

# Abschlussbericht für das Projekt CHARISAM.μSensor

Teilvorhaben SubCtech GmbH

Dr. rer. nat. Tim Klostermann, Dipl. Phys. Stefan Marx

# Inhalt

<b>1</b>	<b>ALLGEMEIN</b> .....	<b>3</b>
1.1	VERSIONSKONTROLLE .....	3
1.2	VERTRAULICHKEITSERKLÄRUNG.....	4
1.3	URHEBERRECHT.....	4
1.4	HAFTUNG.....	4
<b>2</b>	<b>ERREICHUNG DER PROJEKTZIELE</b> .....	<b>5</b>
2.1	ZUSAMMENFASSUNG DES PROJEKTS CHARISMA.....	5
2.2	ABARBEITUNG DER PROJEKTZIELE VON CHARISMA.µSENSOR .....	6
2.3	INWIEWEIT IST DAS IM GESAMTPROJEKTPLAN BESCHRIEBENE ENTWICKLUNGS-ZIEL ERREICHT WORDEN? .....	6
2.4	KNOW-HOW ZUWACHS IM PROJEKT UND IM UNTERNEHMEN .....	8
2.5	MESSUNG SMARTER ZIELE FÜR CHARISMA.µSENSOR .....	8
2.5.1	SPEZIFISCH .....	8
2.5.2	SPEZIFIKATIONEN DER UMGEBUNGSBEDINGUNGEN .....	9
2.5.3	ATTRAKTIV .....	9
2.5.4	REALISTISCH .....	9
2.5.5	TERMINIERT .....	9
2.6	SENSOR-ELEKTRONIK µMODULE .....	10
2.7	µSENSOR SOFTWARE .....	10
<b>3</b>	<b>TECHNISCHE ARBEITZIELE UND UMSETZUNG</b> .....	<b>11</b>
3.1	ERFÜLLTER ARBEITSPLAN.....	11
3.2	AUSWAHL ZU ÜBERWACHENDER MESSGRÖßEN (MEILENSTEIN 1).....	12
3.3	SOFTWAREKONZEPT .....	12
3.4	SENSOREN UND MESSUNGSICHERHEITEN (MEILENSTEIN 2).....	13
3.4.1	BME680 (DRUCK/TEMPERATUR/LUFTFEUCHTIGKEIT/LUFTQUALITÄT).....	13
3.4.2	ILPS22QS (DRUCK) .....	14
3.4.3	IIS328DQ (BESCHLEUNIGUNG) .....	14
3.5	LEITERPLATTENDESIGN UND INTEGRATION (MEILENSTEINE 3).....	14
3.5.1	VERSION 1.3: INITIALES DESIGN .....	14
3.5.2	VERSION 1.3: VERBESSERUNGEN IM DESIGN .....	15
3.6	KOMMUNIKATIONSSCHNITTSTELLEN (MEILENSTEIN 3) .....	17
3.6.1	VORTEILE VON MODBUS-RTU .....	17
3.6.2	VORTEILE VON CAN-BUS.....	17
3.6.3	WARUM DIE KOMBINATION SINNVOLL IST .....	17
3.6.4	MODBUS/CAN-BUS MAP .....	18
3.6.5	DATENPROTOKOLL ZUR KONTROLLINSTANZ.....	18
3.7	KALIBRIERUNGEN (MEILENSTEIN 4 UND 5) .....	19
3.7.1	BME680 (DRUCK/TEMPERATUR/LUFTFEUCHTIGKEIT) .....	19

3.7.2 IIS328DQ (BESCHLEUNIGUNG) ..... 21

3.8 QUALIFIZIERUNGEN (MEILENSTEIN 6) ..... 22

3.8.1 VIBRATIONSTEST ..... 23

3.8.2 TEMPERATUR TEST ..... 24

**4 VERWERTUNGSPLAN ..... 25**

4.1 ERWARTETE VERWERTUNGSERGEBNISSE ..... 25

4.2 WIRTSCHAFTLICHE ERFOLGSAUSSICHTEN ..... 26

# 1 Allgemein

## 1.1 Versionskontrolle

Version	Erstellt		Geprüft		Freigabe		Bemerkung
	Datum	Person	Datum	Person	Datum	Person	
0.1	20.11.2024	TKL					Dokument erstellt
0.4	26.11.2024	TKL					
0.5	27.11.2024	SMA	27.11.2024	TKL			Update
1.0	28.11.2024	TKL	28.11.2024	SMA	28.11.2024	SMA	Freigabe

## 1.2 Vertraulichkeitserklärung

Dieses Dokument enthält vertrauliche und firmeneigene Informationen der SubCtech GmbH. Dieses Dokument und alle darin enthaltenen Informationen sind das vertrauliche und ausschließliche Eigentum der SubCtech GmbH und dürfen ohne schriftliche Genehmigung der SubCtech GmbH und ihrer Tochtergesellschaften nicht reproduziert, offengelegt oder an Dritte weitergegeben werden.

## 1.3 Urheberrecht

© SubCtech GmbH. Alle Rechte vorbehalten. Alle Bilder und Warenzeichen, die in diesem Benutzerhandbuch erwähnt werden, sind Eigentum ihrer jeweiligen Besitzer. Alle Texte, Bilder, Grafiken, Töne, Animationen und Videos sowie deren Anordnung innerhalb des Layouts von SubCtech-Dokumenten unterliegen nationalen und internationalen Urheberrechtsgesetzen und anderen anwendbaren Gesetzen.

NetDI, SmartDI, MicroDI, PowerPack, SmartPowerBlock, SmartCharger, PowerCharger, SmartBMS, OceanLine, OceanPack, OceanPack RACE, OceanPack MOBILE, OceanPack RACK, mBubbler, gosubsea und SubCtech sind eingetragene oder angewandte Warenzeichen der SubCtech GmbH, Deutschland. Alle anderen Marken sind Eigentum ihrer jeweiligen Inhaber.

Die verwendeten Logos sind in der Regel durch die Hersteller geschützt. Jedes verwendete Bild oder Material ist teilweise geschützt und darf ohne vorherige schriftliche Zustimmung von SubCtech nicht fotokopiert, reproduziert oder in eine andere Sprache übersetzt werden.

Es wird keine Haftung für den Inhalt der verwendeten Websites oder URL-Links übernommen.

Wenn Sie lizenzierte Fotos, Texte oder anderes Material finden oder mit der Veröffentlichung von Material nicht einverstanden sind, setzen Sie uns bitte davon in Kenntnis. Bitte machen Sie Angaben zu Name, Copyright-Inhaber oder was uns sonst noch wichtig sein könnte. Das Material wird daraufhin von uns entfernt.

## 1.4 Haftung

Dieser Entwurf wurde mit größter Sorgfalt entwickelt. Trotzdem können wir keine Haftung für die Vollständigkeit, Fehlerfreiheit und Genauigkeit der enthaltenen Informationen übernehmen. Wir schließen jegliche Haftung für Schäden, die direkt oder indirekt aus der Benutzung dieser Website entstehen können, aus, soweit diese nicht auf Vorsatz oder grober Fahrlässigkeit beruhen.

Bitte beachten Sie: Im Hinblick auf unseren Anspruch der kontinuierlichen Verbesserung können das Design und die Spezifikationen unserer Produkte von den in diesem Vorschlag dargestellten abweichen.

## 2 Erreichung der Projektziele

### 2.1 Zusammenfassung des Projekts CHARISMA

Das Forschungsprojekt CHARISMA „Cyber-physische Antriebsmodule für maritime Anwendungen“ hat erfolgreich neuartige cyber-physische Antriebs- und Sensormodule für Industrie 4.0 in der Meerestechnik, insbesondere für Offshore-Anwendungen, entwickelt. Das Hauptprojekt wird gerade im Zuge einer Verlängerung abgeschlossen. In diesem Abschlussbericht geht es vornehmlich um das Teilprojekt CHARISMA.µSensor.

Konventionelle hydraulische und elektrische Aktuatoren wurden erfolgreich durch cyber-physische Systeme ersetzt, was in den verschiedensten Anwendungsfeldern der maritimen Technik zu einer signifikanten Steigerung der Zuverlässigkeit und Produktivität führte. Diese neuen Systeme ermöglichen einen emissionsfreien Betrieb und haben den Einsatz von Ressourcen und CO<sub>2</sub>-Emissionen nachhaltig reduziert.

Die cyber-physischen Antriebsmodule wurden mit digitalisierten Schnittstellen ausgestattet, wodurch die Entwicklung der Prognostics and Health Management (PHM)-Methoden zur Steigerung der Verfügbarkeit und Produktivität ermöglicht wurde.

Die im Projekt entwickelten Module gliedern sich wie folgt:

- Elektronikmodul (Advanced Mechatronics GmbH)
- Softwaremodul (Advanced Mechatronics GmbH)
- Motormodul (Fischer Elektromotoren GmbH)
- Aktuatormodul (Advanced Mechatronics GmbH)
- Sensormodul (SubCtech GmbH)

Durch die signifikante Vernetzung der Module wurden Integrationsrisiken erheblich reduziert und die Schnittstellen durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit deutlich vereinfacht. Die gemeinsame Forschung und Entwicklung ermöglichte eine zielgerichtete Voruntersuchung, die den Lösungsraum für die Anwendungen präziserte. Die Konstellation des Konsortiums erlaubte die umfassende Ermittlung der Anforderungen zur Sicherstellung der Anwendbarkeit in den Zielapplikationen.

Basierend auf empirisch erhobenen Daten wurden methodische Zuverlässigkeits- und PHM-Konzepte entwickelt und implementiert. Eine geeignete Software-Umgebung für mechatronische Systeme in der Meerestechnik wurde erforscht, implementiert und erfolgreich validiert. Zusätzliche Sensoren zur Überwachung zuverlässigkeitsrelevanter Umweltparameter im Cyberphysischen System wurden integriert.

Die Interaktion zwischen den Projektpartnern führte zu einer detaillierten Analyse der Datenerfassung und deren Aufbereitung. Die entwickelten Module ermöglichen einen gemeinsamen, zuverlässigen, kostengünstigen und emissionsfreien Betrieb für unterschiedlichste Unterwasserapplikationen.

Zwei Zielmärkte wurden erfolgreich fokussiert:

- ROV/AUV-Systeme
- Tiefsee-Kontrollsysteme

Die Grundanforderungen dieser Märkte korrelieren, wodurch eine breite Anwendbarkeit der Module erreicht wurde.

Ein Projekterfolg ist der Betrieb von Sensoren und Aktuatoren mit Bussystemen, die über lange Strecken verwendbar sind. Die Ergebnisse des Projekts stellen eine bedeutende Weiterentwicklung der maritimen

Technik dar und eröffnen neue Möglichkeiten für die zuverlässige und nachhaltige Nutzung von Unterwasseranwendungen

## 2.2 Abarbeitung der Projektziele von CHARISMA.µSensor

**Sensor- und Elektronikmodule für extreme Bedingungen:** Zuverlässige Sensor- und Elektronikmodule für die speziellen Anforderungen in der Offshore- und Meerestechnik wurden erfolgreich erforscht und entwickelt. Die Module erfüllen eine wartungsfreie Betriebsdauer von 25 Jahren und sind API17F-qualifiziert für Schock-, Vibrations- und Temperaturzyklen sowie für EMC-Belastungen. Langzeitgenauigkeit und Serviceanforderungen, einschließlich der Kalibrierintervalle, wurden gründlich untersucht und festgelegt. Diese Qualifizierung stellt eine wichtige Voraussetzung dar, um die Module in den Zielmärkten zu platzieren.

**Prognostics and Health Management (PHM) Konzept:** Ein leistungsfähiges PHM-Konzept zur Verfügbarkeitssteigerung der Module wurde entwickelt und implementiert. Hierbei wurde sichergestellt, dass die gelieferten Sensordaten zuverlässig und ausreichend präzise sind und eine qualitätsgesicherte Datengrundlage für ein Condition-Monitoring bieten.

**Materialien und Sensormodule:** Es wurden innovative Materialien für Sensormodule eingesetzt, die auf maritime Anwendungen optimiert sind. Diese Materialien tragen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und zur Senkung der Kosten bei. Die Module sind in Titangehäusen verschiedener Legierungen und Edelstahl bis 600 Bar einsetzbar, und der Formfaktor konnte erfolgreich minimiert werden.

**Industrie 4.0-kompatible Schnittstellen und Protokolle:** Schnittstellen und Protokolle, die die funktionale Sicherheit gewährleisten und sichere Echtzeitdatenübertragungen an übergeordnete Systeme ermöglichen, wurden erfolgreich integriert.

**Flexible Einsatzmöglichkeiten:** Die entwickelten Sensormodule wurden für die Nutzung in verschiedenen Systemarchitekturen und für den cross-innovation-Einsatz in weiteren Anwendungsbereichen angepasst und erfolgreich getestet.

Mit diesen Ergebnissen konnte das Projekt einen wesentlichen Beitrag zur Zukunft der maritimen Technik leisten und die Marktpräsenz des Unternehmens im Bereich fortschrittlicher und zuverlässiger Sensortechnologien für anspruchsvolle Umgebungen ausbauen.

## 2.3 Inwieweit ist das im Gesamtprojektplan beschriebene Entwicklungsziel erreicht worden?

Das Forschungsprojekt CHARISMA „Cyber-physische Antriebsmodule für maritime Anwendungen“ hat, obwohl noch nicht vollständig abgeschlossen, bereits jetzt erfolgreich folgende Zielsetzungen erreicht:

**Cyber-physische Antriebs- und Sensormodule entwickelt:** Neuartige Module wurden konzipiert und erfolgreich für die Meerestechnik sowie Offshore-Anwendungen und Unterwasserfahrzeuge im Kontext von Industrie 4.0 erforscht. Weitere Märkte konnten durch die Vielseitigkeit und Zuverlässigkeit der Sensormodule erschlossen werden.

**Konventionelle Aktuatoren ersetzt:** Der erfolgreiche Austausch herkömmlicher hydraulischer und elektrischer Aktuatoren durch cyber-physische Systeme hat die Zuverlässigkeit und Produktivität in verschiedenen maritimen Anwendungsfeldern signifikant gesteigert. Ein emissionsfreier Betrieb wurde ermöglicht, und Ressourcenverbrauch sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden reduziert.

**Prognostics and Health Management (PHM) Konzept implementiert:** Ein umfassendes PHM-Konzept zur Steigerung der Modulverfügbarkeit wurde entwickelt. Hochpräzise Sensordaten mit integrierter Qualifizierung ermöglichen ein effektives Condition-Monitoring und tragen so maßgeblich zur Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit bei.

**Einsatz neuartiger Materialien für maritime Anwendungen:** Durch die Integration innovativer Materialien für Sensormodule wurde die Zuverlässigkeit der Systeme gesteigert und die Kosten konnten gesenkt werden. Die Module sind bis 600 Bar in Druckgehäusen einsetzbar, und der Formfaktor wurde erfolgreich minimiert. Weiterhin wurde eine Salzwasser-in-Öl Detektion für die Aktuatoren entwickelt.

Die Partner haben festgestellt, dass der „Wasser in Öl“-Sensor, abweichend von der Vermutung ihn direkt im industriellen Umfeld entwickeln zu können, eher eine Forschungsaufgabe darstellte. Daher hat die Hochschule Aalen diesen vorangetrieben und technologisch entwickelt. Dieser Sensor wurde in die Aktuatoren integriert. Damit einhergehend wurde die SubCtech-Sensor-Unit als modulares, skalierbares Sensorsystem designt. Es gab jetzt neue Herausforderungen. Es musste noch mehr Umweltparameter aufnehmen können, damit die Hauptplatine bzw. das Gesamtsystem überwacht werden kann und „Water-Ingress“ als wichtige Funktion für einen sicheren Betrieb mit integriert werden konnte. Dies ergab sich nicht zuletzt durch geänderte Marktanforderungen.

**Hochzuverlässige Sensor- und Elektronikmodule entwickelt:** Sensor- und Elektronikmodule wurden erfolgreich für extreme Umweltbedingungen konzipiert. Sie bieten eine Lebensdauer von bis zu 25 Jahren ohne Wartung und erfüllen die API17F-Qualifizierung für Schock, Vibration, Temperaturzyklen und elektromagnetische Verträglichkeit (EMC). Die Langzeitgenauigkeit und Kalibrierintervalle wurden untersucht und optimiert.

Während der druckneutrale Einsatz im Ölbad auf die Aktuator-nahe Elektronik der Hochschule Aalen gesetzt wurde, wurde der Leckage-Sensor, der für die meisten Kundenapplikationen zwingend notwendig ist in der µSensor Einheit der Firma SubCtech implementiert und getestet. Die zu messenden Parameter werden also eher in kleinen bis großen druckdichten Gehäusen aufgenommen. Hierzu gehören druckdichte Gehäusetaschen, die Komponenten zur übergeordneten Steuerung benötigt werden genau so, wie die Überwachung von Zellkompartiments innerhalb von Batterien oder die Überwachung der Steuerelektroniken oder Hauptplatinen in Bojen. Alle diese Kompartiments werden bei 1bar und in Luft oder Stickstoff zur Vermeidung von Feuchtigkeit und somit Vermeidung von Korrosion und damit Erhöhung der Zuverlässigkeit betrieben. Gemein bleibt die Anforderung die Umgebungs- bzw. Systemparameter, zu beobachten, aufzuzeichnen und auszuwerten.

**Industrie-4.0-kompatible Schnittstellen und Protokolle entwickelt:** Sichere und leistungsfähige Schnittstellen sowie Protokolle für die Echtzeitübertragung von Daten an übergeordnete Systeme wurden implementiert, wodurch die funktionale Sicherheit für maritime Anwendungen gewährleistet ist. Es gibt in der SubSea Branche zwei Standards, die beide unterstützt werden: Modbus-RTU sowie CAN-Bus. Beide Schnittstellen beinhalten nativ Fehlerkorrekturen. Durch Prüfalgorithmen werden die Übertragungen und Dateninterpretationen noch sicherer.

**Erweiterte Anwendungsfelder erschlossen:** Die entwickelten Sensormodule haben ihre Vielseitigkeit in verschiedenen Systemarchitekturen und weiteren Anwendungstests (cross-innovation) erfolgreich unter Beweis gestellt und neue Einsatzmöglichkeiten eröffnet.

Diese Ergebnisse stellen einen wichtigen Schritt für die Zukunft der maritimen Technik und ihre Integration in moderne Industrie-4.0-Umgebungen dar.

## 2.4 Know-how Zuwachs im Projekt und im Unternehmen

Durch das Projekt CHARISMA und die Entwicklung der µSensoren für maritime Anwendungen konnte das Unternehmen einen erheblichen Wissenszuwachs in mehreren technologischen und strategischen Bereichen erzielen. Erstmals wurde intern ein umfassendes Know-how in der Entwicklung und Integration von cyber-physischen Sensoren erworben, die extremen Umweltbedingungen wie hohen Drücken, intensiven Temperaturschwankungen sowie Schock- und Vibrationseinflüssen standhalten. Durch die spezifische Sensorentwicklung für „Water-ingress-Detection“, Luftfeuchtemessungen, Druck- und Beschleunigungsmessungen wurden wesentliche Kompetenzen in der maritimen Sensorik aufgebaut. Die gewonnenen Erkenntnisse zur druckkompensierten Gehäusetechnologie und zu Industrie 4.0-kompatiblen Schnittstellen eröffnen neue technologische Möglichkeiten und setzen das Unternehmen an die Spitze der Innovation im Bereich intelligenter Sensorik für die Offshore-Industrie. Nicht zuletzt die neu gewonnenen Erfahrungen bei den Qualifizierungstests haben einige Designstandards geändert.

Zusätzlich konnten durch die Integration eines Prognostics and Health Management (PHM)-Systems neue Fähigkeiten im Bereich der Früherkennung und Zustandsüberwachung von Sensoren und Antriebssystemen aufgebaut werden. Dieses Wissen stärkt die Kapazität des Unternehmens, zuverlässige, wartungsarme und sicherheitsrelevante Sensorlösungen zu entwickeln, die für die Offshore-Industrie attraktiv sind und gleichzeitig die Anforderungen an MARITIME.value, MARITIME.green, MARITIME.smart und MARITIME.safe erfüllen. Dieser Wissenszuwachs positioniert das Unternehmen strategisch besser, um sich als Anbieter von innovativen und hochzuverlässigen Sensorlösungen für maritime und andere anspruchsvolle Industrieumgebungen zu etablieren.

## 2.5 Messung SMARTer Ziele für CHARISMA.µSensor

Im Projekt CHARISMA wurden bewusst SMARTe Ziele gesetzt, um den Erfolg messbar zu machen. Diese Metriken sollen im Folgenden vor allem aus der Sicht des Teilprojektes CHARISMA.µSensor aufgelistet und erläutert werden.

Im Rahmen des Teilvorhabens CHARISMA.µSENSOR wurden alle definierten Ziele erfolgreich umgesetzt. Die entwickelten Einzelkomponenten konnten als innovative Lösungen flexibel in verschiedene Applikationen und Systeme integriert werden. Die Sensor- und Elektronikmodule wurden erfolgreich für den Einsatz in ROVs (Remotely Operated Vehicles), AUVs (Autonomous Underwater Vehicles), Tiefseeproduktionsanlagen, Deep-Sea-Mining-Systemen sowie anderen anspruchsvollen Unterwasseranwendungen adaptiert und in verschiedenen Tests validiert.

### 2.5.1 Spezifisch

Es wurden µSensoren entwickelt, die präzise und kosteneffizient die Messungen für folgende Parameter ermöglichen:

- Temperatur als Frühindikator für Fehler
  - Messbereich: 0-65°C (absolute accuracy), Operating range: -40 bis +85°C
  - Grenzwerte für Fehlererkennung konfigurierbar.  
Standard ist:  $T/dt < 1^\circ\text{C}/\text{min}$  oder  $0^\circ\text{C} < T < 55^\circ\text{C}$
- Luftqualität Schmach bzw. Rauchentwicklung im System
  - Relativer Wert, bei dem man die Änderung betrachten muss  $dR/dT < 10/\text{min}$
- Druck für den Fall von Wassereintrich
  - Messbereich: 300-1100 hPa (BME680), 260-4060 hPa (ILPS22QS)

- Grenzwerte für Fehlererkennung +/-10% über den Änderungen durch das Boyle-Mariottsche Gesetz und dem Gesetz von Gay-Lussac.
- Luftfeuchtigkeit für die Detektion kleinster Leckagen
  - Messbereich: 10% - 90% (full accuracy range), Operating range: 0 – 100%
  - Grenzwerte für Fehlererkennung  $dr.H./dt < 3\%/min$
- Beschleunigung zur Erkennung harter Stöße. Der Sensor hat verschiedene Messbereiche, die eine Anpassung für verschiedene Einsatzzwecke ermöglichen: +/-2g, +/-4g, +/-8g.
  - Bevorzugter Messbereich ist +/-2g

Die Sensoren sind in verschiedenen druckdichten Gehäusen integriert worden, welche für den Einsatz in Aktuatoren unter extremen Bedingungen geeignet sind.

Die robusten und zuverlässigen Sensoren wurden umfassend getestet und angepasst, um extremen Umgebungsbedingungen standzuhalten. Dabei wurden Aspekte wie Auflösung, Präzision, Messbereiche, Alterungsprozesse und Kalibrierung detailliert berücksichtigt und erfolgreich implementiert.

## 2.5.2 Spezifikationen der Umgebungsbedingungen

Die Sensoren wurden erfolgreich unter extremen Umweltbedingungen getestet und erfüllen folgende Anforderungen:

Betriebstemperaturbereich: -18°C bis +70°C

Schock- und Vibrationsbeständigkeit: ±30g gemäß API17F und ISO 13628-6

Druckbeständigkeit: bis zu 600 Bar in Systemgehäusen. Die Funktionalität wurde anhand dieser Grenzwerte in Labor- und Feldversuchen erfolgreich bestätigt.

## 2.5.3 Attraktiv

Durch die Integration der µSensoren in Industrie 4.0-Umgebungen der Offshore-Industrie wurde eine frühzeitige und zuverlässige Ausfallerkennung ermöglicht. Als Bus-System in diesem Bereich hat sich Modbus-RTU durchgesetzt. Um eine möglichst gute Kompatibilität zu gewährleisten wurde zusätzlich CAN-Bus implementiert. Die Ausfallerkennung erfolgt über ein Prognostics and Health Management (PHM)-System, das kontinuierliche Zustandsüberwachung und Diagnose der Sensoren und des Gesamtsystems erlaubt und so einen klaren Mehrwert für den Betreiber bietet.

## 2.5.4 Realistisch

Das interdisziplinäre Projektteam vereint alle erforderlichen Kompetenzen und Ressourcen zur erfolgreichen Umsetzung der Projektziele. Innerhalb der Laufzeit von 36 Monaten wurde das Projekt vollständig realisiert, sodass die vereinbarten SMART-Ziele erreicht wurden.

## 2.5.5 Terminiert

Nach einer Laufzeit von 36 Monaten wurden die µSensoren erfolgreich entwickelt und in relevanten Einsatzumgebungen getestet. Zum Projektende erreichen die Sensoren die Technologiereifegrad TRL-5, damit hat die Kooperation die erfolgreiche Funktionsprüfung unter Einsatzbedingungen gezeigt.

## 2.6 Sensor-Elektronik µModule

Die entwickelten Sensor-Elektronikmodule zeichnen sich durch ihre hohe Innovationskraft und Zuverlässigkeit aus. Alle technischen Ziele wurden vollständig erreicht:

- **Erfassung und Verarbeitung:** Die Sensordaten werden zuverlässig erfasst und vorverarbeitet (Pre-Processing). Qualitätsparameter wie Vertrauensbereich, Spike-Detection, Varianz der Messwerte und Plausibilitätsprüfungen werden bereitgestellt und unterstützen die PHM-Funktionalität umfassend.
- **Minimale Standby-Leistung:** Eine äußerst geringe Leistungsaufnahme im µ-Power-Bereich wurde umgesetzt.
- **Als Controller** wurde der STM32G491CEU6 gewählt. Er bietet genug Leistung für die Anwendung. Die Architektur ist ein verbreiteter Industriestandard.
- **Langlebigkeit:** Die Module erfüllen eine Design-Lebensdauer von 25 Jahren, einschließlich der Berücksichtigung von Alterungsprozessen und Kalibrierintervallen.
- **Integration und EMV-Festigkeit:** Durch die kompakte Bauweise wurden die Module erfolgreich in die Aktuatoren integriert und zeigen hohe elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) selbst in störintensiven Umgebungen.
- **Sicherheitsstandards:** Die funktionale Sicherheit nach IEC 61508 wurde berücksichtigt, um zukünftige Projekte und Anwendungen zu unterstützen.

Die entwickelten Sensor- und Elektronikmodule haben die geplanten Anforderungen vollständig. Mit ihrer Flexibilität, Zuverlässigkeit und Kosteneffizienz setzen sie neue Standards für Unterwasseranwendungen. Sie ermöglichen eine präzise Zustandsüberwachung und PHM-Strategien und eröffnen vielseitige Einsatzmöglichkeiten, insbesondere in ROVs, AUVs und Tiefseeproduktionssystemen. Die Ergebnisse des Teilvorhabens stellen einen signifikanten Fortschritt für die maritime Technik dar und stärken die Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Partner nachhaltig

## 2.7 µSensor Software

Im Rahmen des CHARISMA-Projekts wurde die µSensor-Software entwickelt und implementiert. Die „smarten“ µController-Sensorboards stellen innovative Lösungen bereit, die die Langzeit-Verlässlichkeit, die nahtlose Integration in das Gesamtkonzept sowie die funktionale Sicherheit gewährleisten.

Die Software der Sensormodule wurde erfolgreich mit Schnittstellen und Protokollen ausgestattet, die die Digitalisierung für Tiefseeanwendungen ermöglichen und vollständig Industrie-4.0-kompatibel sind. Erkenntnisse aus den Validierungstests und der Zuverlässigkeitsanalyse wurden in das Pre-Processing integriert, wodurch hochwertige Daten für das übergeordnete System bereitgestellt werden. Smarte Redundanzstrategien wurden entwickelt, um Fehlerkompensationen auf Sensormodulebene zu gewährleisten.

Erfolgreich umgesetzt wurden:

- **Prognostics and Health Management (PHM):** Die Software liefert Qualitätsparameter wie Vertrauensbereiche, Spike-Detection, Varianz der Messwerte, Plausibilitätsprüfungen und Ausfallerkennung. Die Funktionalitäten werden je nach Anwendungsfall agil in die Software integriert oder eben nicht, sodass die Applikation den Funktionsumfang bestimmen kann.
- **Smarte Algorithmen:** Sensordaten werden zuverlässig nachbearbeitet. Zudem kompensieren Algorithmen Sensortoleranzen durch Kalibrierungen und erhalten die Präzision so über lange Zeiträume hinweg.

- **Industrie-4.0-Datenprotokolle:** Die Module unterstützen sowohl spezialisierte Protokolle (Modbus RTU, CAN, CANopen) als auch Standards, wie: 0–10V, 4–20mA, RS-232/485.
- **Echtzeitübertragung:** Sensordatensätze aller Sensoren werden in Echtzeit mit einer Datenrate von 1 Hz übertragen; für spezifische Anwendungen wurden höhere Datenraten ermöglicht. Im Normalbetrieb ist es aber nicht sinnvoll schneller zu übertragen, da hierdurch ein hohes Datenaufkommen auf dem Bus entsteht.
- **Firmware-Upgrades:** Firmware und Konfigurationen können sicher „on the fly“ auch im eingebauten Zustand unter Wasser aktualisiert werden.
- **Funktionale Sicherheit:** Die Entwicklung wurde gemäß IEC 61508 durchgeführt, um den hohen Sicherheitsanforderungen gerecht zu werden.

## 3 Technische Arbeitsziele und Umsetzung

### 3.1 Erfüllter Arbeitsplan

Im Rahmen des Projekts wurden die physikalischen Abhängigkeiten umfassend evaluiert, die Verschleißgrenzen identifiziert und beurteilt sowie die Charakteristik der Degradation in Bezug auf die Sensorik detailliert beschrieben. Gleichzeitig konnten Erfahrungen aus dem meerestechnischen Bereich sowie aktuelle Marktanforderungen durch SubCtech erfolgreich eingebracht werden. Insbesondere wurden die bekannten Anforderungen an Verfügbarkeit mit den zwingend notwendigen Sicherheitsanforderungen der Branche vereint, ohne dabei Kompromisse eingehen zu müssen. Relevante Normen und Richtlinien für die Offshore-Industrie wurden hierzu recherchiert und in die Umsetzung integriert.

Im Zuge der Konzeptentwicklung wurden die Anforderungen und Schnittstellen der Module detailliert definiert. Gleichzeitig erfolgte die Festlegung und Vorbereitung der geplanten Voruntersuchungen auf Basis einer umfassenden Zuverlässigkeitsanalyse. Auch die Planung für die Integration und Verifikation wurde erfolgreich abgeschlossen und bildet die Grundlage für die nachfolgenden Projektschritte, um das Produkt marktreif zu machen.

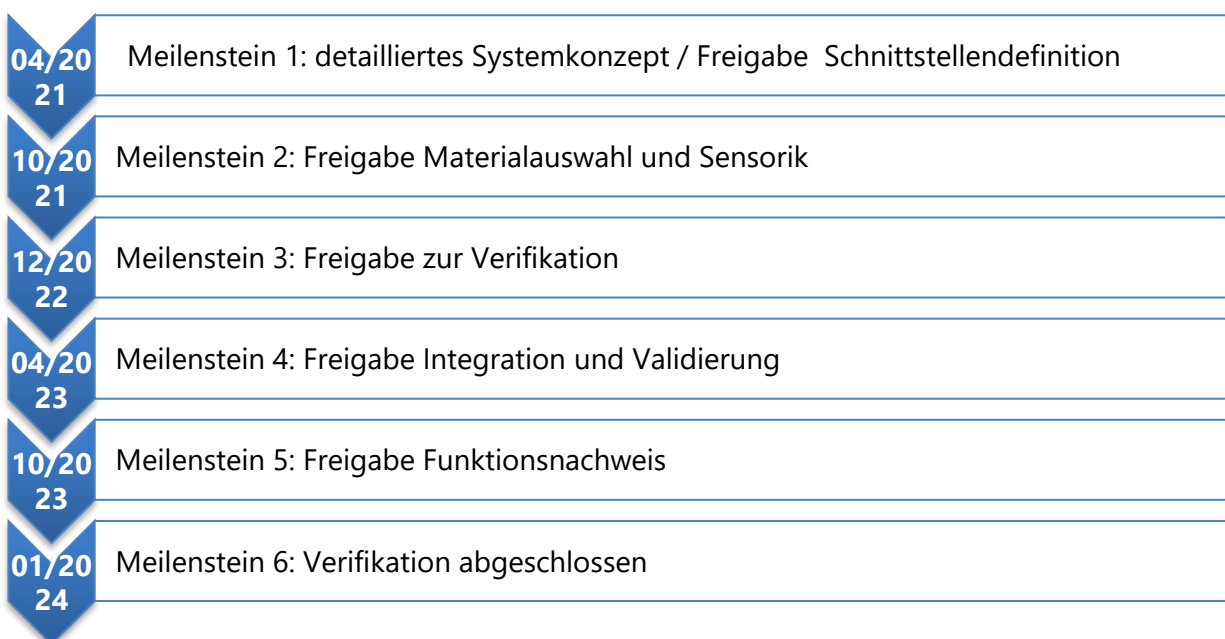


Abbildung 1: Arbeitsplan

## 3.2 Auswahl zu überwachender Messgrößen (Meilenstein 1)

Die Aufnahme der genannten Messgrößen ist essenziell, um die Funktionalität, Sicherheit und Zuverlässigkeit der cyberphysischen-Systeme in Unterwasseranwendungen umfassend zu gewährleisten. Jede Messgröße liefert entscheidende Informationen, die sowohl für den Betrieb als auch für die frühzeitige Erkennung potenzieller Probleme erforderlich sind:

- **Druckmessung**

Die Überwachung des Drucks ist entscheidend für den sicheren Betrieb in Unterwasserumgebungen. Ein stabiler Druck gewährleistet, dass Gehäuse und interne Komponenten den Umgebungsbedingungen standhalten. Abweichungen, wie ein plötzlicher Druckanstieg, können auf Leckagen hindeuten, was eine unmittelbare Gefahr für die Funktionalität des Systems darstellt.

- **Temperaturmessung**

Die Temperaturmessung ist ein Schlüsselfaktor, um den sicheren Betrieb der Elektronik sicherzustellen. Erhöhte Temperaturen können auf eine Überlastung, unzureichende Kühlung oder andere Fehlfunktionen hinweisen. Für ROV Steuerungen oder andere empfindliche Komponenten ist die Überwachung der Temperatur daher besonders wichtig.

- **Luftfeuchtigkeit**

Die Messung der Luftfeuchtigkeit dient der Erkennung von kleinsten Wassereintrüben in das System. Verdunstendes Wasser erhöht die Luftfeuchtigkeit und signalisiert ein mögliches Leck, bevor weitere Schäden entstehen. Diese Messgröße ist besonders wichtig, da Unterwassersysteme naturgemäß in einer feuchten Umgebung betrieben werden, die das Risiko eines Wassereintritts erhöht.

- **Beschleunigungsmessung**

Die Überwachung von Beschleunigungen ist essenziell, um unerwartete Bewegungen oder Stöße zu detektieren, die auf mechanische Probleme oder äußere Einflüsse hinweisen können. Dies ist insbesondere für mobile Systeme wie ROVs oder AUVs von Bedeutung, um die Stabilität und Sicherheit der Bewegung zu gewährleisten.

- **Externe zusätzliche Sensoren**

Z.B.: Pt100-Sensoren: Die genaue Temperaturüberwachung an mehreren Punkten des Gesamtsystems erlaubt es, thermische Anomalien zu identifizieren, z. B. an Batterien, Elektronikgehäusen oder Motoren.

Z.B.: Leckagebänder: Diese Sensoren erkennen zuverlässig, ob Feuchtigkeit an den Deckeldichtungen in das System eingedrungen ist oder ob ein Sensor abgerissen wurde. Dadurch wird eine frühzeitige Erkennung mechanischer Schäden oder Lecks ermöglicht.

Die Kombination dieser Messgrößen ermöglicht es, ein umfassendes Bild des Zustands des Systems zu erhalten. Durch die kontinuierliche Überwachung können potenzielle Fehler frühzeitig erkannt und präventive Maßnahmen ergriffen werden. Dies reduziert nicht nur die Ausfallwahrscheinlichkeit, sondern minimiert auch Wartungskosten und verlängert die Lebensdauer der eingesetzten Komponenten, was insbesondere in anspruchsvollen und kostenintensiven Offshore-Umgebungen von hoher Bedeutung ist.

## 3.3 Softwarekonzept

Die entwickelte Software für das System dient als zentrale Steuerungseinheit und ist darauf ausgelegt, die von den Sensoren aufgenommenen Daten nicht nur zu erfassen, sondern auch ihre kontinuierlichen

Veränderungen intelligent zu analysieren und darauf basierend konsistente Werte auszugeben. Die Software ist modular aufgebaut und verarbeitet die eingehenden Daten in mehreren Schritten, was eine flexible Lösung ermöglicht. Diese Struktur erlaubt nicht nur spätere Erweiterungen, sondern auch den Austausch von Komponenten, ohne die gesamte Softwarearchitektur anpassen zu müssen.

Die Sensormodule werden über sogenannte „Device Module“ angesteuert, die eine einfache Integration zusätzlicher Module oder Funktionserweiterungen gewährleisten. Für die Kommunikation zwischen den Modulen wird Modbus RTU genutzt, ein bewährtes serielles Kommunikationsprotokoll. Diese Wahl erlaubt es, mehrere Platinen über denselben Bus zu verbinden und das System bei Bedarf unkompliziert weiterzuentwickeln.

Um die Funktionsfähigkeit des Systems sicherzustellen, wurden mehrere Mechanismen integriert. Harte Grenzen in der Software erkennen fehlerhafte Sensoren bereits beim Start des Systems und markieren diese. Zusätzlich lassen sich konfigurierte Grenzwerte leicht einfügen und anpassen, um die Anforderungen verschiedener Anwendungen abzubilden. Für eine hohe Zuverlässigkeit und Datengenauigkeit implementiert die Software außerdem Konfidenzintervalle, die die Vertrauenswürdigkeit der Sensorwerte bewerten und ausgeben.

Durch diese intelligente und robuste Architektur bietet die Software eine skalierbare und anpassungsfähige Lösung, die sowohl aktuellen als auch zukünftigen Anforderungen gerecht wird.

## 3.4 Sensoren und Messunsicherheiten (Meilenstein 2)

Um den Funktionsumfang zu gewährleisten wurden folgende Sensoren in das Design aufgenommen.

### 3.4.1 BME680 (Druck/Temperatur/Luftfeuchtigkeit/Luftqualität)

- Druckmessung:
  - Typische Messgenauigkeit:  $\pm 1$  hPa.
  - Temperaturabhängigkeit: Bei extremen Temperaturen können Abweichungen auftreten, die jedoch durch Kalibrierung minimiert werden können.
- Temperaturmessung:
  - Abweichung:  $\pm 1$  °C im typischen Betriebsbereich.
  - Besondere Herausforderung: Die Temperaturmessung ist empfindlich gegenüber Wärmequellen auf dem PCB, wie bei der ersten Version beobachtet (zusätzliche Erwärmung durch PCB-Layout).
- Luftfeuchtigkeitsmessung:
  - Genauigkeit:  $\pm 3$  % relative Luftfeuchtigkeit unter typischen Bedingungen.
  - Einschränkungen: Abweichungen durch Langzeitdrift oder bei extremen Feuchtigkeitswerten möglich.
- Luftqualität
  - Der Luftqualitätssensor misst die Präsenz verschiedener Gase, die in der Standardatmosphäre nicht oder nur in Spuren vorkommen über den sogenannten Gaswiderstand. Daher kann dieser Sensor hervorragend Schmutz und Rauch in Gehäusen detektieren.

IAQ Index	Air Quality	Impact (long-term exposure)	Suggested action
0 – 50	Excellent	Pure air; best for well-being	No measures needed
51 – 100	Good	No irritation or impact on well-being	No measures needed
101 – 150	Lightly polluted	Reduction of well-being possible	Ventilation suggested
151 – 200	Moderately polluted	More significant irritation possible	Increase ventilation with clean air
201 – 250 <sup>9</sup>	Heavily polluted	Exposition might lead to effects like headache depending on type of VOCs	optimize ventilation
251 – 350	Severely polluted	More severe health issue possible if harmful VOC present	Contamination should be identified if level is reached even w/o presence of people; maximize ventilation & reduce attendance
> 351	Extremely polluted	Headaches, additional neurotoxic effects possible	Contamination needs to be identified; avoid presence in room and maximize ventilation

Abbildung 2: Luftwiderstandssensor zur Messung der Luftqualitätssensor, Quelle: Herstellerdatenblatt

### 3.4.2 ILPS22QS (Druck)

- Druckmessung:
  - Typische Messgenauigkeit:  $\pm 0,5$  hPa (im Bereich von 260 bis 1260 hPa).
  - Temperaturabhängigkeit: Kalibrierte Sensoren zeigen minimale Drift.
  - Vorteil: Der Sensor ist für höhere Druckbereiche ausgelegt und ermöglicht präzisere Messungen in Bereichen, in denen der BME680 an seine Grenzen stößt

### 3.4.3 IIS328DQ (Beschleunigung)

- Beschleunigungsmessung:
  - Messbereiche:  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  (wählbar).
  - Genauigkeit:  $\pm 0,02g$  bei typischen Bedingungen.
  - Temperaturabhängigkeit: Messungen sind bei hohen oder niedrigen Temperaturen leicht verzerrt (genaue Werte im Datenblatt, z. B. auf Seite 9).
  - Besonderheit: Der Sensor eignet sich zur Erkennung von Vibrationen oder Bewegungen mit hoher Präzision.

## 3.5 Leiterplattendesign und Integration (Meilensteine 3)

Im Laufe des Projekts wurde die Leiterplatte über zwei Iterationen entwickelt. Die zweite Version hatte als hauptsächliche Verbesserung ein optimiertes Wärmemanagement, sodass die Sensoren weiter entfernt und besser isoliert von sich erwärmenden Platinenregionen befanden.

### 3.5.1 Version 1.3: Initiales Design

Die erste Version der Platine enthält drei fest verbaute Sensoren, die über SPI mit einem Mikrocontroller (STM32G491CEU6) verbunden sind:

- BME680: Misst Druck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

- ILPS22QS: Drucksensor mit einem spezifischen Messbereich.
- IIS328DQ: Beschleunigungssensor mit wählbaren Messbereichen von  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$  und  $\pm 8g$ .

Diese Sensoren wurden ausgewählt, um verschiedene Überwachungsfunktionen zu ermöglichen. Beispielsweise hilft die Kombination der beiden Drucksensoren (BME680 und ILPS22QS) bei der redundanten Überwachung des Drucks. Der BME680 kann auch die Luftfeuchtigkeit überwachen.

Darüber hinaus können externe Sensoren angeschlossen werden:

- Temperatursensoren: Bis zu vier Pt100-Sensoren, die über einen ADC mit I<sup>2</sup>C an den Mikrocontroller angebunden sind.
- Leckageband: Zwei textile Leckagebänder, die Veränderungen der Leitfähigkeit erkennen, z.B. bei Abriss (3,3 V) oder Nässe (0 V). Die Spannung wird über einen Spannungsteiler am ADC gemessen.
- Analogeingänge: Vier analoge Eingänge stehen für weitere Sensoren zur Verfügung, entweder als 4× Single-ended oder 2× differentiell. Hiermit können sogar empfindliche Sensoren optional angeschlossen werden.

Die Platine wird mit einer Versorgungsspannung von 18–36 V betrieben. Intern erzeugt ein isolierter Spannungswandler 3,3 V. Die Kommunikation erfolgt standardmäßig über eine isolierte RS-485-Schnittstelle, kann aber auch über Low-Speed CAN erfolgen.

### 3.5.2 Version 1.3: Verbesserungen im Design

In der zweiten Version des Hardware-Designs wurden hauptsächlich Layout-Optimierungen vorgenommen, um die Temperaturabhängigkeit der Sensoren zu reduzieren.

Problematik der ersten Version:

Der BME680 befand sich in der Mitte der Platine, wo die Wärme des PCBs die Temperaturmessungen beeinflusste. Dies führte nicht nur zu großen Abweichungen, sondern auch zu einer hohen Varianz zwischen den PCBs.

Folgende Optimierungen wurden in der zweiten Version vorgenommen:

- BME680: Der Sensor wurde an den Rand des PCBs verlagert, und um ihn herum wurde eine „Insel“ aus dem PCB ausgefräst, um ihn thermisch zu entkoppeln. Diese Insel ist frei von Kupfer, mit Ausnahme der notwendigen Kommunikationsanschlüsse. Trotz eines konstanten Offsets von etwa  $+10\text{ °C}$  sind die Messwerte nun konsistent über alle PCBs hinweg. Dieser Offset kann herauskalibriert werden.
- Weitere Sensoren: Auch der ILPS22QS und der IIS328DQ wurden an den Rand verschoben, da diese ebenfalls eine gewisse Temperaturabhängigkeit aufweisen. Hierdurch wurden alle Messabweichungen beseitigt.

Mit diesen Optimierungen wurde die Zuverlässigkeit der Messungen verbessert und eine Grundlage für präzise Sensordaten geschaffen. Die modularen Erweiterungsmöglichkeiten und die robuste Kommunikationstechnologie gewährleisten eine hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit für verschiedene Einsatzszenarien.

Die Sensorplatine bietet die zusätzlich zu den in Kapitel [Sensoren und Messunsicherheiten \(Meilenstein 2\)](#) genannten Sensoren Möglichkeit, externe Sensoren flexibel anzuschließen, um vielfältige Messanforderungen zu erfüllen. Aktuell werden vier Pt100-Temperatursensoren verwendet, deren Messwerte über einen ADC, der via I2C mit dem Mikrocontroller STM32G491CEU6 verbunden ist, erfasst. Zusätzlich können bis zu zwei Leckagebänder integriert werden, die mithilfe eines 680 kOhm Widerstands

Zustände wie Abriss oder Nässe detektieren. Diese Zustände werden über Spannungsteiler gemessen. Weiterhin stehen vier analoge Eingänge eines zusätzlichen ADCs für externe Sensoren zur Verfügung, die entweder in vier Single-Ended- oder zwei Differenzmodus-Konfigurationen genutzt werden können. Die Platine arbeitet mit einer Versorgungsspannung von 18–36 V, wobei intern isolierte 3,3 V verwendet werden. Die Kommunikation erfolgt über eine isolierte RS-485-Schnittstelle, wobei alternativ eine Low-Speed-CAN-Schnittstelle bestückt werden kann.

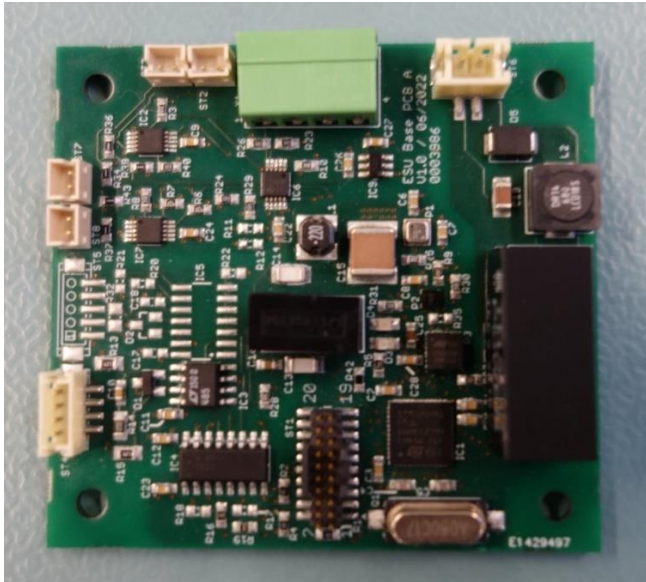


Abbildung 3: PCBA Version 1.0

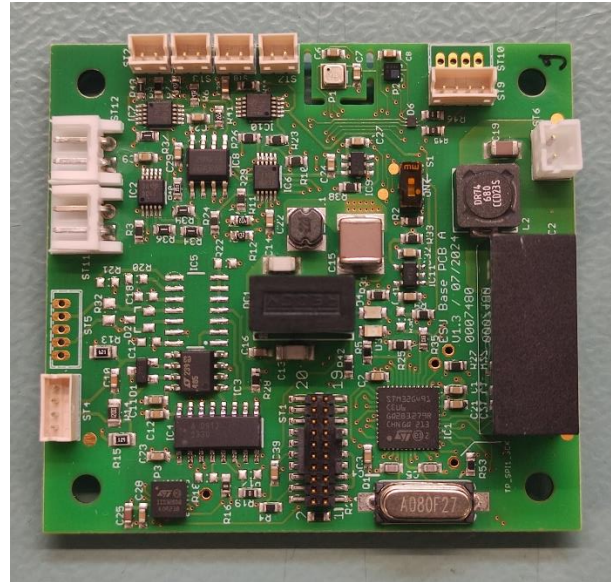


Abbildung 4: PCBA Version 1.3

Weiterhin wurde die Integration in den Aktuator berücksichtigt. Die Leiterplatte wurde in Form und Größe so designt, dass sie in möglichst viele Aktuatorsteuerungen integriert werden kann.

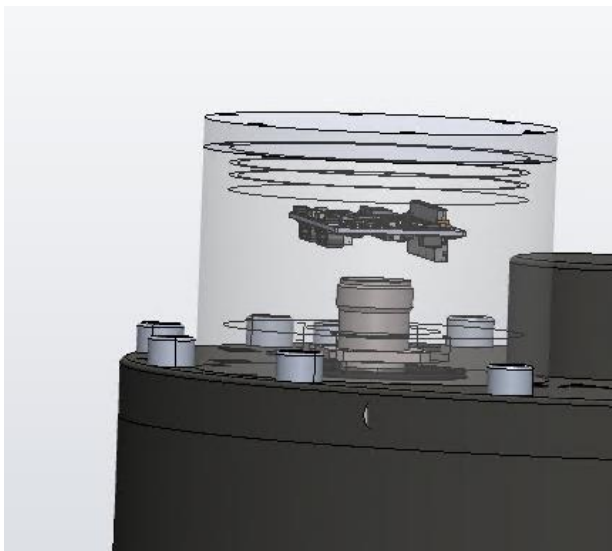
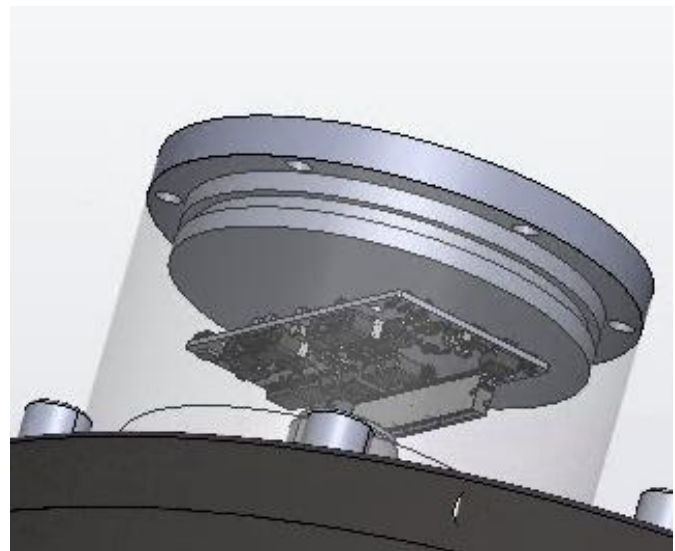


Abbildung 5: Aktuatorintegration



## 3.6 Kommunikationsschnittstellen (Meilenstein 3)

Die Integration von Modbus-RTU und CAN-Bus in die Sensorplatine bietet entscheidende Vorteile, die die Flexibilität, Kompatibilität und Effizienz des Systems verbessern. Beide Kommunikationsprotokolle haben spezifische Stärken, die sich optimal ergänzen und verschiedene Anforderungen abdecken:

### 3.6.1 Vorteile von Modbus-RTU

- **Breite Akzeptanz und Standardisierung**  
Modbus-RTU ist ein weit verbreiteter Kommunikationsstandard in der Industrie und wird von einer Vielzahl von Geräten und Systemen unterstützt. Dies erleichtert die Integration der Sensorplatine in bestehende Infrastrukturen und reduziert die Notwendigkeit proprietärer Lösungen.
- **Kosteneffizienz**  
Aufgrund seiner einfachen Implementierung über RS485 und seiner weit verbreiteten Nutzung ist Modbus-RTU kostengünstig und für eine Vielzahl von Anwendungen geeignet, insbesondere für Umgebungen mit geringen Datenraten.
- **Multi-Device-Kommunikation**  
Modbus-RTU ermöglicht es, mehrere Sensorplatinen oder andere Geräte über denselben seriellen Bus zu verbinden. Dadurch können mehrere Module effizient angesteuert und die Verkabelung minimiert werden.

### 3.6.2 Vorteile von CAN-Bus

- **Zuverlässigkeit in rauen Umgebungen**  
Der CAN-Bus wurde ursprünglich für Automobilanwendungen entwickelt und ist daher besonders robust gegenüber Störungen und Signalverlusten. Dies ist in Unterwasseranwendungen, wo elektromagnetische Störungen auftreten können, von großem Vorteil.
- **Hohe Geschwindigkeit und Effizienz**  
Der CAN-Bus ermöglicht eine schnelle und effiziente Datenübertragung mit integrierter Fehlerkorrektur. Dies ist besonders wichtig für Echtzeitanwendungen, in denen kritische Sensordaten schnell verarbeitet werden müssen.
- **Dezentrale Kommunikation**  
Im Gegensatz zu Modbus-RTU, das auf einer Master-Slave-Architektur basiert, ermöglicht der CAN-Bus eine dezentrale Kommunikation, bei der Geräte direkt miteinander kommunizieren können. Dies erhöht die Flexibilität und Ausfallsicherheit des Systems.

### 3.6.3 Warum die Kombination sinnvoll ist

Durch die Unterstützung beider Protokolle kann die Sensorplatine sowohl in einfachen als auch in komplexeren Netzwerken eingesetzt werden. Die Wahl zwischen Modbus-RTU und CAN-Bus ermöglicht es, die Kommunikationsmethode an die spezifischen Anforderungen eines Projekts anzupassen. So können z. B. bestehende Modbus-Systeme erweitert werden, während für Neuentwicklungen der CAN-Bus als moderner Standard genutzt werden kann. Die Integration beider Protokolle stellt sicher, dass die Sensorplatine mit künftigen Technologien und Standards kompatibel bleibt, was eine langfristige Nutzbarkeit gewährleistet.

Für eine modulare Sensorplattform kann der CAN-Bus aufgrund seiner robusten Fehlerkorrektur und Skalierbarkeit verwendet werden, während Modbus-RTU eine einfache Schnittstelle für externe Geräte bietet. Modbus hat sich in der Subsea-Branche als Standard herausgestellt.

### 3.6.4 Modbus/CAN-Bus Map

Für diese Plattform wurde eine spezielle Bus-Map entwickelt, die den Zugriff auf alle Sensoren festlegt.

Addr.	Identifizier	Min	Max	Unit	Type	Addr.	Identifizier	Min	Max	Unit	Type
18	Pin	0	0xffff		uint16_t	41	BmeTemperatureAvgMin	-500	1500	x.y °C	int16_t
19	MbDeviceId	1	254		uint16_t	42	BmeTemperatureMin	-500	1500	x.y °C	int16_t
20	TemperaturePt0AvgMax	-500	1500	x.y °C	int16_t	43	BmeTemperatureAvgMax	-500	1500	x.y °C	int16_t
21	TemperaturePt0Max	-500	1500	x.y °C	int16_t	44	BmeTemperatureMax	-500	1500	x.y °C	int16_t
22	TemperaturePt0AvgMin	-500	1500	x.y °C	int16_t	45	BmeHumidityAvgMin	0	100	x %	uint16_t
23	TemperaturePt0Min	-500	1500	x.y °C	int16_t	46	BmeHumidityMin	0	100	x %	uint16_t
24	TemperaturePt1AvgMax	-500	1500	x.y °C	int16_t	47	BmeHumidityAvgMax	0	100	x %	uint16_t
25	TemperaturePt1Max	-500	1500	x.y °C	int16_t	48	BmeHumidityMax	0	100	x %	uint16_t
26	TemperaturePt1AvgMin	-500	1500	x.y °C	int16_t	49	Reserved	0x8000	0x7ffd	x hPa	int16_t
27	TemperaturePt1Min	-500	1500	x.y °C	int16_t	50	Reserved	0x8000	0x7ffd	x hPa	int16_t
28	TemperaturePt2AvgMax	-500	1500	x.y °C	int16_t	51	Reserved	0x8000	0x7ffd	x hPa	int16_t
29	TemperaturePt2Max	-500	1500	x.y °C	int16_t	52	Reserved	0x8000	0x7ffd	x hPa	int16_t
30	TemperaturePt2AvgMin	-500	1500	x.y °C	int16_t	53	Reserved	0x8000	0x7ffd	x hPa	int16_t
31	TemperaturePt2Min	-500	1500	x.y °C	int16_t	54	Reserved	-500	1500	x.y °C	int16_t
32	TemperaturePt3AvgMax	-500	1500	x.y °C	int16_t	55	Reserved	-500	1500	x.y °C	int16_t
33	TemperaturePt3Max	-500	1500	x.y °C	int16_t	56	Reserved	-500	1500	x.y °C	int16_t
34	TemperaturePt3AvgMin	-500	1500	x.y °C	int16_t	57	Reserved	-500	1500	x.y °C	int16_t
35	TemperaturePt3Min	-500	1500	x.y °C	int16_t	58	AccelerationXAxisAvg	0x8000	0x7ffd	x g	int16_t
36	InitialBmePressure	0x8000	0x7ffd	x hPa	int16_t	59	AccelerationXAxisMax	0x8000	0x7ffd	x g	int16_t
37	BmePressureAvgMin	0x8000	0x7ffd	x hPa	int16_t	60	AccelerationYAxisAvg	0x8000	0x7ffd	x g	int16_t
38	BmePressureMin	0x8000	0x7ffd	x hPa	int16_t	61	AccelerationYAxisMax	0x8000	0x7ffd	x g	int16_t
39	BmePressureAvgMax	0x8000	0x7ffd	x hPa	int16_t	62	AccelerationZAxisAvg	0x8000	0x7ffd	x g	int16_t
40	BmePressureMax	0x8000	0x7ffd	x hPa	int16_t	63	AccelerationZAxisMax	0x8000	0x7ffd	x g	int16_t

### 3.6.5 Datenprotokoll zur Kontrollinstanz

Das Modbus-Protokoll wird für die Kommunikation zwischen der Oberfläche und dem Unterwassersystem genutzt. Dieses Standardprotokoll bietet sowohl Fehlererkennung als auch Quittierungen, wodurch fehlgeschlagene Kommunikationsversuche zuverlässig erkannt werden können.

Auf der Sensorplatine können Kommunikationsfehler mit dem Unterwassersystem identifiziert werden. Ein Fehlerindikator signalisiert sofort, wenn ein Kommunikationsfehler aktiv ist.

### 3.7 Kalibrierungen (Meilenstein 4 und 5)

Im Folgenden werden wichtige Aspekte der Sensorkalibrierung aufgezeigt. Die verschiedenen Messgrößen bedurften verschiedenste Aufbauten, um die Genauigkeit und Alterung zu bestimmen.

#### 3.7.1 BME680 (Druck/Temperatur/Luftfeuchtigkeit)

Zur Kalibrierung des Drucksensors wurde ein zylindrisches Druckgehäuse verwendet und zwei gleichwertige Modelle unter realistischen Bedingungen getestet und miteinander verglichen. Der Fokus lag darauf, sicherzustellen, dass die Messergebnisse beider Sensoren innerhalb der Auflösung der Bitgenauigkeit übereinstimmen. Diese Untersuchung gewährleistet eine hohe Präzision und Konsistenz der Druckmessung unter den spezifischen Einsatzbedingungen.



Abbildung 6: Druckgehäuse

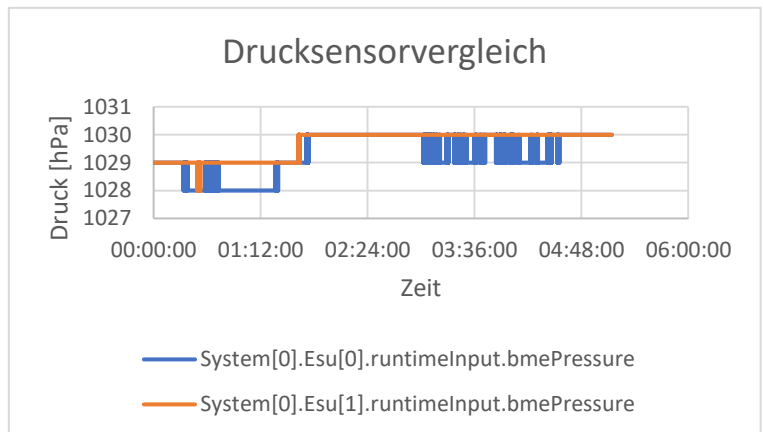


Abbildung 7: Vergleich zweier Drucksensoren

Die Messungen der dynamischen Feuchtigkeit und Temperatur wurden unter kontrollierten Bedingungen in einer Klimakammer durchgeführt. Dies ermöglichte eine präzise Kalibrierung und Verifizierung der Sensorgenauigkeit über den gesamten vorgesehenen Messbereich. Die Klimakammer stellte sicher, dass die Sensoren auch bei wechselnden Umgebungsbedingungen zuverlässig und konsistent arbeiten.



Abbildung 8: Klimakammer

Der Luftfeuchtigkeitssensor zeigte ein gutes Ansprechverhalten und keine messbaren Alterungserscheinungen. Der relative Messwert wurde dann unter Zuhilfenahme, eines Normalisierungsalgorithmus kalibriert.

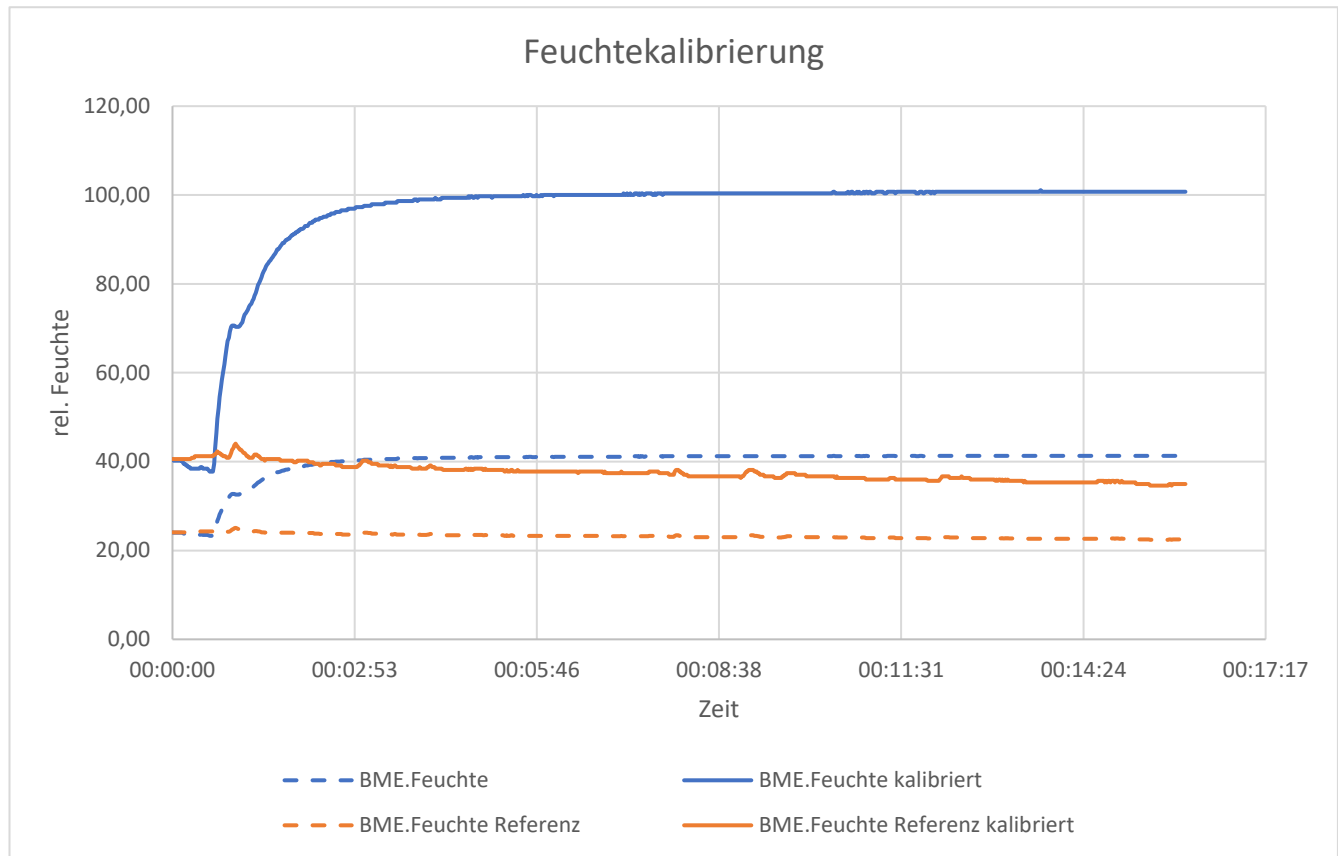


Abbildung 9: Feuchtekalisierung von 40% - 100%

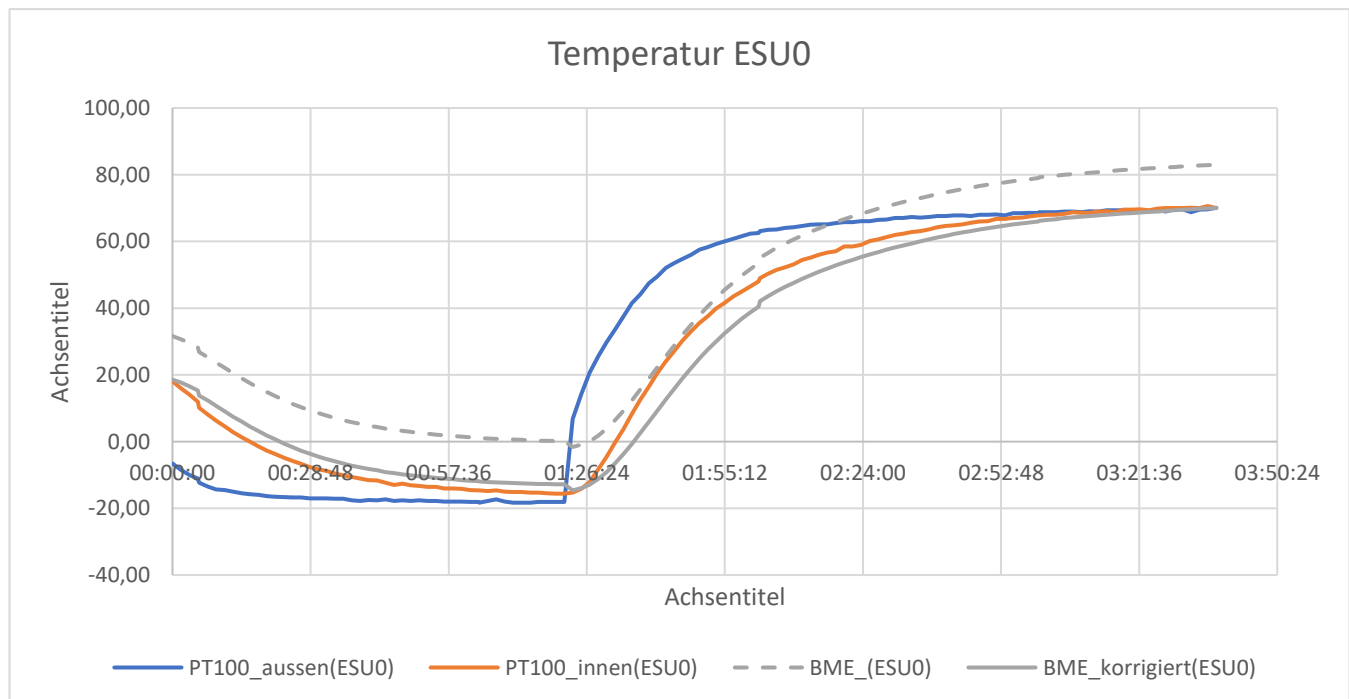


Abbildung 10: Kalibrierung des Temperatursensors

Die Kalibrierung des Temperatursensors wurde durch den Einsatz externer Referenzsensoren durchgeführt, die an verschiedenen Punkten innerhalb des Testkompartiments positioniert wurden. Dabei stellte sich heraus, dass die Wärmekapazität der Leiterplatte einen messbaren Einfluss auf die Temperaturmessung des BME-Sensors hat. Dies bedeutet, dass die Leiterplatte Wärme speichert und langsam abgibt, was zu Verzögerungen und möglichen Abweichungen in der gemessenen Temperatur führt. Um präzise Messwerte zu gewährleisten, musste dieser Effekt bei der Interpretation der Daten berücksichtigt oder durch Anpassungen im Kalibrierungsprozess kompensiert werden.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass Sensor, obwohl auf der elektronischen Leiterplatte angebracht, ähnlich schnell messen konnte, wie ein Sensor, der direkt an die Innenwand des Kompartiments angebracht wurde. Dies ist sehr gut an der Übereinstimmung vom orangenen und grauen Graphen zu erkennen.

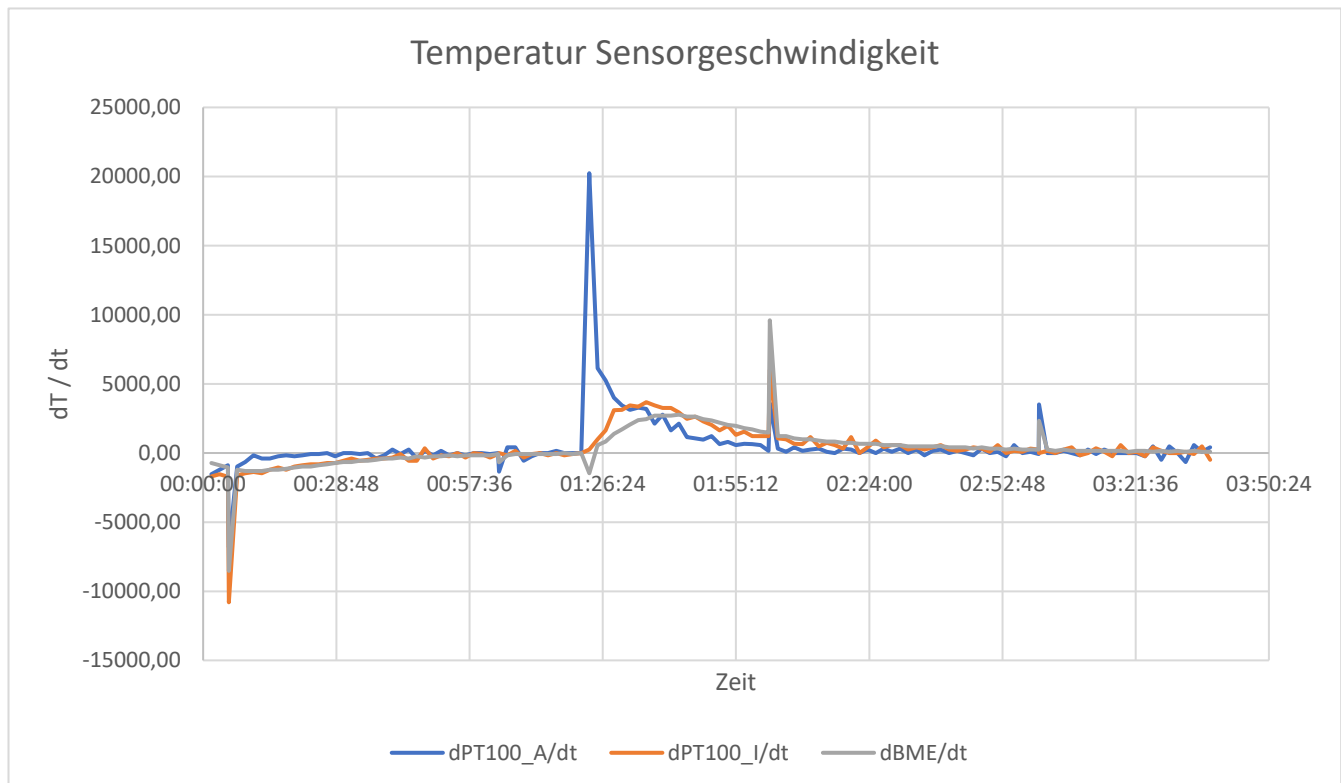


Abbildung 11: Sensorgeschwindigkeitsermittlung on Board im Vergleich zu extern

### 3.7.2 IIS328DQ (Beschleunigung)

Für die Untersuchung der Rotationsbeschleunigung wurde ein Experiment aufgebaut, bei dem ein Beschleunigungstest mit einer Rotationsbeschleunigung von  $0,5 \cdot g$  durchgeführt wurde. Zwei Leiterplatten wurden auf einem Experimentiertisch so montiert, dass ihre x-Koordinaten nach innen zeigten. Dabei wurden sie um  $90^\circ$  zueinander gedreht, um unterschiedliche Ausrichtungen der Beschleunigungssensoren zu testen. Diese Anordnung ermöglichte die präzise Erfassung und Validierung der Sensordaten unter definierten Rotationsbedingungen und diente dazu, die Genauigkeit und Konsistenz der Beschleunigungsmessung zu überprüfen.



Abbildung 12: Beschleunigungs-Teststand

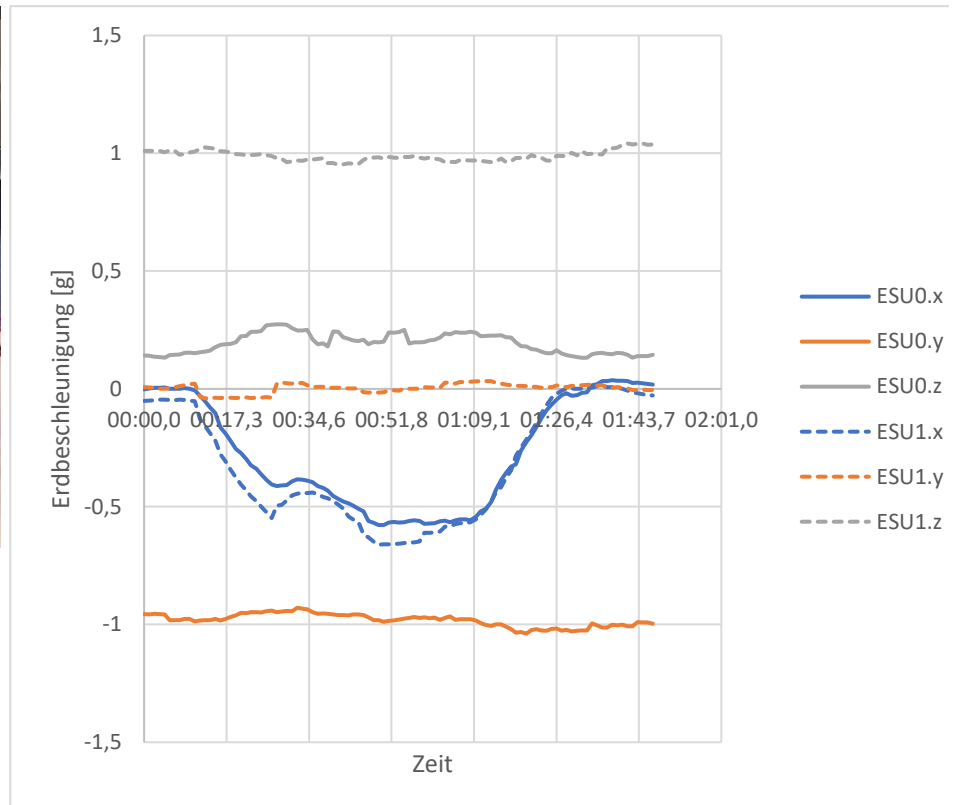


Abbildung 13: Kalibrierungsmessung in PCBA-Koordinaten

Weiterhin sind die Konstanten Werte von  $g=1$  und  $g=-1$  sehr gut durch zu erkennen. Sie zeigen die Orientierung der Sensoren der beiden Leiterplatten dadurch, dass sie die Erdbeschleunigung messen.

### 3.8 Qualifizierungen (Meilenstein 6)

Die Qualifizierung der Leiterplattenbaugruppe nach API 17F stellt sicher, dass die Baugruppe den hohen Anforderungen der Offshore- und Unterwassertechnik gerecht wird. API 17F definiert die Standards für elektrische und elektronische Komponenten, die in extremen Umweltbedingungen eingesetzt werden, wie z. B. in der Tiefsee oder in anspruchsvollen Offshore-Anwendungen.

Im Rahmen der Qualifizierung wurde die PCBA auf ihre Leistungsfähigkeit sowie Widerstandsfähigkeit geprüft. Diese Tests simulieren die extremen Belastungen, denen die PCBA während ihres Betriebs ausgesetzt sein kann. Dazu gehören:

- Schock- und Vibrationsprüfung: Überprüfung der strukturellen Integrität und Funktionalität unter wiederholten mechanischen Belastungen.
- Temperaturtests: Bestimmung der Langzeitzuverlässigkeit bei wechselnden extremen Temperaturen und schnellen Temperaturwechseln.
- EMV-Tests: Sicherstellung, dass die PCBA keine störenden elektromagnetischen Signale aussendet und nicht durch externe Störungen beeinträchtigt wird.
- Drucktests: Simulation von Hochdruckbedingungen, wie sie in tiefen Gewässern auftreten.

Für die Qualifizierungstests wurden teilweise interne Testaufbauten verwendet, die auch in Kapitel [Kalibrierungen](#) verwendet wurden. Andere Test wurden von externen von externen Laboren durchgeführt.



Abbildung 14: Wassertank Experiment



Abbildung 15: Shaker Experiment

### 3.8.1 Vibrationstest

Neben sinus-förmigen Vibrationstests und Shocktests, war der Vibrationstest mit zufälligen Frequenzen eine Herausforderung. Daher soll auf diesen Test genauer eingegangen werden. Hierfür wurde der Standard DIN EN 60068-2-64:2020-09 abgeprüft. Dieser bewertet die mechanische Belastbarkeit von Geräten und Komponenten durch Schwingungen und Vibrationen in zufälligen Frequenzspektren. Der Test wurde wie folgt durchgeführt:

#### 1. Testaufbau

Prüfobjekt: Die Leiterplatte wurde auf einem elektrodynamischen Shaker montiert.

Montage: Das Prüfling wurde gemäß den Vorgaben sicher befestigt, um eine realistische Belastung zu gewährleisten.

Prüfausrüstung: Ein Shaker erzeugt zufällige Schwingungsspektren (Random Vibration). Die Bewegungen erfolgen simultan in definierten Frequenzbereichen und in einer oder mehreren Achsen.

#### 2. Testparameter

Frequenzbereich: Der Test deckt ein festgelegtes Frequenzspektrum von 20 Hz bis 2000 Hz ab.

Energieverteilung: Der Energiegehalt der Schwingungen wird als Power Spectral Density (PSD) in  $g^2/Hz$  angegeben.

Testdauer: Die Vibrationen werden über einen vorgegebenen von 2h durchgeführt.

Achsen: Der Test wurde senkrecht zur Leiterplattenebene durchgeführt, da in dieser Ausrichtung am ehesten Schäden auftreten und um realistische Einsatzbedingungen zu simulieren.

#### 3. Durchführung

Initialprüfung: Vor Beginn des Tests wurde die Elektronik auf seine Grundfunktionalität getestet.

Schwingungseinleitung: Zufällige Vibrationen wurden gemäß den definierten PSD-Werten und Frequenzbereichen eingeleitet.

Kontinuierliche Überwachung: Während des Tests wurde das Verhalten des Prüflings überwacht, um Ausfälle oder Abweichungen zu erfassen.

Abschlussprüfung: Nach dem Test wurde erneut überprüft, ob das Prüfobjekt einwandfrei funktioniert und keine strukturellen Schäden aufweist.

#### 4. Bewertungskriterien

Keine Funktionsausfälle während oder nach dem Test.

Keine sichtbaren physischen Schäden (z. B. Risse, gelöste Komponenten).  
Einhaltung der vorgegebenen Leistungskriterien.

Der Test wurde letztendlich bestanden. In der Abbildung ist das Frequenzverhalten der Elektronik zu sehen.

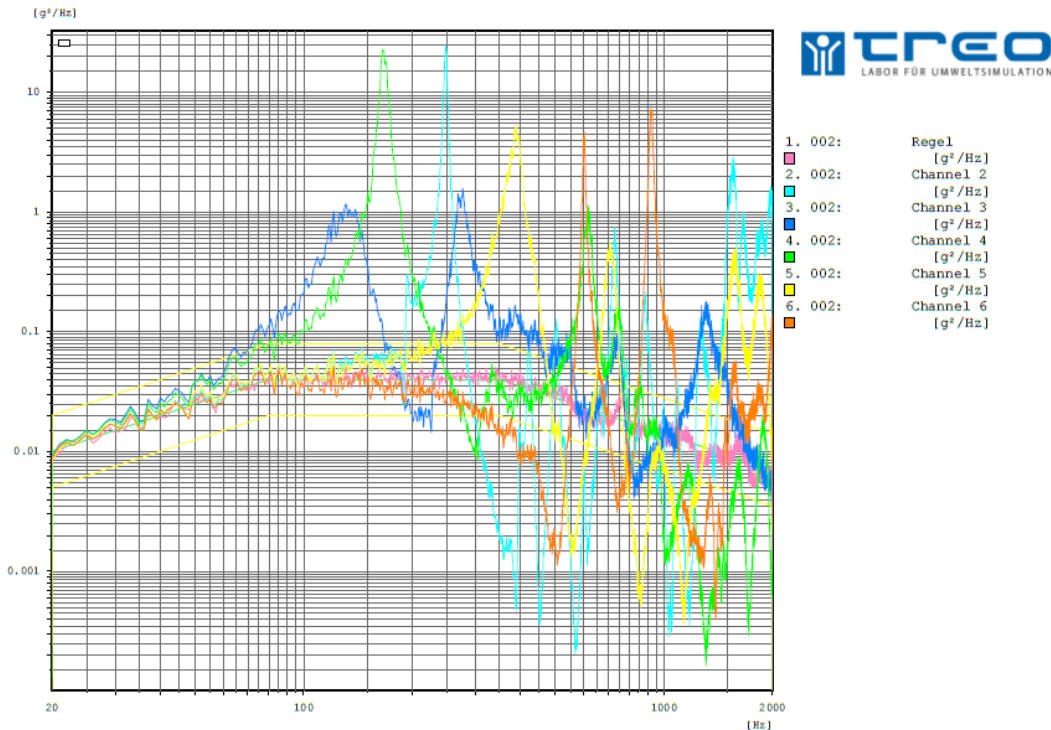


Abbildung 16: Frequenz-Spektrum der Amplituden-Antwort des Testaufbaus

### 3.8.2 Temperatur Test

Zusätzlich zu den Vibrationstests wurden noch Temperaturtests zwischen  $-20^{\circ}\text{C}$  und  $+70^{\circ}\text{C}$  gemacht. Der Test wurde nach dem Standard DIN EN 60068-2-14:2010-04, Test N, Section 7 durchgeführt. Er beschreibt Prüfverfahren zur Ermittlung der Belastbarkeit von Bauteilen und Systemen bei Temperaturwechselbeanspruchungen:

#### 1. Testaufbau

Prüfobjekt: Die Leiterplatte wurde in einer Klimakammer fixiert, um sie kontrollierten Temperaturwechseln auszusetzen.

Messinstrumente: Sensoren überwachten die Temperatur der Leiterplatte während des Tests.

#### 2. Testparameter

Der Temperaturwechsel erfolgte zwischen zwei definierten Extremen, In diesem Falle  $-20^{\circ}\text{C}$  und  $+70^{\circ}\text{C}$ . Die Temperaturänderung erfolgte innerhalb einer Steigung von  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Das Prüfobjekt verblieb für 30 min bei den Extremtemperaturen, um thermische Stabilität sicherzustellen. Der Test umfasste 10 Temperaturwechselzyklen um Langzeitbelastungen zu simulieren.

#### 3. Durchführung

Initialprüfung: Vor Testbeginn wurde die Leiterplatte auf Funktionalität und Integrität geprüft. Die Leiterplatte wurde wiederholt zwischen den vorgegebenen Temperaturbereichen belastet. Während des Tests wurde die elektrische Funktionsfähigkeit überwacht. Nach dem Test wurde die

Leiterplatte erneut überprüft, um mögliche thermische Schäden, Funktionsausfälle oder Materialermüdung zu erkennen.

#### 4. Bewertungskriterien

Mechanische Schäden: Keine sichtbaren Schäden wie Risse, Delaminationen oder Verformungen.

Elektrische Funktionalität: Die Leiterplatte musste weiterhin die spezifizierten elektrischen Eigenschaften erfüllen.

Langzeitstabilität: Es durfte keine signifikante Verschlechterung der Funktionalität auftreten, auch nach mehreren Zyklen.



Abbildung 17: Temperaturtest

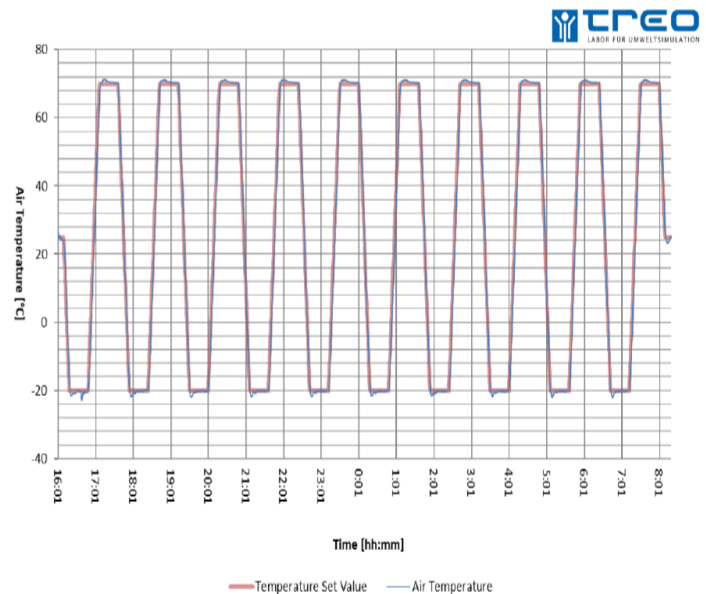


Abbildung 18: Temperaturverlauf

## 4 Verwertungsplan

### 4.1 Erwartete Verwertungsergebnisse

Das Projekt CHARISMA.µSensor zeigt eine klare Perspektive für wirtschaftliche und technologische Vorteile. Durch den gezielten Ausbau spezifischer Kernkompetenzen, wie Sensorkalibrierung, Systemmonitoring und Datenprotokolle, konnten die Firma SubCtech und die Kooperation CHARISMA eine gestärkte Marktposition erreichen. Gleichzeitig wird die Erhaltung von Arbeitsplätzen für zwei Mitarbeiter direkt sichergestellt.

Innerhalb eines Zeitraums von 0 bis 3 Jahren werden neue Produktentwicklungen, die auf der entwickelten Technologie basieren, erwartet. Dies schafft eine Grundlage für Innovation und zukünftiges Wachstum.

Bereits nach 1 bis 2 Jahren erwarten wir eine Steigerung des Produktumsatzes und Ertrags, was zur finanziellen Stabilität und weitere Investitionen in die Zukunft beinhalten wird.

Die vollständige Kommerzialisierung des Gesamtsystems ist in einem Zeithorizont von 2 bis 4 Jahren geplant, wodurch nachhaltige Einnahmen und eine langfristige Marktpräsenz gesichert werden können.

In der Tabelle sind die Verwertungsziele noch einmal zusammengefasst:

Verwertungsergebnis	Zeithorizont (nach Projektende)
Verbesserung der Wettbewerbssituation durch Ausbau spezifischer Kernkompetenzen	Unmittelbar
Kommerzialisierung des Gesamtsystems	0-2 Jahre
Neue Produktentwicklungen, basierend auf der Technologie	0-3 Jahre
Steigerung des Produktumsatzes und des Ertrages	1-2 Jahre
Erhaltung von Arbeitsplätzen (2 Mitarbeiter)	Unmittelbar
Schaffung neuer Arbeitsplätze (2 Mitarbeiter)	0-3 Jahre

## 4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Der Bedarf an ROVs (Remotely Operated Vehicles) und AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) ist einer der am stärksten wachsenden Märkte weltweit. Mit steigenden Anforderungen an Sicherheit, Funktionalität und Kosteneffizienz gewinnen automatisierte Überwachungssysteme an Bedeutung. Besonders im Bereich der kommerziellen Systeme, wie Explorations- und Wartungs-ROVs für Offshore-Öl- und -Gas-Anwendungen sowie bei Forschungssystemen wie bei GEOMAR, zeigt sich ein starkes Wachstum. Durch die Verwendung cyber-physischer Antriebsmodule kann in diesem Umfeld ein zunehmender Wettbewerbsvorteil geschaffen werden.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten von ROVs (Remotely Operated Vehicles) und AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) werden weiterhin durch die aktuelle geopolitische Sicherheitslage erheblich begünstigt. Der steigende Bedarf an Überwachungs-, Inspektions- und Verteidigungstechnologien im maritimen Sektor wird durch zunehmende Spannungen in internationalen Gewässern und strategischen Regionen wie der Nord- und Ostsee, der Arktis, dem Südchinesischen Meer und kritischen Seehandelsrouten verstärkt. ROVs und AUVs bieten hier eine ideale Lösung für Aufgaben wie Unterwasserüberwachung, Minenräumung und Infrastrukturinspektionen in sicherheitskritischen Gebieten. Gleichzeitig treiben Investitionen in die maritime Sicherheit, Forschung und Energiegewinnung die Nachfrage nach diesen Fahrzeugen voran, was ihre wirtschaftliche Attraktivität weiter erhöht.

Ein wesentlicher Hemmschuh für die breite Nutzung solcher Technologien liegt in der aufwendigen Anpassung der Komponenten an spezifische Aufgaben. Diese Anpassungen sind oft zeit- und kostenintensiv, insbesondere aufgrund der geringen Stückzahlen solcher Systeme. Beobachtet man Marktberichte und unterhält sich mit Influencern in diesem Umfeld so ergibt sich die eindeutige Tendenz hin zu modular aufgebauten, und wiederverwendbaren Komponenten. Diese stellen den Schlüssel zur Kostenreduktion dar. Der Einsatz modularer Sensorplatinen und cyber-physischer Antriebsmodule birgt erhebliche Einsparpotenziale, insbesondere im Bereich der Wartung und Inspektion von Offshore-Anlagen, die über ihre Lebensdauer hinweg immense Kosten verursachen.

Eingeführte Hybrid-ROVs wie Aquabotix (USA), SAROV (Saab, Schweden) und Seacat (Atlas Elektronik, Deutschland) bieten zwar erste Fortschritte, weisen jedoch nicht die Modularität, Offenheit und Flexibilität auf, die im Rahmen dieses Projekts angestrebt wurden.

Da der deutsche Markt für solche Technologien begrenzt ist, richtet sich der Fokus auf den internationalen Markt. Mit der Entwicklung modularer und flexibler Komponenten sollen verschiedene Anwendungen im Bereich von ROVs, AUVs und Unterwasser-Aktuatoren abgedeckt werden.

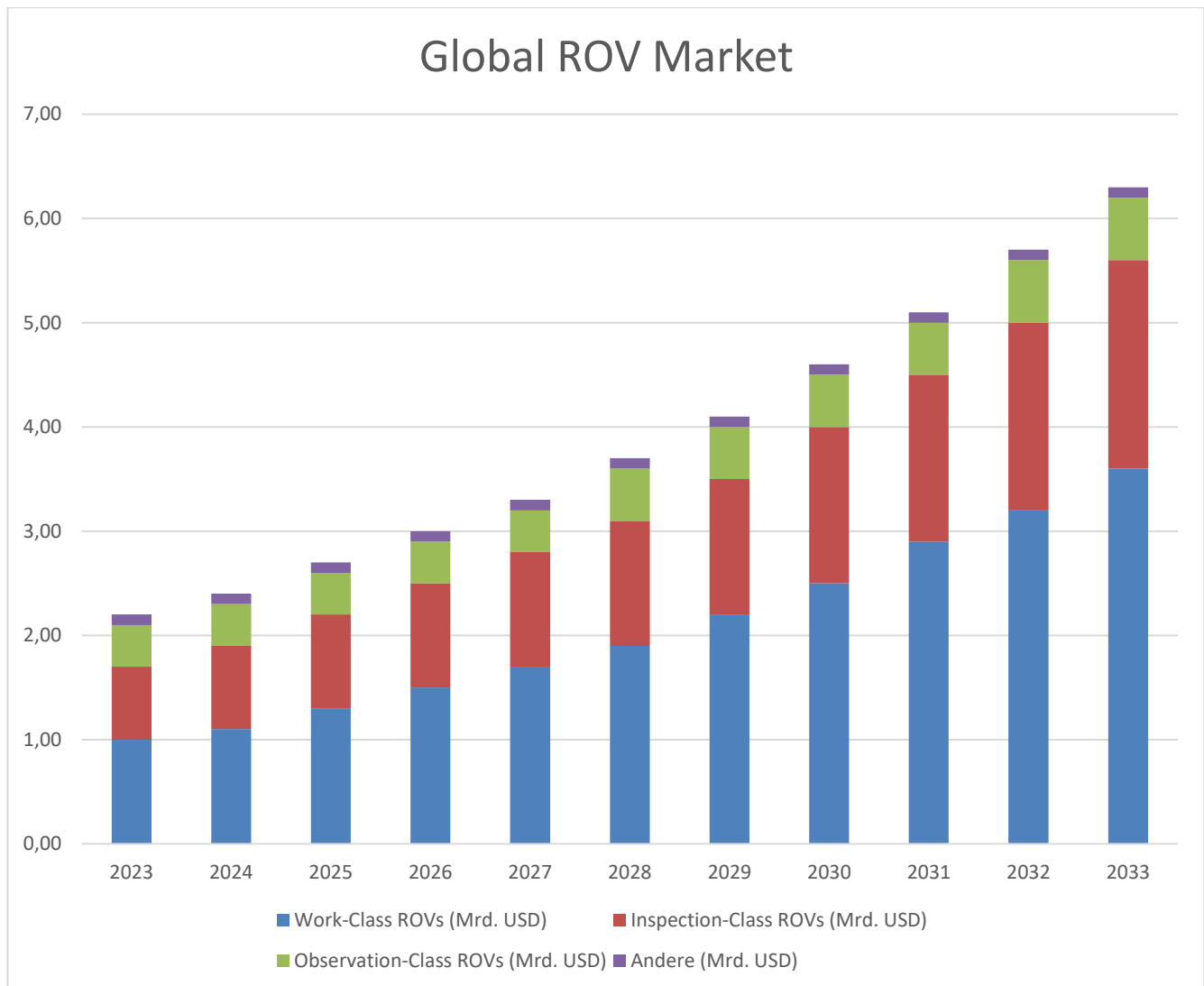


Abbildung 19: Quelle: Market News Live, Newsletter Mai '24

Die Entwicklung von Unterwasserfahrzeugen und ihrer Kernkomponenten ist komplex und kostenintensiv und wird meist von großen Marktführern in der Offshore-Öl- und -Gas-Industrie oder dem militärischen Markt vorangetrieben. SubCtech hat sich jedoch bereits in der Vergangenheit als dynamisches und innovatives High-Tech-Unternehmen etabliert, das erfolgreich Entwicklungsprojekte für Konzerne umsetzt.

- **Know-how und Effizienz:** Dank der vorhandenen Expertise aller Projektpartner und der technischen Kompetenz von SubCtech können sowohl die Sensorplatine als auch die cyber-physischen Antriebsmodule zielgerichtet und effizient entwickelt werden.
- **Modularität:** Die modularen Sensorplatinen und Antriebsmodule sind flexibel an verschiedene Typen von Unterwasserfahrzeugen und Aktuatoren anpassbar.
- **Marktzugang:** Mit dem internationalen Partnernetzwerk und den etablierten Verbindungen von SubCtech in die Offshore-Öl- und -Gas-Industrie ist ein effektiver Marktzugang sichergestellt.

Die Marktaussichten für diese Technologien sind äußerst vielversprechend. Der steigende Bedarf an Unterwasserfahrzeugen sowie die zunehmend erschwerten Einsatzbedingungen (z. B. Tiefsee, Arktis, Regionen mit schlechter Infrastruktur) treiben die Nachfrage nach zuverlässigen, modularen und flexiblen Lösungen wie Sensorplatinen und cyber-physischen Antriebssystemen.

Durch die flexible Konfigurierbarkeit der Komponenten können unterschiedliche Anwendungen mit einer einheitlichen Technologie bedient werden. Dies reduziert nicht nur Entwicklungs- und Produktionskosten, sondern steigert auch die Marktdurchdringung. Die Technologie eignet sich insbesondere für anspruchsvolle Einsatzbereiche wie Tiefseetechnik, Offshore-Öl- und -Gas-Industrie sowie weitere vergleichbare Anwendungen.

Die Kombination aus modularer Sensorik und cyber-physischen Antriebsmodulen bietet technologische und wirtschaftliche Vorteile, die exakt auf die hohen Anforderungen an Sicherheit, Zuverlässigkeit und Effizienz des internationalen Marktes abgestimmt sind. SubCtech positioniert sich damit als führender Anbieter zukunftsweisender Sensortechnologien und Antriebslösungen für die maritime Industrie.

## Berichtsblatt

<b>1. ISBN oder ISSN</b> -	<b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b> Schlussbericht	
<b>3. Titel</b> Abschlussbericht für das Projekt CHARISAM.µSensor		
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Dr. rer. nat. Tim Klostermann Dipl. Phys. Stefan Marx	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 31.05.2024	
	<b>6. Veröffentlichungsdatum</b> 20.12.2024	
	<b>7. Form der Publikation</b> Document Control Sheet	
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b> SubCtech GmbH Wellseedamm 1-3 24145 Kiel	<b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b> -	
	<b>10. Förderkennzeichen</b> 03SX539C	
	<b>11. Seitenzahl</b> 28	
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b> BMWK	<b>13. Literaturangaben</b> 0	
	<b>14. Tabellen</b> 2	
	<b>15. Abbildungen</b> 20	
<b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b> -		
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b> -		
<b>18. Kurzfassung</b> <p>Das Projekt CHARISMA.µSensor widmet sich der Entwicklung innovativer Sensor-Technologien für den Einsatz in der Unterwassertechnik mit einem Schwerpunkt auf modulare Sensorplatinen und cyber-physische Antriebssysteme. Ziel ist die Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Effizienz von ROVs (Remotely Operated Vehicles) und AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) durch den Einsatz flexibler, kosteneffizienter und anpassungsfähiger Komponenten, die wichtige Umwelt- und Systemparameter aufnehmen können, wie Temperatur, Druck, Feuchte, Beschleunigungen, Leckagen, Schmauch und andere ungewollte Gase.</p> <p>Die entwickelten Technologien adressieren wachsende Marktbedarfe, die durch steigende Anforderungen an Sicherheit, Funktionalität und Kosteneffizienz in der maritimen Industrie bedingt sind. Die Kombination aus modernster Sensorik, die für energieeffiziente Antriebssysteme eingesetzt werden kann, schafft technologische und wirtschaftliche Vorteile, die auf aktuelle Herausforderungen wie Tiefsee-Exploration, Offshore-Wartung und maritime Sicherheit abgestimmt sind.</p> <p>Das Projekt zielt darauf ab, die Wettbewerbsfähigkeit der Partner durch die Entwicklung zukunftsweisender Sensoren für zu stärken und die Grundlage für weitere Anwendungen im Bereich der Meeresforschung, Industrie 4.0 und All-Electric-Systeme zu schaffen. Es trägt wesentlich zur Förderung von Innovationen und zur nachhaltigen Entwicklung der maritimen Industrie bei.</p>		
<b>19. Schlagwörter</b> Maritime Sensor Technologie, Modularer Sensor, All-Electric-Systeme (AES), Sensoren für Cyber-physische Antriebssysteme		
<b>20. Verlag</b> -	<b>21. Preis</b> -	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2518872-3

## Document control sheet

<b>1. ISBN or ISSN</b> -	<b>2. type of document (e.g. report, publication)</b> Veröffentlichung (Publikation)	
<b>3. title</b> Final report for the CHARISMA.µSensor project		
<b>4. author(s) (family name, first name(s))</b> Dr. rer. nat. Tim Klostermann Dipl. Phys. Stefan Marx	<b>5. end of project</b> 31.05.2024	
	<b>6. publication date</b> 20.12.2024	
	<b>7. form of publication</b> Document Control Sheet	
<b>8. performing organization(s) name, address</b> SubCtech GmbH Wellseedamm 1-3 24145 Kiel Germany	<b>9. originators report no.</b> -	
	<b>10. reference no.</b> 03SX539C	
	<b>11. no. of pages</b>	
<b>12. sponsoring agency (name, address)</b> BMWK	<b>13. no. of references</b> 0	
	<b>14. no. of tables</b> 2	
	<b>15. no. of figures</b> 20	
<b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b> -		
<b>17. presented at (title, place, date)</b> -		
<b>18. abstract</b> <p>The CHARISMA.µSensor project is dedicated to the development of innovative sensor technologies for use in underwater technology with a focus on modular sensor boards and cyber-physical drive systems. The aim is to improve the performance and efficiency of ROVs (Remotely Operated Vehicles) and AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) by using flexible, cost-effective and adaptable components that can record important environmental and system parameters such as temperature, pressure, humidity, acceleration, leakage, smoke and other unwanted gases.</p> <p>The technologies developed address growing market needs driven by increasing demands for safety, functionality and cost efficiency in the maritime industry. The combination of state-of-the-art sensor technology, which can be used for energy-efficient propulsion systems, creates technological and economic advantages that are tailored to current challenges such as deep-sea exploration, offshore maintenance and maritime safety.</p> <p>The project aims to strengthen the competitiveness of the partners through the development of future-oriented sensors and to create the basis for further applications in the field of marine research, Industry 4.0 and all-electric systems. It contributes significantly to the promotion of innovation and the sustainable development of the maritime industry.</p>		
<b>19. keywords</b> Maritime Sensor Technology, Modular Sensor, All-Electric-Systems (AES), Sensors for Cyber-physical Drive-system		
<b>20. publisher</b> -	<b>21. price</b> -	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2518877-4