



**CENTER  
OF MARITIME  
TECHNOLOGIES e.V.**

Dynamische Analyse  
der hydroelastischen Eigenschaften  
kabelgebundener Tiefseegeräteträger



# **Dynamische Analyse der hydroelastischen Eigenschaften kabelgebundener Tiefseegeräteträger**

von

G. Clauss und S. Hoog

Technische Universität Berlin

Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet Schiffs- und Meerestechnik

Center of Maritime Technologies e.V.  
Bramfelder Straße 164, 22305 Hamburg

## Zusammenfassung

Die Erschließung der Tiefsee wird technologisch maßgeblich im Zusammenhang mit der Exploration und Exploitation neuer Offshore-Vorkommen durch die Öl- und Gasindustrie vorangetrieben. Eine Schlüsselrolle fällt dabei den unbemannten Unterwasser-Fahrzeugen (*Unmanned Underwater Vehicles UUV*) zu, wozu neben den *Autonomous Underwater Vehicles (AUV)* auch die *Remotely Operated Vehicles (ROV)* gehören. Letztere werden seit ca. 30 Jahren in der Tiefe der Meere eingesetzt und haben sich seitdem zu einer zuverlässigen Standard-Technologie für alle Bereiche der Offshore- und Meeresforschungstechnik entwickelt. Begleitet wird die Praxis durch zahlreiche theoretische Untersuchungen sowie Modell- und Großversuche zu Fragen der Statik und Dynamik kabelgebundener Systeme. Die Gesamtsysteme bestehen zumeist aus einer Einsatzplattform (Schiff, Kranbarge oder Halbtaucher), einem Multifunktionskabel (*umbilical*) und dem angehängten Geräteträger (ROV, Schleppfisch usw.). Ein Vertreter dieser Geräteklasse ist mit dem MODUS (*MOBILE DOCKER FOR UNDERWATER SCIENCES*) an der TU Berlin im Einsatz. Er ermöglicht das Absetzen und Bergen schwerer Forschungsstationen in der Tiefsee und erlaubt kontrollierte Einsätze bis in 4.000 m Wassertiefe.

Als systemimmanentes dynamisches Problem erweist sich die direkte Kopplung der Tauch- und Stampfbewegungen des Einsatzfahrzeugs mit dem am Kabel hängenden vertikal gebundenen oder geschleppten Geräteträger. Durch die Übertragung der durch die Wellen induzierten Bewegungen des Einsatzfahrzeugs sowie weiterer hydroelastischer Effekte über das *umbilical* werden vertikale Oszillationen des Geräteträgers induziert, die dessen dynamisches Verhalten und die Stabilität im Einsatz negativ beeinflussen können: Infolge hoher Trägheits- und Widerstandskräfte können die getauchten Systemkomponenten bei ungünstiger Bewegungscharakteristik den vertikalen Oszillationen des Kabels nicht direkt folgen, was zu den gefürchteten *slack-cable* Situationen führen kann. Während dieser kurzen Momente reduziert sich die Kabellängsspannung auf Null, und die Bewegungen des Einsatzfahrzeugs und des getauchten Systems sind entkoppelt. Die im nächsten Moment abrupt einsetzende Straffung des Kabels führt zu gefährlich hohen Kraftspitzen (*snap loads*) am oberen Kabelaufhängepunkt und störenden Taumelbewegungen des Geräteträgers, wobei irreguläre Oszillationen mit unterschiedlichen Amplituden, Frequenzen und Phasen auftreten. Die dynamische Charakteristik des Systems hängt dabei entscheidend von den geometrischen Eigenschaften des Geräteträgers sowie den operativen Bedingungen ab, die folglich zu den wichtigsten Entwurfsaspekten gehören.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens werden Modell- und Großversuche mit dem exemplarischen Geräteträger MODUS durchgeführt, wobei sowohl die Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten als auch der Kräfte und Beschleunigungen am oberen und unteren Kabelende während der Transits vom Einsatzschiff zum Meeresgrund und zurück im Vordergrund stehen. Zu diesem Zweck wurde ein Konzept sowie ein Prototyp-System einer Datenerfassung erstellt und in

Feldeinsätzen mit ebenfalls neu entwickelten Mess-Sensoren getestet. Die erzielten Ergebnisse wurden in einer neu entwickelten Datenbankanwendung gespeichert. Parallel erstellte *Computational Fluid Dynamics* (CFD)-Simulationen berücksichtigen viskose Effekte und liefern Aussagen über Strukturwiderstand und Nachstromfelder für die relevanten Fahrtrichtungen. Die Resultate dienen im weiteren der Bestätigung von Software zur dynamischen Bewegungssimulation, die an der TU Berlin entwickelt wurde. Diese berücksichtigt hydroelastische Aspekte, Strömung und irreguläre Seegänge und erlaubt die Auswertung im Frequenz- und Zeitbereich.

Auch wenn die Entwicklungen noch nicht serienreif sind, können die Ergebnisse des Vorhabens Entwerfern und Konstrukteuren von ROVs, Winden oder Seegangskompensationseinrichtungen wertvolle Hinweise liefern.

Das Forschungsvorhaben wurde dankenswerterweise vom  
**Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit** über die  
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V.  
unter der AIF-Nr. 13273 N gefördert.

## Abstract

The conquering of deepwater – or inner space – is technologically mainly driven by exploration and exploitation activities of the offshore Oil and Gas industry. Key tools permitting and supporting these interventions are Unmanned Underwater Vehicles (UUV) comprising both Autonomous Underwater Vehicles (AUV) and Remotely Operated Vehicles (ROV). Consequently, during the last 30 years standard ROV technology evolved to a reliable everyday tool, used in all fields of oceanographic engineering. This growing ROV market initiated numerous theoretical investigations and sea trials covering the entire scheme of static and dynamic problems during operation. Vertically tethered as well as towed body systems are characterized by hydroelastic effects, influencing the safe and reliable overall performance. These systems consist, in general, of an operating vessel, a tether, umbilical or towing cable and the suspended or towed sensor carrier, respectively. The tether or umbilical connecting the ship with the submerged sensor carrier enables the system to stay underwater almost without time restrictions. An exemplary shuttle system for the inner space is available at the Technical University of Berlin for project operations and full-scale tests down to 4000 m water depth. The so-called MODUS (**MO**bile **D**ocker for **U**nderwater **S**ciences) is a versatile ‘workhorse’, able to deploy and recover various sea bottom stations and support deep sea missions like exact sampling or extended video survey. The system offers a wide spectrum of activities, fully controlled by the operator on board the ship.

Although many times approved, cable tethered sensor carriers not buoyancy balanced, like tow-fish, caged ROVs or MODUS, suffer from a system immanent problem, resulting from the coupling of wave induced heave and pitch ship motions with subsequent vertical oscillations of the suspended carrier due to the transmission of these motions along the free hanging submarine umbilical. Basically, the dynamic behavior and stability of the submerged carrier is a key design aspect, dealing with the prediction of critical operation conditions and the definition of system downtimes. Consequently, investigations focus on the determination of response amplitude amplifications of vertical motions and loads, depending on geometric configurations, as well as operational and environmental conditions: Due to high inertia and drag forces the descended components may not follow the umbilical oscillations, resulting in harmful slack cable situations. During these short moments the cable tension decreases to zero and the motions of the ship and the submerged structure are decoupled. Subsequent large snap loads and erratic motions of the sensor carrier may occur due to independent oscillations with different amplitude and phase of the upper cable suspension point and the descended module.

The presented project carried out model tests and full-scale experiments with the exemplary deep sea shuttle MODUS, determining hydrodynamic coefficients as well as vertical forces and accelerations at the suspension point and at the lower cable end during transit from sea surface to sea bottom and vice versa. For this purpose, a

suitable data acquisition concept and prototype configuration has been developed and field tested with several new build measuring units for the relevant physical parameters. All data have been stored in a new built data base software. Simulations with methods of CFD (Computational Fluid Dynamics) have been performed, considering viscous effects and delivering drag coefficients and wake fields for vertical and horizontal structure motions. Results of these investigations verify and validate results obtained by dynamic simulation software developed in-house, considering nonlinear hydroelastic cable dynamics, current and irregular sea states in frequency and time domain.

The achievements provide relevant information for future downtime predictions of umbilical tethered carriers as well as for the development of winches and active heave compensation systems.

## **Inhaltsverzeichnis**

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                                     | <b>1</b>  |
| 1.1      | Problemstellung                                       | 3         |
| 1.2      | Das Problem der Dynamik                               | 3         |
| 1.3      | Der Geräteträger MODUS                                | 5         |
| <b>2</b> | <b>Zielsetzung und Durchführung des Vorhabens</b>     | <b>8</b>  |
| <b>3</b> | <b>Erzielte Ergebnisse</b>                            | <b>11</b> |
| 3.1      | Numerische Modellierungen und Simulationen            | 11        |
| 3.1.1    | CFD-Simulationen                                      | 11        |
| 3.1.2    | Hydroelastische Simulationen                          | 12        |
| 3.2      | Tankversuche  | 14        |
| 3.2.1    | Schwingversuche                                       | 14        |
| 3.2.2    | Widerstandsversuche                                   | 18        |
| 3.3      | Meßsystem   | 21        |
| 3.3.1    | Konzept   | 21        |
| 3.3.2    | Messdatenerfassung                                    | 23        |
| 3.3.3    | Datenbank   | 26        |
| 3.4      | Feldversuche  | 26        |
| 3.4.1    | Tauchkonfigurationen                                  | 27        |
| 3.4.2    | Registrierungen                                       | 28        |
| <b>4</b> | <b>Gegenüberstellung der Ziele und Ergebnisse</b>     | <b>33</b> |
| <b>5</b> | <b>Umsetzung und Nutzung der Forschungsergebnisse</b> | <b>34</b> |
| <b>6</b> | <b>Literatur</b>                                      | <b>37</b> |



# 1 Einführung

Die moderne Meeresforschungstechnik setzt neben den bekannten und bewährten Landersystemen (Tengberg et al. [11], Priede [10], Linke und Pfannkuche [7]) auch aktive kabelgebundene Tiefseeeräteträger ein, um komplexe, gezielte Aufgaben in der Tiefsee auszuführen. Hierzu gehören Bodenprobennahmegeräte (sogenannte *Piston-Corer*), CTD-Meßsonden (*Conductivity, Temperature, Depth*), Rosetten zur Wasserprobennahme, Sonar-Schleppsonden (sogenannte Schleppfische) sowie zunehmend auch die aus der Offshore Öl- und Gasindustrie bekannten *Remotely Operated Vehicles* (ROV) (Pearl und Winegarden [9]). Die multidisziplinären Aufgaben reichen vom videogestützten Suchen und Beobachten über alle Arten der Probennahme und Analyse unter *in situ* Bedingungen bis hin zum exakten Absetzen und Bergen schwerer Beobachtungs-, Analyse- und Beprobungsstationen auf definierten Positionen auf dem Meeresgrund. Das Gesamtsystem besteht zumeist aus den Komponenten Forschungsschiff mit A-Rahmen, Winde, Multifunktionskabel, ROV (allgemeiner Tiefseeeräteträger) gegebenenfalls im Einsatz mit einer Bodenstation, einer Sonde oder einem Probennahmegerät. Das sichere Betriebsverhalten während der mehrstündigen Taucheinsätze hängt dabei wesentlich vom Seegangsverhalten des verwendeten Forschungsschiffes sowie vom resultierenden axialen Schwingungsverhalten des Systems Multifunktionskabel - Tiefseeeräteträger und Bodenstation ab. Aufgrund lateraler Strömungen können wegen pulsierender Ablösungserscheinungen am Kabel ebenfalls störende Schwingungsformen am Kabelende auftreten. Abb. 1 verdeutlicht das Transitprinzip und die wichtigsten Einflussgrößen für kabelgebundene Systeme.

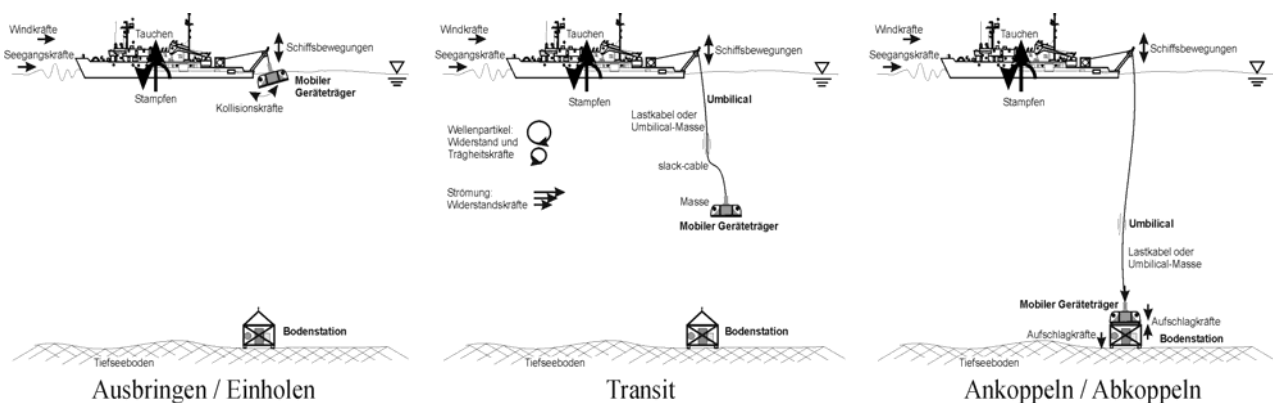


Abb. 1: Einsatzphasen eines Tiefseeeräteträgers bei Annäherung an eine Bodenstation: Ausbringen/Einholen(links), Transit (Mitte) und Abkoppeln bzw. Ankoppeln und Anheben der Nutzlast (rechts)

Oft werden die verwendeten Multifunktionskabel zur Steuerung der Sensoren, Kameras, Scheinwerfer, Antriebsmotore oder Greifarme als sogenannte *umbilicals* ausgelegt (Abb. 2).



Abb. 2:

*Schnitt durch das „umbilical“ des Geräteträgers MODUS, Durchmesser 0,254 m (1 Zoll), Masse 2,276 kg/m (links) und eine Auswahl weiterer „umbilicals“ (nicht maßstabgetreu)*

Der große Vorteil eines *umbilicals* ist, dass neben der Lastaufnahme auch die ununterbrochene Energieversorgung der Unterwassersysteme sowie die kontinuierliche bidirektionale Video- und Datenübermittlung zum Tiefseegeräteträger gesichert ist. Somit sind die kabelgebundenen Geräteträger besonders für den kostengünstigen ferngesteuerten Einsatz in der Tiefsee geeignet.

Folgende wissenschaftliche und wirtschaftliche Themengebiete lassen sich durch bestehende sowie für die Zukunft denkbare kabelgebundene (Schwerlast-) Geräteträger für die Tiefsee erschließen:

Geowissenschaften und Ozeanographie:

- Messung des Sedimentationsaufkommens,
- Messung der magnetischen Feldstärke,
- Messung der Meeresströmungen, Dichte, Temperaturschichtungen,
- Messung seismischer Aktivitäten.

Umweltforschung und Umwelttechnik:

- Schadstoffmessungen,
- Ermittlung ökologischer Störungen,
- Messung von Temperatur und Wasserzusammensetzung,
- Messung von Dichte und Sichtbarkeit,
- Langzeitüberwachung der Wasserqualität in der Nähe von Ölfördergebieten.

Bergungsbranche:

- Ortung und detaillierte Erkundung von Wracks,
- Bergung kleinerer Objekte oder Befestigung von Hebezeug an großen Objekten.

Marine Rohstoffindustrie:

- seismische Exploration von Öl- und Gasvorkommen,
- Langzeitbegutachtung möglicher Standorte von Offshorebauwerken,
- Exploration von biotechnologisch interessanten Tiefseeorganismen.

## 1.1 Problemstellung

Der kontrollierte und sichere Einsatz kabelgebundener Tiefseeeräteträger - besonders für schwere Lasten - ist bisher aus technologischen wie werkstofftechnischen Gründen je nach Einsatzprofil auf Tiefen von 4.000 m bis ca. 6.000 m bei ruhigem oder leichtem Seegang begrenzt. Beim Entwurf von kabelgebundenen Tiefseeeräteträgern muss zudem die Dynamik im Betrieb berücksichtigt und durch entsprechende bauliche und operative Maßnahmen beeinflusst werden. Dies ist unverzichtbar, weil es das Ziel sein sollte, die Einsatzgrenzen der Systeme - bezogen auf den Seegang - zu erweitern, um deren operative Effektivität zu erhöhen.

Die optimale Nutzbarkeit des kabelgebundenen Systems hängt unter anderem vom Grad der axialen Schwingungsbelastung des Multifunktionskabels während der Tauchfahrten ab. Hierzu gehören u. a. auch grundlegende Kenntnisse über die dynamischen Systemparameter. Modellversuche ermöglichen erste Abschätzungen, während numerische Simulationen der Bewegungsübertragung vom Schiff auf das getauchte System in Amplitude und Phase eingehender Validationen bedürfen. Die tatsächlichen Auswirkungen bestimmter Einsatzkonfigurationen auf Kräfte und Bewegungen an den Kabelaufhängenpunkten können jedoch nur am Prototypen validiert werden, da sich schwer abschätzbare Maßstabeffekte bei Modellversuchen sowie unpassende Parametereinstellungen bei Simulationen auf die Gültigkeit und Genauigkeit der Ergebnisse auswirken.

## 1.2 Das Problem der Dynamik

Als Hauptproblem der Dynamik des Systems erweist sich die direkte Kopplung der Tauch- und Stampfbewegungen des Einsatzfahrzeugs mit dem am Kabel hängenden Geräteträger. Durch die Übertragung der durch die Wellen induzierten Bewegungen des Einsatzfahrzeugs auf das *umbilical* werden vertikale Oszillationen des Geräteträgers induziert, die dessen dynamisches Verhalten und die Stabilität im Einsatz negativ beeinflussen können. Die dynamische Charakteristik des Systems hängt dabei entscheidend von den geometrischen Eigenschaften des Geräteträgers sowie den operativen Bedingungen ab. Infolge hoher Trägheits- und Widerstandskräfte können die getauchten Systemkomponenten bei ungünstiger Bewegungscharakteristik den vertikalen Oszillationen des Kabels nicht folgen, was zu den gefürchteten *slack-*

*slack* Situationen führen kann (Abb. 3). Während dieser kurzen Momente reduziert sich die Kabellängsspannung auf Null, und die Bewegungen des Einsatzfahrzeugs und des getauchten Systems sind entkoppelt. Die im nächsten Moment abrupt einsetzende Straffung des Kabels führt anschließend zu gefährlich hohen Kraftspitzen (*snap loads*) am oberen Kabelaufhängepunkt und zu störenden Taumelbewegungen des Geräteträgers, wobei irreguläre Oszillationen mit unterschiedlichen Amplituden, Frequenzen und Phasen auftreten. Simulationen im Zeitbereich, die nichtlineare Aspekte der Kabeldynamik sowie Queranströmung und irregulären Seegang berücksichtigen, bestätigen diese Beobachtungen und erlauben Rückschlüsse auf zu erwartende Systemausfallzeiten (*downtime*).

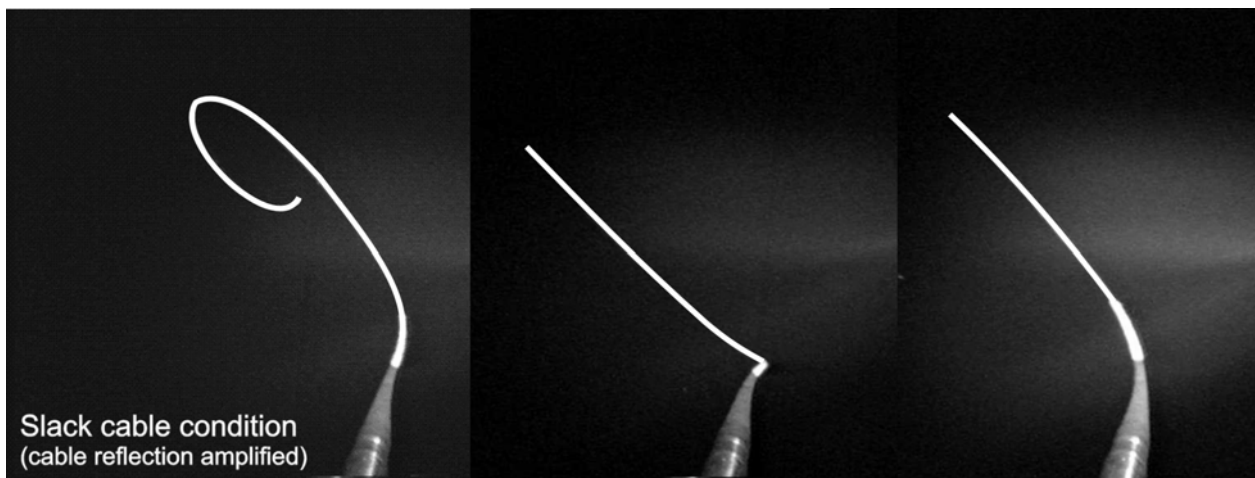


Abb. 3: Entwicklung einer „slack-cable“ Situation am MODUS-„umbilical“ (Kabelreflexion verstärkt dargestellt)

Konzeption, Bau und Einsatz solcher kabelgeführter Trägersysteme für die Tiefsee verlangt demnach die größtmögliche Kenntnis der zu erwartenden Einsatzparameter und der daraus zu erwartenden Lasten auf das System, um qualitativ hochwertige und effiziente Tauchgänge durchführen und kostspielige Schiffszeiten optimieren zu können.

Im folgenden wird ein Überblick über den beispielhaften Geräteträger MODUS (*MO*bile *D*ocker for *U*nderwater *S*ciences) gegeben, der von der Gruppe Tiefseetechnik der TU Berlin und TFH Berlin betrieben wird. MODUS konnte im Rahmen des hier vorgestellten Vorhabens zu Tests und realen Einsätzen im Dienste der Meereresforschung eingesetzt werden und ist folglich elementar für das Verständnis der gesamten Problematik.

### 1.3 Der Geräteträger MODUS

Als Ergebnis des EU-Projektes GEOSTAR 1 (*GEophysical and Oceanographic STation for Abyssal Research*) [3] wurde am damaligen Institut für Schiffs- und Meerestechnik der TU Berlin sowie am Fachbereich VIII der TFH Berlin als deutscher Beitrag der Spezial-ROV MODUS erstellt. Dieser erste Prototyp (Version GEO1) diente der Bestätigung technischer Detaillösungen sowie der Gesamtstrategie zum Absetzen und Bergen schwerer Stationen im Meer. Als Weiterentwicklung dieses Dockers, der für eine Tauchtiefe bis 200 m ausgelegt ist, entstand im Folgeprojekt GEOSTAR 2 die Version GEO2, die bei identischem Grundkonzept zum Einsatz bis in 4.000 m Tiefe geeignet ist. Neben der Heraufsetzung der Tauchtiefe durch geeignete Werkstoffe flossen zahlreiche Detailverbesserungen z.B. im Bereich der Hydrodynamik, der Steuerbarkeit und der Sensortechnik in die neue Version ein. Aus der besonderen Einsatzumgebung resultieren zudem viele der speziell für die Tiefsee ausgelegten Aggregate wie Sonar, Altimeter, Kompass, Kameras, Scheinwerfer, Titan-Druckboxen für die Elektronik und druckfeste Verkabelungen.



*Abb. 4: Der MODUS Prototyp für Flachwasser (Version GEO1), MODUS für Tiefwasser im CAD-Schnittbild sowie als Prototyp (beide Version GEO2), alle mit Bodenstationen*

Abb. 4 zeigt (von links nach rechts) die MODUS-Version GEO1 gekoppelt mit einer Station, das CAD-Schnittbild von MODUS (Version GEO2) beim Andocken an eine Station sowie den MODUS Prototyp (Version GEO2) gekoppelt mit der GEOSTAR 2 Station, nach deren Bergung aus 2.000 m Wassertiefe nach sieben Einsatzmonaten.

Aufgabe der verschiedenen Bodenstationen ist u. a. die autonome Registrierung der geophysikalischen und ozeanographischen Begleitumstände von Erdplattenbewegungen, wie dies von Beranzoli et al. [1] beschrieben wird. Die zu diesem Zweck mit zahlreichen Sensoren ausgestatteten Stationen sind batteriegepuffert für Langzeit-

einsätze bis zu einem Jahr gerüstet. Das Konzept zum Absetzen und Bergen mit MODUS konnte bereits mehrfach in Projekten wie GEOSTAR 1 und 2, GNDT<sup>1</sup>, ORION<sup>2</sup> und BIODEEP<sup>3</sup> in Seegebieten rund um Italien überprüft werden, so dass es heute als voll tauglich bestätigt gilt. Tabelle 1 fasst alle relevanten Informationen der Großgeräte und Modelle zusammen.

*Tabelle 1: Hauptmerkmale von F/S Urania, MODUS, beispielhaften Nutzlastmodulen, Modellen und dem „umbilical“*

| <b>Forschungsschiff (F/S) Urania</b>             |                           |                       |                |   |  |
|--|---------------------------|-----------------------|----------------|---|--|
| Gesamtlänge L <sub>OA</sub> [m]                  |                           | 61,30                 |                |   |  |
| Länge zwischen den Loten L <sub>PP</sub> [m]     |                           | 52,50                 |                |   |  |
| Breite B [m]                                     |                           | 11,10                 |                |   |  |
| Seitenhöhe D [m]                                 |                           | 5,30                  |                |   |  |
| Entwurfstiefgang T [m]                           |                           | 3,60                  |                |   |  |
| Verdrängung [t]                                  |                           | 1115                  |                |   |  |
| <b>MODUS-Umbilical</b>                           |                           |                       |                |   |  |
| Maximale Einsatztiefe [m]                        |                           | 4000                  |                |   |  |
| Durchmesser [m]                                  |                           | 0,0254                |                |   |  |
| Bruchlast [kN]                                   |                           | 378                   |                |   |  |
| Arbeitslast [kN]                                 |                           | 89                    |                |   |  |
| Dehnsteifigkeit EA [N]                           |                           | 25*10 <sup>6</sup>    |                |   |  |
| Masse pro Meter [kg/m]                           |                           | 2,276                 |                |   |  |
| Gewicht pro Meter in Wasser [N/m]                |                           | 18,3                  |                |   |  |
| Anzahl Glasfaserleitungen                        |                           | 3                     |                |   |  |
| Anzahl Spannungsleitungen (für 3000 V)           |                           | 3                     |                |   |  |
| <b>MODUS, Prototyp und Modelle</b>               |                           |                       |                |   |  |
| Bezeichnung                                      | Masse m <sub>0</sub> [kg] | Gewicht in Wasser [N] | L/B/H [m]      | Sensoren  | Kommunikation  |
| MODUS Prototyp (GEO2) (für Tiefwasser < 4.000 m) | 1090                      | 7350                  | 2,88/2,35/1,02 | 4 x horizontale Schubmotoren, 360° Sonar, 325 kHz Altimeter, LF Transponder, 4 x Scheinwerfer, TV-Kameras (wahlweise Farbe, s/w und Zoom), Kompass (analog + elektronisch), Neigungssensor, Accelerometer, Absolutdrucksensor, Lastsensor | Online-Datenübertragung während der Einsätze; Telemetrie über drei single-mode Glasfaserleitungen: 7 x RS232, 2 x RS422, duplex bzw. voll-duplex, max. 115 kBit s <sup>-1</sup><br>1 x TTL, 4x PAL Video |
| MODUS Prototyp (GEO1) für Flachwasser < 200 m    | 954                       | 7338                  | 2,95/2,75/2,03 | 2 x horizontale Schubmotoren, 4 x Scheinwerfer, 2 x TV-Kameras (wahlweise Farbe, s/w), Kompass (analog + elektronisch), Neigungssensor, Absolutdrucksensor  | Online-Datenübertragung während der Einsätze; Telemetrie über multi-mode Glasfaserleitungen: 3 x RS232, voll-duplex, max. 115 kBit s <sup>-1</sup><br>1 x TTL, 2 x PAL Video                             |
| MODUS (GEO2) Modell M1:3                         | 40,50                     | 28,50                 | 0,96/0,78/0,34 | -   | -  |
| MODUS (GEO2) Modell M1:5                         | 8,50                      | 57,40                 | 0,57/0,46/0,20 | Lastsensor  | -  |

<sup>1</sup> GNDT = Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, nationales italienisches Projekt

<sup>2</sup> ORION = Ocean Research by Integrated Observation Networks, gefördert durch die EU, EVK3-CT-2001-67

<sup>3</sup> BIODEEP = BIOTEchnology from the DEEP, gefördert durch die EU, EVK3-CT-2000-42

*Tabelle 1 (Fortsetzung):  
Hauptmerkmale von beispielhaften Nutzlastmodulen, Prototypen und Modellen*

| <b>Nutzlastmodule, Prototypen und Modell</b> |                              |                          |                |  |  |
|--|------------------------------|--------------------------|----------------|--|--|
| Bezeichnung                                  | Masse<br>m <sub>0</sub> [kg] | Gewicht in<br>Wasser [N] | L/B/H [m]      | Sensoren   | Kommunikation  |
| Teststation<br>Prototyp                      | 1433                         | 8201                     | 3,50/3,50/2,90 | -  | -  |
| Teststation<br>Modell M1:5                   | 11,20                        | 64                       | 0,70/0,70/0,58 | -  | -  |
| GNDT-SN1                                     | 1433                         | 8201                     | 3,50/3,50/2,90 | Seismometer, Hydrophon,<br>Schwerkraftmesser, CTD,<br>Strömungsmesser, Altimeter,<br>Echolot   | Redundante Kommuni-<br>kationskanäle während<br>Absetzen, Datenspeicher<br>im autonomen Langzeit-<br>betrieb                                       |
| ORION-N2                                     | 1657                         | 9751                     | 3,50/3,50/2,90 | wie GNDT-SN1   | wie GNDT-SN1 plus hori-<br>zontalem Akustik-Modem  |
| GEOSTAR 2<br>=<br>ORION-N1                   | 2771                         | 13479                    | 3,50/3,50/2,90 | wie GNDT-SN1 plus Magneto-<br>meter (skalar, vektoriell),<br>Transmissiometer, Wasser-<br>proben, elektro-chemisches<br>Analysepaket, 300 kHz ADCP | wie GNDT-SN1 plus nahe-<br>zu Echtzeitkommunikation<br>über vertikales Akustik-<br>Modem und verankerte<br>Boje sowie Satelliteninfra-<br>struktur |
| BIODEEP<br>SCIPACK                           | 350                          | 2000                     | 1,10/1,10/1,52 | Wasserprobennamerosette<br>(verschiedene Flaschen-<br>volumen), CTD, Farbkamera,<br>Scheinwerfer, Altimeter,<br>Kompass                            | Kommunikation und<br>Kontrolle über sekundäres<br>umbilical mit twisted-pair -<br>Verbindung   |

## 2 Zielsetzung und Durchführung des Vorhabens

Die Ziele des Forschungsvorhabens lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Aufbau eines validierten numerischen Modells zur Analyse des hydroelastischen Verhaltens des Gesamtsystems aus Seegang-Schiff-Winde-Umbilical-Tiefseeeräteträger mit/ohne Bodenstation nach dem Motto: ein Geräteträger für viele Bodenstationen.
- Zur Validierung: Aufbau eines Messprogramms als Plattform zur systematischen, zeitkongruenten Registrierung der tatsächlich vorherrschenden Bewegungen und Kräfte am existierenden Prototyp eines aktiven Tiefseeeräteträgers im Tiefseeinsatz sowie
- Mitfahrt bei Tiefseeinsätzen von Tiefseeeräteträgern und Registrierung der Einsatzparameter und Lasten.
- Aufbau einer Ergebnisdatenbank (EDB) für die Bereitstellung von Validationsgrößen für den Entwurf von kabelgebundenen Tiefseesystemen, numerischen Simulationswerkzeugen und computergestützten Windensteuerungen mit dem Ziel:
- der Optimierung der Entwurfsgrößen eines Tiefseeeräteträgers wie Masse, hydrodynamische Masse, Schwerpunktlage usw. sowie von Betriebsparametern wie Seegang, Schiffsausrichtung zur Wellenfront, Strömungstiefenprofil, Windengeschwindigkeit usw. im Modell und im Seetest.

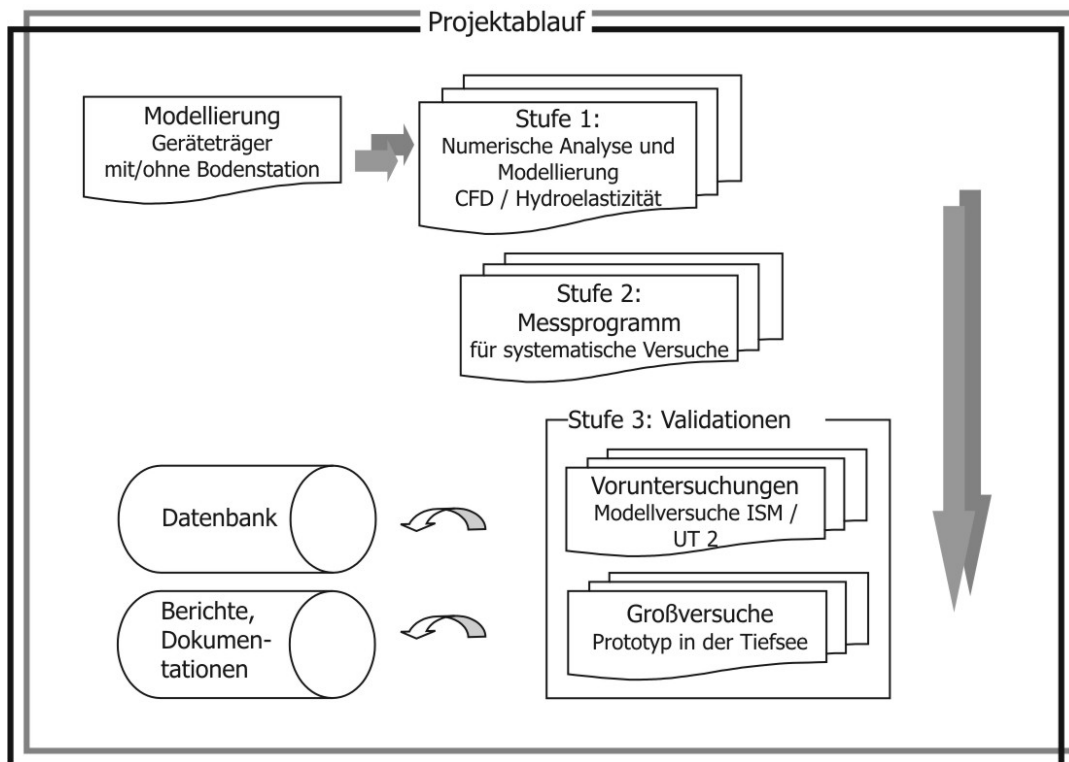


Abb. 5: Ablauf des Forschungsvorhabens



Das Forschungsvorhaben wurde in drei Stufen durchgeführt (Abb. 5):

Stufe 1: Numerische Modellierung und Analyse

Hauptziel ist die Entwicklung eines validierten numerischen Modells für die Auslegung und Optimierung von kabelgebundenen Tiefseeeräteträgern. Hierzu werden numerische Untersuchungen der hydrodynamischen und hydroelastischen Eigenschaften des Systems Schiff - Winde - *umbilical* - Tiefseeeräteträger mit und ohne Bodenstation unter Variation von geometrischen Parametern und Umweltparametern benötigt. Durch die hydrodynamischen Untersuchungen wird für geometrische Variationen von Geräteträger und Bodenstation der Gesamtwiderstand (aus Reibungs- und Druckwiderstand) bestimmt. Zudem wird der Widerstandsanteil des *umbilicals* in der Gesamtbilanz mit berücksichtigt. Die hydroelastischen Untersuchungen basieren auf den zuvor ermittelten Widerstandskräften der getauchten Strukturen und sollen Aufschluss über Horizontalauslenkungen bei verschiedenen Tiefenströmungen sowie den vertikalen Eigenschwingungen des Systems bei verschiedenen regulären und irregulären Seegängen liefern. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Anstieg der hydrodynamischen Masse bei Annäherung an den Ozeanboden. Die Gültigkeit des numerischen Modells wird anschließend durch Beispielrechnungen und die in Stufe 3 folgende Validierung nachgewiesen.

Stufe 2: Messprogramm

Entwicklung eines Messprogramms für systematische experimentelle Untersuchungen und damit Schaffung einer Plattform zur Validation der numerischen Ergebnisse. Das Messprogramm wird mit FORTRAN 90 und vorhandener Software für Steuerungsoberflächen (HP Vee oder LabView) unter Windows erstellt. Somit ergibt sich hier ein Synergieeffekt, der die Integration des Messprogramms in vorhandene Programmstrukturen ermöglicht. Durch standardisierte Schnittstellen wird die spätere Erweiterung des Programms und dessen Einbindung in andere Programmsysteme erleichtert.

Stufe 3: Validierung:

- a) Modelluntersuchungen der stationären hydrodynamischen sowie instationären, hydroelastischen Eigenschaften eines Tiefseeeräteträgers im Tiefwassertank der Forschungsstelle und im großen Umlauftank UT 2 der Zentraleinrichtung Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau (ZE VWS) der TU Berlin.
- b) Versuche mit dem Prototyp des aktiven Tiefseeeräteträgers MODUS im UT 2 der ZE VWS der TU Berlin und Registrierung der im Tiefseeinsatz tatsächlich vorherrschenden hydroelastischen Größen unter Berücksichtigung der Umweltparameter Wind, Seegang und Tiefenströmung.

Die Ergebnisse sollen zu folgenden weiteren Zwecken genutzt werden:

- 1) Aufbau einer Datenbank für die Bereitstellung von Validationsgrößen für den Entwurf von kabelgebundenen Tiefseesystemen, numerischen Simulationswerkzeugen und Windensteuerungen.
- 2) Validierung des von der Forschungsstelle entwickelten Programms TOBO-SIM zur Bewegungsanalyse von geschleppten Geräteträgern für den Sonderfall des stehenden Schiffes bei realistischen Seegangsbewegungen des Schiffes, Strömungsprofilen sowie Kräften am Kabel.

Die zu variierenden Systemparameter bei Modellversuchen sind:

- Länge des Multifunktionskabels = Tests in unterschiedlichen Wassertiefen,
- Fier- und Hievgeschwindigkeiten für das Modell mit/ohne Bodenstation,
- Anbringen von Auftriebskörpern am Multifunktionskabel mit Variation von Zahl und Position,
- Lage von Gewichts- und Auftriebsschwerpunkt des getauchten Systems durch Ab- und Ankoppeln der Bodenstation,
- Gewichts-Auftriebs-Differenz des getauchten Systems durch Absetzen und Bergen der Bodenstation,
- Verhältnis von Systemeigenmasse zu vertikaler hydrodynamischer Masse des Tiefseegeräteträgers,
- Seegangsspektrum, Wellenamplituden sowie –perioden.

Die zu variierenden Systemparameter bei Tests mit dem Prototyp sind:

- Länge des Multifunktionskabels = Tests in unterschiedlichen Wassertiefen,
- Fier- und Hievgeschwindigkeiten für den Tiefseegeräteträger mit/ohne Bodenstation,
- Anbringen von Auftriebskörpern am Multifunktionskabel mit Variation von Zahl und Position,
- Lage von Gewichts- und Auftriebsschwerpunkt des getauchten Systems durch Absetzen und Bergen der Bodenstation,
- Gewichts-Auftriebs-Differenz des getauchten Systems durch Absetzen und Bergen der Bodenstation,
- Verhältnis von Systemeigenmasse zu vertikaler hydrodynamischer Masse des Tiefseegeräteträgers,
- Seegangseinfallswinkel zum Bug des Forschungsschiffes.

Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse:

- Online-Zugang zur Ergebnisdatenbank über Internet, mit möglicher Zugriffsregelung durch Vergabe von Passworten.
- Stetige Betreuung/Erweiterung der Datenbank und des Datenbestandes durch die Betreiber von Tiefseegeräteträgern. Ausbau der EDB durch Aufnahme der Kenntnisse und Erfahrungen anderer Forschungsinstitutionen und Gerätehersteller.
- Fundierte Erkenntnisse durch Simulationen, Modell- und Großversuche.

### 3 Erzielte Ergebnisse

#### 3.1 Numerische Modellierungen und Simulationen

##### 3.1.1 CFD-Simulationen

Wie schon in den beiden Jahresberichten [2] eingehend erläutert, wurden der exemplarisch untersuchte Prototyp des Tiefseegeräteträgers MODUS sowie Modelle von MODUS und einer Bodenstation in CAD und dann in CFD modelliert und eingehenden numerischen Strömungsuntersuchungen unterzogen. Details der Modellparameter, Strömungsparameter und Gitterdimensionen sind ebenfalls in den Jahresberichten zu finden. Berechnet wurden jeweils Widerstandskräfte für Horizontalfahrt sowie vertikale Auf- und Abwärtsfahrt für mindestens zwei Bewegungsgeschwindigkeiten (0,2 m/s, 0,4 m/s und 0,6 m/s in M 1:1 bzw. 0,18 m/s, 0,27 m/s in M 1:5).

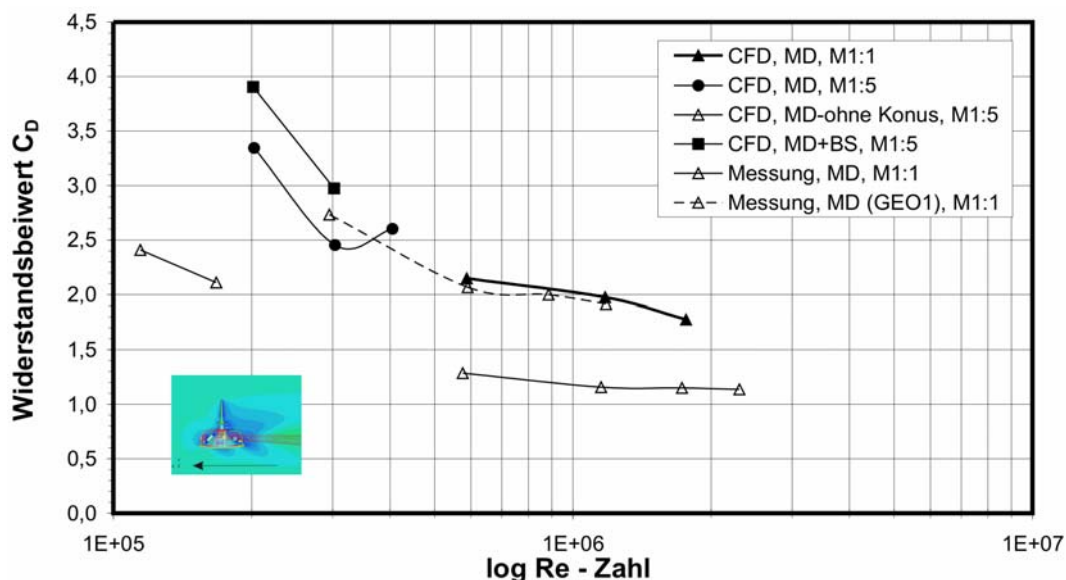


Abb. 6: Berechnete Widerstandsbeiwerte für MODUS in M 1:5 und M 1:1 jeweils für die horizontale Bewegungsrichtung im Vergleich mit experimentell ermittelten Werten für die Prototypen GEO1 und GEO2

Die qualitative Ausprägung der CFD-Ergebnisse für die horizontale Bewegung des Prototyps von MODUS (M 1:1, Version GEO2) zeigt gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Werten (Abb. 6). Der quantitative Vergleich zeigt jedoch zu hohe Werte bei allen numerischen Ergebnissen, so dass eine Parallelverschiebung um mindestens einen ganzen Zähler zu beobachten ist. Ein möglicher Grund ist, dass die Berechnungsergebnisse für die Modelle von MODUS, MODUS ohne innen liegenden Konus und MODUS + Bodenstation trotz sehr hoch aufgelöster Gitterstrukturen und doppelt genauer Auflösung starken numerischen Instabilitäten unterliegen, so dass hier

noch Untersuchungen bezüglich der Gittervariationen und auch der am besten geeigneten Turbulenzmodellierung angestellt werden müssen.

In Abb. 6 wurde das Messergebnis für die Vorgängerstruktur von MODUS (Version GEO1, Gerber und Schulze [4]) ergänzt. Zur endgültigen Beurteilung der Ergebnisse fehlt jedoch die Einschätzung der Strömungsbeeinflussung durch die unterschiedlichen genutzten Versuchsstrecken, da die Version GEO1 im großen Umlauftank UT2 der ZE VWS und die Version GEO2 in der tiefen Schlepprinne der ZE VWS untersucht wurde. Die Ergebnisse für die vertikalen Bewegungen abwärts (Fieren) und aufwärts (Hieven) liegen dagegen im Bereich der Erwartungen, die durch Experimente mit ähnlichen kegelförmigen Körpern in der Literatur (z.B. Hoerner [5]) begründet werden (Abb. 7).

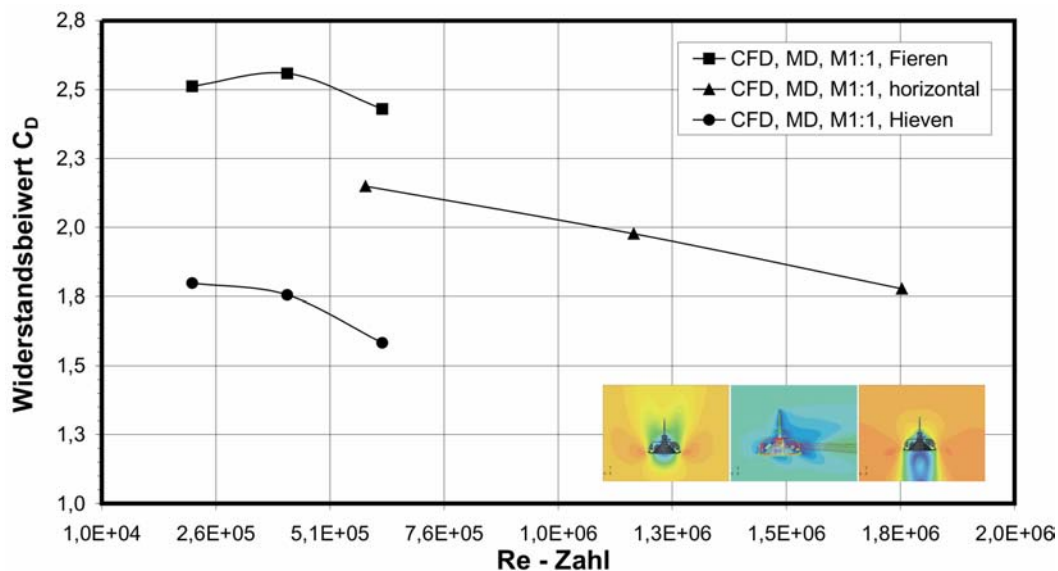


Abb. 7: Berechnete Widerstandsbeiwerte für MODUS in M 1:1 für die Bewegungsrichtungen Fieren, horizontal vorwärts und Hieven

### 3.1.2 Hydroelastische Simulationen

Die hydroelastischen Simulationen nutzen das an der TU Berlin entwickelte Programm TOBO-SIM (*TOwed BOdy-SIMulation*), welches nichtlineare Einflüsse wie Kabel-elastizität, Kabelkrümmung und Queranströmung sowie Geometrie und dynamische Eigenschaften des angehängten Sensorträgers berücksichtigt.

Entwickelt und verifiziert wurde TOBO-SIM im Rahmen des über die AiF vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit geförderten Vorhabens *Experimentelle Untersuchung getauchter Schleppsysteme* (AiF-Nr. 11615 N). Die Anwendung für reale Großsysteme und Vergleichsdaten aus dem Feldeinsatz ist der erste Schritt der Validationen. Abb. 8 zeigt ein typisches Eingabedatenfile für eine diskrete Wellenfrequenz, Amplitude und Kabellänge und die Erläuterungen der einzelnen Rechenparameter.

|            |              |   |           |
|------------|--------------|---|-----------|
| SKD        | SKD          | Dateikennung  |           |
| 18.50      | w_cable      | Gewicht des Kabels in Wasser  | [N]       |
| 1060.      | l_cable(1)   | Laenge des gesamten Kabels (gesamt/unten)                                     | [m]       |
| 1060.      | l_cable(2)   | Laenge des unteren Kabels   | [m]       |
| 1.2        | cdn_cable(1) | Widerstandsbeiwert des Kabels (normal)  |           |
| 1.2        | cdn_cable(2) | Widerstandsbeiwert des unteren Kabels (normal)                                |           |
| 0.024      | cds_cable(1) | Widerstandsbeiwert des Kabels (tangential)                                    |           |
| 0.024      | cds_cable(2) | Widerstandsbeiwert des unteren Kabels (tangential)                            |           |
| 0.         | cl_cable     | Seiteneiwert des Kabels   |           |
| .0254      | d_cable      | Durchmesser des Kabels  | [m]       |
| 25000000.0 | ea           | Dehnsteifigkeit des Kabels  | [N]       |
| 1          | ca           | Hydrodynamische Masse des Kabels  | [kg]      |
| 7350.      | w_body       | Gewicht des Schleppkoerpers in Wasser   | [kg]      |
| 1090.      | masbdy       | Trockenmasse des Schleppkoerpers  | [kg]      |
| 1.2        | cd_body(1)   | Widerstandsbeiwert des Schleppkoerpers (SK) in x                              |           |
| 0.         | cd_body(2)   | Widerstandsbeiwert des Schleppkoerpers in y                                   |           |
| 2.3        | cd_body(3)   | Widerstandsbeiwert des Schleppkoerpers in z                                   |           |
| 5.3        | a_body       | Bezugsflaeche des SK (Projektionsflaeche)                                     | [m**2]    |
| 0.         | cl_body      | Auftriebsbeiwert des SK mit Depressor   |           |
| 0.         | cndp         | Momentenbeiwert   |           |
| 0.         | xh           | Horiz. Abstand Drehpunkt (Verdr.schwerpunkt) des SK und Seilbefestigungspunkt | [m]       |
| 0.         | zh           | Vert. Abstand Drehpunkt (Verdr.schwerpunkt) des SK und Seilbefestigungspunkt  | [m]       |
| 0.         | xg           | Horiz. Abstand Drehpunkt (Verdr.schwerpunkt) des SK und Massenschwerpunkt     | [m]       |
| 0.         | zg           | Vert. Abstand Drehpunkt (Verdr.schwerpunkt) des SK und Massenschwerpunkt      | [m]       |
| 0.         | lt           | Hebelarm  | [m]       |
| 0.         | b_rot_y      |   |           |
| 0.         | cdx_2        |   |           |
| 0.         | clz_2        |   |           |
| 0.         | mhybdy(1,1)  | Hydrodynamische Massenmatrix des Schleppkoerpers                              |           |
| 0.         | mhybdy(2,2)  | alles in [kg]   |           |
| 0.         | mhybdy(2,6)  |   |           |
| 0.         | mhybdy(3,3)  |   |           |
| 5400.      | mhybdy(3,5)  |   |           |
| 0.         | mhybdy(4,4)  |   |           |
| 0.         | mhybdy(5,3)  |   |           |
| 0.         | mhybdy(5,5)  |   |           |
| 0.         | mhybdy(6,2)  |   |           |
| 0.         | mhybdy(6,6)  |   |           |
| 0.         | ixx          | Traegheitsmoment um die x-Achse   | [kg m**4] |
| 0.         | iyy          | Traegheitsmoment um die y-Achse   | [kg m**4] |
| 0.         | izz          | Traegheitsmoment um die z-Achse   | [kg m**4] |
| 0.         | ixz          | Deviationsmoment  | [kg m**4] |
| 0.         | utow         | Schleppgeschwindigkeit  | [kt]      |
| 0.0        | ampli        | Bewegungsamplitude  | [m]       |
| .35        | perio        | Periode   | [s]       |
| 3.5        | dir          | Richtung der Seilbev. 0.=normal zur Seiltang.                                 | [°]       |
| 90.        | tini         | Dauer des sanften Hochfahrens   | [s]       |
| 15.        | z_winch      | Hoehe der Winde ueber dem Wasserspiegel                                       | [m]       |
| 0.         | nrept        | Anzahl der Periodenwiederholungen   |           |
| 8          | iconf        | Rechenkonfig.: 1 = SK als Punktmasse, 2 = 3D-SK                               |           |
| 1          | ns           | Anzahl der Knoten   |           |
| 20         | niter        | Iterationen ueber NLD   |           |
| 5          | nt           | Anzahl der Zeitschritte fuer eine Periode                                     |           |
| 64         | s_dyn        | Stat. (0)/ dyn. Berechnung (1) (nur fuer HPVee-Version)                       |           |
| 1          |              |   |           |

Abb. 8: Typisches Eingabefile der Berechnungsparameter für TOBO-SIM mit Erläuterungen

### Ergebnisse

Die Kurven in Abb. 9 zeigen die Gegenüberstellung der resultierenden Übertragungsfunktionen (RAO) für Tauchen aus Messergebnissen von Schwingversuchen und Simulationsergebnissen mit TOBO-SIM.

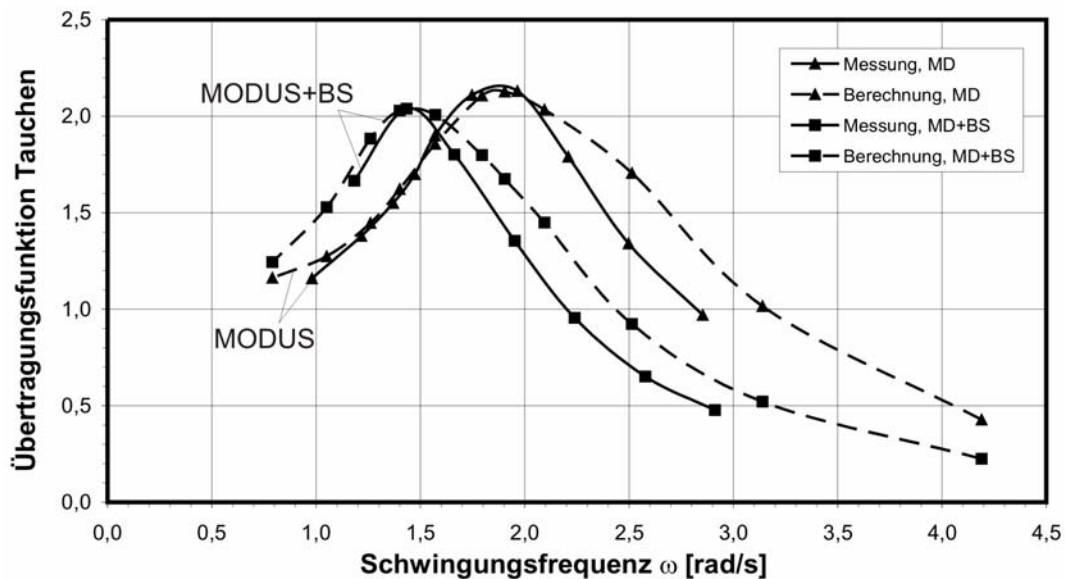


Abb. 9: Mess- und Simulationsergebnisse für die Übertragungsfunktionen beim Tauchen von MODUS (MD) und MODUS + Bodenstation (MD+BS)

Analysiert wurden Vertikalschwingungen mit 1.060 m Kabellänge und MODUS sowie mit MODUS und Bodenstation. Bei den Kurven für MODUS ist eine recht gute Übereinstimmung der Peakfrequenz mit dem zugehörigen maximalen RAO-Wert zu erkennen. Deutliche Abweichungen treten dagegen im abfallenden Kurvenstück für höhere Frequenzen auf. Hier ermittelt die Berechnung sehr viel geringere Dämpfungswerte als die Messung. Sehr gute Übereinstimmung liegt dagegen im ansteigenden Kurvenstück bis zur Peakfrequenz von ca.  $\omega_R = 1,89$  rad/s vor (s. auch Abb.16). Die Ergebnisse für MD + BS zeigen ein ähnliches Bild, hier nur zu kleineren Frequenzen und RAO-Werten verschoben. Die Kurve der Messwerte zeigt einen engeren Verlauf als die der Simulationswerte, wobei die größten Abweichungen, wie schon bei MD *stand-alone*, besonders im höherfrequenten Kurventeil, also rechts der Peakfrequenz von ca.  $\omega_R = 1,44$  rad/s, zu finden sind.

## 3.2 Tankversuche

### 3.2.1 Schwingversuche

Parallel zu den numerischen Modellen wurden Stahlmodelle erstellt, die mit einem speziellen Versuchsaufbau vertikalen Schwingungen ausgesetzt wurden. Die durch Anwendung der Ähnlichkeitsgesetze ermittelten Dimensionen der MODUS-Modelle sowie der Federn für äquivalente Kabellängen von 390 m bzw. 1.060 m wurden einschließlich des Versuchsaufbaus eingehend in den beiden Jahresberichten [2] erläutert.

Ziel der Versuche war es, die hydrodynamischen Massen (*added mass*) der Modelle im Maßstab M 1:5 im ‚Freiwasser‘ und bei Annäherung an den Meeresboden sowie die Bedingungen zur Entstehung sogenannter *slack-cable* Situationen zu erfassen, bei denen die Kabellängsspannung für kurze Momente deutlich reduziert ist (u. U. sogar auf Null) und die Bewegungen des Einsatzfahrzeugs und des getauchten Systems entkoppelt sind. Die im nächsten Moment abrupt einsetzende Straffung des Kabels führt zu gefährlich hohen Kraftspitzen (*snap loads*) am oberen Kabelaufhängepunkt und störenden Taumelbewegungen des Geräteträgers, wobei irreguläre Oszillationen mit unterschiedlichen Amplituden, Frequenzen und Phasen auftreten.

#### Ergebnisse

Zur Überprüfung der Verfahren und Mess-Systeme wurden zunächst Referenzversuche mit einer Scheibe und einer Kugel durchgeführt. Deren Schwingverhalten ist bekannt, so dass die zugehörigen Zeitschriebe der charakteristischen Eigenschwingungsformen der Kraftverläufe in Luft und Wasser gut mit den Ergebnissen für die Modelle von MODUS mit/ohne Bodenstation verglichen werden können (Abb. 10: Scheibe und Kugel, Abb. 11: MODUS m/o BS). Zu beachten ist, dass aufgrund großer Masseunterschiede der Körper Federn unterschiedlicher Steifigkeit eingesetzt werden mussten (42,1 N/m, 84,4 N/m, 922 N/m und 2.510 N/m).

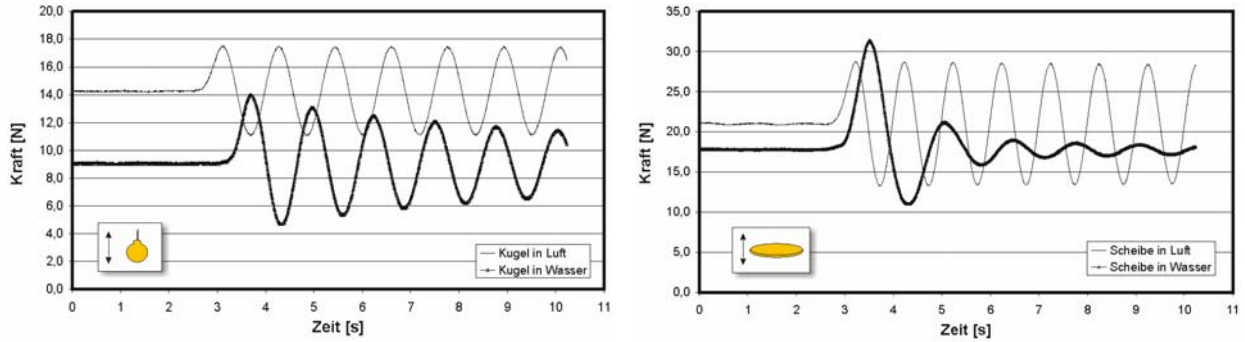


Abb. 10: **Kraftverläufe** für Eigenschwingungen in Luft und Wasser einer Aluminiumkugel,  $m = 1,46 \text{ kg}$ ,  $\varnothing = 0,1 \text{ m}$ ,  $k = 42,1 \text{ N/m}$  (links) einer Stahlscheibe,  $m = 2,14 \text{ kg}$ ,  $\varnothing = 0,16 \text{ m}$ ,  $k = 84,4 \text{ N/m}$  (rechts)

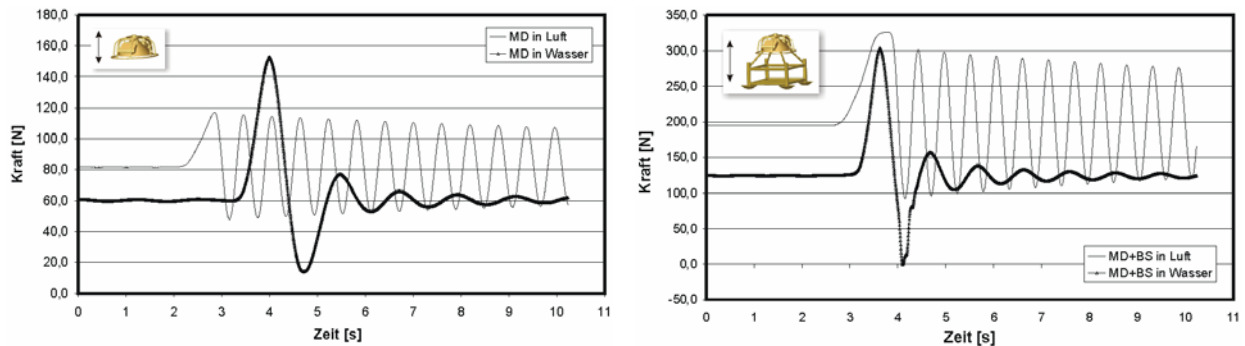


Abb. 11: **Kraftverläufe** für Eigenschwingungen der Modelle M 1:5 in Luft und Wasser von MODUS,  $k = 922 \text{ N/m}$  (links) und von MODUS + Bodenstation,  $k = 2.510 \text{ N/m}$  (rechts)

Die Zeitschriebe der freien gedämpften Auslenkungen sind in den Abbildungen 12 und 13 dargestellt, die logarithmischen Dekremente der Amplitudenverläufe werden in Abb. 14 gezeigt.

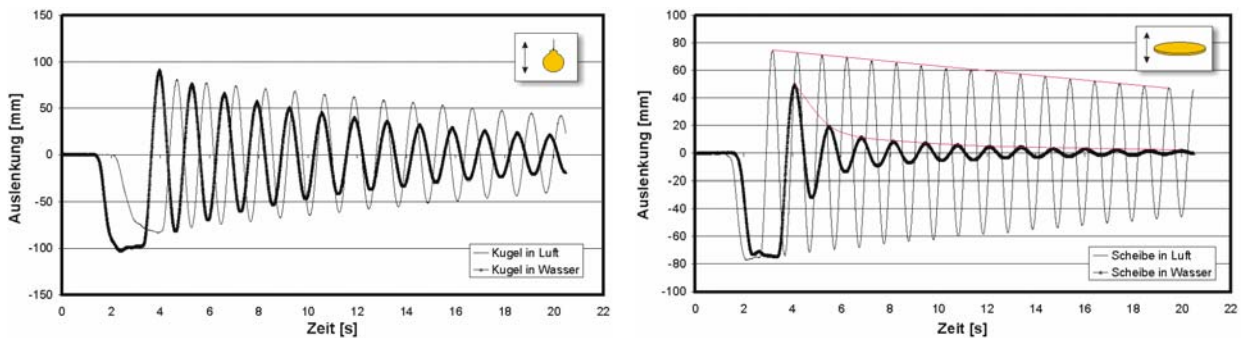


Abb. 12: **Auslenkungen** für Eigenschwingungen in Luft und Wasser einer Aluminiumkugel,  $m = 1,46 \text{ kg}$ ,  $\varnothing = 0,1 \text{ m}$ ,  $k = 42,1 \text{ N/m}$  (links) einer Stahlscheibe einschl. Einhüllende,  $m = 2,14 \text{ kg}$ ,  $\varnothing = 0,16 \text{ m}$ ,  $k = 84,4 \text{ N/m}$  (rechts)

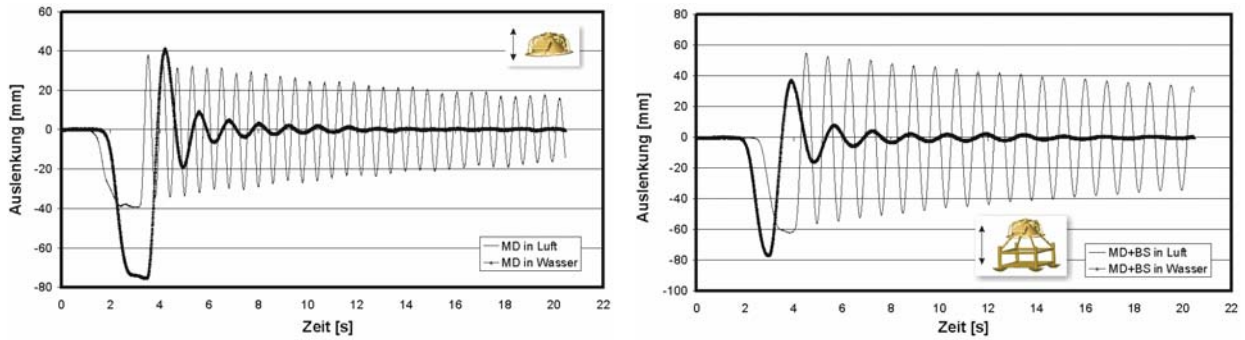


Abb. 13: **Auslenkungen** für Eigenschwingungen der Modelle M 1:5 in Luft und Wasser von MODUS (links) und von MODUS + Bodenstation (rechts), beide mit  $k = 922 \text{ N/m}$

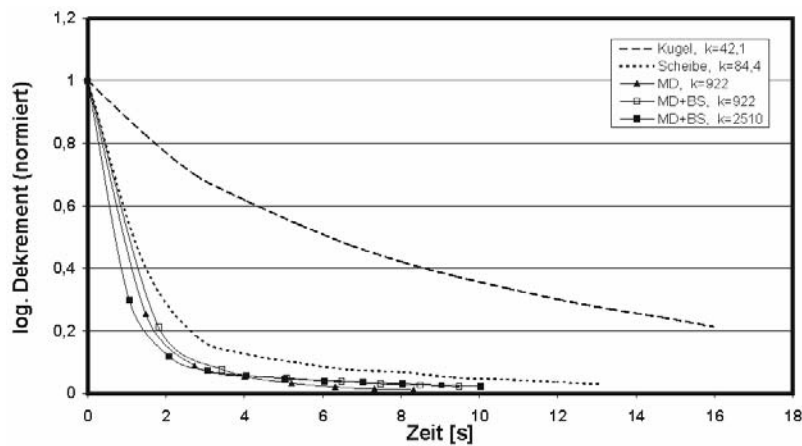


Abb. 14: **Logarithmische Dekremente** der freien gedämpften Schwingungen aus Abb. 12 und Abb. 13

Die hydrodynamische Masse der Scheibe beträgt demnach  $m_h = 1,48 \text{ kg}$  (1,37 kg) und für die Kugel  $m_h = 0,26 \text{ kg}$  (0,26 kg). Die Werte in Klammern sind die analytischen Ergebnisse für diese Körper.

Der Einbau der Feder mit Federrate  $k = 2.510 \text{ N/m}$  simuliert ein relativ kurzes reales Kabel der Länge 390 m. Die Erregerdoppelamplitude entspricht mit 48 mm einer realen Doppelamplitude von 0,24 m. Die auf die Großausführung übertragenen Ergebnisse der Übertragungsfunktionen für MODUS m/o Bodenstation sind in Abb. 15 dargestellt. Die Kurven zeigen eine signifikante Verstärkung bis zu einer Verdoppelung der vertikalen Antwortamplituden der getauchten Modelle im Resonanzfall. Die zugehörigen Maxima der Schwingungsfrequenzen liegen für MODUS bei ca.  $\omega_R = 2,92 \text{ rad/s}$  und für MODUS+BS bei ca.  $\omega_R = 2,48 \text{ rad/s}$ .



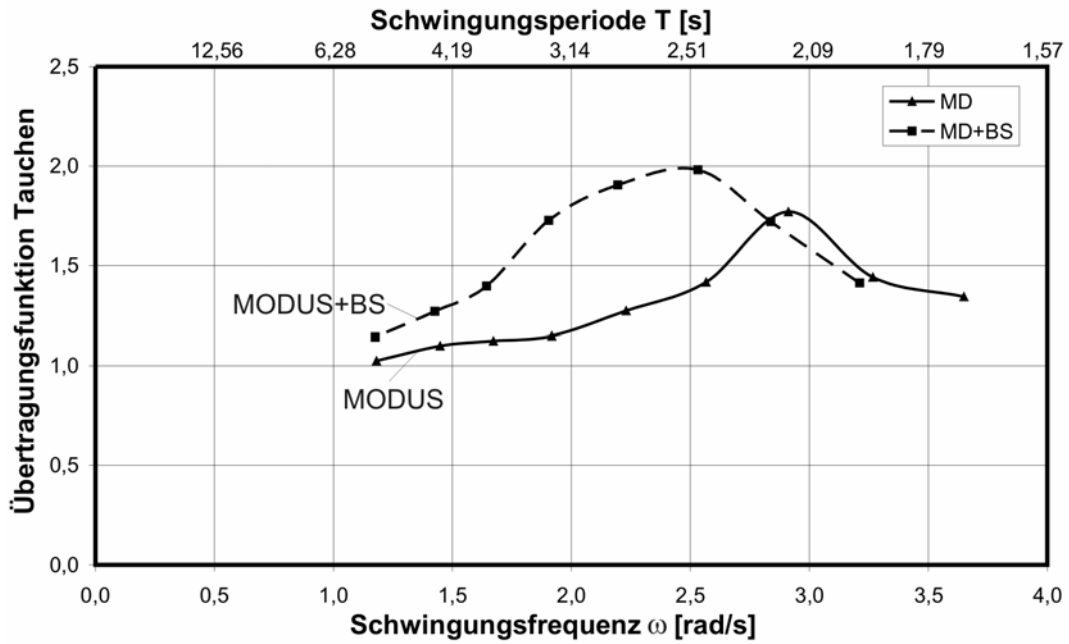


Abb. 15: Übertragungsfunktionen für Tauchen von MODUS m/o Bodenstation bei einer Kabellänge von ca. 390 m

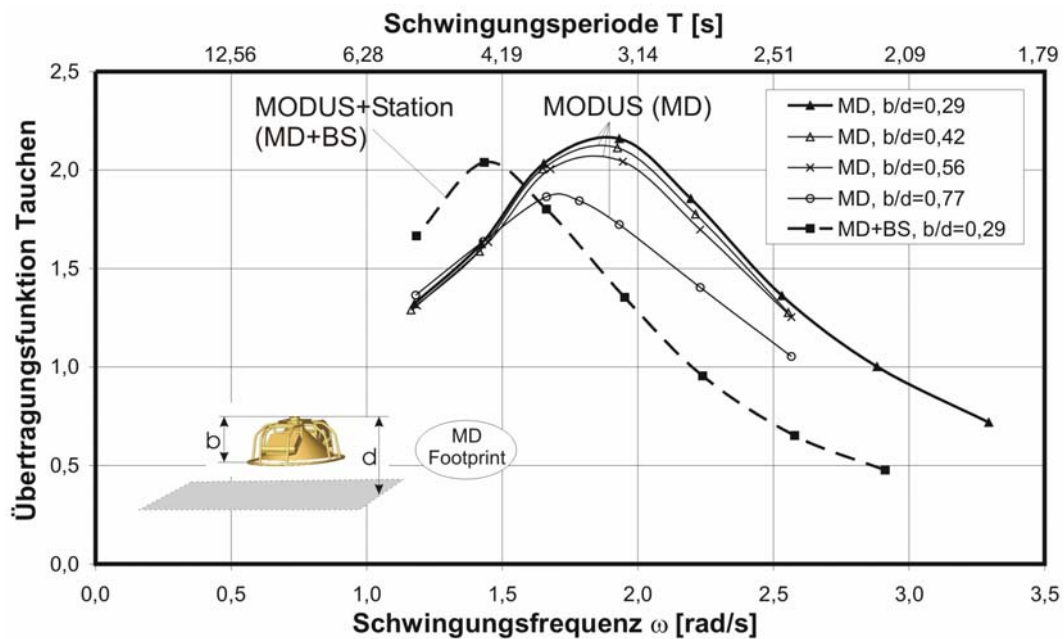


Abb. 16: Änderung der Maxima der Übertragungsfunktionen für Tauchen in Betrag und Position bei Verringerung des Bodenabstands von MODUS, ergänzend RAO für MD+BS im Freiwasser, Kabellänge ca. 1.060 m

Durch Einbau einer Feder mit der Federrate  $k = 922 \text{ N/m}$  wird das Kabel virtuell auf 1.060 m verlängert. Als Folge ergeben sich die Kurvenverläufe in Abb. 16 für die Tauch-Übertragungsfunktionen von MODUS m/o Station. Nach Anwendung der Ähnlichkeitsgesetze lässt sich daraus das gesuchte Schwingungsverhalten der Großausführung prognostizieren. Danach liegen die Maxima der Schwingungsfrequenzen

für MD bei ca.  $\omega_R = 1,89$  rad/s und für MD+BS bei  $\omega_R = 1,44$  rad/s. Ergänzend sind die RAO-Verläufe für MODUS bei Bodenannäherung dargestellt. Der Quotient  $b/d$  (Gesamthöhe Tauchkörper / Höhe Oberkante Tauchkörper bis Boden) beschreibt diese Annäherung. Deutlich sind die mit abnehmendem Bodenabstand verringerten Antwortamplituden zu erkennen, die mit einer Verschiebung des Kurvenmaximums zu kleineren Schwingungsfrequenzen einhergehen (z.B. von  $\omega_{R(b/d=0,29)} = 1,89$  rad/s auf ca.  $\omega_{R(b/d=0,77)} = 1,67$  rad/s). Dies ist in erhöhter hydrodynamischer Masse aufgrund eines vergrößerten Druckfeldes kurz über dem Boden begründet, da die Eigenmasse sowie die Kabellänge in der Versuchsreihe unverändert geblieben sind.

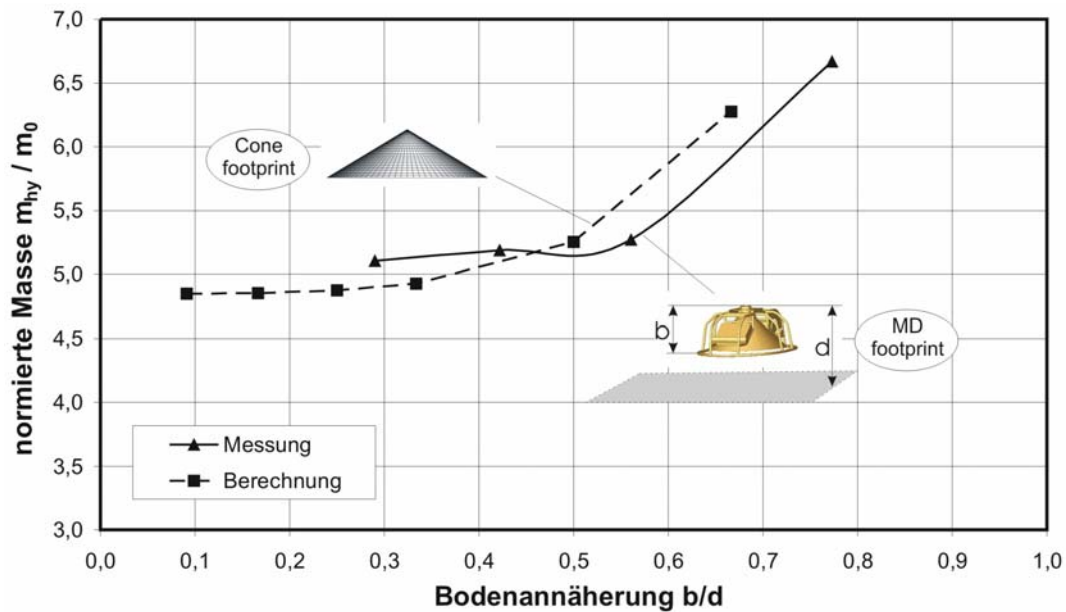


Abb. 17: Zunahme der hydrodynamischen Masse bei Annäherung an den Boden

Die Entwicklung der hydrodynamischen Masse von MODUS bei Bodenannäherung ist in Abb. 17 dimensionslos dargestellt, wobei  $b/d = 1$  das Aufsetzen auf Grund bedeutet. Die im Freiwasser ca. 5fach größere hydrodynamische Masse gegenüber der Eigenmasse für den MODUS steigt bei Bodenannäherung noch einmal deutlich auf Werte bis über das 6,5fache an. Ein sehr ähnliches Bild liefert die Ergebniskurve einer entsprechenden analytischen Berechnung für einen einfachen ovalen Kegel mit dem dreidimensionalen Diffraktionsprogramm WAMIT [12]. Die Hauptabmessungen des Kegels gleichen denen von MODUS in M 1:1, nämlich (L/B/H [m]) 2,88/2,35/1,02 (vergleiche Tabelle 1).

### 3.2.2 Widerstandsversuche

Die experimentelle Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten umströmter Körper ist trotz großer Fortschritte bei der numerischen Simulation notwendige und gängige Praxis.

Um die auf den Widerstandsergebnissen lastenden Maßstabeffekte zu quantifizieren, sind von den Versuchsanstalten besonders im Schiffbau bereits in den 1960er und Anfang der 1970er Jahren sogenannte GEOSIM-Versuche (*GEOMETRICAL SIMILAR*) durchgeführt worden. Hierbei werden geometrisch ähnliche, maßstäbliche Modellfamilien untersucht (z.B. LUTHRA [8]). Ein ähnliches Ziel verfolgen die hier durchgeführten Widerstandsversuche mit zwei maßstäblichen Modellen in M 1:5 und M 1:3 sowie dem Prototyp des Geräteträgers MODUS in der Tiefwasserrinne der ZE VWS der TU Berlin (Abb. 18). Die Ergebnisse dienen dazu, die für die Hydrodynamik und Hydroelastik relevanten Einflüsse bei der Wahl des Abbildungsmaßstabs sowie den notwendigen Grad der Diskretisierung von Modellen zu bestimmen und die Vorhersagegenauigkeit von Modellversuchen zu ermitteln.



*Abb. 18: Prototyp und Modelle von MODUS (GEO2) im Maßstab 1:3 und 1:5*

Die Versuchskörper werden an einem 5-Komponenten-Messbiegestab an der justierbaren Messbühne des Schleppwagens befestigt und voll getaucht mit präziser konstanter Geschwindigkeit durch das Wasser gezogen. Durch individuelle Kalibrierungen des Biegestabes für die drei vorliegenden sehr unterschiedlichen Lastbereiche und Hebelarme ist es möglich, die Widerstandskräfte und –momente aller drei Versuchskörper mit ein und demselben Messaufbau zu ermitteln. Abb. 19 zeigt die drei montierten Versuchskörper, nämlich: das Modell in M 1:5 in Horizontalfahrt, das Modell in M 1:3 in Vertikalstellung und den Prototyp. Die weiteren Schleppkonfigurationen sind in Abb. 20 schematisch dargestellt.



Abb. 19: Widerstandsversuche in der Tiefwasserrinne der ZE VWS der TU Berlin von links nach rechts: Modelle von MODUS in M 1:5, M 1:3 (hier für Vertikalfahrt hochkant montiert) und der Prototyp

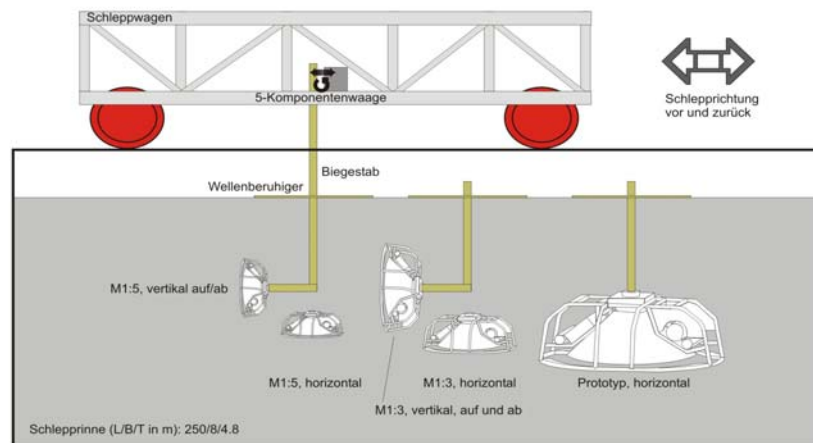


Abb. 20: Konfigurationen der Widerstandsversuche von links nach rechts: Modelle von MODUS in M 1:5, M 1:3 und der Prototyp für vertikale Fahrt (vorwärts und rückwärts) und horizontale Fahrt

Der Auswertung liegen die Ergebniskurven in Abb. 21 zugrunde. Im Bereich kleiner und mittlerer Reynoldszahlen ( $2,5 \cdot 10^4$  bis  $2,0 \cdot 10^5$ ) liegen die Ergebnisse der Modelle, mit durchgezogenen Linien in M 1:5 und mit unterbrochenen Linien in M 1:3. Im oberen Re-Zahlenbereich liegen die Ergebnisse für die Großausführungen ( $3,0 \cdot 10^5$  bis  $2,5 \cdot 10^6$ ). Für die beiden Modelle sind übereinstimmend für die drei Fahrtrichtungen deutlich unterscheidbare Bereiche der  $C_d$ -Werte zu erkennen. So zeigen die Messungen für die Abwärtsrichtungen (Fieren-F) signifikant größere Beiwerte als für die Aufwärtsrichtung (Hieven-H):  $C_{d_F} = 1,13$  bis  $1,4$  und  $C_{d_H} = 0,86$  bis  $1,01$ . Dazwischen liegen die jeweiligen Messwerte für die Horizontalfahrt  $C_{d_{Hor}} = 1,13$  bis  $1,29$ , die aufgrund der größeren Längenausdehnung der Strukturen im Bereich höherer Re-Zahlen liegen ( $1,0 \cdot 10^5$  bis  $5,5 \cdot 10^5$ ). Die jeweiligen Messwerte für die Horizontalrichtungen aller Körper zeigen sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr ähnliche

Verläufe. Diese Tendenz wird vom kleinen Modell in M 1:5 über das mittelgroße Modell in M 1:3 zum Prototyp immer deutlicher, so dass die  $C_D$ -Werte für das Modell in M 1:3 bereits nahezu identisch mit denen für die Großausführung sind. Die Modellergebnisse können also als sehr zufriedenstellend bezeichnet werden, da die vorgenommene Modellierung des Geräteträgers zu vergleichbaren Gesamtwiderständen für Modell und Großausführung geführt haben.

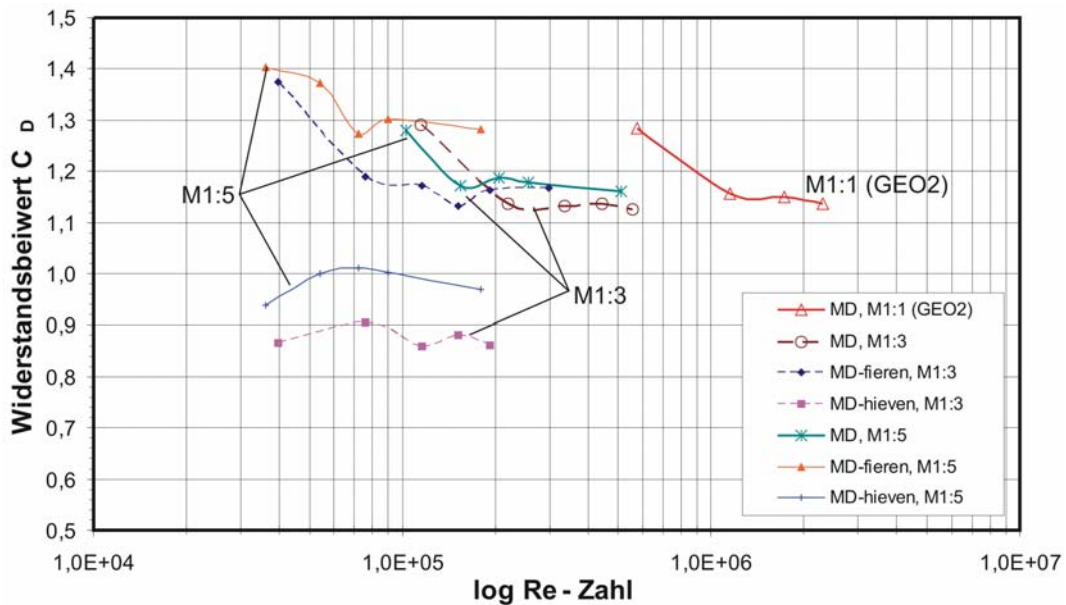


Abb. 21: Widerstandsbeiwerte in Abhängigkeit von der Reynoldszahl für Experimente mit MODUS in M 1:5, M 1:3 und die Prototypen für Flachwasser (GEO1) und Tiefwasser (GEO2)

### 3.3 Meßsystem

#### 3.3.1 Konzept

Das hier vorgestellte Messdatenerfassungssystem hat den Namen *into.contact* (**integrated operations . control and analysis center**) erhalten. Es bündelt alle Komponenten, die zur zeitnahen Registrierung und Auswertung dynamischer Daten, wie sie an Bord des Einsatzschiffes sowie auf dem Geräteträger anfallen, benötigt werden. Diese Daten stammen vom A-Rahmen, von der Schiffsnavigation, vom Geräteträger sowie vom Nutzlastmodul, falls vorhanden (Abb. 22). Zur Mensch-Maschine-Interaktion wurden verschiedene Programmodule entwickelt, die jedes für sich allein voll funktionsfähig sind: *into.contact-MD* erlaubt die interaktive Ansteuerung und Systemkontrolle des Geräteträgers MODUS. Die Software ist dabei sehr eng mit der Hardwarearchitektur der Steuerung verzahnt. Zu den Aufgaben gehören die Online-Abfrage, Visualisierung, Protokollierung und Beeinflussung aller relevanten Betriebsparameter. Die hier anfallenden Daten werden im Datenbankmodul *into.contact-DB* in

geeigneter Weise strukturiert abgelegt, wodurch deren Archivierung und Auswertung stark vereinfacht und somit zuverlässiger wird.

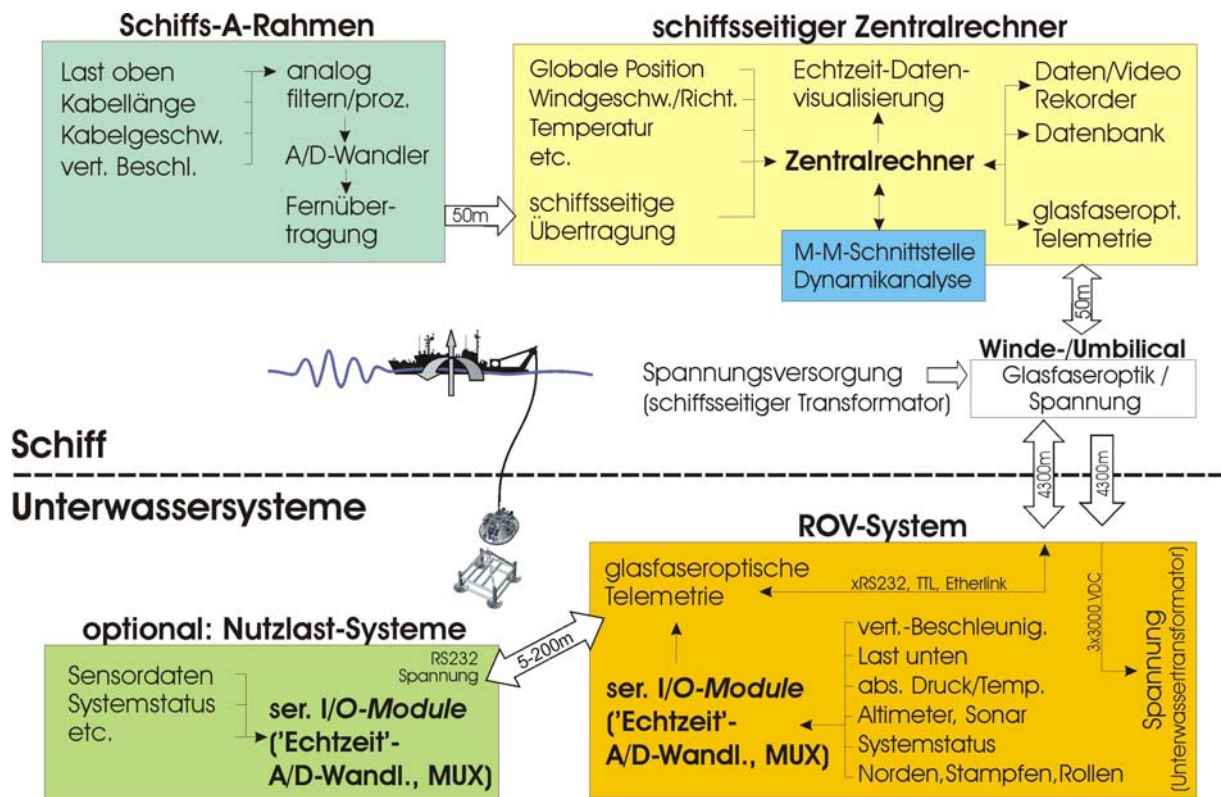


Abb. 22:

Konzept zur Online-Messdatenerfassung und Systembetreuung kabelgebundener Trägersysteme *into.contact* (integrated operations control and analysis center)



Abb. 23: Leitstand zur Steuerung und zum Messdatenmanagement an Bord des Einsatzschiffes

Die Module laufen auf redundanten Rechnern in der zentralen Steuereinheit an Bord des Schiffes (Abb. 23), wo sie über einfach editierbare INI-Dateien konfiguriert werden. So können sie problemlos auch im Netzwerk auf autarken Rechnern wie z.B. Notebooks arbeiten, um z.B. den Ausfall eines Rechners schnell zu kompensieren.

### 3.3.2 Messdatenerfassung

Das Konzept der Messdatenerfassung beruht auf der Notwendigkeit, alle für den Betrieb und die dynamischen Analysen relevanten Daten unter einem gemeinsamen Zeitstempel zu erfassen und zu speichern. Problematisch sind hierbei die differierenden Takt- und Übertragungsraten der zahlreichen Sensoren, deren Daten meist zunächst von analog zu digital gewandelt werden müssen, um sie über längere Strecken übertragen zu können. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Sensoren am Schiff und am getauchten Geräteträger zusammengestellt.

Tabelle 2: Sensorkonfiguration am Schiff und am Geräteträger

| Instrument am Schiff  | Hersteller                          | Messbereich                              | Auflösung                       | Taktrate                                 | Übertragungstaktrate [Hz] |
|---|-------------------------------------|--|---------------------------------|--|---------------------------|
| Beschleunigungsmessung                                      | TU Berlin                           | ± 2 g                                    | 0,005g                          | 250 Hz                                   | 3                         |
| OSTAR Kompass<br>- Norden<br>- Neigung, x/y<br>- Temperatur | Fa. Falmouth Scientific, Inc., USA. | 0 - 360°<br>± 45°<br>-10 - +40°C         | ± 2 Grad<br>± 0,2 Grad<br>0,5°C | 10 Hz<br>10 Hz<br>10 Hz                  | 3<br>3<br>3               |
| Kabel<br>-last<br>-länge<br>-geschwindigkeit                | Fa. MacArtney, Dänemark             | 0 - 100 kN<br>0 - 9999,9 m<br>0 - 99 m/s | 100 N<br>0,1 m<br>0,2 m/s       | abhängig von Drehbewegung<br>Umlenkrolle | 10<br>10<br>10            |
| Instrument am Geräteträger                                  | Hersteller                          | Messbereich                              | Auflösung                       | Taktrate                                 | Übertragungstaktrate [Hz] |
| Beschleunigungsmessung                                      | TU Berlin                           | ± 2 g                                    | 0,005 g                         | 250 Hz                                   | 3                         |
| OSTAR Kompass<br>- Norden<br>- Neigung, x/y<br>- Temperatur | Fa. Falmouth Scientific, Inc., USA. | 0 - 360°<br>± 45°<br>-10 - +40°C         | ± 2 Grad<br>± 0,2 Grad<br>0,5°C | 10 Hz<br>10 Hz<br>10 Hz                  | 3<br>3<br>3               |
| Altimeter   | Fa. TriTech, UK                     | 0 to 100 m                               | 1 mm                            | -  | 1,6                       |
| Druckmessung  | Fa. Keller                          | 1 - 400 bar<br>(± 0,05 % FS)             | ≤ 0,01 % FS<br>12 Bit           | 3 Hz                                     | 3                         |
| Dehnungsmessung   | TU Berlin                           | 0 - 10 kN                                | 10 N,<br>12 Bit                 | 3 Hz                                     | 3                         |
| elektrotechnische Messungen (U, I)                          | TU Berlin                           | -  | 12 Bit                          | 3 Hz                                     | 3                         |

Die Messdatenerfassung erfolgt über das mit LabVIEW [6] erstellte Softwaremodul *into.contact-MD*, das auf Daten aus der speziell programmierten *Dynamic Link Library* (DLL) zur Schnittstellenabfrage zugreift. Hier in der DLL wird der gemeinsame Zeitstempel vergeben sowie auf fehlerhafte Datenübertragung durch kontrollierte Freilassungen in den entsprechenden Spalten und einen zugehörigen Kommentar in der parallel geführten sogenannten *errorlog*-Datei reagiert. Die Datenerfassung schreibt aufgrund der oben aufgeführten Sensoreigenschaften mit einer Taktrate von ca. 345 ms, wobei jedoch durch interne Puffer auch Maxima höherfrequenter Sensordaten erfasst werden. Die Softwarearchitektur in *into.contact* nutzt sogenannte *named-pipe* Schnittstellen, um den Zugriff anderer Rechner im LAN z.B. auf dem Schiff zu den Messdaten zu ermöglichen. Somit wird das Postprocessing der Dynamikdaten bei gleichzeitiger Entlastung des Steuerrechners erleichtert (siehe das Software- und Schreibsche in Abb. 24). Ein Ausschnitt aus einem Datenlog ist in Abb. 25 zu sehen.

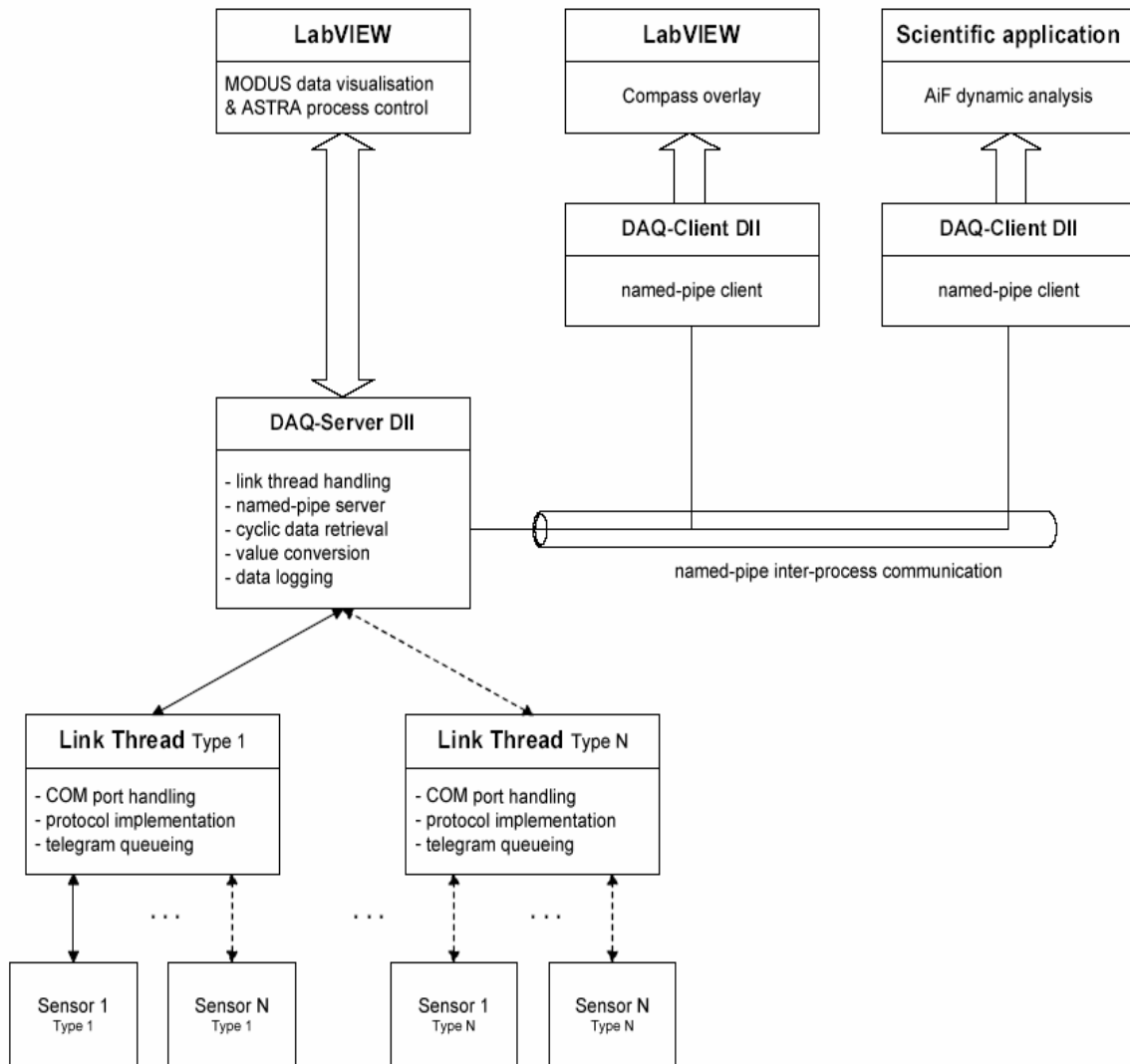


Abb. 24a: Datenakquisition auf dem zentralen Steuerrechner: Softwareschema



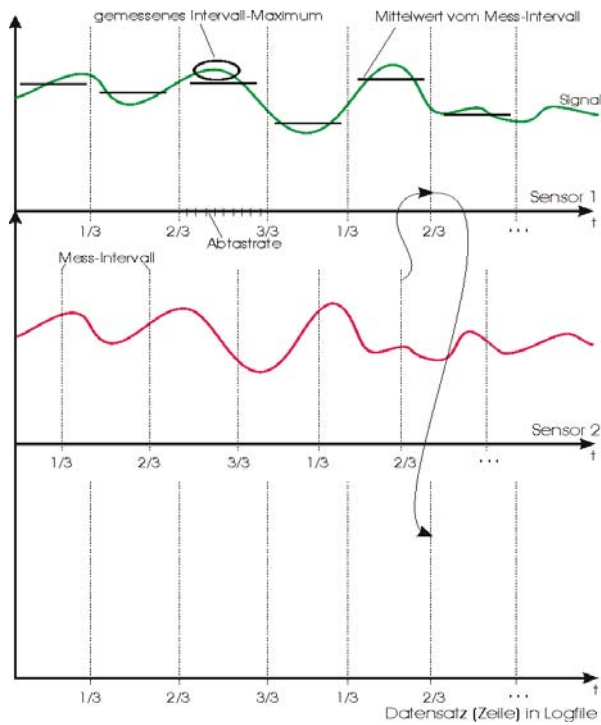


Abb. 24b: Datenakquisition auf dem zentralen Steuerrechner, Schreibschema für zwei Sensoren

Project: DIONEOP  
 Mission: 5  
 Vessel: R/V Urania  
 Cable : 03379  
 Dive : 54  
 Date : 17-11-2003

| Unit Time-stamp       | Xavg   | Xmax   | Yavg  | Ymax  | Unit Time-stamp       | Xavg   | Xmax   | Yavg  | Ymax  | Unit Time-stamp       | Xcite | Ycite | Teile Heading | Temp.  | Unit Time-stamp | Xcite                  | Ycite  | Teile Heading | Temp. |       |       |
|-----------------------|--------|--------|-------|-------|-----------------------|--------|--------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|---------------|--------|-----------------|------------------------|--------|---------------|-------|-------|-------|
| GMTL 08:24:20:750.344 | -0.050 | -0.063 | 0.930 | 1.003 | GMTL 08:24:21:375.360 | -0.259 | -0.233 | 0.988 | 1.016 | FTIL 08:24:20:497.359 | -0.86 | 2.12  | 3.23          | 320.88 | 13.22           | FTIIE 08:24:21:375.360 | -13.71 | -0.71         | 13.73 | 58.89 | 27.44 |
| GMTL 08:24:21:109.359 | -0.052 | -0.067 | 0.961 | 0.994 | GMTL 08:24:21:718.349 | -0.264 | -0.229 | 0.996 | 1.026 | FTIL 08:24:20:812.377 | -0.84 | 2.23  | 3.24          | 325.59 | 13.22           | FTIIE 08:24:21:718.349 | -14.16 | -0.98         | 14.19 | 59.22 | 27.44 |
| GMTL 08:24:21:411.312 | -0.056 | -0.067 | 0.975 | 0.985 | GMTL 08:24:22:062.344 | -0.264 | -0.203 | 0.994 | 1.010 | FTIL 08:24:21:109.377 | -0.89 | 2.20  | 3.23          | 321.97 | 13.22           | FTIIE 08:24:22:062.344 | -14.17 | -0.85         | 14.20 | 59.42 | 27.44 |
| GMTL 08:24:22:712.269 | -0.058 | -0.069 | 0.970 | 0.985 | GMTL 08:24:22:411.359 | -0.255 | -0.209 | 0.986 | 1.022 | FTIL 08:24:21:375.703 | -0.81 | 2.46  | 3.56          | 323.21 | 13.22           | FTIIE 08:24:22:411.359 | -13.94 | -0.25         | 13.94 | 59.11 | 27.44 |
| GMTL 08:24:22:124.453 | -0.062 | -0.072 | 0.985 | 0.998 | GMTL 08:24:22:765.244 | -0.248 | -0.219 | 0.974 | 1.012 | FTIL 08:24:22:124.422 | -0.84 | 2.70  | 3.79          | 322.79 | 13.22           | FTIIE 08:24:22:765.244 | -13.55 | 0.58          | 13.57 | 58.46 | 27.44 |
| GMTL 08:24:22:468.234 | -0.062 | -0.075 | 0.992 | 1.007 | GMTL 08:24:23:171.406 | -0.240 | -0.232 | 0.966 | 0.996 | FTIL 08:24:22:468.250 | -0.74 | 2.40  | 3.87          | 325.68 | 13.22           | FTIIE 08:24:23:171.406 | -13.71 | 2.19          | 13.76 | 59.47 | 27.44 |
| GMTL 08:24:22:812.344 | -0.062 | -0.072 | 1.000 | 1.011 | GMTL 08:24:23:469.237 | -0.232 | -0.232 | 0.960 | 0.986 | FTIL 08:24:22:842.359 | -0.75 | 2.85  | 3.92          | 322.17 | 13.22           | FTIIE 08:24:23:469.237 | -12.86 | 1.94          | 13.01 | 59.51 | 27.44 |
| GMTL 08:24:23:127.375 | -0.059 | -0.072 | 1.006 | 1.021 | GMTL 08:24:23:828.360 | -0.232 | -0.234 | 0.961 | 0.990 | FTIL 08:24:23:127.344 | -0.98 | 2.81  | 3.93          | 324.79 | 13.22           | FTIIE 08:24:23:828.360 | -12.54 | 2.32          | 12.76 | 59.25 | 27.44 |
| GMTL 08:24:23:500.212 | -0.058 | -0.068 | 1.007 | 1.017 | GMTL 08:24:24:171.349 | -0.235 | -0.206 | 0.966 | 1.008 | FTIL 08:24:23:521.344 | -0.99 | 2.70  | 3.82          | 322.00 | 13.22           | FTIIE 08:24:24:171.349 | -12.71 | 2.19          | 12.81 | 59.30 | 27.44 |
| GMTL 08:24:23:828.328 | -0.058 | -0.067 | 1.007 | 1.014 | GMTL 08:24:24:515.344 | -0.242 | -0.240 | 0.974 | 1.008 | FTIL 08:24:23:875.344 | -1.07 | 2.63  | 3.79          | 323.26 | 13.22           | FTIIE 08:24:24:515.344 | -12.93 | 1.95          | 13.08 | 59.50 | 27.44 |
| GMTL 08:24:24:129.375 | -0.056 | -0.065 | 1.007 | 1.015 | GMTL 08:24:24:875.360 | -0.240 | -0.205 | 0.982 | 1.008 | FTIL 08:24:24:209.328 | -1.07 | 2.68  | 3.76          | 323.88 | 13.22           | FTIIE 08:24:24:875.360 | -13.95 | 1.82          | 13.48 | 60.00 | 27.44 |
| GMTL 08:24:24:546.349 | -0.054 | -0.067 | 1.006 | 1.017 | GMTL 08:24:25:250.375 | -0.255 | -0.209 | 0.980 | 1.012 | FTIL 08:24:24:546.349 | -1.04 | 2.48  | 3.63          | 321.84 | 13.22           | FTIIE 08:24:25:250.375 | -13.66 | 1.62          | 13.76 | 60.23 | 27.44 |
| GMTL 08:24:24:984.428 | -0.054 | -0.068 | 1.007 | 1.017 | GMTL 08:24:25:562.312 | -0.258 | -0.222 | 0.990 | 1.018 | FTIL 08:24:24:984.428 | -0.91 | 2.40  | 3.52          | 324.81 | 13.22           | FTIIE 08:24:25:562.312 | -13.85 | 1.42          | 13.92 | 60.32 | 27.44 |
| GMTL 08:24:25:265.281 | -0.054 | -0.067 | 1.007 | 1.022 | GMTL 08:24:25:911.359 | -0.262 | -0.223 | 0.988 | 1.021 | FTIL 08:24:25:265.281 | -0.90 | 2.39  | 3.51          | 320.54 | 13.22           | FTIIE 08:24:25:911.359 | -13.95 | 0.82          | 13.97 | 60.00 | 27.44 |
| GMTL 08:24:25:578.213 | -0.056 | -0.067 | 1.010 | 1.025 | GMTL 08:24:26:265.344 | -0.259 | -0.209 | 0.982 | 1.010 | FTIL 08:24:25:578.213 | -0.81 | 2.43  | 3.55          | 323.51 | 13.22           | FTIIE 08:24:26:265.344 | -14.03 | 0.52          | 14.04 | 59.96 | 27.44 |
| GMTL 08:24:25:927.359 | -0.056 | -0.065 | 1.011 | 1.022 | GMTL 08:24:26:609.344 | -0.255 | -0.203 | 0.974 | 0.996 | FTIL 08:24:25:927.359 | -0.76 | 2.57  | 3.65          | 321.93 | 13.20           | FTIIE 08:24:26:609.344 | -13.76 | 0.13          | 13.76 | 59.30 | 27.44 |
| GMTL 08:24:26:121.344 | -0.058 | -0.067 | 1.017 | 1.016 | GMTL 08:24:27:015.406 | -0.248 | -0.209 | 0.961 | 0.990 | FTIL 08:24:26:121.344 | -0.78 | 2.51  | 3.60          | 322.72 | 13.22           | FTIIE 08:24:27:015.406 | -13.38 | 0.14          | 13.78 | 58.46 | 27.44 |
| GMTL 08:24:26:718.497 | -0.056 | -0.065 | 1.013 | 1.025 | GMTL 08:24:27:329.312 | -0.240 | -0.200 | 0.951 | 0.996 | FTIL 08:24:26:718.497 | -0.86 | 2.54  | 3.64          | 323.81 | 13.22           | FTIIE 08:24:27:329.312 | -13.95 | -0.82         | 13.48 | 59.11 | 27.44 |
| GMTL 08:24:27:042.312 | -0.056 | -0.067 | 1.022 | 1.034 | GMTL 08:24:27:671.349 | -0.232 | -0.268 | 0.946 | 0.961 | FTIL 08:24:27:042.312 | -0.81 | 2.58  | 3.62          | 321.00 | 13.22           | FTIIE 08:24:27:671.349 | -12.47 | 0.63          | 12.48 | 58.06 | 27.44 |
| GMTL 08:24:27:349.312 | -0.054 | -0.063 | 1.021 | 1.036 | GMTL 08:24:28:015.344 | -0.224 | -0.234 | 0.941 | 0.974 | FTIL 08:24:27:349.312 | -0.86 | 2.30  | 3.41          | 324.62 | 13.22           | FTIIE 08:24:28:015.344 | -12.13 | 0.67          | 12.15 | 57.57 | 27.44 |
| GMTL 08:24:27:687.344 | -0.052 | -0.062 | 1.021 | 1.034 | GMTL 08:24:28:359.344 | -0.220 | -0.265 | 0.939 | 0.964 | FTIL 08:24:27:687.344 | -0.86 | 2.40  | 3.51          | 320.64 | 13.22           | FTIIE 08:24:28:359.344 | -11.85 | 1.23          | 12.91 | 57.82 | 27.44 |
| GMTL 08:24:28:031.344 | -0.052 | -0.063 | 1.017 | 1.029 | GMTL 08:24:28:705.406 | -0.224 | -0.265 | 0.947 | 0.974 | FTIL 08:24:28:031.344 | -0.82 | 2.11  | 3.32          | 323.42 | 13.20           | FTIIE 08:24:28:705.406 | -11.96 | 1.12          | 12.04 | 58.14 | 27.44 |
| GMTL 08:24:28:375.344 | -0.050 | -0.062 | 1.010 | 1.026 | GMTL 08:24:29:093.328 | -0.220 | -0.210 | 0.957 | 0.990 | FTIL 08:24:28:375.344 | -0.82 | 2.20  | 3.30          | 321.28 | 13.22           | FTIIE 08:24:29:093.328 | -12.18 | 1.11          | 12.23 | 58.35 | 27.44 |
| GMTL 08:24:28:765.390 | -0.052 | -0.063 | 1.002 | 1.019 | GMTL 08:24:29:411.328 | -0.240 | -0.213 | 0.971 | 1.006 | FTIL 08:24:28:765.390 | -0.81 | 2.10  | 3.21          | 320.52 | 13.22           | FTIIE 08:24:29:411.328 | -12.41 | 0.97          | 12.45 | 58.40 | 27.44 |
| GMTL 08:24:29:109.344 | -0.049 | -0.061 | 0.996 | 1.005 | GMTL 08:24:29:761.360 | -0.252 | -0.200 | 0.966 | 1.016 | FTIL 08:24:29:109.344 | -0.78 | 2.24  | 3.41          | 323.72 | 13.22           | FTIIE 08:24:29:761.360 | -12.82 | 0.63          | 13.04 | 58.23 | 27.44 |
| GMTL 08:24:29:427.488 | -0.052 | -0.062 | 0.988 | 1.007 | GMTL 08:24:30:125.344 | -0.258 | -0.218 | 0.954 | 1.012 | FTIL 08:24:29:427.488 | -0.77 | 2.25  | 3.24          | 322.58 | 13.22           | FTIIE 08:24:30:125.344 | -12.68 | 0.48          | 12.69 | 59.92 | 27.44 |
| GMTL 08:24:29:856.113 | -0.052 | -0.066 | 0.982 | 0.992 | GMTL 08:24:30:469.349 | -0.264 | -0.233 | 0.958 | 1.022 | FTIL 08:24:29:856.113 | -0.76 | 2.42  | 3.50          | 324.76 | 13.22           | FTIIE 08:24:30:469.349 | -12.14 | 0.40          | 12.14 | 60.76 | 27.44 |
| GMTL 08:24:30:015.359 | -0.055 | -0.065 | 0.982 | 0.988 | GMTL 08:24:30:849.375 | -0.265 | -0.246 | 0.992 | 1.021 | FTIL 08:24:30:015.359 | -0.70 | 2.42  | 3.49          | 323.69 | 13.22           | FTIIE 08:24:30:849.375 | -14.43 | 0.41          | 14.44 | 60.87 | 27.44 |
| GMTL 08:24:30:359.344 | -0.057 | -0.066 | 0.986 | 0.994 | GMTL 08:24:31:171.328 | -0.262 | -0.232 | 0.984 | 1.014 | FTIL 08:24:30:359.344 | -0.84 | 2.53  | 3.63          | 323.29 | 13.22           | FTIIE 08:24:31:171.328 | -14.26 | 0.47          | 14.27 | 60.82 | 27.44 |
| GMTL 08:24:30:724.375 | -0.058 | -0.070 | 0.994 | 1.005 | GMTL 08:24:31:515.344 | -0.255 | -0.263 | 0.971 | 1.021 | FTIL 08:24:30:724.375 | -0.89 | 2.65  | 3.76          | 321.49 | 13.22           | FTIIE 08:24:31:515.344 | -14.20 | 0.25          | 14.20 | 60.39 | 27.44 |

| Unit Time-stamp       | Depth  | Dmin  | Unit Time-stamp       | Pull | Dmax | Cable Speed | Unit Time-stamp | UL.1                  | UL.2 | UL.3  | UL.4 | UL.5 | UL.6 | UL.7 | UL.8 | UL.9 | UL.10 | UL.11 | UL.12 | UL.13 | UL.14  | UL.15 |       |
|-----------------------|--------|-------|-----------------------|------|------|-------------|-----------------|-----------------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| ALTL 08:24:21:046.203 | 29.840 | 1.036 | GMCL 08:24:20:984.000 | 73.7 | 79.6 | 3281.2      | 0.40            | HREL 08:24:20:859.313 | 0.34 | -0.09 | 0.46 | 0.43 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 16.54 | -10.64 | 0.00  | 11.85 |
| ALTL 08:24:21:390.344 | 26.431 | 1.036 | GMCL 08:24:21:625.641 | 73.9 | 79.6 | 3281.5      | 0.60            | HREL 08:24:21:125.266 | 0.52 | 0.00  | 0.51 | 0.37 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 16.72 | -5.90  | 0.00  | 11.79 |
| ALTL 08:24:21:859.469 | 21.838 | 1.036 | GMCL 08:24:21:984.359 | 73.1 | 79.6 | 3281.7      | 0.60            | HREL 08:24:21:578.453 | 0.57 | -0.07 | 0.34 | 0.46 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 16.74 | -5.95  | 0.00  | 12.49 |
| ALTL 08:24:22:093.234 | 19.954 | 1.036 | GMCL 08:24:21:984.000 | 73.7 | 79.6 | 3281.7      | 0.60            | HREL 08:24:22:021.349 | 0.40 | 0.81  | 0.32 | 0.42 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 16.83 | -5.93  | 0.00  | 12.08 |
| ALTL 08:24:22:218.125 | 52.840 | 1.036 | GMCL 08:24:22:625.641 | 75.0 | 79.6 | 3282.1      | 0.60            | HREL 08:24:22:124.313 | 0.52 | -0.07 | 0.11 | 0.46 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 16.36 | -6.78  | 0.00  | 11.87 |
| ALTL 08:24:22:843.625 | 51.249 | 1.036 | GMCL 08:24:22:984.359 | 75.0 | 79.6 | 3282.3      | 0.40            | HREL 08:24:22:625.393 | 0.52 | -0.08 | 0.55 | 0.47 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 16.35 | -6.78  | 0.00  | 11.87 |
| ALTL 08:24:23:109.266 | 50.121 | 1.036 | GMCL 08:24:22:984.000 | 75.0 | 79.6 | 3282.3      | 0.40            | HREL 08:24:22:890.265 | 0.41 | 0.00  | 0.70 | 0.35 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 16.88 | -8.54  | 0.00  | 12.08 |
| ALTL 08:24:23:312.203 | 49.471 | 1.036 | GMCL 08:24:23:028.844 | 76.4 | 79.6 | 3282.7      | 0.60            | HREL 08:24:23:312.422 | 0.52 | 0.04  | 0.62 | 0.35 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 16.62 | -9.37  | 0.00  | 11.65 |
| ALTL 08:24:24:000.688 | 47.194 | 1.036 | GMCL 08:24:23:984.156 | 76.3 | 79.6 | 3282.8      | 0.60            | HREL 0                |      |       |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |        |       |       |

### 3.3.3 Datenbank

Die Einsatzdatenbank nimmt eine Schlüsselstellung für die sichere Speicherung und die klare Zuordnung und damit die zuverlässige Analyse der gemessenen Daten ein. Die Konzeption der Datenbank hängt daher eng mit der Art und Struktur der zu speichernden und zu analysierenden Daten zusammen. Als Modul der Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) ist die Datenbank in das modulare Gesamtkonzept von *into.contact* zur Erfassung, Visualisierung und Speicherung der Daten und somit Systemanalyse eingebunden (Abb. 22).

Das Datenbank-Modul *into.contact-DB* greift im Betrieb auf die Speicherbereiche des Steuer- und Kontrollmoduls *into.contact-MD* zu. Letzteres dient direkt der Fernsteuerung des beispielhaften Geräteträgers MODUS, ist jedoch durch die bereits erwähnte Programmierung mit LabVIEW nahezu an beliebige (kabelgebundene) Tauchsysteme anpassbar. Wichtig ist die nahtlose Datenübergabe an weitere Module wie das Datenbank-Modul. Eine Vorstellung der einzelnen Formulare der erstellten Datenbankanwendung wurde bereits ausführlich in den beiden Jahresberichten [2] gegeben.

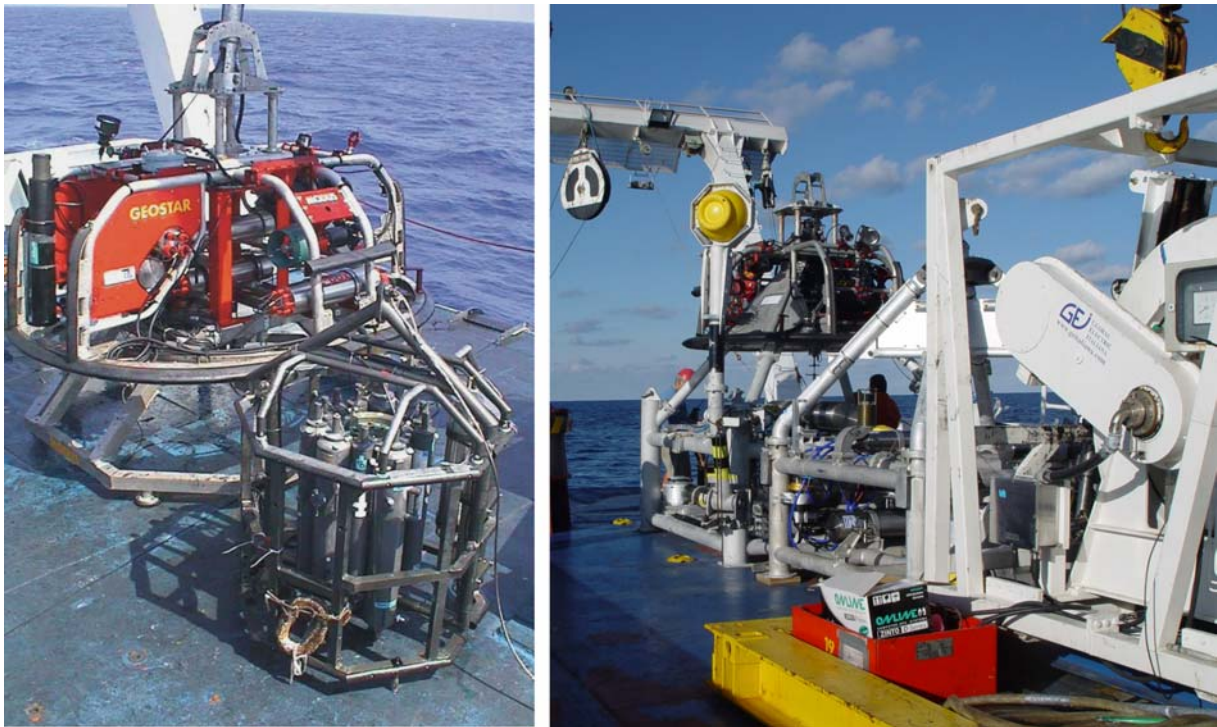
Obwohl sich *into.contact* mit seinen Modulen noch in der Entwicklung befindet, konnte das Grundkonzept während erster Schiffseinsätze im Mai, November und Dezember 2003 verifiziert werden. Diese Anwendungen führten zu Ergänzungen und Änderungen, die die Nutzerfreundlichkeit und die Verwertbarkeit erhöhen konnten. Dies ist ein Prozess, der noch einige Iterationen durchlaufen wird.

Insbesondere konnte das *Client-Server*-Konzept im Laufe der bisherigen Entwicklungen verbessert werden, so dass nun neben der lokalen Verfügbarkeit der Daten bei Messungen im Labor oder bei Einsätzen auf See auch der Betrieb im firmeninternen LAN (*Local Area Network*) reibungslos funktioniert. Der Zugang über das Internet über sogenannte Datenzugriffsseiten ist jedoch bisher nicht implementiert, so dass zunächst die Auslieferung der LAN-Version über CD-ROM erfolgt. Auf die angestrebte Internetversion soll dann in einem nächsten Schritt über die Vergabe von Passwörtern Zugriff bestehen, wenn die immer häufigeren Angriffe durch sogenannte *Viren* oder *Würmer* über das Internet durch z.B. eine *Firewall* abgeblockt werden können.

## 3.4 Feldversuche

Die (kostenneutrale) Mitfahrt bei Schiffseinsätzen mit dem Geräteträger MODUS erlaubt die Anwendung und Bestätigung des neuen Meßsystems; Probleme und Fehler können der Optimierung des Systems dienen. Im Mai sowie im Herbst/Winter 2003 wurden erstmals Projekteinsätze zur systematischen Registrierung realer Größen bei Tauchfahrten mit dem neuen Meßsystem genutzt. Verantwortlich waren das durch das

italienische Forschungsministerium geförderte Projekt GNDT sowie die durch die EU geförderten Projekte BIODEEP und ORION. Einsatzgebiet beim erstem Projekt war das Seegebiet östlich von Sizilien mit Tauchtiefen bis 2.250 m, beim nächsten das östliche Mittelmeer mit Tauchtiefen bis zu 3.700 m, während bei dem letzten das Tyrrhenische Meer nördlich von Sizilien mit Tauchtiefen bis zu 3.500 m das Zielgebiet war. Eindrücke von diesen Einsätzen sind Abb. 26 zu entnehmen.



*Abb. 26: Der Geräteträger MODUS im Tiefseeinsatz mit BIODEEP-Probenahmerosette (links) mit den beiden Bodenstationen des Projektes ORION (rechts) an Deck der R/V Urania*

### 3.4.1 Tauchkonfigurationen

Der MODUS-Geräteträger lässt sich bedarfsgerecht *stand-alone* oder auch gekoppelt mit unterschiedlichen Nutzlastmodulen einsetzen. Die Bezeichnungen sowie die wichtigsten Dimensionen der genutzten Module wie Größe, Masse, Gewicht in Seewasser und die Sensoren sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Aus der Vielzahl der bisher durchgeführten Tauchfahrten wurden Messergebnisse folgender Konfigurationen (Tabelle 3) näher untersucht:

Tabelle 3: Konfigurationen der registrierten Tauchgänge

| Tauchmodule  | (Gesamt-) Masse [kg] | (Gesamt-) Gewicht [N] | Einsatzmonat<br>Einsatzort<br>Einsatzzweck                              | registrierte Tauchphasen   | Dauer der Tauchphasen ca. [min]  | durchschnittliche Umweltparameter (ca.-Werte)                                   |
|--|----------------------|-----------------------|---|--|----------------------------------|---|
| <i>Umbilical</i><br>[pro m]                          | 2,276                | 18,3                  | -   | s. u.<br>auch mit <i>slack</i>                                   | s. u.                            | s. u.   |
| <b>MODUS</b><br><i>stand-alone</i><br>(Version GEO2) | 1090                 | 7350                  | s. u.;<br>s. u.;<br>Tests + Transits<br>von/zu<br>Stationen             | - Fieren<br>- Horizontal-<br>fahrt /<br>Schleppfahrt<br>- Hieven | max. 110<br>max. 110<br>max. 110 | s. u.   |
| <b>MODUS + BS</b><br>(GNDT-SN1)                      | 2523                 | 15551                 | Mai 2003;<br>östlich Sizilien;<br>Bergen der<br>Station                 | - Hieven   | 70                               | Wind: 4,2 m/s,<br>Wellenhöhe: 0,6 m<br>Wellen/Schiff: 180°<br>Wassertemp.: 18°C |
| <b>MODUS + BS</b><br>(ORION-N2)                      | 2747                 | 17101                 | Dezember 2003<br>nördl. Sizilien;<br>Absetzen der<br>Station            | - Fieren   | 95                               | Wind: 2,7 m/s,<br>Wellenhöhe: 0,4 m<br>Wellen/Schiff: 180°<br>Wassertemp.: 11°C |
| <b>MODUS + BS</b><br>(ORION-N1)                      | 3861                 | 20829                 | Dezember 2003<br>nördl. Sizilien,<br>Absetzen + Ber-<br>gen der Station | - Fieren<br>- Fieren +<br>Hieven                                 | 100<br>270                       | Wind: 3,3 m/s,<br>Wellenhöhe: 0,5 m<br>Wellen/Schiff: 180°<br>Wassertemp.: 11°C |

### 3.4.2 Registrierungen

Die folgenden Abbildungen zeigen Registrierungen der Last am oberen Kabelaufhängepunkt mit den zugehörigen Kabellängen für drei verschiedene Tauchkonfigurationen. In Abb. 27 taucht MODUS ohne zusätzliche Last zum Zwecke der Video-Observation des Meeresgrundes.

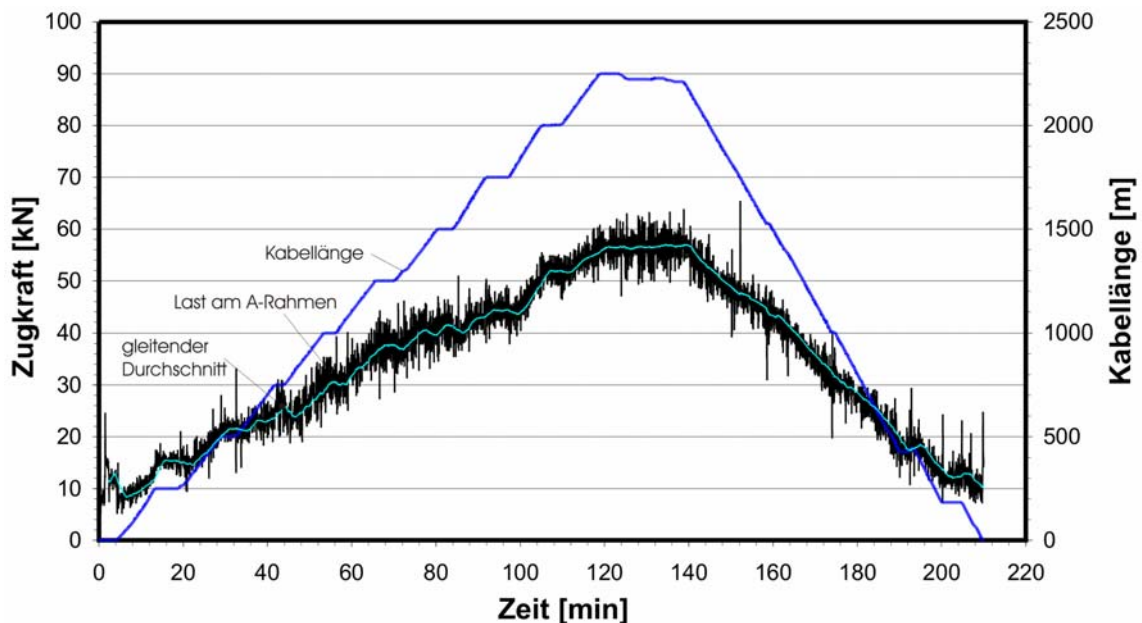


Abb. 27: Last am A-Rahmen und Kabellänge für eine Testtauchfahrt mit MODUS, Stopps alle 250 m, maximale Kabellänge 2.250 m ( $m_{MD} = 1.090$  kg)

Deutlich ist die geringe Schwankungsbreite der Kraftoszillationen während der gesamten Tauchfahrt zu erkennen, da sich die Gesamtmasse des getauchten Systems allein durch die konstante Zu- und Abnahme der Kabelmasse und nicht durch die angehängte Masse ändert. Zur Identifikation rein kabellängenabhängiger Vertikaloszillationen wurde das Fieren alle 250 m für ca. 3 bis 5 min gestoppt. Hier wirken sich allein die durch den Seegang induzierten Schwingungen bei konstanter Kabellänge auf das getauchte System aus.

Eine andere Situation zeigt Abb. 28, in der die Kräfte am oberen und unteren Aufhängepunkt und der Kabellängenverlauf für den Bergungstauchgang der GNDT-SN1-Bodenstation aufgetragen sind. Das Fieren erfolgt also mit MODUS *stand-alone*, gefolgt von der Annäherungs- und Ankoppelphase und dem anschließenden Hieven an Deck des Schiffes. Deutlich ist der Lastsprung bei dem Anheben der Station vom Meeresgrund in den Lastschrieben zu erkennen. Die hier geborgene Station ist mit der Masse  $m_{BS} = 1.433$  kg die leichtere der drei eingesetzten Stationen.

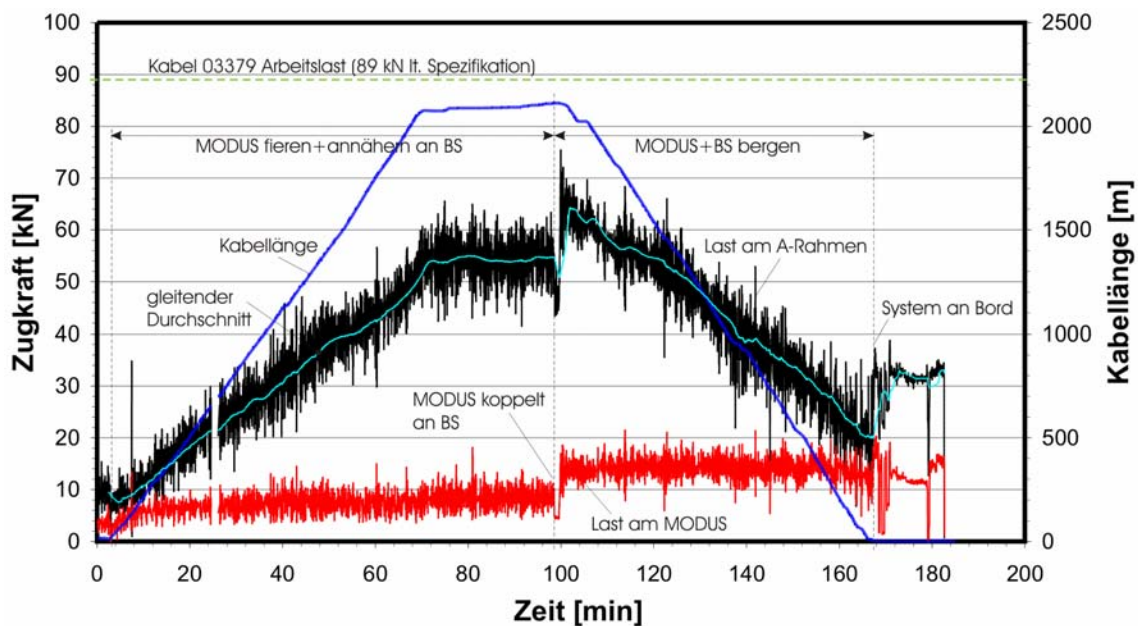


Abb. 28: Bergung der Bodenstation GNDT-SN1 mit MODUS  
Kraftverläufe am oberen und unteren Aufhängepunkt und Kabellänge  
maximale Kabellänge 2.112 m ( $m_{MD} = 1.090$  kg,  $m_{BS} = 1.433$  kg)

Die Abbildungen 29 und 30 zeigen Absetzvorgänge die beiden ORION-Stationen mit Massen von 1.657 kg bzw. 2.771 kg, maximale Kabellänge 3450 m ( $m_{MD} = 1090$  kg,  $m_{BS} = 2771$  kg). Bei diesen Tauchgängen wurden die Stationen jeweils auf Grund gebracht, d.h. das Fieren erfolgte mit der großen Last aus MD plus BS, wohingegen das Hieven nur mit MD erfolgte. Als Folge sind unterschiedliche Schwankungsbreiten der Kraftoszillationen für Fieren und Hieven zu erkennen. Die Entlastung des Systems beim Stehen auf Grund zeigt deutlich den Einfluss der Stationen auf die Lasten und das Schwingungsverhalten.

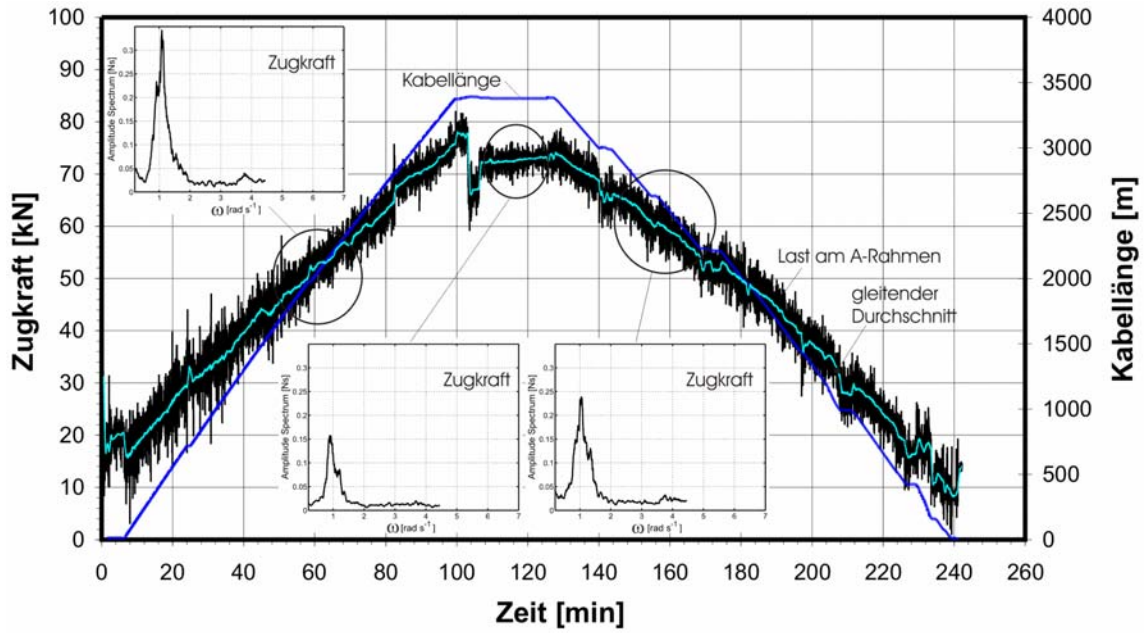


Abb. 29: Last am A-Rahmen, Kabellänge und beispielhafte Amplitudenspektren für das Absetzen der Bodenstation ORION-N2  
maximale Kabellänge 3.450 m ( $m_{MD} = 1.090$  kg,  $m_{BS} = 1.657$  kg)

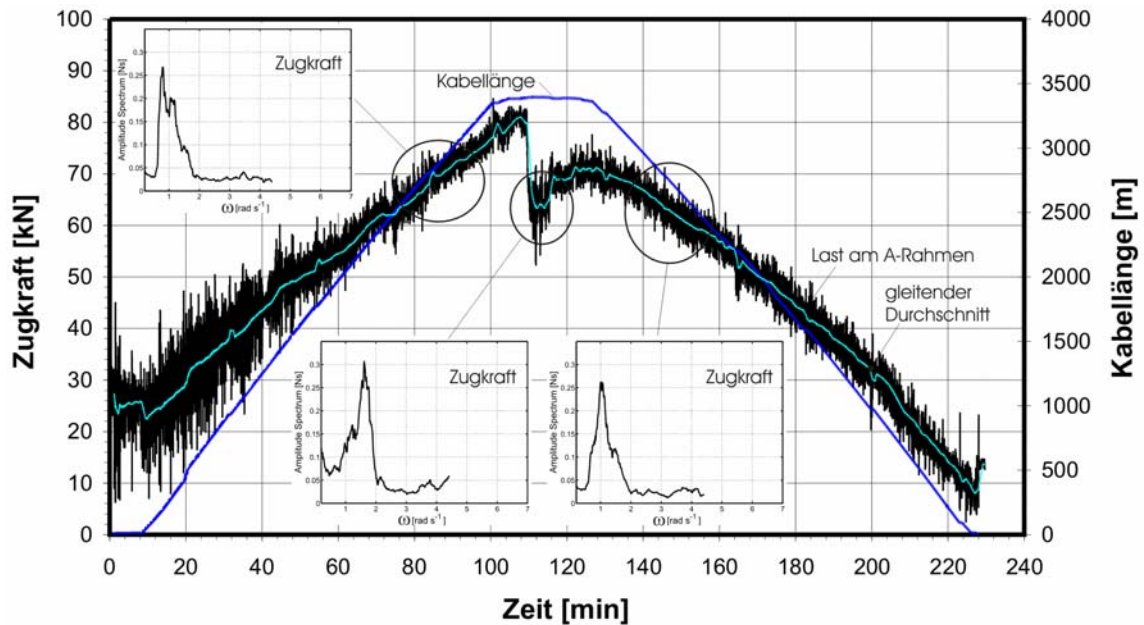


Abb. 30: Kraftverlauf am oberen Aufhängepunkt, Kabellänge und beispielhafte Amplitudenspektren für das Absetzen der Station ORION-N1,  
maximale Kabellänge 3 450 m ( $m_{MD} = 1.090$  kg,  $m_{BS} = 2.771$  kg)

Abb. 30 zeigt die weiteste Aufspreizung der Kraftoszillationen beim Fieren durch die bisher größte Gesamtmasse des Tauchsystems, nämlich

$$\begin{aligned}
 m_{ges} &= m_{MD} + m_{BS} + m_{hy} + m_K \cdot l/3 \\
 &\approx 1.090 \text{ kg} + 2.771 \text{ kg} + 5.500 \text{ kg} + 2,28 \text{ kg} \cdot 3.450 \text{ m} / 3 \approx 11.983 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

am tiefsten Punkt (mit der Masse von MODUS  $m_{MD}$ , der Masse der Bodenstation  $m_{BS}$ , der von der Länge abhängigen Kabelmasse  $m_K$  und der hydrodynamischen Masse  $m_{hy}$ ). Zudem ist in den Amplitudenspektren ein signifikanter Sprung in der Schwingungsfrequenz zwischen dem am Boden stehenden und dem frei hängenden System zu erkennen, der die Tendenzen aus den Modellversuchen bestätigt.

Die in den Abbildungen 29 und 30 ergänzten Frequenzspektren der Kraftoszillationen am A-Rahmen für verschiedene Phasen und ähnliche Kabellängen bestätigen die Schwingungsgleichung, nach der der Anstieg der Masse zur Verringerung der Schwingungsfrequenz führt. Dies wird umso deutlicher sichtbar, je größer der Masseunterschied (hier durch Auswechslung der Bodenstationen) ausfällt:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{EA}{l(m_{MD} + m_{BS} + m_{hy} + lm_K / 3)}}$$

$$\omega_R = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2},$$

mit der Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$ , der Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung  $\omega_R$ , der Abklingkonstanten  $\delta$ , der Dehnsteifigkeit des Kabels  $EA$ , den einzelnen Masseanteilen (s. o.) und der Kabellänge  $l$ .

Die Entstehung sogenannter *slack*-Situationen kann verschiedene Ursachen haben. Als betriebsbedingte Ursache sind Änderungen der Drehgeschwindigkeit oder Stopps der Windentrommel zu identifizieren (Abb. 31).

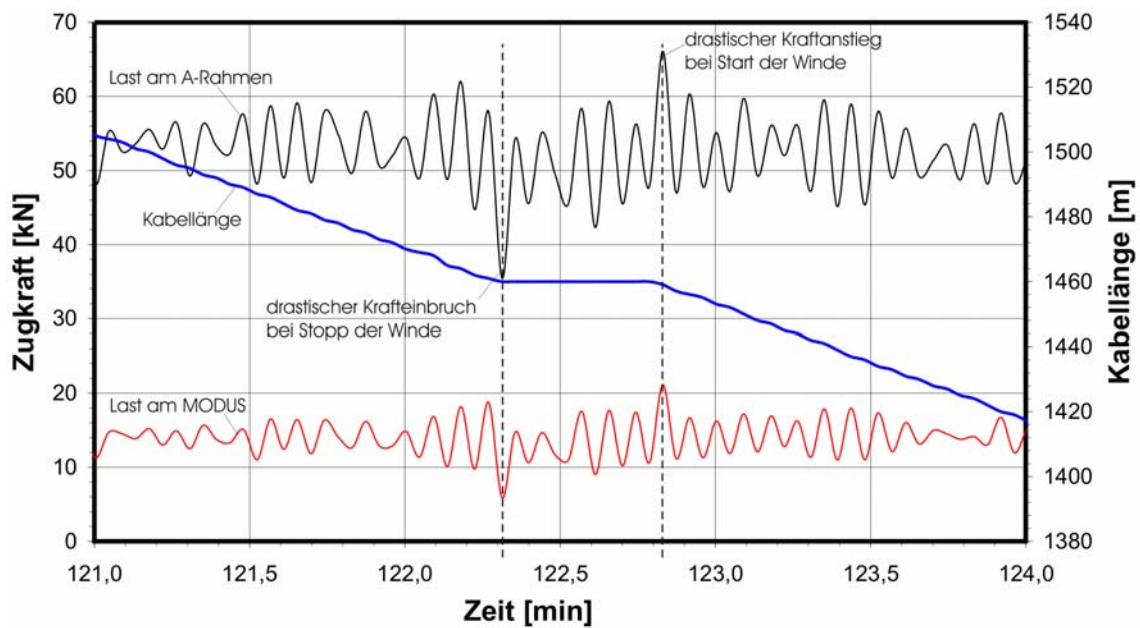


Abb. 31:

*Drastische Änderung der Zugkraft am oberen und unteren Kabelende als Folge von Windenmanövern beim Hieven, Kabellänge 1.460 m ( $m_{MD} = 1.090$  kg,  $m_{BS} = 1.433$  kg), Detail aus Abb. 28*

Da vollkommen gleichmäßiges Ab- und Aufrollen des Kabels nicht erreichbar ist, müssen das Kabel und der obere Aufhängepunkt am A-Rahmen die hieraus resultierenden z.T. drastischen peitschenartigen Zugkraftanstiege (*snap-loads*) verkraften können. Auch bei ‚ungestörter‘ Transifahrt können diese gefürchteten Phänomene auftreten, wie Abb. 32 zeigt.

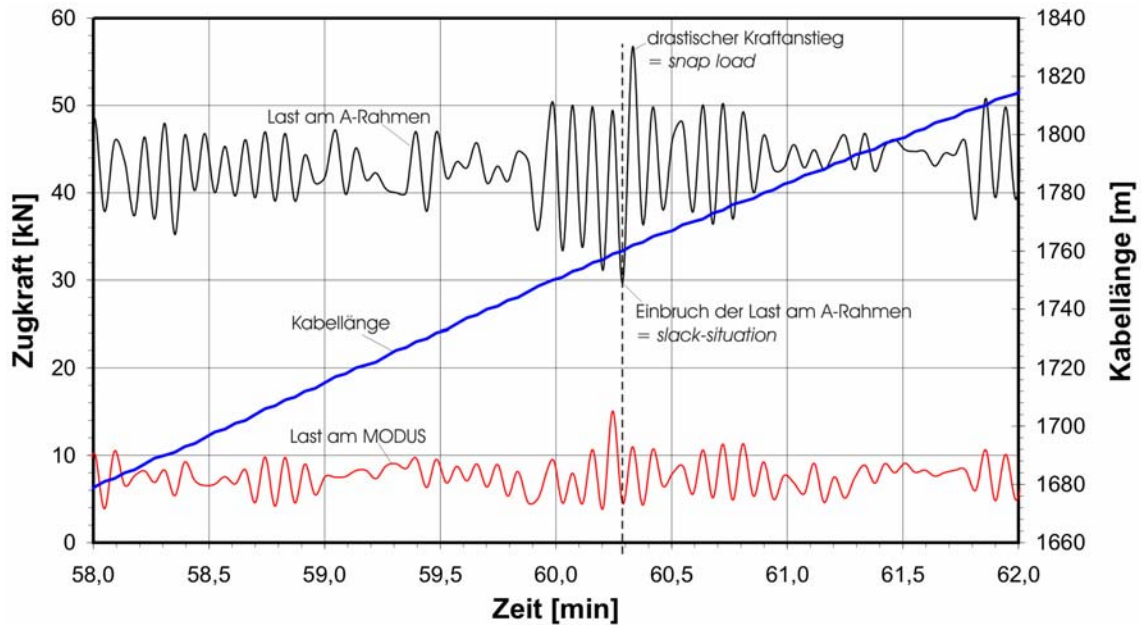


Abb. 32:

*Drastischer Anstieg der Zugkraft am A-Rahmen als Folge einer slack-Situation beim Fieren, Kabellänge 1.760 m ( $m_{MD} = 1.090$  kg), Detail aus Abb. 28*

In dem Beispiel wird der Geräteträger ohne besondere Unterbrechungen mit bis zu 36 m/min gefiert. Dieses Tempo sorgt beim Fieren für ein stetiges ‚Aufschwimmen‘ auf der Druckwelle, die sich vor dem offenen Konus von MODUS ausbildet. Als Antwort auf die Vertikalschwingungen des Schiffes und Kabels in einem Wellenset kann sich die Antwortschwingung des Geräteträgers zu einem kurzen *Peak* am unteren Kabelende potenzieren, am oberen Kabelende gefolgt zunächst von einem Einbruch der Last und direkt darauf von einer Peitschenlast. Aufgrund der geometrie- und frequenzabhängigen starken Dämpfung der vertikalen Bewegungen von MODUS erreichen die Kraftamplituden am unteren Kabelende nicht annähernd den Umfang wie am oberen Kabelende in dem hier vorliegenden, kabellängenabhängigen Frequenzbereich.



## 4 Gegenüberstellung der Ziele und Ergebnisse

| Ziele   | Ergebnisse   | Abweichungen   | Kommentare   |
|---|--|--|--|
| Aufbau eines numerischen CFD-Modells und Simulationen                         | CFD-Diskretisierungen für die Maßstäbe 1:5 und 1:1 wurden erstellt. Berechnet wurden jeweils drei Fahrtrichtungen: abwärts, horizontal und aufwärts für mehrere Geschwindigkeiten. | Die Ergebnisse liegen im Bereich der Erwartungen. Abweichungen von Messwerten in der Quantität sind jedoch besonders bei den Modellen zu verzeichnen.                          | Aufgrund numerischer Instabilitäten erwiesen sich die Berechnungen für das Modell in 1:5 als problematisch. Gesonderter Untersuchungsbedarf besteht bzgl. optimaler Turbulenzmodelle, Relaxationsparameter.  |
| Modellversuche zur Bestimmung von Kräften und Wegen im Tiefseeinsatz          | Zwei Modelle im Maßstab 1:5 und 1:3 wurden erstellt und mit äquivalenten Federsystemen für zwei diskrete Tauchtiefen im Schwingversuch untersucht.                                 | -  | Die Modellierung äquivalenter Federsysteme für die maximale Tauchtiefe des Geräteträgers stellt eine bedeutende Herausforderung an das Material und das Konzept dar. Ein evtl. Wandeeinfluss des Tanks auf die Ergebnisse z.B. der hydrodyn. Masse konnte nicht näher bestimmt werden. |
| Validierung/Anpassung eines vorhandenen Simulationsprogramms                  | Die simulierten Ergebnisse zeigen – nach Parameteranpassung – recht gute Übereinstimmung mit Modellversuchen. Es fehlen noch intensive Vergleiche mit Felddaten.                   | Durch Verlegung von Schiffsfahrterminen in das letzte halbe Jahr des Projektes konnten noch keine intensiven Validierungen vorgenommen werden.                                 | Die weitere Anpassung des Algorithmus bedarf intensiver Einarbeitung und weiterer Validierungen anhand Feldeinsatzdaten. Sinnvoll wäre an diesem Punkt ein Folgeprojekt.   |
| Aufbau eines Mess-Systems zur Online-Registrierung von Dynamikdaten           | Konzept zur online Registrierung von Dynamikdaten und Gesamtsystem aus Hard- und Software für das obere und untere Kabelende wurden erstellt.                                      | -  | Dynamikdaten der Messmodule liegen mit unterschiedlichen Datenraten und –frequenzen etc. vor. Im vorliegenden System wurden z. T. Kompromisse bzgl. Lese- und Schreibrate getroffen. Hier sind noch weitere Optimierungen und ausgiebige Tests vonnöten.                               |
| Entwicklung/Bau benötigter Messmodule   | Module zur online Registrierung der Kräfte, Beschleunigungen, Drücke, am oberen und unteren Kabelende wurden erstellt.   | Wünschenswert sind Messmodule zur Registrierung der Lagereferenz über Grund und relativ zum Schiff.  | Aufgrund der besonderen Umwelteinflüsse sind u. a. DMS-Klebung unter Aussendruck $\geq 400$ bar sehr problematisch. Hier muss der Montageprozess weiter optimiert werden.  |
| Registrierung von Einsatzparametern der Großausführung bei Tiefseetauchgängen | Registrierung der axialen Kräfte und der 2-achsigen Beschleunigungen am oberen und unteren Kabelende.  | Die Kraftmessung am unteren Modul versagte nach den ersten Tauchgängen, da sich die DMS-Klebung löste. Die unteren Kraftregistrierungen sind somit nur bedingt aussagekräftig. | Module zur 2-achsigen Beschleunigungsmessung sind durch 3-achsige zu ersetzen. Die Montage der Messmodule am Messort sollte einem strengen Regiment unterliegen und einem standardisierten Prüfprozess bzgl. Einbaulage, Anschlüsse usw. unterliegen.                                  |
| Aufbau einer Ergebnisdatenbank  | Die erstellte Datenbank umfasst neben den Einsatzdaten auch allgemeine relevante Infos zu Entwicklung und Bau kabelgebundener Geräteträger.  | -  | Die Nutzbarkeit der Datenbank kann durch geeignete interne gefilterte Abfragen noch weiter gesteigert werden. Dies kann ohne weiteres im Rahmen kommender Bemühungen geschehen.  |
| Optimierung der Entwurfsgrößen eines Tiefseeeräteträgers                      | Ein sogenannter Ereignisraum zur Definition des Gütekriteriums für dynamische Bewegungsparameter kabelgebundener Geräteträger wurde erstellt.                                      | Eine Optimierung im mathematischen Sinne konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit noch nicht erstellt werden.  | Es sind weitere Arbeiten zur Definition von Gütekriterien und Nebenbedingungen vonnöten, die mit z.B. einer automatisierten Parameterstudie zur Optimierung führen können.   |

## 5 Umsetzung und Nutzung der Forschungsergebnisse

Die Erkundung der Tiefsee im Hinblick auf die verstärkte Nutzung der Energie- und Rohstoffressourcen (z. B. Gashydrate, Öl, Erdgas, u. a. Naturstoffe) wie auch im Rahmen von Initiativen zur globalen Datenerhebung (GOOS, EuroGOOS) für den kommerziellen und nichtkommerziellen Einsatz der Langzeitbodenstationen nimmt einen steigenden Stellenwert ein. Die oft multidisziplinären Bodenstationen erlauben es, zeitliche und räumliche Gradienten spezifischer Messgrößen am Tiefseeboden zu erfassen. Zahl und Art der Sensoren und Probenehmer führen jedoch oft zu schwergewichtigen Stationen (z. B. GEOSTAR Bodenstation bis zu ca. 1,5 t in Wasser), die exakt nur mit kabelgebundenen Geräteträgern positioniert werden können. Die Kenntnis der limitierenden Einsatzbedingungen von kabelgebundenen Tiefseegeräteträgern ist daher unbedingte Voraussetzung für die Entwicklung und den Bau erfolgreich operierender Systeme. Bisher sind erst wenige solcher Systeme für Wassertiefen über 3.000 m realisiert worden.

Mit dem MODUS steht ein funktionsfähiger Prototyp zum Einsatz und zur weiteren Erprobung zur Verfügung. Aufgrund seiner einfach zugänglichen und erprobten mechanischen und elektronischen Schnittstellen, hoher Tragfähigkeit, Online-Kontrolle während der gesamten Operationsdauer und guten Positionierbarkeit ermöglicht MODUS die Aufnahme völlig unterschiedlicher Bodenstationstypen. Das Trägersystem MODUS kann somit zum Aufbau eines validierten numerischen Modells sowie einer verlässlichen Datenbasis zur Konzipierung weiterer Tiefseesysteme dienen.

Die Versuchsergebnisse für die Modelle und den Prototyp wurden ausführlich dokumentiert und werden Interessenten in einer Datenbank (*into.contact-DB*) zur Verfügung gestellt. Die Zugriffsmöglichkeit auf die Daten soll im wesentlichen über zwei Kanäle ermöglicht werden:

- Anlegen einer lokal an der TU Berlin betreuten, d.h. funktionsfähig gehaltenen und aktualisierten Datenbank. Der Zugriff auf den Datenbank-Server erfolgt über das Internet durch einen zu schaffenden Link auf der Homepage des Instituts für Land- und Seeverkehr - Fachgebiet Meerestechnik - (z.Z.: <http://www.ism.tu-berlin.de/>). Der Zugriff kann je nach Bedarf über zu vergebende Passworte geregelt werden. Die Einrichtung der Datenbank erfolgt mit Hilfe der kommerziellen Software MS Access. Hiermit wird dem Nutzer die systematische, verknüpfte Ergebnissuche in der Datenbank und die Speicherung der Suchergebnisse in Dateien mit weit verbreiteten Dateiformaten (z.B. MS Access-mdb, dBASE-dbf, Lotus123-wk\*, MS Excel-xls, html, andere ODBC-Datenbanken usw.) zur Weiterverwendung ermöglicht. Durch automatische Kommentare oder Hilfefunktionen (sogenannte Assistenten) kann die Nutzerführung erfolgen.

- Die Datenbankdatei wird auf Anfrage auf CD-ROM versandt. Die lokale Installation der Datenbank erfordert die Datenbanksoftware MS Access (enthalten im weit verbreiteten MS Office-Paket) mit entsprechender Softwarelizenz beim Nutzer. Die Nutzung der Datenbank folgt den oben gemachten Ausführungen. Aktualisierungen der Datenbank können im Rahmen von zu vereinbarenden Regelungen mit dem Institut für Land- und Seeverkehr (Fachgebiet Meerestechnik) bezogen werden.

Die erzielten Ergebnisse lassen sich wie folgt nutzen:

- In einer Online-Ergebnisdatenbank mit Zugriff über das Internet zur Konzeption/Validation kommerziell oder wissenschaftlich genutzter numerischer Modelle und Simulationsprogramme für kabelgebundene Systeme und deren Windensteuerungen – FGs Konstruktion, Produktion - Ingenieurdienstleistungen.
- Bei der Konzeption von Neubauprojekten: kabelgebundene Tiefseeeräteträger, Winden, *Launch And Recovery Systems* (LARS), Multifunktionskabel (*Umbilical*), Tiefsee-Bodenstationen für wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung – FGs Konstruktion, Produktion, Regeltechnik - Maschinenbau.
- Zum Erarbeiten von Empfehlungen für den Betrieb solcher Anlagen, z.B. Abbruchkriterien für den Tauchgang bei Schlechtwetter und verstärktem Seegang, Gestaltung von mechanischen Schnittstellen usw. – FGs Meß-, Regel-, Automatisierungstechnik.
- Die Kenntnis der dynamischen Einsatzgrenzen komplexer kabelgebundener Trägersysteme ermöglicht die Anpassung der Komponenten/Ausrüstung an das Aufgabenprofil schon vor Ablegen des Schiffes, wodurch die Ausweitung der Operationszeiten in der jeweiligen Einsatztiefe (Vermeidung von Aufschaukelvorgängen) und somit die Optimierung der Schiffseinsätze zu erreichen ist.
- Die Kenntnis der nichtlinearen hydroelastischen Eigenschaften des gekoppelten Systems dient zur Validierung von Simulationsprogrammen wie sie z.B. bei Systemen zur Seegangskompensation und elektronisch gesteuerten Winden genutzt werden.
- Das exakte Absetzen technischer Strukturen in der Tiefsee stellt, anders als das Betreiben von schwebenden oder geschleppten Systemen (z.B. Schleppfischen), eine besondere Herausforderung dar. Die Kenntnis der hydrodynamischen Einsatzparameter und der nichtlinearen hydroelastischen Eigenschaften des kabelgebundenen Trägersystems bedeutet den Schutz der Systeme (der Investitionen) durch die Reduzierung der Gefahr von Schäden oder sogar von Systemverlusten, die sich leider nicht selten ereignen.
- Die Kenntnis der Systemeinsatzbedingungen bedeutet grundsätzlich die Erhöhung der Qualität der Tiefsee-Einsätze für Meeresforschung oder Rohstoffgewinnung. Dies führt im allgemeinen zu einer Reduzierung der notwendigen

mehrständigen Tauchgänge zum Erreichen der geforderten Ziele und somit zu nicht unerheblichen Kosteneinsparungen auf der Operationsseite.

- Der Markt für Trägersysteme wie auch für wissenschaftliche Bodenstationen für die Tiefsee ist bisher begrenzt. Die Komponentenhersteller sind fast durchweg kleine und mittlere Unternehmen. Der Nutzen aus technologischem Vorsprung kann folglich in kurzer Zeit zur Festigung der Firmenposition, wenn nicht sogar zur Dominanz auf diesem überschaubaren Marktsegment führen.

## 6 Literatur

- [1] Beranzoli, L., Braun, T., Calcara, M., Casale, P., de Santis, A., D'Anna, G., Di Mauro, D., Etiope, G., Favali, P., Fuda, J.-L., Frugoni, F., Gamberi, F., Marani, M., Millot, C., Montuori, C., Smriglio, G. (2003):  
Mission results from the first GEOSTAR observatory (Adriatic Sea 1998). *Earth Planets Space*, 55, 361-373, 2003.
- [2] Clauss, G.F., Hoog, S. (2003, 2004):  
Dynamische Analyse der hydroelastischen Eigenschaften kabelgebundener Tiefseegeräteträger. *Jahresberichte Nr. 1 und Nr. 2 zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13273 N*, gefördert durch das BMWA.  
Erhältlich beim Center of Maritime Technologies e.V., Hamburg
- [3] GEOSTAR (2001):  
GEophysical and Oceanographic Station for Abyssal Research. EU-project in framework MAST III-DG XII CT95-0007 (GEOSTAR 1) and MAST III-DG XII CT98-0183 (GEOSTAR 2), 1995-2001.
- [4] Gerber, H.W., Schulze, D. (1998):  
GEOSTAR – Development and test of a deployment and recovery system for deep-sea benthic stations. *Proceedings Oceans '98 Conference, Nice (France), September 1998*.
- [5] Hoerner, S. F. (1965):  
Fluid-Dynamic Drag. Vom Autor herausgegeben 1965, per Internet zu bestellen unter Hoerner Fluid Dynamic, P.O. Box, Phone/Fax: (661)665-1065,  
[Hfdy@aol.com](mailto:Hfdy@aol.com), (<http://members.aol.com/hfdy/home.htm>).
- [6] LabVIEW, Vers. 7.0 (2003):  
Software von National Instruments Germany GmbH, München, 2003.
- [7] Linke, P., Pfannkuche, O. (2000):  
Videogesteuerte Positionierung und Einsatz von Landersystemen in der Tiefsee. Vorge stellt bei: *Meeresforschungstechnik 2000 plus*, 1. Norddeutsches Symposium, 13. Jan. 2000, Kiel, Geomar ([www.geomar.de](http://www.geomar.de)).
- [8] Luthra, G. (1970):  
Modellfamilien-Untersuchung zur Ermittlung der Erhöhung des zähigkeitsbedingten Widerstands auf flachem Wasser. *Schiff und Hafen*, S. 1007, 1970.
- [9] Pearl, J., Winegarden, C. (2000):  
Underwater Vehicles in the Scientific Arena.  
Aus: *UnderWater Magazine* ([www.diveweb.com](http://www.diveweb.com)), Reprint, Sept/Oct 2000.
- [10] Priede, I.G. (1998):  
ALIPOR – Autonomous Lander instrument platforms for oceanographic research. 3rd MAST Conference, Lisbon, 1998.

- [11] Tengberg, A. de Bovee, F., Hall, P., Berelson, W., Chadwick, D., Ciceri, G., Crassous, P., Devol, A., Eemerson, S., Gage, J., Glud, R., Graziottini, F., Gundersen, J., Hammond, D., Helder, W., Hinga, K., Holby, O., Jahnke, R., Khripounoff, A., Lieberman, S., Nuppenau, V., Pfannkuche, O., Reimers, C., Rowe, G., Sahami, A., Sayles, F., Schurter, M., Smallman, D., Wehrli, B., de Wilde, P. (1995):  
Benthic chamber and profiling landers in oceanography – A review of design, technical solutions and functioning. Prog. Oceanog., Vol. 35, pp. 253-294, Elsevier Science Ltd., Oxford, 1995.
- [12] WAMIT, Vers. 5.1 (1994):  
Wave Analysis M.I.T. Software des Department of Ocean Engineering Mass. Institute of Technology, Massachusetts.

Veröffentlichungen im Rahmen des Forschungsvorhabens:

- [13] Clauss, G. F., Hoog, S., Stempinski, F., Gerber, H.W.:  
Advanced Deepwater Intervention with MODUS –Latest Results from Model Tests and Full-Scale Operations. 14th (2004) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Paper 2004-MP-10, May 23-28, 2004, Toulon, France
- [14] Präsentation von MODUS anlässlich der Eröffnung des Jahres der Technik, Deutsches Technikmuseum Berlin, anwesend u. a. die Ministerin für Bildung und Forschung, 28.01.2004.
- [15] Clauss, G. F., Hoog, S., Vannahme, M., Gerber, H. W., Gasparoni, F., Calore, D.:  
MODUS: Space Shuttle for Deep-Water Operations, Journal of Marine Technology (SNAME), Vol. 40, No. 3, July 2003, pp.218-228.
- [16] Clauss, G. F., Hoog, S., Gerber, H. W.:  
MODUS - Ein Schwerlast-ROV für das Ausbringen und Bergen von Tiefsee-Stationen. Vortrag auf der 97. Hauptversammlung der Schiffbautechnischen Gesellschaft (STG), Hamburg, 20. - 22. November 2002.
- [17] Clauss, G. F., Hoog, S., Gerber, H. W.:  
MODUS for Deepwater Interventions – 4000 m wd. – from Design to Scientific Application. 10th (2002) International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM), Paper No. 67, Crete, Hellas, May 13-17, 2002.