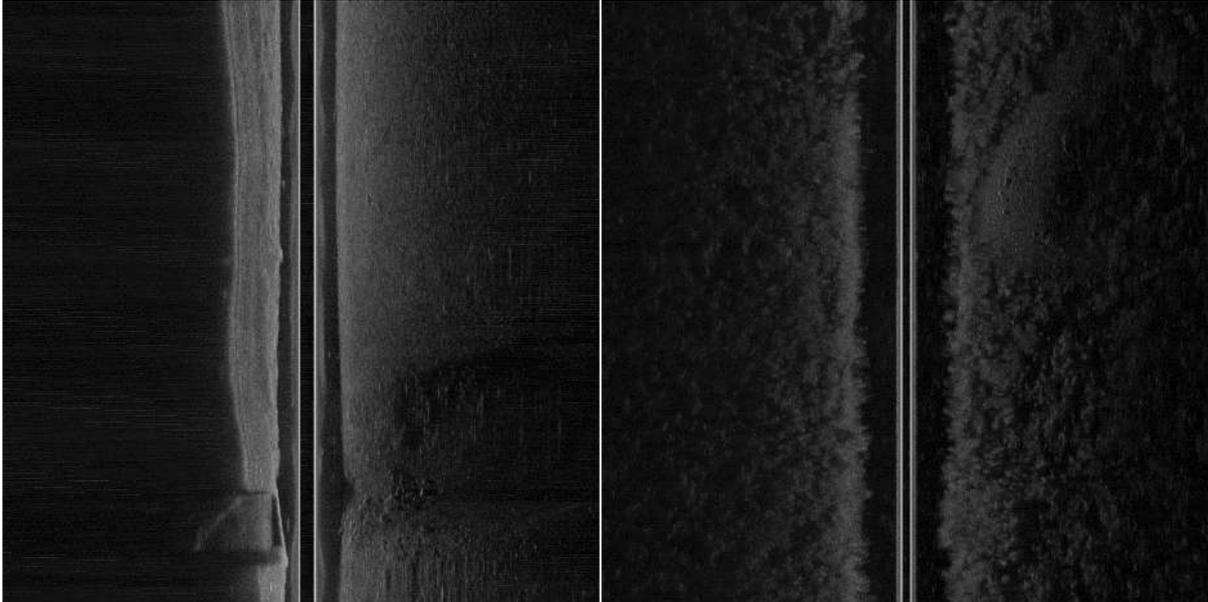


Abbildung 83: Sidescanaufnahmen des RiverBoats

Verarbeitung der Echolotdatensätze

Am FiW wurden verschiedene Zusammenführungen der Datensätze vorgenommen um ein DGM bzw. DOM aus den Peildaten und der digitalen photogrammetrischen Vermessung abzuleiten.

Hierfür wurde unter anderem der Renaturierungsbereich der Rur in Körrenzig aus dem Zuständigkeitsbereich des WVER detailliert vermessen und daraus ein DGM aufbereitet, zu sehen in Abbildung 84. Dies erfolgte allerdings zunächst unter Nutzung der frei verfügbaren Geländedaten des Landes NRW.

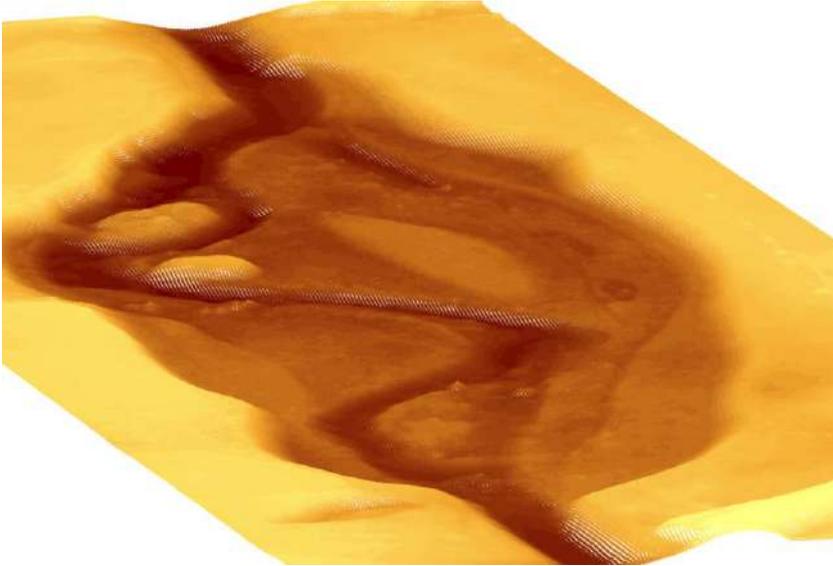


Abbildung 84: Mittels bildgebender und sonarbasierter Technik erzeugtes Digitales Höhenmodell des Flussverlaufes der Rur in Koerrenzig.

Die Zusammenführung der Echolotdatensätze mit den photogrammetrischen Datensätzen erfolgte für den in Abbildung 85 dargestellten Datensatz anders, hier wurde die Gesamtpunktwolke beibehalten und mit den gemessenen Echolotpunkten zusammengeführt. Hierdurch erhält man die fotorealistische Abbildung der Ufervegetation und kann diese im Zusammenspiel mit den Bathymetriedaten auswerten.

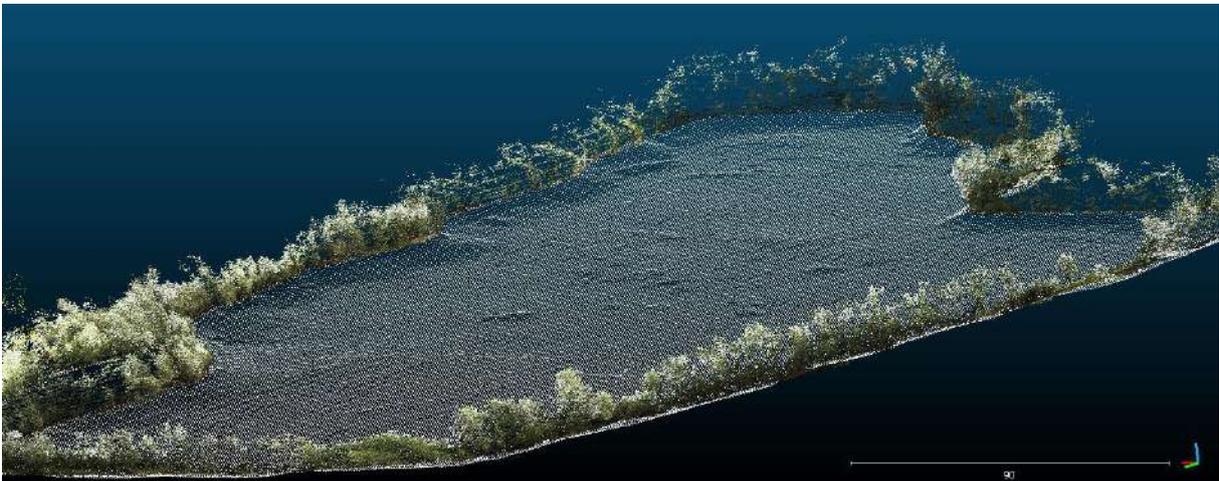


Abbildung 85: Uferpunktwolke und Bathymetrie eines Sees an der Weser. Datengrundlage von Single-Beam Peilung und Überwassermappingeinheit

Darüber hinaus wurden weitere Auswertansätze entwickelt. So wurde beispielsweise ein Ansatz entwickelt, mit dem sich aus den Punktwolken des Gewässerumfeldes Angaben zur Beschattung des Gewässers ableiten lassen. Das Verfahren basiert auf der Analyse von Punktwolken des Uferbereichs, aus denen geometrische Kennzahlen zur Ausprägung der Ufervegetation ermittelt werden. Diese werden danach in die Struktur der Eingabedaten des DWA-Gewässergütemodells überführt und können damit direkt in eine Simulation des Beschattungsgrades und der resultierenden Wassertemperaturen überführt werden. Diese Untersuchung erfolgte im Rahmen einer Masterarbeit (Tabatabaei 2018, unveröffentlicht). Eine beispielhafte Darstellung einer Punktwolke nach Höhenwerten ist in Abbildung 86 gegeben.

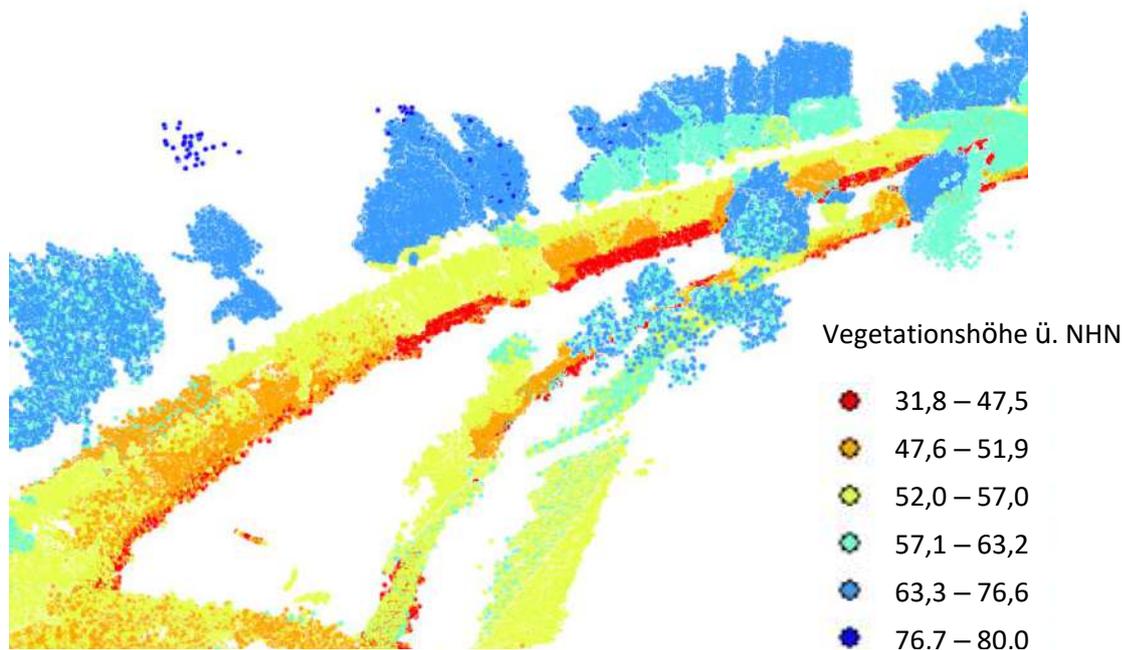


Abbildung 86: Klassifikation von Uferbewuchs nach Höhe

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. 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 Wasserspiegelhöhendifferenz deutlich erkennbar (Abbildung 87).

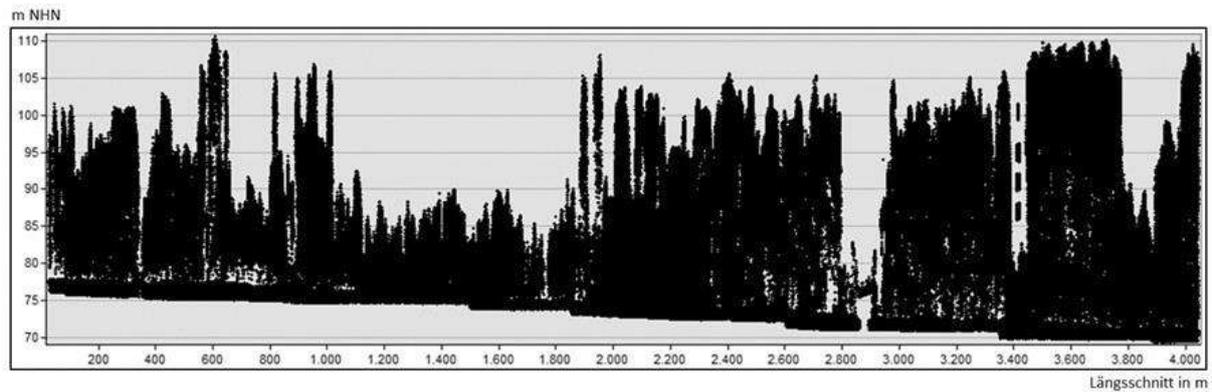


Abbildung 87: Wasserspiegelhöhendifferenz im Untersuchungsraum

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 Punktinformationen (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.

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 Berücksichtigung 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.

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 88 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. 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 Anpassung gegeben werden. Die optimierten Eingangsparameter können gleichermaßen in anderen Gewässergütemodellen angewendet werden.

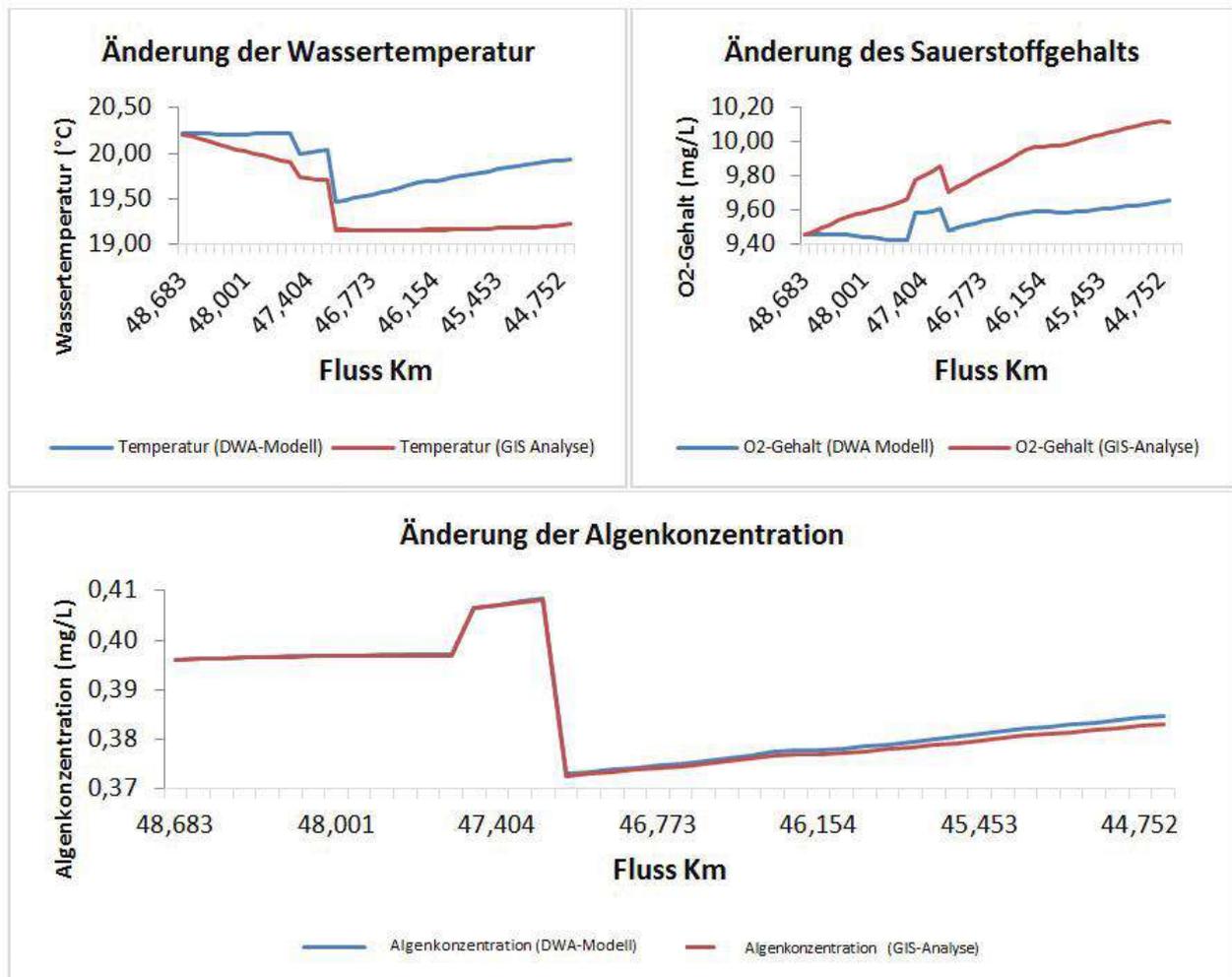


Abbildung 88: Änderung der strahlungsempfindlichen Parameter durch Anpassung der Vegetationsparameter im DWA-Gewässergütemodell. Tabatabaei 2018

Analyse der Echolotdaten

Die Echolotaufnahmen weisen, je nach Beschaffenheit des Gewässers, eine unterschiedliche Qualität auf. Besondere Charakteristiken sind hierbei starkes Auftreten von Flüssigschlick in Abgrenzung zu einer festen Sohle und Wasserpflanzen. Für die genauere Analyse dieser Charakteristiken wurde ein Ansatz entwickelt, mit dem die Echogramme als Graustufen-Bilder geplottet werden können. In diese kann daraufhin von Hand gezeichnet werden. Die von Hand gezeichneten Linien lassen sich dann wiederum analysieren und in georeferenzierte Tiefenwerte überführt werden. Mit diesem Verfahren lässt sich sicherstellen, dass auch bei komplizierten Untergrundbeschaffenheiten eine genaue Interpretation der Echolotwerte erfolgen kann. Beispiele für Echogramme, in denen dies erforderlich sein könnte, sind in Abbildung 90 und Abbildung 89 dargestellt.

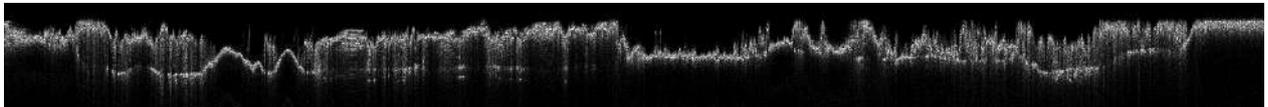


Abbildung 90: Echogramm einer Befahrung eines Sees mit starkem Aufkommen von Wasserpflanzen

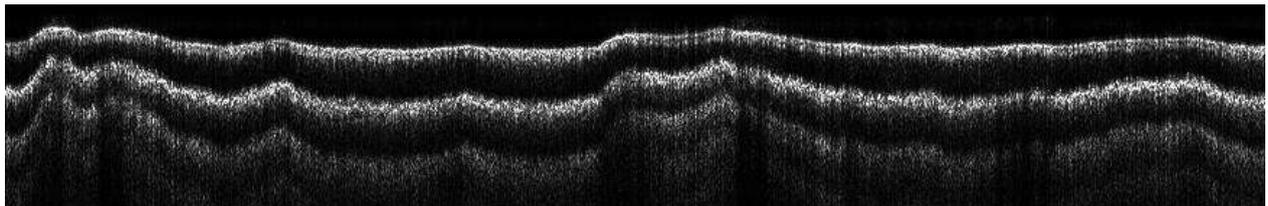


Abbildung 89: Echogramm von einem flachen Gewässerbereich mit vielen multiplen Reflexionen

Aufbereitung der Unterwasseraufnahmen

Im Rahmen der oben beschriebenen Vergleichsmessungen am Renaturierungsabschnitt der Rur bei Körrenzig wurden ebenfalls die Unterwasserkameras genutzt, um eine Analyse der Untergrundbeschaffenheit durchzuführen. Hierzu wurden die aufgenommenen Bilder gesichtet und je nach Ort der Aufnahme eine Klassifikation der vorgefundenen Sohlmaterialien vorgenommen. Beispiele für die aufgenommenen Unterwasserbilder sind in Abbildung 91 zu sehen.

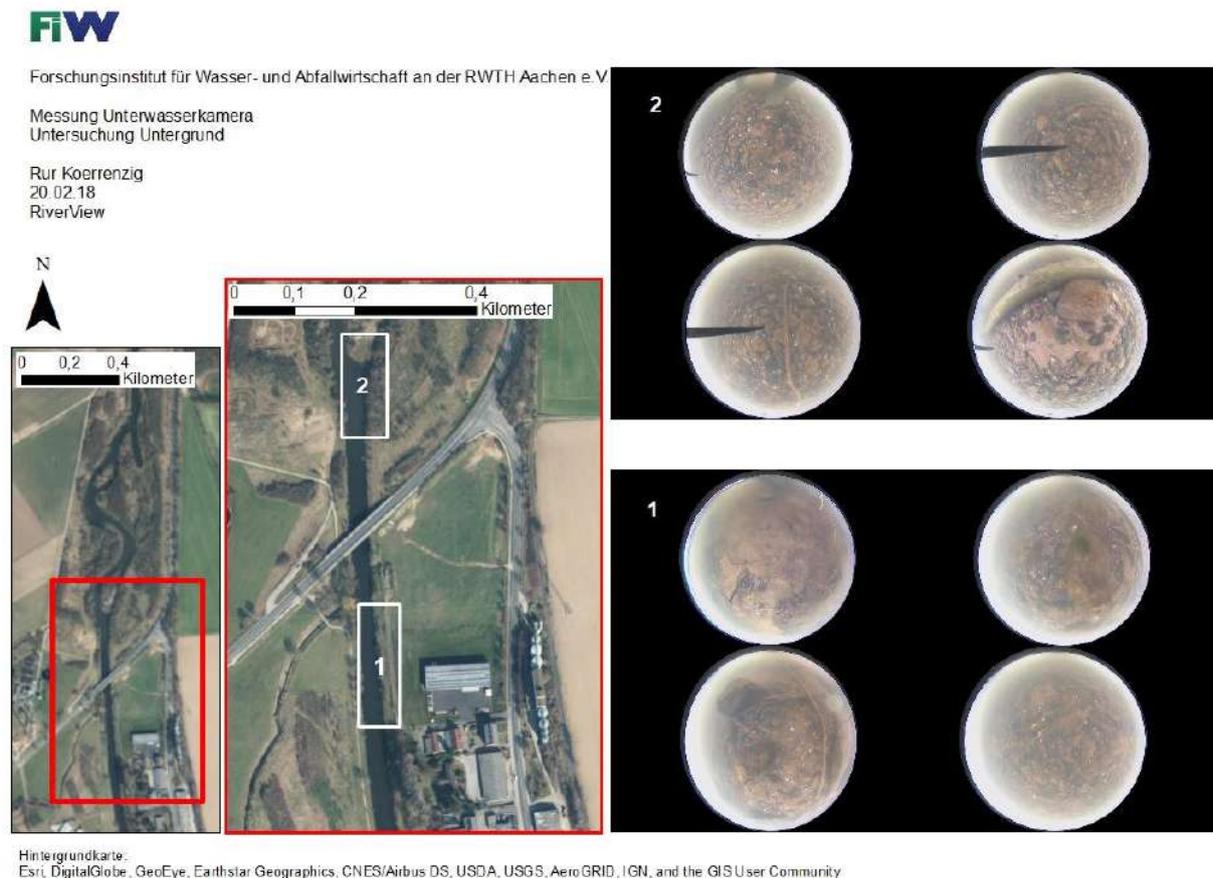


Abbildung 91: Ermittlung des Sohlsubstrats mittels am RiverBoat befestigten Unterwasserkameras.

5.5.8 Evaluierung der bildgebenden und verarbeitenden Verfahren und Systeme

Die federführend durch das gia entwickelten bildgebenden und geodätischen Aufnahmemethoden mittels Überwasserkamera wurden durch das FiW in einer Vielzahl von Messfahrten getestet. Die Kommunikation zwischen den verschiedenen Modulen wurde im Projektverlauf kontinuierlich verbessert um eine größere Ausfallsicherheit zu gewährleisten.



Abbildung 92: Überwasseraufnahmen an der Wurm zu zwei verschiedenen Zeitpunkten (LandyBug 5).

Am 04.05.2016 wurde mit dem Boot des IWW (Nelli 2) eine Testfahrt von ca. 4,5 km Länge auf der Lippe durchgeführt. Die Panoramakamera hat mit einer Rate von 2 fps gearbeitet und somit pro Sekunde 2 x 6 Einzelbilder erzeugt, aus denen sich die einzelnen Panoramen zusammensetzen. Ein Beispielbild ist in Abbildung 93 gezeigt.



Abbildung 93: 360°-Panoramaaufnahme auf der Lippe (Lünen, 04.05.2016)

Aus den bei dieser Befahrung erhobenen Bilddaten wurde durch das gia photogrammetrisch eine Punktwolke erzeugt, diese ist in Abbildung 94 zu sehen.

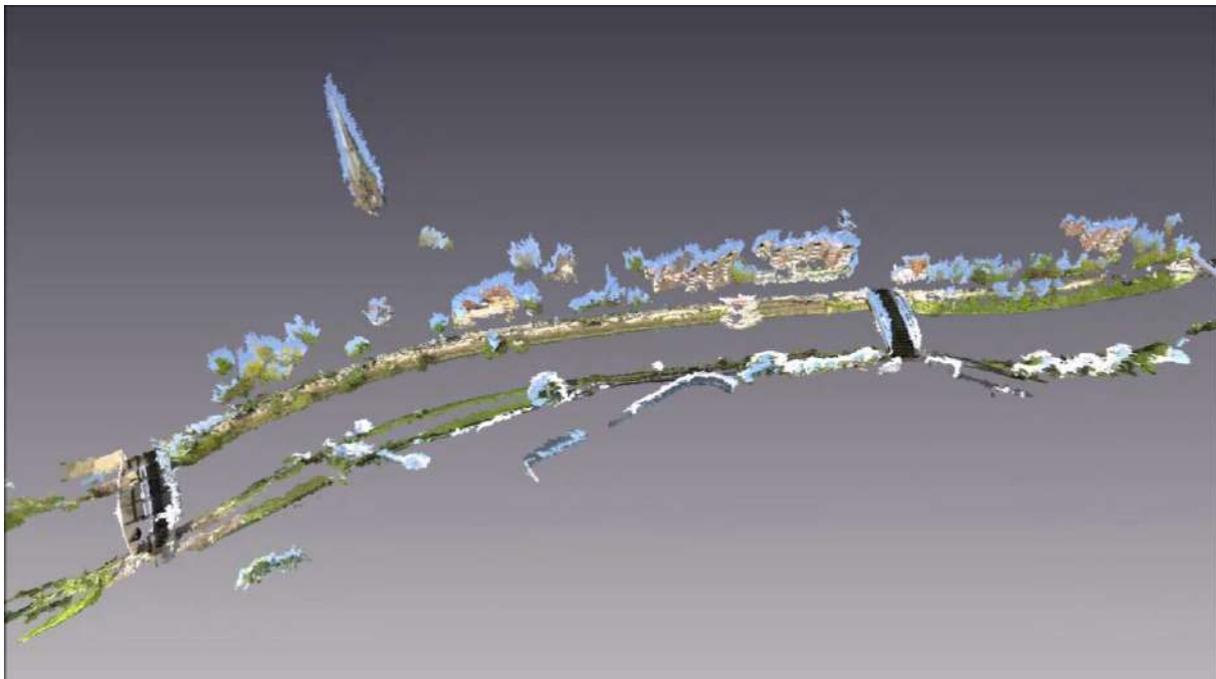


Abbildung 94: Punktwolke eines Abschnitts der Lippe (Draufsicht)

Mit dem hier entwickelten Verfahren wurde ein sehr hoher Detaillierungsgrad erreicht. Der Detaillierungsgrad ist im Wesentlichen von der Aufnahmezeit der Bilder und der Entfernung zum untersuchten Objekt abhängig. Gleiches gilt für die relative Genauigkeit der Einzelpunkte.

Hierüber hinaus wird die absolute Positionsgenauigkeit der Einzelpunkte zusätzlich zu den o.g. Punkten von der GNSS-Genauigkeit beeinflusst. Diese liegt je nach Anzahl der Satelliten im Bereich von wenigen cm bis zu wenigen Metern.

In den Testeinsätzen war der begrenzende Faktor der Genauigkeit meist fehlender Mobilfunkempfang und damit das Fehlen von RTK-Signalen. Dies lässt sich im Postprocessing korrigieren, da die GNSS-Rohdatenstreams aufgezeichnet werden. Zu größeren Problemen führt die Abschattung des Satellitenempfangs durch Bewuchs oder naturräumliche Gegebenheiten wie steile Talflanken. Für solche Fälle bietet sich die Nutzung des in Kapitel 5.2.5 beschriebenen Tachymetertrackings oder der Korrektur der Positionierungsdaten mittels Sensorfusion (Kapitel 5.7) an. Ebenfalls kann über die oben beschriebenen Verfahren des Bildmatchings Bereiche mit geringerer GNSS-Qualität im Postprocessing korrigiert und die Datenqualität verbessert werden. Es stehen somit vielfältige Möglichkeiten zur Verfügung um eventuelle Abschattung von Satellitenempfang, fehlendem Mobilfunkempfang und anderen Störeinflüsse zu korrigieren.

5.6 Unterwasserkamerabasierte Bathymetrie

In den Praxisversuchen stellte sich heraus, dass die Erfassung der Gewässertopographie in Flachwasserbereichen, insbesondere Uferbereichen mit Wassertiefen kleiner 35 cm, das bord-eigene Echolot im RiverBoat keine Ergebnisse liefern kann, was in den physikalischen Eigenschaften des Verfahrens begründet ist. Daher wurde in der Aufstockungsphase ein kamera- und linienlaserbasiertes System entwickelt, das in Ergänzung zu den Echolotmessungen die vollständige Erfassung der Gewässertopographie unter Wasser ermöglicht.

5.6.1 Systemkonfigurationen

In der Vorplanungsphase wurden folgende Systemkonfigurationen für eine bild- und laserlinienbasierte Bathymetrie entworfen: Stereokameras mit fester Basis, Einzelkamera und Kamera mit Linienlaser. Hiervon wurde das Stereokamerasystem nicht realisiert, weil eine zweite Kamera nicht verfügbar war.

Der Systementwurf basierend auf einer Einzelkamera benutzte eine Kamera, deren Aufnahme-richtung senkrecht zum Bootskörper nach unten auf den Gewässerboden zeigt. Die Aufnahmefrequenz während einer Messfahrt wird so gewählt, dass in Verbindung mit der Vorwärtsbewegung des Messbootes ein Bildverband mit hohem Überdeckungsgrad (mindestens 75 %) entsteht. Bei diesem Systemansatz erfolgt die Auswertung der Bilder durch Anwendung von Verfahren der automatischen Bildzuordnung (SfM, DIM, s.o.), deren primäres Resultat eine 3D-Punktwolke des Gewässerbettes ist. Sekundär können hieraus dann Oberflächenmodelle abgeleitet werden.

Für RiverView wurde das Verfahren getestet, um damit die Erfassung der Gewässersohle durchzuführen. Das SfM-Verfahren konnte grundsätzlich erfolgreich zum Einsatz kommen und damit für die Erfassung der Gewässertopographie angewendet werden, allerdings waren die Ergebnisse häufig durch die Trübung des Wassers sowie eine fehlende Textur beeinträchtigt. Abbildung 95 zeigt das aus dem Versuch erstellte Digitale Geländemodell eines Teils des Gewässerbodens nach der Aufbereitung der Punktwolken.

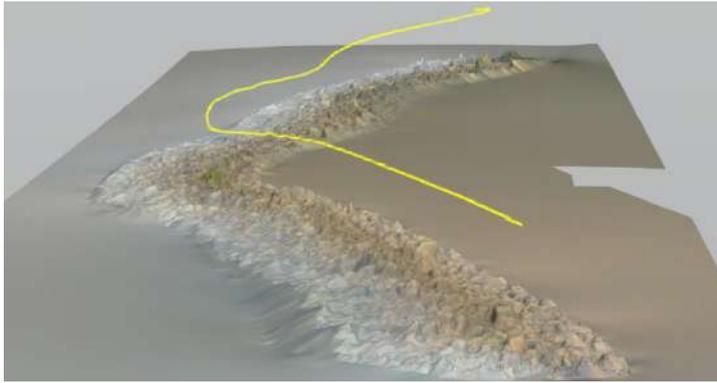


Abbildung 95: DGM einer Gewässersohle, abgeleitet ausschließlich aus der Aufnahmen einer einzelnen Unterwasserkamera (Überhöhte Darstellung)

Für allgemeine Anwendungsfälle, vor allem wenn die Textur nicht ausreichend vorhanden ist, erzielt man mit einem System bestehend aus einer Kamera und einem feststehenden Linienlaser bessere Ergebnisse. Das Messprinzip (Abbildung 96) beruht auf einer zumeist grünen Laserlichtquelle, die quer zur Fahrtrichtung ein Lichtfächer nahezu senkrecht zum Bootskörper nach unten projiziert. Auf der Gewässersohle entsteht eine farbige Linie, die den größten Teil des Gewässerbettes abdeckt und von einer Kamera erfasst wird. Die Laserlinie am Gewässerboden wird durch Anwendung des photogrammetrischen Triangulationsprinzips dreidimensional vermessen, indem die in den Aufnahmen detektierten Linien bzw. deren zugehörige Bildstrahlen mit der Ebene des Laserlichtfächers verschnitten werden.

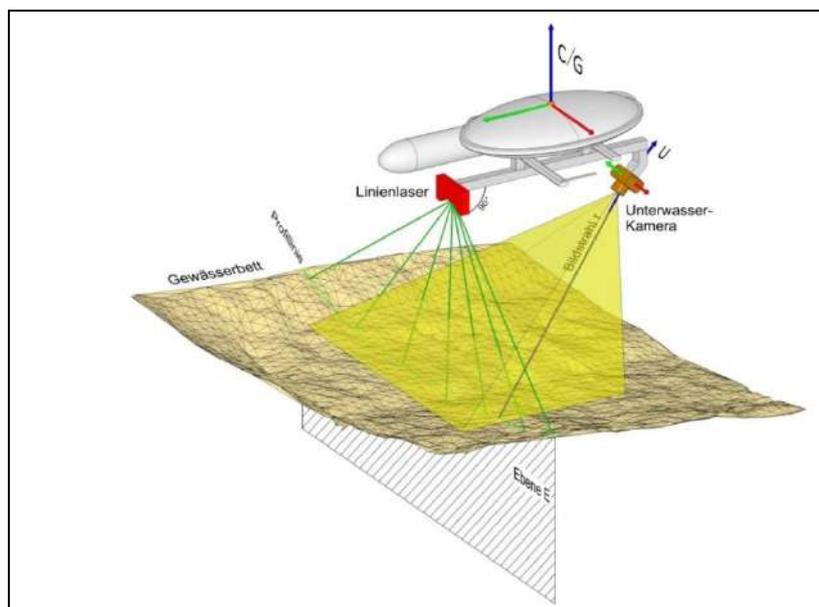


Abbildung 96: Bathymetrische Messung mit einem Linienlaser und einer Einzelkamera (Messprinzip)

Als Kamera wurde eine IDS μ Eye UI-3280CP-C-HQ eingesetzt, die in einem wasserdichten Gehäuse eingebaut war (Abbildung 97). Der Sensor (Sony IMX264) dieser Global-Shutter-Kamera verfügt über eine Auflösung von 2456 x 2054 Pixel bei einer Größe von 8.473 x 7.086 mm². Das Objektiv besitzt eine Brennweite von 6 mm. Die Abgrenzung zum Wasser erfolgte durch ein hemisphärisches Trennglas. Die Kamera wurde so montiert, dass sich das Projektionszentrum im Mittelpunkt der Halbkugelschale befand, so dass das photogrammetrische Abbildungsmodell mit den klassischen Kollinearitätsgleichungen auch unter Wasser gültig war, was sich für den Praxiseinsatz als effektivste Lösung zeigte. Eine in einem Testfeld des geodätischen Instituts durchgeführte bestätigte dies. Die Verzeichnungswerte in Verbindung mit dem hemisphärischen Trennglas waren besser als unter reinen Luftbedingungen, was auf eine Teil-Kompensation der Verzeichnungswirkung hindeutet.



Abbildung 97: Unterwasserkamera mit Umhausung

5.6.2 Kalibrierung des bathymetrischen Kamera-Laserlinien-Messsystems

Das bathymetrische Messsystem besteht in dieser Ausführung aus einem grünen Linienlaser, der kontinuierlich eine Ebene E aufspannt und damit auf dem Gewässerboden eine Linie erzeugt, und einer Unterwasserkamera, die diese Linie aufnimmt. Um geometrisch korrekte Messergebnisse zu erzielen, musste das Kamera-Laserlinien-System kalibriert werden. Mit der Kalibrierung wird die gegenseitige Lage der beiden (dreidimensionalen) Koordinatensysteme S_U und S_L bestimmt (hier als „intrinsische“ Kalibrierung bezeichnet), die wie folgt definiert sind:

S_U : Bildkoordinatensystem der Unterwasserkamera (photogrammetrische Definition)

S_L : Koordinatensystem der Laserlinien-Ebene E; die Ebenennormale bildet die Z-Achse von S_L ; der Ursprung sowie die X- bzw. Y-Achse liegen in E, deren genaue Position kann bzw. muss willkürlich festgelegt werden.

Wenn die Lage der Ebene E gegenüber S_U bekannt ist, kann die 3D-Bodenlinie – zunächst im Kamerakoordinatensystem S_U – auf relativ einfache Weise durch Vorwärtseinschneiden der Bildstrahlen mit der Ebene E bestimmt werden. Sofern zusätzlich die Transformation von S_U (oder alternativ S_L) in das Überwasser-Koordinatensystem (i.d.R. S_C) bekannt ist (hier als „extrinsische“ Kalibrierung bezeichnet), gelingt auch die Georeferenzierung der 3D-Bodenlinie.

Herstellung und Einmessung der Kalibrierkulisse

Für die Kalibrierung wurde eine künstliche Unterwasserlandschaft geschaffen, die sich aus mehreren (Teil-)Ebenen in dreidimensionaler Anordnung zusammensetzt (Abbildung 98). Diese Unterwasserkulisse wurde stabil in Aluminium konstruiert, damit die Geometrie auch unter Wasser eine unveränderliche Geometrie aufweist. Auf der Oberfläche wurden kodierte (wasserfeste) Zielmarken dauerhaft angebracht, die automatisch in PHIDIAS gemessen werden können. Die exakte Position sowie Dichte der Zielmarken spielt nicht die entscheidende Rolle; wichtig ist, dass die Teilebenen der Unterwasserkulisse über die Oberflächenpunkte sicher definiert und bestimmbar sind. Die Einmessung der Zielmarken erfolgte geodätisch-photogrammetrisch mit einer externen Vollformatkamera (D800) anhand eines dichten Bildverbandes an der Luft, wobei zusätzlich insgesamt 4 Streckenstäbe am Objekt angebracht wurden. Diese Strecken für die Definition des Maßstabes im photogrammetrischen Bildverband wurden im Messlabor des Geodätischen Instituts auf der Interferometerbahn mit übergeordneter Genauigkeit ermittelt. Die Koordinaten der Passpunkte konnten mit einer Genauigkeit von besser als 0,01 mm in alle Koordinatenrichtungen bestimmt werden.

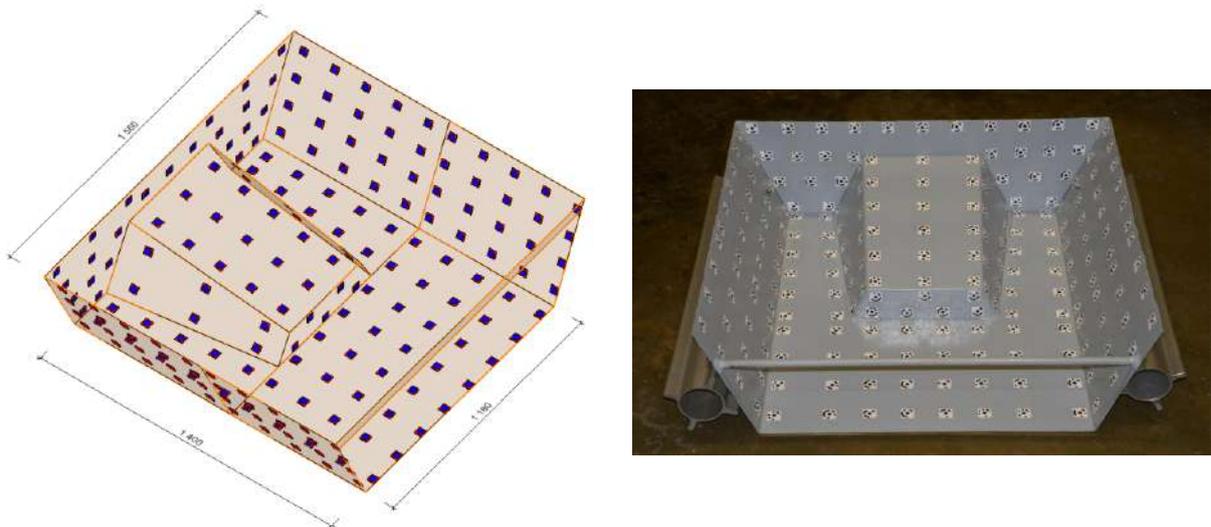


Abbildung 98: Unterwasserkulisse mit Passpunkten (Dimensionen in Millimeter)

Mathematische Kalibriermodelle

Für die Kalibrierung befinden sich die Kalibrierkulissee und das Kamera-Laserlinien-System unter Wasser (Abbildung 99). Der Laser erzeugt kontinuierlich auf dem Kulissenboden die grüne Linie, die – zusammen mit den Passpunkten – von den Kamerabildern erfasst wird. Eine Aufnahmeserie sollte aus mindestens 10 bis 20 Aufnahmen für redundante Kalibrierberechnungen bestehen, wozu das Kamera-Laserlinien-System jeweils gegenüber der Unterwasserkulisse in der Position verändert werden sollte.

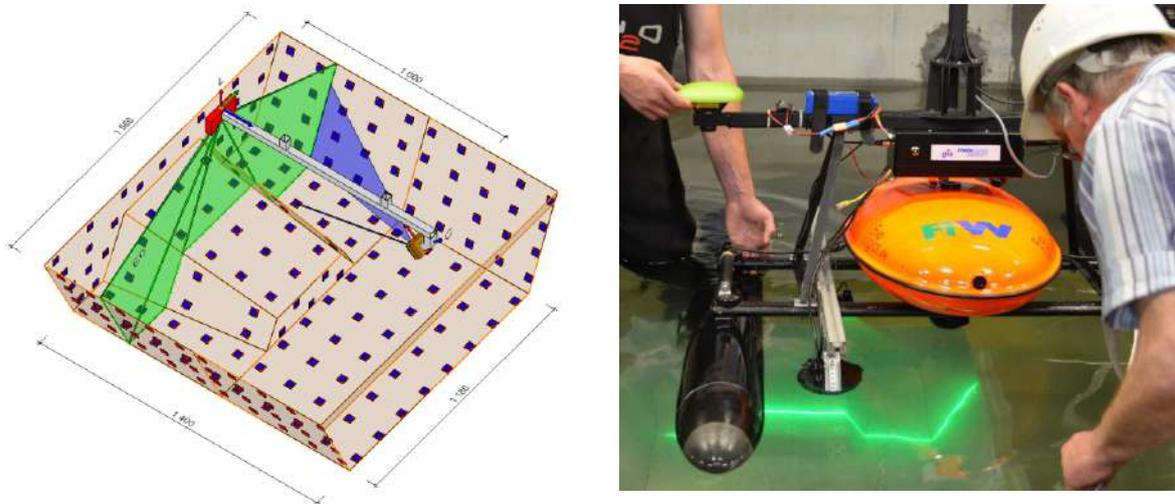


Abbildung 99: Erfassung von Laserlinie und Passpunkten mit der Unterwasserkamera

Das für das Projekt entwickelte Kalibriermodell kombiniert die klassische Punktphotogrammetrie mit der Linienphotogrammetrie basierend auf Geraden. Hierbei müssen wir zwischen der intrinsischen und extrinsischen Kalibrierung unterscheiden.

Intrinsische Kalibrierung

Die Pose der Kamera (bzw. von S_U) wird hierbei durch gewöhnliche Einzelbildorientierung (photogrammetrischer Rückwärtsschnitt) anhand des dreidimensionalen Passpunktfeldes bestimmt. Das mathematische Modell sind die Kollinearitätsgleichungen für Punkte, die sich strukturell folgendermaßen zusammensetzen:

$$\begin{aligned}x_i &= f(c, x_H, y_H, dx, dy, X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa, X_j, Y_j, Z_j) \\y_i &= f(c, x_H, y_H, dx, dy, X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa, X_j, Y_j, Z_j)\end{aligned}\quad (1)$$

Die Bildkoordinaten (x,y) werden hierbei ausgedrückt als Funktion der Parametergruppen

- Kameradaten (Innere Orientierung): $c, x_H, y_H, dx, dy,$
- Daten der Äußeren Orientierung (Kamerapose): $X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa,$
- Passpunktkoordinaten: $X_j, Y_j, Z_j.$

Die primären Unbekannten bzw. Zielgrößen sind die (rot markierten) Daten der Äußeren Orientierung. Wenn die Anzahl der messbaren Passpunkte hoch genug ist, kann auch simultan die Innere Orientierung (Kameradaten) bestimmt werden; ansonsten muss diese Berechnung in einer gesonderten Kamerakalibrierung außerhalb erfolgen.

Für die (geraden) Linien im Bild- und Objektraum gelten zu Gl. (1) analoge Kollinearitätsgleichungen der Linienphotogrammetrie:

$$\begin{aligned}a_i &= f(c, x_H, y_H, dx, dy, X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa, \alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j) \\b_i &= f(c, x_H, y_H, dx, dy, X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa, \alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j)\end{aligned}\quad (2)$$

Hierin sind im Unterschied zu den punktbasierten Gleichungen:

- a_i, b_i : Parameter der 2D-Bildgeraden g_1 bis g_7
- $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j$: Parameter der 3D-Objektgeraden G_1 bis G_7

Damit werden jeweils redundanzfreie Parametrisierungen der Bild- und Objektgeraden benutzt. Wegen der gleichartigen Struktur der Gleichungen können beide Beobachtungsarten unmittelbar simultan im Ausgleichungsmodell der Einzelbildorientierung verwendet werden.

Für die intrinsische Kalibrierung des Kamera-Laserlinien-Messsystems erfolgte die Verwertung der Linienmessungen auf folgende Art:

In der Einzelausgleichung wurden die Objektgeradenparameter – neben den Parametern der Kamerapose – als Unbekannte behandelt:

$$\begin{aligned}a_i &= f(c, x_H, y_H, dx, dy, X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa, \alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j) \\b_i &= f(c, x_H, y_H, dx, dy, X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa, \alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j)\end{aligned}\quad (3)$$

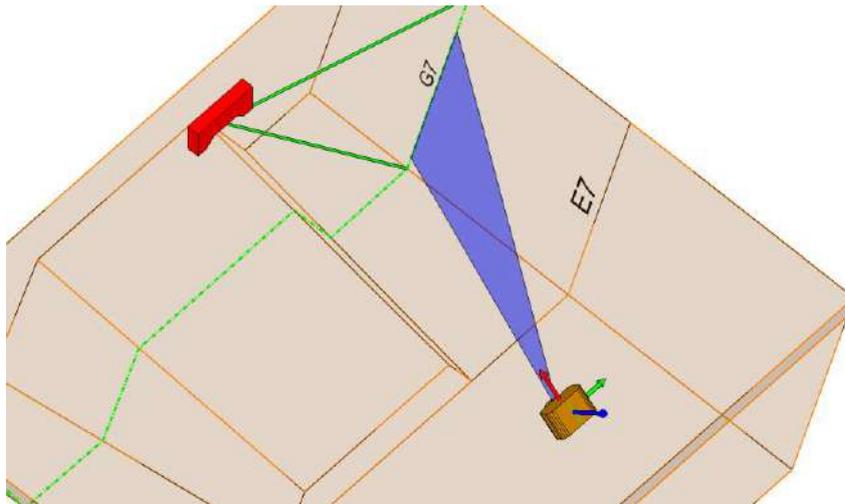


Abbildung 100: Vorwärtsschnitt von Linienbeobachtungen für die intrinsische Kalibrierung

Damit das Ausgleichungssystem nicht singulär ist, muss die Bedingung eingeführt werden, dass jede Objektgerade (G1 bis G7) durch den Vorwärtsschnitt der projizierenden „Bildstrahlenebene“ mit der entsprechenden Kulissenebene (E1 bis E7) entsteht (Abbildung 100 zeigt die Situation beispielhaft für G7). Die Objektgerade muss also in der jeweiligen Kulissenebene liegen. Die Bedingungsgleichung für E7 mit den Ebenenparametern A, B, C, D lautet beispielsweise:

$$0 = A_{E7} \cdot x_j + B_{E7} \cdot y_j + C_{E7} \cdot z_j + D_{E7} \quad (4)$$

In Gl. (4) sind die kartesischen Koordinaten noch jeweils als Funktion der unbekannteren Geradenparameter auszudrücken, also $x_j = f(\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j)$, $y_j = f(\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j)$ und $z_j = f(\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j)$.

Außerdem definieren die 7 Einzelgeraden, die der Laser auf dem Kulissenboden erzeugt, die Laserebene E0 (Abb. 5.5), d.h. aus den 3D-Geraden können Normale und Lage von E0 abgeleitet werden. In dem Ausgleichungsmodell wird also als weitere Bedingung formuliert, dass sich die Objektgeraden allesamt in der gleichen Laserebene E0 befinden:

$$0 = A_{E0} \cdot x_j + B_{E0} \cdot y_j + C_{E0} \cdot z_j + D_{E0} \quad (5)$$

Im Unterschied zu Gleichung (4) sind die Ebenenparameter A_{E0} bis D_{E0} hier auch Unbekannte. Das Ausgleichungssystem wird also gebildet aus den Beobachtungsgleichungen (1) und (2) sowie den Gleichungen (4) und (5) als Bedingungen. Die für die Kalibrierung relevanten Ergebnisse der Ausgleichung sind die Äußere Orientierung (Pose) der Kamera ($X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa$) und die Position der Laserebene E0 ($A_{E0}, B_{E0}, C_{E0}, D_{E0}$) – beides jeweils zum Zeitpunkt einer Aufnahme in der Unterwasserkulisse und zunächst innerhalb des Passpunktkoordinatensystems.

tems. Dadurch ist die gegenseitige Lage von Kamera- und Laserliniensystem (S_U und S_L) zueinander bestimmt (intrinsische Kalibrierung). Für eine Kalibrierungsberechnung genügt im Prinzip jeweils eine Aufnahme. Durch Mehrfachdurchführung anhand von Wiederholungsaufnahmen und anschließende Mittelbildung kann die Genauigkeit der intrinsischen Kalibrierung gesteigert werden (zahlenmäßige Ergebnisse siehe nächster Abschnitt).

Extrinsische Kalibrierung

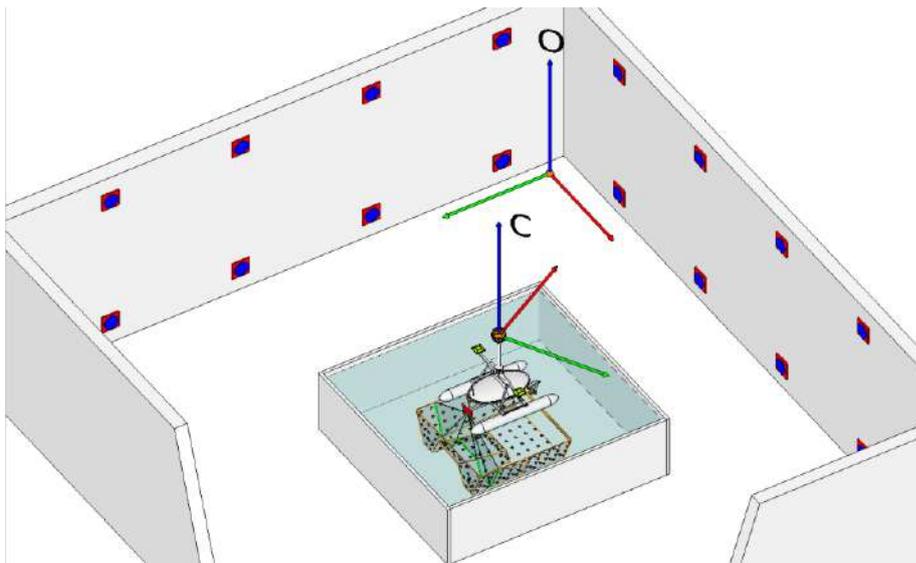


Abbildung 101: Extrinsische Kalibrierung

Für die globale Georeferenzierung der bathymetrischen Messdaten des Kamera-Laserlinien-Messsystems muss die transformatorische Verbindung zum Überwasser-Mapping-System hergestellt werden. Dies gelingt am einfachsten, indem man die Unterwasser-Kalibrierenaufnahmen zusammen mit der Überwasser-Mapping-Plattform erstellt, die parallel eine Positionsbestimmung über Wasser durchführt. Innerhalb von Gebäuden erfolgt die Positionsbestimmung anhand der Panoramakamera somit in einem (Überwasser-)Passpunktsystem.

Wenn dann das Passpunktfeld der Unterwasserkulisse (Abbildung 101) in dem gleichen Koordinatensystem wie das (Überwasser-)Passpunktsystem koordiniert ist (was durch tachymetrische Einmessung einfach zu realisieren ist und im Projekt so durchgeführt wurde), bestimmt man bei der intrinsischen Kalibrierung die Kamerapose unmittelbar in diesem System. Demzufolge hat man implizit auch die extrinsische Kalibrierung bewerkstelligt, denn die relative Lage von S_F gegenüber S_C kann damit über verkettete Transformationen berechnet werden.

Durchführung der Kalibrierung und Ergebnisse

Für die praktische Durchführung der Kalibrierungsaufnahmen konnte die Versuchsrinne des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) vorteilhaft genutzt werden (Abbildung 102), so dass die intrinsische und extrinsische Kalibrierung (s.o) in einem Zuge möglich war. Das Vorbecken der Versuchsrinne wurde für den extrinsischen Teil mit Zielmarken als Passpunkten ausgestattet, die – zusammen mit der Position der auf dem Fußboden platzierten Kalibrierkulisse – mit einem gewöhnlichen Tachymeter geodätisch eingemessen wurden, so dass die Passpunkte für die intrinsische und die Passpunkte für die extrinsische Kalibrierung in einem homogenen Koordinatensystem vorlagen. Das bathymetrische Unterwasser-Messsystem war während der Kalibrierfahrt unter dem RiverBoat montiert, das, ausgestattet mit dem Überwasser-Mapping-System, in Kreuzbahnen im mit Wasser gefüllten Vorbecken mit der Hand bewegt wurde. Beide Kamerasysteme zeichneten dann zeitsynchron kontinuierliche Aufnahmen auf.



Abbildung 102: Vorbecken in der Versuchsrinne des IWW mit der für die Kalibrierfahrt platzierten Kalibrierkulisse

Der Laser erzeugte auf dem Kulissenboden eine Bodenlinie, die sich aus bis zu 7 geraden Linienstücken G1 bis G7 zusammensetzte (Abbildung 103). In jeder Aufnahme werden diese Linien – neben den Passpunkten – als Bildlinien (g1 bis g7) abgebildet, wovon mindestens 4 Linien in der Regel gut brauchbar sein sollten. Die Messung der Punkte und Linien erfolgte mit dem photogrammetrischen Auswertesystem PHIDIAS automatisch mit gleichzeitiger Identifizierung der kodierten Punkte. Die Linien konnten teilautomatisch gemessen werden.

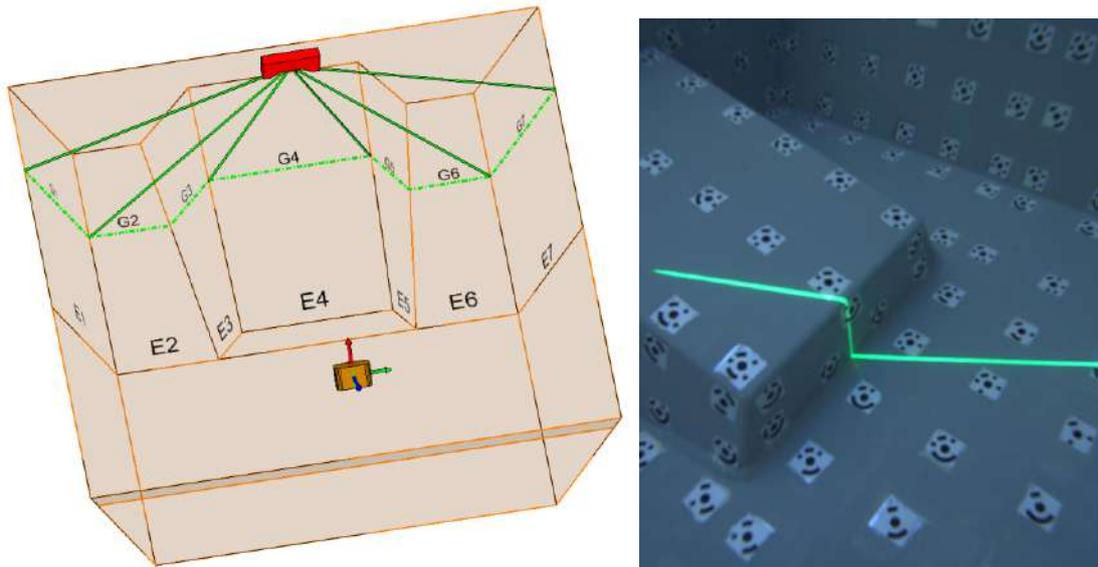


Abbildung 103: Objektlinien G1 bis G7 auf den Teilebenen der Unterwasserkulisse

Die Kalibrierungsberechnung wurde anhand von 31 Bildern durchgeführt, wobei jedes Bild einen Kalibrierungsdatensatz liefert. Bei der intrinsischen Kalibrierung wird – wie oben beschrieben – die relative Lage der Laserlinienebene im Kamerakoordinatensystem S_U der Unterwasserkamera bestimmt. Wenn man die Ebene E0 beispielsweise in Hessescher Normalform ($\underline{n} \cdot \underline{x} + d = 0$) darstellt, ergab sich als Mittel der 31 Messungen:

$$\underline{n} = \begin{pmatrix} 0,719315 \\ -0,082589 \\ -0,689753 \end{pmatrix} \quad d = 264,026 \text{ [mm]}$$

Die Standardabweichung der Ebenenparameter betrug 0,9 mm für die Lage und $0,13^\circ$ für die Richtung des Ebenennormalenvektors \underline{n} , was für den Verwendungszweck mehr als ausreichend ist und das hohe Potenzial des Messprinzips aufzeigt.

Für die extrinsische Kalibrierung, die Bestimmung der Position der Unterwasserkamera relativ zur Panoramakamera, wurden die Aufnahmen des Überwasser-Mappingsystems gemeinsam mit den Aufnahmen der Unterwasserkamera ausgewertet. Zunächst mussten die Passpunktkoordinatensysteme für beide Kameras verbunden werden (Abbildung 104). Dazu wurden mit dem Tachymeter Leica MS50 die Passpunkte über Wasser zusammen mit 10 Punkten auf der Kalibrierkulisse aufgenommen. Mit einer räumlichen 7-Parameter-Transformation wurden anhand der identischen Punkte in beiden Systemen alle Punkte der Kalibrierkulisse in das Überwasser-Passpunktsystem überführt.

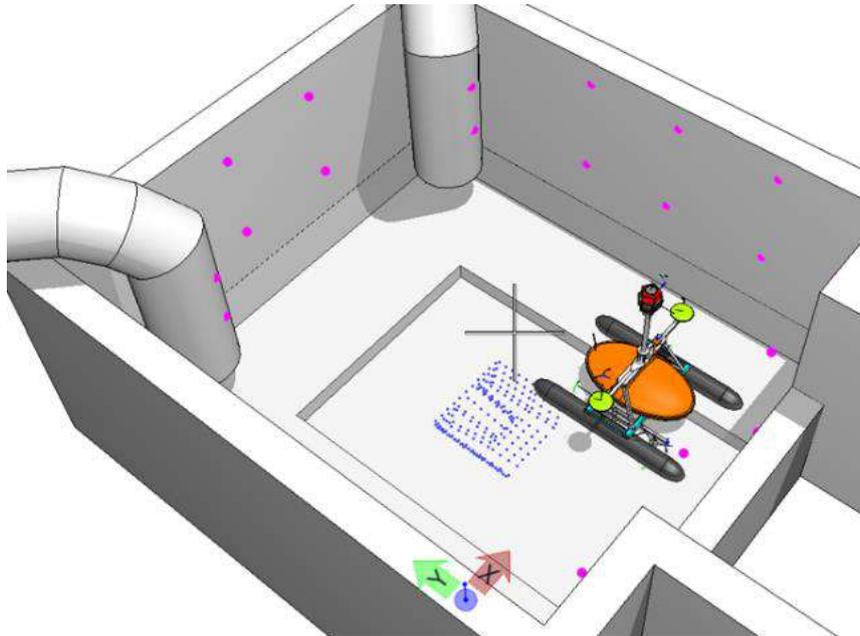


Abbildung 104: Passpunkte über (violett) und unter Wasser (blau) im einheitlichen Koordinatensystem

In allen Bildern wurden mit der Software PHIDIAS die codierten Zielmarken zum Teil vollautomatisch gemessen (Abbildung 105). Die Messung der Zielmarken war in den Unterwasseraufnahmen in vielen Fällen aufgrund der unzureichenden Beleuchtung nicht automatisch möglich und musste manuell vervollständigt werden.

Die Orientierungsparameter von 333 Panoramaaufnahmen und 76 Unterwasseraufnahmen konnten über einen räumlichen Rückwärtsschnitt bestimmt werden (siehe Kapitel 5.5.4 Mathematische Kalibriermodelle). Der Grund für die deutlich geringere Anzahl verwertbarer Unterwasseraufnahmen ist die schwache Beleuchtung der Versuchshalle. Die Belichtungszeit unter Wasser war länger als über Wasser und aufgrund der Bewegungsunschärfe waren einige Aufnahmen nicht verwertbar.

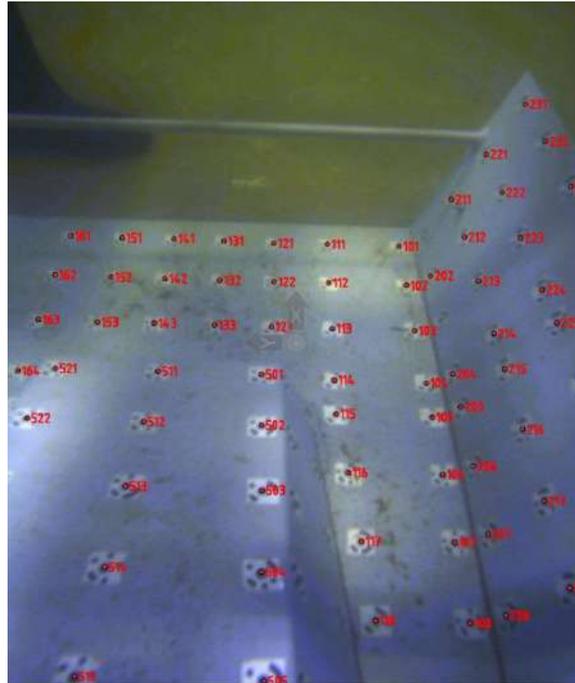


Abbildung 105: Gemessene Passpunkte in einem Bild der Unterwasserkamera

Die Aufnahmen über und unter Wasser wurden zwar mit der gleichen Frequenz 1 Hz aufgenommen, die Auslösung war jedoch nicht synchron. Deshalb wurde über den Zeitstempel der Unterwasseraufnahme die korrespondierende Orientierung der Panoramabilder zwischen zwei Aufnahmen interpoliert.

Die sechs Orientierungsparameter (Verschiebung dx , dy , dz und Rotationswinkel Ω , Φ , κ) wurden an 54 Positionen bestimmt und ein Mittelwert berechnet. Der Mittelwert der Eulerschen Drehwinkel Ω , Φ und κ konnte nicht direkt ermittelt werden, weil die Drehwinkel sich auf mitgedrehte Achsen beziehen und die Parameter voneinander abhängig sind. Deshalb wurden die Rotationsparameter in Quaternionen umgewandelt, gemittelt und anschließend wieder in Eulerwinkel transformiert (Tabelle 12).

Tabelle 12: Ergebnis der relativen Orientierung vom Bildkoordinatensystem der Panoramakamera ins Bildkoordinatensystem der Unterwasserkamera

Parameter	Mittelwert	Standardabweichung
Verschiebung dX	255,0 mm	4,5 mm
Verschiebung dY	-256,6 mm	4,3 mm
Verschiebung dZ	-1184,1 mm	3,1 mm
Quaternion q0	-0,036677	0,0042
Quaternion q1	0,363855	0,0018
Quaternion q2	0,004055	0,0025
Quaternion q3	0,930710	0,0007
Rotation ω	197,04 gon	
Rotation φ	152,66 gon	
Rotation κ	6,17 gon	

Ergänzend zu den Kalibrierenaufnahmen wurde zur Kontrolle der Parameter und zur Überprüfung der Messgenauigkeit ein Teil des Bodens der Rinne aufgenommen, an dem sich eine (Beton-)Stufe befand. Mit Bildverarbeitungsmethoden wurden aus 89 Bildern zunächst die Bildkoordinaten der projizierten Laserline vollautomatisch bestimmt, indem in jeder Spalte des Digitalbildes der Algorithmus die Position mit der maximalen Intensität suchte (Abbildung 106).

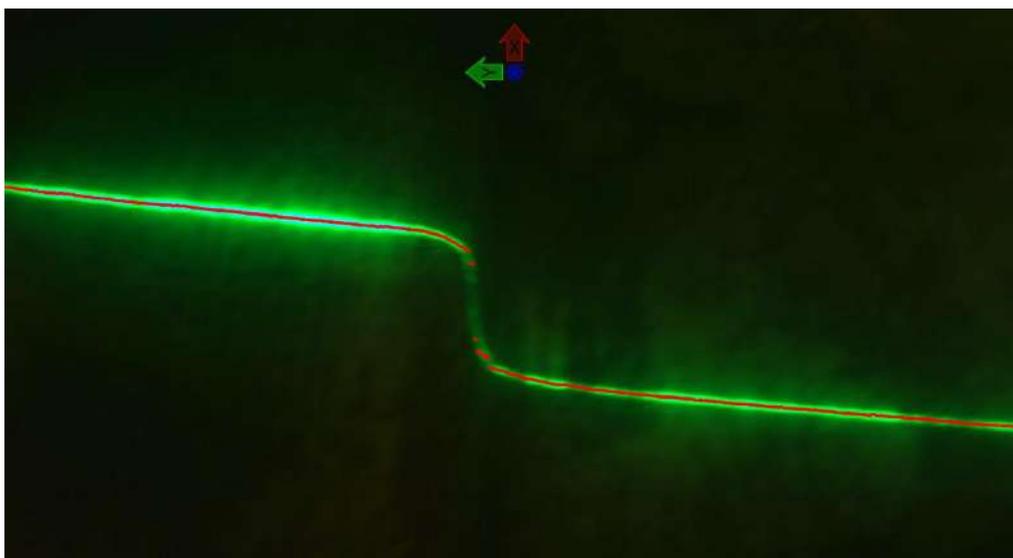


Abbildung 106: Automatisch gemessene Laserprofilpunkte (rot)

Um von den Bildkoordinaten zu absoluten 3D-Koordinaten zu gelangen, waren mehrere Schritte nötig.

1. Transformation der Pixelkoordinaten in Bildkoordinaten und Korrektur der Objektivverzerrung
2. Projektion des 2D-Bildpunktes und Schnitt mit der festgelegten Laserebene
3. Interpolation der Pose der Panoramakamera für den Zeitstempel der Unterwasseraufnahme
4. Berechnung der absoluten Bildorientierung durch Transformation der Bildorientierung der Panoramakamera mit der relativen Orientierung aus der Kalibrierung (Tabelle 12)
5. Transformation des Profilpunktes aus Schritt 2 (Vektor vom Projektionszentrum zum Schnittpunkt mit der Laserebene) vom Kamerasystem ins übergeordnete Koordinatensystem unter Verwendung der in Schritt 4 bestimmten absoluten Orientierungsparameter

Insgesamt wurden aus 89 Bildern 176507 Profilpunkte berechnet. Zum Vergleich der Höhenwerte wurde als Referenzfläche die Vermessung mit dem Tachymeter Leica MS50 herangezogen und einem Soll-Ist-Vergleich unterzogen. Mit der Scanfunktion des Instrumentes, wurden 351727 Punkte aufgenommen und anschließend zu einem Oberflächenmodell (Dreiecksflächennetz) verbunden (Abbildung 107). Die Standardabweichung der Koordinaten der Referenzfläche betrug ca. 1 mm.

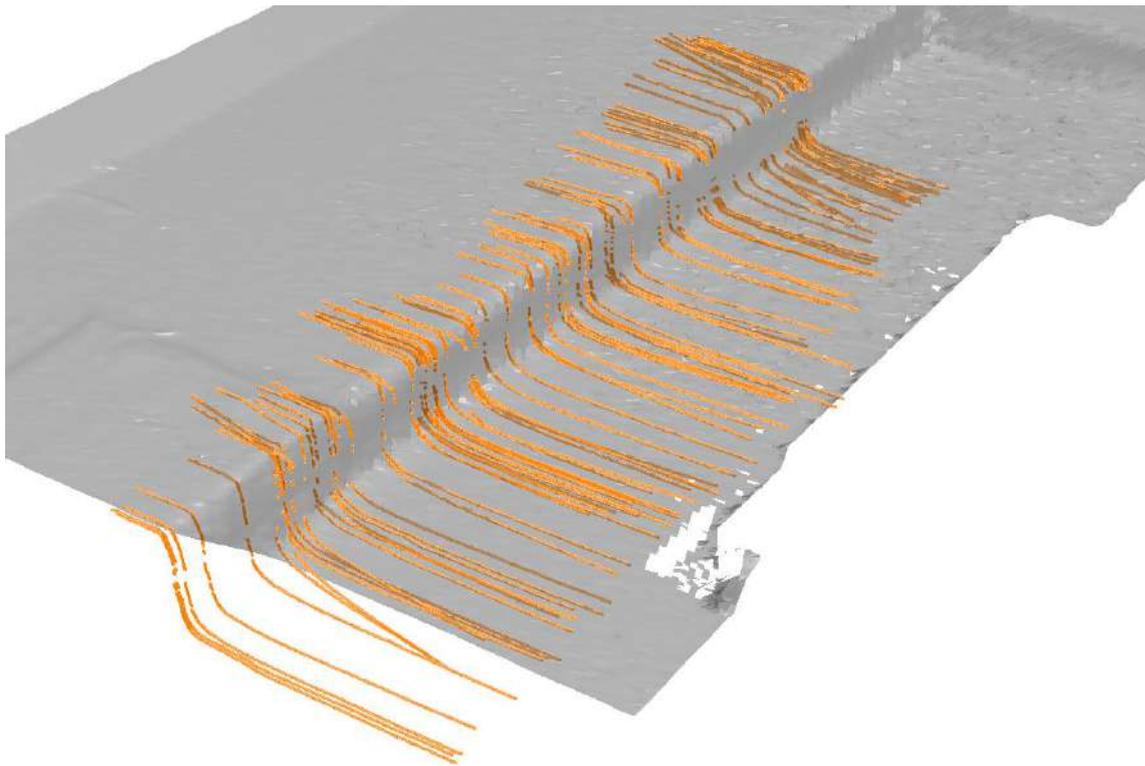


Abbildung 107: Vergleich zwischen Laserscan mit Tachymeter (grau) und Laserlinienauswertung (braun)

Der Vergleich der bathymetrischen Laserlinienprofile mit der tachymetrischen Laserscan-Oberfläche führte zu dem Ergebnis, dass die senkrechten (absoluten) Abstände der Punkte zur Referenzfläche im Mittel 2.5 mm (quadratisches Mittel, RMS 3.8 mm) betragen. Das Histogramm in Abbildung 108 zeigte dabei eine unauffällige Verteilung ohne systematische Abweichungen. Diese in der Versuchsrinne erzielten, hohen Höhengenaugkeiten von ca. 2-4 mm wird man wohl in der Praxis nur selten erreichen, da die Standardabweichung der Höhenwerte nicht nur von der relativ gemessenen Tiefe, sondern im Wesentlichen auch von der Genauigkeit der Bootsposition abhängt. Im Praxiseinsatz kann von ca. 1 cm Genauigkeit ausgegangen werden.

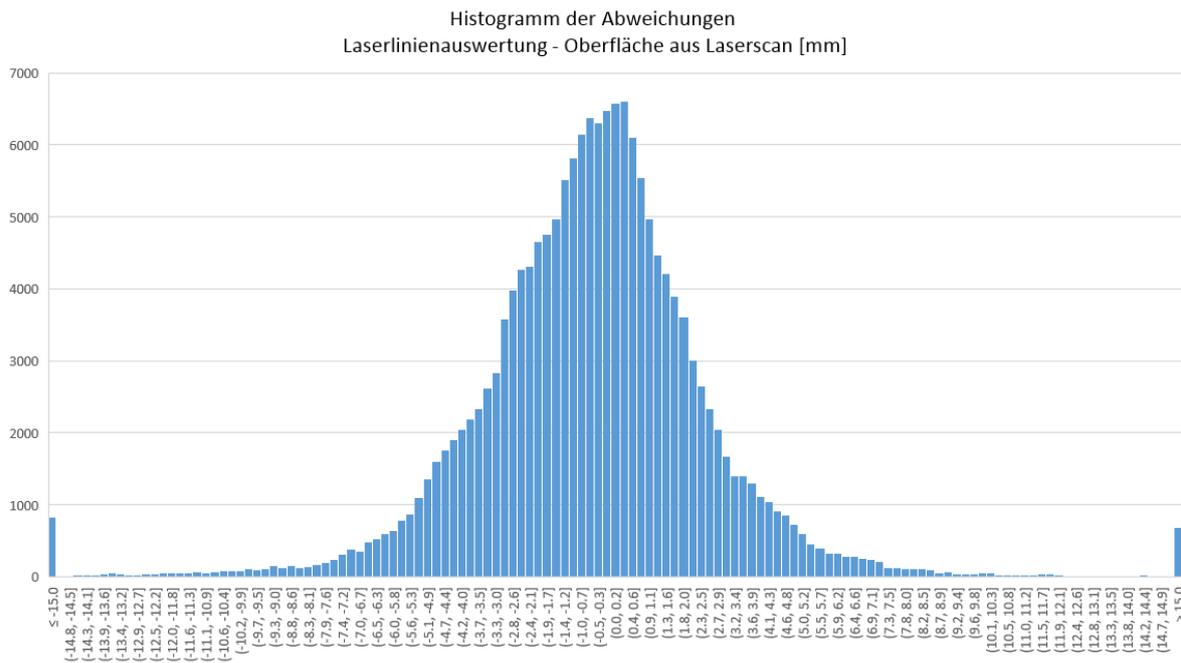


Abbildung 108: Histogramm der räumlichen Abstände zwischen Punkten aus der Laserlinienauswertung zur Oberfläche aus der Laserscanaufnahme

5.7 Datenfusion zur Positionsschätzung

Wenn GNSS in kleinen und mittleren Binnengewässern oder in Flüssen eingesetzt werden, dämpfen vorstehende Vegetation an den Gewässerufeln oder Bauwerke (z.B. Brücken) die Satellitensignale. Im Ergebnis ist dann in derartigen Fällen keine oder eine nur sehr eingeschränkte Positionsermittlung des Bootes mit GNSS erfolgen, wodurch neben der autonomen Navigation des Bootes auch die Georeferenzierung der erfassten Sensordaten unmöglich wird.

Trägheitsnavigationssysteme (Inertiale Navigationssysteme, INS) dagegen funktionieren prinzipiell in jeder Umgebung, da diese als autonome Einheiten von keiner externen Informationsquelle abhängig sind. Die Trägheitsmesseinheit ist die Hauptkomponente des INS und besteht üblicherweise aus einem Dreiachsen-Beschleunigungsmesser sowie Dreiachsen-Gyroskop, welche die Beschleunigungen bzw. Winkelgeschwindigkeiten des Fahrzeugs messen. Die Messungen des INS sind jedoch fehlerbehaftet aufgrund des Vorhandenseins von Zufallsabweichungen (Noise) und systematischen Einflüssen (Bias), die sich kumulieren und schnell zu großen Positionierungsfehlern führen können. Diese Fehler können durch den Einsatz von Kalibrierungsmethoden grundsätzlich reduziert werden. Die genauesten Kalibrierungsmethoden werden in Laboratorien durchgeführt und erfordern sehr präzise Instrumente. Einige systematische Einflüsse ändern sich jedoch von Einschaltung zu Einschaltung des INS und müssen daher vor jeder Mission geschätzt werden. Im Rahmen des Projektes wurden zwei INS, Xsens MTi-300 AHRS und Novatel SPAN-CPT7, untersucht. Das Xsens MTi-300 AHRS-INS ist ein preiswertes und beliebtes Massenmarktsystem, welches in einer Vielzahl von Bereichen eingesetzt wird. Novatel SPAN-CPT7 hingegen ist ein qualitativ hochwertiges System aus dem mittleren Preissegment. Später wurde ein erweiterter Kalman-Filter (EKF) speziell für das Multisensor-RiverBoat entwickelt. Zur Verschmelzung von INS- und GNSS-Messungen wird eine lose gekoppelte Integrationstechnik verwendet. Es wurden mehrere Tests durchgeführt, um den implementierten Fusionsfilter (Kalman Filter) zu evaluieren. Die Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen einer kommerziellen Plattform von NovaTel und geodätischen Tachymetertracking verglichen.

Instrumenten-Koordinatensystem

Navigationssensoren verfügen in der Regel immer über ein eigenes lokales Instrumentenkoordinatensystem, in welchem die Messwerte räumlich referenziert werden. Je nach Hersteller und INS-Typ variieren diese jedoch bezüglich des Ursprungs, der Drehrichtung und Achsausrichtung. Die Abbildung 109 (links) zeigt das rechtshändige Instrumentenkoordinatensystem der Plattform Xsens MTi-300; die z-Achse steht senkrecht zur Aluminium-Grundplatte (am Rand), die y-Achse steht orthogonal zur z-Achse und zeigt nach links und die verbleibende x-Achse steht senkrecht zu den anderen 2-Achsen und zeigt zur Vorderseite der INS. Die Abbildung 109 (rechts) zeigt das Instrumentenkoordinatensystem der NovaTel SPAN-CPT7-Bedie-

neinheit, wobei die z-Achse senkrecht zum Gehäuse der Bedieneinheit liegt, die y-Achse orthogonal zur z-Achse sowie die verbleibende x-Achse senkrecht zur z- und y-Achse zeigen und sich somit ein rechtshändiges orthogonales Bezugskordinatensystem ergibt.



Abbildung 109: Der Instrumentenrahmen Xsens MTi-300 AHRS (links) und NovaTel SPAN CPT7 (rechts)

Inertial Navigation System

Ein INS besteht aus einem Computer mit entsprechender Hard- und Software, der die Berechnungen durchführt, und einer inertialen Messeinheit mit Beschleunigungsmessern, Gyroskopen sowie der Plattform, auf der sie montiert sind. Basierend auf den Newtonschen Bewegungsgesetzen liefert das INS Position, Lage und Orientierung des Fahrzeugs auf dem das INS montiert ist. Kontinuierlich gesammelte Informationen über Beschleunigung und Winkelgeschwindigkeit sind erforderlich, um diese Navigationsinformationen zu berechnen.

Strapdown Navigation

Aus den Messungen der Beschleunigungsmesser und des Gyroskops kann mit Hilfe der Navigationsalgorithmen die Position und Orientierung eines Objekts relativ zu einem bekannten Startpunkt berechnet werden (Woodman, O. J. 2007). Abbildung 110 veranschaulicht dieses Verfahren. Für gute Integrationsergebnisse müssen die Anfangsbedingungen genau bestimmt werden, was bereits ein anspruchsvolles Problem darstellt. Die oben bereits beschriebenen zufälligen und insbesondere systematischen Einflüsse in den Daten führen zu Abweichungen in der berechneten Position und Orientierung (Beispiel siehe Abbildung 111). Bei der Verwendung von low-cost Inertialsensoren, die in der Regel als MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)-Sensoren ausgeprägt sind, ist insbesondere die Integrationsdrift relativ groß. Daher sind die Orientierungsschätzungen und insbesondere die Positionsschätzungen nur für einen kurzen Zeitraum ausreichend genau und zuverlässig.

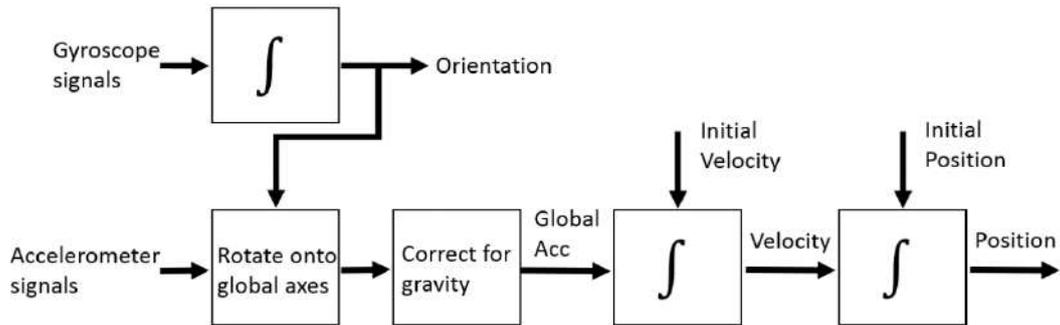


Abbildung 110: Strapdown-Trägheitsnavigationsalgorithmus zur Berechnung von Position und Orientierung aus Gyroskop- und Accelerometer-Signalen. Woodman, O. J. 2007

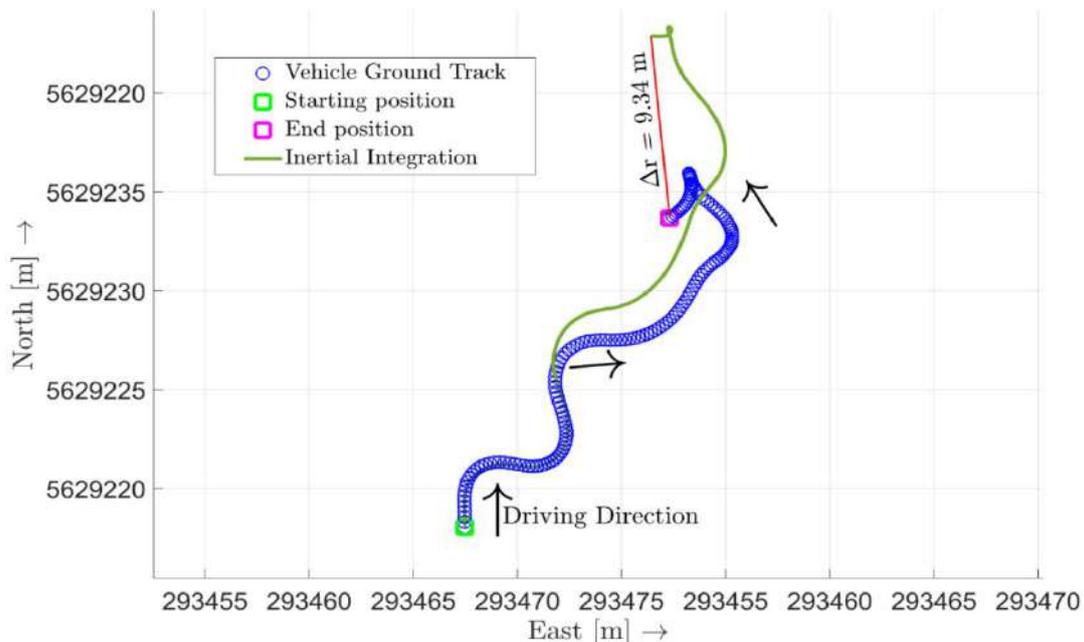


Abbildung 111: Plot, der die durch Sensorfehler verursachte Positionsdrift zeigt

INS-Fehlerquellen

Hauptfehlerquellen des INS sind die instrumentellen Fehler der Inertialsensoren, die Fehler des Gravitationsmodells, numerische Berechnungsfehler, Fehler des Navigationsmodells und Initialisierungsfehler einschließlich der Anfangsposition, Geschwindigkeit und Ausrichtung. Von diesen Fehlerquellen sind die instrumentellen Fehler die bedeutendsten und dominantesten für die Navigationsgenauigkeit. Bei den INS-Sensorfehlern handelt es sich um deterministische (konstante) und nicht-deterministische (stochastische) Fehler. Bei den deterministischen Fehlern handelt es sich in der Regel um werkseitig modellierte Fehlerparameter, die

vom Hersteller kompensiert werden. Häufige nicht-deterministische Fehler sind kurzfristige Instabilitäten der Sensoren (Rauschen), Angular Random Walk (ARW), Velocity Random Walk (VRW), zusätzlich Driften und Änderungen des Skalierungsfaktors. Die Schätzungen der deterministischen Fehler können durch die Verwendung geeigneter stochastischer Modelle für die nicht-deterministischen Fehler verbessert werden. Bei statischen Analysen (INS unbewegt) wurden im Rahmen des Projektes die Allan-Varianz und die Welch's Power Spectral Density (PSD)-Methode angewandt, um die Sensorfehler für jeden Inertialsensor zu quantifizieren. Nach der statischen Analyse wurde eine kinematische Analyse durchgeführt, bei der ein speziell für das RiverBoat konzipiertes Extended Kalman Filter (EKF) implementiert und ausgewertet wurde. Die Allan-Varianz ist eine populäre Technik für die Zeit-Hauptanalyse der Zufallsprozesse, mit dem die Stabilität aufgrund von Rauschprozessen abschätzen und nicht die von systematischen Fehlern oder Unvollkommenheiten wie Frequenzdrift oder Temperatureffekte (Iowa State University, 1998). Die Allan-Varianz wurde für die beiden im Projekt eingesetzten INS bestimmt (Abbildung 112 und Abbildung 113). Die berechneten Steigungen der Allan-Abweichungsfunktionen des Messrauschens sind in der Tabelle 13 aufgeführt.

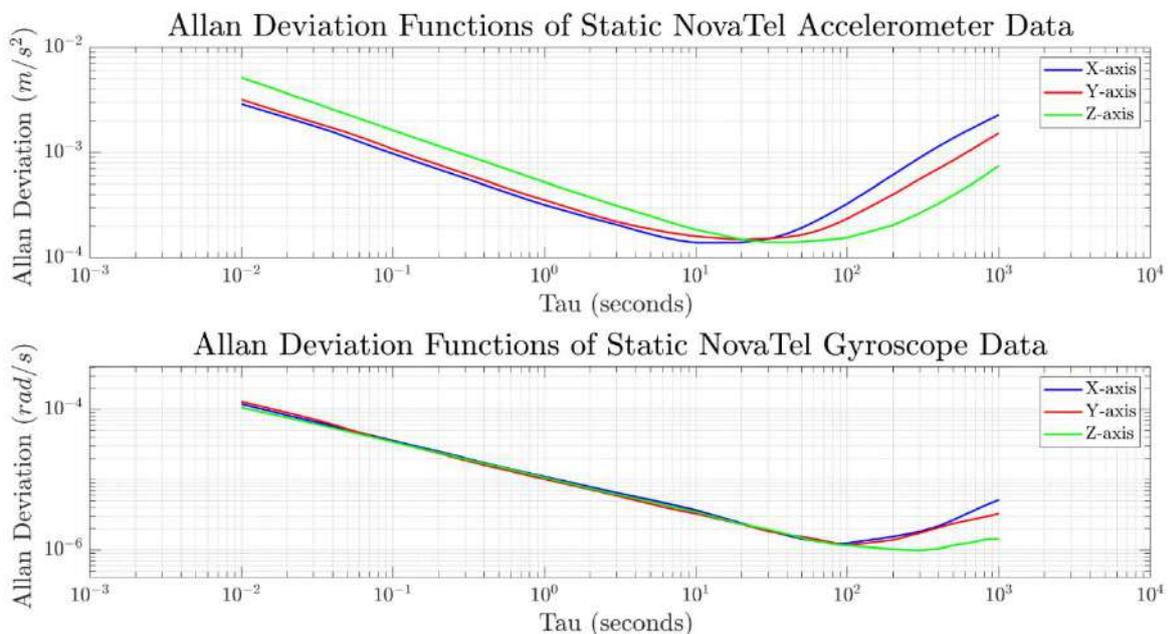


Abbildung 112: Die Allan-Abweichungsdiagramme der statischen Daten von NovaTel-INS-Beschleunigungsmessern und -Gyroskopen

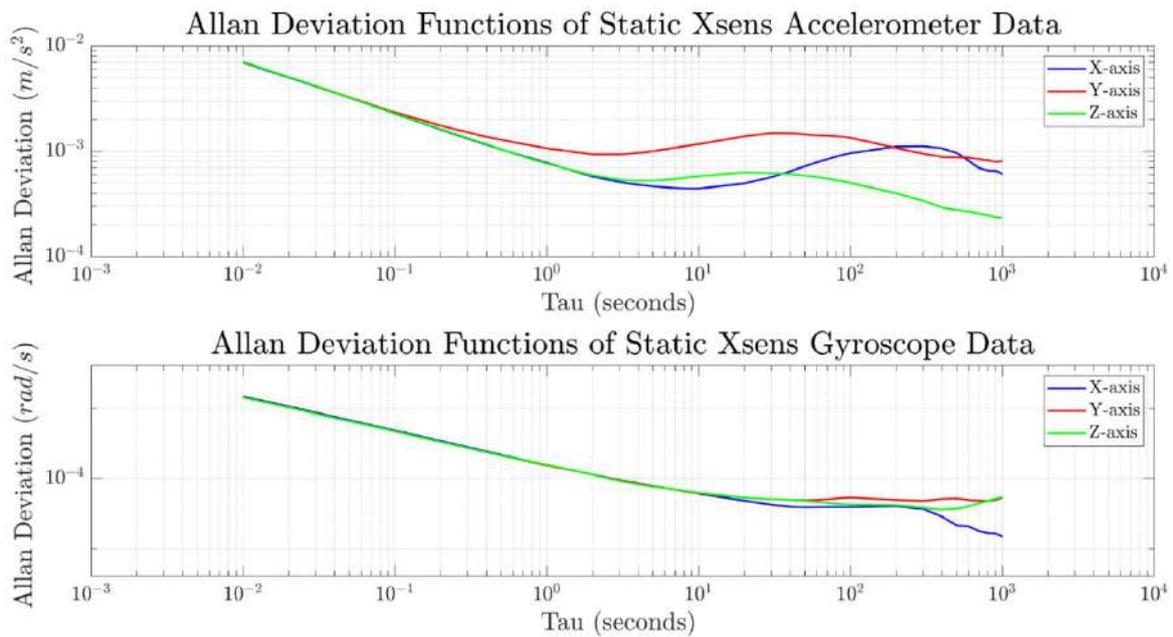


Abbildung 113: Die Allan-Abweichungsdiagramme der statischen Daten von Xsens-INS-Beschleunigungsmessern und -Gyroskopen

Tabelle 13: Messrauschen Allan-Abweichung für das INS Xsens MTi 300

Xsens INS	Random Walk	Dynamic Bias
X-Axis Accelerometer	7.754e-04 (m/s ²)	4.420e-04 (m/s ² /sqrt(Hz))
Y-Axis Accelerometer	0.0012 (m/s ²)	7.959e-04 (m/s ² /sqrt(Hz))
Z-Axis Accelerometer	7.633e-04 (m/s ²)	2.332e-04 (m/s ² /sqrt(Hz))
NovaTel INS	Random Walk	Dynamic Bias
X-Axis Gyroscope	1.562e-04 (rad/s)	1.487e-05 (rad/s/sqrt(Hz))
Y-Axis Gyroscope	1.543e-04 (rad/s)	4.811e-05 (rad/s/sqrt(Hz))
Z-Axis Gyroscope	1.576e-04 (rad/s)	3.618e-05 (rad/s/sqrt(Hz))

Die Analyse der spektralen Leistungsdichte (Power Spectral Density, PSD) bietet eine weitere Methode zur Beurteilung des Rauschprozesses. Die PSD-Analyse wird häufig im Bereich der Signalanalyse verwendet, um die Leistungsmenge zu bestimmen, die ein Signal bei bestimmten Frequenzen besitzt. Ihre grundlegendste mathematische Form ist als Fourier-Transformation der Autokorrelationsfunktion des zu analysierenden Signals definiert. Die Welch-Methode wurde zur Schätzung des PSD eines Signals verwendet, indem die Fourier-Transformationen von kleinen, überlappenden Segmenten innerhalb des Signals berechnet und gemittelt wurden, um eine Schätzung des PSD des gesamten Signals zu erhalten. Die Abbildung 114 und Abbildung 115 zeigen die PSDs für die untersuchten Inertialmesssysteme. Die berechneten Steigungen der PSDs des Messrauschens sind in Tabelle 14 aufgeführt. Alle Steigungen der

PSDs des Messrauschens sind sehr nahe bei Null, was darauf hinweist, dass die PDSs des Messrauschens im Wesentlichen flach sind.

Tabelle 14: PSD-Steilheitswerte des Messrauschens für Xsens und NovaTel INS

Xsens INS	PSD Steigung
X-Axis Accelerometer	1.5246e-06 (m/ s ²)/ Hz ²
Y-Axis Accelerometer	1.7245e-06 (m/ s ²)/ Hz ²
Z-Axis Accelerometer	2.2728e-06 (m/ s ²)/ Hz ²
X-Axis Gyroscope	5.8310e-08 (deg/sec/√Hz)
Y-Axis Gyroscope	3.1596e-08 (deg/sec/√Hz)
Z-Axis Gyroscope	4.1529e-08 (deg/sec/√Hz)
NovaTel INS	PSD Steigung
X-Axis Accelerometer	1.3069e-07 (m/ s ²)/ Hz ²
Y-Axis Accelerometer	1.5847e-07 (m/ s ²)/ Hz ²
Z-Axis Accelerometer	5.2532e-07 (m/ s ²)/ Hz ²
X-Axis Gyroscope	1.7726e-10 (deg/sec/√Hz)
Y-Axis Gyroscope	1.7677e-10 (deg/sec/√Hz)
Z-Axis Gyroscope	2.1200e-10 (deg/sec/√Hz)

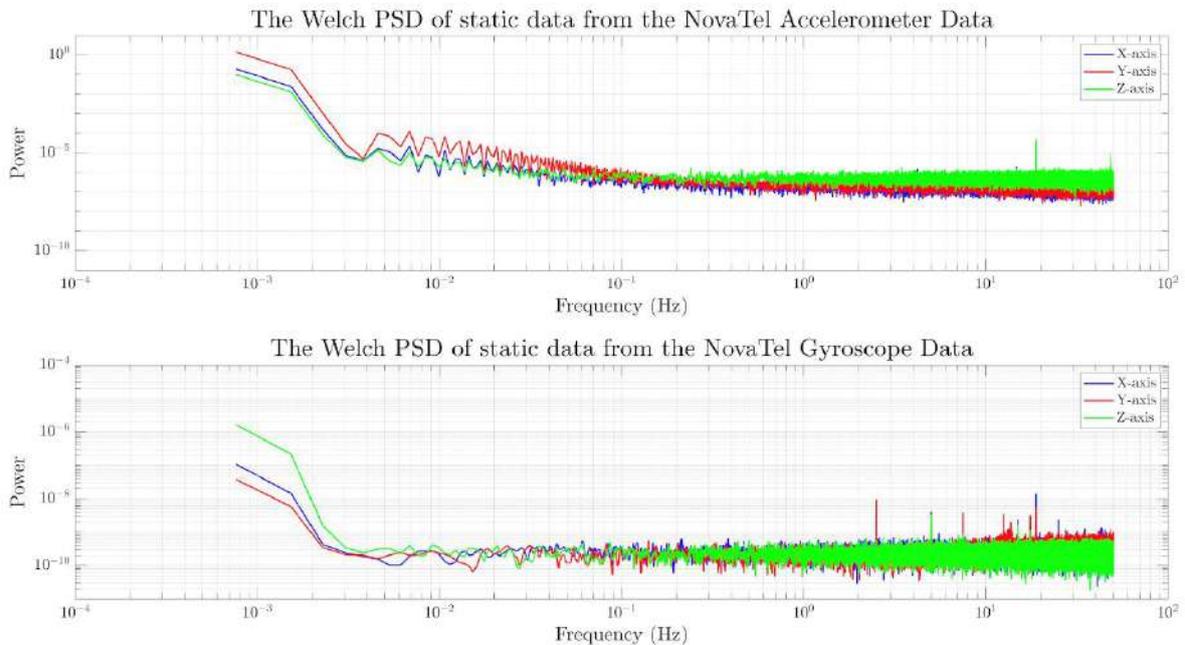


Abbildung 114: Die Welch PSD der statischen Novatel IMU

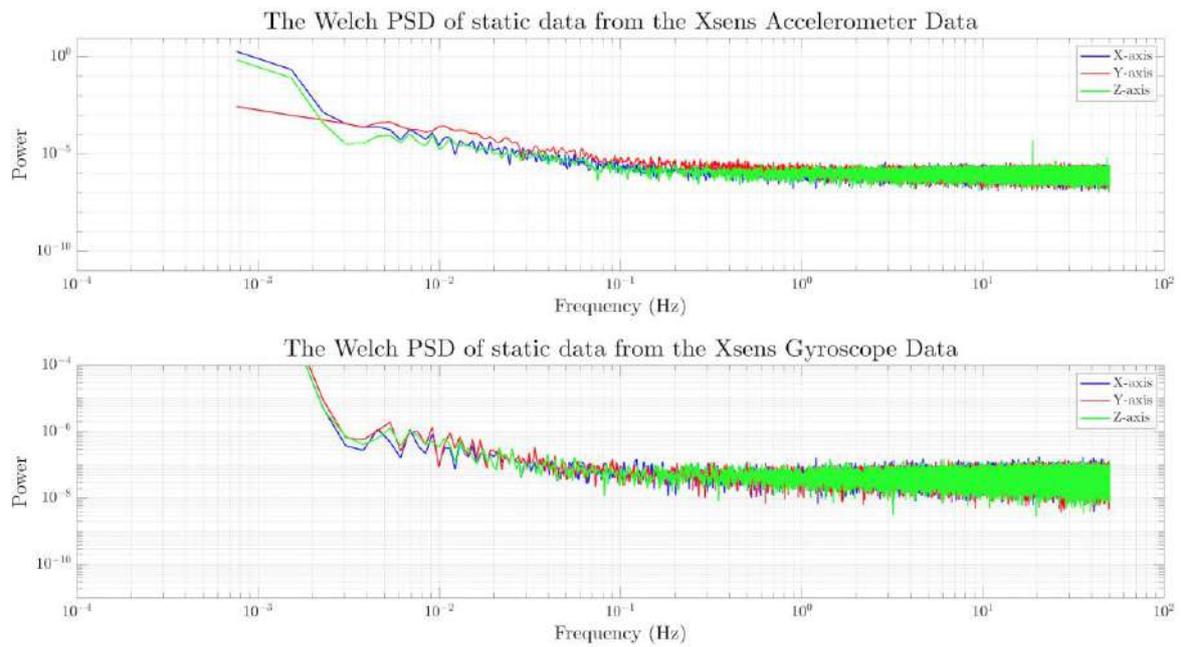


Abbildung 115: Die Welch PSD der statischen Xsens IMU

Implementierung und Auswertung des Erweiterten Kalman-Filters (EKF)

Um die Georeferenzierung des Messbootes und damit der mit dem Boot erfassten Gewässerparameter auch bei GNSS-Signalausfälle zu ermöglichen, wurde eine Sensorfusion von GNSS- und INS-Daten implementiert. Auch wenn einige, insbesondere höherpreisige INS (z.B. NovaTel SPAN CPT7) bereits über eingebettete Sensorfusionsalgorithmen verfügen, wurde dabei eine eigene Implementierung verfolgt. Einerseits ermöglicht dieses Vorgehen auch bei Verwendung von low-cost INS (z.B. Xsens MTi-300 AHRS) eine verbesserte Georeferenzierung, andererseits kann so eine jederzeit erweiterbare Basis geschaffen werden, die in einer späteren Weiterentwicklung beliebig oder erweitert werden kann, um bspw. weitere Sensordaten (z.B. Kameradaten) im Filter zu berücksichtigen, was bei den integrierten „Black-Box-Implementierungen“ unmöglich ist.

Die selbst implementierte Sensorfusion basiert auf einem lose gekoppelten Erweiterten Kalman Filter (EKF) mit 15 Zustandsgrößen (Position (3), Geschwindigkeit (3), Orientierung (3), Beschleunigungsmesser-Bias (3), Gyroskop-Bias (3)) (Abbildung 116) und wurde für den UTM- und ECEF-Koordinatenrahmen realisiert (Abbildung 117) (vgl. Solá J 2017, Groves 2013; Godha S 2006; Weston and Titterton 2004).

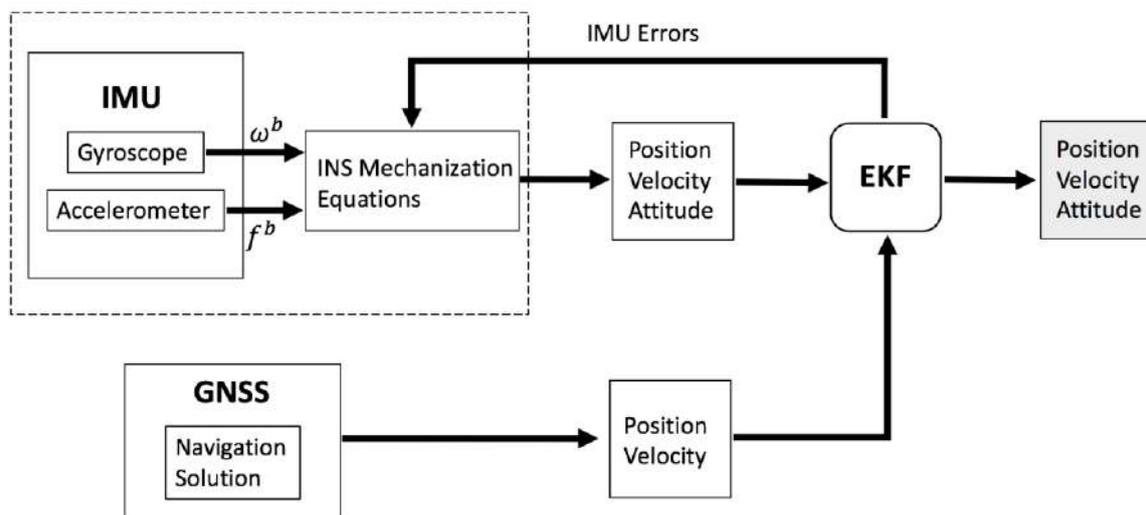


Abbildung 116: Schematischer, lose gekoppelter (LC) Erweiterter Kalman-Filter (EKF) Navigationsalgorithmus für ein INS. Groves 2013

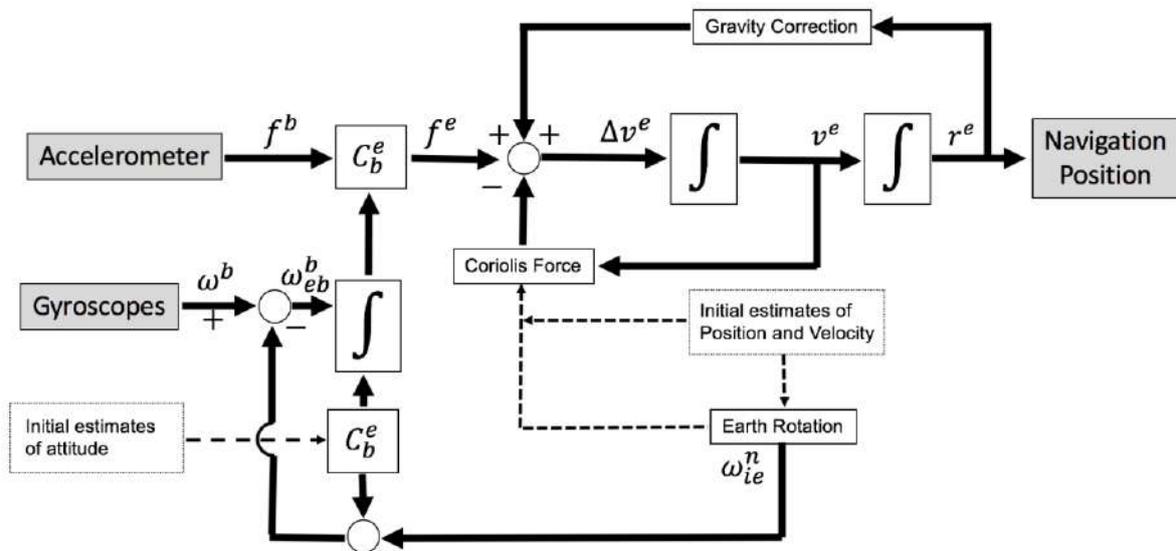


Abbildung 117: Schema der INS ECEF-Rahmenmechanisierung. Groves 2013

In lose gekoppelten Systemen werden die durch das GNSS-Signal abgeleiteten Geschwindigkeiten über einen Navigationskalmanfilter als Aktualisierungen der INS-Schätzungen der Positionsinformationen verwendet. Die Leistungsfähigkeit des Algorithmus wurde unter GNSS-Vollabdeckung und mit GNSS-Ausfällen im Post-Processing bewertet. Berücksichtigung der im Labor ermittelten INS-Sensorfehler und Vergleich der Trägheitsintegrationsversuche des NovaTel INS mit dem Xsens INS. Außerdem bietet das NovaTel INS die eng gekoppelte erweiterte Kalman-Filterlösung. In Anbetracht der oben genannten Vorteile wurde das Novatel INS als Testsensor für die Feldtests ausgewählt. Die Feldtests wurden auf dem Sportplatz der Universität durchgeführt. Abbildung 118 zeigt den mit dualen GNSS-Antennen ausgestatteten Wagen, der an das Novatel-INS SPAN-CPT7 angeschlossen ist. Um eine Leistungsvergleichsanalyse zu ermöglichen, ist eine Referenznavigationslösung erforderlich. Hierzu wurde eine Referenztrajektorie (Ground Truth) durch Tachymetertracking mit der Leica Totalstation ermittelt. Das Prisma wurde über das NovaTel IMS montiert, um die Abweichung eines Hebelarms zu reduzieren.



Abbildung 118: Geräteaufbau für die Testfahrten

Es wurden zwei Tests durchgeführt und die Novatel-INS-Daten, die in NovaTel eingebaute EKF-Kalman-Lösung und Trackingdaten gesammelt. Der erste Test wurde mit freier Sicht zum Himmel durchgeführt und lieferte somit eine gute Satellitensichtbarkeit. Für den zweiten Test wurden drei GNSS-Ausfälle von 20 Sekunden, 66 Sekunden und 77 Sekunden eingefügt. Zur Evaluierung wurde die selbst entwickelten Kalman Filter-Implementierung mit der eingebauten eng gekoppelten Novatel Kalman Filterlösung, der Post-Processing-Lösung der kommerziellen Software Waypoint Inertial Explorer und dem Tachymeter-Ground Truth verglichen.

Keine GNSS-Ausfall-Ergebnisse

Die Testlaufbahn 1 (Abbildung 119) wurde so ausgelegt, dass sie sowohl viele Kurven als auch geradlinige Fahrten aufweist, um die unterschiedliche Dynamik zu simulieren, die ein Fahrzeug aufweisen kann.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse GNSS-Aktualisierungen sind mit einer Frequenz von 1 Hz verfügbar. Die Ausgaberate des INS ist auf 100 Hz eingestellt, zwischen den GNSS-Aktualisierungen arbeitet das INS im Prädiktionsmodus. Abbildung 120 vergleicht die mit dem NovaTel mit lose gekoppelter Integration erhaltenen Positions-RMS-Verweis. In Testfahrt 1 ist die GNSS-Verfügbarkeit während des gesamten Laufs gut, die INS-Navigationsparameter werden kontinuierlich korrigiert, wodurch eine Akkumulation der Fehler verhindert wird, was wiederum zu einer Genauigkeit von unter 30 cm unter Verwendung der INS führt.

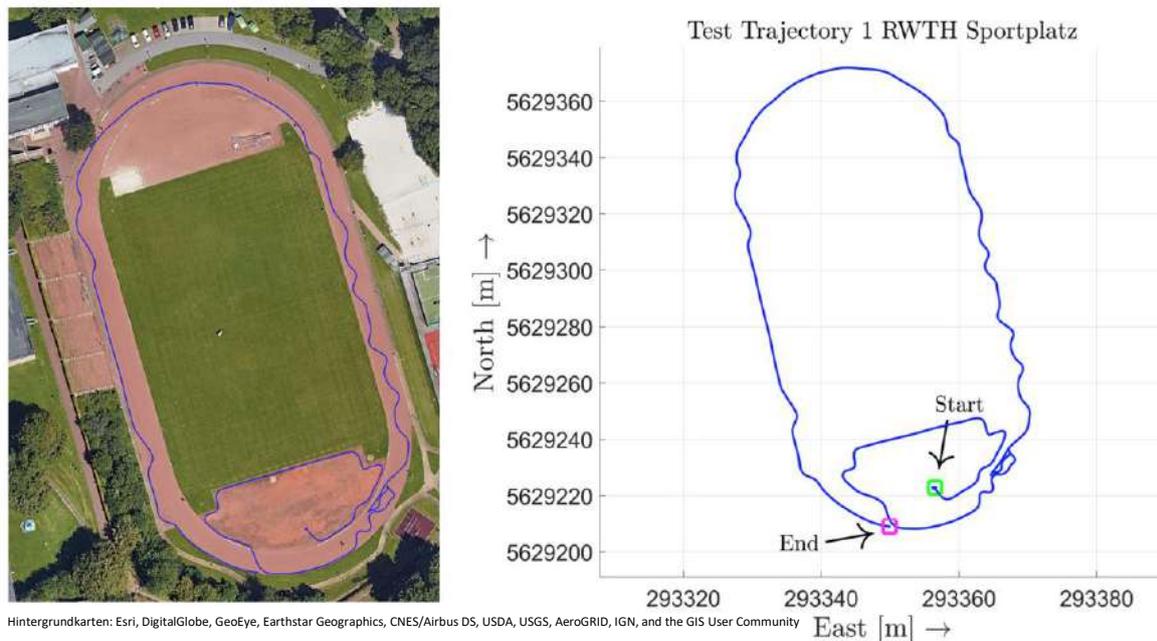


Abbildung 119: RWTH-Testflugbahn 1 auf Google Earth (links) und UTM-Koordinaten (rechts)

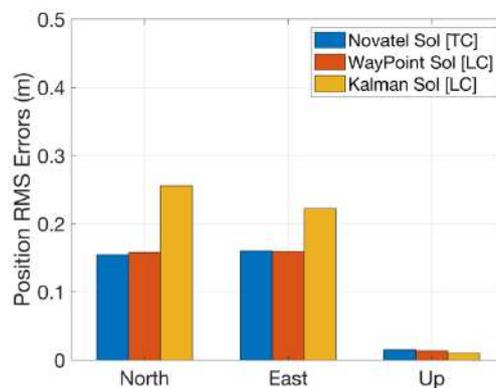


Abbildung 120: RWTH-Testflugbahn 1; 3D-Position RMS-Fehler Vergleich w.r.t Tachymeter-Ground Truth

GNSS-Ausfall-Ergebnisse

Die Vorteile der Integration von GNSS und INS kommen im Allgemeinen zum Tragen, wenn GNSS-Signale gedämpft und/oder durch Mehrwegeausbreitung beeinträchtigt werden. Die Testlaufbahn 2 (Abbildung 121) wurde entworfen, um die Fähigkeit des Inertialsensors während dieser Zeiten zu demonstrieren. Es wurden künstlich drei GNSS-Lücken von 20 Sekunden, 66 Sekunden bzw. 77 Sekunden durch das Abdecken der GNSS-Antennen mit einem stark dämpfenden Material (Aluminiumfolie) erzeugt. Die Abdeckung der Antennen führte damit zu einer künstlichen Abschattung der Satellitensignale. Die Zeiten der GNSS-Ausfälle (GNSS Outage) sind in Abbildung 122 markiert.

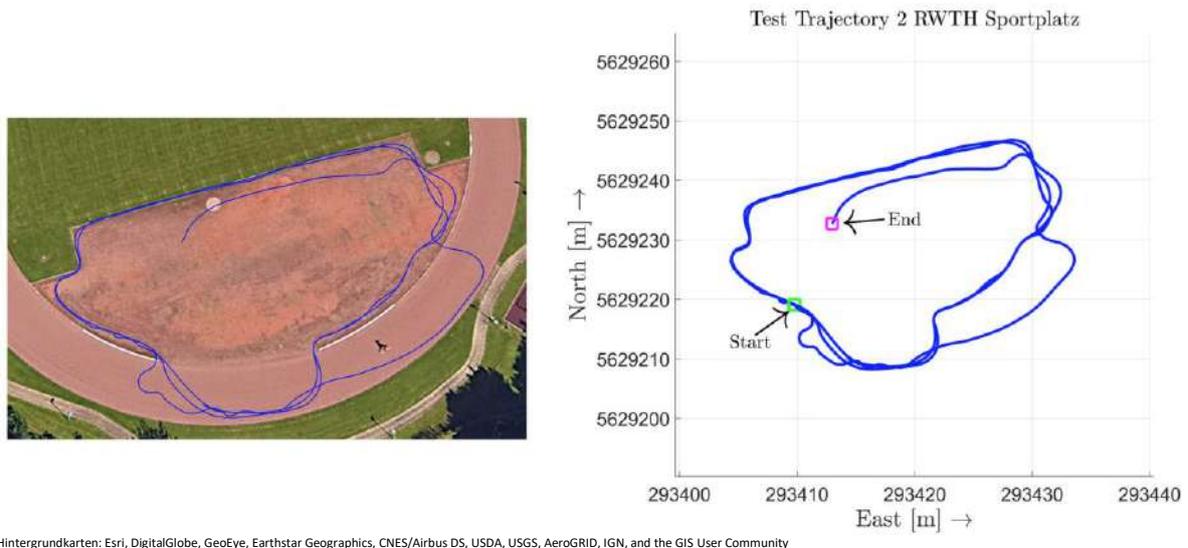


Abbildung 121: RWTH-Testbahn 2 auf Google Earth (links) und UTM-Koordinaten (rechts)

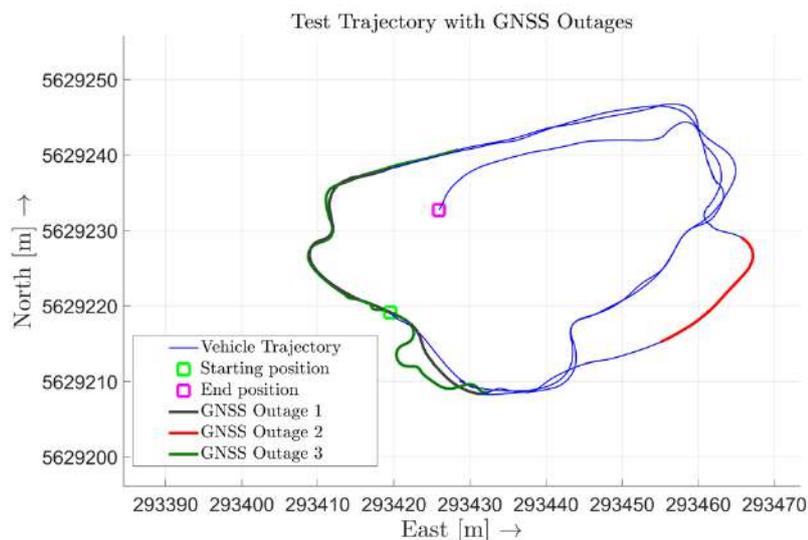


Abbildung 122: RWTH-Testbahn 2 mit GNSS-Datenausfällen

Während der GNSS-Lücken arbeitet der Filter im Prädiktionsmodus, so dass die Leistung des integrierten Systems in erster Linie durch das INS bestimmt wird. Der Kalman-Filter mit 15 Zuständen wurde im UTM- und ECEF-Rahmen verarbeitet. Die eng gekoppelte Endposition der Novatel-Kalman-Lösung wurde mit der eigenen Kalman-Filter-Implementierung im UTM- und ECEF-Rahmen verglichen. Beim Fehlen von GNSS nehmen auch die Fehler in der INS-Geschwindigkeiten zu. Da die Geschwindigkeiten integriert werden, um Positionen zu erhalten, wächst der Positionsfehler mit der Zeit an. Wie in Abbildung 123, Abbildung 124 und Abbildung 125 zu sehen ist, schnitt die ECEF-Implementierung im Vergleich zur UTM-Implementierung mit einem maximalen 3D-Positionsfehler von 1,24 m besser ab. Der Grund dafür liegt im erweiterten Korrekturmodell der ECEF-Implementierung, da hier weitere physikalische Einflüsse (z.B. Erdrotation, Gravitation) modelliert wurden.

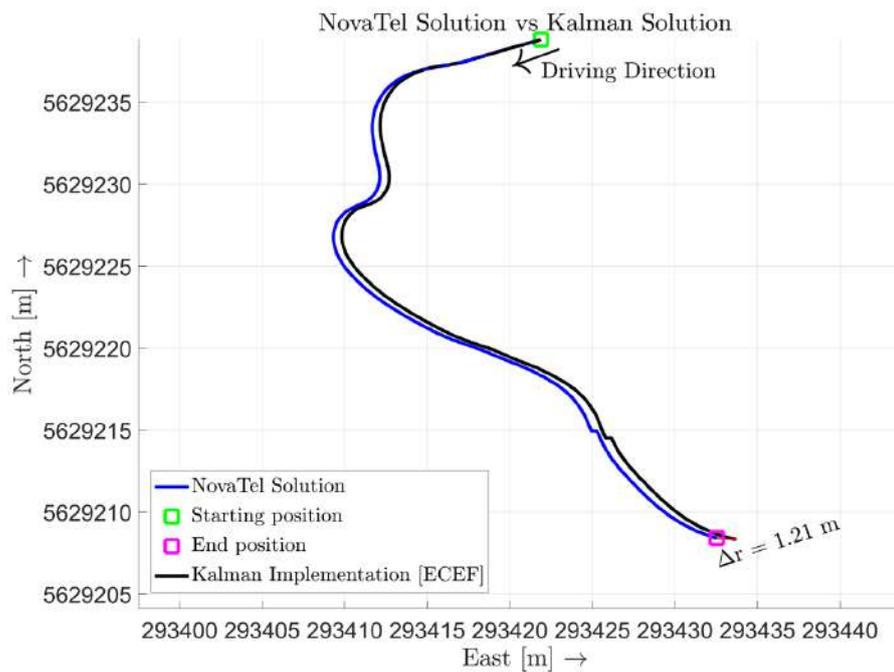
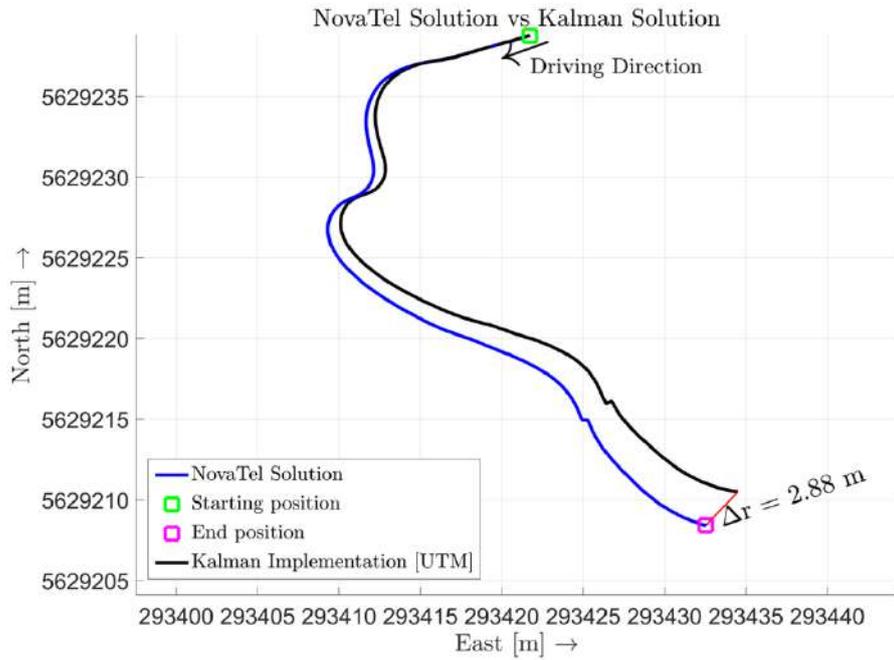


Abbildung 123: 66 Sekunden (1,1 Minuten) GNSS-Ausfall; Endpositionsvergleich Novatel Solution-Kalman UTM (oben) und Novatel Solution-Kalman ECEF (rechts)

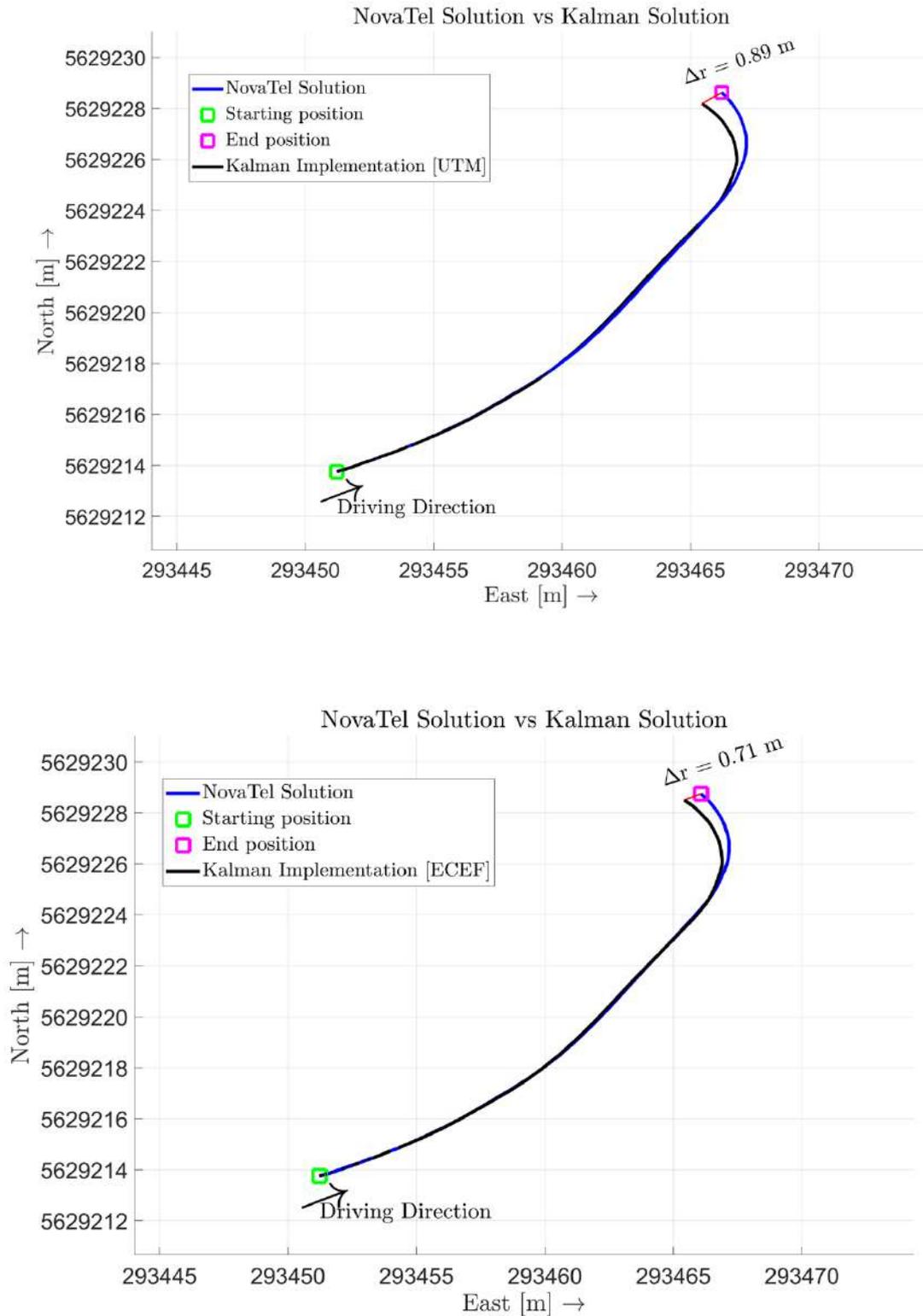


Abbildung 124: 20 Sekunden (0,33 Minuten) GNSS-Ausfall; Endpositionsvergleich Novatel Solution-Kalman UTM (oben) und Novatel Solution-Kalman ECEF (unten)

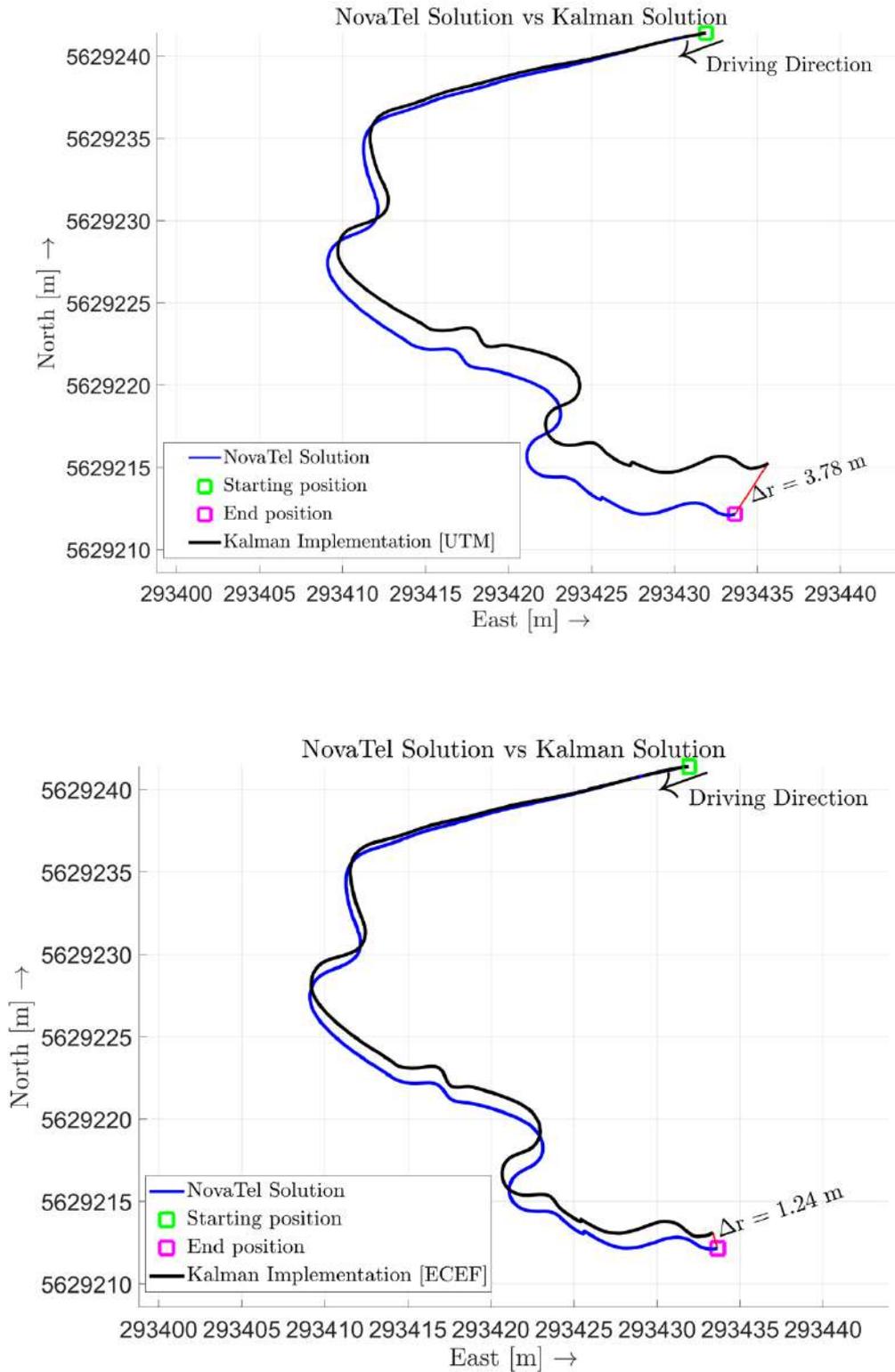


Abbildung 125: 77 Sekunden (1,28 Minuten) GNSS-Ausfall; Endpositionsvergleich Novatel Solution-Kalman UTM (oben) und Novatel Solution-Kalman ECEF (unten)

Die GNSS-Ausfälle für diese Analyse sind identisch zu dem oben erwähnten Abschnitt. Abbildung 126 zeigt einen Vergleich des implementierten 15-Zustands-Kalman-Filters im ECEF-Rahmen, die integrierte Novatel Kalman Filterlösung, die kommerzielle Closed-Source-Software Waypoint inertial explorer solution sowie die Tachymeter-Ground-Truth-Daten. Tabelle 15 zeigt die Ergebnisse des Endpositionsvergleichsfehler aller Filter während der 66 Sekunden des GNSS-Ausfalls. Abbildung 127 und Tabelle 16 zeigen den RMS (Root Mean Square)-Fehler der 3D-Position.

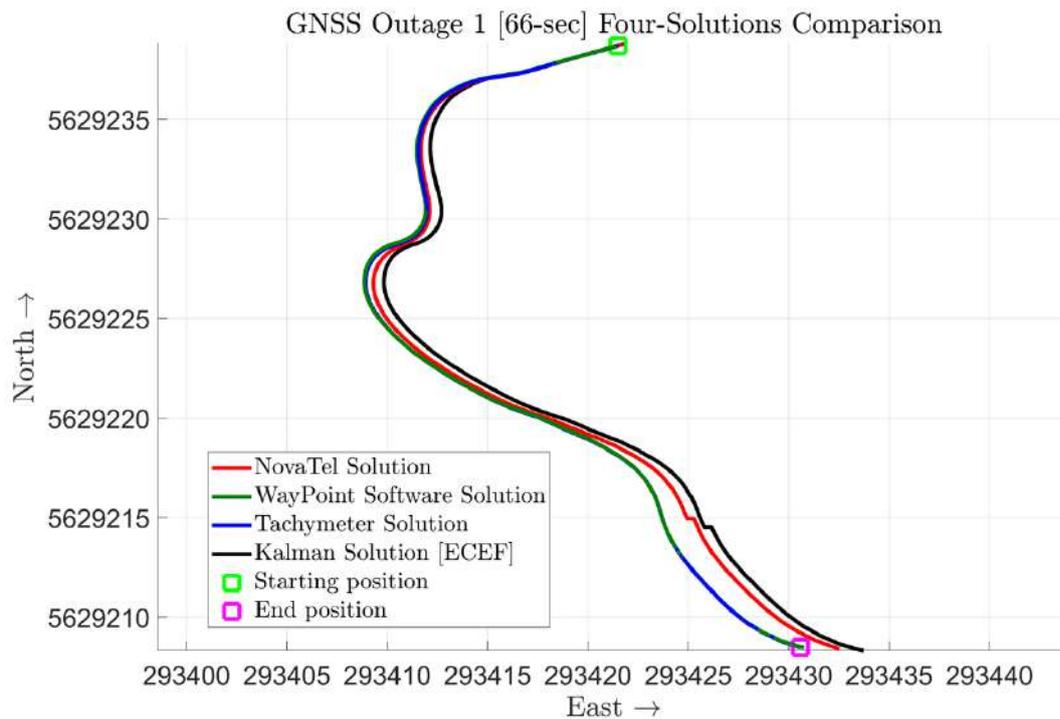


Abbildung 126: GNSS-Ausfall 1 (66 Sekunden); Endpositionsvergleich Bezug auf den Tachymeter Ground Truth

Tabelle 15: GNSS-Ausfall 1; Endpositionsabweichungen in Bezug auf das Tachymeter-Ground-Truth

Verfahren	3D-Positionsfehler [m]
NovaTel Solution (TC)	1,96
Way point Software (LC)	0,20
LC Kalman UTM Implementation	4,42
LC Kalman ECEF Implementation	3,16

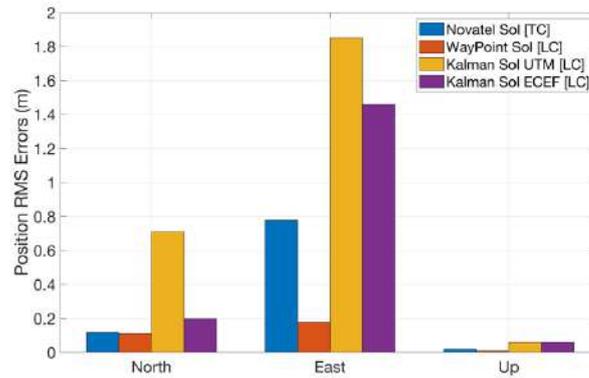


Abbildung 127: GNSS-Ausfall 1 [66 Sekunden]; 3D-Positions-RMS-Fehler-Vergleich in Bezug auf die Tachymeter-Ground Truth

Tabelle 16: 3D-Positions-RMS-Fehler in Bezug auf das Tachymeter

Verfahren	North [m]	East [m]	Höhe [m]
NovaTel Solution (TC)	0,12	0,78	0,02
Way point Software (LC)	0,11	0,18	0,01
LC Kalman UTM Implementation	0,71	1,85	0,06
LC Kalman ECEF Implementation	0,20	1,46	0,06

Abbildung 128 zeigt den Vergleich während eines 20 Sekunden dauernden GNSS-Ausfalls. Tabelle 17 fasst den Endpositionsvergleichsfehler aller Filter während des GNSS-Ausfalls zusammen. Die RMS-Fehler der 3D-Position sind in Abbildung 129 und Tabelle 18 dargestellt.

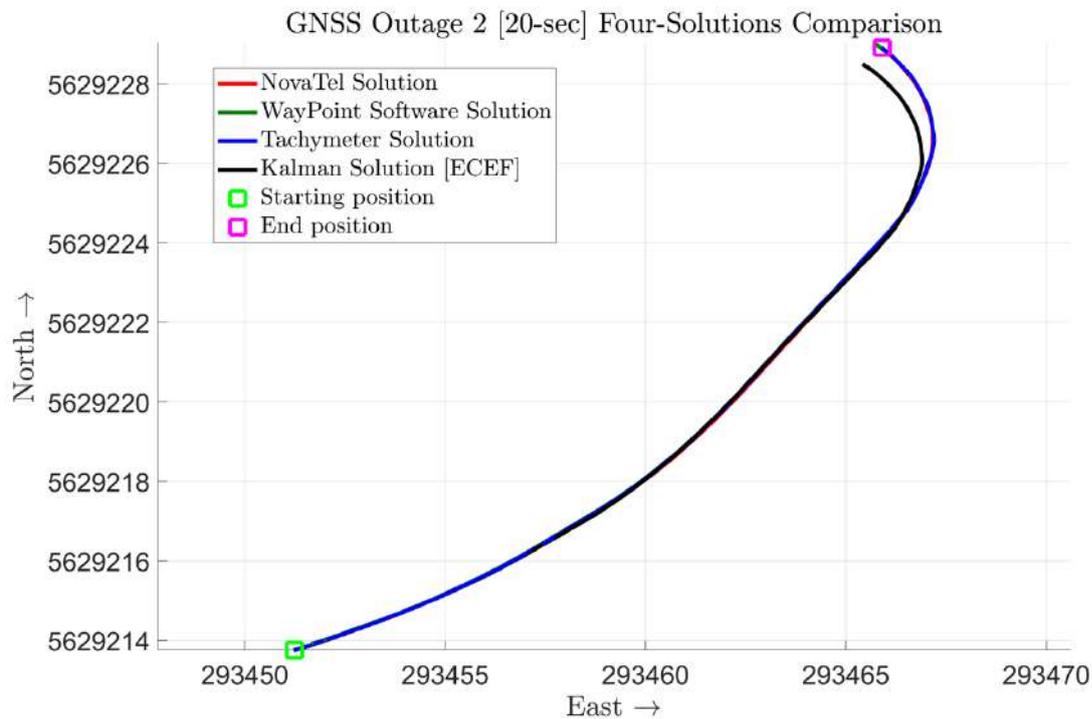


Abbildung 128: GNSS-Ausfall 1 (20 Sekunden); Endpositionsvergleich in Bezug auf die Tachymeter-Ground Truth

Tabelle 17: GNSS-Ausfall 2; Endpositionsabweichungen in Bezug auf das Tachymeter

Verfahren	3D-Positionsfehler [m]
NovaTel Solution (TC)	0,25
Way point Software (LC)	0,23
LC Kalman UTM Implementation	0,86
LC Kalman ECEF Implementation	0,63

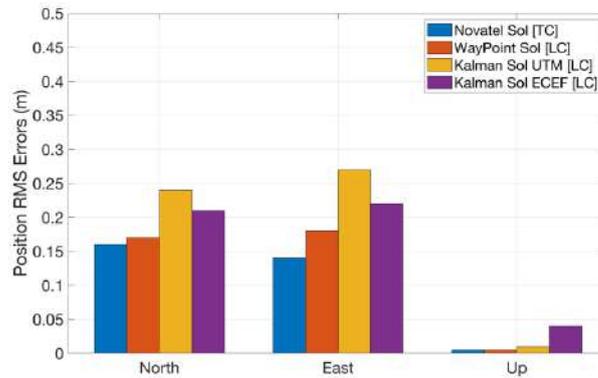


Abbildung 129: GNSS-Ausfall 2 [20 Sekunden]; 3D-Positions-RMS-Fehler-Vergleich in Bezug auf die Tachymeter-Ground Truth

Tabelle 18: 3D-Positions-RMS-Fehler in Bezug auf das Tachymeter

Verfahren	North [m]	East [m]	Höhe [m]
NovaTel Solution (TC)	0,16	0,14	0,005
Way point Software (LC)	0,17	0,18	0,005
LC Kalman UTM Implementation	0,24	0,27	0,01
LC Kalman ECEF Implementation	0,21	0,22	0,04

Ähnlich zeigt Abbildung 130 den Vergleich während eines 77 Sekunden dauernden GNSS-Ausfalls. Tabelle 19 fasst den Endpositionsvergleichsfehler aller Filter während des GNSS-Ausfalls zusammen. Die RMS-Fehler der 3D-Position sind in Abbildung 131: GNSS-Ausfall 3 [77 Sekunden]; 3D-Positions-RMS-Fehler-Vergleich in Bezug auf die Tachymeter-Ground Truth und Tabelle 20 dargestellt.

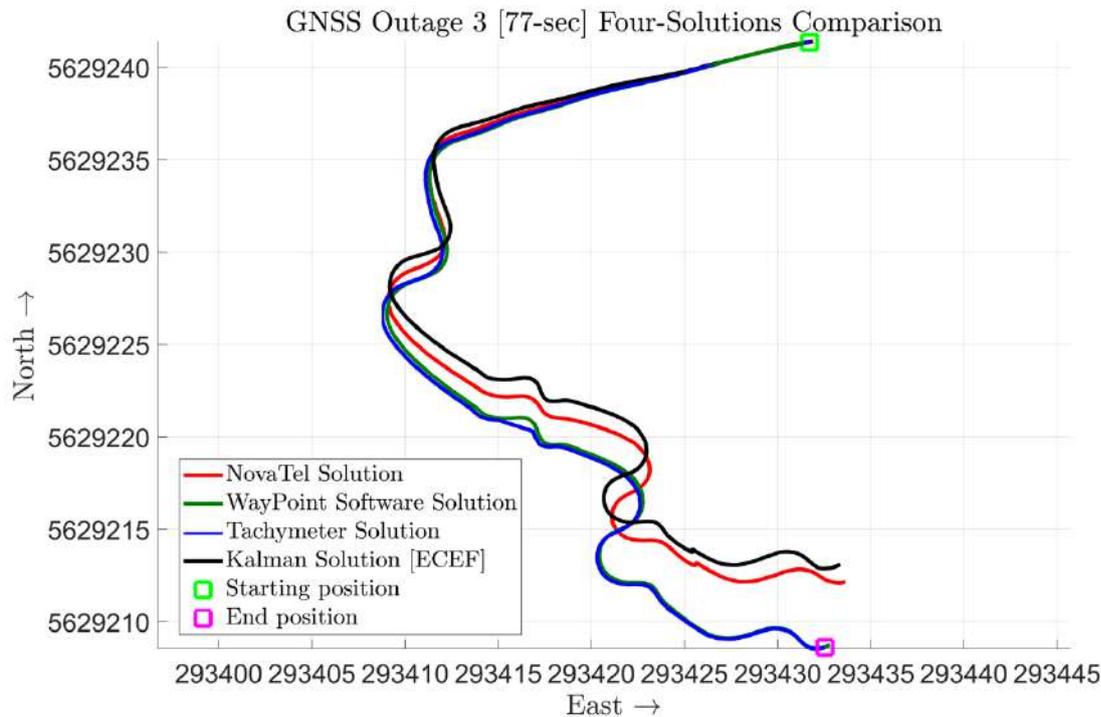


Abbildung 130: GNSS-Ausfall 1 (77 Sekunden); Endpositionsvergleich in Bezug auf die Tachymeter-Ground Truth

Tabelle 19: GNSS-Ausfall 3; Endpositionsabweichungen in Bezug auf das Tachymeter

Verfahren	3D-Positionsfehler [m]
NovaTel Solution (TC)	3,75
Way point Software (LC)	0,29
LC Kalman UTM Implementation	7,34
LC Kalman ECEF Implementation	4,57

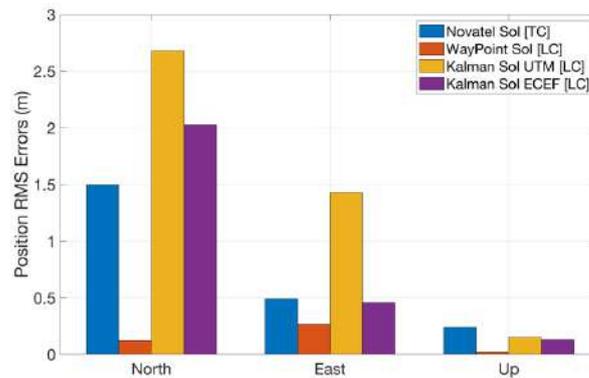


Abbildung 131: GNSS-Ausfall 3 [77 Sekunden]; 3D-Positions-RMS-Fehler-Vergleich in Bezug auf die Tachymeter-Ground Truth

Tabelle 20: 3D-Positions-RMS-Fehler in Bezug auf das Tachymeter

Verfahren	North [m]	East [m]	Höhe [m]
NovaTel Solution (TC)	1.5	0.49	0.24
Way point Software (LC)	0.12	0.27	0.02
LC Kalman UTM Implementation	2.68	1.43	0.15
LC Kalman ECEF Implementation	2.03	0.46	0.13

In den oben aufgeführten Untersuchungen konnte ausschließlich die Positionsgenauigkeit der verschiedenen Filterlösungen durch Vergleich mit dem Tachymeter-Ground-Truth evaluiert werden. Eine Untersuchung der Orientierungsschätzung war damit jedoch nicht möglich. Zu deren Evaluierung wurden daher die Orientierungsschätzungen des integrierten eng gekoppelten Novatel Kalman Filters und des selbst implementierten lose gekoppelten Kalman Filters in Bezug auf die Post-Processing-Lösung der Waypoint Software verglichen. Die Tabelle 21, Tabelle 22 und Tabelle 23 zeigen die Abweichungen der Lösungen für die drei Testläufe mit GNSS-Ausfällen. Die Abbildung 132, Abbildung 133 und Abbildung 134 zeigen die roll-, pitch- and yaw-Winkelvergleiche sowie auf der rechten Seite jeweils einen vergrößerten Ausschnitt aller drei Lösungen. Auffallend sind wiederkehrende Sprünge in der Novatel-Lösung, deren Ursache jedoch nicht geklärt werden konnte. Vermutet werden jedoch interne Korrekturmodelle bzw. Korrekturregeln, die zu einem Sprung der Werte führen könnten.

Tabelle 21: RMS-Fehler GNSS-Ausfall 1 Bezug auf das Waypoint software

66 Sekunden GNSS-Ausfall		
	Novatel Solution [TC]	Kalman Filter [LC]
Roll [deg]	0.184	0.036
Pitch [deg]	0.081	0.025
Yaw [deg]	0.359	0.293

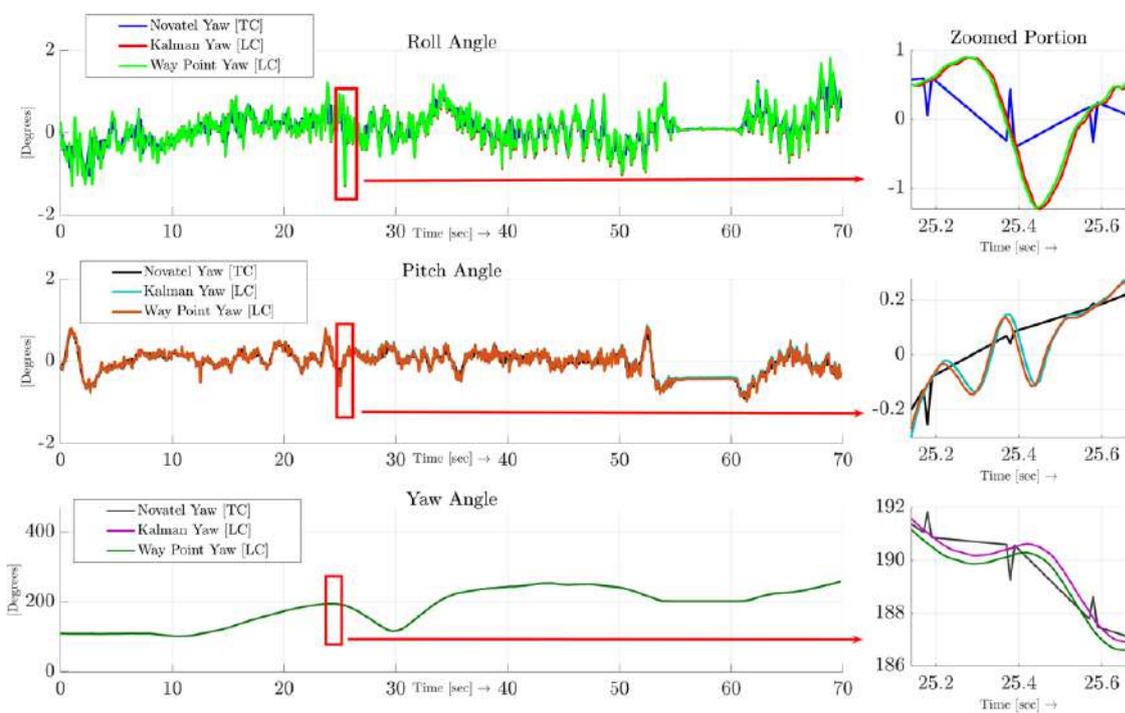


Abbildung 132: GNSS-Ausfall 1 (66 Sekunden); Orientierungsvergleich in Bezug auf die Waypoint software

Tabelle 22: RMS-Fehler für den GNSS-Ausfall 2 in Bezug auf die Waypoint-Software.

20 Sekunden GNSS-Ausfall		
	Novatel Solution [TC]	Kalman Filter [LC]
Roll [deg]	0.189	0.053
Pitch [deg]	0.091	0.035
Yaw [deg]	2.58	0.310

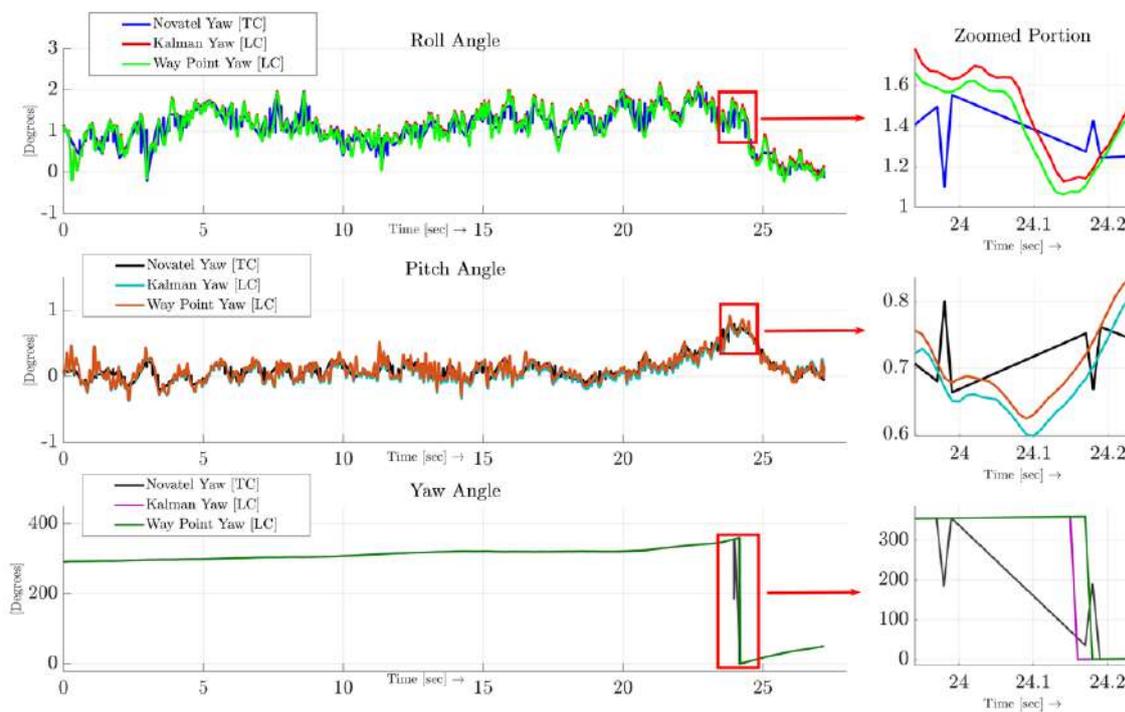


Abbildung 133: GNSS-Ausfall 2 (20 Sekunden); Orientierungsvergleich in Bezug auf die Waypoint software

Tabelle 23: RMS-Fehler für den GNSS-Ausfall 3 in Bezug auf die Waypoint-Software.

77 Sekunden GNSS-Ausfall		
	Novatel Solution [TC]	Kalman Filter [LC]
Roll [deg]	0.238	0.113
Pitch [deg]	0.102	0.123
Yaw [deg]	0.449	0.343

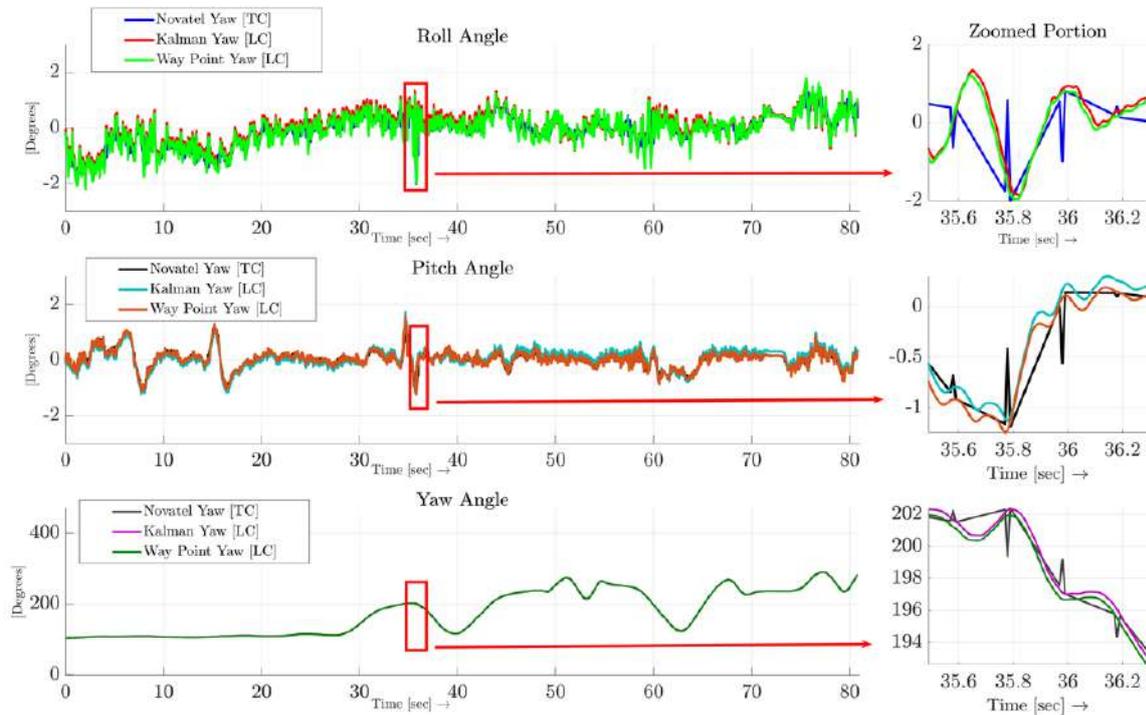


Abbildung 134: GNSS-Ausfall 3 (20 Sekunden); Orientierungvergleich in Bezug auf die Waypoint software

Zusammenfassend wurde eine eigene Sensorfusionslösung entwickelt, die eine Positionsgenauigkeit von 2-3 m und Kurswinkelgenauigkeit $0,4^\circ$ bei GNSS-Signalausfällen bis 60 sec unter Verwendung der Novatel INS gewährleistet.

5.8 RiverAdmin – Datenmanagement

Das entwickelte Datenmanagementsystem dient der Verwaltung, Prüfung, Verarbeitung, Bereitstellung und Koordination der durch die anderen Module generierten Daten. Auf Basis eines umfassenden Datenmodells zur integrierten und persistenten Speicherung aller erfassten bzw. relevanten Informationen wurde ein Geodatenbanksystem implementiert. Das System ermöglicht das zentrale Management der Daten bei gleichzeitigem Zugriff durch interessierte oder verantwortliche Nutzer unter Beachtung des open data-Konzepts. Die folgenden Teilziele wurden umgesetzt:

- Implementierung eines Geodatenbanksystems für die persistente Speicherung und Bereitstellung aller zeitlich und räumlich referenzierten Sensor- und Bilddaten
- Gewährleistung plausibler Ergebnisse durch Entwicklung von Plausibilisierungsalgorithmen für aufgenommene Daten
- Entwicklung eines Bildviewers zur Betrachtung der Bilddaten in 360°-Rundumsicht
- Entwicklung interoperabler Datenschnittstellen zu Expertensystemen, Web- und Geoportalen

In diesem Arbeitspaket wurden darüber hinaus verschiedene Aspekte der Datenauswertung und Weiterverwertung betrachtet und entwickelt. Im Wesentlichen wurde hier ein System für die konsistente und zeitlich-räumliche Datenspeicherung entwickelt, sowie Plausibilisierungs- und Auswertetools und Präsentationsmechanismen für die (Bild-)Daten.

Die Datenspeicherung erfolgt in dem o.g. bimodalen spatio-temporalen Datenbankmanagementsystem. Für die Einspeisung der Datensätze in die Datenbank wurde ein Upload-Tool entwickelt, in welchem die Konvertierung der binären *Isf-Datensätze aus Neptus direkt in die für die Datenbank notwendige Struktur umgewandelt werden.

Mit dem selben Tool lassen sich ebenfalls bestimmte Datensätze, aus einer Liste auswählbar, gezielt herunterladen um sie an verschiedenen Stellen weiterzuverwenden.

Auf die erhobenen Datensätze aufbauend wurde ein Viewer entwickelt um die Bilddaten georeferenziert darzustellen. Hiermit wird ein realitätsnahes Erlebnis des Gewässers und darin integriert Visualisierung der erhobenen Daten ermöglicht.

5.8.1 Konzeptionierung und Layout der Datenschnittstellen und Übertragung

Die Entwicklung und der Aufbau des spatio-temporalen (Geo-)Datenbankmanagementsystems sowie der Bilddatenverwaltung ist detaillierter in Kapitel 5.8.3 beschrieben. Hier ist der Aufbau des Tools zum Upload der Datensätze in das Datenbanksystem erläutert.

Mit dem in Abbildung 135 dargestellten Dialog kann sich der Nutzer mit Hilfe einer vorher registrierten E-Mail-Adresse und seinem Passwort am System anmelden. Die Nutzerverwaltung erfolgt hierbei über das Datenbanksystem *PostgreSQL*. Sobald der Nutzer am System angemeldet ist und sofern er Schreibrechte besitzt, ist er in der Lage, Daten aus einer Messfahrt in das Datenbanksystem hochzuladen. Dazu werden verschiedene Pfadangaben abgefragt. Zusätzlich hat der Nutzer die Möglichkeit, die Daten als *.csv oder *.json zu exportieren. Die Rohdaten (*.lsf) werden in PostgreSQL persistiert und intern zunächst durch einen Parser dekodiert, damit sie in die Datenbank eingelesen werden können.

Eine grafische Oberfläche ermöglicht dem Nutzer eine einfache Handhabung des Uploads sowie des Downloads der Daten (Abbildung 135).

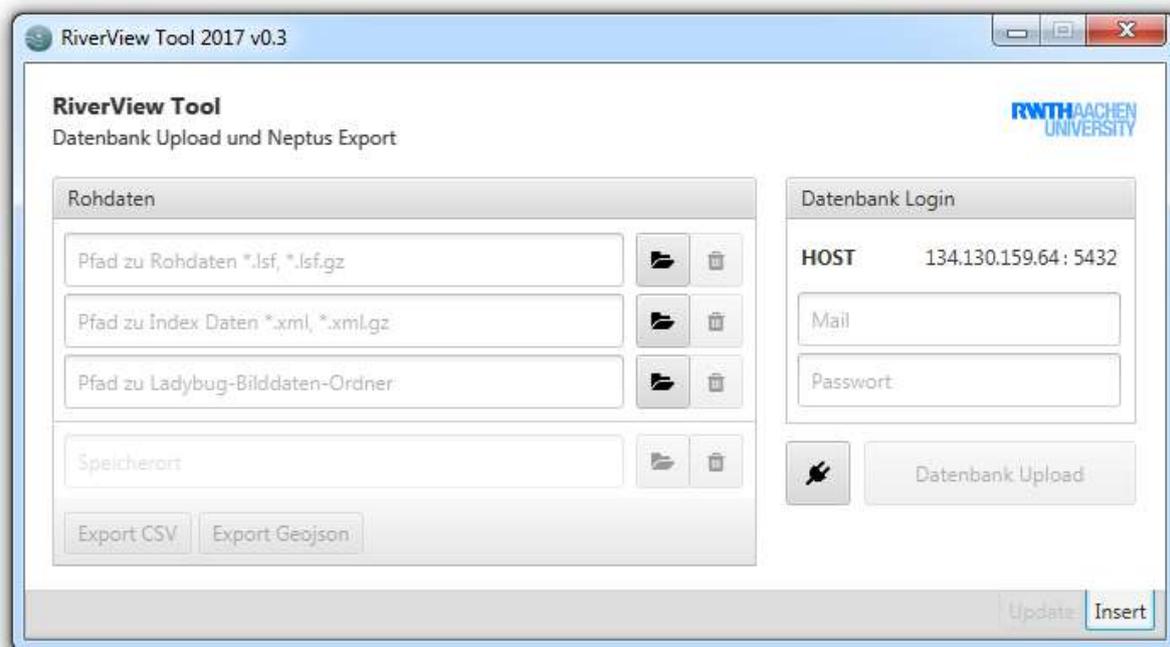


Abbildung 135: RiverView Tool 2017 v0.3

Durch die Implementierung eines bimodalen Datenbanksystems können sowohl die Bilddaten des Panoramakamerasystems als auch die übrigen Sensor- und Navigationsdaten effizient verwaltet werden. Hierbei werden die Bilddaten mit Hilfe der Middleware *Rasdaman* abgelegt, während die Bildmetadaten (z. B. Zeitstempel, Orientierungswinkel) in der objektrelationalen PostgreSQL-Datenbank gespeichert werden. Der Zugriff erfolgt dann zunächst über PostgreSQL, um durch den gewählten Standort und Zeitstempel den Namen und die Track-ID des Bildes zu ermitteln. Mit Hilfe der Track-ID können anschließend die Anfrage an *Rasdaman* zur Abfrage der Bildrasterdaten gesendet und durch Angabe eines Skalierungsfaktors das Bild in

einer vordefinierten Auflösung vom Server geladen werden. Die Grundlage für die Abfrage unterschiedlicher Bildauflösungen ist eine in Rasdaman hinterlegte Bildpyramide für jedes Bildpanorama.

5.8.2 Praxisanwendung der Datenübertragung mit Flussgebietsinformationssystemen der Praxispartner

Zu Beginn des Projektes wurden, zusammen mit dem Praxispartnern WVER und EGLV Datenbedarfe ermittelt, um auf Grundlage dieser das RiverView®-System entsprechend zu gestalten.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zu den derzeit genutzten Verfahren und den erhofften Verbesserungen durch RiverView werden in Tabelle 24 bis Tabelle 26 dargestellt. Der Aufbau der Tabellen ist in biologische, hydromorphologische, chemisch-physikalische und chemische Qualitätskomponenten unterteilt. Diese werden wiederum in die einzelnen Parameter unterteilt und Messmethoden beziehungsweise Bewertungsverfahren sowie das Ziel dieser Messung aufgezeigt. Diese Zusammenstellung soll einen Einblick in die zeitliche und räumliche Auflösung sowie den üblichen Untersuchungszeitpunkt solcher Messmethoden geben. Hierbei ist zu beachten, dass dies schwer zu verallgemeinern und meist abhängig von den ebenfalls in den Tabellen aufgeführten stark variierenden Untersuchungsgründen ist. In der letzten Spalte wurden die von den Praxispartnern WVER und EGLV erhofften Optimierungen durch das Projekt RiverView berücksichtigt.

Tabelle 24: Ergebnisse der biologischen Qualitätskomponenten

Biologische Qualitätskomponente		Methode/Bewertungsverfahren	Was genau wird gemessen?	Ziel?	Räumliche Auflösung	Untersuchungszeitpunkt	Untersuchungsfrequenz	Untersuchungsintervall	Grund für die Untersuchung	Erhoffte Optimierung durch RiverView
Gewässerfauna	Makrozoobenthos	PERLODES	MZB, Substrat, ACPs	Saprobie, Allgemeine Degradation, Versauerung	20-150 m je nach Gewässergröße	März-August angepasst an die Entwicklungsstadien	1 X MZB + 4 X ACPs	i.d.R. alle 3 Jahre	Erfolgskontrolle, Sondermessungen (z.B. Nebenbestimmungen von wasserrechtlichen Erlaubnissen)	Keine
		Saprobienindex DIN 38410	MZB, ACPs	Saprobie	20-150 m je nach Gewässergröße	März-August angepasst an die Entwicklungsstadien	1 X MZB + 1X ACPs	i.d.R. jährlich	WRRL Monitoring berichtspflichtiger Gewässer	Keine
	Fischfauna	Elektrofischung, FIBS	Feldbogen Fischfauna, Fischfauna	Art, Individuenzahl, Größe, (Altersstruktur)	Mindestbefischungsstrecke von 200-500 m	August-Mitte Oktober	einmal	i.d.R. alle 3 Jahre	Erfolgskontrolle, Sondermessungen, WRRL Monitoring (meist)	Substrat der Sohle im Längsverlauf für den Lebensraum

Biologische Qualitätskomponente		Methode/Bewertungsverfahren	Was genau wird gemessen?	Ziel?	Räumliche Auflösung	Untersuchungszeitpunkt	Untersuchungsfrequenz	Untersuchungsintervall	Grund für die Untersuchung	Erhoffte Optimierung durch RiverView
									durch das LANUV)	
Gewässerflora	Makrophyten	Phylib	gemäß Feldprotokoll, sowie Qualität und Quantität MP	stoffliche, mechanische, strukturelle Belastung	meist in ausgewählten Abschnitten	Juni-September	einmal	i.d.R. alle 3 Jahre	im Rahmen von Erfolgskontrollen, WRRL Monitoring	Bedeckungsgrade und Arten im Längsverlauf
	Phytobenthos	meist zu aufwändig							Meist nur im Rahmen von WRRL Monitorings durchgeführt vom LANUV	Keine
Sonstige	Ufergehölz									Prozentuale Beschattung des Gewässers

Tabelle 25: Ergebnisse hydromorphologische Qualitätskomponenten(Morphologie)

Hydromorphologische Qualitätskomponente		Methode/Bewertungsverfahren	Was genau wird gemessen?	Ziel?	Räumliche Auflösung	Untersuchungszeitpunkt	Untersuchungsfrequenz	Untersuchungsintervall	Grund für die Untersuchung	Erhoffte Optimierung durch RiverView
Morphologie	Laufentwicklung	Luftbilddaufnahmen		Veränd. Gewässerverlauf	gesamtes Untersuchungsgebiet		einmal	im Abstand von 2-3 Jahren	im Rahmen von Erfolgskontrollen, WRRL Monitoring bei berichtspflichtigen Gewässern alle 6 Jahre	Erfassung von Daten im Längsverlauf, technische Erfassung von bislang (subjektiv) geschätzten Parametern
	Längs- und Querprofil	Arbeitsblatt 18 LANUV	Längs- und Querprofil, Sohlgefälle	Erfassung Gerinne- und Auenmorphologie, dynam. Veränd. Gewässerbett	im Abstand von 20-100 m		einmal	im Abstand von 3-6 Jahren		
	Sohlsubstrat		volumenmäßig überwiegendes Sohlsubstrat	flächendeckende Substratkarte, dynam. Prozesse Sohlsubstrat	in 1 m Abständen entlang Querprofil	parallel zur Querprofilmessung	parallel zur Querprofilmessung	parallel zur Querprofilmessung		
	Kritische Sohlsubspannung	sehr unterschiedliche Methoden		Sohlstabilität, Wiederbesiedlungspotential	einmal pro Untersuchungsgebiet	parallel zur Längs- und Querprofilmessung	parallel zur Längs- und Querprofilmessung	parallel zur Längs- und Querprofilmessung		
	Ausuferungshäufigkeit	mittels Pegel (Drucksonde)	Anzahl Tage an dem Wasserstand Grenzwerte übersteigt	Funktion (Sekundär-)Aue überprüfen	einen Pegel?	Ganzjährig	alle 15 min	min. 1 Jahr		Keine

Hydromorphologische Qualitätskomponente		Methode/Bewertungsverfahren	Was genau wird gemessen?	Ziel?	Räumliche Auflösung	Untersuchungszeitpunkt	Untersuchungsfrequenz	Untersuchungsintervall	Grund für die Untersuchung	Erhoffte Optimierung durch RiverView
	Uferstruktur/Auensediment	Begehung Gelände, Luftbilddaufnahme	Sedimente und ihre Mächtigkeit	Karte Auensedimente, dynamische Prozesse Substrat	gesamtes Untersuchungsgebiet	Mittelwasser	einmal	im Abstand von 3 Jahren	meist nur zur Erfolgskontrolle wenn eine Sekundäraue angelegt wurde	Erfassung von Daten im Längsverlauf, technische Erfassung von bislang (subjektiv) geschätzten Parametern
	Substratverteilung	PERLODES		Substratverteilung aufgeteilt in 5 % Stufen					im Rahmen von PERLODES (MZB)	Erfassung über gesamtes Gewässer, Auftreten von Verschlämmungen
	Gewässerumfeld/Relief		Biotoptypen, Nutzungsflächen				einmal	im Abstand von 2-3 Jahren	im Rahmen von Erfolgskontrollen	Keine

Tabelle 26: Ergebnisse hydromorphologische Qualitätskomponenten (Durchgängigkeit und Wasserhaushalt)

Qualitätskomponente		Methode/Bewertungsverfahren	Was genau wird gemessen?	Ziel?	Räumliche Auflösung	Untersuchungszeitpunkt	Untersuchungsfrequenz	Untersuchungsintervall	Grund für die Untersuchung	Erhoffte Optimierung durch RiverView
Hydromorpholog. QK										
Durchgängigkeit		anhand der Fischfauna				parallel zur Fischfauna			siehe Fischfauna	Keine
Wasserhaushalt		Pegel	Wasserstand	Wasserstand, Abfluss			alle 2 h	ganzjährig		Ermittlung von Grundwasserzuflüssen

Tabelle 27: Ergebnisse physikal.-chem. und chem. Qualitätskomponenten

Alg. physikal.-chem. und chem. Qualitätskomponente		Methode/Bewertungsverfahren	Was genau wird gemessen?	Ziel?	Räumliche Auflösung	Untersuchungszeitpunkt	Untersuchungsfrequenz	Untersuchungsintervall	Grund für die Untersuchung	Erhoffte Optimierung durch RiverView			
Alg. physikal.-chem. Parameter	Temperaturverhältnisse					je nach Untersuchungsgrund	reguläres Monitoring: 6 Mal pro Jahr Lippe, 1 Mal pro Jahr Emischer, WRRL Monitoring 4-13 Mal pro Jahr, ereignisbezogen parallel zur Ermittlung der biologischen Parameter	Reguläres Monitoring Lippe und Emischer jährlich, WRRL Monitoring mindestens alle 3-6 Jahre, ereignisbezogen parallel zur Ermittlung der biologischen Parameter	parallel zu Fischfauna, MZB, Reguläres Monitoring Hauptgewässer, WRRL und ereignisbezogene Monitorings	Erfassung von Daten im Längsverlauf			
	pH-Wert			Versauerungszustand									
	Leitfähigkeit			Salzgehalt									
	Trübe												parallel zu MZB, bei WRRL und ereignisbezogenen Monitorings, reguläres M. Lippe ohne BSB
	Sauerstoffgehalt			Sauerstoffhaushalt									
	Sauerstoffsättigung												großes Monitoring (ereignisbezogen)
	BSB			Bestimmung leichter organ. Belastungen									
	CSB			Persistente Stoffe									Gr. Monitoring (ereignisbezogen), WRRL Monitoring, Lippe
	TOC			Persistente Stoffe									
	DOC			Anthrop. Belastung									Großes Monitoring (ereignisbezogen)
	SAK			Trübung									
	TN _b												Großes Monitoring, regulär Lippe, WRRL Monitoring (ausgenommen TN _b)
	Ammonium			Nährstoffverhältnisse (Nitrat: Reinigungsleistung Kläranlage)									
	Nitrat												
	Nitrit												
	ortho-Phosphat-P												
	Phosphor												
	Chlorid				Salzgehalt								
	Sulfat												Großes Monitoring (ereignisbezogen)
Säurekapazität			Versauerungszustand, Pufferleistung										
Gesamthärte			Versauerungszustand										
Flussgebietspezifische Schadstoffe								einige Stoffe Lippe sonst selten, LANUV hauptverantwortlich	Keine				
Bestimmte andere Schadstoffe			Siehe OGewV				Siehe OGewV, Lippe alle 2 Monate		Keine				
prioritäre Stoffe									Keine				

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass beide Wasserverbände bedingt durch die geographische Lage ihrer Verbandsgebiete, ihrer kultur- und naturräumlichen Ausstattungen und ihre unterschiedliche Größe auch unterschiedlich bei der Gewässerüberwachung vorgehen. Selbst innerhalb der Verbände gibt es, als Folge von internen Entscheidungen und laufend neu gewonnenen Erkenntnissen aus Erfolgskontrollen, wechselnde Vorgehensweisen (Goedeking, 2015; Petruck, 2015a).

Hauptgegenstand des regulären Gewässermonitorings sind das Makrozoobenthos in Verbindung mit den chemisch-physikalischen Parametern Temperatur, Leitfähigkeit, Trübung, Sauerstoffgehalt, Sauerstoffsättigung und biochemischer Sauerstoffbedarf sowie der Substratverteilung (bei PERLODES). Hier wird meist einheitlich nach dem PERLODES Verfahren vorgegangen und mit der Software Asterics die allgemeine Degradation, Saprobie und Versauerung ausgewertet (Goedeking, 2015; Petruck, 2015b).

Die Beweggründe für eine Gewässerüberwachung sind, mit Ausnahme des Wasserhaushaltes, fast immer Erfolgskontrollen von naturnahen Baumaßnahmen, welche die Fließgewässer dem in der WRRL geforderten „guten Zustand“ annähern sollen. Hier werden, mit Ausnahme des Phytobenthos, alle biologischen Parameter und zahlreiche hydromorphologische Parameter untersucht. Die Untersuchung des Phytobenthos erfolgt meist durch das LANUV (Goedeking, 2015).

Weitere, weniger ausführliche Monitorings werden ereignisbezogen durchgeführt. Dies können z.B. Sondermessungen sein, die in Nebenbestimmungen von wasserrechtlichen Erlaubnissen festgelegt werden, beispielsweise für die Überprüfung einer Kläranlage. Dies würde dann eine Beprobung des Makrozoobenthos und unterstützenden chemisch-physikalischen Parametern zur Folge haben. Monitorings zur Überprüfung der Durchgängigkeit, beispielsweise von Wehren, erfolgen anhand der Fischfauna. Gezielte Beprobungen einzelner Fischarten finden ebenfalls statt. Die Verbreitung der Emscher-Groppe, welcher als Relikt besondere Bedeutung zugesprochen wird, wird von der EGLV in der Emscher und ihren Nebenläufen gezielt untersucht (Jörrens, 2015; Petruck, 2015a).

Während EGLV und WVER bei der Beprobung der ACPs ähnlich vorgehen, ist ein deutlicher Unterschied bei der Untersuchung der flussgebietsspezifischen Schadstoffe, bestimmten anderen Schadstoffen und prioritärer Stoffe zu verzeichnen. Die EGLV überprüft bedingt durch ihre Lage im Ruhrgebiet ihr Hauptgewässer, die Lippe, regelmäßig auf 50 bis 60 dieser Stoffe und teilweise auch auf Medikamentenreste. Der WVER unternimmt in der Eifel nur ereignisbezogene Messungen von Schadstoffen (Jörrens, 2015; Petruck, 2015a).

Optimierungen von Monitoringmethoden durch das Projekt RiverView erhoffen sich die Projektpartner EGLV und WVER in allen Bereichen. Im Bereich der biologischen Parameter etwa durch die Erfassung der Bedeckungsgrade und Makrophytenarten im Längsverlauf sowie der

prozentualen Beschattung des Gewässers durch Ufergehölz. Im morphologischen Bereich wären laut EGLV die Erfassung von Daten im Längsverlauf und laut WVER die technische Erfassung von bislang subjektiv geschätzten morphologischen Parametern hilfreich. Des Weiteren wären die Messung der Sohlschubspannung bei kleinen Hochwassern, die Substratverteilung im Rahmen von PERLODES über das ganze Gewässer, sowie Informationen über das Auftreten von Verschlammungen wünschenswert. Für die Durchgängigkeit werden keine Optimierungen gesehen. Den Wasserhaushalt betreffend, wäre die Ermittlung von Grundwasserzuströmungen hilfreich. Dies könnte durch Temperaturunterschiede im Gewässer festgestellt werden und fällt damit auch in den chemisch-physikalischen Bereich. Für die allgemeinen chemisch-physikalischen Parameter sollte, ebenso wie für einen Großteil der morphologischen Parameter, die Erfassung der Daten im Längsverlauf bewerkstelligt werden können. Da die Schadstoffe nur selten überprüft werden, existieren hier nach aktuellem Stand keine Optimierungswünsche von Seiten der beiden Wasserverbände (Goedeking, 2015b; Petruck, 2015b).

Da sich die Datenauswertung als spezifischer und weniger verallgemeinerbar herausgestellt hat, als zunächst erwartet, wurden andere Darstellungs- und Präsentationsmöglichkeiten für die Daten weiterverfolgt, als zunächst angedacht. Hier zu nennen ist insbesondere die Präsentation der (Bild-)Daten in Virtual Reality. Dieses Verfahren wurde auf zahlreichen Veranstaltungen getestet und iteriert, um den Nutzern ein möglichst realitätsgetreues Bild der untersuchten Gewässer zu vermitteln. Eine Nutzung von sowohl der Datenpräsentation in VR, oder alternativ im Browser ohne VR-Brille, zeigte vielfältige Möglichkeiten der Nutzung.

In dem hier implementierten Virtual-Reality-Framework können, abhängig vom jeweiligen Datenbedarf, zielgruppenspezifisch Inhalte aufbereitet und präsentiert werden. Von „Lernanwendungen“ in denen, anhand von realen Gewässerabschnitten, grundlegende Ökosystemzusammenhänge erläutert werden können, bis hin zur Darstellung von georeferenzierten chemisch-physikalischen Güteparametern für Fachanwender, kann hier alles realisiert werden. Hierdurch wird eine optimale Datenverfügbarkeit realisiert.

5.8.3 Aufbau des spatio-temporalen Datenbanksystems für Mess- und Bilddaten

Das Geodatenbanksystem bildet die Basis für die Verwaltung, Speicherung und effiziente Nutzung der Daten, die während einer Messfahrt durch die auf dem Katamaran befindlichen Sensoren erfasst werden.

Das Entity-Relationship-Modell (ERM) wurde iterativ erarbeitet. Zeit und Raum stehen im Vordergrund der Betrachtungen, müssen aber für jede Entität einzeln betrachtet werden. Es gibt nunmehr vier Hauptentitäten, die im Entity-Relationship-Modell wiedergefunden werden können: *Entity*, *Track*, *EntityState* und alle Sensornamen.

Um jede Messfahrt wiedererkennbar und gleichzeitig eindeutig zu machen, wird der Start-Zeitstempel und die Startpunkt-Geometrie genutzt. Zusätzlich können jeder Messfahrt auch ein Name, ein Fahrer, das Wetter und weitere Attribute zugewiesen werden. Jeder Track erhält – sofern er einzigartig vorherrschend in der Datenbank ist – eine eindeutige ID, die sich auch in der Entität *Entity* wiederfinden lässt. In dieser Entität werden die Namen der Sensoren (spätere Entitäten) gespeichert, so wie auch die ID der Messfahrt – beides ergibt nun den neuen Primärschlüssel, damit zu jeder Messfahrt alle Sensordaten gefunden werden können. *EntityState* speichert die Entitäten-Namen, die in *Entity* enthalten sind und importiert hierzu zu jedem Zeitpunkt deren Status.

Abbildung 136 zeigt das Entity-Relationship-Modell in gekürzter Darstellung.

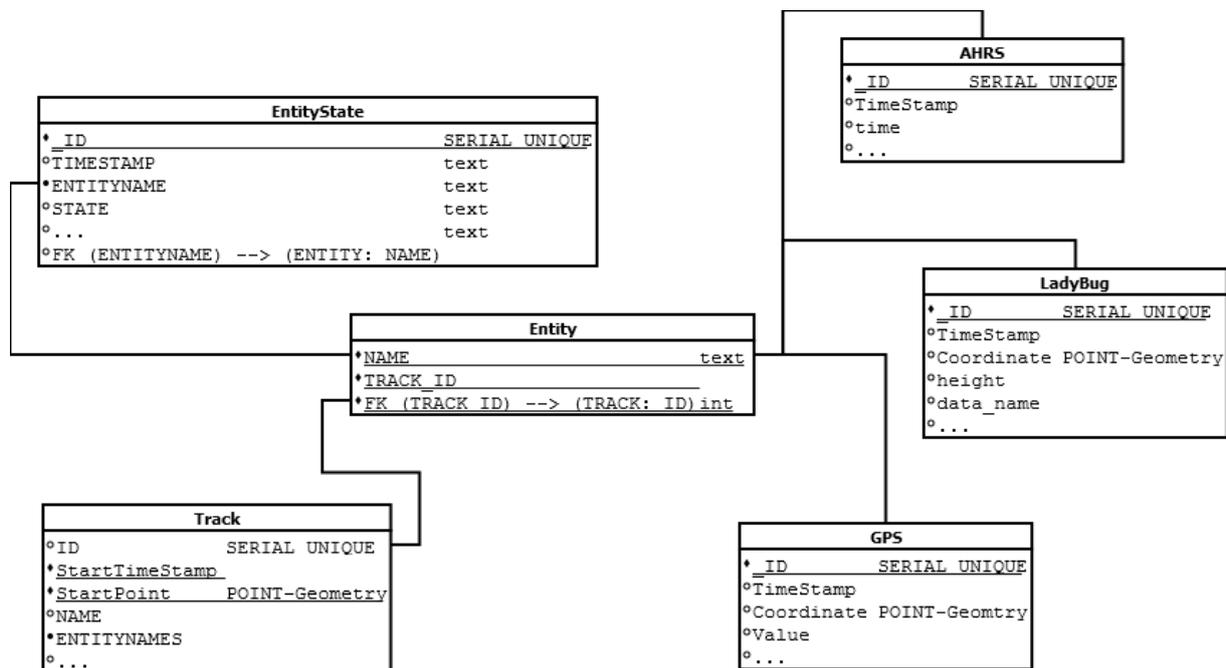


Abbildung 136: ERM gekürzt

Die Sensoren benötigen – wie die Praxisversuche gezeigt haben – einen anderen eindeutigen Identifikator als den Zeitstempel, der bisher als Referenz galt. Denn in einigen Fällen konnte festgestellt werden, dass zu identischen Zeitpunkten mehrere Werte existieren. Dies macht es erforderlich, ein Attribut *ID* einzuführen, die automatisch hochgezählt wird, sobald ein neuer Wert importiert wird.

Bevor eine neue Messfahrt hinzugefügt wird, werden zunächst die vorliegenden Dateien eingelesen und analysiert. Danach wird – sollte die Messfahrt nicht bereits vorhanden sein – ein neuer Track angelegt, mit Hilfe dessen dann die Daten eingelesen werden.

Vor dem Hintergrund der Vielfalt der Projektdaten wurden zahlreiche Untersuchungen zu einzelnen Datenbankmanagementsystemen gemacht. Der Im- und Export von Bilddaten stellte sich dabei als eine besondere Herausforderung dar. Tests ergaben hierbei, dass *PostgreSQL*

mit *PostGIS* nicht für eine Bilddatenverwaltung in RiverView optimal sind. Aus diesem Grund wurden zusätzlich spezialisierte Rasterdatenbanken in die Betrachtung einbezogen. Aufgrund dieser Untersuchungen und unter dem Gesichtspunkt der im Projekt zu verwaltenden Sensor- und Nutzerdaten fiel die Auswahl auf ein multimodales Datenbankmodell: dieses Modell umfasst neben dem objektrelationalen Datenbankmanagementsystem *PostgreSQL* und dessen Erweiterung *PostGIS* auch die Graphdatenbank *Neo4j* sowie die Rasterdatenbank *Rasdaman*.

Um ein Nutzerzugriffsmodell zu realisieren, wird auf das *Neo4j*-Datenbankmanagementsystem zurückgegriffen. Die Stärke dieser Graphdatenbank liegt in der schnellen Ausführung von Abfragen zwischen miteinander verknüpften Daten. Dabei sind den Nutzergruppen verschiedene Rechte zugeordnet.

PostgreSQL wird eingesetzt für die Einspeisung von Sensordaten sowie dessen Metadaten (s.o.).

Bilddaten werden dagegen als große Rasterdaten im *Rasdaman*-System persistiert. *Rasdaman* bezeichnet eine Middleware, die Bilddaten entweder in *PostgreSQL* oder auch im Dateisystem speichert. Mit einer speziell für die Belange von Rasterdaten entwickelten Sprache ist dann ein schneller Im- sowie Export der Bilddaten von RiverView möglich.

Diese drei Modelle arbeiten als eine Einheit zusammen, um eine reibungslose und effiziente Verarbeitung und Persistierung der Daten zu ermöglichen.

Den Zugriffspunkt für den Endnutzer stellt die oben beschriebene Nutzeroberfläche (vgl. Kapitel 5.8.1) dar, die es möglich macht, sich in das System einzuloggen sowie (mit entsprechenden Rechten) Daten in das System hochzuladen, zu exportieren als auch zu ändern oder zu löschen.

Das entworfene System führt die Prozessierung (CRUD) der durch den Katamaran und dessen Sensoren (Multiparametersonde, Panoramakamera usw.) gesammelten Daten durch und verfügt über eine effiziente Nutzerverwaltung mit Rechtemanagement und Zugriffsmechanismen. Es stellt in dieser Form eine völlig neuartige Lösung dar, um hochdimensionierte Rasterdaten, sensible Nutzerdaten sowie eine Vielzahl von Sensordaten in *einem* Guss effizient zu verwalten.

5.9 360°-Viewer

Die Visualisierung der Bildpanoramen sollte im Rahmen des RiverView-Konzeptes ähnlich zu Google StreetView über einen Webbrowser mit intuitiver Bedienung umgesetzt werden. Die Entwicklung eines derartigen 360°-Viewers für die Bild- und Gewässerdaten erfolgte auf der Grundlage spezieller Web- und 3D-Grafikprogrammierbibliotheken, wie JavaScript und WebGL.

5.9.1 Schnittstellen 360°-Viewer-Umgebung und Steuerung

Für die Visualisierung der Daten der Überwasser-Mapping-Plattform – insbesondere der Bildpanoramen – ist ein spezieller 360°-Viewer erforderlich, der einen deutlichen Mehrwert für den Anwender des Webportals durch eine signifikante Erhöhung der Usability (vgl. Google Street View) darstellt.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Webviewer entwickelt, der auf Grundlage der Bildpanoramen eine Rundumsicht mit Ansichtssteuerung (Schwenken, Zoomen, Verschieben) des Gewässerumfeldes inklusive der Visualisierung der erfassten Gewässerparameter ermöglicht. Dabei wurde zusätzlich untersucht, inwiefern auch 3D-Messfunktionalitäten (z.B. Messung eines Abstandes zwischen zwei Punkten) im Viewer durch Bildmessung oder auf Basis der zu hinterlegenden 3D-Punktwolken möglich ist.

Panorama-Viewer

Ein Panorama-Viewer vermittelt dem Nutzer das Gefühl, sich auf der Grundlage verschiedener Bildpanoramen in der realen Welt zu bewegen. Dazu gehört neben der Darstellung der Panoramen die Möglichkeit, sich innerhalb einer zurückgelegten Strecke des RiverBoats, durch die selbige zu bewegen, d. h., von Bild zu Bild zu navigieren.

Konzept

Für die Umsetzung des Viewers werden 3D-Regelgeometrien in Form einer Sphäre genutzt, auf welche das Panoramabild, welches vorher aus den Einzelbildern entstanden ist, projiziert wird. Damit der Effekt einer virtuellen Weltkugel entstehen kann, wird das virtuelle Auge (Kamera) in der Mitte der Sphäre platziert.

Datenhaltung

Die Datenhaltung des Projektes RiverView basiert auf einem bimodales System, bestehend aus dem objektrelationalen Datenbankmanagementsystem PostgreSQL und der Rasterdatenbank Rasdaman. Eine Speicherung von Bilddaten in PostgreSQL bietet sich nicht an, weswegen die auf große Rasterdatenbestände spezialisierte Datenbank Rasdaman ausgewählt wurde, um das große Bilddatenaufkommen in RiverView zu bewältigen. Da neben den Bilddaten zudem Sensordaten aufgenommen werden, werden diese in PostgreSQL persistiert.

Der Upload der Daten erfolgt über die Middleware RiverView Database. Abbildung 137 zeigt, wie die einzelnen Datenbanksysteme mit dem Viewer und dem RiverView Database Management System zusammenhängen.

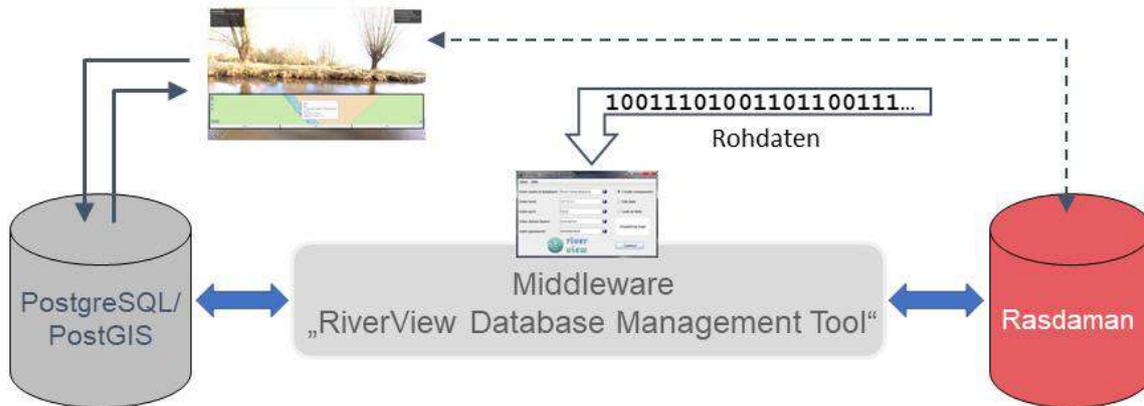


Abbildung 137: Datenhaltung RiverView

Umsetzung

Der Panorama-Viewer ist ein Web-Client, der mit Hilfe von JavaScript, HTML, CSS sowie der Bibliothek ThreeJS umgesetzt wurde. ThreeJS ist eine JavaScript-Bibliothek, die eine 3D-Objekt-Modellierung mit WebGL ermöglicht (siehe Abbildung 138).



Abbildung 138: Panorama-Viewer

Als Kartengrundlage wurde OpenStreetMap gewählt, die es ermöglicht, eine Karte frei (Open Source) in die Anwendung zu integrieren, sodass der Nutzer zu jeder Zeit seinen aktuellen Standort sehen kann.

Mit Hilfe der REST-Schnittstelle PotgREST und des OGC Web Coverage Services (WCS), der innerhalb des Datenbankmanagementsystems Rasdaman umgesetzt wurde, um dort auf Bilddaten zuzugreifen, können die Daten aus beiden Datenbanksystemen im Viewer bezogen werden.

Um eine bestmögliche Effizienz beim Laden zu erhalten, wurde mit dem Konzept der Bildpyramiden gearbeitet. Würde ein gesamtes Panoramabild auf die Sphäre projiziert werden, so würde daraus eine Latenzzeit für den Lade- und Visualisierungsvorgang von bis zu neun Sekunden resultieren. Eine Navigation von Bild zu Bild würde dem gleichen Effekt unterliegen. Eine Bildpyramide (Abbildung 139) baut sich aus mehreren Ebenen auf. Diese Ebenen wiederum repräsentieren verschiedene Auflösungen des Bilds. Je niedriger die Auflösung, desto kleiner ist das Bild. Wird es dann trotzdem über die gleiche Sphäre gezogen, so wirkt das Bild wesentlich unschärfer als das Original. Jedoch kann das niedrig aufgelöstere Bild signifikant schneller aus der Datenbank geladen werden. So ist es möglich, dem Nutzer innerhalb einer Sekunde ein Vorschaubild im Viewer zu präsentieren, so dass der Nutzer bereits nach einer Sekunde in der Lage, sich zu orientieren und einen allgemeinen Eindruck zu gewinnen.

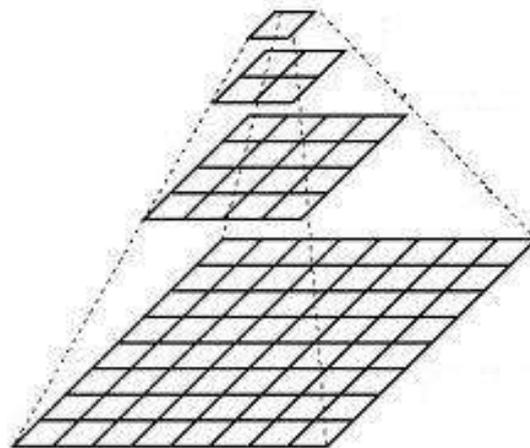


Abbildung 139: Bildpyramide

Eine weitere Steigerung der Ladeperformanz liegt im Konzept, zunächst nur Ausschnitte des Panoramabilds zu laden. Dabei ist es wichtig, die Ausschnitte, die sich im Sichtfeld des Nutzers befinden, zuerst zu laden, damit sich der gewünschte Effekt einer hohen Ladeperformanz einstellt. Tests ergaben, dass es sinnvoll ist, zunächst ein komplettes Panoramabild in niedriger Auflösung zu laden (komplettiert nach ca. einer Sekunde) und danach auf das Laden von Ausschnitten mit höherer Auflösung überzugehen. So entsteht der Eindruck, dass das Panorama nach ca. zwei bis drei Sekunden vollständig geladen wurde. Dreht sich der Nutzer dann in der Sphäre, so werden die weiteren relevanten Ausschnitte nachgeladen. Die Wartezeit des Nutzers bis zur vollständigen Darstellung des Panoramabilds hat sich dementsprechend um ca. zwei Drittel verringert.

Die Teilstücke wurden über das sogenannte Aligned Tiling innerhalb Rasdamans gebildet. Dabei werden Kacheln gleicher Höhe und Breite gebildet (Abbildung 140).

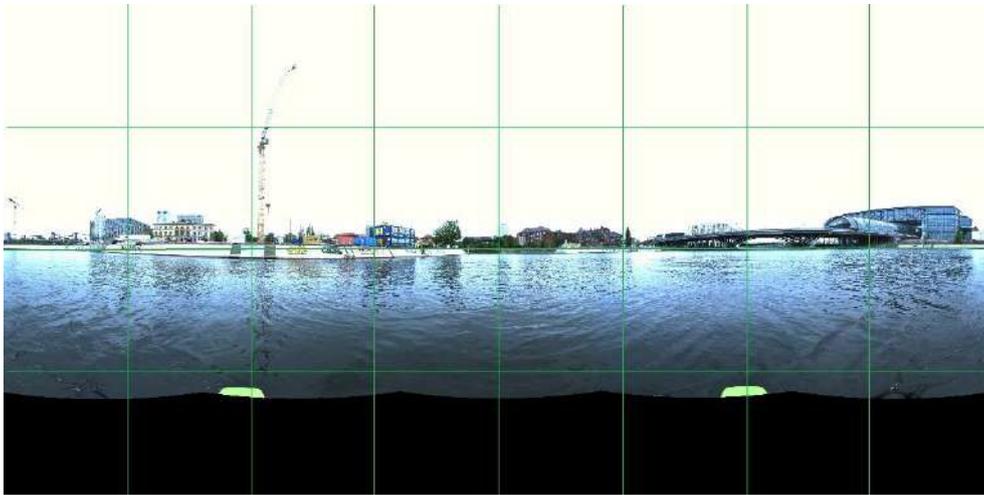


Abbildung 140: Aligned Tiling

Der Sprung zu anderen Bildpanoramen kann in zwei verschiedenen implementierten Varianten entstehen: über berechnete 3D-Koordinaten als Sphären innerhalb der Panorama-Sphäre oder über die OpenStreetMap-Karte.

Die georeferenzierten Daten des RiverBoats befinden sich in einem anderen Koordinatenreferenzsystem als das der virtuellen Kamera des Viewers. Aus diesem Grund muss eine Koordinatentransformation zwischen beiden Systemen vorgenommen werden. Dies geschieht über eine Rotationsmatrix, die sich aus UTM-Koordinaten und Neigungswinkeln des aktuellen und denen des Referenzpanoramas, dessen Position als 3D-Koordinate im Viewer dargestellt werden soll, zusammensetzt. An den dadurch entstehenden 3D-Koordinaten werden kleinere Sphären erstellt, auf die dann das Panorama des jeweiligen Punktes projiziert werden.

Bei der Darstellung der Kugeln kommt es zu einem Performanzverlust im Browser, da mehr Objekte dargestellt und gezeichnet werden müssen. Je mehr Objekte gezeichnet werden, desto langsamer rechnet die Grafikeinheit eines Rechners. Damit auch Rechner mit einer weniger leistungsstarken Grafikeinheit den Viewer uneingeschränkt nutzen können, wurde das Weiterspringen über die OpenStreetMap-Karte implementiert.

In der Karte, die sich im Viewer befindet, werden zudem die Koordinaten der anderen Panoramen, die mit dem RiverBoat aufgenommen wurden, dargestellt. Es ist daher möglich, sich über die Karte zum gewünschten Ort zu bewegen.

Im Viewer sind neben der Karte noch weitere erfasste Daten (z. B. Sauerstoffgehalt oder Temperatur) dargestellt, die mit dem Aufruf des Panoramas aus der PostgreSQL-Datenbank bezogen werden. Somit ist es dem Nutzer möglich, Daten und zugehöriger Bilder auf einen Blick zu betrachten.

5.9.2 Entwicklung und Anwendung der Plausibilisierungsalgorithmen

Neue Anforderungen an das Datenbankmodell wurden bei der Auswertung der realen Daten identifiziert und die Datenbank kontinuierlich modifiziert, wie oben beschrieben. Um eine bestmögliche Qualität der gespeicherten Datensätze zu erreichen, wurden verschiedene Ansätze entwickelt um die Daten qualitätszusichern.

Bei umfangreichen Messkampagnen werden eine Vielzahl von Einzeldatensätzen generiert, die es entsprechend aufzubereiten gilt. Hierbei gilt es zum einen mögliche Fehler beim Export der Datensätze aus Neptus, zum anderen aber auch eine Filterung der GNSS-Genauigkeit etc. vorzunehmen. Ebenfalls wurden für die verschiedenen Datensätze unterschiedliche Verfahren entwickelt.

Bathymetrie

Für die Bathymetrie sind verschiedene Schritte der Plausibilisierung und Datenaufbereitung notwendig. Im ersten Schritt wird für eine stimmige Bathymetrie des Gewässers die Wasserspiegellage benötigt. Aufgrund variierender Güte des GNSS-Empfangs, Vorhandensein von RTK, können größere Differenzen der gemessenen Höhe bzw. der Genauigkeit der gemessenen Höhe auftreten. Um diese Effekte zu eliminieren und den tatsächlichen Wasserspiegel als Bezugsniveau für die Berechnung der Sohlhöhen zu ermitteln muss hier eine Korrektur vorgenommen werden. Dieser Schritt unterscheidet sich zwischen Fließgewässern und Standgewässern: Alternativ hierzu können jegliche Punkte, welche keine optimale GNSS-Qualität besitzen, aussortiert werden. Hierdurch können aber potentiell, insb. im Uferbereich, viele GNSS-Messpunkte wegfallen.

Fließgewässer: An Fließgewässern wird eine Fixierung der Wasserspiegellage vorgenommen, auf welche die einzelnen Messwerte bezogen werden können.

Hier ergeben sich allerdings verschiedene Vor- und Nachteile einer Verwendung der fixierten Wasserspiegellage gegenüber der Verwendung der Einzelmesswerte des GNSS.

Bei fixierter und vergleichmäßiger Wasserspiegellage werden Effekte von Wellengang etc. nicht berücksichtigt. Hingegen sind Effekte des Rauschens der GNSS-Höhen weniger relevant. Hier muss also entsprechend der Verhältnisse vor Ort eine Unterscheidung vorgenommen werden. Bei kleineren Fließgewässern ohne relevanten Wellengang oder Schifffahrt, kann eine gleichmäßige Wasserspiegellage bessere Ergebnisse liefern, bei großen Fließgewässern empfiehlt sich jedoch die Verwendung der Einzelmesswerte.

Es wurde ein Workflow entwickelt, mit dem der vergleichmäßigte Wasserspiegel ermittelt werden kann. Hierfür wird eine Längsbefahrung des Gewässerabschnitts für jeden Befahrungstag vorgenommen. Diese wird für die Ermittlung des Wasserspiegels herangezogen. Die GNSS-

Höhen dieser Datensätze werden mit einem gleitenden Mittelwert geglättet. Anschließend können diese GNSS-Höhen GIS-basiert auf die umliegenden Rohdatenpunkte übertragen werden.

Standgewässer: Für den Fall der Vermessung von Standgewässern wird anders verfahren. Hier muss für jeden Befahrungstag eine mittlere Wasserspiegellage ermittelt werden. Hierfür wurde ein Skript entworfen, mit dem automatisiert die jeweiligen Befahrungstage und jeweiligen Gewässer getrennt werden und die jeweilige Wasserspiegellage ermittelt wird. Auf diese gemittelte Wasserspiegellage werden dann alle Tiefenwerte bezogen.

Dieses Vorgehen bietet den großen Vorteil, dass auch Messpunkte mit suboptimalem VDOP verwertet können. Wenn bspw. für einen Teil der Befahrung kein RTK-Fix erreicht wird, die Lagegenauigkeit aber dennoch, in Bezug zu den jeweiligen Genauigkeitsanforderungen des Auftrags, akzeptabel ist, müssen diese Punkte nicht verworfen werden, sondern der Wasserspiegel kann entsprechend korrigiert werden.

Dies wurde realisiert, indem zuerst die Bathymetrie-Daten nach Befahrungstagen und befahrenen Gewässern sortiert werden. Daraufhin werden pro Tag und See alle Bathymetriedaten betrachtet und nach einigen Bedingungen gefiltert:

- RTK-Fix vorhanden
- HDOP-Wert kleiner als 1
- Wassertiefe und GNSS-Höhe innerhalb händisch definierter Plausibilitätsgrenzwerte

Aus den verbleibenden Werten wird dann der Medianwert des Wasserspiegels gebildet. Hiermit wird gewährleistet, dass nur qualitativ hochwertige Punkte herangezogen werden und eine bestmögliche Annäherung an den tatsächlichen Wasserspiegel erfolgen kann.

Gewässergüteparameter

Zur Weiterverwertung der aufgenommenen Güteparameter der Multiparametersonde wurde ein Workflow entwickelt, mit dem die Gütedaten automatisiert mit den chemisch-physikalischen Grenzwerten der EU-Wasserrahmenrichtlinie abgeglichen werden können. Hierzu wurde eine maschinenlesbare tabellarische Aufstellung der Grenzwerte angefertigt. Mit diesen können die jeweiligen Parameter entlang einer Fließstrecke des Gewässers abgeglichen und entsprechend ihrer Einhaltung bzw. Nicht-Einhaltung der Grenzwerte kategorisiert werden.

Echolot-Charakteristik

Im Rahmen des Vorhabens wurde ebenfalls die Auswertbarkeit von Echogrammen für die Ableitung der Untergrundbeschaffenheit evaluiert (Shariati 2018). Wesentliche Annahme hierfür war, dass unterschiedliche Materialzusammensetzungen in einer unterschiedlichen Reflexionsstärke und unterschiedlichen Tiefenausbreitung der Reflexionen resultieren.

Diese Annahme ist in der Literatur belegt, ist aber stark beeinflusst von den jeweiligen sensor-spezifischen Parametern wie Verstärkungskurven o.Ä. Hier wurde geprüft, inwiefern sich aus der Charakteristik Aussagen ableiten lassen.

Um diese Annahme zu überprüfen, wurden verschiedene Versuche in einer Laborumgebung und im Gewässer durchgeführt. Das wesentliche Ergebnis hiervon ist in Abbildung 141 dargestellt. In dieser Abbildung ist der Zusammenhang von Wassertiefe zu Reflexionsstärke dargestellt, farblich gekennzeichnet sind verschiedene Untergrundmaterialien welche vor Ort identifiziert wurden. Hier ist eine Clusterung der Materialien in verschiedenen Bereichen der Reflexionsstärken festzustellen. Eine zuverlässige Kalibrierung war jedoch im Rahmen von River-View nicht möglich. Allerdings weisen die bisherigen Ergebnisse Potenzial für die Entwicklung einer belastbaren Erfassungsmethode auf.

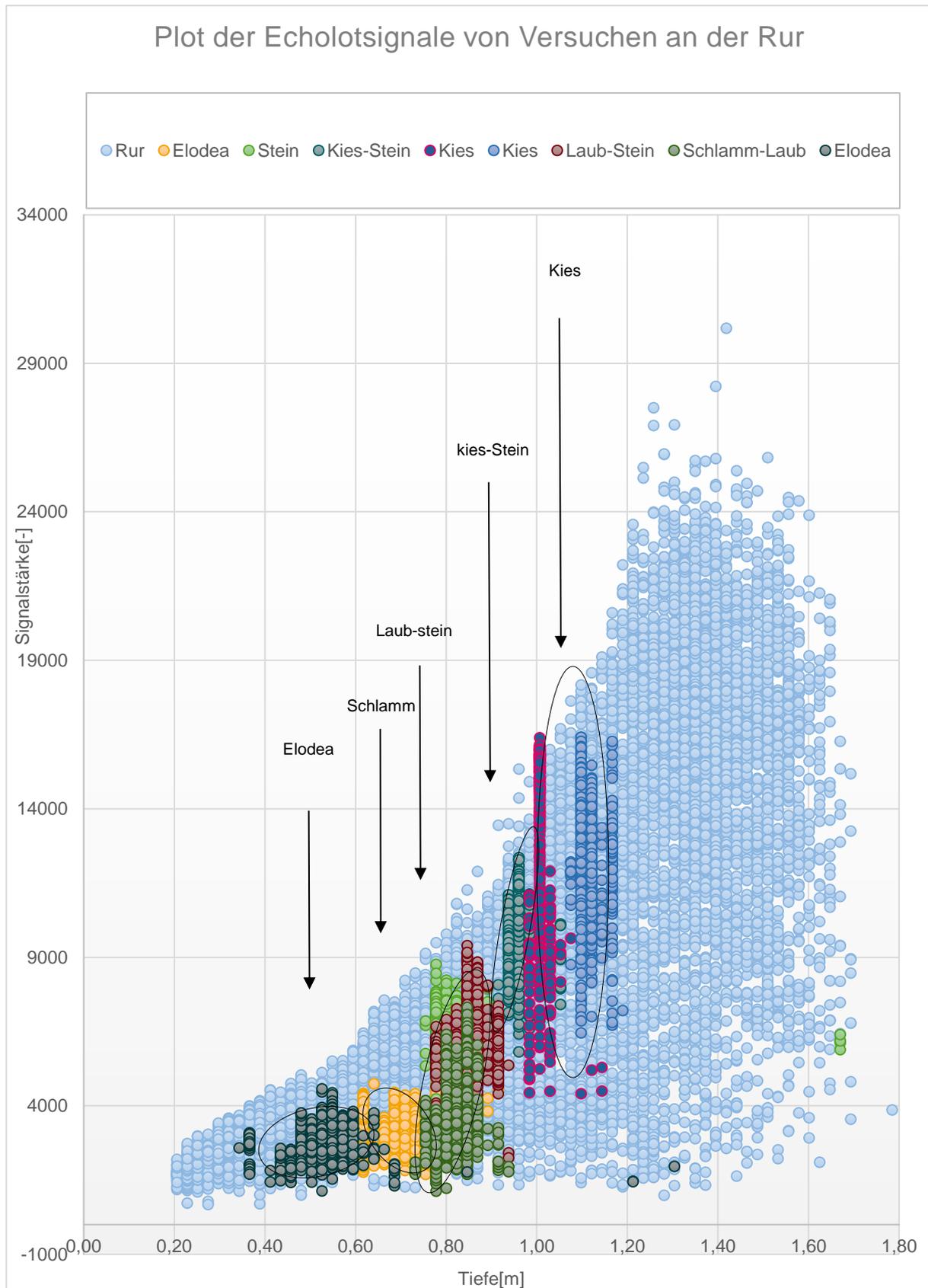


Abbildung 141: Tiefenverlauf der Signalstärke des Echolots für die Vermessung an der Rur im Vergleich alle Einzelversuche. Shariati 2019

Sidescan-Sonar

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde die weitergehende Verwendung von Sidescan-Sonardaten zur Ermittlung der Uferlinie getestet (Kasper 2019). Hierbei wurde ein Skript entwickelt, welches die Signalverläufe der Sonar-Echos hinsichtlich ihrer Charakteristik untersucht. Das Ergebnis hat gezeigt, dass die Signale zwar eine Identifikation der Uferlinie zulassen, dass

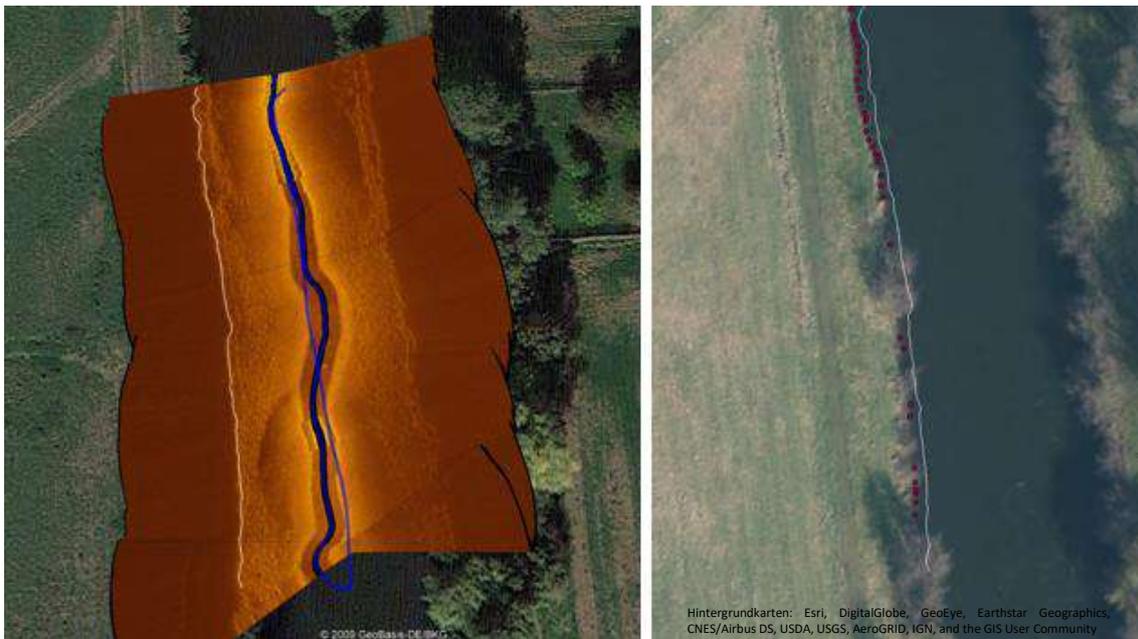


Abbildung 143: Überlagerung der Seitensichtsonarbilder mit einem Satellitenbild, rechts: mit GNSS eingemessene Uferpunkte mit Gegenüberstellung der im Seitensichtsonar zu sehenden Uferlinie (weisse Linie). Kasper 2019, unveröffentlicht



Abbildung 143: Ausgewertete Uferpunkte des untersuchten Gewässerabschnittes. Kasper 2019, unveröffentlicht

jedoch die Genauigkeit der ermittelten Punkte zum aktuellen Zeitpunkt keine echte Verwertbarkeit der Ergebnisse zulässt. Hieraus ergibt sich aber erhebliches Weiterentwicklungspotential für die Nutzung der Sidescan-Sonardaten, welches in Folgeprojekten weiterverfolgt wird.

Vegetationsanalyse

Im Rahmen einer weiteren Masterarbeit wurde die Verwendung der aufgezeichneten Bilder der Überwassermappingeinheit für die Ermittlung von Vegetationsinformationen des Uferbewuchses getestet (Knollmann 2020). Die Ergebnisse zeigen, dass eine auf den Bilddaten basierte Auswertung der Ufervegetation mittels künstlicher Intelligenz ein großes Potential für die Objektivierung wasserwirtschaftlicher Fragestellungen darstellt.

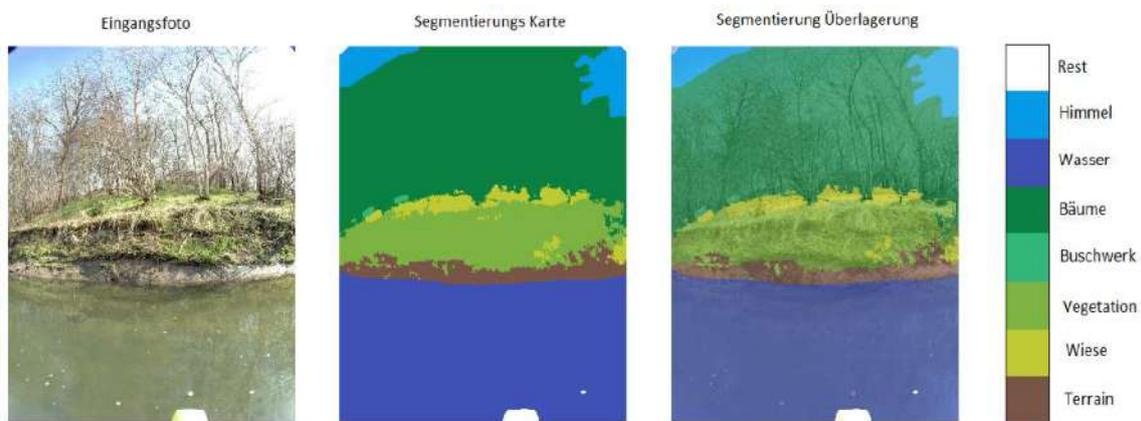


Abbildung 144: Darstellung der semantischen Bildsegmentierung. Knollmann 2020 (unveröffentlicht)

Wasserpflanzen

Ein großes Fehlerpotential in der Echolotpeilung bietet das Aufkommen von Wasserpflanzen. Gleichmaßen sind Wasserpflanzen ebenfalls von wasserwirtschaftlich-fachlichem Interesse. Vor diesem Hintergrund wurde für Bereiche mit starkem Aufkommen von Wasserpflanzenbewuchs ein Werkzeug entwickelt, das es ermöglicht, im Echogramm des RiverBoats eigene



Abbildung 145: Unterwasseraufnahme des Markkophytenbestand einer stillgelegten Kiesgrube

Tiefenwerte einzuzeichnen. Hiermit wurde eine Korrektur von Messfehlern aufgrund von Aufkommen von Wasserpflanzen realisiert und zudem die Möglichkeit geschaffen, diese Wasserpflanzen zu kartieren.

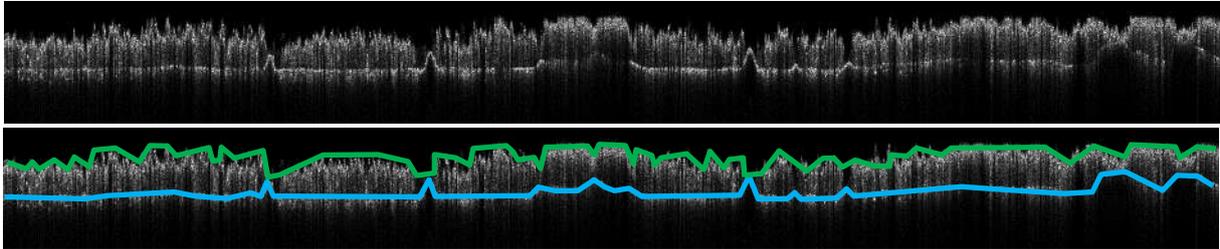


Abbildung 146: Echogramm mit intensivem Makrophytenbestand ohne/mit Markierung (Pflanzen sind grün markiert, Gewässergrund ist blau markiert), vereinfachte Darstellung

Sämtliche hier beschriebenen Verfahren wurden an verschiedensten Datensätzen entwickelt und getestet. Es wurden verschiedene Entwicklungsstufen dieser Verfahren erreicht. Besonders hervorzuheben ist hier die Möglichkeit, diese Verfahren weiterzuentwickeln, um eine Allgemeingültigkeit und eine Marktreife der Verfahren zu erreichen.

5.10 RiverWorks – Datenvermittlung

Ziel des Arbeitspaketes 5 war die Entwicklung eines Konzeptes, mit dem die erhobenen Daten aus den anderen Projektteilen den verschiedenen relevanten Akteuren zielgruppenspezifisch zugänglich gemacht werden sollen. Auf eine grundlegende Konzeptionierung der zu kommunizierenden Inhalte und der Zielgruppen, wurden die Teilpakete WebPortal und RiverApp umgesetzt. Diese sind im Folgenden beschrieben.

5.10.1 Abstimmung Kommunikationskonzept

Ziel von RiverView sind neue, innovative Lösungen, die eine umfassende Datenerfassung, -auswertung und -visualisierung (über und unter Wasser) beinhalten, um Fachplaner und Akteure der Wasserwirtschaft gezielt bei ihren vielfältigen Aufgaben zu unterstützen. Dadurch soll die Umsetzung nachhaltiger Maßnahmen bei der Gestaltung von Gewässern erleichtert und die Öffentlichkeit besser eingebunden werden. Das Kommunikationskonzept unterstützt diese Zielsetzung und ist beim Projekttreffen am 26. August 2015 in Berlin abgestimmt worden. Ein entsprechendes Kommunikationskonzept ist erforderlich, um RiverView als „Marke“ zu etablieren. Das konkretere Ziel des Konzeptes ist die Vermarktung des RiverBoats (sowie der im Projekt entwickelten Einsatzmöglichkeiten) und die Nutzbarmachung der Ergebnisse im Kontext der Wasserrahmenrichtlinie. Hierzu ist insbesondere die Einbindung von Akteuren der Wasserwirtschaft, Wissenschaft und in Teilen auch der breiten Bevölkerung erforderlich.

Eine besondere Rolle spielen die Anforderungen der beiden Praxispartner, Emschergenossenschaft/Lippeverband und Wasserverband Eifel-Rur. Sowohl der Test der Systeme als auch der aktive Dialog mit den Anwendern ermöglicht den Einstieg in die Verwertung schon während der Projektlaufzeit.

Über die gesamte Projektlaufzeit wurde die Internetseite www.river-view.de gepflegt und ständig aktualisiert. Zudem wurden soziale Medien als Informationsmittel genutzt. Auf Twitter, auf Facebook und Instagram wurde durch regelmäßige Posts Aufmerksamkeit generiert.

Die Information der interessierten Öffentlichkeit sowie der Transfer der Ergebnisse war verteilt auf die Projektpartner und erfolgte durch Präsentationen auf Messen, Tagungen und Konferenzen, sowie über die Ausrichtung von zwei eigenen, eher regionalen Workshops. Das zugrundeliegende Öffentlichkeitsarbeitskonzept, das Corporate Design sowie die Produkte der Öffentlichkeitsarbeit wie Logo, Namensgebung, Flyer, Bild- und Videomaterial wurde für das Konsortium zentral im FiW erarbeitet und eng mit den Projektpartnern abgestimmt.

5.10.2 Entwicklung des Web-Portals

Als wesentlicher Teil des Gesamtkonzeptes RiverView wurde die Entwicklung eines WebPortals angestrebt, mit dem eine ganzheitliche Darstellung der erhobenen Daten an einem Ort realisiert wird.

Hierzu wurde im ersten Schritt ein Konzept für die Umsetzung erarbeitet. Wesentliche Punkte sind die generelle Gliederung einer solchen WebApp, welche Datensätze in welcher Form dargestellt werden sollen und welche Funktionen implementiert werden.

Das wesentlichen Ergebnisse der Konzeptionierung sind in Abbildung 147 dargestellt.

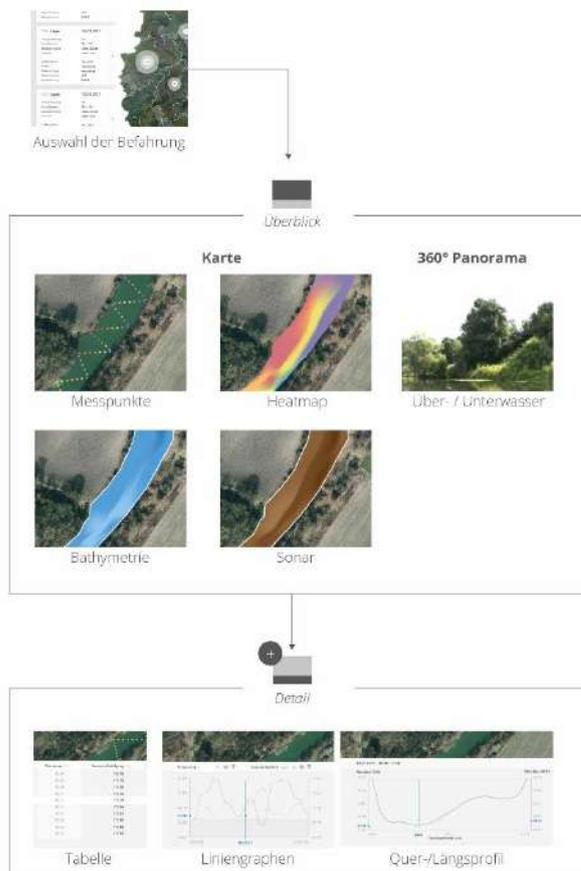


Abbildung 147: Konzept des Webportals.

Im nächsten Schritt erfolgte die technische Realisierung. Die technische Umsetzung des WebGIS Portals basiert im Wesentlichen auf mapbox (Kartendarstellung), turf (Geospatiale Funktionen) und dem react Framework.

Letzteres ermöglicht einen modularen und adaptierbaren Aufbau einer Webapplikation. Die Abbildung (Abbildung 147) zeigt die grundlegenden Struktur des RiverView® Portals. Sie ermöglicht die Kombination verschiedener Module - je nach Anforderungen des Nutzers.

Sie bieten in Form von kartographischen Darstellungen (Messpunkte, Heatmaps, Bathymetrie, Sonar) sowie 360° Über- und Unterwasser-Panoramen eine räumliche Zuordnung und einen

Überblick. Mittels der Datenvisualisierungen (Tabelle, Liniengraphen, Profile) sind Detailinformationen und numerische Werte abruf- und vergleichbar.

Die Module sind über einen unidirektionalen Datenfluss miteinander verbunden, d.h. eine Markierung einer Tabellenspalte hebt bspw. gleichzeitig den dazugehörigen Messpunkt auf der Karte hervor. Anhand von Metainformationen lassen sich Flussbefahrungen filtern und auswählen.

Die Informationen umfassen dabei Angaben zum Fluss, der Befahrungsstrecke und dem Befahrungszeitraum, Wetterinformationen sowie eingesetzten Messsonden.

Die Befahrungen werden mittels dynamischer Cluster auf der Karte übersichtlich zusammengefasst und sind interaktiv auswählbar. Erläuterungen zu den Möglichkeiten des Portals können fachfremde Besucher über die Benutzung informieren. Nach der Auswahl einer Befahrung wechselt der angezeigte Kartenausschnitt komfortabel zum Befahrungsort der Messkampagne.

Eine Zeitleiste ermöglicht die zeitliche und örtliche Filterung der aufgenommenen Daten. Wie aus gängigen digitalen Anwendungen bekannt, befindet sich eine Toolbar an der Seite, die grundlegende GIS Funktionalitäten und das Ändern von Kartendarstellungen ermöglicht.

Diese umfassen die Darstellung von Messpunkten, interpolierten Heatmaps, Sonaraufnahmen und der Bathymetrie samt Uferlinien. Zu den Messpunkten, wie auch gesondert markierten interessanten Points-of-Interest (bspw. Einleitern, Querbauwerken oder Zuflüssen), lassen sich Kontextinformationen einblenden und ein direkter Wechsel in die 360° Panorama-Ansicht ist möglich. Zu allen Darstellungen werden die Metainformationen der Befahrung dargestellt, um den Nutzern eine korrekte Interpretationsgrundlage zu den Messdaten zu bieten. Die Daten lassen sich im unteren Bereich des Portals in Form von Tabellen oder Liniengraphen je nach Anwendungsfall darstellen und filtern. Dabei lassen sich Liniengraphen einzeln oder paarweise darstellen, um Korrelationen der Parameter leicht ersichtlich abzubilden. Die Ansicht der Bathymetrie ermöglicht die Beobachtung einer Messstelle zu unterschiedlichen Jahreszeiten.

Das oben beschriebene Konzept wurde während der Projektlaufzeit kontinuierlich iteriert und weiterentwickelt. Zum Ende der Projektlaufzeit liegt ein funktionstüchtiges WebPortal mit eigener Serverinfrastruktur vor. Das Einladen von neuen Datensätzen und Interpolationen ist komfortabel über Drag & Drop gelöst.

Im entwickelten WebPortal lassen sich unter anderem die Rohdaten der Echolotpeilung als Wassertiefen (Abbildung 148) oder als Höhe über NHN (Abbildung 149) darstellen



Abbildung 149: Screenshot des WebPortals, dargestellter Parameter Sohlhöhe über NHN



Abbildung 148: Screenshot des WebPortals, dargestellter Parameter Wassertiefe

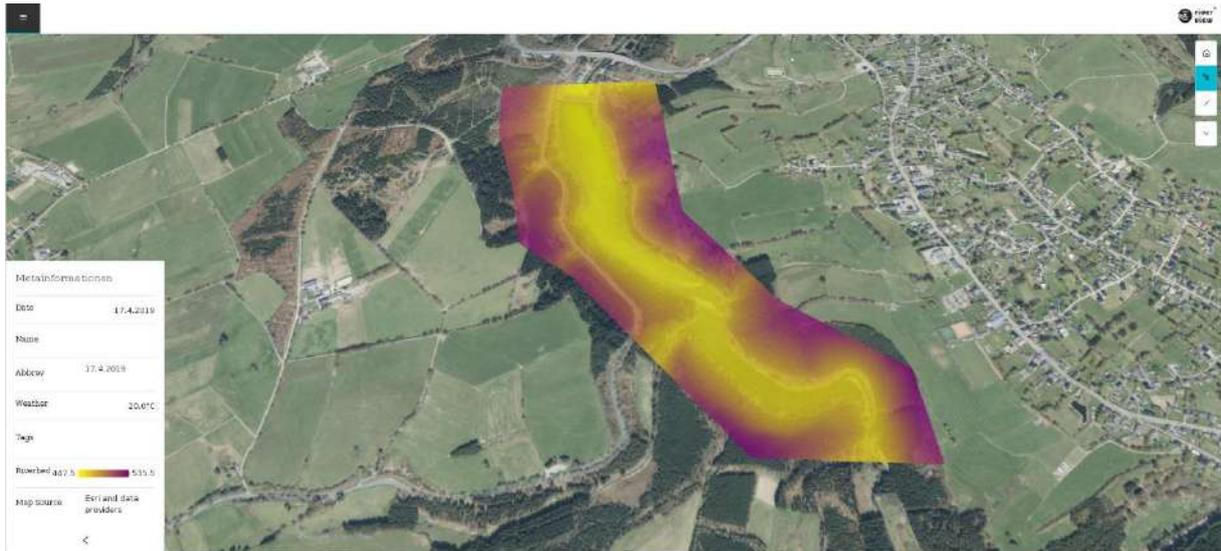


Abbildung 151: Screenshot des Webportals, dargestellter Parameter: interpolierte Sohlhöhe über NHN



Abbildung 150: Screenshot des Webportals. Entfernungsmessungsfunktion

Ebenfalls lässt sich das entsprechende Produkt der Vermessungsaufgabe, das digitale Geländemodell von Gewässersohle und Gewässerumfeld als geschlossenes DGM darstellen, hier angezeigt als Sohlhöhe über NHN (Abbildung 151). Als weitere Funktion wurde die Möglichkeit, über die Konstruktion einer Linie auf der Karte, die Entfernung zweier Punkte zu berechnen, implementiert (Abbildung 150)

Die gemessenen Einzelwerte der MPS lassen sich in einem Pop-Up-Fenster betrachten, welches beim Hovern mit der Maus eingeblendet wird (Abbildung 152).

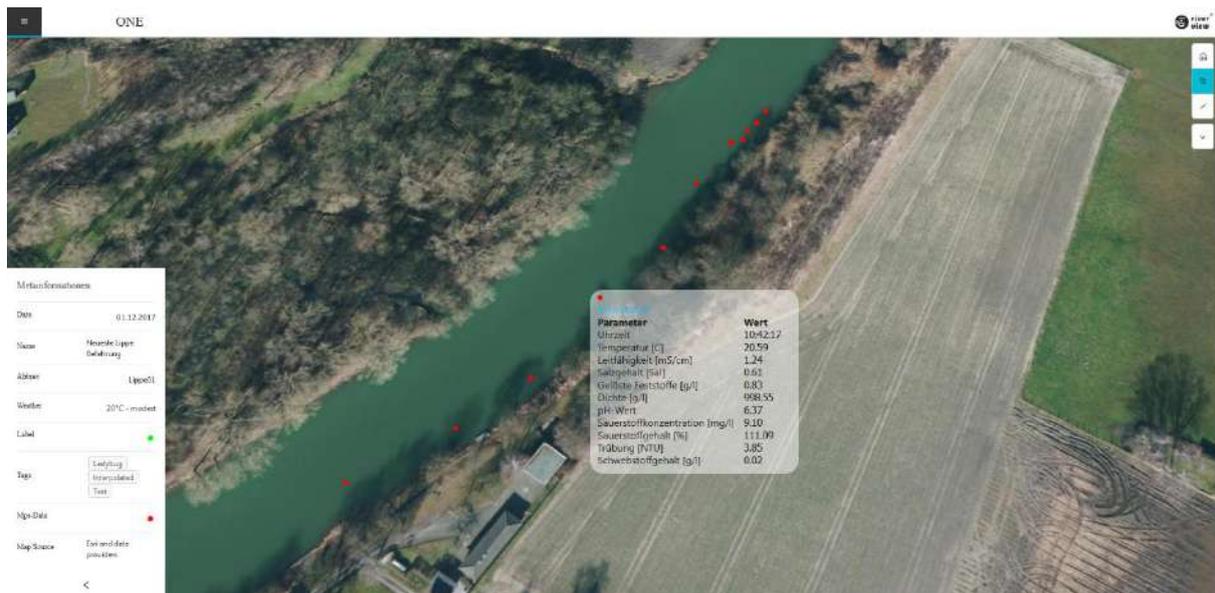


Abbildung 152: Screenshot des WebPortals, aufgeklappte Anzeige der MPS-Messwerte

5.10.3 Kopplung des Systems mit dem Portal/GIS

Der entwickelte 360°-Bildviewer wurde in das Webportal implementiert, bzw. die beiden Systeme gekoppelt. Die Kopplung des 360°-Bildviewers wurde über die Verlinkung der beiden Oberflächen untereinander erreicht. Im WebPortal wird beim Hovern über den GNSS-Punkt ein Pop-Up angezeigt, in dem man einen Link findet, der über die Koordinaten des Punktes einen Link generiert, der einen an die richtige Stelle des Bildviewers leitet, wie in Abbildung 153 dargestellt.

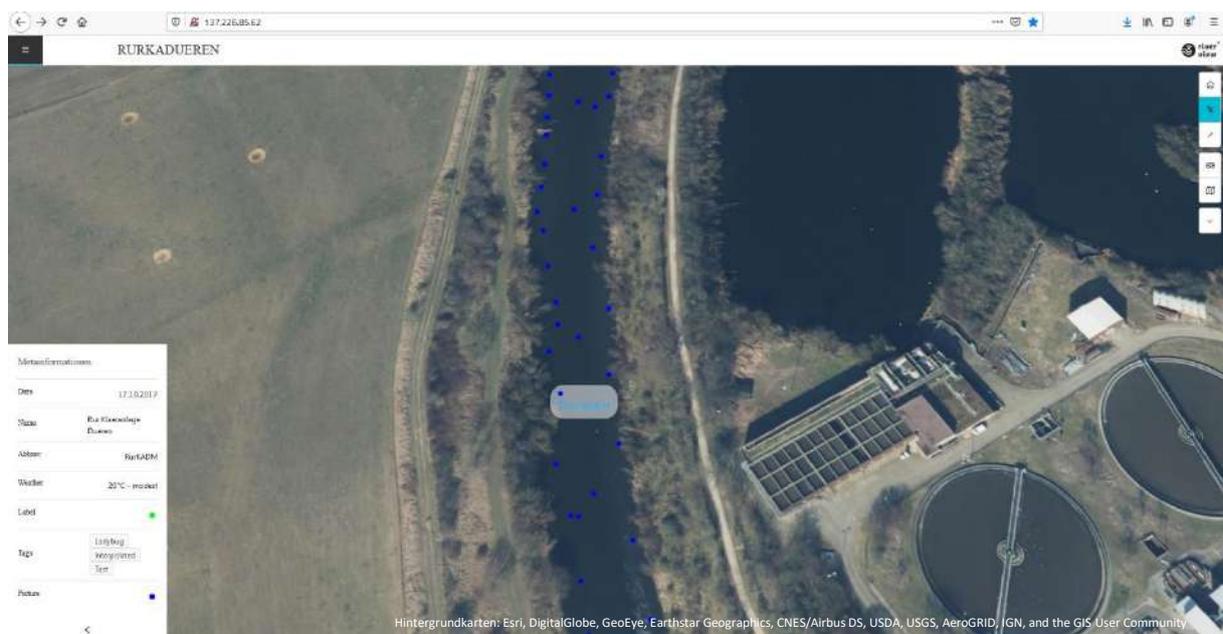


Abbildung 153: Webportal mit aufgeklapptem Pop-Up

5.10.4 Pflege des Webportals und Anwendung River-App

RiverApp

Um einen komfortablen Zugriff auf die erhobenen Datensätze für verschiedene Anwendergruppen zu ermöglichen, wurde eine Smartphone-App entwickelt, mit der Messdaten visualisiert werden können. Um einen ersten Eindruck zum möglichen Funktionsumfang der App zu erhalten, wurde im Frühjahr 2018 eine Umfrage bezüglich der zu entwickelnden Smartphone-App des Projektes RiverView durchgeführt. Die Verteilung der Fragebögen fand überwiegend im Rahmen des 48. IWASA im Januar in Aachen sowie auf Projekttreffen statt. Neben persönlichen Angaben und Details zur Handynutzung wurde unter anderem abgefragt, welche Inhalte der potentielle Nutzer als relevant erachtet und welche Zielgruppen angesprochen werden sollten. Die Ergebnisse werden im folgenden Kapitel vorgestellt. Insgesamt wurden 16 ausgefüllte Fragebögen ausgewertet. Die Altersspanne liegt zwischen 19 und 64 Jahren, wobei die Hälfte der Umfrageteilnehmer zwischen 20 und 30 Jahre alt ist. Ebenfalls die Hälfte der Teilnehmenden sind Studierende. 31 % sind weiblich, 50 % männlich, der Rest hat hierzu keine Angaben gemacht.

Smartphone-Nutzung

Mit 69 % nutzen die meisten Teilnehmenden ein Android-Betriebssystem. Das Telefon wird überwiegend zwischen 0,5 h und 2 h am Tag verwendet. Die häufigsten Nutzungsarten sind Telefonie, Kommunikationsapps (WhatsApp, Telegram, etc.) sowie Internetnutzung. Nur zwei Teilnehmende nutzen Google Street View auf dem Smartphone. Augmented Reality wird lediglich von einem Befragten genutzt. Diese Funktionen sind potentielle Inhalte der App.

Funktionalität der RiverView-App

Die zweite Hälfte des Fragebogens bezieht sich explizit auf die möglichen Inhalte der RiverView-App. Wie in Abbildung 154 dargestellt, ist eine Mehrheit von 56 % für die Implementierung einer Funktion, die Google Street View (GSV) ähnelt und durch die Nutzer eine virtuelle Flussfahrt auf ihrem Smartphone durchführen könnten. Bei Augmented Reality, also einer Erweiterung des Echtzeit-Kamerabildes durch Messdaten, ist sich die Mehrheit unsicher. Möglicherweise ist der Begriff Augmented Reality noch nicht ausreichend bekannt oder der Nutzen innerhalb der App unklar.

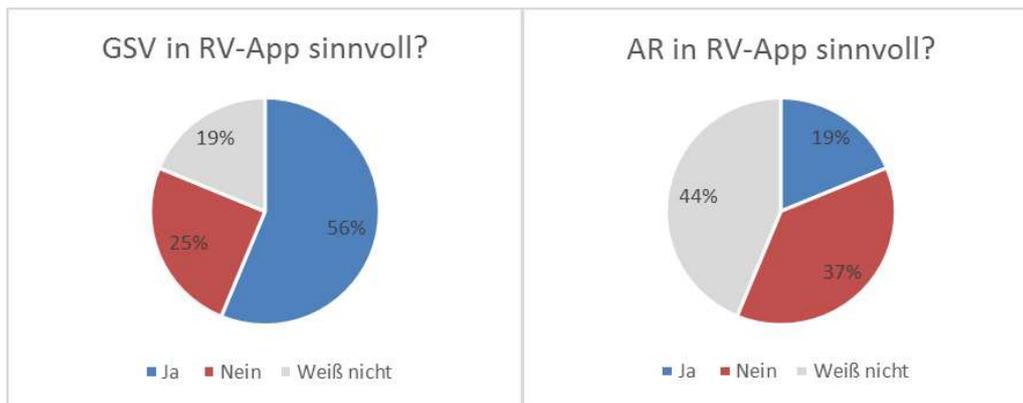


Abbildung 154: Verteilung der Antworten bezüglich der Implementierung von einer Google Street View (GSV) ähnlichen Funktion (links) und Augmented Reality (rechts)

Weiterhin wurde gefragt, welche Daten in Echtzeit und welche als historische Daten verfügbar sein sollten. An dieser Stelle sind mehrere Antworten möglich. Deshalb wird hier zur besseren Übersicht ein Balkendiagramm erstellt, das auf der y-Achse den Prozentwert der abgegebenen Stimmen je Parameter bezogen auf die Grundgesamtheit von 16 Teilnehmerinnen und Teilnehmern darstellt (Abbildung 155). Allgemein ist zu bemerken, dass für die unterschiedlichen Echtzeitdaten insgesamt 103 Stimmen abgegeben wurden, während auf die historischen Daten 83 Stimmen entfielen.

In Echtzeit (vgl. Abbildung 155) sind besonders die Temperatur, die Strömungsgeschwindigkeit und der Pegel (je 81 %) von den Teilnehmenden der Befragung in einer App erwünscht. Die niedrigste Zustimmung erhält die Gewässerstrukturgüte mit 19 %.

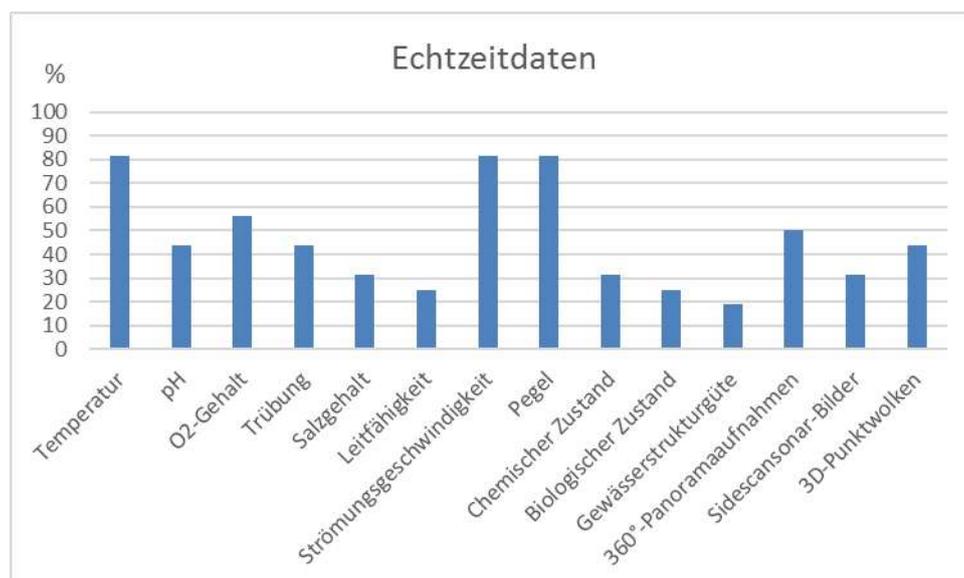


Abbildung 155: Anteil der Teilnehmenden, die die abgebildeten Parameter in Echtzeit als relevant erachten

In Abbildung 156 ist die grafische Auswertung der relevanten historischen Daten dargestellt. Hier zeigt sich bei den meisten Parametern ein mehr oder weniger deutlicher Zustimmungsverlust. Lediglich der chemische Zustand, der biologische Zustand und die Gewässerstrukturgüte gewinnen an Relevanz. Die am stärksten nachgefragten historischen Daten sind absteigend der Pegel (69 %), die Temperatur (63 %), der chemische Zustand (56 %) und die Strömungsgeschwindigkeit (50 %). Am geringsten nachgefragt sind bei den historischen Parametern die Sidescansonar-Bilder mit 6 %.



Abbildung 156: Anteil der Teilnehmenden, die die abgebildeten Parameter als historische Daten als relevant erachten

Zuletzt wurde nach den möglichen Zielgruppen einer RiverView-App gefragt. Auch hier waren mehrere Antworten möglich. Der Prozentwert wird wieder anhand der Grundgesamtheit von 16 Teilnehmerinnen Teilnehmern und den abgegebenen Stimmen je Parameter ermittelt. Wenig überraschend gingen hier die meisten Stimmen an die Wasserwirtschaft (88 %). Doch auch Hobbynutzer/innen (75 %), Anwohner/innen und Forschung (je 63 %) sind häufig angekreuzte Zielgruppen. Schülerinnen und Schülern wird mit lediglich zwei abgegebenen Stimmen (13 %) keine Partizipation gegönnt. Die Verteilung der Antworten auf die Frage nach der Zielgruppe ist in Abbildung 157 dargestellt.

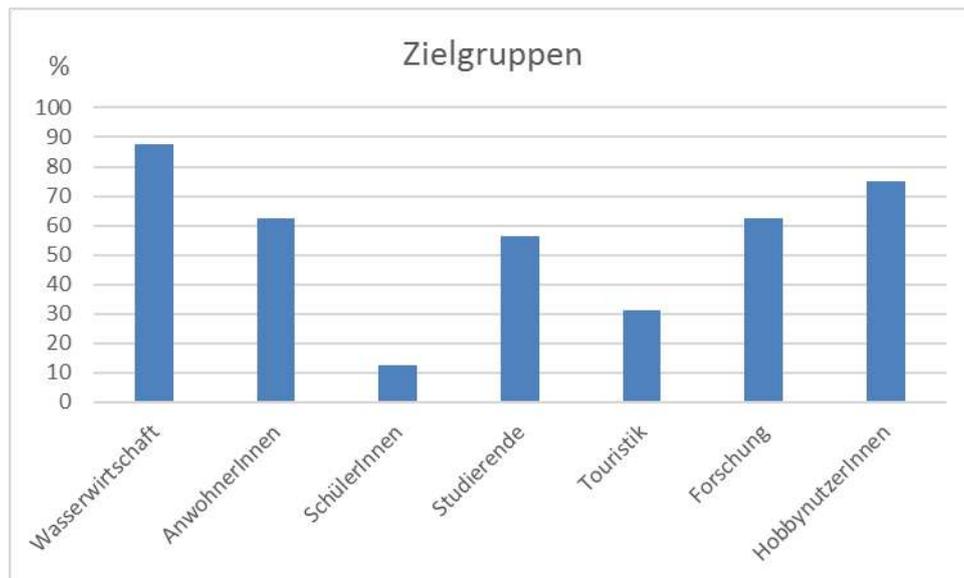


Abbildung 157: Verteilung der Antworten bezüglich der Zielgruppe der RiverView-App

:

Umsetzung der RiverApp

Die RiverView-App wurde für Android-Systeme konzipiert und umfasst ein Menü, in dem der Nutzer die verschiedenen Parameter der Multiparametersonde auswählen kann. Diese sind die Dichte, die gelösten Stoffe, die Leitfähigkeit, die O₂-Konzentration, die O₂-Sättigung, die Salinität, die Temperatur, die Trübung und der pH-Wert. Die getroffene Wahl wird dann auf einer Karte als farbiger Streckenverlauf angezeigt. Die Karte ist dreh- und zoombar. Am unteren Rand befindet sich die Legende des jeweiligen Parameters. In der folgenden Abbildung 158 ist auf der linken Seite ein Screenshot des Menüs mit der Auswahl der Temperatur und auf der rechten Seite die entsprechende Karte mit dem Temperaturverlauf zu sehen. Gezeigt wird hier ein Abschnitt der Emscher.

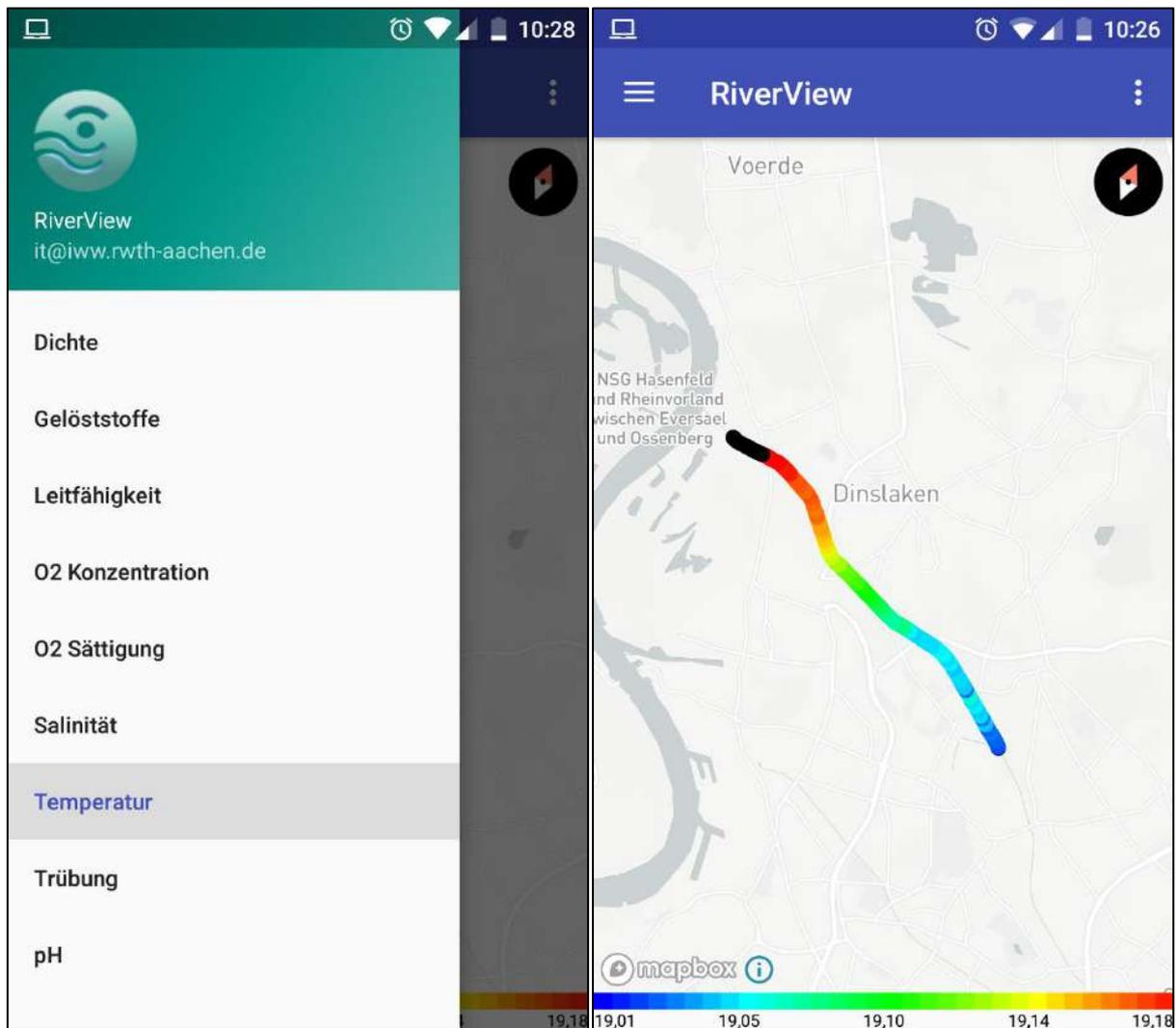


Abbildung 158: Screenshots aus der RiverView-App. Links: Menü, Rechts: Karte

Die App kann zukünftig im Umfang erweitert werden. So ist es sinnvoll auch die Ergebnisse des Sidescan-sonars, der 360°-Kamera etc. einzubinden. Außerdem kann die GPS-Funktion des Smartphones genutzt werden, indem der Standort des Nutzers in der Karte markiert wird. Auch eine automatische Anpassung der Kartenlegende an den betrachteten Abschnitt kann von Nutzen sein. Diese und andere Funktionen können in einem Menüpunkt „Einstellungen“ ein- und abgeschaltet werden.

5.10.5 Kommunikation mit externen Gruppen, Wissensmanagement, Dissemination der abgestimmten Vorhabensergebnisse und Empfehlungen

Während der Projektlaufzeit fand eine intensive Öffentlichkeitskommunikation statt. Die Ergebnisse wurden regelmäßig auf Messen, in Veröffentlichungen (siehe Kapitel 6) und über den Projekt-Twitter Account @OrangeRiverBoat sowie in Fernsehbeiträgen im WDR und ZDF dargestellt. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 159 zu sehen, wo das RiverBoat für ein ZDF-Kamerateam auf dem Rhein vorgeführt wurde. Dadurch erlangte das Projekt viel Aufmerksamkeit und es wurden neue Ideen zur Erweiterung generiert.



Abbildung 159: Fernsehauftritt am Rhein

Ein Schwerpunkt der Öffentlichkeitskommunikation stellte die Teilnahme an Messen und Symposien dar. Das Projekt RiverView wurde im Laufe der Projektzeit auf zahlreichen Veranstaltungen verschiedener Größe präsentiert, in Form von Messeständen und/oder Vorträgen. Hierzu wurde im Konsortium Hand in Hand gearbeitet, beispielweise wurde das RiverBoat auf einem Stand von SEBA auf dem Bochumer Hydrometrikolloquium, begleitet durch Mitarbeiter des FiW, vorgestellt.

Messen/Veranstaltungen

- IWASA: 2016, 2017, 2018, 2019, 2020
- IFAT: 2018
- Essener Tagung: 2017, 2018
- Bochumer-Hydrometrie-Kolloquium 2019

- Wasserrahmenrichtliniensymposium: 2017 und 2018
- Wissensnacht Ruhr, 2016
- 5-Jahresfeier der Johannes-Rau-Forschungsgemeinschaft 2019
- ZUSE-Tag 2019
- FiW-Forum: 2017, 2018, 2019
- RWTH Wissenschaftsnacht 2019
- Rewam-Anwenderworkshops 2019: Dresden und Erfurt

Fernsehauftitte und andere Öffentlichkeit

- Talk aus der Wanne 2019, [Interview im Rahmen von Aachen 2025](#)
- WDR-Lokalzeit Münsterland
- ZDF-Plan-B
- ZDF-Planet e
- ReWaM-Interview-RedeFluss (<https://bmbf.nawam-rewam.de/redefluss-fuenf-fragen-an-gesa-kutschera/>)

Eine Liste der Veröffentlichungen ist Kapitel 6 zu entnehmen.

Darüber hinaus wurden kontinuierlich Werbematerialien wie Flyer und Roll-Ups produziert.

Die Öffentlichkeitskommunikation wurde in vielfältiger Weise verfolgt und kann durchweg als Erfolg gewertet werden. Insbesondere die Messeauftritte (bspw. IFAT 2018, Abbildung 160) und die Vorträge auf verschiedenen Veranstaltungen haben dazu geführt, dass sich das Projekt einer großen Bekanntheit in der Fachöffentlichkeit erfreut. In einer Vielzahl von intensiven Gesprächen zwischen Mitarbeitern des Konsortiums und den Fachleuten aus verschiedenen Bereichen der Wasserwirtschaft konnten die Anwendungsfälle aufgearbeitet werden und vielfältiges Feedback zu den Projektinhalten eingeholt werden.

Hieraus haben sich auch schon während der Projektlaufzeit Verwertungsmöglichkeiten ergeben. So konnten durch Kontakte, die auf Veranstaltungen geknüpft wurden, bereits Dienstleistungsprojekte verschiedener Größe und verschiedenen Inhalts durchgeführt werden.



Abbildung 160: RiverView auf dem Stand des BMBF bei der IFAT 2018

Besonders hervorzuheben sind zwei Unterstützungselemente zur wirtschaftlichen Verwertung während der Projektlaufzeit durch Aktivitäten des Vernetzungs- und Transfervorhaben ReWaMnet und der aktiven Verknüpfung von RiverView mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zur Mitwirkung in Pilotprojekten des Blauen Bands Deutschland durch den Projektträger.

Im Rahmen des Vernetzungsvorhabens ReWaMnet, geleitet durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde, wurden unter anderem zwei Anwenderworkshops durchgeführt, die der Vorstellung ausgewählter ReWaM-Verbundprojekte vor potentiellen Anwendern dienten. In Kurzvorträgen sowie Diskussionen in kleinen Gruppen wurden viele spannende Informationen zu potentiellen Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse der Forschungsprojekte im Anwendungsbezug der jeweiligen Besucher der Workshops ausgetauscht.

5.11 Projektkoordination

Das FiW agierte als Projektkoordinator in RiverView. Während der Projektlaufzeit brachte es die Projektpartner zusammen und organisierte zahlreiche Projekttreffen in Aachen, Berlin, Kaufbeuren und in Hohenroda. Dort wurde der aktuelle Stand der Arbeiten der Projektpartner und des FiWs besprochen, Informationen ausgetauscht und bei einigen Treffen auch gemeinsame Messfahrten durchgeführt wie bspw. am 03.05.2017 in Berlin im Humboldthafen und am 22.04.17 in der Werra bei Fulda.



Abbildung 161: Zahlreiche Projekttreffen wurden durch das FiW organisiert.

Einen engen Austausch gab es mit dem Vernetzungs- und Transfervorhaben ReWaMnet, u.a. durch die Teilnahme von Projektpartnern in den Querschnittsthemen 1 „Wissenstransfer und Praxistransfer“ und 2 „Probenahmestrategien und Methoden“. Das RiverView-Team beteiligte sich auch, vertreten durch Dr. Friedrich-Wilhelm Bolle, am Lenkungsreis, um die Erkenntnisse und Erfahrungen mit den Verbundprojekten zu teilen und die Eindrücke in die weitere RiverView-Projektarbeit einfließen zu lassen.

In verschiedenen Veröffentlichungen (bspw. HyWa: Kutschera et al., 2018) wurde das Forschungsprojekt dargestellt. Eine vollständige Liste der Veröffentlichungen ist Kapitel 6 zu entnehmen.

Das RiverBoat bzw. das Projekt RiverView wurde auf verschiedenen Messen vorgestellt. Darunter die IFAT 2018 in München, das IWASA 2018, 2019 und 2020 in Aachen sowie auf den

ReWaM-Anwenderworkshops in Erfurt und Dresden. Das Projekt Riverview wurde ebenfalls auf der weltgrößten Messe für Vermessungstechnik, der INTERGEO 2016, vorgestellt.

Das FiW hat das Konsortium weiterhin auf den Anwenderworkshops von ReWaMnet vertreten, bei denen mit verschiedenen potentiellen Anwendern die Verwertungsmöglichkeiten eruiert wurden. In Abbildung 162 ist das RiverBoat beim ReWaM-Anwenderworkshop in Dresden, sowie die Präsentation eines Gewässers in einer VR-Brille zu sehen.



Abbildung 162: ReWaM-Workshop in Dresden

6 Erfolge und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

- Tabatabaei, S.; Blankenbach, J.; Effkemann, C.; Kutschera, G.: Ermittlung der Ufervegetation aus Punktwolken zur Ableitung von Parametern für ein Gewässergütemodell, vorgesehen für allgemeine Vermessungs-nachrichten (avn), in Bearbeitung
- Schwermann, R., Effkemann, C., Hein, N., Kutschera, G., Blankenbach, J. (2019): RiverView – Monitoring von Gewässerparametern an kleinen und mittleren Fließgewässern mit USV. allgemeine Vermessungs-nachrichten (avn), Heft 05/19, Wichmann Verlag im VDE Verlag, Offenbach, Seiten 136-145, ISSN 0002-5968.
- Kutschera, G., Blankenbach, J., Bolle, F.-W., Jagow, M.-L., Sivicki, T., Wirtz, J. (2018): RiverView® – innovatives Gewässermonitoring mit unbemannten mobilen Messtechniken. Tagungsband zur 51. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. 14.03.-16.03.2018, Essen. Reihe "Gewässerschutz - Wasser - Abwasser". Band 147. ISBN: 978-3-938996-53-9.
- Schwermann, R., Effkemann, C., Hein, N., Kutschera, G., Blankenbach J. (2018): RiverView® – Monitoring von Gewässerparametern an kleinen und mittleren Fließgewässern mit USV. Hydrographie 2018 – Trend zu unbemannten Messsystemen. Beiträge zum 170. DVW-Seminar und 32. Hydrographentag. 12.06.-14.06.2018, Lindau. DVW-Schriftenreihe. Band 9. ISBN: 978-3-95786-165-8.
- Kutschera, G., Blankenbach, J., Blut, C., Bolle, F.-W., Effkemann, C., Gahlaut, S., Hein, N., Jagow, M.-L., Schüttrumpf, H., Schwermann, R., Tabatabaei S., Wöffler, T. (2018): Monitoring kleiner und mittlerer Fließgewässer mittels bemannter und unbemannter Wasserfahrzeuge – Ergebnisse des Projektes RiverView. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 62. Jahrgang, Heft 6., 12.2018.
- Wehmeyer, D., Kutschera, G. (2018): RiverView® - Visualisation and Communication via Virtual Reality. Young Water Researchers Symposium (YoWaReS) 2018. 26.11.2018, Aachen.
- Wöffler T., Engels, R., Blankenbach, J., Effkemann, C., Schüttrumpf, H. (2017): „RiverView – Eine virtuelle Flussfahrt“. Tagungsbeitrag des 47. IWASA: Living Rivers – Neues aus Praxis und Forschung. ISBN 978-3-8440-5499-6, Shaker Verlag.
- Kutschera, G., Schwermann, R., Blankenbach, J., Heller, G., Bolle, F.-W. (2017): RiverView – räumlich und zeitlich hochaufgelöste Gewässerdatenerfassung. In: wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, Ausgabe September 2017.
- Bolle, F.-W., Kutschera, G. (2017): Ein innovatives neues Instrument zur Gewässerbewertung. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft – Neue Instrumente für die Siedlungswasserwirtschaft Wasserwirtschaft 4.0.

- Helm, B., Wiek, S., Krebs, P., Engels, R., Stecking, M., Bolle, F.-W. (2017): Die Gewässer lückenlos erfassen – Konzepte und Ansätze für eine durchgängige Aufnahme und Auswertung von Gewässereigenschaften. In: KW-Korrespondenz Wasserwirtschaft, GFA, Heft Nr.4 (pp. 203-208).
- Effkemann, C., Schwermann, R., Blankenbach, J. (2017): Kalibrierung und Navigation eines Überwasser-Mapping-Systems für die Erfassung von bildhaften und sensorischen Gewässerparametern. In: W. Lienhart (Ed.), Ingenieurvermessung 17. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, 2017 (pp. 113–130). Berlin/Offenbach: Wichmann.
- Hein, N., Blankenbach, J. (2017): Vergleich von Postgis und Rasdaman als Geodatenbanken für großvolumige Bilddatenbestände eines mobilen Mappingsystems. In: AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik, vde- Verlag.
- Blankenbach J. (2016): Raum-zeitliche Geoinformation für die Wasserwirtschaft 4.0, Gastbeitrag acwa aktuell, Herausgeber acwa – Aachen Wasser.
- Engels, R., Schüttrumpf, H., Blankenbach, J., & Schwermann, R. (2016): RiverView – Die Digitalisierung der Wasserwirtschaft durch hochaufgelöste raumzeitliche Informationsmodellierung. In: Tagungsband zur 49. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, 02.-04.03.2016 in Essen, ISBN 978-3-938996-45-4, Essen.
- Kutschera, G., Engels, R., Bolle, F.W., Schüttrumpf, H., Barneveld, H., Zethof, M. (2016): Die Zukunft des Hochwasserschutzes als Teil der Wasserwirtschaft 4.0 - ein erster Blick durch die digitale Brille. Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2016 (9), Nr. 11, S. 674, ISSN 1865-9926, Hennef.
- Wöffler, T., Engels, R., Schüttrumpf, H. (2016): RiverView – Eine virtuelle Flussfahrt. In: Wasser- und Abfall, Ausgabe 6/2016.

Durchgeführte Studentische Arbeiten

- Abelen, J. (2018): Evaluierung von GIS-Frameworks für die webbasierte Datenbereitstellung und 360°-Bildviewerintegration im Projekt RiverView®. Masterarbeit am Geodätischen Institut der RWTH Aachen University.
- Jagow, M.-L. (2016): Sensorgestützte Aufnahme physikalischer und chemischer Fließgewässerparameter: Anwendungsmöglichkeiten und –grenzen. Masterarbeit am Geographischen Institut der RWTH Aachen University
- Kasper, K. (2019): Untersuchungen zur Generierung der Uferlinien von kleinen bis mittleren, unverbauten Gewässern aus Seitensichtsonardaten im Vergleich mit alternativen Methoden. Masterarbeit am Geodätischen Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme im Studiengang Umweltingenieurwissenschaften
- Kasper, K. (2016): Anforderungen an wasserwirtschaftliche Daten im Wasserverband Eifel-Rur (WVER) und Emschergenossenschaft/Lippeverband (EGLV). Bachelorarbeit am Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University
- Klatt, L. (2017): Entwicklung und Untersuchung eines Laser-Line-Scanning-Systems für die bathymetrische Erfassung der Gewässersohle in kleinen Fließgewässern. Bachelorarbeit am Geodätischen Institut der RWTH Aachen University.
- Knollmann, P. (2020): Development of an approach for the use of artificial neural networks for analysis of river surroundings with semantic image segmentation. Masterarbeit im Studiengang Sustainable Management – Water and Energy am Lehr- und Forschungsgebiet Ingenieurhydrologie.
- Oepen K. (2018): Untersuchungen zu hochauflösenden USB-Platinen-/Industriekameras und deren Eignung für photogrammetrische Messaufgaben. Masterarbeit am Geodätischen Institut der RWTH Aachen University.
- Shariati M. (2019): Untersuchungen zur Echolot gestützten Sohlhöhenvermessung von Gewässern (Projekt River-View) im Hinblick auf den Zusammenhang von Messsignal und Sohlbeschaffenheit. Projektarbeit an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe im Studiengang Umweltingenieurwesen und Modellierung in Kooperation mit dem FIW an der RWTH Aachen
- Tabatabaei, S. (2018): Detaillierte Untersuchung der Ufervegetation und Ableitung von Empfehlungen zur Anpassung der Parameter des DWA-Gewässergütemodells. Masterarbeit am Geodätischen Institut der RWTH Aachen University.
- Winandi, S. (2018): Bestimmung der Uferlinien von kleinen Fließgewässern anhand von photogrammetrischen Bilddaten und bildbasierten Punktwolken. Masterarbeit am Geodätischen Institut der RWTH Aachen University.

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., Hyyppä H., Kaartinen H., Hyyppä J. & Jaakkola A (2009): Application of Boat-based Laser Scanning for River Survey. *Earth Surface Processes and Landforms* 34.
- Allan Variance, Technical Report, Workshop on Enhancement of Helicopter Fault Diagnostics Methodologies, Iowa State University, 1998, Virginia Beach, VA. Url: <http://home.engineering.iastate.edu/~shermanp/AERE432/lectures/Rate%20Gyros/Allan%20variance.pdf>
- Bauer, M. (2018): Vermessung und Ortung mit Satelliten – Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme. 7. Auflage, Wichmann / VDE Verlag, Berlin/Offenbach.
- Bens, O., Hüttel, R.F. [Hrsg.]: Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10. Deutsches GeoForschungszentrum, Potsdam.
- Blankenbach, J., Schwermann, R. (2014): Photogrammetrische Deformationsvermessung von Haubenschildrohren für den Rohrvortrieb. In Wieser (Hrsg.): Ingenieurvermessung 14 – Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich 2014; Zürich, Schweiz, 14-17. Januar 2014, S. 15-25, Wichmann Verlag, 2014; Heidelberg, ISBN: 978-3-87907-535-5
- 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.
- Buckup, L., Buckup. M., Heller, G., Klopries, E.-M., Lautenschläger, R. (2016): Sedimentuntersuchungen in Talpserren – eine komplexe Aufgabe. Vortrag beim 39. Dresdner Wasserbaukolloquium 2016 „Gewässerentwicklung & Hochwasserrisikomanagement“. Hrsg.: Technische Universität Dresden – Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Wasser und Technische Hydromechanik
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit – BMU [Hrsg.] (2013): Die Wasserrahmenrichtlinie – Eine Zwischenbilanz zur Umsetzung der Maßnahmenprogramme 2012.
- Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V. (2007): Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse - BWK-Merkblatt, Band M 3. 4., veränd. Aufl.; Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

- Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V. (2008): Detaillierte Nachweisführung immissionsorientierter Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen gemäß BWK-Merkblatt 3 - BWK-Merkblatt, Band M 7. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- 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/Ofenbach.
- El-Sheimy N. (2005): An overview of mobile mapping systems. In FIG Working Week 2005 and GSDI-8, Cairo, Egypt.
- Engels R., Schüttrumpf H., Blankenbach J. & Schwermann R. (2016): Die Digitalisierung der Wasserwirtschaft durch hochaufgelöste, raumzeitliche Informationsmodellierung. Gewässerschutz - Wasser - Abwasser, 2016, ISBN 978 3 938996 45 4, Essen.
- Europäische Gemeinschaft (EG) (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik
- 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.
- EU KOMMISSION (2019): COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT – European Overview - River Basin Management Plans. Brussels, 26.2.2019 SWD(2019) 30 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019SC0030>
- Forster C. (2016): Visual Inertial Odometry and Dense Reconstruction for Mobile Robots, PhD Dissertation, Faculty of Business, Economics and Informatics, University of Zuerich (UZH).
- Godha, S. Performance Evaluation of Low Cost MEMS-Based IMU Integrated With GPS for Land Vehicle Navigation Application Master's University of Calgary, Canada, 2006.
- Goedeking, A. (12. 03. 2015). Großes Interview. (K. Kasper, Interviewer) Düren.

- Groves, P. D., Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems. Artech House: Boston; London, 2013.
- 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.
- Hoffmann, T. G. & Mehl, D. (2010): Entwicklung und Bereitstellung einer Bewertungsmethodik zur Beurteilung des Natürlichkeitsgrades des hydrologischen Regimes der Oberflächenwasserkörper (Fließgewässer und Seen) gemäß EU-WRRL im Land Sachsen-Anhalt. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B.,
- Hunger S., Karrasch P. & Wessolek 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.
- Jörrens, F. (04. 12. 2015): Telefonat Schadstoffe und prioritäre Stoffe WVER. (K. Kasper, Interviewer).
- 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.
- Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) (2011): Strahlwirkungs- und Trittsteinkonzept in der Planungspraxis, LANUV Arbeitsblatt 16; Recklinghausen.

- LAWA: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (Herausgeber) (1999). Gewässerstrukturgüte-kartierung in der Bundesrepublik Deutschland: Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer.
- Leibundgut, C. & Hildebrand, A. (1999): Natürlicher Abfluß und Abflußdynamik. In: Geller, W. [Hrsg.]: Flusseinzugsgebietsmanagement – Herausforderung an die Forschung. Tagungsband der internationalen Fachtagung am 8. und 9. Juni 1999. Bericht des UFZ Leipzig-Halle GmbH, Sektion Gewässerforschung. 31/1999.
- Leibundgut, C., Eisele, M., Hildebrand, A. und Steinbrich, A. (2001): Einzugsgebietsbezogene Bewertung der Abfluss- und Stoffdynamik als Grundlage eines Bewertungsverfahrens "Hydrologische Güte" zum operationellen Einsatz im nachhaltigen Flussgebietsmanagement. Institut der Hydrologie der Universität Freiburg, Freiburg.
- Leibundgut, C. & Eisele, M. (2005): Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens „Hydrologische Güte“ als Expertensystem zum operationellen Einsatz im Flussgebietsmanagement. Abschlussbericht zum Projektvorhaben BWC 21013, Forschungszentrum Karlsruhe.[<http://www.hydrology.unifreiburg.de/forsch/hydgue/BW-Plus-Endbericht-2005-BWC-21013.pdf>; 18.02.2009].
- Leithmann, K., Schitthelm, D. (2009): Wirkungseffizienz als Entscheidungskriterium zur Auswahl immissionsbezogener Maßnahmen der Niederschlagswasserbehandlung. Gewässer – Wasser – Abwasser, Band 216, Aachen 2009, ISBN 978-3-938996-22-5, Hrsg.: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp. Aachen.
- Linnenweber, C., Mirbach, E. (2013): Synergien und Konflikte zwischen Gewässerschutz, Naturschutz und Hochwasserschutz. ISBN 978-3-938996-38-6. Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.
- 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.
- Petruck, A. (10. 12 2015b). Telefonat Teil 2. (K. Kasper, Interviewer).

- Petruck, A. (21. 12 2015c). E-Mail . (K. Kasper, Interviewer).
- 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).
- Planungsbüro Koenzen (2018): RiverView – Vergleich terrestrische Messung und automatische Messung mittels RiverBoat. Bericht, unveröffentlicht.
- Rehfeld-Klein, M., Wegner, R., Sieker, H., Kail, J., Pottgiesser, T. (2009): Integrativ planen! KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 2009 (2), Nr. 12.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J. and Braun, D. P. (1996): A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. In: Conservation Biology, Nr. 10 (4), pp. 1163-1174.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, R. and Braun, D. P. (1997): How much water does a river need? In: Freshwater Biology, Nr. 17, pp. 231-249.
- Schmidt, G., Gretzschel, O., Volk, M. und Uhl, M. (2003): Konzept zur skalenspezifischen Modellierung des Wasser- und Stoffhaushaltes im Projekt FLUMAGIS. In: Hennrich, K., Rode, M. und Bronstert, A. [Hrsg.]: 6. Workshop zur großskaligen Modellierung in der Hydrologie. Flussgebietsmanagement. Kassel: Kassel University press.
- Schwermann R. & Effkemann C. (2002): Kombiniertes Monoplotting in Laserscanner- und Bild-daten mit PHIDIAS. In: Luhmann (Hrsg.): Photogrammetrie und Laserscanning – Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management, Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- Solá J. Quaternion kinematics for the error-state Kalman filter, 2017. Url: <http://www.iri.upc.edu/people/jsola/JoanSola/objectes/notes/kinematics.pdf>
- Szeliski R. (2011): Computer Vision – Algorithms and Applications. Springer Verlag, London.
- Titterton, D.; Weston, J. L., Strapdown Inertial Navigation Technology. IET, 2nd edition 2004.
- 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 smartphone-based robot system for energy-efficient aquatic environment monitoring. IPSN ,15 Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks.
- Wasserverband Eifel-Rur (WVER) (2009): Auswirkungen naturnaher Rückbaumaßnahmen und naturnaher Laufabschnitte – Gezielte Nutzung von Strahlwirkungen und Trittschneif-

- fekten zur Erreichung der Ziele der EG-WRRL im EZG Eifel-Rur. Systemanalyse und Entwicklung einer regelbasierten Entscheidungshilfe für die Bewirtschaftungsplanung an der Eifel-Rur, unveröffentlicht.
- Wermter, P., Claßen, S., Schitthelm, D. (2013): Bewertung von siedlungswasserwirtschaftlichen und hydromorphologischen Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung auf den ökologischen Zustand von Fließgewässern – Maßnahmeneffizienz. ISBN 978-3-938996-38-6. Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.
- Wermter, P., Maaßen, M., Spengler, B. und Patil, S. (2014): Methoden zur Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für den Schutz und die Entwicklung von Oberflächengewässern aus hydrologischer Sicht - Pilotstudie am Roßbacheinzugsgebiet in Dortmund. In: FiW [Hrsg.]: Anpassung siedlungswasserwirtschaftlicher Infrastrukturen an die Auswirkungen des Klimawandels. Oekom Verlag (in Druck).
- Woodman, O. J., An Introduction to inertial navigation, University of Cambridge Computer Laboratory, Technical Report. 696, 2007. Url: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>
- 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.

Projektpartner



www.river-view.de



Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland“ (ReWaM) im Förderschwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement“ (NaWaM)