



Fusion von Tauchroboter- und Satellitenmessungen über unterschiedliche Skalen, Messmodelle und spektrale Abtastungen

D. Nakath¹ · V. Grossmann² · R. Kiko³ · R. Koch² · N. Oppelt⁴ · K. Köser¹

Angenommen: 24. Juli 2022 / Online publiziert: 26. Oktober 2022
© Der/die Autor(en) 2022

Zusammenfassung

In küstennahen Gewässern ist es von Vorteil, satellitengestützte optische Messungen des Meeres mit visuellen und sensorischen Beobachtungen von Tauchrobotern zu fusionieren. Obwohl Satelliten nur wenige Meter tief in Gewässer hineinschauen können, ist es möglich, generelle Wassereigenschaften oder den Bodenbewuchs von Küstengewässern zu bestimmen. Visuelle und sensorische Tauchroboterbeobachtungen sind hierzu komplementär und können auch tiefere Gewässer erreichen. Das mitgeführte künstliche Licht wird jedoch stark gestreut und erfordert andere Messmodelle. Zusätzlich sind die räumlichen und spektralen Auflösungen der Beobachtungen oftmals sehr unterschiedlich. Wir analysieren hier die damit verbundenen Problematiken und skizzieren Wege, wie die Fusion der grundverschiedenen Messungen dennoch gelingen könnte.

Einleitung

In den Ingenieurwissenschaften haben sich in den letzten Jahren *Digital Twins* etabliert (siehe z. B. [3, 5, 12]), um komplexe Systeme zu untersuchen und zu verstehen. Auch in den Naturwissenschaften werden beobachtete Phänomene und Zusammenhänge in der echten Welt oft durch phy-

sikalische oder chemische Modelle beschrieben, z. B. wie CO² zwischen Ozean und Atmosphäre ausgetauscht wird. Solange kleinere Modelle für Simulation oder das Verständnis nützlich sind, nimmt man in Kauf, dass die Modellierung bestimmter Aspekte eine recht grobe Approximation der gesamten Welt sein kann. Somit können spezifische Aspekte hinreichend genau verstanden oder vorhergesagt werden, wie etwa der Effekt von Düngemitteln in Abwässern oder die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs [2, 11].

Mit zunehmender Menge und Diversität von Sensordaten wird es immer schwieriger, Muster in den Daten zu erkennen, die unterschiedlichen Daten und Metadaten zu kombinieren und die Zusammenhänge manuell zu modellieren, d. h. diese zu fusionieren (siehe Abb. 1). Satellitenbasierte Beobachtungen der Wassersäule können z. B. als Proxy für die Primärproduktion [10], für Zooplankton Schwärme [1] oder Wasserqualität genutzt werden oder können die Seegrasbedeckung im Flachwasser bestimmen helfen [6]. Die Beobachtungen sind aber begrenzt auf wenige Meter Wassersäule, da der Satellit auf die Eindringtiefe der Sonnenstrahlung angewiesen ist. Es ist schwierig, fusionierte Modelle auf tiefere Gewässer auszudehnen (siehe Abb. 2), da etwa die tauchroboterbasierte Unterwasserbildung mit Kameras und künstlichen Lichtquellen (siehe Abb. 3) andersartige Beobachtungen ergeben [8]. Zudem sind die Repräsentation der optischen Effekte in der Wassersäule sowie die räumlichen und spektralen Auflösungen sehr unterschiedlich. Des Weiteren sind manche Prozesse, die ein Tauchroboter oder andere Messgeräte in der Tie-

✉ D. Nakath
dnakath@geomar.de

V. Grossmann
vgr@informatik.uni-kiel.de

R. Kiko
rainer.kiko@imev-mer.fr

R. Koch
rk@informatik.uni-kiel.de

N. Oppelt
oppelt@geographie.uni-kiel.de

K. Köser
kkooser@geomar.de

- ¹ GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Kiel, Deutschland
- ² Institut für Informatik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, Deutschland
- ³ Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, Sorbonne Université, Villefranche-sur-Mer, Frankreich
- ⁴ Institut für Geographie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, Deutschland

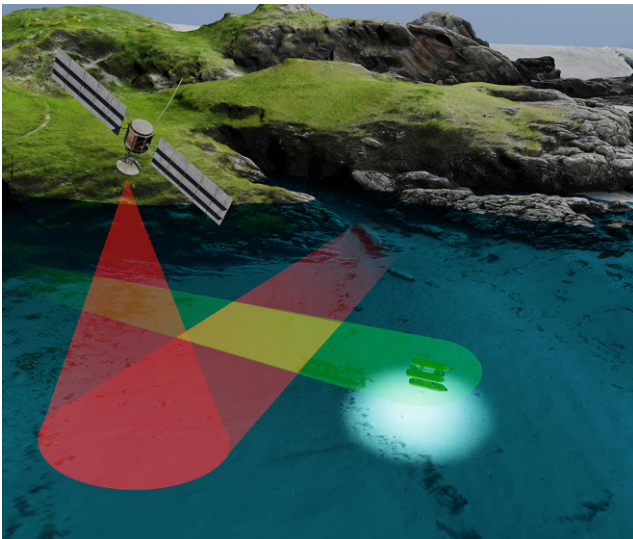


Abb. 1 Szenario: Fusion von satellitengestützten Messungen und In-situ-Beobachtungen von Küstengewässern mit Tauchrobotern. (Satellite by Daan van Leeuwen is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial. Isle of Mull Beach by Jamesharmer is licensed under Creative Commons Attribution)

fe beobachten können, nicht oder nur in bedingtem Maße von den Bedingungen in der direkt darüber liegenden Oberflächenschicht abhängig. So kann z.B. die Partikel- und Planktonabundanz in der Tiefe von den Oberflächenbedingungen abhängig sein, die zwei Wochen zuvor in 20km Entfernung vorherrschten, da Meeresströmungen, Subduktions- oder Sinkprozesse die Partikel und Organismen entsprechend verfrachtet haben können.

Abb. 2 Sentinel-2-Foto eines Gebiets nördlich von Kiel sowie benthische Karte. (Generiert mit [6])



Nach Kenntnis der Autoren gibt es zur Zeit Ansätze für *Digital Twins of the Ocean* im frühen Forschungsstadium, jedoch keine im produktiven Einsatz. Die Fusion verschiedenster Daten, Modelle und Repräsentationen ist eine Schlüsseltechnologie für Digital Twins, wie wir auch schon in einem Überblicksartikel argumentiert haben [4]. Zusätzlich ist das *Sehen* eine der wichtigsten Sinneswahrnehmungen des Menschen, und daher erwarten wir, dass besonders die Einbringung von visueller Information in Digital Twins diese intuitiver zugänglich, nutzbar und erfahrbar macht.

Forschungsfragen im Rahmen der Cross-Domain-Fusion

In diesem Zusammenhang stellen sich folgende Forschungsfragen: (1) Wie können wir auf verschiedenen Skalen arbeiten und dennoch die Messungen fusionieren, sodass sie von gegenseitigem Nutzen sind (für Kalibrierung und Extrapolation in die Breite oder Tiefe)? (2) Wie können wir spektrale Koeffizienten des Wassers (z. B. Absorption) aus einfachen Breitbandkoeffizienten einer RGB-Kamera extrahieren und für die Kalibrierung von Satellitenprodukten verwenden? Können wir neue multispektrale Kameras unterstützen? (3) Wie können wir Einzelbeobachtungen von Organismen in der Wassersäule oder auch Seegras auf dem Meeresboden mit Satellitendaten fusionieren? (4) Wie können wir die Methodiken aus Unterwassermodellen (differenzierbare Monte-Carlo-basierte Simulation [9]) und Satellitendaten (Inversion von Strahlungstransfermodellen mit geschlossener Gleichung) mit höherer spektraler

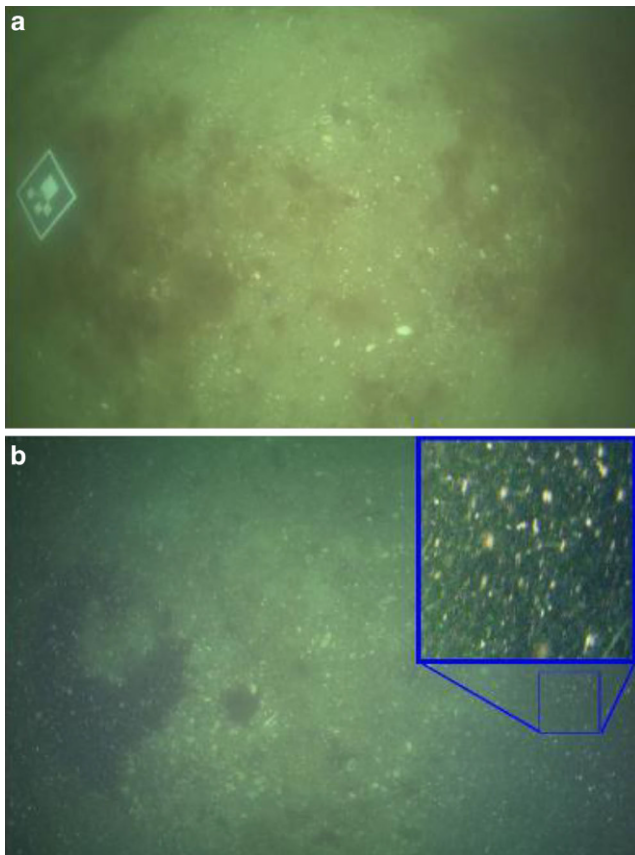


Abb. 3 Tauchroboterbilder aus der Nähe der in Abb. 2 dargestellten Region, aufgenommen im Mai 2020 (a) und Juli 2020 (b). In der Vergrößerung rechts in b sieht man sehr viele Schwebstoffe im Wasser (sog. „marine snow“), diese können im Tauchroboter als einzelne Partikel wahrgenommen werden, tragen im Luft-/Satellitenbild hingegen nur zu makroskopischen Effekten bei, da sie viel kleiner als der Fußabdruck eines Satellitenpixels sind

Auflösung kombinieren und evtl. mit Ansätzen aus dem Machine Learning zusammenbringen? (5) Wie müssen hierbei die Brechungseffekte an der Wasseroberfläche und die Komponenten von Vorwärts- und Rückwärtsstreuung in der Wassersäule berücksichtigt werden? (6) Welchen Einfluss haben Wetterbedingungen, Wellendynamik und Strömungen auf die Güte der Fusion? Mittelfristig stellt sich zusätzlich die Frage, wie wir Kalibrierungen durchführen können, wenn Satellit und Tauchroboter nicht zur selben Zeit denselben Ort gesehen haben. Können Strömungsmodelle den ganzen Ansatz weiter generalisieren, indem sie die Position der betrachteten Wassermasse für einen anderen Zeitpunkt vorhersagen, wo dann eine Messung des anderen Sensors vorgenommen werden kann, oder kann eine Referenzmessung für eine Wassermasse anhand einer berechneten Trajektorie gesucht werden?

Bezug zum Gesamtvorhaben Cross-Domain-Fusion Zunächst wird eine gemeinsame Nutzung, also Fusion, von

datengetriebenen und formalisierten Modellen angestrebt. Weiterhin sollen Datenpunkte auf sehr unterschiedlichen Skalen genommen und gemeinsam verwendet werden. Hierbei sollen auch kleinskalige Effekte im Messumfeld, die z.B. durch unterschiedliche Wetterbedingungen oder die Advektion von Planktonblüten generiert werden können, berücksichtigt werden. Und schließlich arbeiten die verwandten Sensoren in unterschiedlichen Lichtmodalitäten: Während Satellitendaten im multispektralen Bereich operieren, sollen breitbandige Kameraaufnahmen von kleinen Flächen oder sogar einzelnen Objekten mit diesen fusioniert werden. Damit stellt dieses Projektvorhaben eine konkrete Instantiierung des vorgeschlagenen Cross-Domain-Fusion-Paradigmas dar.

Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten

Die Herausforderungen der Fragestellung liegen in der Heterogenität der Daten und Modelle. Während der Fußabdruck des Satelliten eine große Bandbreite von Submeter bis Kilometer groß ist, beobachtet der Tauchroboter nur im Nahbereich. Es gibt daher keine 1-zu-1-Relation zwischen den Messungen und zudem einen Skalenunterschied von mindestens einer Größenordnung in der räumlichen Auflösung. Auch spektral unterscheiden sich die Auflösungen stark, wobei der Satellit meist eine bessere spektrale Auflösung aufweisen kann. Arbeitet der Tauchroboter mit künstlicher Beleuchtung, erzeugt er selbst sehr viel Streulicht, das analytisch nicht mehr herauszurechnen ist, sondern nach aktuellem Stand der Technik durch inverse Methoden (Monte-Carlo-Simulation) kompensiert werden kann. Die Satellitendaten werden hingegen mit invertierten Strahlungstransfermodellen der Atmosphäre und der Wassersäule korrigiert, sodass die Rohdaten nicht direkt vergleichbar sind. Vielmehr wird eine sensor- und mediumagnostische Zwischenrepräsentation benötigt.

Da genau bekannt ist, zu welchen Zeiten welche Satelliten bestimmte Gebiete abdecken, kann kurz zuvor oder wenig später das abgedeckte Gebiet mittels Tauchroboter untersucht werden, sodass Messungen desselben Wasserzustandes bei gleichen Wetterbedingungen vorliegen. Langfristig wäre die Einbeziehung von Strömungsmodellen wünschenswert, sodass bei nicht exakt gleichzeitiger Messung die Position der betrachteten Wassermasse vorhergesagt werden kann. Anhand von den überlappenden Messungen zwischen Tauchroboter und Satellit sollen die jeweiligen Messungen und Modelle miteinander in Beziehung gesetzt werden. So können Satellitendaten mittels Tauchrobotermessungen in die Tiefe extrapoliert werden oder Tauchroboterdaten mittels Satellitenmessungen in die Fläche. Zusätzlich gehen wir davon aus, dass die optischen

Wasserparameter (z. B. Partikelgrößenverteilung, Abschwächung, Albedo, Phase Function [7]) durch Nutzung beider Modelle und Messungen genauer bestimmt werden können, insbesondere unter Berücksichtigung der relativ breitbandigen Sensorik der Tauchroboterkamera gegenüber der feineren spektralen Auflösung des Satelliten. Die Kenntnis dieser Wasserparameter soll dann dazu genutzt werden, benthische Karten ohne Wassereffekte zu erzeugen, in denen die tatsächlichen Oberflächenfarben, z. B. des Sediments oder Seegrases, wiederhergestellt werden. Die Kombination von in situ und Satellitenbeobachtungen kann jedoch immer nur in einem kleinen Zeitfenster gelingen, da Tauchrobotereinsätze logistisch schwierig sind. Somit können die besten optischen Fenster (windstill, wolkenfrei, keine Wassertrübung durch Algen) nur sehr selten, wenn überhaupt für die Gewinnung von Fusionsdaten genutzt werden. Da jedoch der Satellit, aufgrund langer Einsatzzeit und großem Footprint, optimale optische Fenster oft treffen sollte, kann eine genaue Fusion der Daten und vor allem auch eine Messung der Wassereigenschaften im Grenzbereich der Satellitensichttiefe eine Verbesserung des finalen Produkts generieren. Zusätzlich sollen mithilfe dieser Parameter synthetische Bilder der beobachteten Region unter anderen Bedingungen (What-if-Szenarios) erzeugt werden können. In den Überlappungsbereichen der unterschiedlichen Messverfahren sollen zunächst die Modelle und Vorhersagen über die Wasserparameter gegeneinander verglichen werden, idealerweise unterstützt durch eine Probennahme und Untersuchung der Wasserparameter.

Resümee

In diesem Beitrag wurde die Relevanz der kombinierten Analyse von Daten unterschiedlicher Messsysteme (Satellit und Tauchroboter) für aktuelle Fragen in der Meeresforschung diskutiert und herausgestellt, dass die Fusion von verschiedenartigen Daten, Modellen und Methoden eine Schlüsseltechnologie für zukünftige Digital Twins des Ozeans im Rahmen des Cross-Domain-Fusion-Verbundprojekts darstellt. Es wurde gezeigt, welche Herausforderungen zu lösen sind, um satellitenbasierte Beobachtungen mit andersartigen In-situ-Messungen von Tauchrobotern zu verschneiden.

Funding Diese Arbeit wurde von Kiel Marine Science (KMS) und dem Future Ocean Network (FON) unterstützt (V. Grossmann), außerdem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (Projektnummer 396311425) im Rahmen des Emmy-Noether-Programmes (D. Nakath, K. Köser). R. Kiko wurde vom Programm „Make Our Planet Great Again“ der Agence Nationale de la Recherche (Frankreich) im Rahmen des „Programme d’Investissements d’Avenir“ (Projektnummer „ANR-19-MPGA-0012“), sowie vom Heisenberg-Programm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Projektnummer 469175784) unterstützt.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Basedow SL, McKee D, Lefering I, Gislason A, Daase M, Trudnowska E, Skarstad Egeland E, Choquet M, Falk-Petersen S (2019) Remote sensing of zooplankton swarms. *Sci Rep* 9(1):686
2. Delgado JA, Short NM Jr, Roberts DP, Vandenberg B (2019) Big data analysis for sustainable agriculture on a geospatial cloud framework. *Front Sustain Food Syst* 3:54
3. Glaessgen E, Stargel D (2012) The digital twin paradigm for future nasa and u.s. air force vehicles. In: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference Honolulu
4. Grossmann V, Nakath D, Urlaub M, Oppelt N, Koch R, Köser K (2022) Digital twinning in the ocean challenges in multimodal sensing and multiscale fusion based on faithful visual models. In: Proceedings of the ISPRS Congress 2022 Nice
5. Kritzinger W, Karner M, Traar G, Henjes J, Sihn W (2018) Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine* 51(11):1016–1022 (16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018)
6. Kuhwald K, Schneider von Deimling J, Schubert P, Oppelt N (2021) How can sentinel-2 contribute to seagrass mapping in shallow, turbid baltic sea waters? *Remote Sens Ecol Conserv* 8(3):2056–3485
7. Mobley CD (1994) Light and water: radiative transfer in natural waters. Academic Press
8. Museler EA (2003) A comparison of in-situ measurements and satellite remote sensing of underwater visibility. Technical report, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY
9. Nakath D, She M, Song Y, Köser K (2021) In-situ joint light and medium estimation for underwater color restoration. In: Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV) Workshops, S 3731–3740
10. Pahlevan N, Smitha B, Schalles J, Binding C, Cao Z, Mae R, Aliakas R, Kangro K, Gurling D, Nguyen H, Matsushita B, Moses W, Greb S, Lehmann M, Hann T-L, Ondrusek M, Oppelt N, Stumpf R (2020) Seamless retrievals of chlorophyll—a from sentinel-2/3 in coastal and inland waters: a machine learning approach. *Remote Sens Environ* 240:111604
11. Storlazzi CD, Gingerich SB, van Dongeren A, Cheriton OM, Swarzenski PW, Quataert E, Voss CI, Field DW, Annamalai H, Piniak GA et al (2018) Most atolls will be uninhabitable by the mid-

- 21st century because of sealevel rise exacerbating wavedriven flooding. *Sci Adv* 4(4):eaap9741
12. Tao F, Zhang H, Liu A, Nee AYC (2019) Digital twin in industry: state-of-the-art. *IEEE Trans Ind Inform* 15(4):2405–2415

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.