

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Zuwendungsempfänger:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.

Titel der Förderung:

OTC Rostock: Autonome, modulare Infrastruktur für Unterwassersysteme (OTC-Base) - A

Verantwortliche Autoren:

Jan Witte (Fh-IOSB)
Philipp Woock (Fh-IOSB)
Ganzorig Baatar (Fh-IOSB-AST)
Torben Dankwort (Fh-ISIT)
Uwe Lichtenstein (Fh-IGD)

Förderkennzeichen:

03ZU1107AA

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZU1107AA gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

SCHLUSSBERICHT TEIL I:

KURZBERICHT

FRAUNHOFER IOSB

Karlsruhe, 13. Februar 2025

Förderkennzeichen: 03ZU1107AA

Vorhabenbezeichnung: Ocean Technology Campus (OTC) Rostock
Autonome, modulare Infrastruktur für Unterwassersysteme (OTC-Base) - A

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2021 – 30.09.2024

Berichtszeitraum: 01.10.2021 – 30.09.2024

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung, Anknüpfen an wissenschaftlichen und technischen Stand

In OTC-Base wird ein Unterwasser-Absetzgestell als erste Realisierung entwickelt, inklusive eines zentralen Rechen- und Administrationsmoduls. Die Projektpartner entwickelten und integrierten in OTC-Base Module für Energieversorgung, -übertragung, Kommunikation, Verortung und Positionierung. Im finalen Seeversuch am Digital Ocean Lab (DOL) wurden die Plattform, Kommunikationsinfrastruktur und Energieschnittstellen in einem Szenario mit einem autonomen Unterwasserfahrzeug getestet und demonstriert. Das Gesamtziel des Vorhabens bestand in der Bereitstellung von Standards bzgl. Energieversorgung, Energieschnittstellen, Kommunikation, Rechnerinfrastruktur und mechanischer Infrastruktur für alle OTC-Projekte durch eine offene Plattform.

Die beteiligten Fraunhofer-Institute definierten individuelle Ziele und einigten sich im Projektantrag auf folgende Aufgabenteilung: Das Fraunhofer IOSB-AST konzentrierte sich auf die Konzeption und Planung der Hardware für die Unterwasserkamerasysteme. Das Fraunhofer IOSB war mit der Definition und Dokumentation der internen Informationsschnittstellen, die als Grundlage für die Integration der verschiedenen Funktionsmodule dienen, betraut. Ein weiteres Ziel war die Konzeption und Umsetzung eines skalierbaren Kommunikations- und Energiemanagement-Hubs. Dieser wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern entwickelt und beinhaltete die Integration vielseitiger Schnittstellen, um die Anforderungen der heterogenen Systemkomponenten zu erfüllen. Ein zentraler Schwerpunkt lag auf der Entwicklung einer modularen Software-Infrastruktur, die auf offenen und etablierten Standards wie ROS 2 basiert. Diese Architektur wurde so gestaltet, dass sie langfristig erweiterbar ist und eine einfache Integration unterschiedlicher Sensorkomponenten er-

möglich. Das Fraunhofer ISIT hat sich auf die Entwicklung eines speziellen Vibrationsharvestermoduls konzentriert. Das verwendete MEMS-Bauteil besteht aus einem Biegebalken mit piezoelektrischer Beschichtung und einem NdFeB-Mikromagnet-Array. Es kann mechanische Bewegungen von externen Magneten und mechanische Impulse auf den Harvester übertragen. Um auch außerhalb der Resonanz signifikante Energie zu erzeugen, muss der Biegebalken nach einer Auslenkung durch einen einzelnen Stoß lange nachschwingen können. Diese Technik, bekannt als "Frequency-Up Conversion", ermöglicht es, elektrische Energie aus nichtperiodischen oder niederfrequenten mechanischen Oszillationen zu gewinnen. Das Fraunhofer IGD fokussierte sich in der letzten Projektphase auf Vorbereitung und Durchführung der finalen Tests im Digital Ocean Lab (DOL) in der Ostsee.

2. Ablauf des Vorhabens

Fraunhofer IOSB-AST:

Im Rahmen dieses Projekts entwickelte das Fraunhofer IOSB-AST zwei Unterwasserkamerasysteme für den stationären Einsatz mit einer universellen Kommunikationsschnittstelle. Der Entwicklungsumfang betrifft die Hardware, deren Zusammenbau und Prüfung auf Druckfestigkeit sowie die Softwareschnittstelle zur Steuerung der hier zu entwickelnden Systeme.

Fraunhofer IOSB:

Die Arbeiten des Fraunhofer IOSB konzentrierten sich auf die Entwicklung einer modularen, skalierbaren Softwareinfrastruktur für ein Unterwasserabsatzgestell. Im Fokus stand die Konzeption und prototypische Umsetzung einer modular gestalteten Software- und Hardwarearchitektur, um die Integration heterogener Komponenten zu ermöglichen.

Im Laufe des Projekts wurde eine Node-Architektur mit einem Publisher-Subscriber-Modell entwickelt. Flexible Schnittstellen für die Anbindung diverser Sensoren wurden definiert, und die Software-Infrastruktur basierte auf etablierten Standards, um langfristige Skalierbarkeit und Erweiterbarkeit zu gewährleisten. Prototypen der Kommunikations- und Computing-Module wurden aufgebaut und getestet, erste Sensoren angebunden, und Daten für Tests bereitgestellt.

Die Hardware- und Netzwerkintegration, einschließlich eines Batteriemanagementsystems, wurde erfolgreich abgeschlossen. In gemeinsamen Testaufbauten wurden die Konfiguration der Schnittstellen sowie die Integration der Sensorkomponenten überprüft. Abschließend wurde das Gesamtsystem in unterschiedlichen Szenarien getestet.

Fraunhofer ISIT:

In diesem Projekt wurde ein Energy-Harvesting-Modul entwickelt und getestet, das das Zero Power Wake Up-Konzept nutzt. Zuerst wurden verschiedene Energy-Harvesting-Konzepte untersucht, um ein tieferes Verständnis dieser Techniken zu erlangen. Im weiteren Projektverlauf wurde das Harvesting-Modul aufgebaut und charakterisiert, wobei seine Funktionen und Eigenschaften getestet und analysiert wurden. Darauf folgte die Umsetzung des Energy-Harvesting-Systems und die Testphase im Labor, bei der die Leistung und Effizienz des Systems in einer kontrollierten Umgebung überprüft wurde. Schließlich wurde das Modul unter realen Bedingungen im Seerversuch getestet und, falls nötig, angepasst.

3. Wesentliche Ergebnisse und ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Fraunhofer IOSB-AST:

Die im Projekt einzusetzenden Kamerasysteme wurden fristgerecht hergestellt und geliefert. Die Lieferung umfasste die geplanten zwei Kamerasysteme und die Softwarelösung zur Integration und Steuerung. Die Projektplanung sah nicht vor, dass weiterführende Arbeiten zur Integration im Gesamtsystem seitens Fraunhofer IOSB-AST durchgeführt werden. Aufgrund der Schwierigkeiten in der Umsetzung der Integrationsvorhaben des Gesamtsystems konnte die Softwarelösung nicht fristgemäß von den Projektpartnern integriert werden.

Fraunhofer IOSB:

Die definierten Ziele des Projekts wurden erfolgreich erreicht. Zusammen mit dem Lehrstuhl Meeresstechnik der Universität Rostock wurde ein iterativ optimiertes Schaltschema entwickelt, das die Anforderungen aller Projektpartner berücksichtigte. Die Informationsschnittstellen wurden strukturiert dokumentiert und bilden eine transparente Grundlage für zukünftige Entwicklungen.

Der Kommunikations- und Energiemanagement-Hub wurde prototypisch aufgebaut, und Prototypen der zentralen Recheneinheiten wurden erfolgreich getestet. Die entwickelte Software-Infrastruktur wurde so gestaltet, dass heterogene Sensorkomponenten wie IMU-, ADCP- und Trübungssensoren angebunden werden konnten. Die Middleware wurde in eine Containerplattform integriert, um die Flexibilität der Software zu gewährleisten. Ein abschließender Systemtest unter Laborbedingungen bestätigte die Funktionsfähigkeit der Infrastruktur.

Die optimierten Schaltschemata und die getesteten Prototypen legten eine solide Basis für weitere Entwicklungen. Eine umfassende Dokumentation stellt die Transparenz und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sicher.

Fraunhofer ISIT:

Im Rahmen des Projekts wurden wesentliche Ziele im Energy-Harvesting erreicht. Untersuchungen zu verschiedenen Konzepten und die Entwicklung von Prototypen standen im Fokus. Besonders hervorzuheben ist das Konzept des Zero Power Wake Up zur Energieeinsparung.

Ein auf diesen Erkenntnissen basierender Prototyp wurde erfolgreich getestet. Ein entsprechendes Modul wurde aufgebaut und integriert, welches ein Sensorsystem aktiviert und die Energieversorgung mittels Latching-Circuit reguliert.

SCHLUSSBERICHT TEIL II: EINGEHENDE DARSTELLUNG

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Karlsruhe, 13. Februar 2025

Förderkennzeichen: 03ZU1107AA

Vorhabenbezeichnung: Ocean Technology Campus (OTC) Rostock
Autonome, modulare Infrastruktur für Unterwassersysteme
(OTC-Base) - A

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2021 – 30.09.2024

Berichtszeitraum: 01.10.2021 – 30.09.2024

1. Im Rahmen des Vorhabens durchgeführte Arbeiten (Überblick)

OTC-Base stellt die technologische Basis für alle im Rahmen des OTC geplanten Entwicklungsvorhaben dar. Dabei sollen innerhalb von OTC-Base sowohl methodische als auch technologische Entwicklungen in gleicher Weise Berücksichtigung finden. Ziel ist es, eine physische Entwicklungsumgebung bereitzustellen, um zielgerichtet an Unterwassertechnologien zu forschen, die in Zukunft eine weitgehend autonome Erforschung der marinen Umwelt ermöglichen. Mit OTC-Base wird innerhalb des Clusters die Voraussetzung zur Erprobung neuer Technologien und Systeme geschaffen. Die Ergebnisse befördern direkte und effiziente Erprobungen unter realen Bedingungen, z. B. am Digital Ocean Lab (DOL). Das Projekt stellt im ersten Ansatz eine am Meeresboden installierte, modular aufgebaute Infrastruktur dar, die in späteren Entwicklungsstufen durch mobile Systeme ergänzt wird. Das Projekt wurde in [Rau23] international vorgestellt.

2. Detailliertere Darstellung der Ergebnisse

2.1. Fraunhofer IOSB-AST

Die ersten Treffen aller Projektpartner haben gezeigt, dass die ursprünglich geplanten Arbeiten zur Konzeption und Entwicklung von Energiemanagement-HUBs mit sehr geringem Aufwand von dem Projektpartner (Kraken Power GmbH) umgesetzt werden könnten. Kraken Power GmbH ist in diesem Projekt zur Umsetzung von Energieversorgung und Batteriemanagement beauftragt worden. So wurde eine Umstrukturierung der Arbeitspakete im Laufe des Projekts durchgeführt, so dass Fraunhofer IOSB-AST mit der Konzeption und dem Aufbau von Unterwasserkamerasystemen beauftragt wurde. Der Arbeitsaufwand und Materialkosten entsprachen den im Projektantrag geplanten Schätzungen und Mitteln.

Nach anfänglichen Schwierigkeiten mit den Lieferzeiten der Elektronikbauteilen wurden die Kameras fristgerecht aufgebaut. Nach dem Aufbau der Hardware, in diesem Fall die Kameras, wurde die Steuereinheit der Kamera so aufgebaut, dass sie mit Hilfe eines ROS-Knotens angesteuert werden kann.

2.1.1. Hardware – Aufbau des Kamerasystems

Die Kamerasysteme wurden im Laufe der April 2023 vollständig zusammengebaut. Eine Unterwasser-kamera besteht aus den folgenden Einzelteilen:

1. Kamera (GoPro Hero 9 Black),
2. Steuer- und Kommunikationseinheit (Onion Omega2+),
3. Ansteckplatine mit DC/DC-Wandler und Schnittstellen,
4. wasserdichte Gehäuse für Kamera und Elektronikbauteile und
5. spezielle Unterwasserstecker für Kommunikation und Strom (SubConn MCBH8M)

Nachdem die Einzelteile fachgerecht zusammengesetzt wurden, wurden erste Funktionstests sowie Softwaretests durchgeführt. Sofern keine Fehler vorhanden sind, werden die Komponenten in dem wasserdichten Gehäuse integriert und wasserdicht verschlossen. Das so verschlossene Gehäuse (Abbildung 1), bzw. das Kamerasystem, wird entsprechend der Vorgaben auf Dichtigkeit getestet.



Abbildung 1: Kamerasystem in Unterwassergehäuse

Die Unterwasserkameras können in einer maximalen Tiefe von 150 Metern eingesetzt werden. Somit wurde ein Drucktest mit einer 20-prozentigen Sicherheitspuffer durchgeführt, so dass die neu aufgebauten Kamerasysteme bei 18 bar auf Druckfestigkeit geprüft worden sind. Abbildung 2 zeigt den Drucktestverlauf des dazugehörigen Dichtigkeitstests. Zur Feststellung der Dichtigkeit wurden die Gewichte der Testobjekte vor und nach dem Test ermittelt und kein Wassereintritt oder offensichtliche Gewichtsunterschiede festzustellen sind, werden weitere Untersuchungen durchgeführt. Wenn bei optischen Betrachtungen keine mechanischen Schäden oder physische Anomalien festzustellen sind, werden die Kamerasysteme auf ihre Funktion getestet. Da die Kameras einwandfrei funktionierten, wurden die Kameragehäuse mit Drucktest-Siegel versiegelt. Bei jedem Einsatz sollte darauf geachtet werden, dass diese Siegel nicht beschädigt sind. Falls diese Siegel nicht mehr in Ordnung sind, besteht die Möglichkeit, dass die Kameragehäuse schon geöffnet wurden. In diesem Fall kann Fraunhofer IOSB-AST die Druckfestigkeit der Kameras nicht mehr garantieren, da wegen eines möglichen mechanischen Eingriffes auch Beschädigungen an den Dichtelementen der Gehäuse entstanden sein könnten.

Druckverlauf

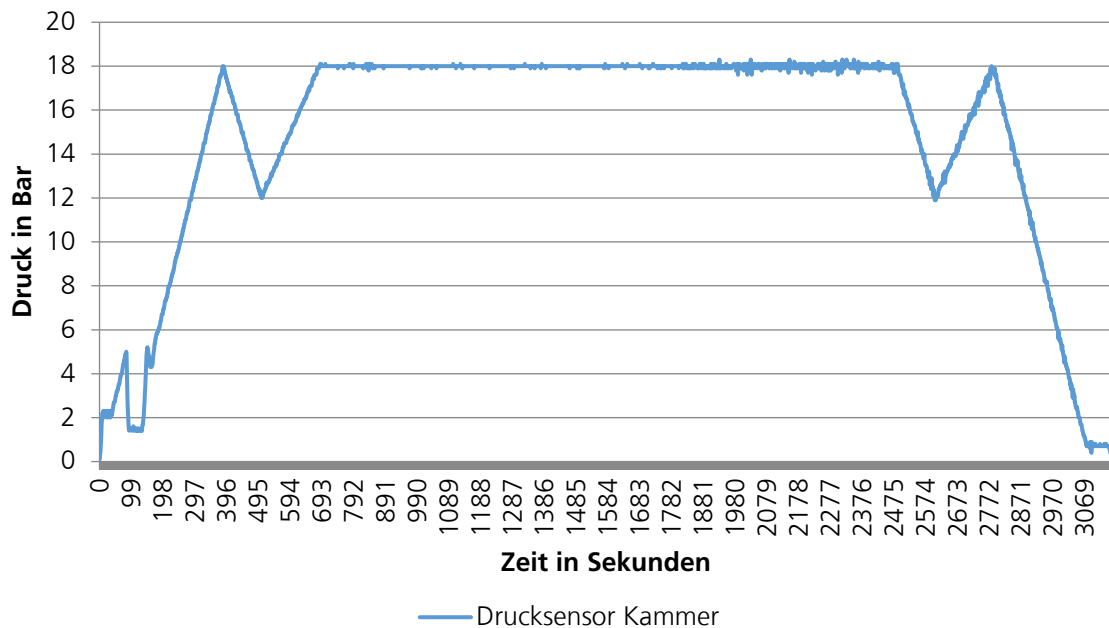


Abbildung 2: Drucktestverlauf - Test bis 18 bar

2.1.2. Software

Die Steuerung der GoPro Kameras erfolgt mit Hilfe von eigens entwickelter Software, die auf einem Linux basierten Betriebssystem laufen. Diese Software ermöglicht die Kommunikation zwischen der Kamera und Bediener und stellt den Video-Stream von der Kamera bereit. So kann ein Bediener eine SSH-Kommunikation zu der Kamera aufbauen und verschiedene Funktionen einleiten:

- Starten und Stoppen von Video-Streams,
- Video-Aufnahme starten und stoppen,
- Einzelfotos aufnehmen,
- Foto-Serien einstellen und aufnehmen,
- Kamera aus- und einschalten.

Diese Software dient lediglich zur grundsätzlichen Steuerung des Kamerasystems und bietet eine Schnittstelle für den Bediener bzw. das Bediensystem an.

Aufgrund des weitestgehend automatisierten Einsatzes des OTC-Base Systems, müssen entsprechende Schnittstellen für die vorgegebene Systemumgebung entwickelt werden. In diesem Fall wird ein ROS-2-Knoten für die Kommunikation mit den Kamerasystemen entwickelt. Diese Entwicklung erfolgte ebenfalls im Rahmen des Projektvorhabens (Abbildung 3).

Der ROS-2-Knoten wurde für die 2023 aktuelle Version „Iron Irwini“ entwickelt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt (<https://gitlab.cc-asp.fraunhofer.de/gan17244/ros2-go-pro-interface>).

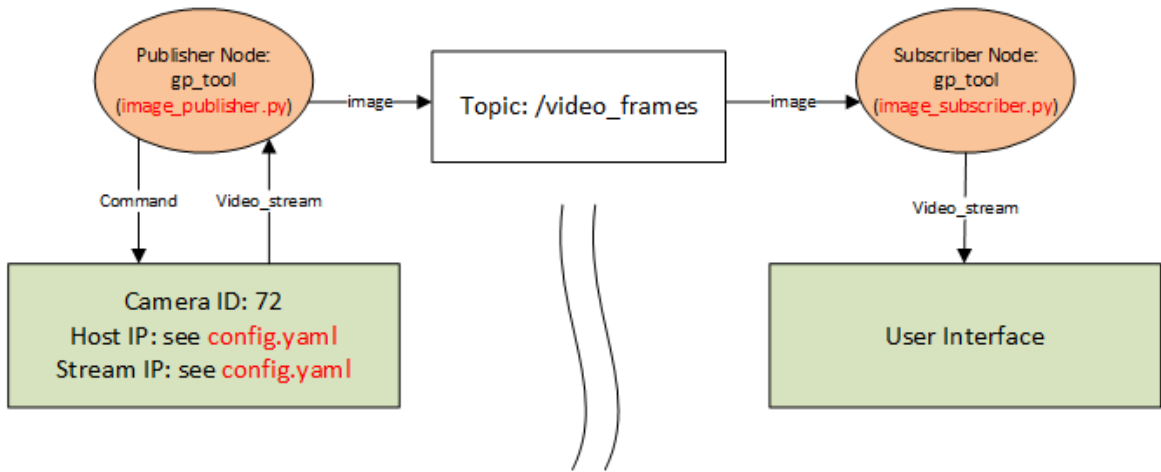


Abbildung 3: Struktur des ROS-Knotens

Der hier entwickelte ROS-Knoten besteht aus zwei Komponenten: „Publisher Node“ und „Subscriber Node“. Publisher Node soll auf dem OTC-Base-Steuereinheit laufen. Dies ermöglicht eine direkte Verbindung zu den Kamerasystemen, so dass die Video-Streams direkt am Knoten entgegengenommen werden. Die so empfangene Video-Streams werden in ROS 2 verständliche Topic umgewandelt und unter dem Topic „/video_frames“ in das System veröffentlicht. Die Grundeinstellungen, wie der Knoten die Verbindungen zu den Kamerasystemen aufbaut, sind in der Datei „config.yaml“ (siehe Abbildung 4) aufgeführt und bei Bedarf können diese entsprechend angepasst werden. Abbildung 5 zeigt die Prozessstruktur der hier beschriebenen Knoten. In den Funktionsblöcken sind die zutreffenden Konfigurationseinträge aufgeführt.

```

config.yaml
1 controller:
2   host_ip: 192.168.2.71
3   user: root
4   password: toor
5
6 publisher:
7   udp_address: "udp://127.0.0.1"
8   port: 5005
9   stream_config: "overrun_nonfatal=1&fflags=nobuffer&f:m=mpegts&probesize=8192&loglevel=0"
10  idle_image: test.jpg
11  timer_period: 0.1
12  show_video: True
13  topic: video_frames
14
15 subscriber:
16  drop_offset: 0.5
17  image_rotation: 180
18
  
```

Abbildung 4: Konfigurationsdatei Kamera-Knoten

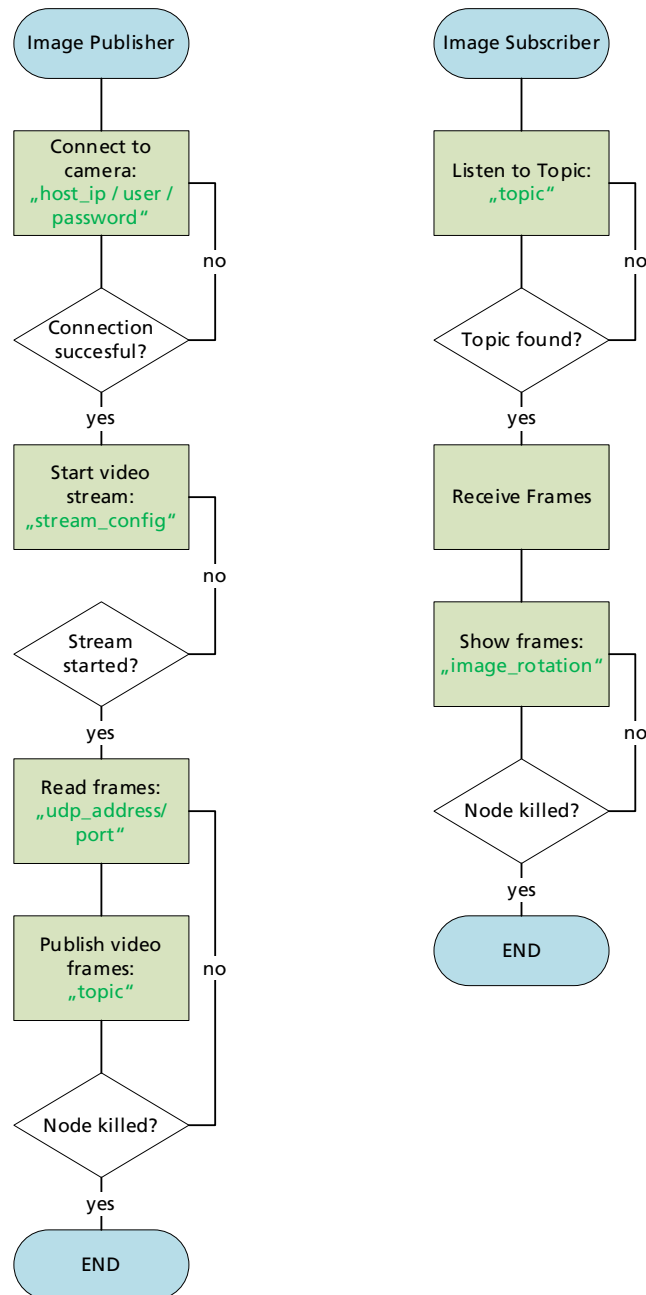


Abbildung 5: Prozessstruktur "Publisher" und "Subscriber" Nodes

Subscriber Node ermöglicht den Operator auf der Benutzeroberfläche die Video-Streams abzuspielen und Befehle an die Kamera zu senden. Je nach Montageausrichtung der Kamerasysteme kann das Videobild rotiert werden, wie in der Konfigurationsdatei festgelegt ist.

2.1.3. Wesentliche Ergebnisse und ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Es hat im November 2023 ein planmäßiges Integrationstreffen bei der Firma „Framework Robotics“ stattgefunden. Zu diesem Zeitpunkt waren die Kamerasysteme bereits den Projektpartnern übergeben worden. Bei diesem Treffen wurden System-Konfigurationen des OTC-Base besprochen und ersten Anpassungen vorgenommen. Fraunhofer IOSB-AST hat zu dem

Treffen den entwickelten ROS-2-Knoten für die Kamerasysteme vorgestellt und den zu diesem Zeitpunkt aktuellen Verantwortlichen demonstriert. Aufgrund der noch nicht vollständig konfigurierten ROS-Basis auf dem Hauptrechner des OTC-Base Systems konnten die Kamerasysteme nicht im Gesamtsystem getestet werden. Für die geplante Systemumgebung wurden jedoch die IP-Adressen der Kamerasysteme angepasst und diese wurden im Protokoll des Integrationstreffens bei der „Framework Robotics“ eingetragen.

Die Integration des Kamerasystems in das Endsystem von OTC-Base hat leider wegen operativer Schwierigkeiten bei einem Partner nicht wie geplant stattgefunden. Diese Aufgabe musste kurzerhand an den Projektpartner weitergeleitet werden, so dass personelle Engpässe bei diesem Vorhaben zu beobachten waren. In dieser Hinsicht ist die Integration der Kamerasysteme im Gesamtsystem nicht wie geplant erfolgt.

2.2. Fraunhofer IOSB

Das zentrale Konzept von OTC-Base stellt u. a. eine Modularisierung sowie eine skalierbare und leistungsstarke Infrastruktur bezüglich Hard- und Software für ein Unterwasserabsatzgestell dar (Abbildung 6). Dieses konnte in der ersten Projektphase durch die Arbeiten von Fraunhofer IOSB und Framework Robotics GmbH in enger Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern weiter vorangetrieben, konzeptioniert und teilweise umgesetzt werden.

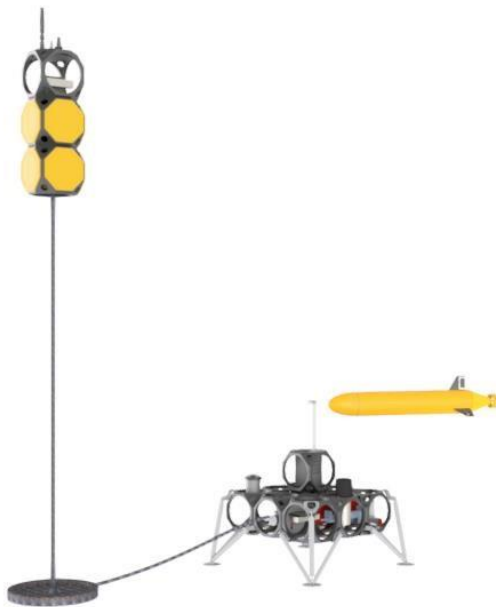


Abbildung 6: Konzept des Gesamtsystems mit Unterwasser- (rechts) und Oberflächeneinheit (links)

Das Fraunhofer IOSB beteiligte sich regelmäßig an den monatlichen Projektbesprechungen von OTC-Base. Dabei brachte es seine fachlichen und organisatorischen Kompetenzen ein, leitete die Arbeitsgruppe *Recheneinheit und Netzwerk* in enger Zusammenarbeit mit Framework Robotics und trug somit maßgeblich zur partnerübergreifenden Softwarearchitektur bei.

Für die High-Level-Software wurde in enger Zusammenarbeit mit den Partnern ein flexibles Konzept entworfen, das auf einer Containerplattform und modularer Middle-

ware basiert. Dabei wurden die Informationsschnittstellen so gestaltet, dass sie die vielen verschiedenen Anforderungen der Funktionsmodule widerspiegeln. Die Strukturierung der Software anhand der Systemarchitektur und Anbindung der heterogenen Komponenten wird dadurch einfach und erweiterbar.

In der AG Recheneinheit und Netzwerk wurde ROS (Robot Operating System¹) als Middleware für die Plattform ausgewählt und eine flexible, erweiterbare Node-Architektur mit einem Publisher-Subscriber-Modell vorgestellt. Um auch in Zukunft die Base-Plattform offen zu halten, fiel die Entscheidung, die aktuelle Weiterentwicklung ROS 2 als Middleware-Standard zu wählen, auch wenn die Entwicklungsreife von ROS 2 aktuell noch nicht ganz die Stabilität von ROS 1 erreicht hat. Auf dieser Basis wurden die Hauptkommunikations- und Computing-Module im Labor prototypisch aufgebaut und eingerichtet sowie erste Sensoren angebunden und den Projektpartnern Daten bereitgestellt.

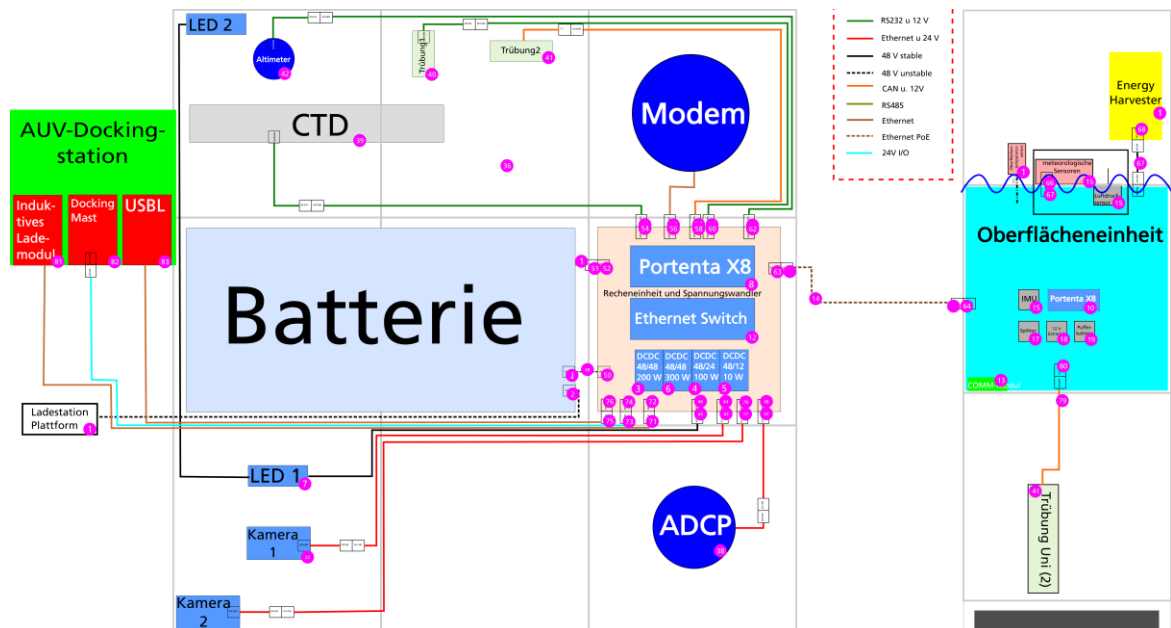


Abbildung 7: Prinzipskizze des Gesamtsystems, bestehend aus Unterwassereinheit (links) und Oberflächeneinheit (rechts)

Zur Realisierung der Recheneinheit erfolgte zunächst eine Recherche zur Auswahl der Hardwarekomponenten. Zusammen mit der Universität Rostock wurde ein erstes Schaltschema der Base-Station erstellt und im Verlauf des Projekts in einem iterativen Prozess stetig verfeinert. Die Definition der Anschlüsse durch die Projektpartner wurde berücksichtigt, um die Schnittstellen- und Kommunikationsmöglichkeiten der Sensormodule in die Gesamtkonzeption zu integrieren. Daraufhin wurde in der AG Recheneinheit und Netzwerk ein detailliertes Schaltschema (Abbildung 7) und eine software- und hardwaretechnische Gesamtkonzeption erarbeitet und den anderen Projektpartnern vorgestellt, um eine offene Kommunikationsschnittstelle für alle Beteiligten zu ermöglichen.

Die Partner Framework Robotics und Fraunhofer IOSB boten die anderen Partner im Projekt hinsichtlich der Entwicklung und Umsetzung eigener Netzwerkknoten auf Basis der geschaffenen Kommunikationsschnittstellen.

¹ <https://ros.org>

Im weiteren Verlauf des Projekts stand die Umsetzung des modularen Softwarekonzepts im Fokus der Arbeiten des Fraunhofer IOSB. Zudem wurde ein Konzept zur mechanischen und elektrischen Integration von Sensoren und Recheneinheit zusammen mit Framework Robotics GmbH und mit Unterstützung der Universität Rostock erarbeitet.

Innerhalb der AG Recheneinheit und Netzwerk wurde der Entwurf der Systemarchitektur abgestimmt und die Entwicklungsaufgaben für die verschiedenen Sensorkomponenten unter den beteiligten Projektpartnern aufgeteilt: Fraunhofer IOSB (IMU, ADCP, Trübungssensoren, Wettersensoren, Wakeup Energy Harvester), Fraunhofer IOSB-AST (Kameras) und Framework Robotics (CTD, Altimeter, Lichter, AUV-Docking, DC-DC-Wandler, Batterie, Housing und Integration). Darüber hinaus unterstützte das Fraunhofer IOSB die Gesamtprojektorganisation unter der Projektleitung durch den Lehrstuhl für Meerestechnik der Universität Rostock und brachte seine fachlichen und organisatorischen Kompetenzen im Austausch mit den Projektpartnern bei Projektmeetings und Integrationstreffen ein.

Mittels der in der ersten Projektphase ausgewählten Middleware ROS 2 wurden dann die entsprechenden Nodes programmiert und die zentralen Recheneinheiten in Oberflächeneinheit (Boje) und Unterwassereinheit (Absatzgestell) auf der Zielhardware eingerichtet. Ziel war im nächsten Projektabschnitt ein prototypischer Aufbau der Hauptkommunikations- und Computing-Module im Labor, um erste Softwaretests für die Gesamtintegration durchführen zu können.

Ein großer Teil der Entwicklung der Softwareschnittstellen für die einzelnen Sensorkomponenten beinhaltete die Anbindung der Sensoren über unterschiedlichste Schnittstellenvarianten. Dies beinhaltete sowohl interrupt-basiertes Auslesen der Daten als auch Polling-Varianten bei Sensoren, welche nicht selbständig Daten senden. So konnte ein breites Spektrum an unterschiedlichen Schnittstellenvarianten als *Proof-of-Concept* für zukünftige Sensoren eingebunden werden.

Die Entwicklung der ROS-2-Nodes für die Wettersensorik beinhaltete die Protokollanbindung an 1-wire (Außentemperatur sowie Innentemperatur und Luftfeuchtigkeit) und I²C/SPI (Luftdruck).

Für die ROS-2-Node der IMU musste der Anschluss an eine serielle Schnittstelle (UART ohne Pegelanpassung) sichergestellt werden, genauso wie für die ROS-2-Node für den Trübungssensor von Seabird Scientific, der über RS232 mit dem OTC-Base System verbunden wird. Die ROS-2-Node für den Trübungssensor des Lehrstuhls für Meerestechnik der Universität Rostock hingegen musste per CAN-Bus angebunden werden und die Node für den Energy Harvester stellt lediglich ein separates High-Signal des Wakeup-PCB am GPIO bereit. Zudem wurde auch eine ROS-2-Node mit Ethernet-Schnittstelle entwickelt, welche den ADCP mit der

Station verbindet. Ein Überblick über die Schnittstellenrealisierung gibt Abbildung 8. Dadurch wird dem Projekt ermöglicht zukünftig einfach Sensoren mit diesen Schnittstellen einzubinden.

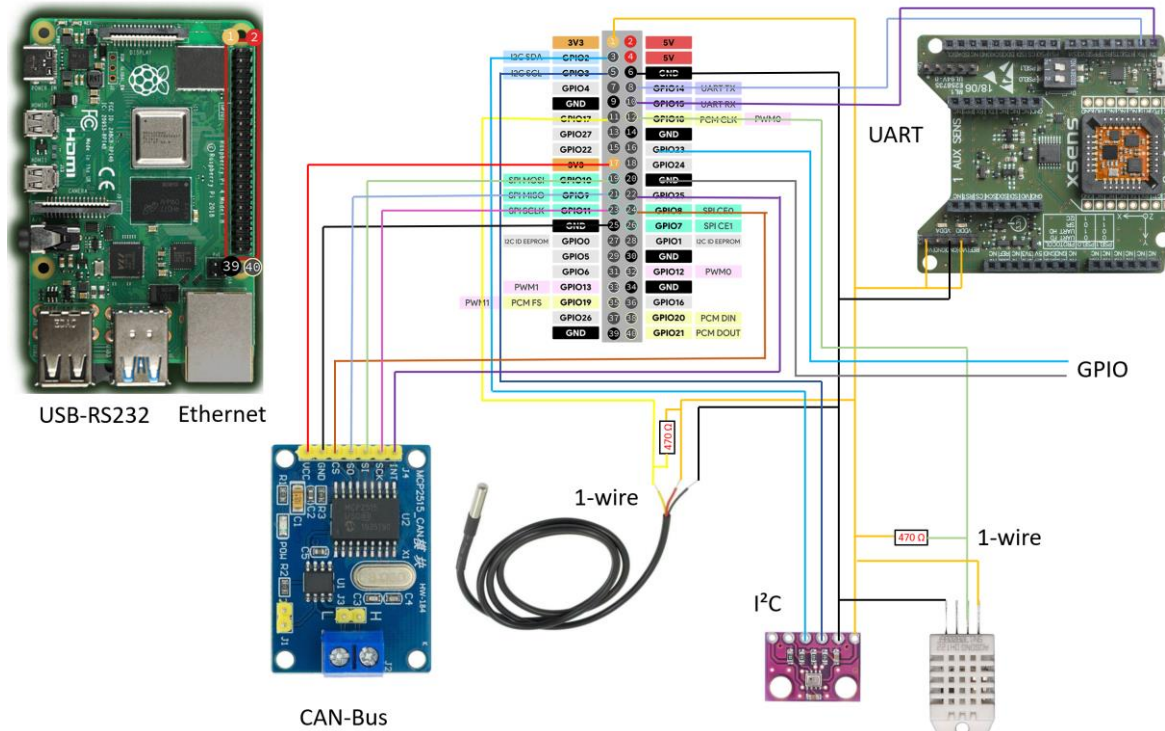


Abbildung 8: Prototypische Realisierung der Schnittstellen.

Zunächst wurde die Hardware des Bojenkörpers mit allen Sensoren im Labor exemplarisch aufgebaut, um elektrotechnische Komponenten zu testen und eine solide Grundlage für die weiteren Schritte zu schaffen. Im April 2024 fand der Aufbau und Test des Gesamtsystems im Wasser unter Laborbedingungen statt, bei dem sowohl die Unterwassereinheit als auch die Oberflächeneinheit aufgebaut und geprüft wurden. Da noch nicht alle Hardwarekomponenten der Oberflächeneinheit final in die Boje integriert waren, wurden die noch nicht integrierten Sensoren mittels eines prototypischen Aufbaus angebunden.

Zu diesem Zeitpunkt begann die Konfiguration des Raspberry Pi für die Unterwassereinheit, auf welchem Ubuntu 22.04 als Betriebssystem installiert und entsprechend der vorhergehenden Konfiguration des Raspberry Pi für die Oberflächeneinheit angepasst wurde, sodass das Setup der unterschiedlichen Recheneinheiten sich nur anhand der integrierten Sensornodes unterschied. Darüber hinaus wurde in Zusammenarbeit mit Evologics eine umfangreiche Netzwerkkonfiguration durchgeführt. Dabei wurde das Kommunikationsmodul von Evologics als Access Point und Router für externe Verbindungen eingerichtet, und die Netzwerkkonfiguration der Raspberry Pis mit lokalen IP-Adressen, Port-Weiterleitungen und externem Zugriff optimiert. Dabei wurden mehrere logische Interfaces auf den einzigen Ethernet-Port des Raspberry Pi konfiguriert um das ADCP sowie weitere ethernetfähige Sensoren zu integrieren.

Ein wichtiger Bestandteil der Arbeiten war die Konfiguration des Batteriemanagementsystems von Kraken. Mithilfe von Evologics und Kraken wurde der Startprozess der Batterie so eingestellt, dass die Batterie nach dem automatischen Start ein Handshake mit der Basisstation durchführt und damit in den dauerhaften Betrieb wechselt.

Nach der erfolgreichen elektrotechnischen Gesamtintegration wurden die Nodes der Sensorik in der Oberflächen- und Unterwassereinheit konfiguriert und getestet. Dieser Schritt konnte erst nach dem elektrotechnischen Aufbau der Einzelkomponenten erfolgen und beinhaltete das Starten der Nodes und der Überprüfung des Outputs auf Plausibilität. Sämtliche Nodes wurden in ein gemeinsames Startskript integriert, um eine einheitliche Steuerung zu gewährleisten.

Ein abschließender gemeinsamer Gesamttest aller vorhandenen Nodes konnte erst kurz vor dem abschließenden Wassertest am Flussufer der Warnow durchgeführt werden, als alle Einzelkomponenten verfügbar und integriert waren.

Abschließend erfolgte eine umfassende Dokumentation der Softwareschnittstellen sowie aller vorhandenen Nodes. Diese Dokumentation stellt sicher, dass alle Konfigurationen und Integrationsschritte transparent und reproduzierbar sind und bietet den Projektpartnern eine verlässliche Grundlage für die weitere Zusammenarbeit und Entwicklung.

2.3. Fraunhofer ISIT

Die Herausforderung bei der Implementierung eines Energy Harvesting Moduls mittels MEMS-Technologie liegt in der höheren Resonanzfrequenz des Harvesters im Vergleich zu niederfrequenten Wellen. Um diese zu überbrücken, wurde ein Frequenzaufwärtswandler entwickelt, der den Harvester effizient anregt. Dies geschieht durch einen starken Impuls, der den Biegebalken des Harvesters in seiner Eigenfrequenz schwingen lässt. Diese Thematik wurde in der Masterarbeit von Linda Nolte (Abschnitt 7 in [Nol22]) ausführlich behandelt und das Projektergebnis international vorgestellt [Rau24].

Abweichend von der ursprünglichen Planung musste eine Boje eingesetzt werden. Dies bot jedoch die Möglichkeit, das Energy Harvesting via Wellenbewegung an der Wasseroberfläche zu betreiben.

Die Analyse verschiedener Konzepte zeigte, dass jene, welche Wellenbewegungen nutzen, mehr Energie erzeugen als Konzepte, die unter Wasser Druckänderungen ausnutzen. Diese Erkenntnisse basieren auf Bewegungsdaten, die am Riff Nienhagen gewonnen wurden, und umgesetzt wurden in verschiedene Modelle zur Bestimmung geeigneter Testparameter.

Auf dieser Basis wurden verschiedene Mechanismen zur Frequenzaufwärtswandlung entwickelt und experimentell evaluiert. Besonders erfolgversprechend erwies sich ein Konzept basierend auf einer rotierenden Unwucht in der Boje. Technische Hintergründe zum Harvesting wurden in [Dan23] veröffentlicht. Eine Abbildung des Messtandes ist in Abbildung 9a dargestellt. Um den "Zero-Power Wake-up" zu realisieren, wurde eine entsprechende Schaltung entwickelt und getestet. (Abbildung 11) Diese Schaltung nutzt die erzeugte Spannung, um einen Transistor zu schalten, der den Massepfad einer angeschlossenen Schaltung inklusive eines Mikrocontrollers kontrolliert.

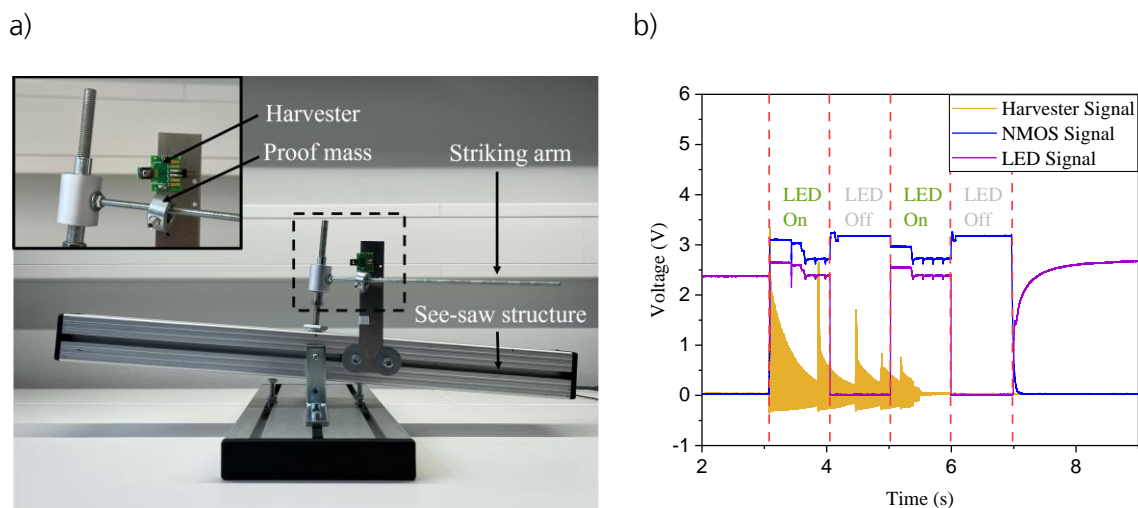
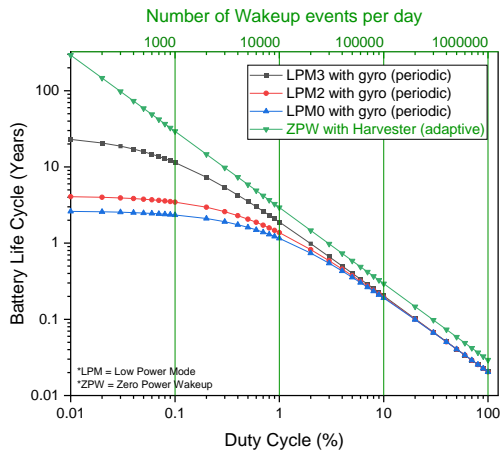


Abbildung 9: a) Demonstrator Aufbau. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt den MEMS Energy Harvester.
 b) Demonstration des zero power wake up. In gelb und blau jeweils dargestellt das Signal des MEMS Energy Harvester und die Spannung am Transistor.

Darüber hinaus wurde gezeigt, dass ein passiver "Zero-Power Wake-up" im Vergleich zu einem aktiven Wake-Up, der durch ein Gyroskop gesteuert wird, klare Vorteile bietet. Dies wurde durch Modellberechnungen bestätigt, bei denen der Energieverbrauch eines kommerziell verwendeten Gyroskops, eines Mikrocontrollers in verschiedenen Low-Power-Modi und das Versenden eines Protokolls über einen Radiosender modelliert wurden (Abbildung 10a).

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde das Pendelsystem für den Einsatz in der Boje weiterentwickelt und optimiert. Durch Kippen des Systems erzeugen die Schlagarme einen Impuls, der als Anregung für den MEMS Energy Harvester verwendet wird. Dieser Aufbau ist in der Lage, Wellenbewegungen aus unterschiedlichen Richtungen umzuwandeln. (Abbildung 10b)

a)



b)

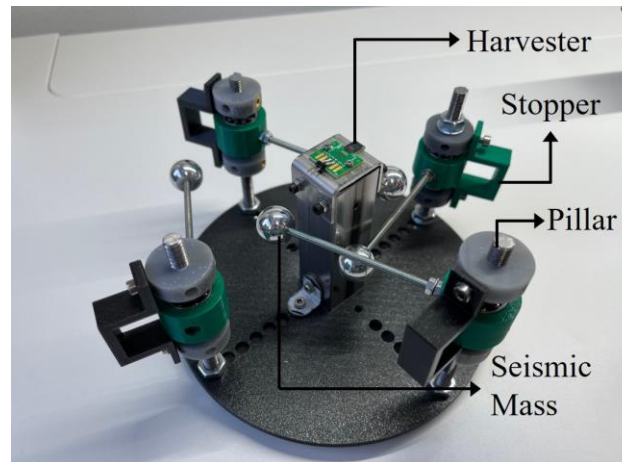
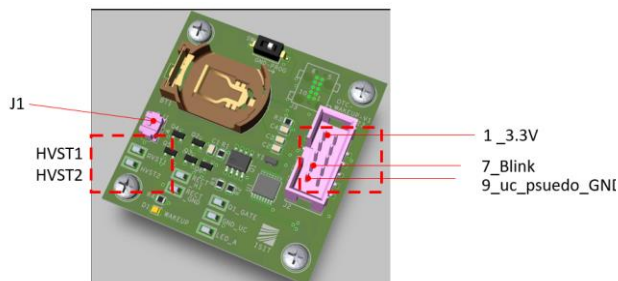


Abbildung 10: a) Lebensdauer einer Batterie im Bezug zu verschiedenen Aufweckzyklen für verschiedene Low-Power-Modi eines Mikrocontrollers im Vergleich zu dem energy harvesting für zero power wake up. Aufbau des Energy Harvesting Moduls zum Abschluss des Meilenstein 2

Zudem wurden Fortschritte durch die Erweiterung des Wake-Up-Moduls durch ein Latching-Circuit erzielt. (Abbildung 11) Dieser ermöglicht es, andere Module und Sensoren dauerhaft mit Strom zu versorgen, ohne einen kontinuierlichen Energieverbrauch beim Wake-Up-Modul selbst zu erzeugen.

a)



b)

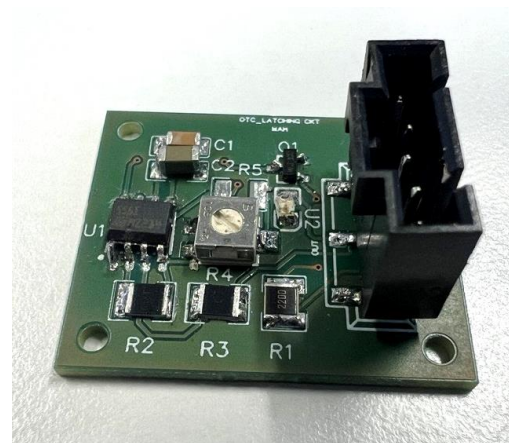


Abbildung 11: Links: Zero-Power Wake-Up PCB. Rechts: Latching Circuit.

In Zusammenarbeit mit der Universität Rostock wurden Labortests auf einem Hexapod-Messstand durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit des Systems weiter zu testen. (Abbildung 12) Dabei wurde das Energy Harvesting-Modul harmonisch um eine Achse angeregt und die erzeugte Spannung und Energieausbeute in Abhängigkeit von der Auslenkung und der Periodenlänge bestimmt. (Abbildung 13) Zudem konnte gezeigt werden, dass durch ausreichend hoher Verkippung ein Sensorsystem (hier eine Trübungssensor) über das Wake-Up-Modul mit Latching-Circuit aktiviert werden kann. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden auf der Oceans 2024, Singapur und entsprechend in einem Konferenzartikel veröffentlicht und können im Detail dort nachgelesen werden [Rau24].

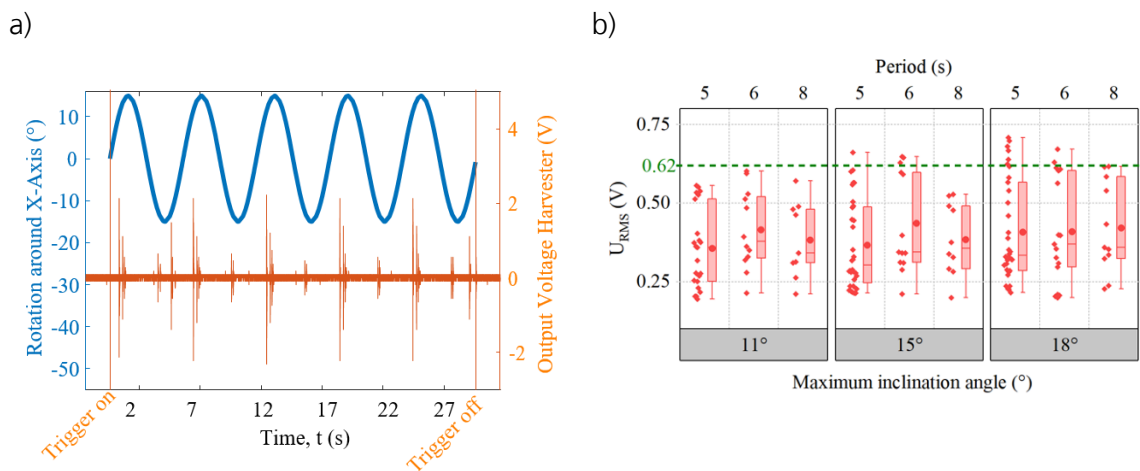
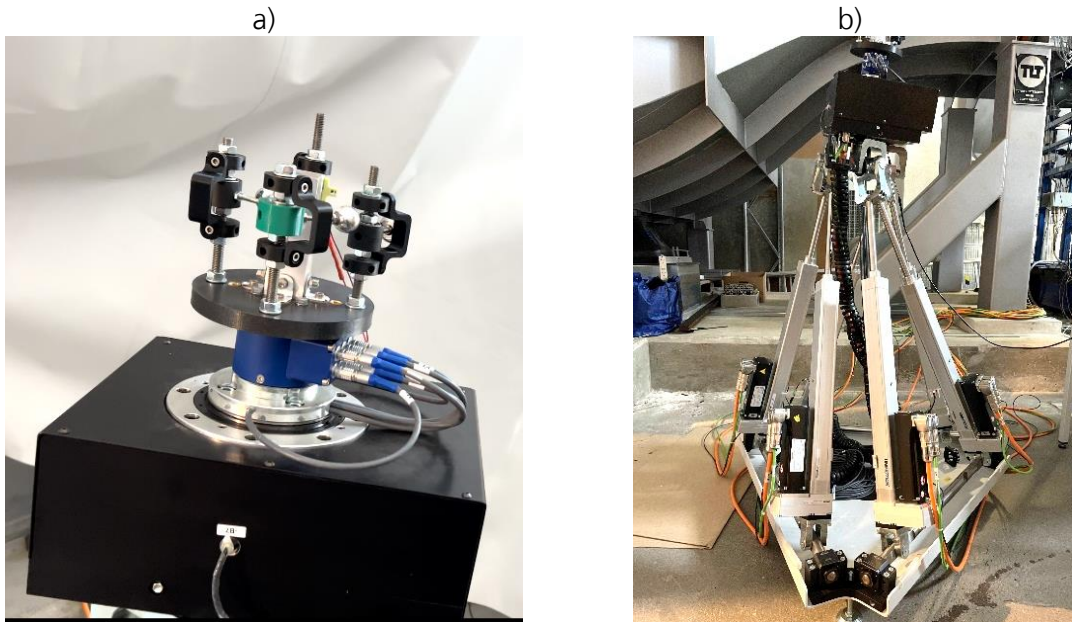


Abbildung 13: a) Blau: Kippwinkel des Energy Harvesting Moduls für eine Bewegung um die x-Achse Zeitabhängig, mit einer Zeitdauer von 6 s und einer Amplitude von 15°. Orange: Gemessene Ausgangsspannung am Energy Harvesting Modul erzeugt durch den MEMS Energy Harvester.
 b) RMS-Spannungswerte bestimmt in Abhängigkeit vom maximalen Kippwinkel und der Periodenlänge für eine harmonische Rotationsbewegung um eine Achse. Um den „Zero-Power-Wake-Up“ zu initiieren werden 0,62 V benötigt und ist als Referenz in grün eingezeichnet.

Um das Energy Harvesting-Modul langfristig und zuverlässig in der Praxis einsetzen zu können, wurde eine wasserdichte Kapsel entworfen und im 3D-Druckverfahren hergestellt. Diese wurde an der Universität Rostock getestet und hat sich als ausreichend wasserdicht erwiesen, um den Einsatz auf See zu überstehen.

In gemeinsamen Integrationstreffen wurde die mechanische und elektrische Integration der einzelnen Komponenten überprüft. Dabei wurde die Funktionsfähigkeit der Komponenten in Kombination miteinander getestet und eventuelle Probleme frühzeitig identifiziert.

In den folgenden Monaten wurde das Modul weiter verbessert. Insbesondere der Latching-Circuit wurde optimiert, um parasitäre Spannungsabfälle zu vermeiden, und das Befestigungssystem des Moduls in der Boje wurde überarbeitet, um eine stabile und sichere Montage zu gewährleisten. Zudem wurde die gesamte Integration durchgeführt und getestet (Abbildung 14).

Das Modul, integriert in dem Bojensystem, konnte aufgrund des kurzfristigen Ausfalls eines Bauteils kurz vor den finalen Seetests nicht zum Test aktiviert werden. Obwohl das Fraunhofer ISIT nicht mehr Teil der kommenden Förderphase sein wird, ist das Nachholen der Tests in der kommenden Förderphase geplant.

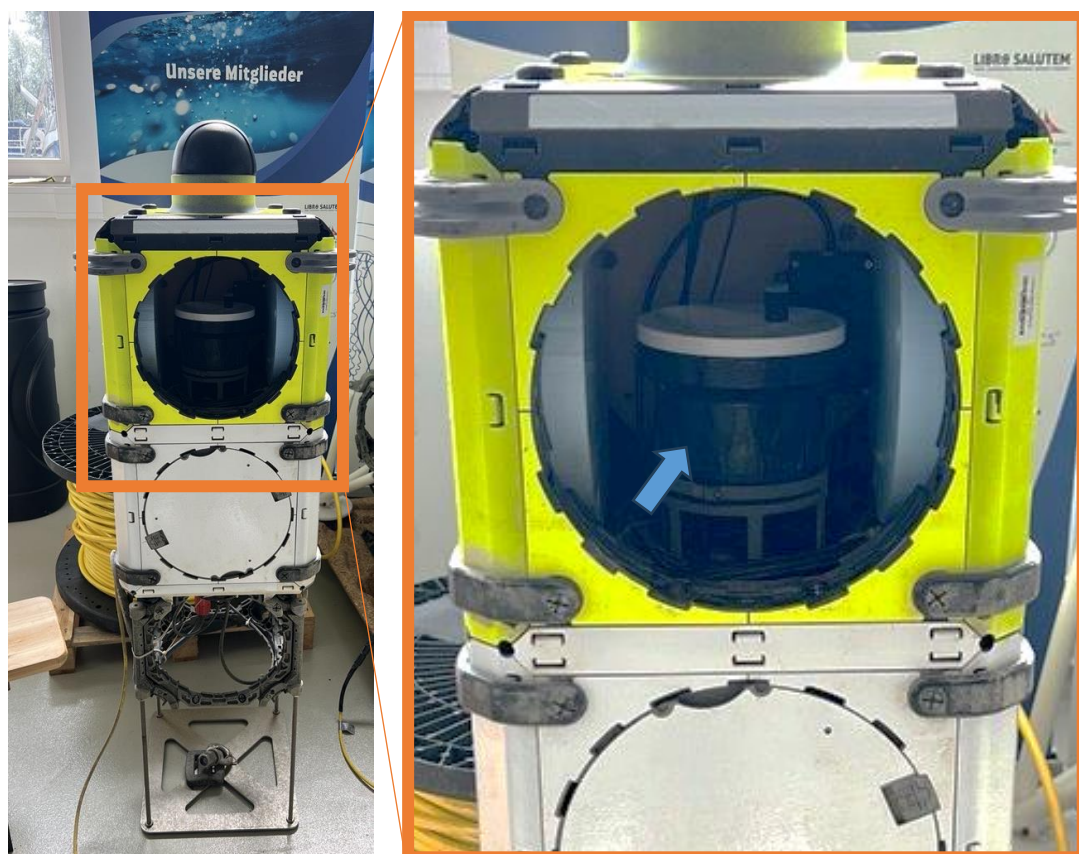


Abbildung 14: Oberflächeninheit mit eingebauten Energy Harvesting Modul.

2.4. Fraunhofer IGD

Das Fraunhofer IGD hat im Rahmen dieses Projekts die Planung und Durchführung der praktischen Tests übernommen. Die geplanten Versuche im Wasser wurden in zwei Phasen unterteilt. Ein erster Test mit der Base im Wasser erfolgte an der Steganlage der Fraunhofer Arbeitsgruppe Smart Ocean Technologies (Abbildung 15). Ziel der Tests war es die grundlegenden Funktionen der Base im Einsatz unter Wasser zu testen. Hierbei sollte der logistische Aufwand so gering wie möglich sein, um eventuell auftretende Probleme schnell vor Ort lösen zu

können. In dieser Testphase wurden u. a. Andockversuche an die Base mit dem AUV des Projektpartners Evologics durchgeführt. Die Versuche wurden durch das Fraunhofer IGD mittels Unterwasservideoaufnahmen dokumentiert.



Abbildung 15: Base-Bojenkörper bei Tests am Steg

Nachdem die erste Testphase genutzt wurde, um eine zufriedenstellende Arbeitsweise aller Funktionen des Absetzgestells sicherzustellen, konnte die zweite Testphase gestartet werden. Hierzu sollte das Absetzgestell und die Oberflächeneinheit im Bereich des Digital Ocean Labs ausgesetzt werden und dort etwa zwei Wochen verbleiben (Abbildung 16 und Abbildung 17). Dieses Vorhaben erforderte eine gründliche Vorbereitung und Planung. Für das Aussetzen des Absetzgestells und der Oberflächeneinheit wurden ein geeignetes Schiff und zusätzlich Taucher benötigt. Außerdem erforderte die Länge des geplanten Tests, dass die Batterie des Absetzgestells zwischendurch geladen werden kann. Hierzu wurde durch die Energieversorgung und Datenanbindung der Forschungsplattform im Digital Ocean Lab die nötige Ladeinfrastruktur bereitgestellt.



Abbildung 16: Base-Bojenkörper im Wasser vor DOL bei Nienhagen

Insgesamt fanden während der Testphase im DOL drei Ausfahrten mit dem gecharterten Schiff statt. Die erste, um die Komponenten im DOL mittels Schiffskrans und Tauchern auszu- setzen und die Funktion der integrierten Sensoren zu testen. Eine weitere Ausfahrt fand wäh- rend der Testphase statt, um weitere Andockversuche mit dem AUV der Firma Evologics durchzuführen. Hierbei wurden die Taucher eingesetzt, um die Versuche mittels Unterwasser- kameras zu dokumentieren. Die dritte Ausfahrt wurde planmäßig genutzt, um alle Kompo- nenten wieder aus dem Wasser zu bergen.



Abbildung 17: Unterwassereinheit der Base

3. Ergänzende Informationen

3.1. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Förderphase des Projekts OTC-BASE lief von 01.10.2020 bis 30.09.2024. Das Budget des Teilvorhabens betrug 854.380,00 EUR. Dies beinhaltet die Arbeiten der folgend genannten Fraunhofer-Institute.

3.1.1. Fraunhofer IOSB-AST

Im Rahmen des Projektvorhabens wurden für das Fraunhofer IOSB-AST die geplanten Hardwarekosten, Reisekosten für die Integrationstreffen sowie Personalkosten abgerechnet. Es entstanden keine weiteren Belastungen.

3.1.2. Fraunhofer IOSB

Durch die Projektgestaltung wurden bei diesem Projekt für das Fraunhofer IOSB wie geplant lediglich Personalkosten sowie Reisekosten für die Integrationstreffen mit den Partnern gebucht.

3.1.3. Fraunhofer ISIT

Keine signifikanten Investitionen wurden getätigt die einer gesonderten Darstellung benötigen. Neben verschiedenen elektrischen Komponenten wie z. B. PCBs, mechanische Bauteile, elektrische Komponenten wurden vor allem Personalmittel gebucht. Reisekosten haben sich auf verschiedene Projekttreffen und Reisen zu Konferenzen zur Präsentation der Ergebnisse im Projekt beschränkt.

3.1.4. Fraunhofer IGD

Neben den gebuchten Personalkosten wurde der Hauptanteil der Sachkosten für Charter eines geeigneten Schiffes und Besatzung zur Durchführung der Tests auf See verwendet. Weitere Mittel wurden zur Beschaffung nötiger Ausrüstung und Verbrauchsmaterial eingesetzt. Hierzu zählen u. a. Leinen, Anker, Auftriebs- und Anschlagmittel. Reisekosten entstanden nur in Form der Ausfahrten in das Digital Ocean Lab an Bord des gecharterten Schiffes.

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

4.1.1. Fraunhofer IOSB-AST

Durch die jahrelangen Erfahrungen in der Entwicklung von Unterwasserfahrzeugen und deren Komponenten ist Fraunhofer IOSB-AST in der Lage, modular einsetzbare Unterwasserhardware maßgeschneidert anzufertigen. So lieferte Fraunhofer IOSB-AST in dem Projektvorhaben maßgeschneiderte Kamerasysteme für die Überwachung der Station und der Umgebung entwickelt. Die Schwerpunkte der Entwicklung befassten sich mit der druckfesten Kameragehäuse mit einer universellen Schnittstelle für Plug-and-Play-Möglichkeit sowie einer softwareseitigen Lösung zur einfachen Integration im Gesamtsystem. Die im Rahmen des Projekts geleisteten Arbeiten sind sinngemäß und notwendig.

4.1.2. Fraunhofer IOSB

Durch die sehr heterogene Zusammenstellung der Einzelkomponenten von OTC-Base mussten mit vielen verschiedenen Partnern die Integration der Schnittstellen für die anzubindenden Sensorsysteme abgestimmt werden. Die Gesamtintegration der Systeme erforderte eine vielschichtige Entwicklung der einzelnen Sensornodes in die modulare Architektur, um der angestrebten Flexibilität hinsichtlich der Interoperabilität Rechnung zu tragen. Die im Arbeitsplan vorab formulierten Aufgaben legten den Fokus auf die Entwicklung der Nodes und deren Integration, welche erfolgreich bearbeitet werden konnten. Die geleisteten Arbeiten zur Sensornodeentwicklung und Gesamtintegration der Software waren somit notwendig und angemessen.

4.1.3. Fraunhofer ISIT

Bezüglich des Energy Harvesting Moduls waren die Aufwände angemessen aufgrund der komplexen Fragestellung angefangen von der Recherche, Konzeptionierung, Aufbau von Prototypen sowie Aufbau und Erprobung des Energy Harvesting Moduls.

4.1.4. Fraunhofer IGD

Mit dem Digital Ocean Lab betreibt das Fraunhofer IGD eine ideale Testeinrichtung, um die dem Projekt zugrundeliegende Fragestellung zu beantworten. Dazu kommen Erfahrung in der Planung und Durchführung von Tests und Experimenten der komplexen Offshore-Umgebung. Die Infrastruktur am Standort mit ihrer Steganlage an der Warnow ermöglicht weiterhin grundlegende Tests im Wasser mit geringem logistischem Aufwand.

5. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

5.1.1. Fraunhofer IOSB-AST

Die im Projekt realisierten Hardware- und Softwarelösungen entsprechen den neuesten Standards und verfügen über eine Plug-and-Play Fähigkeit, die eine Möglichkeit zur Weiterverwertung der Entwicklung in unterschiedlichen Projekten bietet. Die Druckfestigkeit der entwickelten Kamerasysteme ist mit 18 bar zertifiziert und kann somit in tieferen Gewässern in unterschiedlichen Trägersystemen- und stationären Systemen integriert werden.

5.1.2. Fraunhofer IOSB

Ein besonderer Fokus in der Entwicklung von OTC-Base lag auf der Offenheit der Schnittstellen und einer offenen, flexiblen open-source basierten Software. Durch die umfangreiche Integration und die Benutzung des Industriestandards ROS 2 für die Integration von Unterwasser- und Überwassersensorik als „proof-of-concept“ sind unsere im Projekt geleisteten Arbeiten relevant für zukünftige herstelleroffenen Sensorintegrationen und -fusionskonzepte im maritimen Bereich. Mit der Integration verschiedener Protokolle und Standards konnten umfangreiche Erfahrungen für maritime Szenarien gewonnen werden und sie ermöglicht das „rapid prototyping“ der Entwicklung von ROS2-Nodes für weitere Integrationen zusätzlicher Sensoren in Folgeprojekte oder anderen ähnlichen Anwendungen.

5.1.3. Fraunhofer ISIT

Im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Verwertung ermöglicht die Erweiterung durch den Zero-Power Wake-Up die Erschließung weiterer technologischer Bereiche, wie das Asset Tracking (Verfolgen von Gütern). Zudem könnte das MEMS Energy Harvesting zur Energieversorgung von Sensorsystemen an schwer erreichbaren Stellen genutzt werden. Auch eine Anwendung des Zero-Power Wake-Up im Bereich Automotive und Maschinenüberwachung ist denkbar.

5.1.4. Fraunhofer IGD

Ein System, wie der im Projekt entwickelte Lander mit seinen Möglichkeiten zur Sensorintegration und Interaktion mit autonomen Unterwasser- und Oberflächenfahrzeugen stellt eine interessante Möglichkeit dar, die Arbeiten und Forschungsvorhaben im Digital Ocean Lab sinnvoll zu unterstützen. Neue Themenfelder können mit dieser Technologie erschlossen und vorhandene vertieft und erweitert werden.

6. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

6.1.1. Fraunhofer IOSB-AST

Mit ROS-2 hat Fraunhofer IOSB-AST eine Erweiterung der Softwareschnittstelle der entwickelten Hardware vornehmen können und somit auf den neuesten Stand der Softwarelösungen im Bereich Open-Source Softwarelösung einarbeiten dürfen.

6.1.2. Fraunhofer IOSB

Die Konfiguration eines Multisensorsystems mithilfe von ROS 2 ist weit verbreitet in Industrie und Forschung, es ist uns nicht bekannt, dass es während der Projektzeit andere Vorhaben gab, die diese Umsetzung der Softwareintegration auch für einen Unterwasserknoten durchgeführt haben.

Während der Projektlaufzeit gab es mehrmals Kontakt mit dem Projekt Stella Maris Testing Solution vom kanadischen COVE, die einen ähnlichen Ansatz für ein sensorbestücktes Absatzgestell verfolgen. Nach unseren Kenntnissen gibt es in diesem Projekt jedoch nicht die Zielstellung, offene Sensor- und Softwareschnittstellen bereitzustellen so wie es für die Software von OTC-Base innerhalb des Projekts vom Fraunhofer IOSB umgesetzt wurde.

6.1.3. Fraunhofer ISIT

Dem Fraunhofer ISIT sind keine Fortschritte bekannt geworden die das Vorhaben beeinflussen.

6.1.4. Fraunhofer IGD

Dem Fraunhofer IGD sind während der Projektlaufzeit keine Fortschritte bei anderen Stellen auf dem auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden, die in irgendeiner Weise den Verlauf des Projekts beeinflusst hätten.

7. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF

Im Folgenden sind die Veröffentlichungen von Fraunhofer gelistet, die im Rahmen von OTC-Base entstanden sind:

7.1. Veröffentlichungen

- [Rau23] Concept and Design of a Prototype Autonomous, Modular Subsea Bottom Station, Louis Leon Rautmann, Jan Witte, Thomas Emter, Minhaz Ahmed, Burkhard Rieck, Helge Renkewitz, and Sascha Kosleck, OCEANS 2023 - MTS/IEEE U.S. Gulf Coast, pages 1-9, 2023, DOI: 10.23919/oceans52994.2023.10337383
- [Rau24] Experimental Assessment of Miniature Wave-Energy-Converter Performance: Output Analysis in Simulated Wave Conditions, Louis Leon Rautmann, Minhaz Ahmed, Torben Dankwort, Sascha Kosleck, Björn Gojdka OCEANS 2024-Singapore. IEEE, 2024 DOI: 10.1109/OCEANS51537.2024.10682257
- [Dan23] Dankwort, T., Ahmed, M., Grünzig, S., Khare, A., & Gojdka, B. (2023, March). High-performance Aluminum Scandium Nitride MEMS energy harvester with wafer-level integrated micromagnets for contactless rotational motion harvesting. In 2023 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM) (pp. 1-4). IEEE, DOI: 10.1109/ICM54990.2023.10101917

7.2. Masterarbeiten

- [Nol22] Entwicklung eines Systems zur Umwandlung von Wellenenergie durch MEMS Energy Harvester, Linda Nolte, Masterarbeit eingereicht am 16.09.2022

7.3. Kongresse / Konferenzen

Die Projektergebnisse wurden neben den genannten Konferenzveröffentlichungen auf dem MST Kongress präsentiert. Hardware-Demonstratoren wurden auf dem MST Kongress in Dresden und der Sensors Converge in Santa Barbara, USA, gezeigt. Der Energy Harvester des Fraunhofer ISIT wurde auf der Rostock Ocean Convention vorgestellt.