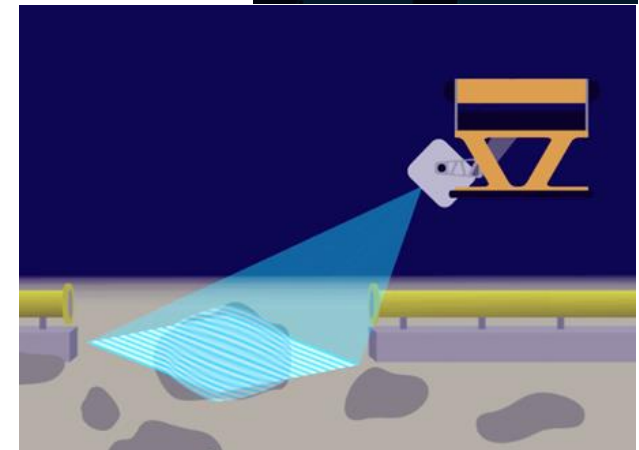
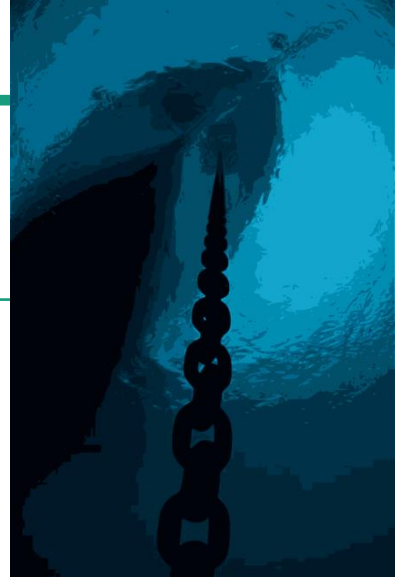

Qualitätssicherung komplexer Strukturen unter Wasser mittels dynamischer 3D-Messung

C. Munkelt, Fraunhofer IOF, 25.04.2023, OptecNet @ Fürstentfeldbruck



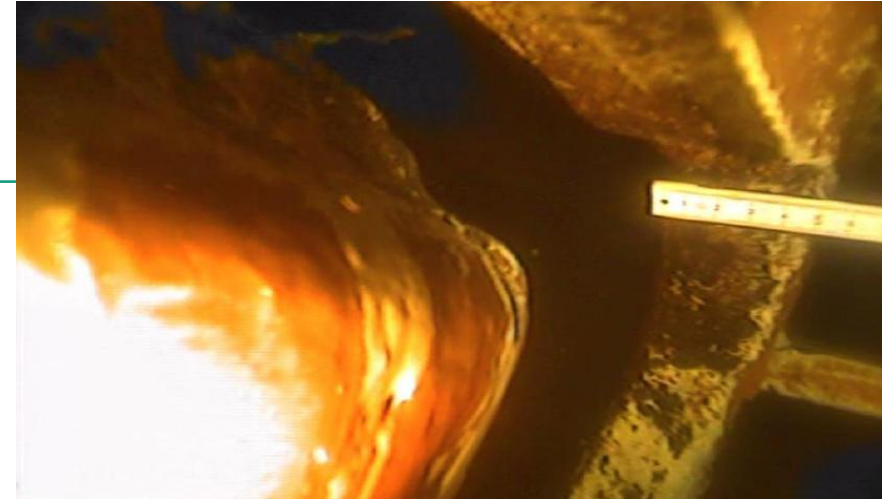
Wozu dynamische 3D-Messung unter Wasser?

- **Zeit = Geld**, besonders unter Wasser!
- Viele aktuelle UW 3D-Messverfahren sind zeitaufwändig
 - Mit Tauchern?
 - Manuelles Anbringen von Markern?
 - Keine Echtzeit-3D-Rekonstruktion → Auswertezeit!
- **Ausgedehnte Messobjekte** quasi-statisch zu aufwändig
 - 1000 m Pipeline? Verstreute Einzelobjekte?
- Weitere: Fundament / Verankerung von Windenergieanlagen, Bergung von unexplodierter Munition (UXO)

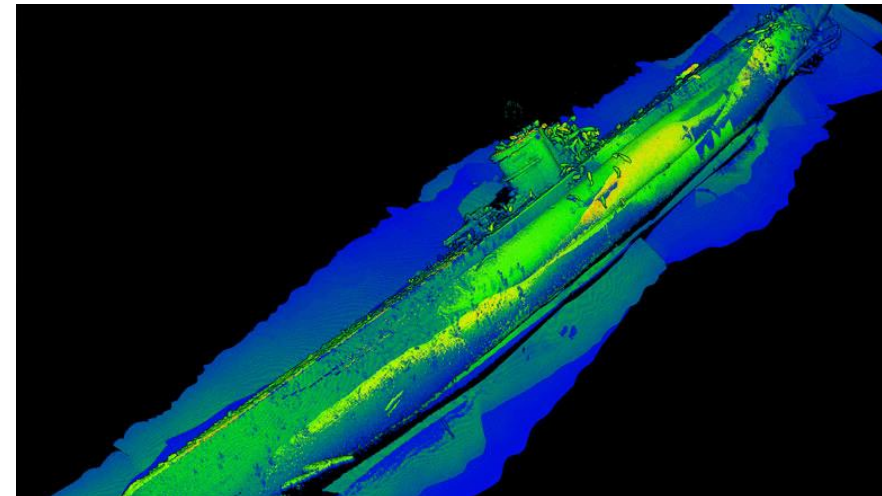


Qualitätssicherung unter Wasser

- Bisher viel durch **Video-Dokumentation**
- **Überblicks-Dokumentation** via Laserscanning + Photogrammetrie
- + statische Detail-3D-Scans...



Schiffs-Ruder (Quelle: Baltic Taucherei- und Bergungsbetrieb Rostock GmbH)



Schiffs-Wrack (Quelle: Voyis case study, <https://www.eiva.com/about/case-studies/navimodel-and-naviedit-2g-robotics>)

Inhalt

- Motivation
- Robuste Sensorik: „goDEEP3D“
- Herausforderungen im Unterwasser-Einsatz
 - Kalibrierung
 - Messung in Bewegung
 - Trübheit
 - Sonstige Robustheitsaspekte
- Zusammenfassung & Ausblick



UW 3D Sensor

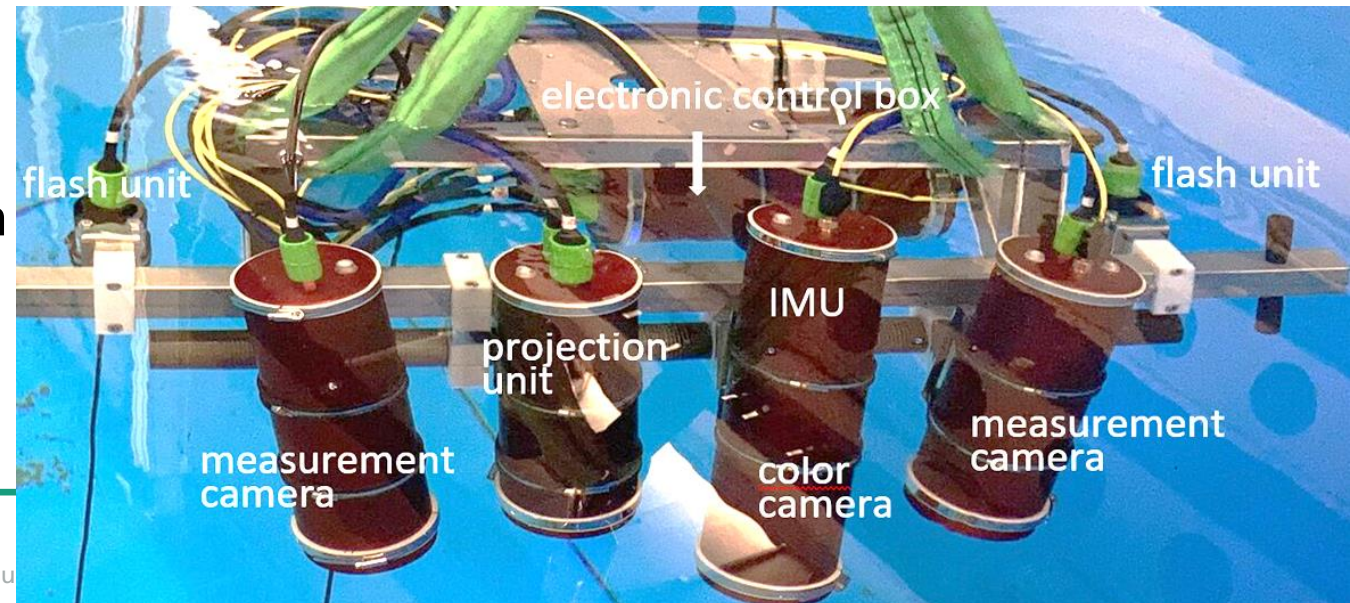
Entwickelt im BMWK Projekt „UW Sensor“ 2019 - 2022

- Projektpartner Searenergy, Oktopus, 3++, Justus-Maximilian-Universität Würzburg, und Fraunhofer IOF Jena
- 3D Rekonstruktion mittels aktiver Musterprojektion:
 - Simultane 3D (0.7 MPx) + 2D Farb-Texturerfassung (7 MPx)
 - Kontinuierliche 3D-Messrate von 12 Hz – 60 Hz
 - Tiefseetauglich bis 1000 m
 - Messfeld bis zu 0.9 m × 0.8 m
 - Messentfernung: 1.0 m – 2.5 m
 - Messunsicherheit: 0.1 mm – 0.4 mm
 - Längenmessabweichung ± 1%
 - Abmessungen: 1.2 m × 0.7 m × 0.5 m
 - Gewicht: 65 kg



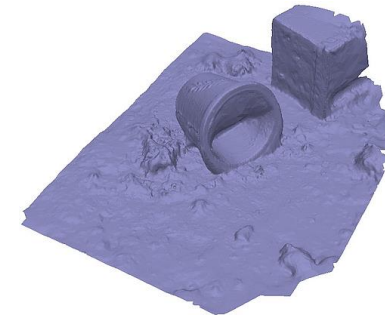
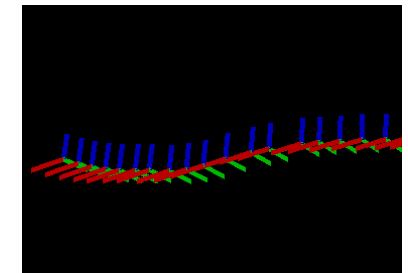
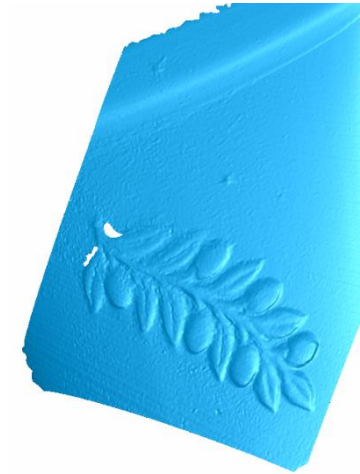
Oben: Erprobung in der Ostsee an einem working class ROV.

Unten: Aufbau des Sensors im Detail.



UW 3D Sensor

- Kombination von:
 - Synchronisierte Beleuchtung & **Bildaufnahme**
 - **3D-Rekonstruktion** mit aktiver Musterprojektion
 - Visuelle und inertielle **Odometrie (VIO)**
 - Simultane Lokalisierung und Kartierung (**SLAM**)
 - **Registrierung** der 3D-Daten
 - Abbildung der **Farb-Textur-Daten**



Bilder: Rekonstruktion eines Terrakotta-Topfes (JMU & IOF)

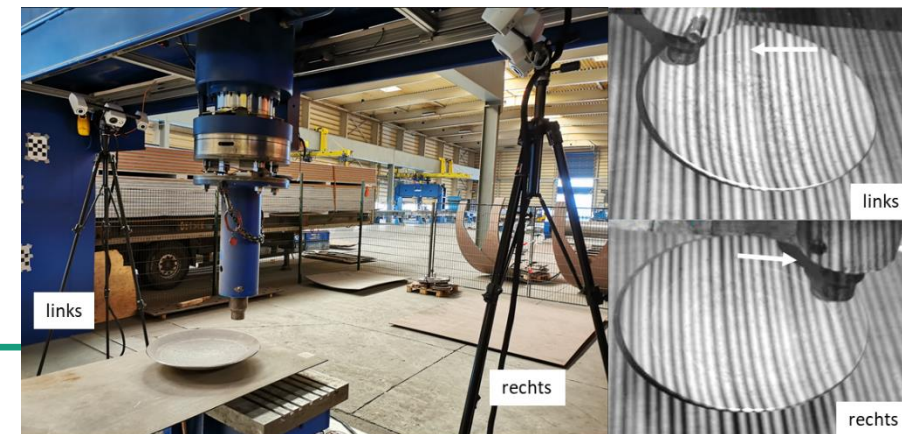
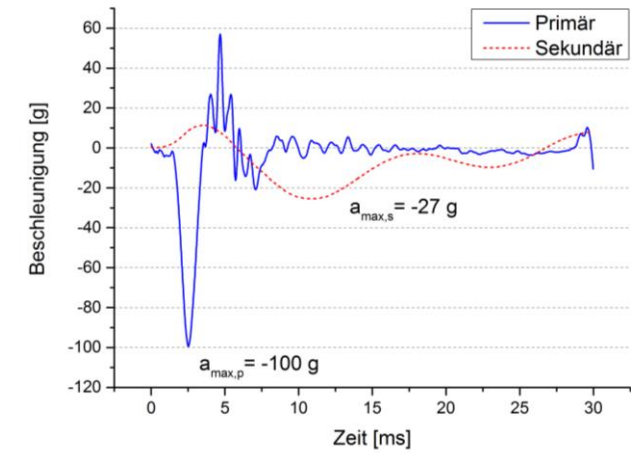
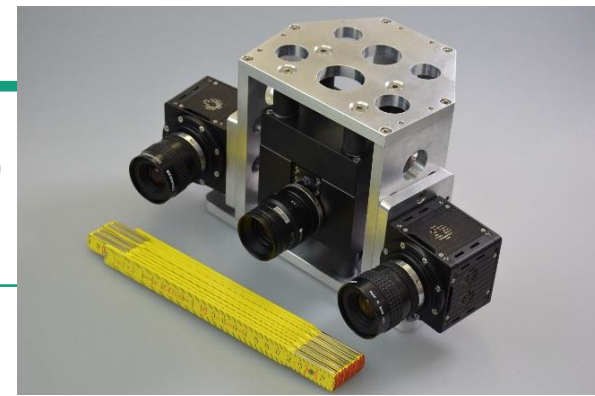
Weitere **Robuste Sensorik** ...in der Abteilung BS

■ Mitfahrende 3D-Sensorik für Automobil-Crash-Tests

- **Extreme Beschleunigungen!**
 - Messfeld ca. 600 mm × 600 mm
 - 2D-Auflösung 256 px × 256 px bei 11.5 kHz
 - Messunsicherheit < 3 mm
- ➔ **Mechanische Stabilität!**

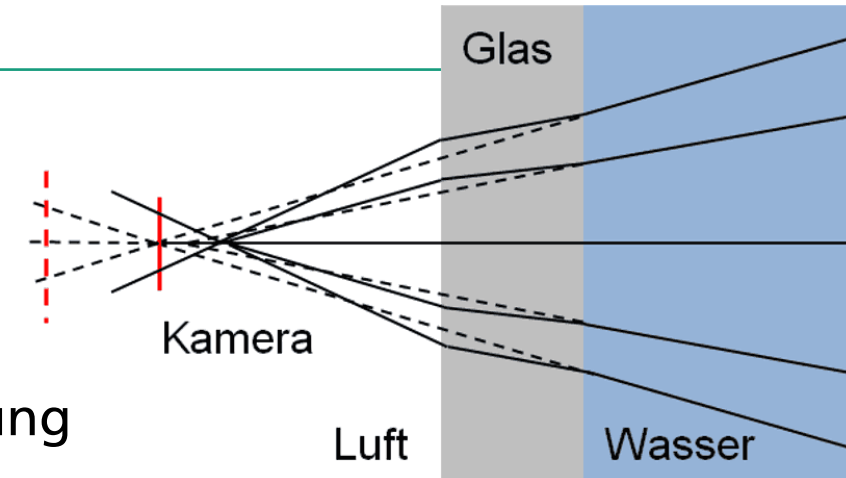
■ Qualitätskontrolle bei der kaltplastischen Umformung

- **Dreck! Vibrationen! Rauhe Umgebung...**
- ➔ **Industrietaugliche Auslegung von HW & Kalibrierung!**



Welche Herausforderungen unter Wasser?

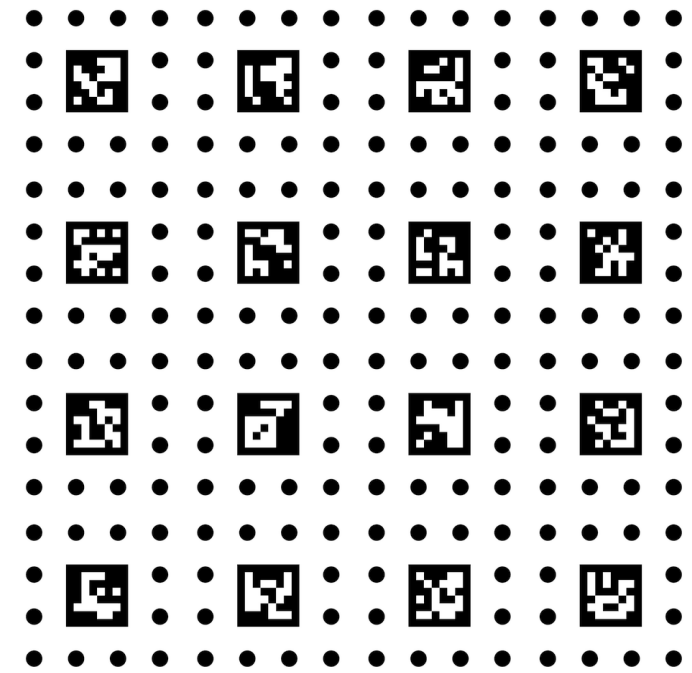
- Optische Messtechnik UW → **Brechung + Medien-Effekte**
- Sensor (immer) **in Bewegung** → Bewegungskompensation
- **Messbedingung** Wasser: Trübheit / Absorption / Rückstreuung
- Sonstiges: **Druckfestigkeit**, Datenübertragung, Temperatur
- **(Logistik)** – eigentlich trivial, aber:
 - Vorabkalibrierung heikel (Transport, Wasserbedingungen)
 - Adaption Sensor an Remote Operated Vehikle (ROV)
 - Was vergessen? Was kaputt? → Alles redundant!
 - ...



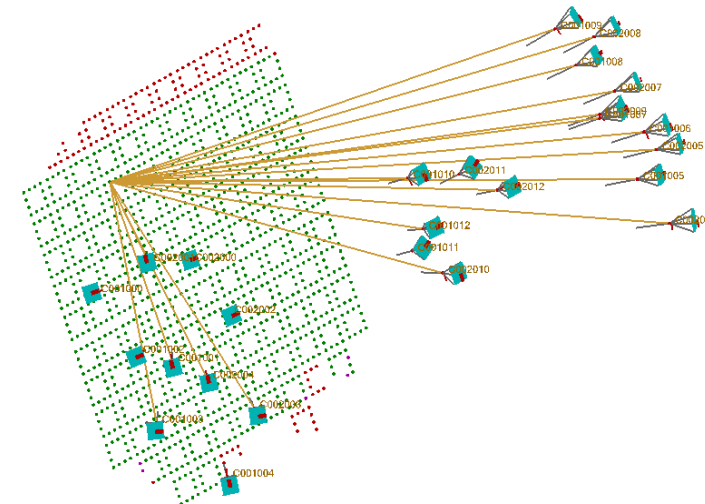
Schiffslift (Quelle: Baltic Taucherei- und Bergungsbetrieb Rostock GmbH)

Kalibrierung

- Echtes UW-Kamera-Modell (z.B. strahlbasiert) wäre schön...
 - Aber **aktuell Näherung** ausreichend und **echtzeitfähig**
 - Etabliertes Verfahren: Marker mit Bündelblockausgleichung
- UW-Haupteffekte:
 - **Brennweitenverlängerung** $\sim 1.3 \times$
 - **Starke tiefenabhängige Verzeichnungseffekte**
- Anforderung an die Kalibrierung:
 - **Direkt vor Ort, direkt vor Messkampagne**
 - **Mit geringem Aufwand & Verzögerung**
 - **Reproduzierbar, (teil-) automatisiert, hohe Güte**

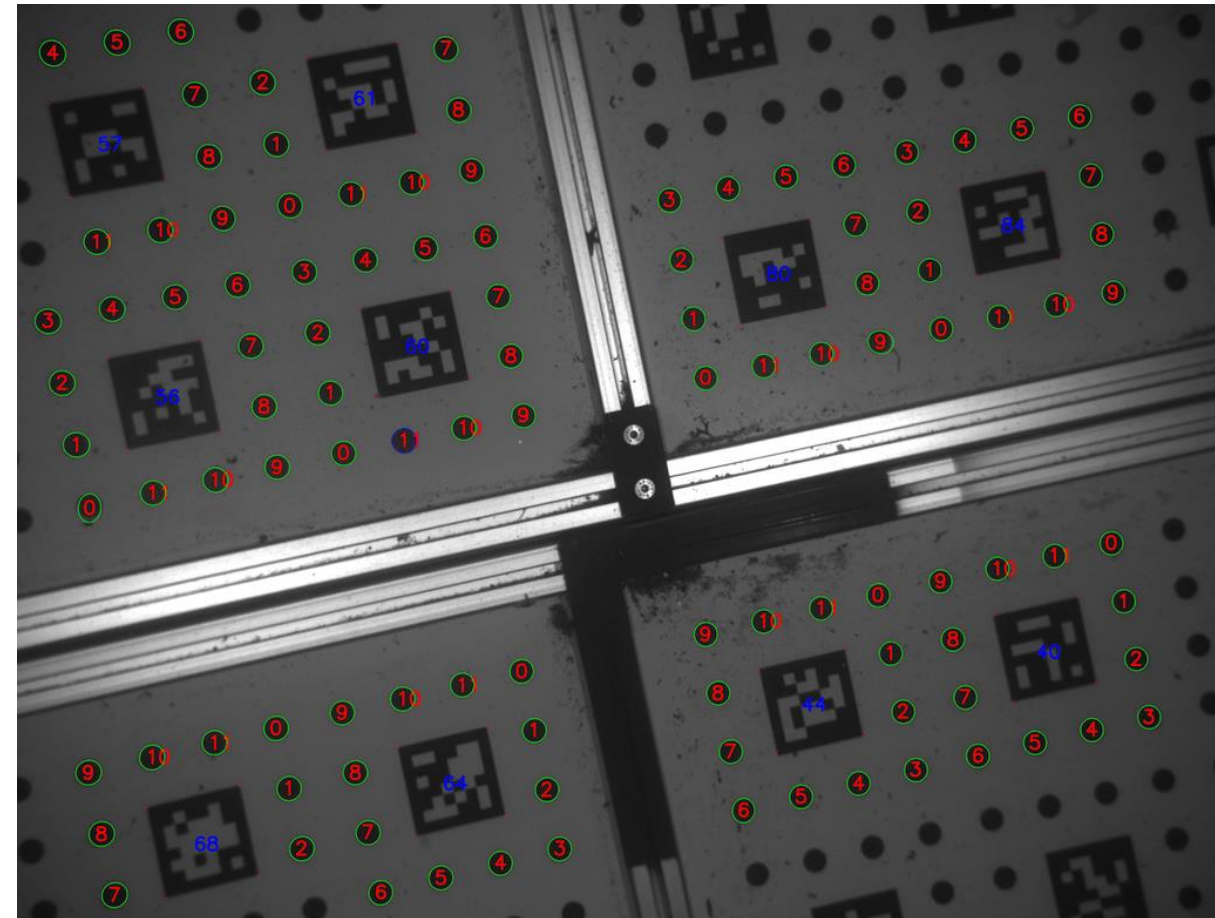


Kalibrierungsmuster und berechnete Kameraposen



Kalibrierung – vor Ort

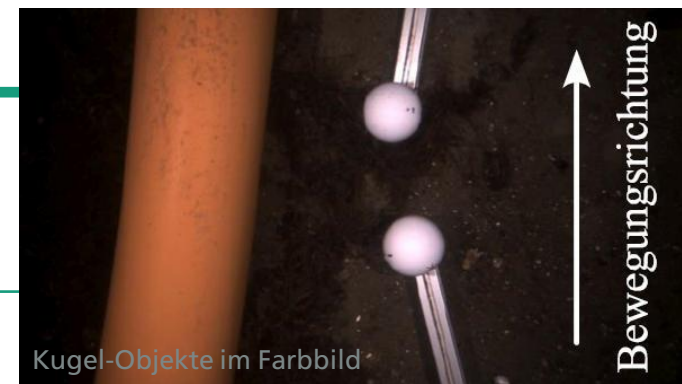
- Ausbringen eines Kalibrieramusters vor Ort
- **Simultane Aufnahme von:**
 - Stereobildpaaren der Messkameras,
 - Farbkameradaten,
 - IMU-Daten
- **Kalibrierung** von inneren & äußeren Parametern aller Kameras, Skalierung, IMU
- **Dauer: ~ 30 Minuten**
- **Unabhängigkeit** von Salzgehalt, Temperatur, Transportbedingung, ...



Kalibriermuster im Unterwassereinsatz

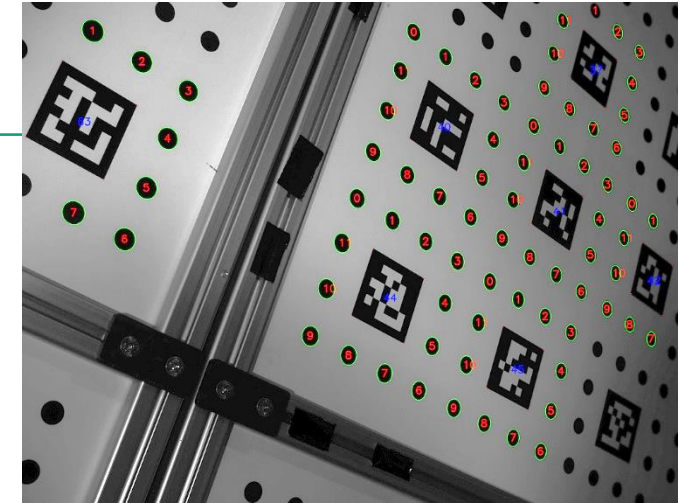
Messen in Bewegung

- **Sensorgeschwindigkeiten** zwischen 0.2 m/s – 1.0 m/s!
- **Bildversatz** zwischen Einzelbildern 1.0 px – 2.5 px
- Zusätzlich: **10 Streifenbilder** pro 3D Bild → Rekonstruktionsfehler
- Visuelle & inertielle Odometrie liefert **Bewegungsrichtung**
 - **Berechnung des Versatzes** im Bildraum der Messkameras
 - **Angepasste, schritthaltende Verschiebung** der Streifenbilder
- **Gute 3D-Rekonstruktionsergebnisse** bei gleichförmiger Sensorbewegung!

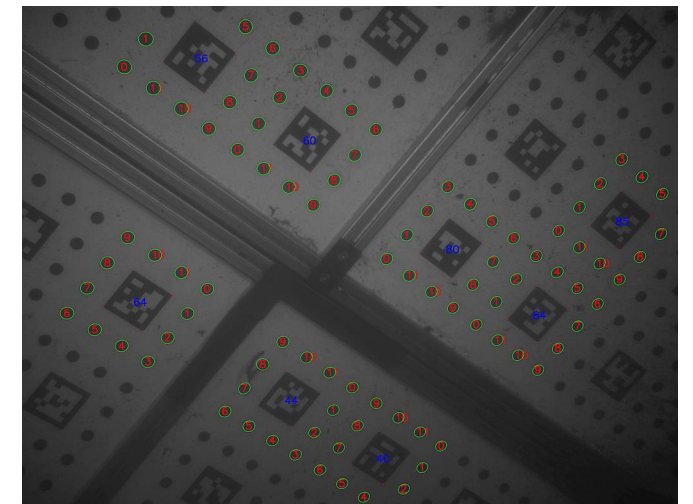


Trübung - turbidity

- Laborsituation „Luft“ \neq Klarwasserbecken \neq Meerwasser!
- Luft \rightarrow Klarwasser: **Absorption**
 - Wellenlängenabhängige signifikante Dämpfung
 - Mehr Licht! + Blaues Licht! (für 3D) + UW-Weißabgleich!
- Klarwasser \rightarrow Meerwasser: **Schwebeteilchen**
 - **Rückstreuung**: Teilchen vor dem Objekt reflektieren Messbeleuchtung zurück zur Kamera
 - **Trübung**: Teilchen verschlechtern Objektabbildung
- Abhilfe: **mehr Licht + Bildverarbeitung!**

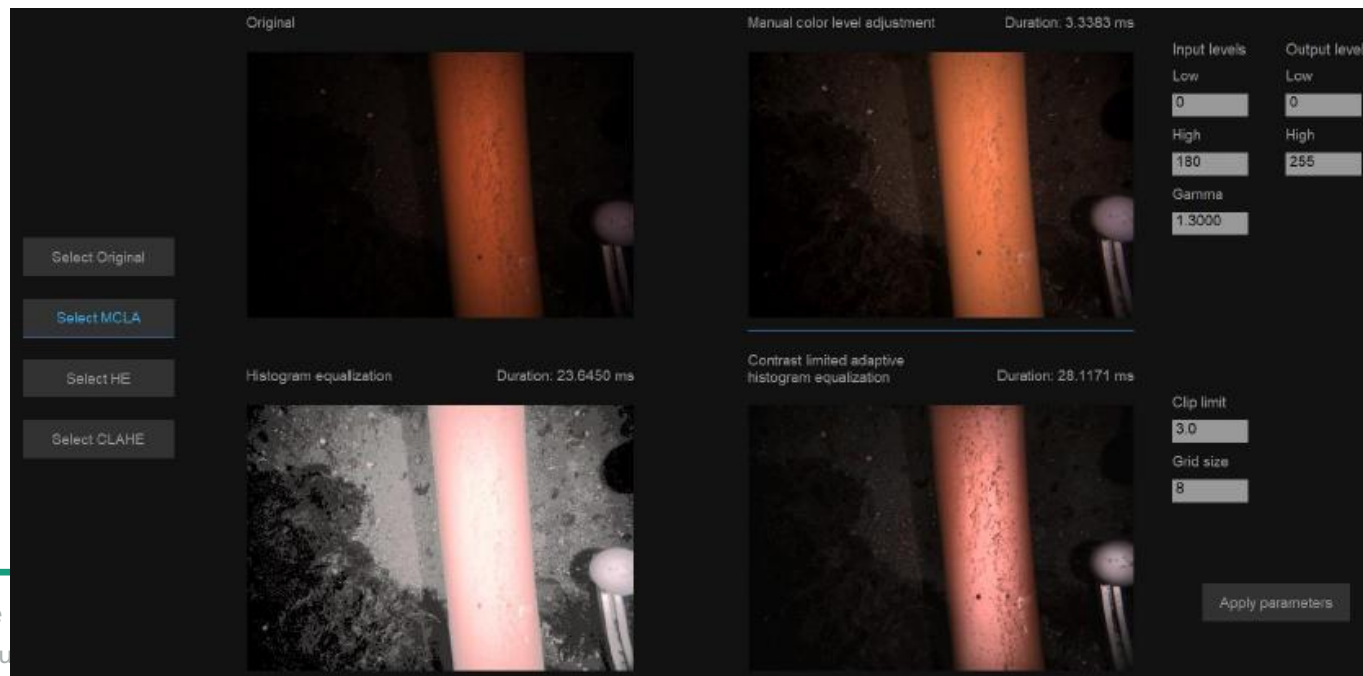


Kalibriermuster an Luft und in Seewasser



Bildverarbeitung zur Kontrastverbesserung

- Aufnahme der Bilder im Rohdatenformat
- Angepasste Gammakurve und Kontrastwertspreizung
- Angepasste Roh- zu Farbbild-Umwandlung
- Echtzeit-Visualisierung zur Operator-Unterstützung:

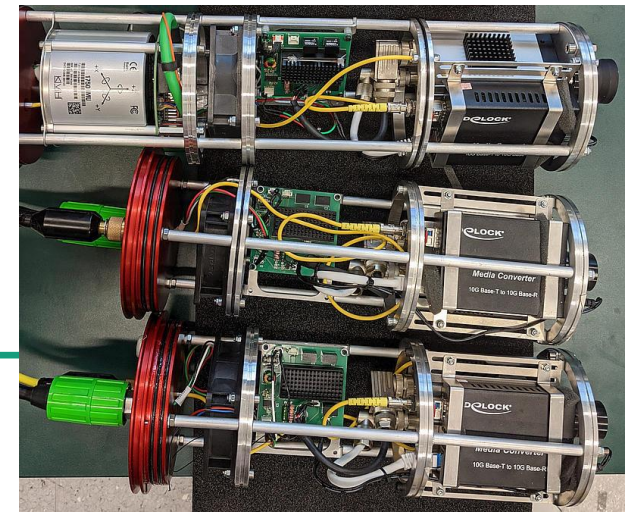
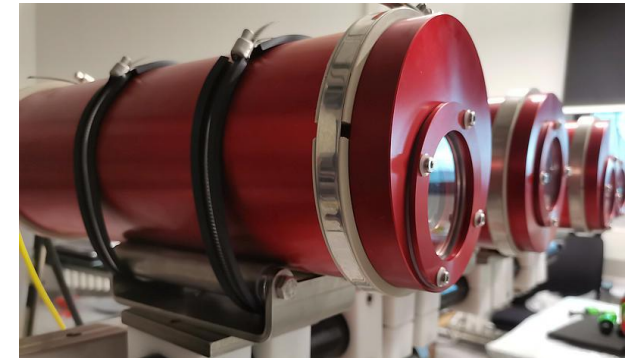


Messszene ohne und mit Kontrastverbesserung



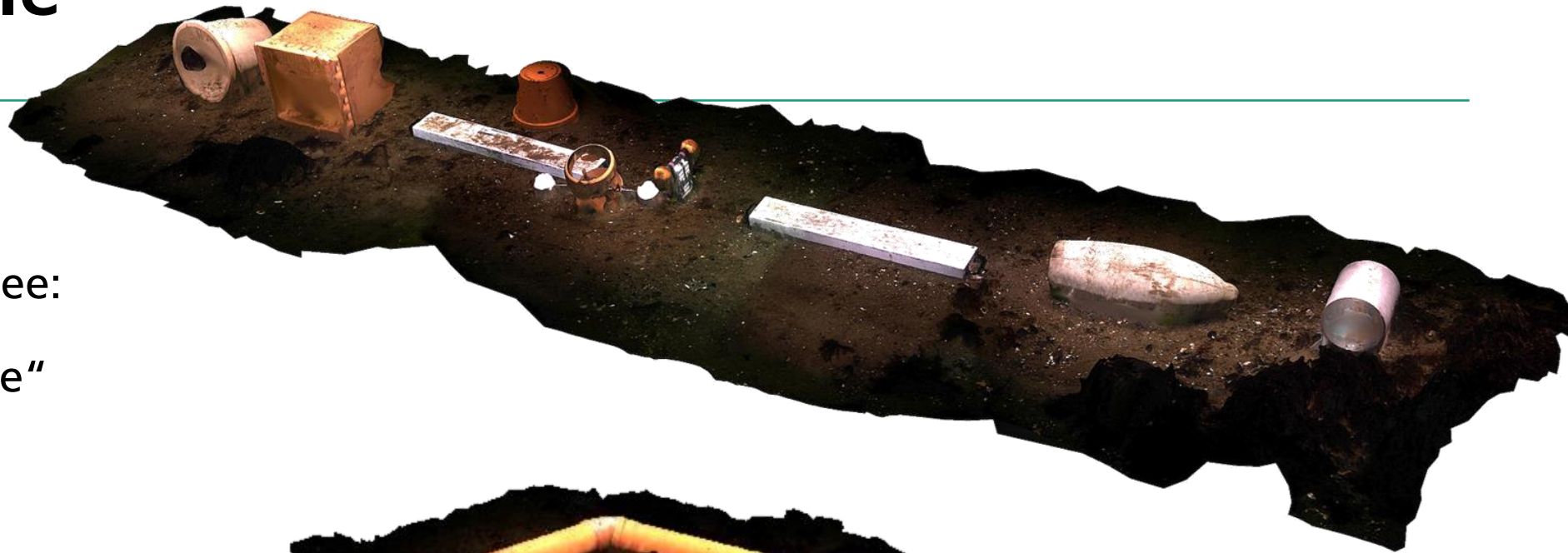
Sonstige Robustheitsaspekte

- 1000 m Tiefe → Druckfestigkeit:
 - Aluminium-Tuben + Saphirglas
 - Spezielle zertifizierte Kabel + Stecker
 - Stickstoff-Füllung → Fehler → Öffnen ...
- Datenübertragung über 1000 m:
 - Lichtwellenleiter: fragil (schon im Labor)
 - Herausforderung: **Dämpfung**
→ über ??? Kupplungen bis zum ROV
- Temperatur: geschlossene Gehäuse!
 - Anbindung an Außenwand!



Messbeispiele

- 2x Teststrecken
- á ~10 m in der Ostsee:
- „Referenzobjekte“
- „Pipeline“



Messbeispiele - Videoimpressionen

- Nasstest des Sensors:
[videos\PXL_20221118_150151125.mp4](#)
- Erfassung der „Referenzobjekte“:
[videos\07_Line_mode1.mp4](#)
- Erfassung der „Pipeline“:
[videos\20_Pipeline_Mode4_lowRes.mp4](#)



Zusammenfassung

Qualitätssicherung komplexer Strukturen unter Wasser

- **Robustheit unter Wasser** umfasst:
 - **Physische Robustheit** → raue Bedingungen
 - **Messfähigkeit** unter ungünstigen Messbedingungen
- **Offshore-Test** erfolgreich absolviert:
 - **Praktikables** Kalibrierverfahren,
 - hohe **Messgenauigkeit** erreichbar,
 - **Bewegungskompensation** erfolgreich implementiert
- **Kombination von Messen in Bewegung...** → große Messbereiche!
 - ... und bei Bedarf **hoher Detailauflösung**
 - ... ohne hohen Zeitaufwand möglich!



Fazit und Ausblick

für zukünftige Aufgaben

- Prinzip der **strukturierten Beleuchtung** ist unter Wasser für **Detail-Rekonstruktion** geeignet
- Visuelle Odometrie liefert ausreichende **Umgebungsdaten in 3D**
- **Miniaturisierung** der realisierten Demonstratoren für praktikable Anwendung wird angestrebt:
 - Gewicht, Maße, Handhabbarkeit
 - Anbindung an Inspection-Class ROV
 - Manuell führbare Systeme für Taucher

