

Ein integriertes LSPIV Fernerkundungssystem, Sensordatenfusion und Bildverarbeitung für Assistenzsysteme im regulären Einsatz der Fährschifffahrt

Nick Rüssmeier^{1,2}, Anael Ngome¹

¹Jade Hochschule, Fachbereich Ingenieurwissenschaften, Wilhelmshaven, Deutschland

²Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI), Marine Perception, Oldenburg, Deutschland

Zusammenfassung

Zentrale Herausforderungen der operativen Schifffahrt sind der nachhaltige und optimale Schiffsbetrieb sowie die Reduktion von Emissionen. Insbesondere in Strömungs- und Tidengewässern lassen sich Treibstoffeinsparungen erzielen, wenn Umwelteinflüsse für eine sparsame Fahrweise ausgenutzt werden. Im Rahmen der Forschung an Assistenzsystemen zur Erleichterung und Effizienzsteigerung des Schiffsbetriebes wird dazu ein Umweltsensor-System für lokale live Strömungsmessungen für den Betrieb an Bord einer Fähre entwickelt. Auf Basis dieser Sensordaten errechnet ein KI-basiertes Assistenzsystem die zum Fahrzeitpunkt manövertechnisch effizienteste Route im regulären Fährbetrieb. In diesem Zusammenhang präsentieren wir ein integriertes LSPIV (Large Scale Particle Imaging Velocimetry) Fernerkundungssystem, welches Langzeitmessreihen in Form ortsveränderlicher Vektorfelder oberflächennaher Strömungsverhältnisse mit einem relativ großen räumlichen Abdeckungsbereich bspw. Strömungen von Flüssen in realen Studiumgebungen im Fahrtgebiet über Flüsse erfasst und analysiert. Mit der aktuellen Forschungsarbeit werden Funktionalitäten für einen einfachen, automatisierten und kontinuierlichen mobilen Einsatz implementiert und getestet. Neben der automatischen extrinsischen Kalibrierung der eingesetzten Thermalkamera zur Kompensation der sich ständig verändernden variablen Ausrichtung an Bord der Fähre unterwegs, geben wir einen Einblick in die Architektur und integrierte Datenstromverarbeitung des optischen Sensorsystems. Die Studie schließt mit den Ergebnissen der frühzeitigen Verifikation des Fernerkundungssystems im Strömungskanal ab, und gibt einen Ausblick auf die weitere Integration auf einem Fährschiff mit dem Einsatz eines KI-basierten Assistenzsystems für den regulären Fährbetrieb.

Keywords: Fernerkundung, optische Strömungsmessverfahren, automatisierte großräumige Partikelbild-Geschwindigkeitsmessung (LSPIV), Fährschifffahrt, Assistenzsystem Energieeinsparung.

Einleitung und Motivation

Im Rahmen der Forschung an Assistenzsystemen zur Erleichterung des Schiffsbetriebes ist es eine Herausforderung, die nautischen Erfahrungen in ein automatisches Assistenzsystem zu überführen. Für die Navigation auf Wasserstraßen ist heutzutage noch eine sehr genaue Kenntnis über das zu befahrene Revier notwendig. Um das Schiff unter ständig wechselnden Umwelteinflüssen, wie Wind und Strömung, sicher ans Ziel zu bringen, wird die vorherrschende Umwelt- und Verkehrslage in aktueller Situation durch die schiffführende Besatzung an Bord durch unterschiedliche Informationsquellen aufgenommen und bewertet. In der See- und Binnenschifffahrt kann hierfür beispielsweise auf Kurs- und

Bahnregler zurückgegriffen werden. Ein System zur Manöroptimierung entlang vorgegebener Routen [1] kann den Kurs eines Schiffes, entsprechend der vorliegenden Umweltsituation somit ermitteln und für den Schiffsführer als Entscheidungsunterstützung für die Navigation zur Verfügung stellen. Mittels dem LSPIV (Large Scale Particle Imaging) Messverfahrens könnten Vektorfelder von oberflächennahen Strömungsverhältnissen mit einem relativ großen räumlichen Abdeckungsbereich (bspw. Strömungen von Flüssen in realen Studiumgebungen) berechnet und in einem aktuellen situativen Lagebild ausgegeben werden. Dieses Messverfahren bietet somit eine Informationsbasis für weitere Navigationslösungen sowie Assistenzsysteme zur Erleichterung des Schiffsbetriebes.

Mit diesem Beitrag stellen wir die Entwicklung eines automatisierten und integrierten LSPIV Fernerkundungssystems zur mobilen optischen Strömungsmessung vor. Der Aufbau der Arbeit widmet sich eingehend einer kurzen Vorstellung des zu Grunde liegenden Messverfahrens sowie dem Stand der Wissenschaft und Technik mit vorangegangenen Arbeiten, hierauf folgt eine Darstellung der Sensorsystemarchitektur und Datenstromverarbeitung sowie Ergebnisse der frühzeitigen Verifikation im Strömungskanal, und schließt mit einer Zusammenfassung und Ausblick der weiteren Integration auf einem Fährschiff mit dem Einsatz eines KI-basierten Assistenzsystems für den regulären Fährbetrieb.

Stand der Wissenschaft und Technik, vorangegangener Arbeiten

Bei dem PIV-Messverfahren handelt es sich um ein bildauswertendes Messverfahren. Mittels LSPIV wird das PIV-Messverfahren auf einen größeren räumlichen Abdeckungsbereich appliziert. Insgesamt bieten (passive/aktive) optische Sensoren durch deren unterschiedlichen Sensor-Charakteristika ein weites elektromagnetisches Spektrum für das Anwendungsfeld in maritimen Umgebungen oder Binnenwasserstraßen. Als Grundlage für die LSPIV Berechnung dienen Merkmale in einem aufgenommenen Bild in Form von natürlich vorkommenden Tracern, wobei je nach Spektralbereich (visuell oder infrarot) entweder Schaumkronen/Whitecaps oder Signaturen auf dem Wasser, welche einen von ihrer Umgebung unterschiedlichen Emissionskoeffizienten aufweisen, gut genutzt werden können [2].

Die grundlegende Funktionsweise der zeitaufgelösten PIV Analyse basiert auf der Kreuzkorrelation zweier aufeinanderfolgenden Bildsequenzen (Frame), welche in einem definierten Zeitabstand Δt aufgenommen wurden. Die zu analysierenden Bildpaare werden hierzu in ortsbezogene Abfragesegmente unterteilt und der jeweilige Korrelationskoeffizient als statistische Verteilung von Tracer-Verschiebung in Subpixelbereich von x - und y - Koordinaten im Abfragebereich gebildet. Nach der Analyse einer Verschiebung von x - und y - Koordinaten werden Vektoren gebildet $[px/Frame]$ und darauffolgend ein Orthorektifikationskoeffizient $[mm/px]$ auf die Vektormatrix angewendet, somit Bildkoordinaten in Weltkoordinaten mittels extrinsischer Korrekturparameter überführt. Weitere Forschungsanwendungen, wie bspw. in „LSPIV implementation for

environmental flow in various laboratory and field cases“ von Kantoush et al. [3] oder in „Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments“ von M. Muse et al. [4] oder auch Z.J. Taylor et al. [5], zeigen bereits vielfältige Möglichkeiten im Einsatz stationärer Beobachtungssysteme, bei der dieses Messverfahren auf Basis aufgezeichneter Videosequenzen zum Einsatz kam und plausible Ergebnisse bei schwierig zu messenden Umgebungssituationen erzielt wurden. Vielfältige dieser Anwendungen verwenden visuelle Kamerasysteme, welche in der Studien- oder Laborumgebung teilweise auf künstliche Tracer zurückgreifen und die Systemkalibrierung zur Orthorektifikation mittels Kontrollpunkte vor Ort mit Spezialgeräten vermessen wird. Da die großräumige Partikelbild-Geschwindigkeitsmessung empfindlich auf die vom Anwender festgelegten Parameter und Berechnungsoptionen reagiert, stellen manuelle Erfassung und Verarbeitung von Video- und Datenmaterial eine Fehlerquelle dar [6]. Es existieren weiterhin Radarsensoren zur Strömungsmessung, welche allerdings von Schiffen nicht unbedingt ökonomisch betrieben werden können [7, 8]. Und im Langzeitbetrieb von in situ hydroakustik Unterwassermesstechniken [9, 10] besteht, bspw. durch Biofouling ein erheblicher Wartungsaufwand.

Vorangegangene LSPIV-Offshore-Anwendungsstudien zeigen diesbezüglich bei stationären Langzeitbeobachtungen, dass selbst stark ungleichmäßige Strömungsverhältnisse mit Rückströmungen, starken Querströmungen usw., räumlich und zeitlich hochaufgelöst gemessen und visualisiert werden können. Von der Umgebungsbeleuchtung unabhängige Beobachtungen wurden hierbei mittels Infrarotkamera ermöglicht. Auf Basis dessen wurden nützliche Informationen für weitere Ausbaustufen und Algorithmen für ein integriertes LSPIV Fernerkundungssystem gesammelt [11, 2].

Für Anwendungen im regulären Fährbetrieb wird deutlich, dass Erweiterungen zur Automatisierung der Orthorektifikation in Bezug auf den Eigenvektor mit Translation und Rotation des an Bord befindlichen, mobilen LSPIV-Sensorsystems, sowie Funktionen zur Echtzeitanalyse und Datenfusion, notwendig und Gegenstand unserer aktuellen Forschung sind, auf die wir in diesem Beitrag eingehen. Nachfolgend wird eine Systemarchitektur sowie Datenstromverarbeitung und -fusion mit den erweiterten, implementierten Ansätzen vorgestellt, auf deren Basis eine nachrüstbare

und flexibel einsetzbare Lösung zur Strömungsmessung für unterschiedliche Anwendungsszenarien geschaffen wird.

Systemarchitektur und Funktionsweise

Mit der Architektur des LSPIV-Sensorsystems wurden flexible und erweiterbare Lösungen für den mobilen und stationären Einsatz zur Echtzeitdatenanalyse berücksichtigt und in zwei übergreifende funktionale Einheiten unterteilt: ein kamerabasiertes Sensormodul (Abb. 1, oben) mit integrierter Referenzmesstechnik zur Orts- und Lagebestimmung als inertiales Navigationssystem (Abb. 1, rechts), sowie einer dezentralen Verarbeitungseinheit (Abb. 1, unten). Um einen zuverlässigen Betrieb des Systems unter harschen und variierenden Umweltbedingungen sicherzustellen, ist die Sensortechnik in einem Outdoor-Schutzgehäuse mit Belüftung, Begleitheizung und Energieversorgung integriert. Das Sensormodul beinhaltet eine radiometrische Infrarotkamera (2), welche über Software Development Kit (SDK) angesteuert wird und kontinuierlich eine Temperaturmatrix aus dem beobachteten Sichtbereich bereitstellt. Die Temperaturmatrix wird im weiteren als Bilddatenstrom verarbeitet. Die integrierte Referenzmesstechnik (3) umfasst mehrere Sensoren zur Bestimmung der räumlichen Orientierung und Position. Über eine Inertial Measurement Unit (IMU) (3b) werden Orientierungsinformationen in Form von Roll-, Pitch- und Yaw-Winkel gemessen. Darüber hinaus stellt die IMU zusätzliche Messgrößen wie lineare Beschleunigungen und magnetische Orientierungsinformationen bereit. Über ein GNSS-Modul (3a) in Verbindung mit einer externen Antenne, werden darüber hinaus absolute Positions- und Zeitinformationen aufgezeichnet. Ergänzend dazu erfasst ein barometrischer Drucksensor (3c) den vorherrschenden Umgebungsdruck und ermöglicht die Ableitung von Höheninformationen des Sensorsystems.

Diese Referenzdaten werden mit einsprechenden Kameraparametern kontinuierlich in einer Schleife zur extrinsischen Korrektur mittels einer inversen Homographietransformation verrechnet, und bilden die Grundlage zur Orthorektifikation des Bilddatenstroms.

Eine dezentrale Sensorbox (5) bildet die Schnittstelle zum Sensormodul samt Energieversorgung und embedded PC zur Datenstromverarbeitung, und stellt über Netzwerkverbindung die ausgewerteten Strömungsinformationen für ein übergeordnetes KI-basiertes Assistenzsystem

zur optimierten Navigation auf der Fähre bereit. Spezifikationen einzelner Komponenten sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Insbesondere für die dynamischen Einsatzbedingungen, bieten diese Datenströme somit eine Grundlage zur automatisierten Orthorektifikation in Bezug auf den Eigenvektor mit Translation und Rotation, des an Bord der Fähre befindlichen, mobilen LSPIV-Sensorsystems.

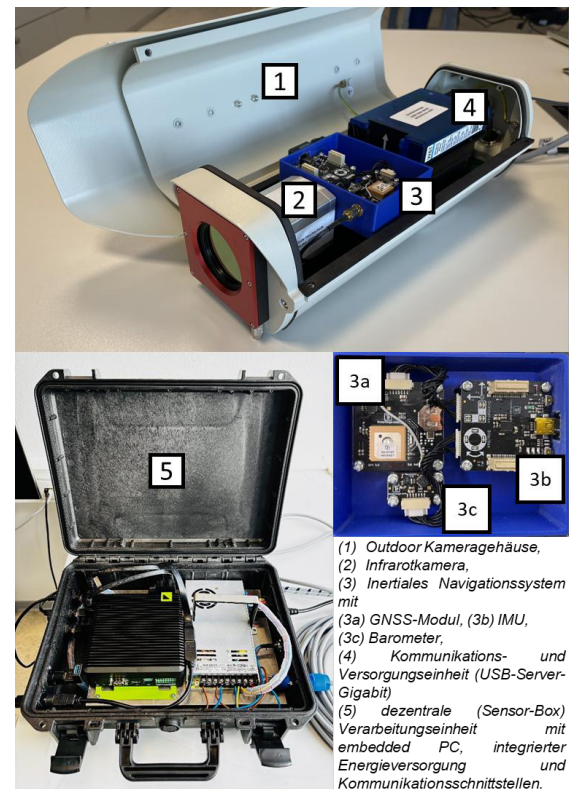


Abb. 1: Systemaufbau des integrierten LSPIV-Sensorsystems und dessen Komponenten.

Tab. 1: Übersicht der Hauptkomponenten und technischen Spezifikationen

Komponente	Typ	Spezifikationen
Radiometrische Kamera	Optris PI 640i (Mikrobolometer)	640×480 px; bis 32 Hz; 17 µm Detektor; < 40 mK NETD; ±2 °C Genauigkeit; 8–14 µm Wellenlänge
Optiken	Kalibrierte Wechselobjektive	15° x 11° / f = 41,5 mm 33° x 25° / f = 18,7 mm 60° x 45° / f = 10,5 mm 90° x 64° / f = 7,7 mm
Recheneinheit	NVIDIA Jetson Orin NX (Embedded AI Computing Modul)	8-Core ARM; 1024 CUDA Cores; AI bis 100 TOPS; 16 GB RAM; Linux OS; 10–25 W Leistung
Inertiales Navigationssystem	Tinkerforge IMU Brick 2.0 GPS 3.0 Barometer 3.0	9-DOF IMU; GNSS ±2.5 m; Barometer 300–1100 hPa; Updaterate 10 - 100 Hz

Datenstromverarbeitung und -fusion

Für die Datenstromverarbeitung und Implementierung der vielfältigen Funktionen des mobilen LSPIV-Sensorsystems wurde als Middleware das Robot Operating System (ROS 2) eingesetzt [12]. Die Open-Source-Software hat sich bereits vielfältig bei anderen Anwendungen zur Entwicklung autonomer Systeme mit Kinematik-Korrekturen, sowie der Umwelt- und Verkehrslagebilderstellung bewährt [13]. Zu Grunde liegt hierbei eine modulare Systemarchitektur mit Sensor-, Middleware- und Anwendungsebene um eine unmittelbare, leistungsfähige und echtzeitnahe Verarbeitung der Sensordaten am Einsatzort zu gewährleisten.

Durch die modulare Integration der Sensoren und Verarbeitungskomponenten innerhalb der ROS2-basierten Systemarchitektur können einzelne Komponenten und deren datenabhängige Softwaremodule unabhängig voneinander erweitert oder ersetzt werden, ohne dass sich die grundlegende Systemstruktur verändert. Eine reproduzierbare Integration wird darüber hinaus durch die Nutzung von Docker-Images unterstützt. Eine dezentrale, fehlertolerante und skalierbare Kommunikation zwischen den Systemkomponenten erfolgt über den Data Distribution Service (DDS) als standardisiertes Middleware-Protokoll. Diese Intra-Prozess-Kommunikation erlaubt einen optimierten Datenaustausch innerhalb desselben Prozesses, wodurch sich die Latenz reduziert und die Effizienz der Datenverarbeitung erhöht.

Abbildung 2 zeigt die entwickelte Datenstromverarbeitungs-pipeline mit den Verarbeitungsschritten auf Basis des UNIX-Zeitstempels. Zu Beginn erfolgt eine automatische Initialisierung der Sensoren (a). Während des Betriebs werden die Sensordaten zur Bestimmung von Position, Orientierung, Höhe und Zeit synchron erfasst und bereitgestellt. Parallel dazu wird die Temperaturmatrix des beobachteten Sichtbereichs kontinuierlich erfasst und mittels Temperatur-Mapping verarbeitet. Hierbei wird die Temperaturmatrix in ein radiometrisches 16-Bit-Bildformat überführt indem die physikalischen Temperaturmesswerte (in°C/K) auf einen Intensitätsbereich von 0 bis 65535 skaliert werden, so dass auch geringe Temperaturunterschiede zuverlässig erfasst werden. Dies ist insbesondere für die LSPIV-Analyse von Vorteil, da stabile Intensitätsgradienten die Qualität der Kreuzkorrelation und somit die Bestimmung der Strömungsvektoren verbessern.

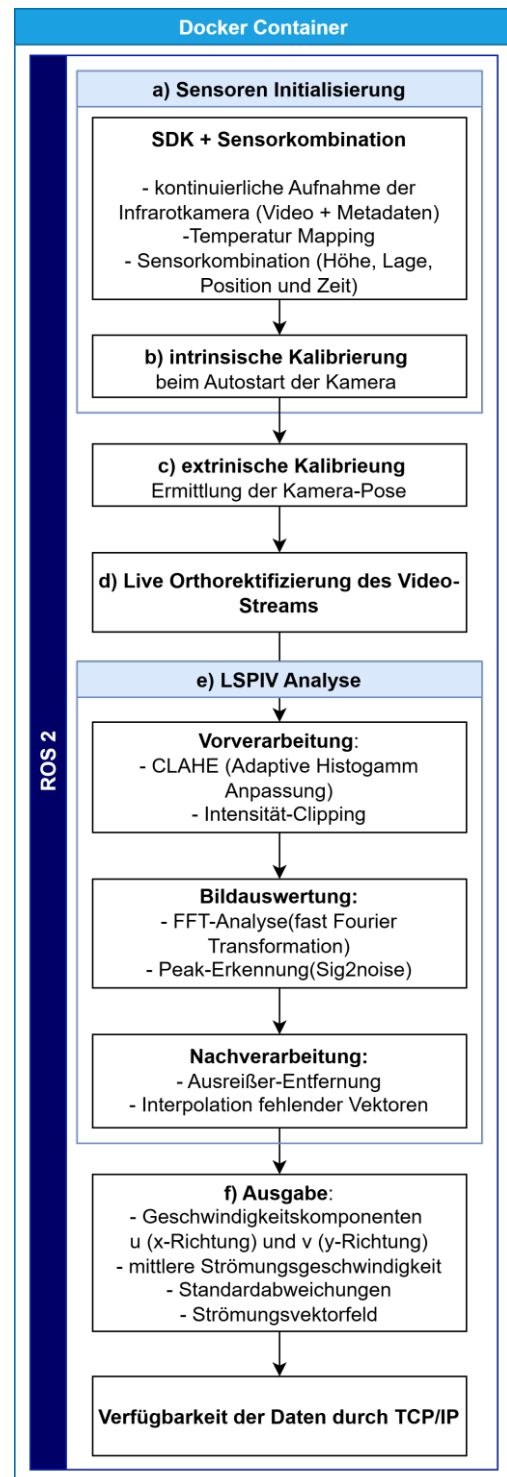


Abb. 2: Funktionsübersicht der integrierten Datenstromverarbeitung zur Echtzeitdatenverarbeitung von Sensorinitialisierung und Kalibrierung über die Auswertalgorithmik bis zur Bereitstellung der LSPIV-Strömungsmessdaten via TCP/IP in einem Netzwerk für die KI-Anwendung des Routen-Assistenzsystems auf dem Fährschiff.

Im nachfolgenden Schritt erfolgt die intrinsische Kalibrierung (b) und die automatische extrinsische Kalibrierung der Kamera zur Ermittlung der Kamerapose (c) und Orthorektifizierung der Bilddatenströme (d). Die extrinsische Kalibrierung umfasst die Bestimmung der Position sowie der Orientierung (Rotation und Translation) der Kamera im Weltkoordinatensystem. Sie bildet mit der intrinsischen Kalibrierung die Grundlage für eine Orthorektifikation. Das Ziel der extrinsischen Kalibrierung besteht in der Korrektur projektiver Verzeichnungen der Bilddaten hin zu einer maßstabsgerechten orthogonalen Ansicht. Darüber hinaus bietet sich auch die Möglichkeit ein einheitliches Weltkoordinatenmodell für multi-kamera-Beobachtungen zur Verfügung zu stellen, die bei weiteren Anwendungen [14] genutzt werden können. Über die automatische extrinsische Kalibrierung werden Position und Orientierung der Kamera in ein ENU (East, North, Up) Weltkoordinatensystem überführt [15], und bildet zusammen mit der intrinsischen Kalibrierung die Grundlage der Orthorektifikation, ohne die Notwendigkeit spezifisch festgelegte oder zuvor vermessene Kontrollpunkte aus der beobachteten Szene für die LSPIV-Analyse anzugeben. Hierbei wird mittels einer inversen Rotations- und Homographie-transformations-Matrix [16, 17] ein diskretes Pixelraster eines Bildes auf die planare Bodenebene transformiert, womit eine maßstabsgerechte orthogonale Darstellung berechnet, sowie ein einheitlicher Arbeitsbereich als Ground Bounding Box für die folgende LSPIV-Echtzeitanalyse zur Verfügung gestellt wird.

Die folgende LSPIV-Analyse (e) basiert auf dem orthorektifizierten Bilddatenstrom. Die Kernfunktionen werden hierbei über OpenPIV v. 0.25.3 [18], einer freien und quelloffener Software, via Python abgebildet. Bei der LSPIV-Analyse erfolgt zunächst eine Bilddatenvorverarbeitung, mit dem Ziel den Bildkontrast von relevanten Tracern durch eine adaptive Histogrammanpassung zu verbessern und gleichermaßen störende Intensitätseffekte zu reduzieren. Im nächsten Schritt werden zwei aufeinanderfolgende, zeitlich korrelierende Bildpaare mittels Kreuzkorrelation in Ortsbezogenen Such- und Abfragesegmente unterteilt und ausgewertet. Dabei kommt die schnelle Fourier-Transformation zum Einsatz. Die resultierende Korrelation wird hinsichtlich des Signal-Rausch-Verhältnisses bewertet, und valide Verschiebung in Subpixelbereich von x- und y-Koordinaten im Abfragebereich zur Vektorbildung verwendet. Mit der

anschließenden qualitätsorientierten Nachverarbeitung werden fehlerhafte Vektoren identifiziert und entfernt sowie ggf. fehlende Werte über Interpolationsverfahren ergänzt. Das Resultat ist ein konsistentes Strömungsvektorfeld, auf dessen Basis statistische Kenngrößen zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit als auch -Richtung sowie die zugehörige Standardabweichung kontinuierlich mit Zeitstempel in einer Zeitmessreihe zur Verfügung stehen. Die berechneten Geschwindigkeiten und dazugehörigen statistischen Kenngrößen werden abschließend in einem standardisierten Datenformat über eine TCP/IP-basierte Schnittstelle an das übergeordnete KI-basierte Assistenzsystem für die Anwendung im Fährbetrieb bereitgestellt.

Verifikation des Systems

Im Rahmen der experimentellen Verifikation des entwickelten LSPIV-Systems wurde am Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM, Wilhelmshaven) eine Messkampagne unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt. Das Ziel bestand darin, die gesamte Systemfunktionalität zur Erfassung von Strömungsvektorfeldern zu beurteilen und LSPIV-Programmparameter zur Berechnung, Verarbeitung und Analyse der Strömungsvektorfelder frühzeitig vor dem Einsatz an Bord zu optimieren. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 3 dargestellt.



Abb. 3: Übersicht experimentelle Verifikation des entwickelten LSPIV-Systems. (A) kamerabasiertes Sensormodul oberhalb des überdachten Strömungsbeckens (B); (C) Übersicht des Messaufbaus mit ADCP in situ Referenzmessung; (D) dezentrale Verarbeitungseinheit innerhalb der Containeranlage.

Darüber hinaus sollte der Einfluss geometrischer Parameter (Kamerahöhe, Kamerapose, Objektivwechsel) auf die Qualität der Orthorektifizierung beurteilt, und die so erhaltenen LSPIV-Strömungsmessdaten mit in situ Referenzmessdaten verglichen werden.

Die Kamera wurde oberhalb eines Strömungsbeckens in ca. 4,3 m Höhe montiert, wodurch die Wasseroberfläche aus definierter Höhe und Blickrichtung beobachtet werden konnte. Die Aufnahme und Verarbeitung der Bilddatenströme erfolgte über die dezentrale Recheneinheit, welche innerhalb der Containeranlage betrieben wurde. Simultan wurden in situ Referenzmessungen im Strömungsbecken ca. 20cm unterhalb der Wasseroberfläche mit einem kompakten ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, Aquadopp2, Nortek Group) erhoben und aufgezeichnet.

Die resultierenden Bilddatenströme wurden über die zuvor beschriebene LSPIV-Verarbeitungspipeline (Abb. 2) verarbeitet und entsprechende Strömungsvektorfelder berechnet (vgl. Abb. 4). Zu Beginn des Experiments wiesen die Vektorfelder eine hohe Anzahl an falsch-positiven Daten auf (Abb. 2 A), welche dann über die nachgelagerten Filterprozesse schrittweise bereinigt werden (Abb. 2 B). Die gewählten LSPIV-Filtereinstellungen waren ($\Delta t = 0,035$ s) mit Signal-Rausch-Verhältnis ($\text{sig2noise} = 1,4$), adaptive Kontrastanpassung (CLAHE-Clipping = 11.000–15.000 bei 16 Bit), Vektor-Median-Filter (Median-Threshold = 2,0), sowie Größe korrespondierender Abfragebereiche (Interrogation Areas = 38 px.). Nach der Parameteroptimierung zeigt das Endergebnis (C) ein konsistentes und physikalisch plausibles Strömungsfeld mit ausschließlich validen Strömungsvektoren.

Im Rahmen der experimentellen Verifikation wurden ebenfalls ergänzende Tests bei variierenden geometrischen Randbedingungen (Kamerahöhe, Blickwinkel, Objektivwahl) durchgeführt, um den Einfluss auf die Qualität der Strömungsmessung systematisch zu untersuchen. In diesem Zusammenhang wurden Messungen mit unterschiedlichen Objektiven (15°, 33°, 60° und 90° Sichtfeld) durchgeführt, um der Zusammenhang zwischen dem Öffnungswinkel und der Bildabdeckung auf die resultierende Messgenauigkeit zu analysieren. Zusätzlich wurde ein Nadir-Test mit dem 90°-Objektiv durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Kamerahöhe von 1,60 m das 90°-Objektiv die besten Resultate liefert. Dies ist insbesondere auf die größere abgedeckte Fläche sowie die verbesserte Erfassung von Partikelbewegungen innerhalb des Sichtfeldes

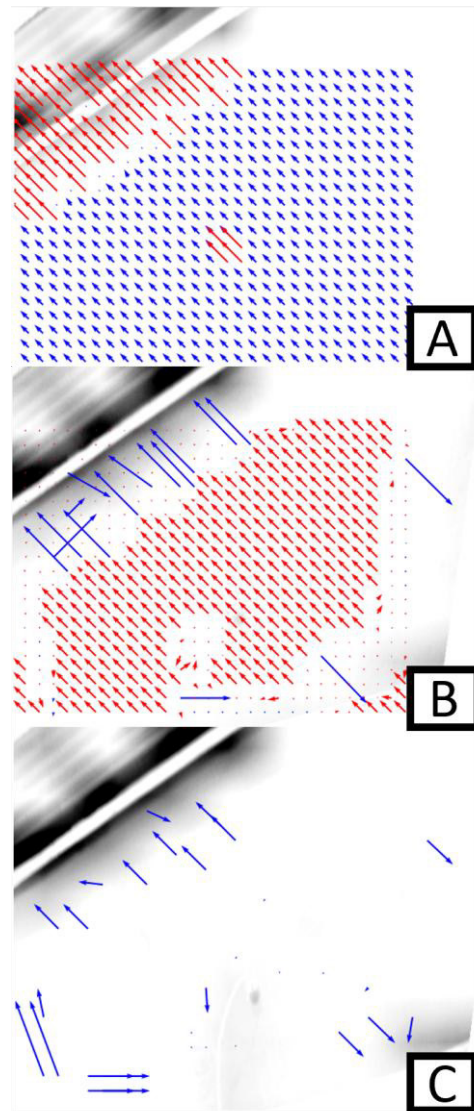


Abb. 4: Beispielübersicht einzelner Verarbeitungsstufen und Ergebnisse einer LSPIV-Vektorfeldberechnung (in vergrößerter Darstellung, als Auszug des beobachteten Bereiches im Strömungsbecken). (A) Vektorfeld mit zahlreichen falsch-positiven Vektoranteilen. (B) Darstellung gültiger (valider) Vektoren im Vergleich zu verworfenen (invaliden) Vektoren und als Ergebnis der Nachbearbeitung das gefilterte Vektorfeld (C).

zurückzuführen. Die Wahl der geeigneten Optik erweist sich somit als entscheidender Faktor für die Leistungsfähigkeit des Systems und steht in direktem Zusammenhang mit den gewählten geometrischen Randbedingungen. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des entwickelten LSPIV Fernerkundungssystems wurde der Mittelwert aller im Sichtbereich

vorkommenden Oberflächenströmungsgeschwindigkeiten gebildet und mit in situ Referenzdaten des ADCP-Sensors verglichen. Die Darstellung in Abbildung 5 zeigt den Vergleich der aus dem LSPIV-Sensorsystem (rot) und dem ADCP Referenzsensor (blau) erhobenen Strömungsdaten nach der LSPIV-Parameteroptimierung. Die beispielhaft dargestellte Zeitreihe der Strömungsgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 5 A) zeigt im Vergleich, dass die LSPIV Messwerte stellenweise höhere Amplituden gegenüber den in situ ADCP Messdaten aufweisen. Diese lokale Überschätzung der LSPIV Messdaten spiegelt sich in der mittleren Abweichung von $MAD=0,016\text{ m/s}$ wieder, und weist auf eine geringfügige systematische Überbewertung des LSPIV-Verfahrens hin. Die Regression mit $RMSE = 0,086\text{ m/s}$ wurde über den beispielhaft betrachteten Zeitraum quantifiziert, und die mittlere Abweichung zwischen beider Messdatenreihen entspricht je nach Strömungsgeschwindigkeitsniveau einem relativen Fehler von etwa $\delta = 8\text{--}17\%$. Dieser Wert kann für LSPIV-Anwendungen im Feldeinsatz als akzeptabel bis gut bewertet werden, und entspricht den Erwartungen bei den hier im Vergleich gesetzten oberflächennahen Strömungen und den Strömungsverhältnissen in der Wassersäule. Eine weitgehende Übereinstimmung der vorherrschenden Geschwindigkeitsverteilung aus beiden Datenreihen ist bei der Überschneidung der Histogramme evident (siehe Abbildung 5B). Das LSPIV-Histogramm weist jedoch leicht verbreiterte Werteverteilungen ($> 0,3\text{ m/s}$) auf, die vor allem durch unvollständige Partikelverfolgung, sowie kamerabedingtes Rauschen verursacht werden können. Diese Beobachtung steht im Einklang mit der zuvor berechneten RMSE, und die Verteilung bestätigt eine geringe mittlere Abweichung. Bei der Betrachtung des Zeitverlaufs der Strömungsrichtung (siehe Abbildung 5C) zeigen die Werte beider Datenreihen eine deutliche Streuung ohne erkennbaren Zusammenhang. Dies war bei dem hier verwendeten kleinen geschlossenen Strömungsbecken zu erwarten, bei dem keine definierte Strömungsrichtung eingestellt werden konnte. In der Versuchsumgebung entstehen hierdurch, bspw. durch Wellenrücklauf und lokal turbulente Oberflächenstrukturen, instationäre Strömungsbedingungen. Insgesamt zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass die LSPIV-Ergebnisse quantitativ mit der Referenzmessung überein-

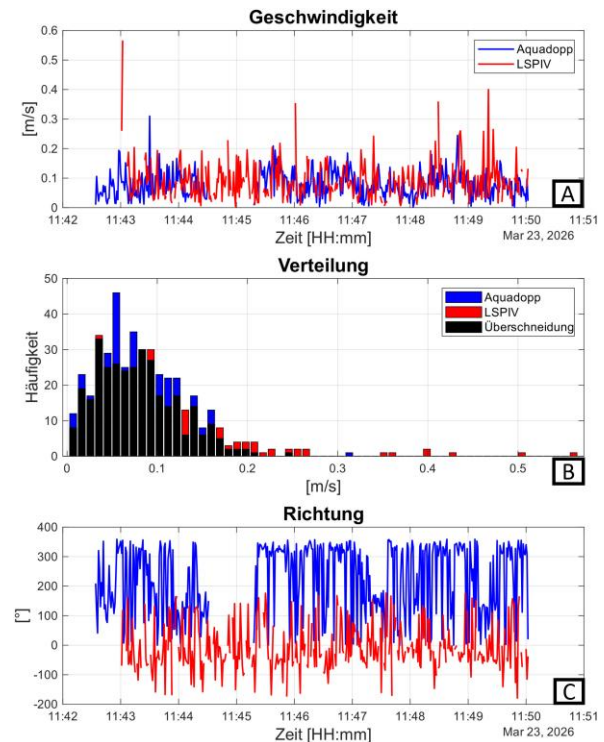


Abb. 5: Strömungsgeschwindigkeit (A) und Histogramm (B) zur Geschwindigkeitsverteilung sowie Strömungsrichtung (C) von LSPIV und in situ ADCP Referenzmessdaten über einen beispielhaften Zeitraum.

stimmen, während gehend die Richtungsmessung aufgrund lokaler Turbulenzeinflüsse weniger stabil ist. Die Messkampagne lieferte somit zentrale Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit des entwickelten LSPIV Fernerkundungssystems. Es konnte gezeigt werden, dass die integrierten Funktionen und Analyseverfahren grundsätzlich in der Lage sind, physikalisch konsistente Strömungsvektorfelder zuverlässig zu messen und diese als mittlere Strömungsgeschwindigkeit und -richtung über einen Zeitverlauf auszugeben. Zudem wurde deutlich, dass sowohl die geometrischen Randbedingungen (Kamerahöhe, Blickwinkel, Objektivwahl) als auch die Sensitivität gegenüber der LSPIV-, Bildvorverarbeitungs- und Filterparameter entscheidend für die Qualität der resultierenden Strömungsvektorfelder sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Kombination aus präziser Orthorektifikation und robuster LSPIV-Analyse bildet die Grundlage für weiterführende Validierungen im Feldeinsatz und mobilen Betrieb unterwegs auf einer Fähre unter realen Umweltbedingungen und eröffnet gleichzeitig ein großes Optimierungspotenzial mit vielversprechenden

Ergebnissen. Die Erprobung im Feld unterwegs auf dem Fluss Weser ist hierzu über einen Erprobungszeitraum von etwa 10 Monaten parallel zu einer Referenzmessstelle vorgesehen. Mit dem Einsatz im regulären Fährbetrieb sind weiterführende Automatisierungsansätze und Optimierungen insbesondere hinsichtlich variierender Umweltbedingungen zur robusten Bilddatenvorverarbeitung und Fehlertoleranz geplant um eine nachrüstbare und flexibel einsetzbare Lösung zur Strömungsmessung in mobilen und stationären Anwendungsszenarien zu ermöglichen.

Beitrag der Autoren und Danksagungen

NR war für Hauptkonzept und Architektur des Systems verantwortlich und entwarf und schrieb die Arbeit, zu der die weiteren Autoren beitrugen. AN war für die Implementierung, Systemaufbau sowie Verifizierung verantwortlich. Die Autoren bedanken sich bei der Arbeitsgruppe Prozesse und Sensorik mariner Grenzflächen am ICBM, Universität Oldenburg für die Unterstützung bei der Messkampagne am Strömungskanal. Die Jade Hochschule dankt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die finanzielle Unterstützung im Rahmen der Projektförderung „Eco-Crossing“ (DBU Projekt 39313/01)

Literaturnachweis

- [1] Y. Ender, et al., Optimising ship manoeuvring time during port approach using a decision support system: a case study in Turkey. *Ships and Offshore Structures* 18.12, 1713-1725 (2023); doi: 10.1080/17445302.2022.2140522
- [2] N. Ruessmeier, O. Zielinski, Ocean current observations by infrared and visual Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV). *OCEANS 2021: San Diego-Porto*, 1-10 (2021); doi: 10.23919/OCEANS44145.2021.9705808
- [3] S. A. Kantoush, et al., LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases. *Journal of Hydro-environment Research* 5(4), 263-276 (2011); doi: 10.1016/j.jher.2011.07.002
- [4] M. Muste, et al., Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water resources research* 44.4 (2008); doi: 10.1029/2008WR006950
- [5] Z.J. Taylor, R. Gurka, G.A. Kopp, A. Liberzon, Long-Duration Time-Resolved PIV to Study Unsteady Aerodynamics, Instrumentation and Measurement, *IEEE Transactions* 59 (12), 3262-3269 (2010); doi: 10.1109/TIM.2010.2047149
- [6] G. Bodart, et al., Quantifying and reducing the operator effect in LSPIV discharge measurements. *Water Resources Research* 60.2 (2024); doi: 10.1029/2023WR034740
- [7] K. G. Hessner, et al., Nautical radar measurements in Europe: Applications of WaMoS II as a sensor for sea state, current and bathymetry. In *Remote Sensing of the European Seas* 435-446 (2008); doi: doi.org/10.1007/978-1-4020-6772-3_33
- [8] K. Reichert, et al., WaMoS II: A radar based wave and current monitoring system. *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*. ISOPE-I-99-246 (1999)
- [9] H. Rubio-Arias, et al., ADCP, multi-frequency analysis for flow measurements in rivers. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 18.1, 101-112 (2019); doi: 10.15576/ASP.FC/2019.18.1.101
- [10] A. Vergne, et al., Acoustic backscatter and attenuation due to river fine sediments: Experimental evaluation of models and inversion methods. *Water Resources Research* 57.9 (2021); doi: 10.1029/2021WR029589
- [11] N. Rüssmeier, et al., Ocean surface water currents by large-scale particle image velocimetry technique. In *OCEANS 2017- Aberdeen*, 1-10 (2017); doi: 10.1109/OCEANSE.2017.8084843
- [12] S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey, C. Lalancette, W. Woodall, Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild, *Science Robotics* vol. 7, (2022); doi: 10.1126/scirobotics.abm6074
- [13] A. Lejman, N. Rüssmeier, O. Ferdinand, & F. Stahl, Eine integrierte Datenstromverarbeitung zur Erfassung von Umweltlagebildern. *Tagungsband: 22. ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Messsysteme*, 499-504 (2024); doi:10.5162/sensoren2024/P20_499-504.
- [14] R. Tsubaki, Multi-camera large-scale particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 31(8) 084004 (2020); doi: 10.1088/1361-6501/ab85d5
- [15] ASAM e.V., OpenSCENARIO DSL – Coordinate Systems, 2026. [Online]. Verfügbar unter [8.3 Coordinate systems :: ASAM OpenSCENARIO](#). [Letzter Zugriff: 14. April 2026]
- [16] D. J. Justs, R. Novickis, K. Ozols and M. Greitāns, Bird's-eye view image acquisition from simulated scenes using geometric inverse perspective mapping, *17th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC) Tallinn, Estonia*, 1-6 (2020); doi: 10.1109/BEC49624.2020.9277042
- [17] J. Liebowitz, A. Zisserman, Metric rectification for perspective images of planes. In *Proceedings. 1998 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 482-488 (1998); doi: 10.1109/CVPR.1998.698649
- [18] A. Liberzon, R. Gurka, and Z. Taylor, OpenPIV Home Page, (2009) [Online]. Verfügbar unter: <http://www.openpiv.net> [Letzter Zugriff: 14. April 2026]