

Sebastian Pose; Stefan Reitmann; Lisa Jarosch; Otto Dreier; Eric Röder; Gero Licht

# Automatisiertes Gewässermonitoring

Die Gewässerüberwachung erfordert bislang einen hohen personellen Aufwand. Robotik, KI und wissenschaftliches Tauchen können zur (kosten)optimierten Erfassung von Güteparametern in Binnengewässern beitragen.



Bild 1 Der Schwimmroboter „Elisabeth“ der TU Bergakademie Freiberg soll mit einem komplexen Sensorsystem für das Gewässermonitoring ausgestattet werden.  
Quelle: TU Bergakademie Freiberg

## Robotergestütztes Binnengewässer-Monitoring

Die Projekte RoBiMo (Robotergestütztes Binnengewässer-Monitoring) und AIRGEMM (Artificial Intelligence and Robotics for GeoEnvironmental Modelling and Monitoring) an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg wollen zu einer deutlichen Verbesserung des Gewässermanagements beitragen. Bisherige Einschränkungen der Frequenz und Intensität der Überwachungsleistungen sollen dabei überwunden werden. Neu einzuführende Parameter (z. B. Gewässerrespiration) erlauben besser auf Herausforderungen im Rahmen des globalen Wandels einzugehen. Die ESF Nachwuchsforschergruppe RoBiMo setzt sich aus einem interdisziplinären

Team der TU Bergakademie Freiberg zusammen und nahm am 1. Januar 2020 seine Arbeit auf. Gemeinsam möchte man eine ganzheitliche technische Lösung zur regelmäßigen, kontinuierlichen, automatisierten, 3D-ortsaufgelösten und multisensorischen Erfassung im Bereich des Binnengewässer-Monitorings entwickeln (Bild 1). Ziel ist es in Talsperren, gefluteten Tagebauseen und anderen Binnengewässern ein umfassenderes Verständnis der Gewässergüteentwicklung in Folge jahreszeitlicher Schwankungen und Extremwetterereignissen zu gewinnen. Dazu soll der bestehende Schwimmroboter „Elisabeth“ mit einem Sensorsystem ausgestattet werden. Dieser wird autonom und mit Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) Gewässer teilweise bzw. komplett tiefenaufgelöst

Zahlreiche Talsperren, Stauseen und andere Binnengewässer dienen in Deutschland beispielsweise der Trink- und Brauchwassergewinnung, der Fischerei, dem Tourismus und dem Erhalt des ökologischen Zustands des Naturhaushalts. Besonders die trockenen Jahre 2018/19 stellten die Funktionalität und Versorgungssicherheit der Anlagen auf die Probe. Auch die große Zahl gefluteter Bergbaufolgeseen stellt durch wiederkehrende Versauerungsprozesse erhebliche Herausforderungen für deren nachhaltige Nutzung dar. Das Gewässermonitoring erfolgt in regelmäßigen Zeitintervallen und ist bislang mit einem hohem personellen Aufwand und entsprechenden Kosten verbunden.

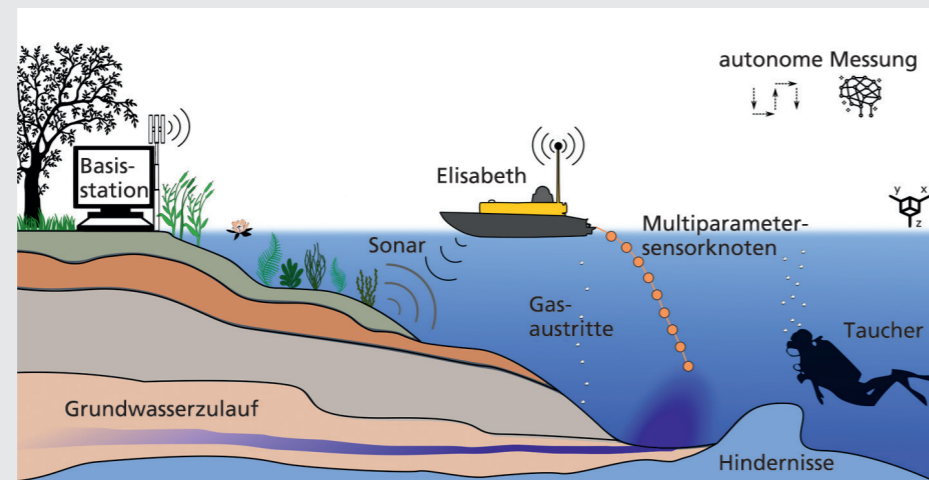


Bild 2 Untersuchungen mit dem Schwimmroboter „Elisabeth“: Autonome, dreidimensionale, multisensorische Erfassung von Binnengewässern, Validierung der Ergebnisse und Darstellung mit Methoden der KI  
Quelle: TU Bergakademie Freiberg

**Projekt RoBiMo**



**Projekt AirGemm**



**Finanzierung**



Europäische Union

Europa fördert Sachsen.



ESF  
Europäischer Sozialfonds



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

untersuchen. Das Sensorsystem soll aus einer Kette von Sensorelementen bestehen, wovon jedes eine Vielzahl an Wassergüteparametern simultan erfasst. Die Ausstattung des Roboters, die Entwicklung der KI sowie die virtuelle Darstellung der Daten wird durch das Projekt AIRGEMM am Institut der Informatik der TU Freiberg realisiert. Die Daten werden in Bezug auf Umweltkartierung und -überwachung ausgewertet. Aus Ultraschallkartierungen gewonnene 3D-Punktwolken werden durch die Analyse maschinellen Lernens nach Objekttypen klassifiziert.

### Wenn die „Elisabeth“ nicht so tolle Sensoren hätte

Der Schwimmroboter „Elisabeth“ (Bild 2) entstand auf Basis eines Katamarans von Clearpath Robotics und steht dem hiesigen Projektverbund zur Verfügung (Länge 1,3 m, Breite 0,9 m). Ausgestattet mit Sensorik für Positionsbestimmung (GNSS) sowie Beschleunigung und Lage (IMU) wird

der Schwimmroboter für das Projekt um ein Fächerecholot mit einer erreichbaren Tiefe von 100 m zur dreidimensionalen Erfassung des Untergrundes erweitert. Die verfügbare Rechenleistung auf dem Schwimmroboter wurde so gewählt, dass sowohl eine Vorverarbeitung der Messwerte, wie auch eine Pfadplanung unter Berücksichtigung aktueller Messwerte auf dem Boot möglich sind. Eine Akkuladung ermöglicht durchgehende Messungen von mindestens drei Stunden, durch austauschbare Akkus sind mehrere Messfahrten direkt hintereinander umsetzbar. Erweitert wird der Schwimmroboter im Laufe des Projektes durch eine Plattform, die als Träger der Sensorkette dient und durch den Schwimmroboter bewegt wird. Durch die Trennung bleibt das Messsystem transportabel und kann von zwei Personen ohne Hilfsmittel bewegt werden. Ergänzt wird das System durch eine Basisstation am Ufer zur Übermittlung der Messwerte in Echtzeit.

## Meilenstein.



Bereits auf den ersten Blick ist es am modernen Design unseres gasdichten Iris® Blenden-Regulierschiebers klar abzulesen. Bewährtes immer besser zu machen, ist unser Antrieb. Dabei bleibt die Idee dieses industriellen Allrounders auch in der dritten Generation bestechend einfach. Nur in der Mitte bleiben Ströme von Flüssigkeiten und Gasen immer im Fluss. Und lassen sich viel exakter und damit energiesparender regeln. Präzise. Zuverlässig. Wartungsfrei. Weitere Informationen: [www.eggerpumps.com](http://www.eggerpumps.com)

EGGER



Bild 3 Wissenschaftliche Taucher des Scientific Diving Centers mit einer Sedimentprobe bei der jährlichen wissenschaftlichen Taucherkursion (<https://tu-freiberg.de/sdc>).  
Quelle: TU Bergakademie Freiberg

### Design und Herstellung einer Multi-sensor-Messkette

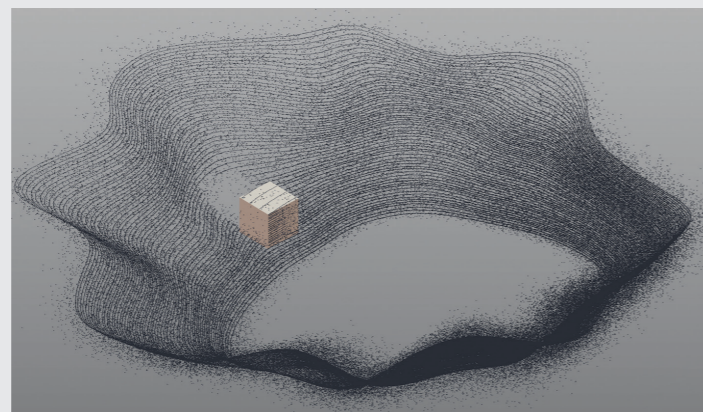
Das Arbeitspaket Sensorentwicklung (Institut für Elektronik- und Sensormaterialien) des Projektes RoBiMo beschäftigt sich mit Design und Herstellung einer Multisensor-Messkette. Durch den Einsatz einer Messkette mit zahlreichen Sensorknoten, und damit auch Messpunkten, wird es möglich sein, die verschiedenen Gewässerparameter zeitgleich tiefenaufgelöst zu erfassen. Neben dem Abschluss von zeitlichen Abweichungen, erlaubt simultanes Messen eine schnellere Vermessung des gesamten Gewässers. Die Messkette wird aus modularen Sensorknoten bestehen, um Erweiterbarkeit und Flexibilität der Messung sicher zu stellen. Die Sensorknoten werden mit mehreren Sensoren für seenphysikalische sowie ökologisch relevante Parameter ausgestattet. Zudem werden eigene Sensoren entwickelt, um die kommerziellen Produkte zu ergänzen. So soll ein filtrierender Sensor zur Erfassung der Gewässerbelastung durch Mikroplastik entwickelt und implementiert werden.

Neben dem Design der Sensorknotengehäuse und der Einbindung der Sensoren ist ein geeignetes System zu entwickeln, das die Kommunikation zwischen dem USV (unmanned surface vehicle) und den Sensoren ermöglicht. Zur Minimierung des Leistungsbedarfs müssen die Sensorknoten hinsichtlich Gewicht und Stromverbrauch optimiert werden.

### Validierung und Verifizierung der Ergebnisse

Eine Herausforderung bei der Messung mittels neuer Sensorsysteme kann die Validierung und Verifizierung der Ergebnisse darstellen. Dazu ist das wissenschaftliche Tauchzentrum (Scientific Diving Center) der TU Bergakademie Freiberg bei diesem Projekt eingebunden. Dieses koordiniert den Einsatz des Schwimmroboters im Rahmen dreier Messkampagnen und ist bei auftretenden Problemen, wie dem Umgang mit Unterwasser-Hindernissen, direkt vor Ort. Durch die in-situ Messung ausgewählter Parameter, wie Temperatur und Leitfähigkeit, können die Ergebnisse des Messsystems überprüft und bewertet werden. Weiterhin ist eine gezielte Beeinflussung der Sensoren durch die wissenschaftlichen Taucher mög-

Bild 4 Beispielhafte Darstellung einer 3D-Welt aus einer Punktwolke.  
Quelle: TU Bergakademie Freiberg



lich. Die Entnahme von Wasser- und Sedimentproben (Bild 3) erlaubt den Vergleich zwischen Daten des Sensorsystems und einer Laboranalyse, sowie die Bestimmung weiterer (Wasser-) Inhaltsstoffe. Zudem lassen sich durch die Taucher lokal begrenzte Anomalien (wie Grundwasserzu- und -abflüsse) auffinden, gezielt untersuchen und beproben.

### Inputdaten für die künstliche Intelligenz

Durch den Einsatz von Fotogrammetrie zur 3-dimensionalen Erfassung von Unterwasserobjekten können Inputdaten für die künstliche Intelligenz gewonnen werden. KI-Methoden zur Objekterkennung, sowie zur Auswertung von Bildern und Messdaten erfordern ein hohes Maß an Vorbereitung und große Mengen Referenzdaten. Dies wird im Projekt AIRGEMM innerhalb zweier wesentlicher Teile bearbeitet:

- Erstellung einer Untersuchungsumgebung und
- Implementierung von Sensorik in diesem Untersuchungsraum.

Die Erstellung von Untersuchungsumgebungen beinhaltet die Erzeugung einer 3D-Welt (z. B. eines Gewässers) und zugehöriger Vegetation, aber auch von Fremdobjekten (z. B. Rohrleitungen), die es zu identifizieren gilt. Die Sensorik muss die 3D-Szene gemäß der realen Sensorik-Charakteristiken des Schwimmroboters aufgreifen (Bild 4). Auf diese Weise können vielfältige Trainingsbeispiele erzeugt werden, um eine KI auf den Einsatz in Binnengewässern vorzubereiten. Neben der Objekterkennung ist die Erfassung von beweglichen Objekten (wie Fischen) wesentlicher Forschungsgegenstand. Erzeugung und Analyse der Daten erfordern einen sehr hohen Rechenaufwand. Dies wird am Institut für Informatik mit einem KI-Rech-

ner NVIDIA DGX2 gelöst (Bild 5). Er stellt ein leistungsfähiges System mit 16 Grafikprozessoren für die Bearbeitung komplexer KI-Herausforderungen dar.

### Gewässerinterne Prozesse besser verstehen

Zum Verständnis gewässerinterner Prozesse sollen verschiedene Parameter und deren räumliche sowie zeitliche Variation im Binnengewässer untersucht werden (Institut der Geologie). Dazu zählen seenphysikalische Parameter, wie pH-Wert, Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, Wasserinhaltsstoffe (z. B. Phosphat, Nitrat, Chlorophyll und Mikroplastik) sowie weitere wasseranalytische Bestimmungen wichtiger Anionen und Kationen. Das Einzugsgebiet des Gewässers wird zudem hinsichtlich des Stoffeintrags betrachtet. Ein wichtiger Aspekt sind Grundwasserzutritte, die Nähr- und Schadstoffe in das Gewässer einbringen können. Innerhalb des Projektes sollen zudem für Modellseen Respirationsgasflüsse klimawirksamer Spurengase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$ ) gemessen und die im Sediment befindlichen relevanten Elementpools erfasst werden (Institut der Mineralogie). Die Gasflussmessungen erfolgen mit einer Modifikation des an der TU Bergakademie Freiberg entwickelten dynamischen Kammersystems SEMACH-FG, das bereits im Rahmen von Qualifizierungsarbeiten auf Gewässern zur Anwendung kam. Im Sommer 2020 sind Messkampagnen zur manuellen Beprobung eines zukünftigen Modellsees geplant, um eine Referenzdatengrundlage für die angestrebte automatisierte Messung zu schaffen.

### RoBiMo im Vergleich zu anderen Projekten

Es existieren vergleichbare wissenschaftliche Projekte zur Vermessung und Beprobung von Binnengewässern (BOOT-Monitoring). Die Projekte der TU Freiberg grenzen sich dazu klar ab, da hier automatisierte Messungen erfolgen. Andere Projekte (RiverView oder AquaSense), die bereits automatisierte Gewässervermessung unter Aufnahme diverser Wasserparameter nutzen, setzen konventionelle Sensoren in einem einzelnen Sensorelement ein. Im Vergleich dazu werden bei RoBiMo und AIRGEMM eigene multimodale Sensoren entwickelt, die an einer Sensorkette in variabler Auflösung unter-

schiedliche Tiefen abdecken. Da die Sensorkette automatisch angehoben und absenkt werden kann, lassen sich aus der Bewegung des Schwimmroboters spezifische 3D-Repräsentationen der erfassten Phänomene erzeugen. Diese Darstellung zeitlicher und räumlicher Zusammenhänge ermöglicht ganz neue Erkenntnisse. Gleichzeitig leitet das Team aus den erfassten Größen neue Strategien für automatisierte Datenaggregation ab. Deren Erfolg kann dann durch die Einbindung von Ground-Truth Daten, erfasst durch wissenschaftliche Taucher des Scientific Diving Center, überprüft werden. Damit sollen eine bessere Kalibrierung der Sensorkette sowie die Aufnahme weiterer Parameter erfolgen, um das Gewässermontoring zu ergänzen.

### Zeitplanung

Der zeitliche Ablauf der notwendigerweise iterativen Entwicklungen und Untersuchungen ist stark an den drei geplanten Messkampagnen (eine pro Jahr) orientiert. Diese sollen jeweils in den Sommermonaten durchgeführt werden.

Im ersten Jahr (2020) stehen die Basisfunktionalität des Schwimmroboters, autonome Navigation, Datenübermittlung sowie der Einsatz eines vereinfachten Messknotens mit Basisparametern, wie Druck, Temperatur, Beschleunigung und Leitfähigkeit im Vordergrund. Über die folgenden Wintermonate soll die Messkette auf 20 Meter erweitert und mit allen benötigten Sonden und Sensoren ausgestattet werden. In der zweiten Messkampagne (2021) wird eine Verifizierung des gesamten Sensor- und Robotersystems erfolgen. Im Jahr 2022 erfolgt dann eine fachspezifische Untersuchung ausgewählter Binnengewässer in Bezug auf konkrete hydrologische und gewässerkundliche Fragestellungen. Weiterhin soll die Möglichkeit der Extrapolation des Messsystems auf andere (z. B. maritime) Einsatzgebiete oder Extremereignisse untersucht werden.

### Zwei beteiligte Projekte, viele Synergien

Ziel der Zusammenarbeit der vorgestellten Projekte ist es, eine autonome, multisensorische Messung gewässerrelevanter Parameter vorzunehmen und diese entsprechend intuitiv nachvollziehbar zu visualisieren. Im Zusammenwirken der Einzelkomponenten



Bild 5 KI-Rechner NVIDIA DGX2 des Instituts für Informatik an der TU Bergakademie Freiberg.  
Quelle: TU Bergakademie Freiberg

Sensorik, Schwimmrobotik, automatischer Auswertung/Interpretation und Visualisierung lässt sich eine kontinuierliche Überwachung von Gewässerzuständen und -güte realisieren. Erweiterungen der Sensormesskette werden ebenso angestrebt wie innovative Lösungen zur Erfassung der Gewässerrespiration. Der Schwimmroboter soll bereits während der Projektlaufzeiten Trinkwassertalsperren und geflutete Bergbaufolgeseen befahren und untersuchen. Technische Maßnahmen, wie die Kalkung von Bergbaufolgeseen, sollen auf ihre Wirksamkeit geprüft werden. Der Erhalt der Wasserqualität und der Bewirtschaftung stehen dabei im Fokus ebenso wie Grundwasser-Seewasser-Interaktionen, die für den Gewässerzustand eine ausschlaggebende Rolle spielen und nicht im Detail verstanden sind. Die Zusammenarbeit der verschiedenen Institute in Freiberg bietet dabei große Synergien bei der zu bewältigenden Aufgabe und eine Vielzahl an Möglichkeiten und Ideen um das Projekt erfolgreich abzuschließen.

■ Technische Universität  
Bergakademie Freiberg  
Sebastian Pose (Korrespondenz-Autor)  
[Sebastian.Pose@sdc.tu-freiberg.de](mailto:Sebastian.Pose@sdc.tu-freiberg.de)  
<https://tu-freiberg.de/robimo>  
<https://tu-freiberg.de/airgemm>