

Roboter für das Wasser der Zukunft

Lisa Jarosch¹, Sebastian Pose², Stefan Reitmann³, Otto Dreier⁴, Gero Licht³, Eric Röder⁵



Die trockenen Jahre 2018 und 2019 stellten Gewässer in Deutschland vor eine neue Belastungsprobe. Auch in Sachsen gibt es viele Binnengewässer, die der Trink- und Brauchwassergewinnung, der Fischerei, dem Hochwasserschutz sowie der Bewahrung der ökologischen Vielfalt dienen.

In zahlreichen Klimaprognosen für den Freistaat Sachsen werden immer längere Trockenperioden prognostiziert, unterbrochen von verstärkten Extremniederschlagsereignissen im Sommer (Beispiele: Hochwässer 2002 oder 2013)⁶. Dies führt zu neuen Herausforderungen bei der Gewährleistung der Versorgungssicherheit, vor allem an Trinkwasser, aber insbesondere auch bei der Wasserbeschaffenheit. Umfassende Gewässermonitoringmaßnahmen sind erforderlich, die derzeit nur mit hohem personellem Aufwand und Kosten umgesetzt werden können. Zudem können Aussagen zum Gewässerzustand aktuell nur punktuell an einzelnen Messstationen getroffen werden. Dies hat zur Folge, dass seeinterne Prozesse nicht umfassend verstanden sind. Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser, sowie Austritte klimarelevanter Gase aus den Seesedimenten haben Einfluss auf die Hydrochemie des Wassers und das Klima.

Entwicklung zur autonomen Gewässergüteuntersuchung

Die ESF-Nachwuchsforschergruppe RoBiMo (Robotergestütztes Binnengewässer-Monitoring) ist ein interdisziplinäres Team an der TU Bergakademie Freiberg. Die Gruppe nahm Anfang Januar 2020 ihre Arbeit an einer ganzheitlichen technischen Lösung zur regelmäßigen, kontinuierlichen, automatisierten, 3D-ortsaufgelösten und multisensorischen Gewässererfassung auf (Abbildung 1).

Ziel ist es, in Binnengewässern aller Art, darunter Talsperren und gefluteten Tageauseen, ein besseres Verständnis der Gewässerdynamik in Folge von jahres-

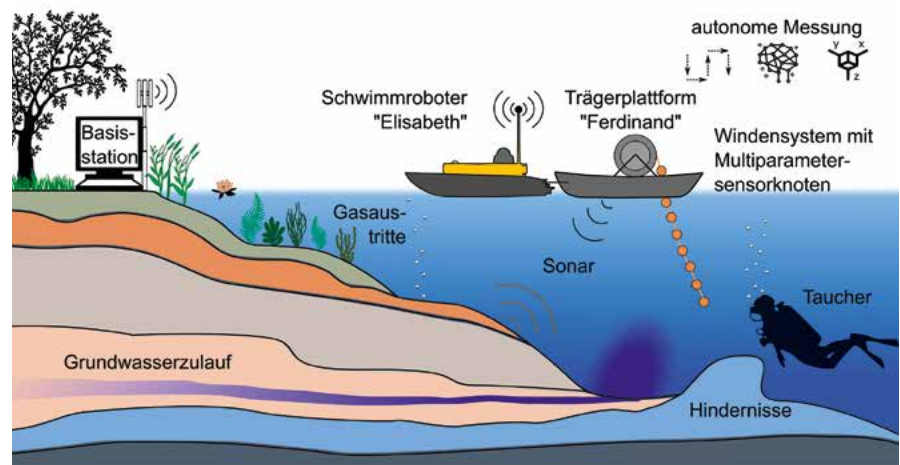


Abb. 1: Schematische Darstellung von Untersuchungen mit dem Schwimmroboter „Elisabeth“ und der modularen Plattform „Ferdinand“ zur autonomen, dreidimensionalen, multisensorischen Erfassung von Binnengewässern, sowie der Validierung der Ergebnisse durch wissenschaftliche Taucher und deren Darstellung mit Methoden der künstlichen Intelligenz. Plattform und Schwimmroboter sind Eigen- bzw. Weiterentwicklungen der TU Bergakademie Freiberg.

zeitlichen Schwankungen und Extremwetterereignissen zu gewinnen. Dazu soll der bestehende Schwimmroboter „Elisabeth“ mit einem erweiterten modularen Sensorsystem auf der Trägerplattform „Ferdinand“ ausgestattet werden. Dieses System wird Gewässer autonom mit Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) und Pfadplanung teilweise bzw. komplett tiefenaufgelöst vermessen.

Das Sensorsystem dient drei unabhängigen Aufgaben:

1. Dreidimensionale Erfassung des Gewässerkörpers, einschließlich seiner Sedimente durch SONAR-Technik,
2. Tiefenaufgelöste und simultane Erfassung hydrophysikalischer und -chemischer Parameter mit einer Kette von Sensorknoten, wovon jeder eine Vielzahl an Wassergüteparametern erfasst (hydrographische Profile), sowie
3. Messung der Gewässerrespiration mit Infrarot-Spektrometrie und automatischer Probenahme.

Die Ausstattung des Roboters, die Entwicklung der KI sowie die virtuelle Darstellung der Daten wird durch das Projekt AIRGEMM am Institut für Informatik der TU Bergakademie Freiberg realisiert. Diese Daten werden in Bezug auf Umweltkartierung und -überwachung ausgewertet. Die aus Ultraschallkartierungen gewonnene 3D-Punktwolke wird durch die Analyse maschinellen Lernens nach Objekttypen klassifiziert und bildet die Grundlage für die Pfadplanung.

Mit Innovationen ins kalte Nass

Die bei RoBiMo eingesetzte SONAR-Technik erfasst den Gewässeruntergrund dreidimensional. Damit können Sedimentstrukturen und Unterwasserobjekte entdeckt und mit KI-Methoden klassifiziert werden. Diese Technik ist für die Pfad(Wege)planung des Roboters wichtig, um Unterwasserhindernisse umfahren zu können. Der Einsatz der multisensorischen Messkette wurde in anderen Projekten bislang nicht umgesetzt. Diese Messkette erlaubt tiefsimultane Messungen verschiedener Gewässerparameter, die eine dynamische Zustandsbeschreibung in Abhängigkeit von der Tiefe ermöglichen. Mit der hohen Auflösung der Daten sollen Grundwasserzutritte in das Gewässer identifiziert und qualitativ erfasst werden. Die am Projekt beteiligten wissenschaftlichen Taucher der TU Bergakademie Freiberg validieren Messwerte direkt vor Ort und unter realen Bedingungen. Mit ihrer Erfahrung können z. B. Grundwasserzutritte schon rein optisch erkannt und eine erste Quantifizierung vorgenommen werden. Der Einsatz der Taucher in diesem Zusammenhang ist bislang einzigartig. Weiterhin wird die „Gewässeratmung“ im Projekt RoBiMo untersucht. Die quantitative und zeitlich hochauflösende Erfassung der klimarelevanten Spurengase CO_2 , CH_4 und N_2O erlaubt eine Identifikation des Gewässers als Senke bzw. Quelle dieser Gase. Diese Lücke zu schließen ist ein wesentlicher Beitrag zu Fragen des

1 TU Bergakademie Freiberg (alle Autoren):
Professur für Hydrogeologie und Hydrochemie
2 Scientific Diving Center/Lehrstuhl für
Technische Thermodynamik
3 Institut für Informatik
4 Institut für Elektronik- und Sensormaterialien
5 Professur für Geochemie und Geoökologie
6 Schwarzak 2015



Foto: Otto Dreier

Abb. 2: Schwimmroboter „Elisabeth“ zieht die Messplattform „ferdinand“ zu ihrem ersten gemeinsamen Testlauf am 10. Juli 2020 über den unteren Kreuzteich in Freiberg.

globalen Klimawandels. Durch die hohe Mobilität des Schwimmroboters können gezielt verschiedene Gewässerzonen der Standgewässer beprobt werden.

Auch andere Projekte beschäftigen sich mit der Untersuchung von Gewässern hinsichtlich deren Untergrund und Zustand. Bei BOSS Manta Ray oder ROBUST wird der Meeresgrund untersucht. Allerdings werden die erfassten Daten nicht zur aktuellen Pfadplanung genutzt. Die Gewässerzustandsbeschreibung ist von hohem hydrologischen und ökologischen Wert. Bislang wurde in vergleichbaren Projekten, wie RiverView, nur ein Sensor eingesetzt. Damit kann die Messung in lediglich einer Tiefe erfolgen. Die Identifizierung und Untersuchung von Grundwasserzutritten ist bis jetzt mit hohem analytischen Aufwand, wie der Untersuchung der Isotopenzusammensetzung (z. B. Projekt SeeZeichen), und der Entnahme zusätzlicher Wasserproben verbunden. Respirationsmessungen von CO₂ und CH₄ werden zum Beispiel im Projekt TregaTA lediglich stationär auf zwei Talsperren unterschiedlicher Trophiegrade untersucht.

„Elisabeth“ + „ferdinand“: Schwimmroboter und -plattform

Die regelmäßige Untersuchung verschiedener Gewässer verlangt den unkomplizierten Transport einer Messplattform

zu entsprechenden Einsatzorten. Mit „Elisabeth“ (Abbildung 2) steht dem Projekt ein kompakter Katamaran mit einer Länge von 1,3 Metern zur Verfügung, der von zwei Personen ohne weitere Hilfsmittel bewegt werden kann. Ausgestattet mit Sensorik für die Positionsbestimmung (GNSS) sowie Beschleunigungs- und Lage Sensoren (IMU) ist „Elisabeth“ für drei Stunden autonomen Betrieb ausgelegt. Die eigentlichen, modularen Sensorsysteme werden auf der zusätzlichen Schwimmplattform („ferdinand“) montiert. Dadurch wird eine Überlastung der Nutzlast des Katamarans vermieden, ohne auf die einfache Handhabung an Land zu verzichten. Ergänzt wird „Elisabeth“ durch eine Basisstation am Ufer zur Übermittlung der Messwerte sowie der Möglichkeit des Eingriffs in die Messung.

Der Sensor macht's

Um verschiedene Gewässerparameter zu erfassen, werden die einzelnen Knoten der Messkette mit vielfältigen Sensoren ausgestattet. Mit einem am Institut für Elektronik- und Sensormaterialien (IESM) entwickelten ersten Basisknoten (Abbildung 3) werden neben Wasserdruck und -temperatur auch elektrische Leitfähigkeit und Trübung sowie die Beschleunigung des einzelnen Knotens gemessen. Da die Messkette mit ihren Knoten in das Gewässer abgelassen wird, können durch

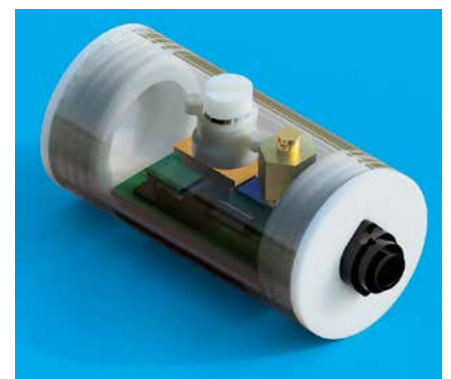
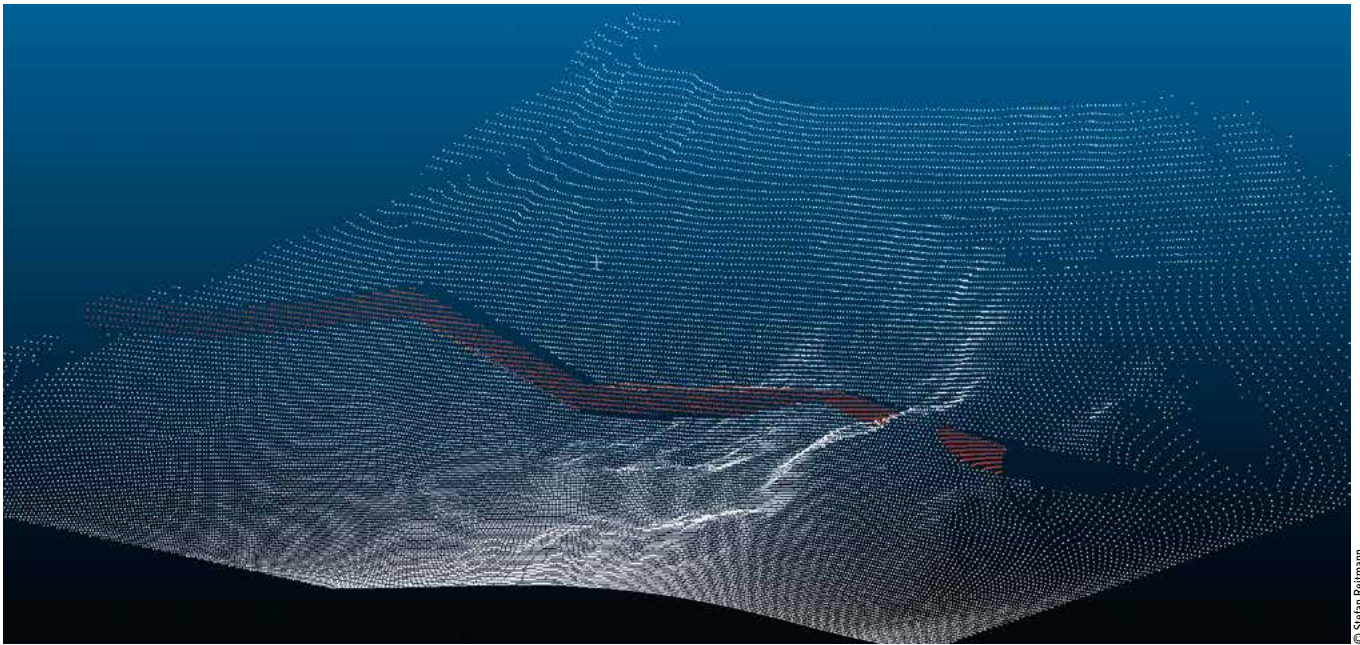


Abb. 3: Design der Basis-Sensorknoten. An der Oberseite sind zwei der verbauten Sensoren zu erkennen, im Inneren bilden mehrere Platinen die Mess- und Auswerteelektronik.

die Knoten alle Parameter zeitgleich in verschiedenen Tiefen gemessen werden. Dadurch entsteht ein Tiefenprofil des Gewässers. Über die Beschleunigung der einzelnen Knoten können anschließend Rückschlüsse über die Position der Knoten und damit auch über die Auslenkung der Kette gezogen werden. Anzahl und Art der Knoten an der Messkette können leicht verändert werden, um die Kette an verschiedene Messanforderungen anzupassen. Kern jedes einzelnen Messknotens bildet ein Microcontroller (µC), der die einzelnen Sensorsignale ausliest und gebündelt an „Elisabeth“ sendet. Der µC wird mit den Sensoren in ein Acrylgehäuse eingebaut, das durch



© Stefan Reilmann

Abb. 4: Künstliche Datengenerierung zur Gewinnung von Trainingsbeispielen zum Anlernen einer Künstlichen Intelligenz. Ziel der automatisierten semantischen Segmentierung ist die Erkennung von Objekten in den Messdaten, wie hier beispielhaft von Rohr (rot) und Untergrund (weiß).

Datenkabel und Stahlseil mit einer Winde auf der Schwimmplattform „ferdinand“ verbunden wird.

Neben dem Einsatz von kommerziell erhältlichen Sensoren werden im Rahmen des Projekts auch zwei neuartige Sensoren zum Messen des Mikroplastikgehalts und des Nitratgehalts entwickelt. Diese und weitere Parameter sollen im Rahmen des Projekts ebenfalls in die Messknoten integriert werden.

KI-Modellierung

Der Einsatz von SONAR und weiterer Sensorik erzeugt eine Vielzahl von Daten, deren Bearbeitung, Visualisierung und Analyse spezifische Modelle erfordert und Möglichkeiten der KI nutzen kann. Die Schallimpulse des Sonars erzeugen hochkomplexe Punktwolken der Gewässer, aus denen Wissen extrahiert werden kann (Abbildung 4). Im Detail geht es um automatische Objekterkennung und Klassifizierung, zusammengefasst unter dem Begriff der semantischen Segmentierung. Durch die Auswahl von Binnengewässern im sächsischen Raum sind die Anwendungsfälle sehr spezifisch und besitzen eine geringe Datengrundlage. Darum liegt einer der Schwerpunkte des Projekts auf der laborgestützten Vorbereitung von KI-Algorithmen durch Erzeugung synthetischer Daten in virtuellen Umgebungen. Dafür wurden unter Berücksichtigung der technischen Spezifika bereits virtuelle Sensoren implementiert, die reale Messungen simulieren und wesentliche

Einflussgrößen der Umwelt (Leitfähigkeit, Wassertemperatur etc.) berücksichtigen können.

Durch den Einsatz von Unterwasser-Fotogrammetrie durch wissenschaftliche Taucher zur 3-dimensionalen Erfassung von Unterwasserobjekten können zusätzliche Inputdaten (Punktwolken, 3D-Modelle) für die Pfadplanung der künstlichen Intelligenz gewonnen werden. Weiterhin werden so einzelne Objekte detailliert für spätere Untersuchungen erfasst. Die variierende Erzeugung von Referenzumgebungen lässt so ein Datenfundament entstehen, das die KI gezielt für die Feldexperimente vorbereitet. Die umfangreichen Berechnungen werden am Institut für Informatik mit einem KI-Rechner NVIDIA DGX-2 gelöst, ein leistungsfähiges System mit 16 Grafikprozessoren für die Bearbeitung komplexer KI-Herausforderungen.

Die Auswahl der Gewässer für die Forschung

Um räumliche und zeitliche Änderungen seeinterner Prozesse untersuchen zu können, werden gezielt Gewässer ausgewählt. Ein Schwerpunkt liegt auf Binnengewässern mit vermuteten Grundwasserzutritten, mit besonderen Eigenschaftenänderungen in der Tiefe und mit Behandlungsmaßnahmen gegen Versauerung. Dazu zählen das Speicherbecken Lohsa I in der Oberlausitz, einige der Bergbaufolgeseen im Südraum Leipzig (z. B. der Störmthaler See), sowie der derzeit entstehende Cottbuser Ostsee. Um die

seeinternen Prozesse erfassen zu können, muss das System hydrophysikalische Parameter wie pH-Wert, Trübung, elektrische Leitfähigkeit und andere Wasserinhaltsstoffe (z. B. Phosphat, Chlorophyll und Mikroplastik) messen können. Zusätzlich zu den Vor-Ort-Messungen werden Wasserproben im hydrogeologischen Labor des Instituts für Geologie auf weitere Anionen und Kationen sowie TOC/TIC analysiert. Auch das Einzugsgebiet des Gewässers wird näher betrachtet, da Zuflüsse Stoffe in den See transportieren. Zudem können Existenz und Menge von Grundwasserzutritten durch eine Quantifizierung der Wasserbilanz ermittelt werden. Solche Zutritte können weitere Nähr- und Schadstoffe in das Gewässer eintragen und die Wasserqualität beeinflussen.

Schwimmend gemessen – tauchend überprüft

Herausforderungen bei der Messung unterschiedlicher Wasserparameter mittels neuer Sensorsysteme sind die Validierung und Verifizierung der Daten. Dazu arbeitet das Scientific Diving Center (SDC) direkt vor Ort unter Wasser an der Überprüfung der Zuverlässigkeit der neuen Sensoren. Das SDC koordiniert den Einsatz des Schwimmroboters im Rahmen von drei Messkampagnen und ist bei auftretenden Problemen, wie dem Umgang mit Unterwasser-Hindernissen, direkt vor Ort. So können kritische Punkte unter Wasser dokumentiert, überwacht, gelöst und verbessert werden. Zusätzlich

werden In-situ-Messungen ausgewählter Parameter, wie Temperatur, Leitfähigkeit, Trübung und pH-Wert, durch die wissenschaftlichen Taucher durchgeführt. Damit lässt sich eine Echtzeitüberprüfung und Validierung der Sensoren durchführen. Weiterhin ist eine gezielte Beeinflussung der Sensoren durch die Taucher möglich, wodurch ein Grundwasserzutritt bzw. eine unetstetige Änderung der Wasserqualität nachgebildet werden kann. Die Entnahme von Wasser- und Sedimentproben mit gut dokumentierter und genauer Positionierung der Probenahme, sowie dem Einsatz von speziell entwickeltem Probenahmezubehör erlaubt den Vergleich zwischen den Daten des Sensorsystems und einer Laboranalyse, sowie die Bestimmung weiterer (Wasser-)Inhaltsstoffe. Ergänzend lassen sich durch die Taucher lokal begrenzte Anomalien (wie Grundwasserzu- und -abflüsse) auffinden, gezielt untersuchen, dokumentieren und beproben. Somit kann eine erste Erkundung bzw. eine detaillierte Nachuntersuchung ergänzend zum Einsatz des Schwimmroboters erfolgen.

Auch Gewässer atmen

Gewässer und Feuchtgebiete sind weltweit eine der größten Quellen klimawirksamer Spurengase.⁷ Zugleich fehlt es an nachweislich repräsentativen Daten.⁸ Entsprechend ist die Erfassung des Austauschs klimawirksamer Spurengase zwischen Wasseroberfläche und Atmosphäre wesentlich, um die Rolle der Gewässer im Klimawandel-Kontext charakterisieren zu können. Die Messung des Gasaustauschs erfolgt mit einer Modifikation des an der TU Bergakademie Freiberg entwickelten Kammersystems SEMACH-FG (Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, IÖZ). Das Kammersystem wurde auf die Schwimmplattform „ferdinand“ integriert und soll in Zukunft auch autonom arbeiten. Dies umfasst die Vor-Ort-Messung von Kohlendioxid (CO₂)-Konzentrationsänderungen, sowie die Gewinnung von Gasproben für die spätere Bestimmung der Konzentrationen an Methan (CH₄) und Distickstoffmonoxid (N₂O) mittels Gaschromatographie. Über die gewonnenen Daten werden die Gasflüsse berechnet, aus denen die Senken- oder Quellenfunktion des Systems berechenbar wird. Zusätzlich werden Vorräte an Kohlenstoff und Stickstoff im Sediment (Reservoir) durch manuelle Beprobung

erfasst. Das SEMACH-FG kam bereits bei Arbeiten auf Binnengewässern und in Feuchtgebieten im Rahmen diverser Qualifizierungsarbeiten zum Einsatz.⁹ Im Sommer 2020 arbeiteten die Masterstudenten Lisa Drechsler, Karsten Gustav und Eric Röder an Detailuntersuchungen eines für das Projekt relevanten Talsperrensyste(m)s (Klingenberg und Lehmühle), und nahmen dabei unter anderem intensive Tests der Respirationsmesstechnik und weiterer Prozesse im Nährstoffkreislauf der Gewässer vor. Deren Ergebnisse schufen eine Referenzdatengrundlage für die im RoBiMo-Projekt angestrebten automatisierten Messungen.

Was passiert als nächstes?

Das Projekt RoBiMo umfasst diverse Forschungsbereiche, die gemeinschaftlich an der Umsetzung einer kontinuierlichen robotischen Gewässerüberwachung arbeiten. Während der Projektlaufzeit werden ausgewählte Gewässer bereits befahren. Dies erfolgt in mehreren Messkampagnen:

Im Sommer 2020 wurde die Schwimmfähigkeit der modularen Plattformen „Elisabeth“ und „ferdinand“ getestet, ebenso der eigens entwickelte Multiparametersensor, die autonome Navigation sowie die Datenübermittlung. Es fanden Begehungen ausgewählter Gewässer statt, um erste Vor-Ort-Messungen durchzuführen und Wasserproben zu entnehmen. Eine Erweiterung der Basissensorknoten und der Messkette auf 20 m wird im Winter angestrebt.

Für Frühjahr/Sommer 2021 ist eine Feldkampagne des Systems im Amazonasbecken in Planung, bei dem es auch um die Überprüfung der Robustheit der Technik unter extremen Witterungsbedingungen geht.

Eine Implementierung und Überprüfung der Sensorkette soll im Sommer 2021 voraussichtlich am Haselbacher See stattfinden. Dort wird Sumpfungswasser des Tagebaus Schleenhain mit bekannter Hydrochemie eingespeist. Hier kann die Funktionalität der Sensoren überprüft werden. Außerdem soll das gesamte Robotersystem validiert werden.

Im dritten Jahr des Projekts, 2022, werden die ausgewählten Gewässer hinsichtlich ihrer hydrogeologischen Besonderheiten und Fragestellungen befahren. Es soll außerdem überprüft werden inwieweit eine Extrapolation auf andere

Einsatzgebiete (z. B. maritimer Raum) oder auf Extremereignisse möglich ist.

Da in RoBiMo sehr komplexe Sachverhalte unterschiedlicher Fachbereiche bearbeitet werden, wird ein Austausch mit den Verantwortlichen vergleichbarer Projekte angestrebt. Hier sollen Erfahrungen verglichen, fachlich diskutiert und mögliche Zusammenarbeiten besprochen werden. Ein solches Forum ist bereits in Planung.

Übergeordnetes Ziel der Projekte RoBiMo und AIRGEMM ist eine verbesserte Überwachung von Gewässern, die dem Erhalt der Wasserqualität und der Bewirtschaftung dienen soll. Dies wird mit dem Einsatz eines autonom schwimmenden Roboters und einer modularen Plattform mit Hilfe der Methoden der KI umgesetzt. Bis dato nicht vollständig verstandene Grundwasser-Seewasser-Interaktionen sind dabei ausschlaggebende Faktoren für den Zustand des Gewässers.

Weitergehende Informationen und Aktuelles:

<https://tu-freiberg.de/robimo>



<https://tu-freiberg.de/airgemm>



Referenzliste und weiterführende Literatur

- Drechsler L (2018) Respiration von Seekörpern – eine Annäherung. B.Sc. Arbeit, TU Bergakademie Freiberg
- Gartiser V (2020) Gas fluxes and C, N pools in aquatic systems. B.Sc. Arbeit, TU Bergakademie Freiberg
- Marcé R, Obrador B, Gómez-Gener L, Catalána M, Koschorreck M, Arce MI, Singer G, von Schiller D (2019) Emissions from dry inland waters are a blind spot in the global carbon cycle. *Earth Sci Rev* 188: 240-248; doi 10.1016/j.earscirev.2018.11.012
- Marwinski I, Neubert T (2015) THG-Emissionen von Feuchtgebieten und kleinen Binnengewässern. B.Sc. Tandemarbeiten, TU Bergakademie Freiberg
- Oertel C, Matschullat J, Zimmermann F, Zurba K, Erasmi S (2016) Greenhouse gas emissions from soils – a review. *Chem Erde - Geochem* 76, 3: 327-352; doi: 10.1016/j.chemer.2016.04.002
- Schwarzak S, Hänsel S, Matschullat J (2015) Projected changes in extreme characteristics for Central Eastern Germany (21st Century, model-based analysis). *Internat J Climatol* 35, 10: 2724-2734; DOI: 10.1002/joc.4166

7 Oertel et al. 2016

8 Marcé et al. 2019

9 Drechsler 2018; Gartiser 2020; Marwinski und Neubert 2015