

Sven Hoog

Ein Beitrag zur dynamischen Analyse
der hydroelastischen Eigenschaften
kabelgebundener Tiefseegeräteträger



Berlin 2005

D 83

EIN BEITRAG ZUR DYNAMISCHEN ANALYSE DER
HYDROELASTISCHEN EIGENSCHAFTEN
KABELGEBUNDENER TIEFSEEGERÄTETRÄGER

von

Dipl.-Ing. Sven Hoog

am Institut für Land- und Seeverkehr (ILS),
Fakultät V, der
Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionssausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nitsche

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Günther F. Clauss

Prof. Dr.-Ing. Hans W. Gerber

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 08.07.2005

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Land- und Seeverkehr (ILS), Fachgebiet Schiffs- und Meerestechnik der Technischen Universität Berlin.

Mein herzlicher Dank gilt den Herren Prof. Dr.-Ing. Günther F. Clauss vom ILS sowie Prof. Dr.-Ing. Hans W. Gerber vom FB VIII (Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik) der Technischen Fachhochschule (TFH) Berlin, für deren nicht nachlassende wissenschaftliche Förderung, Ihre Geduld und die menschliche Betreuung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nitsche danke ich sehr für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Des Weiteren bedanke ich mich herzlich bei allen Mitarbeitern am Fachgebiet, seien es Wissenschaftler, technische und verwaltende Angestellte oder Studenten, die mir und den von mir begleiteten Forschungsvorhaben in den letzten Jahren tatkräftig zur Seite standen.

Frau Ingrid Meifert sowie Ihrer Nachfolgerin Frau Kornelia Tietze gebührt mein Dank für Ihre Unterstützung bei den zahlreichen kleineren und größeren administrativen Fragen rund um MODUS, sowie Ihre aufmunternden Worte.

Mein Dank gilt Frau Dr.-Ing. Katja Jacobsen sowie den Herren Dr.-Ing. Martin Vannahme, Dr.-Ing. Rolf Habel und Dipl.-Ing. Christian Schmittner für Ihren freundschaftlichen Rat und den wissenschaftlichen Gedankenaustausch. Bei meinem Büronachbarn Herrn Dipl.-Ing. Wilfried Langner bedanke ich mich besonders für den jahrelangen freundschaftlichen Austausch und die Zusammenarbeit bei allen Themen, die zur konkreten Durchführung der verschiedenen Forschungsvorhaben und den zugehörigen Seeinsätzen relevant waren. Den Herren Jürgen Heeg, Uwe Brandes, Peter Longerich und Dipl.-Ing. Haiko de Vries bin ich für ihre engagierte und kooperative Unterstützung beim Bau von Versuchsvorrichtungen, Steuerungen und Messsystemen zu Dank verpflichtet. Ebenso danke ich den Mitarbeitern der ZE VWS Berlin für die Hilfe bei der Vorbereitung und Durchführung der Schleppversuche, in den kurz vor der Schließung befindlichen Versuchseinrichtungen der Schleuseninsel.

Ich danke meiner Frau Kerstin und meinen beiden Kindern Ennio und Maya sowie meiner gesamten Familie für ihre Geduld, Ihre Liebe, den Zuspruch und Ansporn während der letzten Jahre.

Die Entwicklung und der Bau des MODUS-Geräteträgers erfolgte in enger Kooperation zwischen TU Berlin und TFH Berlin mit Forschungsmitteln der EU im 5. Forschungsrahmenprogramm (MAST III). Die Untersuchungen zur Dynamik des Systems wurden über mehrere Jahre u. a. durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMW A) finanziert. Mein Dank gilt hier den Projektpartnern aus dem Europäischen Ausland, ohne die die Messkampagnen bei Seeinsätzen nicht möglich gewesen wären.

Sven Hoog

Berlin im Juli 2005

KURZFASSUNG

Die Eroberung der Tiefsee (oder des *inner space* in Analogie zum *outer space* – dem Weltraum) wird technologisch maßgeblich im Zusammenhang mit der Exploration und Exploitation neuer Offshore-Vorkommen durch die Öl- und Gasindustrie vorangetrieben. Eine Schlüsselrolle fällt dabei den so genannten *Unmanned Underwater Vehicles* (UUVs) zu, wozu neben den *Autonomous Underwater Vehicles* (AUVs) auch die *Remotely Operated Vehicles* (ROVs) gehören. Letztere traten vor ca. 30 Jahren ihren Siegeszug in die Tiefe der Meere an 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, etc.). Ein Vertreter dieser Geräteklasse ist mit dem MODUS (*MOBILE DOCKER FOR UNDERWATER SCIENCES*) an der TU Berlin im Einsatz. Er stellt ein ‚Arbeitspferd‘ zum kontrollierten Absetzen und Bergen schwerer Forschungsstationen in bis zu 4000 m Wassertiefe dar.

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 erfährt die Kabelschnittkraft einen Nulldurchgang, 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 und unteren Kabelaufhängepunkt und störenden Tummelbewegungen 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.

Die vorliegende Arbeit stellt Modell- und Großversuche mit dem exemplarischen Geräteträger MODUS vor, die zur Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten als auch der Kräfte und Beschleunigungen am oberen und unteren Kabelende zum einen in Versuchsanlagen und zum anderen während Tiefsee-Einsätzen mit Forschungsschiffen durchgeführt wurden. Ein zu diesem Zweck neu entwickeltes Prototypsystem einer online Datenerfassung wurde in Feldeinsätzen mit ebenfalls neu entwickelten Messsensoren getestet. Die erzielten Ergebnisse wurden in einer eigens erstellten Datenbankanwendung gespeichert und damit systematischen Analysen zugeführt. Parallel erstellte CFD-Simulationen (*Computational Fluid Dynamics*) liefern Aussagen über Strukturwiderstand und Nachstromfelder für die relevanten Fahrtrichtungen unter Berücksichtigung viskoser Effekte. Die Resultate können den Entwurf von Geräteträgern sowie von Seegangskompensatoren unterstützen und dienen hier der Bestätigung von Software zur dynamischen Bewegungssimulation. Letztere wurde an der TU Berlin entwickelt und berücksichtigt irreguläre Seegänge, hydroelastische Aspekte und Queranströmung und ermöglicht die Auswertung im Frequenz- und Zeitbereich.

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 comprise, 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 deep ocean shuttle system 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 (*MOBILE DOCKER FOR UNDERWATER SCIENCES*) 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, a system immanent problem still remains, as there is the coupling of heave and pitch motions of the vessel with subsequent vertical oscillations of the suspended carrier due to the transmission of these wave induced ship 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 downtime. 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 (the cable suspension point) 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 work describes 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. Simulations with methods of CFD (*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*) consider viscous effects and lead to characteristic 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 effects of cable dynamics, current and irregular sea states in frequency and time domain. Goal is to provide relevant information for the downtime prediction of umbilical tethered carriers as well as for the development of winches and active heave compensation systems for the operation in arbitrary sea states and with various wave/ship encounter angles.

1	EINLEITUNG	1
1.1	Übersicht und Motivation	1
1.2	Stand der Forschung	4
1.2.1	Anwendungsgebiete für kabelgebundene Trägersysteme	5
1.2.2	Der Geräteträger MODUS	9
1.2.3	Numerische und experimentelle Analyse kabelgebundener Trägersysteme	12
1.3	Ziel der Arbeit	15
2	PHYSIKALISCHES MODELL	18
2.1	Vorbemerkungen	18
2.2	Koordinatensysteme	20
2.3	Kräftegleichgewicht am A-Rahmen	22
2.4	Dynamisches Problem	24
2.4.1	Spektrale Analyse	25
2.4.2	Elastisches Ersatzsystem	26
3	NUMERISCHE SIMULATIONEN	32
3.1	Hydroelastische Simulationen	32
3.2	CFD-Simulationen	35
3.2.1	RANSE und Turbulenzmodellierung	35
3.2.2	Wirbelablösung am Kabel	36
3.2.3	MODUS	37
3.2.4	2D-Grundformen	43
4	MEßSYSTEM	44
4.1	Konzept	44
4.2	Messdatenerfassung	46
4.3	Sensorsysteme	48
4.3.1	A-Rahmen: Messung von Zugkraft/Kabelgeschwindigkeit/Kabellänge	48
4.3.2	Geräteträger: Messung der Zugkraft	48
4.3.3	Messung von Neigung und Beschleunigung	50
4.4	Labortests und Kalibrierung	50
4.4.1	Kraftmesswaage	50
4.4.2	Sensoren für Neigung und Beschleunigung	51
5	TANKVERSUCHE	55
5.1	Schwingungsversuche	55
5.1.1	Aufbau und Modellsystem	55
5.1.2	Durchführung	58
5.1.3	Auswertung	58
5.2	Widerstandsversuche	63
5.2.1	Konfigurationen und Durchführung	65
5.2.2	Auswertung	66

6	TIEFSEEEINSÄTZE	67
6.1	Tauchkonfigurationen.....	67
6.2	Auswertung.....	68
6.3	Bemerkungen zur Tiefenmessung.....	79
7	VALIDATIONEN	81
7.1	Vergleich von Messung und Simulation	81
7.2	Einfluss des Begegnungswinkels von Wellen und Schiff	82
7.3	Ableitungen für den Entwurf aktiver Seegangkompensationseinrichtungen	84
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	85
9	VERZEICHNISSE	88
9.1	Literatur	88
9.2	Abbildungen, Tabellen.....	91
9.3	Symbole, Abkürzungen.....	96
10	ANHANG	98
A	Konstruktionszeichnungen	99
A.1	Forschungsschiff F/S URANIA	100
A.2	Winde Cormac 4000/25,4-89 ROV	101
A.3	Umbilical Rochester 03379.....	102
A.4	Kabelumlenkrolle	103
A.5	MODUS-Geräteträger für 4000 m Einsatztiefe	104
A.6	Kraftmesswaage am MODUS	105
B	Messtechnik	106
B.1	Neigungssensor (OSTAR-Compass) – Datenblatt.....	107
B.2	Beschleunigungssensoren (Typ ADXL202/AQC) – Datenblatt.....	108
B.3	Lastsensor an der Umlenkrolle- Datenblatt.....	109
B.4	Lastsensor am MODUS – DMS-Applikation.....	110
B.5	Messverstärker – Datenblatt.....	111
B.6	Drucksensor – Datenblatt	112
B.7	Telemetrie – Datenblatt	113
C	Ausgewählte Messergebnisse	114
C.1	Beispieldatenprotokoll.....	115
C.2	Schwingversuche MD und MD+BS in M1:5.....	117
C.3	Widerstandsversuche M1:5, M1:3, M1:1	125
11	INDEX	126

1 Einleitung

1.1 Übersicht und Motivation

Die moderne Meeresforschungstechnik setzt neben den bekannten und bewährten *Lander*-Systemen¹ auch aktive kabelgebundene Tiefseegeräteträger ein, um komplexe, gezielte Aufgaben in der Tiefsee auszuführen (TENGBERG et al. [52], PRIEDE [47], LINKE und PFANNKUCHE [36]). Hierzu gehören Geräte zur Bodenprobenahme (*piston-corer*), CTD-Meßsonden (*Conductivity, Temperature, Depth*), Rosetten zur Wasserprobenahme, Sonar-Schleppsonden („Schleppfische“ oder *tow fish*) sowie *Remotely Operated Vehicles* (ROVs), die aus dem Alltag der Offshore Öl- und Gasindustrie nicht mehr wegzudenkenden sind (PEARL und WINEGARDEN [46]). Das multidisziplinäre Aufgabenspektrum reicht vom Video gestützten Suchen und Beobachten, über alle Arten der Probenahme und Analyse unter *in-situ* Bedingungen, bis hin zum exakten Absetzen und Bergen schwerer autonomer Beobachtungs-, Analyse- und Beprobungsstationen auf genau vorherbestimmten Positionen auf dem Meeresgrund [GERBER und CLAUSS [21]]. Die Gesamtsysteme bestehen dabei zumeist aus einer Einsatzplattform (Schiff, Kranbarge oder Halbtaucher) mit schwenkbarem A-Rahmen am Heck oder Mittschiffs bzw. einem zentralen *moonpool*. Hinzu kommt die Winde mit Multifunktions- oder reinem Zugkabel und dem angehängten Geräteträger mit oder ohne Nutzlastmodul, wie z.B. einer mit Sensoren bestückten Bodenstation (Abb. 1-1).

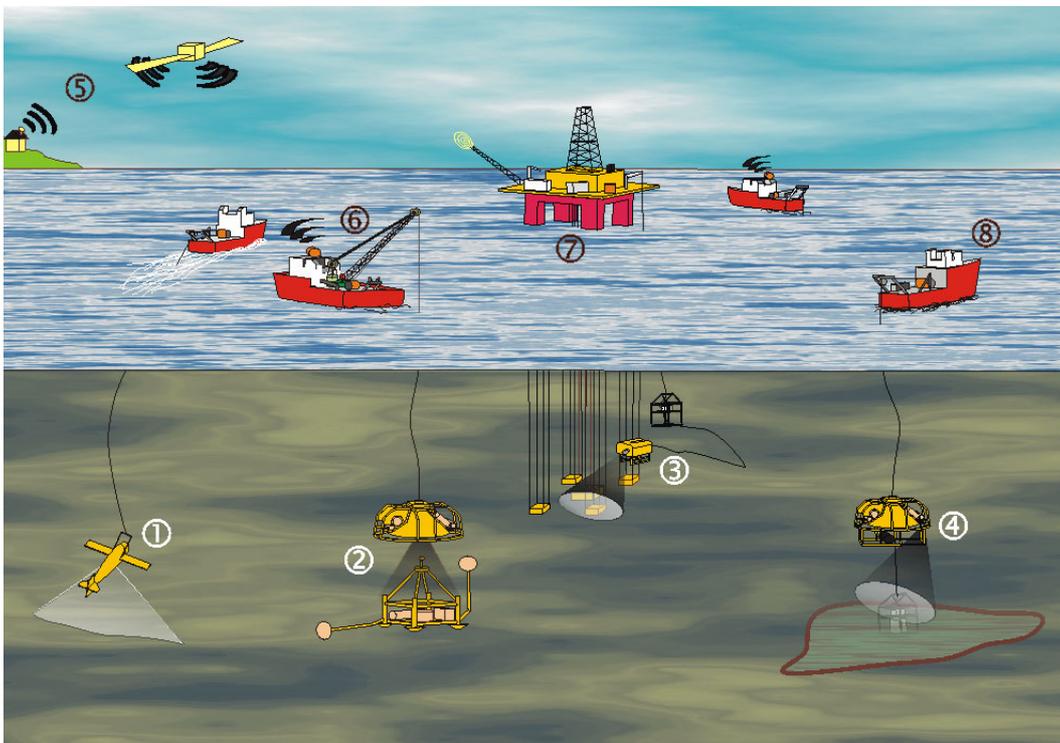


Abb. 1-1: Einsatzfacetten kabelgebundener Trägersysteme: ① Geschleppter Sensorträger (Schleppfisch), ② mobiles Schwerlastträgersystem mit Bodenstation, ③ käfiggestütztes ROV, ④ mobiles Trägersystem zur kontrollierten Probenahme, ⑤ Satellitenverbindung zu Fahrzeugen und Sensoren (z.B. ARGOS, Inmarsat, dGPS), ⑥ Kranschiff, ⑦ Offshore-Plattform (*Tension Leg Platform* - TLP), ⑧ Schiff mit A-Rahmen

¹ Anmerkung: Die englische Sprache ist zum Standard in der Meerestechnik avanciert. Um dem Rechnung zu tragen, wurden deutsche Bezeichnungen durch englische Fachausdrücke ergänzt bzw. ersetzt.

Zu den Zielen der weltweit angelegten Forschungsprojekte wie GOOS (*Global Ocean Observing System* [23]), IODP (*Integrated Ocean Drilling Program* [30]) o. a. gehört die parallele Erfassung zeitabhängiger Umweltparameter. So wird den komplexen Abläufen in der weithin unbekanntem Tiefsee z.B. ein entscheidender Einfluss auf die globale Klimaentwicklung zugesprochen. Andere Aktivitäten suchen Leben in lebensfeindlichen Umgebungen in der Tiefsee, um aus deren Gensequenzen Hinweise für die Entwicklung neuartiger Medikamentwirkstoffe zu gewinnen (BIODEEP [2]). Theorien und Hoffnungen, deren Beweise oft noch nicht erbracht sind.

Die konkret verwendete Technologie richtet sich nach dem Profil der Anforderungen, dass von Seiten der (Meeres-) Forschung an die (Meeresforschungs-) Technik gestellt wird, um die unterschiedlichen Forschungsziele in den Ozeanen zu Erreichen (CLAUSS et al. [7]). Die erzielten Ergebnisse lassen sich je nach Verwendungszweck aufbereiten und visualisieren (Abb. 1-2).

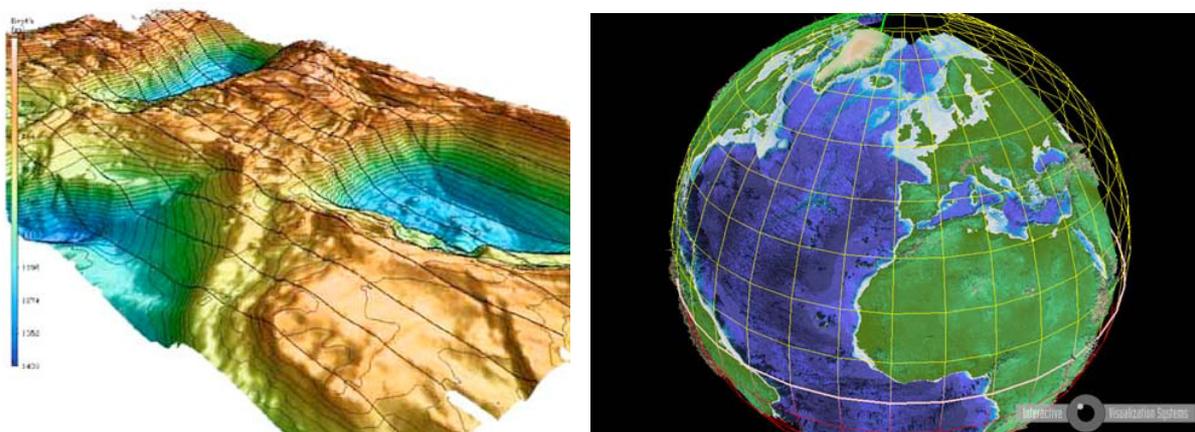


Abb. 1-2: Beispiele für 3D-Visualisierungen von Forschungsergebnissen: (links) Topologie des Meeresbodens mit Isobaren; (rechts) gewichtete Modellierung der Erdkruste (IVS [31])

Der Einsatz kabelgebundener Interventionssysteme wird dabei von einer Reihe von Randbedingungen auf See eingeschränkt. Hierzu gehören Umwelteinflüsse wie Wind, Seegang, Strömungen, (Treib-)Eis, besonders hohe oder niedrige Temperaturen von Luft und Wasser. Problematische Situationen können bei allen Phasen einer Schiffsmission entstehen und zur Gefahr für Menschen und Technik werden. Eine Schlüsselrolle nimmt das Betriebs-, bzw. Bewegungsverhalten der am Kabel hängenden Tauchgeräte ein. Dieses hängt während der mehrstündigen Fier- und Hievoperationen wesentlich von den Seegangseigenschaften des verwendeten Forschungsschiffes, sowie vom resultierenden axialen Schwingungsverhalten des getauchten Systems ab. Zu den kritischen Arbeitssituationen gehören (CERMELLI et al. [3])

- das Ein- und Austauchen durch die Wasseroberfläche (die so genannte *splash zone*)
- Annäherung an bzw. Landen auf dem Meeresboden
- Phasen, in denen das Kabel kurzfristig lose durchhängt.

Letztere, die so genannten *slack-cable* Situationen, treten immer dann auf, wenn während der Transits zum/vom Unterwasser-Einsatzort das Kabel kurzfristig bei zu null gehender Zugspannung schlaff und teilweise im Bogen durchhängt, wie dies bei Tauchgängen mit dem Spezial-ROV MODUS beobachtet werden kann (Abb. 1-3). In diesen Momenten sind die Vertikalbewegungen von Schiff und getauchtem System entkoppelt. Die darauf folgende peitschenartige Straffung des Kabels resultiert aus den mit verschobener Phase gegenläufigen Bewegungen des Einsatzschiffes und des Geräteträgers. Diese so genannten Jojo-Effekte führen zu gefährlichen Lastspitzen (*snap loads*) am oberen Kabelaufhängepunkt sowie zu

unkontrollierbaren Taumelbewegungen des Geräteträgers am unteren Kabelende. Aufgrund von Queranströmung können zudem oszillierende Wirbelablösungen am Kabel auftreten (*vortex shedding*), die ebenfalls zu störenden Horizontal- und Vertikalschwingungen am unteren Kabelende führen. Die Kenntnis der bestimmenden Ablösefrequenz hilft daher bei der Auslegung umströmter Kabel.

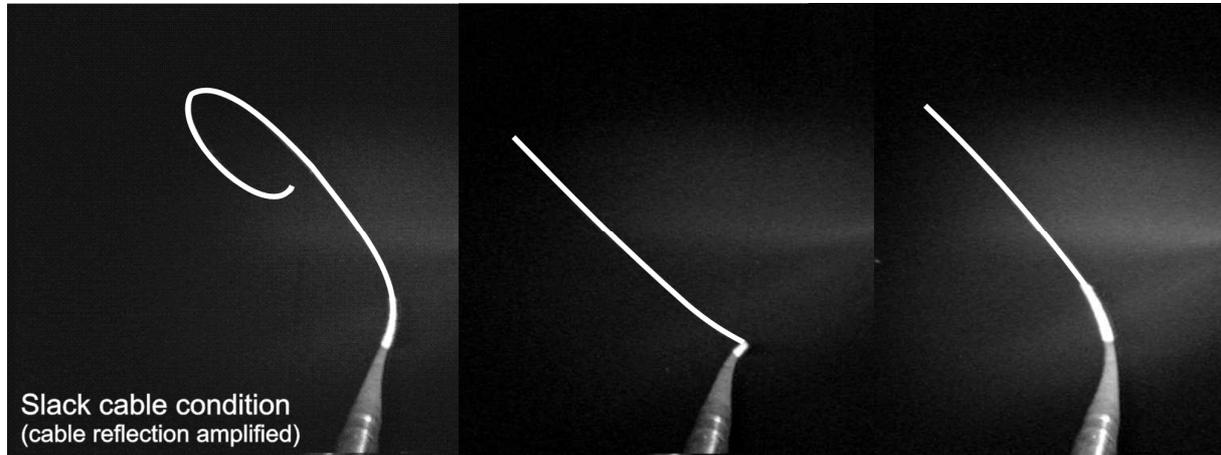


Abb. 1-3: Entwicklung einer *slack-cable* Situation am MODUS-*umbilical* (Kabelreflexion verstärkt dargestellt)

Oft werden die verwendeten Multifunktionskabel als *umbilical* (engl. Nabelschnur) ausgelegt. Sie dienen der Lastaufnahme, der Energieversorgung, sowie der bidirektionalen Video- und Datenübermittlung zum Tiefseeeräteträger. Aus dieser Funktionsvielfalt resultieren deren z. T. beträchtlichen Querschnittsflächen, die einen signifikanten, normal zur Längsachse wirkenden Strömungswiderstand sowie große Eigenmasse und - bei Querbeschleunigung – großer hydrodynamischer Masse pro Längeneinheit bedeuten. *Umbilical* lassen sich in zwei große Gruppen einteilen, nämlich diejenigen auftriebsneutraler Bauart und die mit Abtrieb. *Umbilical* der ersten Gruppe werden mit ebenfalls auftriebsneutralen ROVs eingesetzt, erlauben deren Bewegungsfreiheit in sechs Freiheitsgraden bei gleichzeitiger maximaler Entkoppelung der Bewegungen von Trägerschiff und ROV. Aufgrund der Auftriebsbeschränkung können jedoch selbst die stärksten Arbeits-ROV (*workclass*) nur maximale Nutzlasten von ca. 8000 N tragen.

Umbilical der zweiten Gruppe zeichnen sich durch einen vergleichsweise geringen Durchmesser und geringe Masse aber großes Gewicht in Seewasser und große Tragfähigkeit aus. Hierzu gehört auch das vom Geräteträger MODUS genutzte *umbilical* (Abb. 1-4, links).



Abb. 1-4: (v.l.n.r.) Schnitt durch das *umbilical* von MODUS (Durchmesser 0,254 m (1 Zoll), Masse 2,276 kg/m) sowie eine Auswahl weiterer *umbilical* und beispielhafter Kabelstrukturen (nicht maßstabgetreu)

Das *umbilical* verbindet das Einsatzschiff kontinuierlich mit dem Sensorträger und erlaubt somit theoretisch den zeitlich unbegrenzten Einsatz in großen Tiefen. Hierdurch werden zeit-, und somit kostenintensive Aussetz- und Einholvorgänge auf eine Mindestzahl reduziert. Neben der unbegrenzten Tauchzeit stellen die folgenden Aspekte die Hauptvorteile kabelgebundener Systeme dar:

- zuverlässige Fernabfrage und Steuerung von Sensoren und Funktionen,
- spontane Interaktion und Anpassung der Arbeitsabläufe durch den Operator,
- Absetzen und Bergen relativ großer Lasten zum und vom Meeresboden,

In den folgenden Unterkapiteln wird ein Überblick über aktuelle Anwendungsgebiete- und Konzepte für kabelgebundene Trägersysteme vorgestellt. Besonders wird auf den bereits erwähnten Berliner Tiefseegeräteträger MODUS eingegangen, der zur experimentellen Validierung der numerischen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit bei Einsätzen bis in 3700 m Tiefe mitgenutzt werden konnte. Der Stand der Forschung auf dem Gebiet der numerischen und experimentellen Analyse dynamischer und hydroelastischer Aspekte beim Betrieb solcher Systeme wird kurz reflektiert. Kapitel zwei skizziert das physikalische Modell des dynamischen Systems, bestehend aus den Komponenten Schiff – Winde – A-Rahmen – *umbilical* und Geräteträger. Kapitel drei widmet sich numerischen Analysen der Umströmung von Kabel und Geräteträger und untersucht die nichtlinearen dynamischen Bewegungseigenschaften kabelgebundener Tauchsyste-me. Kapitel vier beschreibt das neu entwickelte Meßsystem zur Registrierung relevanter Einsatzparameter wie Kräfte, Beschleunigungen und Orientierungen für die Großausführung. Messergebnisse aus experimentellen Untersuchungen im Versuchstank zum Schwingverhalten des beispielhaften Geräteträgers MODUS mit und ohne Bodenstation (im Modell), als auch Widerstandsversuche zur Ermittlung der hydrodynamischen Koeffizienten der Modelle und des Prototyps, bestimmen das Kapitel fünf. Ergänzt werden die Tankversuche durch Messergebnisse der realen Einsatzparameter bei Tiefsee-einsätzen mit dem Prototyp - Kapitel sechs. Im Kapitel sieben folgen Validationen von Messungen und Berechnungen, die u. a. den Einfluss der Orientierung des Schiffes zur einlaufenden See bei kabelgeführten Tiefsee-einsätzen anhand eines Fallbeispiels aufzeigen. Den Abschluss der Arbeit bilden die Zusammenfassung, Verzeichnisse für Literatur, Symbole, Abbildungen, ein Anhang und ein Index der wichtigsten verwendeten Begriffe.

1.2 Stand der Forschung

Zu den Hauptaufgaben der Tiefseetechnik gehört die Bereitstellung zuverlässiger Interventionssysteme zur Unterstützung der z. T. hochkomplexen Arbeitsfelder bei der Erschließung der tiefen Meeresgebiete. Viele Firmen der Zulieferindustrie versorgen die jeweiligen Fahrzeugtypen mit geeigneten, an die Anforderungen angepassten Beobachtungs-, Mess-, Beprobungs- und Manipulationssystemen. Begleitet wird diese Entwicklung durch zahlreiche theoretische Untersuchungen sowie Modell- und Großversuche zu Fragen der Statik und Dynamik kabelgebundener Systeme. Zu Fragen nichtlinearer hydroelastischer Effekte aus Krümmung, Widerstand und Dehnung im und am Kabel besteht jedoch noch Forschungsbedarf, da diese Effekte mit zunehmender Einsatztiefe immer stärker in Erscheinung treten, und zudem je nach Systemtyp unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

1.2.1 Anwendungsgebiete für kabelgebundene Trägersysteme

Die wirtschaftliche und wissenschaftliche Bedeutung bestehender sowie für die Zukunft denkbarer ferngesteuerter, kabelgebundener Tiefseeeräteträger und den hiermit eingesetzten Sensorsystemen lässt sich anhand der folgenden Auflistung abschätzen:

Geowissenschaften und Ozeanographie:

- Messung des Sedimentationsaufkommens, Probenahme
- Messung des Erdmagnetfeldes in Stärke und Ausrichtung
- Messung der Meeresströmungen in Stärke und Richtung
- Messung von Dichte und Temperaturschichtungen
- Messung seismischer Aktivitäten in Stärke und Richtung (z.B. für Tsunami-Warnsysteme)

Umweltforschung und Umwelttechnik:

- *In-situ* Schadstoffmessungen, Probenahme
- Ermittlung ökologischer Störungen
- Messung der Wasserzusammensetzung
- Messung von Temperatur, Dichte, Sichtbarkeit, Leitfähigkeit des Wassers
- Langzeitüberwachung der Wasserqualität z.B. in der Nähe von Flussmündungen und Ölfördergebieten

Auffinden und Bergen

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

Marine Rohstoffindustrie:

- Seismische Exploration von Öl- und Gasvorkommen
- Langzeitmonitoring möglicher Standorte für Offshore-Bauwerke
- Absetzen und Rückbau von Bohrloch-Unterwasserkomplettierungen etc.
- Inspektion von Verankerungen schwimmender Plattformen
- Exploration und Probenahme biotechnologisch interessanter Tiefseeorganismen

...

Jede der oben aufgeführten Anwendungen stellt aufgrund seiner spezifischen Aufgabenstellung unterschiedliche Anforderungen an die Energieversorgung, Sensordatenübermittlung, Operationsüberwachung und nicht zuletzt die Positionsgenauigkeit und Lagestabilität während der z. T. mehrstündigen Einsätze. Durch Einteilung in zwei Gruppen lassen sich die Anwendungs- und Betriebsprofile der einzelnen Systeme unterscheiden:

Gruppe 1: Kabelgebundene Systeme mit auftriebsneutraler Bauart oder Betriebsart. Beispiele sind die freien, d.h. nicht im ‚Käfig‘ auf Tiefe gebrachten ROVs und die sog. Schleppfische (*tow fish*).

Gruppe 2: Im weitesten Sinne kabelgebundene Systeme ohne Auftriebskörper (syntaktischen Schaum oder Glassphären). Beispiele: An Transportkäfige gebundene (*caged*) ROVs, Kernprobenehmer (*piston-corer*), CTD-Sonden (*Conductivity, Temperature, Depth*), bodengängige, geschleppte oder selbst fahrende Fahrzeuge (*miner, cable trencher*) oder das Spezial-ROV MODUS für schwere Lasten (siehe Abschnitt 1.2.2). Weitere verwandte Systeme der Offshore-Industrie sind z.B. Bohrgestänge und Förderstränge während der Bohrlochankoppelung (*borehole re-entry concept*), zylindrische Sauganker (*suction anchor piles*), Komponenten zur Bohrlochunterwasserkompletierung (z.B. *templates, manifolds, blowout preventer, Christmas trees*), Betonmatten zum Schutz von Pipelines (*concrete mats*).

Die Abb. 1-5 bis 1-7 geben einen Überblick über gängige Konzepte für schwebende und geschleppte Systeme der Gruppe 1, während die Abb. 1-8 bis 1-10 Konzepte für frei hängende oder auf dem Seeboden fahrende Systeme der Gruppe 2 zeigen.

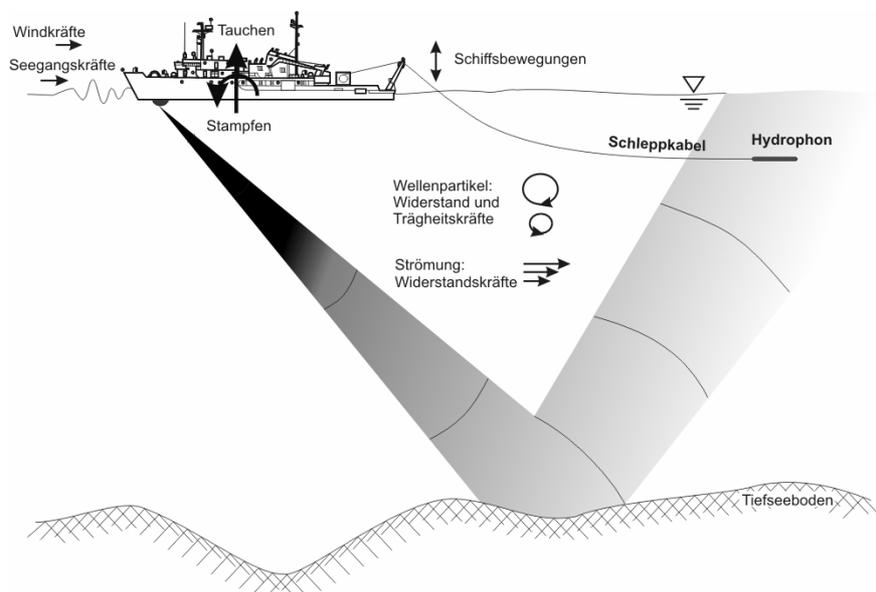


Abb. 1-5: Geschleppter Sensorträger (Hydrophon)

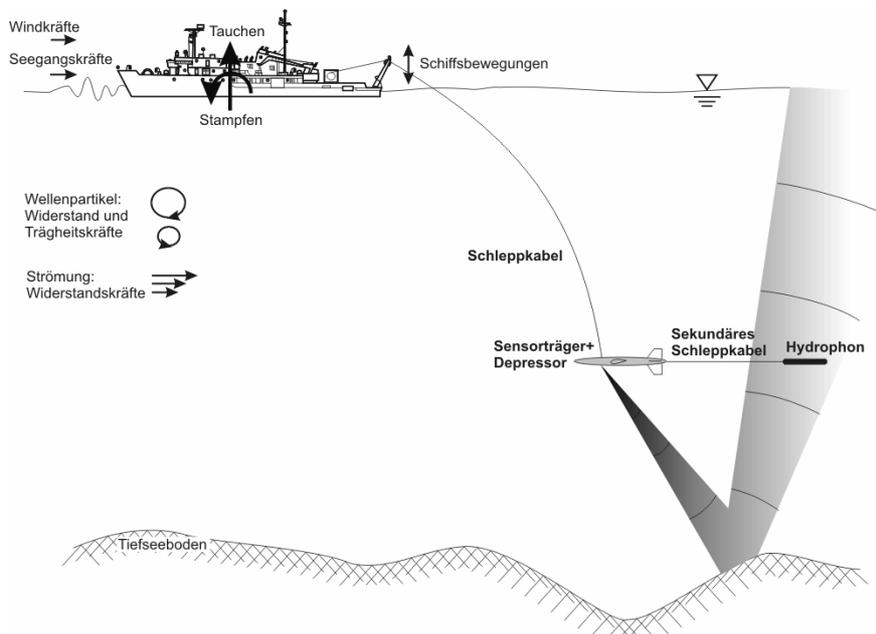


Abb. 1-6: Schallquelle (Schleppfisch) und Empfänger (Hydrophon) als tief geschleppte Einheit

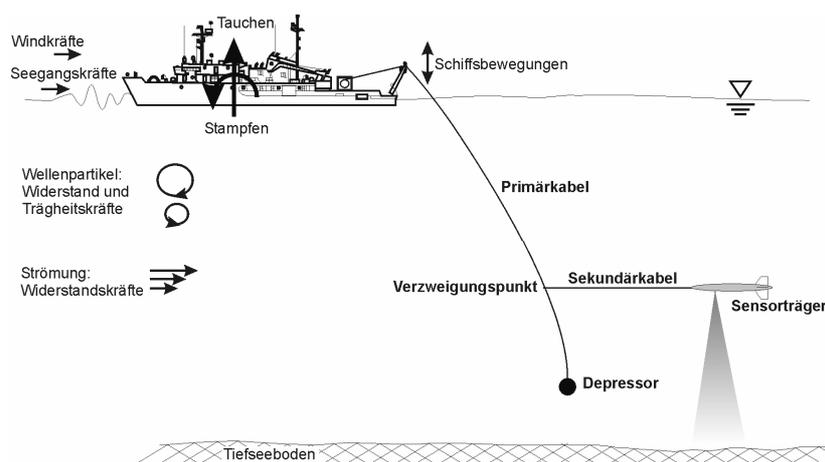


Abb. 1-7: Tief geschleppter Sensorträger mit Depressor zur Bewegungskoppelung

Das kabelgebundene System in Abb. 1-5 stellt den klassischen Fall eines am langen Zugkabel hinter dem Schiff in definierter Tiefe geschleppten Hydrophons dar. Mit diesem werden Bodenreflexionen der vom Schleppschiff explosionsartig abgestrahlten Schallwellen aufgefangen und gespeichert oder direkt über das Kabel an das Zugschiff übertragen. Aus den Laufzeitdifferenzen der Signale können unterschiedliche Bodenstrukturen erkannt und Hinweise auf z.B. Öl- und Gasfelder ermittelt werden. Die Schlepptiefe hängt vom Gewicht und den hydrodynamischen Eigenschaften des Sensorträgers und des Schleppkabels sowie der Schleppgeschwindigkeit ab. Grundsätzlich gilt hier: Je tiefer und stabiler Sender und Empfänger über Grund schweben, desto genauere Ergebnisse können erzielt werden, da der Einfluss störender horizontaler Wasserdichteschichtungen aufgrund der geringeren Wassertiefe abnimmt. Die in Abb. 1-6 gezeigte Konfiguration erlaubt somit eine günstigere, weil tiefere Schleppposition als in Abb. 1-5. Dieser Vorteil wird durch einen dem eigentlichen Sensorträger vorgeschalteten Schleppfisch erzielt, der zum einen als Schallquelle dient, und zum anderen durch seine Depressorflügel den Auftrieb des Kabels reduziert oder sogar neutralisiert. Ein anderes Konzept wird in Abb. 1-7 verfolgt. Hier dient statt des Schleppfisches ein einfaches vorangestelltes Depressorgewicht der Entkoppelung des geschleppten Systems von den störenden Vertikalbewegungen des Schiffes. Der Sensorträger am Ende eines von einem Verzweigungspunkt des Primärkabels ausgehenden Sekundärkabels ist Sender und Empfänger des Schallimpulses in einem.

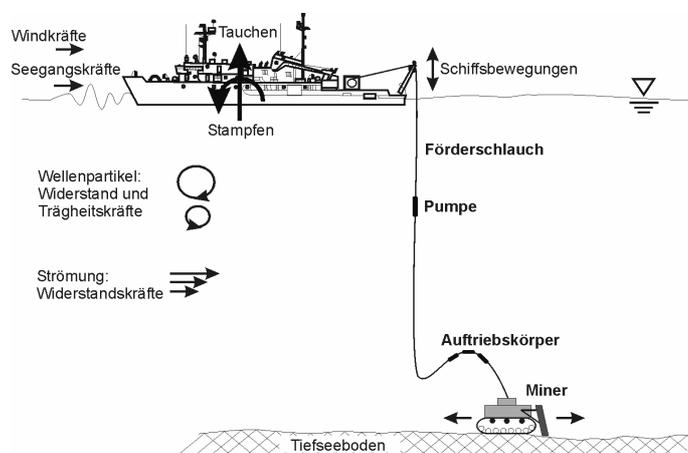


Abb. 1-8: Bodengängiges Förderfahrzeug mit Förderschlauch in Girlandenform zur Bewegungskoppelung

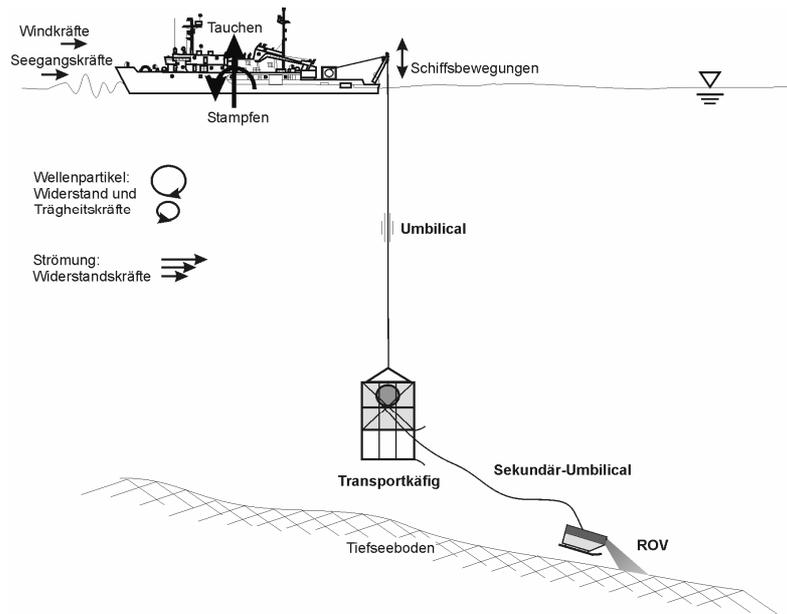


Abb. 1-9: Käfiggebundenes ROV im Tiefseeinsatz

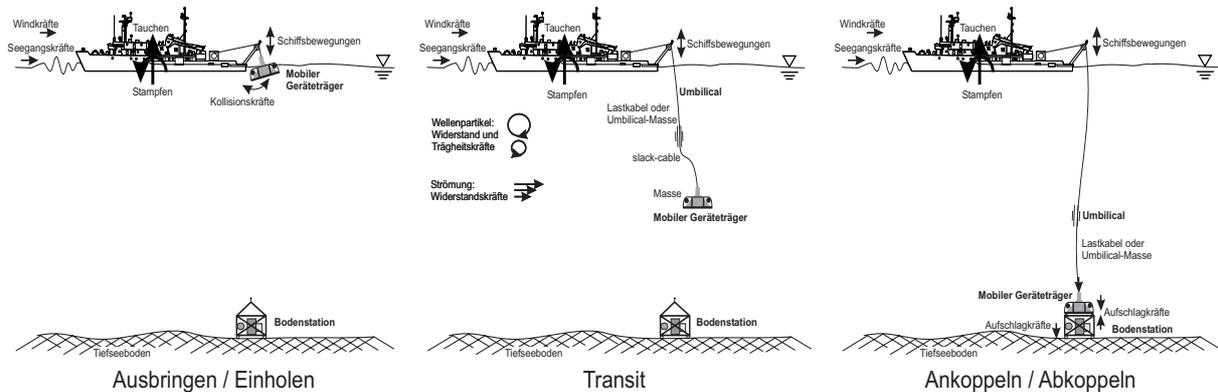


Abb. 1-10: Tiefseegeräteträger bei Annäherung an eine Bodenstation. Einsatzphasen (v. l. n. r.): Ausbringen/Einholen, Transit, Abkoppeln bzw. Ankoppeln und Anheben der Nutzlast

Der *miner* oder *crawler* in Abb. 1-8 ist ein Förderfahrzeug für Bodenschätze wie z.B. Manganknollen, die sich im oberen Sedimentbereich befinden. Er ist ein frei am Kabel hängendes, bzw. am Boden operierendes System, bei dem die Entkoppelung der vom Seegang über das Schiff auf den Förderstrang übertragene Vertikalbewegungen essentiell für dessen störungsfreie Funktion ist. Die Entkoppelung wird hier durch die biegeschlaffe so genannte Girlandenform des Strangs bewirkt, die mit gezielt positionierten Auftriebskörpern erzwungen wird. Zum Transport des Fördergutes sind Pumpen am Einsatzschiff oder Förderschlauch vorgesehen.

Während der gesamten Einsatzzeit ist der frei hängende Transportkäfig in Abb. 1-9 den Vertikalbewegungen der Einsatzplattform ausgesetzt. Oft werden diese Systeme in der Offshoretechnik zur Funktionsüberwachung von Installationen oder für Wartungsarbeiten eingesetzt. Der Käfig dient einem an einem sekundären *umbilical* befestigten ROV als sicherer ‚Hafen‘ in der Tiefe. Durch die Auftriebsneutralität des ROV sowie seines *umbilicals* bleiben schädliche Vertikalbewegungen während des Einsatzes allein auf den Käfig beschränkt. Während der Transitphasen ist das ROV jedoch im Käfig geparkt und erhöht somit signifikant die Masse des Trägersystems, jedoch nicht dessen Gewicht. Dies beeinflusst die Dynamik des Systems entscheidend, da sich die statische Last an der oberen Kabelaufhängung aus dem Gewicht des Tauchgeräts und dem aktuellen Kabellängengewicht ergibt. Die hinzukommenden dynamischen Lastantei-

le resultieren aus der vertikal beschleunigten Gesamtmasse bestehend aus Kabellängenmasse sowie der Eigenmasse und der hydrodynamischen Masse des Geräteträgers.

Eine vergleichbare Situation herrscht beim Trägerprinzip in Abb. 1-10 vor. Hier wird ein Geräteträger auf Tiefe gebracht und ist dort durch Schubmotoren aktiv horizontal positionierbar. Er dient je nach Einsatzzweck entweder frei hängend als Kontrollstation für sekundär gebundene Sensorsysteme oder zum Absetzen und/oder Bergen schwerer Stationen am Meeresboden. Letztere Operation bewirkt, ähnlich wie bei dem vorgenannten System aus Transportkäfig und ROV, einen signifikanten Anstieg von Masse, Gewicht und Volumen des Geräteträgers, da die Nutzlaststation während der Transitphasen fest mit dem Träger verbunden ist. Störende Vertikalbewegungen werden ohne Seegangsfolge- oder Kompensations-einrichtungen direkt über das *umbilical* nach unten übertragen und können nur in engen Grenzen durch bauliche Maßnahmen oder adaptive Auftriebshilfen wie z.B. Hochdrucktanks beeinflusst werden. Ein Vertreter dieses Trägerprinzips wird folgend mit dem MODUS-System genauer vorgestellt.

1.2.2 Der Geräteträger MODUS

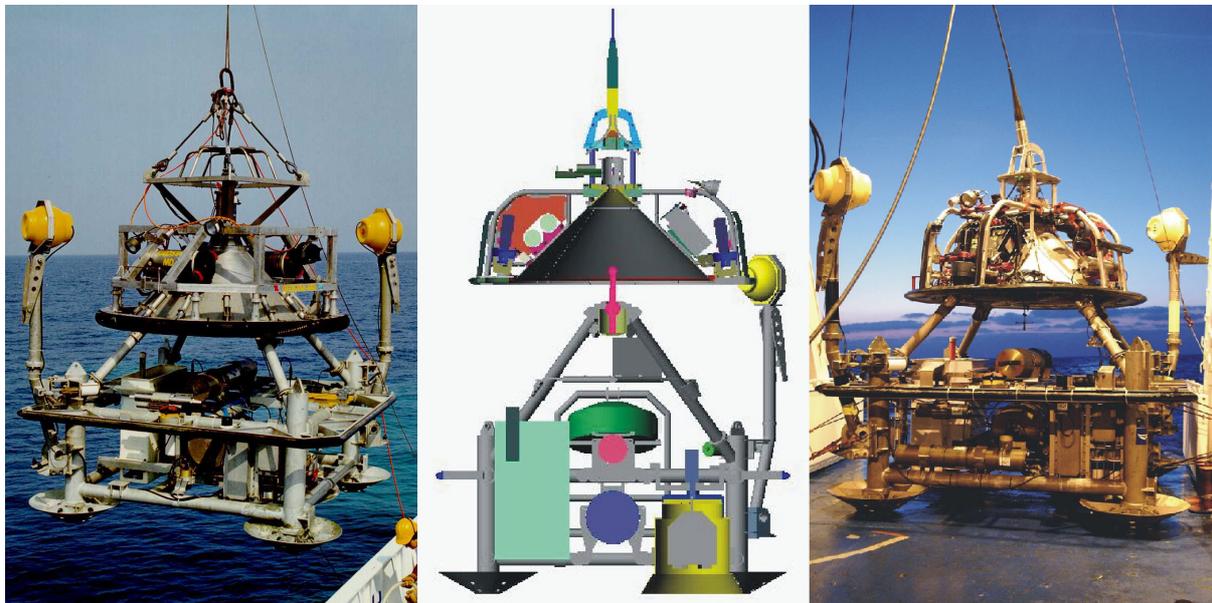


Abb. 1-11: (v.l.n.r.) Der MODUS Prototyp für Flachwasser (GEO1), MODUS für Tiefwasser (GEO2) im CAD-Schnittbild sowie als Prototyp (GEO2), jeweils mit Bodenstation

Als Ergebnis des EU-Projektes GEOSTAR 1 (*GEophysical and Oceanographic STation for Abyssal Research*, [19]) wurde am Institut für Schiffs- und Meerestechnik der TU Berlin (ISM – heute: Institut für Land- und Seeverkehr - ILS) sowie am Fachbereich VIII der TFH Berlin als deutscher Beitrag der Spezial-ROV MODUS (*MOBILE DOCKER FOR UNDERWATER SCIENCES*) 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 4000 m Tiefe geeignet ist. Neben der Heraufsetzung der Tauchtiefe durch geeignete druckfeste oder kompensierte Subsysteme flossen zahlreiche Detailverbesserungen in den Bereichen Hydrodynamik, Steuerungstechnik und Sensortechnik in die neue Version ein. Aus der besonderen Einsatzumgebung resultieren somit viele der speziell für die Tiefsee ausgelegten Aggregate wie Sonar, Altimeter, Kompass, Kameras, Scheinwerfer, Druckboxen für die Elektronik und druckfeste Verkabelungen. Abb. 1-11 zeigt

(v.l.n.r.) die GEO1-Version von MODUS gekoppelt mit einer Station, das CAD-Schnittbild von MODUS (GEO2) beim Andocken an eine Bodenstation, sowie den MODUS Prototyp (GEO2) gekoppelt mit der GEOSTAR 2 – Station, nach deren Bergung aus 2000 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 Batterie gepuffert für Langzeiteinsätze bis zu einem Jahr gerüstet. Das Konzept zum Absetzen und Bergen mit MODUS konnte bereits mehrfach in Projekten wie GEOSTAR 1 und 2, GNDT², ORION³ und BIODDEEP⁴ in Seegebieten rund um Italien überprüft werden, so dass es heute als voll tauglich bestätigt gilt.

Die Absetz- und Bergungsprozedur

Der mobile Docker hat grundsätzlich die Funktion eines ferngesteuerten Kranhakens für die Tiefsee, dessen Arbeitsprinzip in Abb. 1-10 zu sehen ist. Die Absetz- und Bergungsprozedur beginnt mit einer akustischen Profilmessung durch das Einsatzfahrzeug zur Ermittlung von Topographie und Tragfähigkeit des Meeresgrundes. Nach Festlegung eines geeigneten ‚Landeplatzes‘ (oder nach Ortung der Bodenstation) beginnt das Fieren des Geräteträgers (Abb. 1-10 links und Mitte). Diese Operation kann für Windengeschwindigkeiten von 0,6-1,0 m/s und eine Einsatztiefe von 4000 m bis zu zwei Stunden dauern. Die Annäherung an den Boden wird ab 100 m über Grund durch das Altimeter angezeigt. Im Nahbereich des Bodens bestimmt dann das Sonar am Bug von MODUS die einzuschlagende Richtung, wobei Reflexionen vom Boden oder von größeren Gegenständen wie z.B. der Bodenstation über die glasfaseroptische Telemetrie (*single-mode*-Technik) an Deck zum Sonarrechner übermittelt werden. Dort werden die akustisch gewonnenen Signale in graphische Informationen für das Bedienpersonal (*operator*) umgesetzt. Das vertikale Verfahren sowie das Aufsetzen auf dem Boden (oder Ankoppeln an die Bodenstation) erfolgt durch die Winde an Deck des Einsatzschiffes (Abb. 1-10, Mitte und rechts). Horizontale Fahrten bis zu einem Radius von ca. 2-5% der Einsatztiefe werden durch zwei Paare von Düsenpropellern mit bürstenlosem Gleichstrommotorantrieb ausgeführt, die in voller Ausbaustufe zusammen ca. 2800 N Schub liefern. Bei größeren Entfernungen zum Ziel wird zudem langsame Fahrt mit dem Schiff aufgenommen (u_0 ca. 1 m/s), wodurch zusätzliche Strömungskräfte auf Kabel und Geräteträger einwirken. Einen visuellen Eindruck von den Vorgängen in der Tiefe erhält der *operator* durch bis zu vier Videokameras in Kombination mit starken Leuchten. Zusätzlich werden Systemüberwachungsdaten, Lasten und Beschleunigungen am oberen und unteren Kabelende, Kabellänge, erreichte Tiefe (als Druck in bar), Nordausrichtung sowie Roll- und Stampfwinkel angezeigt und aufgezeichnet. Nach Absetzen der Station (oder beim Ankoppeln) wird der passive *docking pin*, der die Spitze der pyramidenförmigen Bodenstation darstellt, mit Hilfe des trichterförmigen Konus im Zentrum von MODUS durch den durch Gummipuffer gegen Stöße geschützten Aluminiumrahmen geleitet, so dass ein ungewolltes Einfädeln und Verfangen verhindert wird. Den oberen Abschluss des Konus bildet der aktive Kupplungsmechanismus mit seinen durch eine Feder vorgespannten Fangklauen (*latch device*), in den der *docking pin* selbsttätig einrastet. Das erfolgreiche An- und Abkoppeln, dessen Prinzip auch bei Raumfahrten im so genannten *outer space* genutzt wird, wird dem *operator* durch Näherungsschalter auf seinem Kontrollmonitor signalisiert. Erst jetzt kann dem Windenfahrer das Kommando zum Einholen des Trägersystems gegeben werden. Das Hieven des Systems nimmt in der

² GNDT = *Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*, nationales italienisches Erdbeben-Forschungsprojekt

³ ORION = *Ocean Research by Integrated Observation Networks*, gefördert durch die EU, EVK3-CT-2001-67

⁴ BIODDEEP = *BIOTEchnology from the DEEP*, gefördert durch die EU, EVK3-CT-2000-42, [2]

Regel mehr Zeit als das Fieren ein, da die korrekte Aufwicklung des *umbilicals* auf die Windentrommel in der Praxis störanfällig ist. Mit dem Einholen der ‚Fracht‘ und dem sicheren Vertäuen auf dem Arbeitsdeck ist der Tauchgang beendet.

Tab. 1-1: Hauptmerkmale: F/S URANIA, *umbilical*, MODUS, Nutzlastmodule und Modelle

Forschungsschiff (F/S) URANIA					
Gesamtlänge L_{OA} [m]			61,30		
Länge zwischen den Loten L_{PP} [m]			52,50		
Breite B [m]			11,10		
Seitenhöhe D [m]			5,30		
Entwurfstiefgang T [m]			3,60		
Verdrängung [t]			1115		
MODUS- <i>umbilical</i>					
Maximale Einsatztiefe [m]			4000		
Durchmesser [m]			0,0254		
Bruchlast [kN]			378		
Arbeitslast [kN]			89		
Dehnsteifigkeit EA [N]			25*10 ⁶		
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		
MODUS, Prototyp und Modelle					
Bezeichnung	Masse m_0 [kg]	Gewicht in Wasser [N]	L/B/H [m]	Sensoren	Kommunikation
MODUS Prototyp (GEO2) (für Tiefwasser - 4000 m)	1090	7350	2,88 / 2,35 / 1,02	4x horizontale Schubmotoren, 360°Sonar, 325 kHz Altimeter, LF Transponder, 4x Scheinwerfer, TV-Kameras (wahlweise Farbe, s/w und Zoom), Kompass (analog + elektronisch), Neigungssensor, Accelerometer, Absolutdrucksensor, Lastsensor	Online-Datenübertragung während der Einsätze; Telemetrie über drei <i>single-mode</i> Glasfaserleitungen: 7x RS232, 2x RS422, duplex bzw. voll-duplex, max.115 kBit s ⁻¹ 1x TTL, 4x PAL Video
MODUS (GEO2) eingeschl. Wasser	100	-	Rohrrahmen-volumen	-	-
MODUS Prototyp (GEO1) (für Flachwasser - 200 m)	954	7338	2,95 / 2,75 / 2,03	2x horizontale Schubmotoren, 4x Scheinwerfer, 2x TV-Kameras (wahlweise Farbe, s/w), Kompass (analog + elektronisch), Neigungssensor, Absolutdrucksensor	Online-Datenübertragung während der Einsätze; Telemetrie über <i>multi-mode</i> Glasfaserleitungen: 3x RS232, voll-duplex, max.115 kBit s ⁻¹ 1x TTL, 2x PAL Video
MODUS (GEO2) Modell M1:3	40,50	279	0,96 / 0,78 / 0,34	-	-
MODUS (GEO2) Modell M1:5	8,50	57,40	0,57 / 0,46 / 0,20	Lastsensor	-
Nutzlastmodule, Prototypen und Modell					
Bezeichnung	Masse m_0 [kg]	Gewicht in Wasser [N]	L/B/H [m]	Sensoren	Kommunikation
Teststation Prototyp	1433	8201	3,50 / 3,50 / 2,90	-	-
Bodenstationen eingeschl. Wasser	150	-	Rohrrahmen-volumen	-	-
Teststation Modell M1:5	11,20	64	0,70 / 0,70 / 0,58	-	-
GNDT-SN1	1433	8201	3,50 / 3,50 / 2,90	Seismometer, Hydrophon, Schwerkraftmesser, CTD, Strömungsmesser, Altimeter, Echolot	Redundante Kommunikationskanäle während Absetzen, Datenspeicher im autonomen Langzeitbetrieb
ORION-N2	1657	9751	3,50 / 3,50 / 2,90	wie GNDT-SN1	wie GNDT-SN1 plus horizontalem Akustik-Modem
GEOSTAR 2 = ORION-N1	2771	13479	3,50 / 3,50 / 2,90	wie GNDT-SN1 plus Magnetometer (skalar, vektoriell), Transmissiometer, Wasserproben, elektro-chemisches Analysepaket, 300 kHz ADCP	wie GNDT-SN1 plus nahezu Echtzeitkommunikation über vertikales Akustik-Modem und verankerte Boje sowie Satelliteninfrastruktur
BIODEEP SCIPACK	350	2000	1,10 / 1,10 / 1,52	Wasserprobenamerosette (verschiedene Flaschenvolumen), CTD, Farbkamera, Scheinwerfer, Altimeter, Kompass	Kommunikation und Kontrolle über sekundäres <i>umbilical</i> mit <i>twisted-pair</i> -Verbindung

In der Kombinationsmöglichkeit des mobilen Dockers mit beliebig auslegbaren Bodenstationen oder Nutzlastmodulen liegt die Stärke des Systemansatzes: Aufgrund der einfachen aber zuverlässigen elektromechanischen Kupplung zu den unterschiedlichen Bodenstationen (Aktivteil am Geräteträger – Passivteil an der Bodenstation), sowie der genormten Datenschnittstellen (RS 232, RS 485 sowie PAL-Video), erlaubt MODUS die unkomplizierte Intervention bis in 4000 m Tiefe. Dieser Zugang steht theoretisch allen Forschungszweigen (s. o.) und deren z. T. schwergewichtigen Tiefseestationen offen, wodurch die Bandbreite der möglichen Einsatzprofile heute noch nicht zu übersehen ist. Neben den Schnittstellen sind besonders die hohe Tragfähigkeit (bis 30 kN) und die gute Positionierbarkeit zu den Vorteilen dieses Trägerkonzeptes zu zählen. Die Modularität des Konzeptes wird durch die Liste der Sensoren und Nutzlastmodule der bisherigen Projekte deutlich (Tab. 1-1).

Mit MODUS bietet sich im Rahmen dieser Arbeit die Gelegenheit, neben maßstäblichen Modellen im Versuch (Abb. 1-12, links und Mitte) im Besonderen den Prototyp eines beispielhaften kabelgebundenen Tiefseeeräteträgers für schwere wissenschaftliche Bodenstationen exemplarisch im Einsatz zu untersuchen. Hierzu gehört die systematische Ermittlung der relevanten Umwelt- und Operationsparameter während der Tauchgänge. Für unterschiedliche Einsatzgebiete und Einsatzziele können somit Erfahrungen beim Absetzen verschiedener Bodenstationen mit differierenden Massen und Gewichten gesammelt werden. Die Erkenntnisse dienen im weiteren Vorgehen der Validation eines existierenden nichtlinearen numerischen Bewegungssimulationsmodells, sowie dessen Modifikation und modularer Erweiterung zur Anpassung an die Realität, falls erforderlich.



Abb. 1-12: (v.l.n.r.) CAD- und Stahlmodell von MODUS (jeweils Maßstab 1:5) und Prototyp von MODUS sowie eine Testversion der Bodenstation

1.2.3 Numerische und experimentelle Analyse kabelgebundener Trägersysteme

Online-Literaturrecherchen verdeutlichen die großen Anstrengungen, die zur Erforschung der relevanten Phänomene auf dem Gebiet der geschleppten kabelgebundenen Systeme bisher geleistet wurden. Die Arbeiten konzentrieren sich einerseits auf die Hydrodynamik von Seilen und andererseits auf die mathematische Modellierung kinematischer Ketten, u. a. mit Methoden rechnergestützter Generierung von Bewegungsgleichungen (Computeralgebra). Mit solchen Verfahren berechnen KLECZA und KREUZER [34] das Multifunktionskabel eines Unterwasser-Roboters (ROV) idealisiert als Kette.

Auch die besonders intensiv untersuchten Fischereikabel und -netze gehören in den Forschungsbereich der geschleppten kabelgebundenen Systeme. HAHNBECK [25] löst die partiellen Differentialglei-

chungen des undehnbaren Seils als Kontinuum. Dabei untersucht er experimentell die hydrodynamischen Eigenschaften unterschiedlicher Trossen. Insbesondere beschreibt er auch die hydrodynamische Querkraft, die von der spiralförmigen Oberflächenstruktur verursacht wird. Die geschwindigkeitsabhängige Kraft wird längs und quer zur Anströmung zerlegt und jede Komponente auf das Geschwindigkeitsquadrat der gesamten Anströmung bezogen. Diese Arbeit bietet eine Fülle von Diagrammen gemessener hydrodynamischer Beiwerte verschiedener Trosstypen abhängig von der Anströmungsrichtung. Weiteres Datenmaterial zu hydrodynamischen Beiwerten von Kabeln und Trossen ist bei FRIDMANN [17] sowie – ebenfalls aus der Sicht der Fischerei – bei FERRO und HOU [14] zu finden.

Die Arbeit von PAPAZOGLU et al. [45] untersucht die dynamischen Eigenschaften von geschleppten Kabeln im Modellmaßstab. Es zeigt sich eine Dominanz der Dehnsteifigkeit, die, kombiniert mit der Freifallgeschwindigkeit des Kabels, durch geeignete Modellskalierung abgebildet werden muss, um aussagefähige Ergebnisse für die dynamischen Zugspannungen zu erhalten.

Als Hauptproblem der Dynamik kabelgebundener Systeme erweist sich die direkte Kopplung der Tauch- und Stampfbewegungen des Einsatzfahrzeugs mit dem am Kabel hängenden Geräteträger (Abb. 1-5 bis Abb. 1-10). 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, gekennzeichnet u. a. durch Kraft- und Beschleunigungsamplituden, hängt dabei entscheidend von den geometrischen Eigenschaften des Geräteträgers sowie den operativen Bedingungen wie Wellenperiode und signifikante Wellenamplitude des Seegangs ab. Infolge hoher Trägheits- und Widerstandskräfte können die getauchten Systemkomponenten besonders bei Erreichen der Systemeigenfrequenz der Vertikalschwingung den erzwungenen Oszillationen des Kabels nicht folgen, was zu den gefürchteten *slack-cable* Situationen führen kann (CLAUSS et al. [5], DRISCOLL et al. [10], HUANG und VASSALOS [29]). Während dieser kurzen Momente erfährt die Kabelschnittkraft am unteren Kabelende einen Nulldurchgang, und die Bewegungen des Einsatzfahrzeugs und des getauchten Systems sind entkoppelt. Die im nächsten Moment abrupt einsetzende Straffung des Kabels führt umgehend zu gefährlich hohen Kraftspitzen (*snap loads*) am oberen Kabelaufhängepunkt und 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*) (VANNAHME [54], VANNAHME und CLAUSS [55]). *Snap loads* bewirken darüber hinaus ein diskontinuierliches, nichtlineares Verhalten der Kabelelastizität, was zur temporären Verschiebung der Resonanzfrequenz führen kann und bisherige Annahmen erweitert (VASSALOS et al. [56]).

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschung liegt im Bereich des Tiefseebergbaus. Hier werden vor allem technisch-ökonomische Wege zur Stetigförderung von Manganknollen o. ä. vom Grunde des Meeres zu schwimmenden Stationen untersucht (Abb. 1-8). Die Verbindungsleitungen zwischen Meeresboden und Wasseroberfläche sind im weiteren Sinne ebenfalls Multifunktionskabel.

Die Thematik der flexiblen Verbindungsleitungen wie Seile, Kabel und andere wird von MARKOULIDIS [41] mit der Finite-Elemente-Methode beschrieben. Er berücksichtigt dabei geometrische und werkstoffspezifische Nichtlinearitäten auch unter Strömungs- und Wellenlasten, geht mit seinen theoretischen Untersuchungen allerdings nur bis zu einer Länge der Leitungen von 700 m. GIESE [22] betrachtet ebenfalls relativ kurze flexible Verbindungen, nähert sich den Problemen aber mit der Finite-Differenzen-

Methode, die er auf ein System diskreter verteilter Massen anwendet. Die Arbeit von HOFFMANN [28] beschreibt theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Verhalten flexibler Verbindungsleitungen zwischen bewegten Unterwassergeräten und schwimmenden Stationen. Neben dem stationären wird auch das dynamische Betriebsverhalten von bis zu 6000 m langen Leitungen untersucht, wobei diese als Gliederkette aus diskreten starren Körpern abgebildet wird. Auch GREBE [24] untersucht flexible Leitungen zwischen Unterwassergeräten und schwimmenden Stationen. Die Leitungen werden durch endliche, gelenkig verbundene, stabförmige Elemente und konzentrierte Massen nachgebildet und durch Auftriebskörper in Girlandenform gezwungen (Abb. 1-8). Aufgrund der Girlandenform der Leitung kann das untersuchte getauchte System besonders große räumliche Bewegungen ausführen, und unterliegt dabei wesentlich geringeren Zugkräften als bei geradliniger Verbindung mit dem Einsatzschiff. Zudem werden Schiffsbewegungen sehr stark in ihrer Wirkung auf das Unterwassergerät gedämpft.

Zum Themenkomplex der *caged* ROVs (Abb. 1-9) ist von DRISCOLL et al. [11] eine zweiteilige Arbeit veröffentlicht worden. Es werden Techniken und Verfahren vorgestellt, die zur zeitkongruenten Registrierung und Bewertung aller sechs Bewegungsfreiheitsgrade von Schiff und Käfig im Feldeinsatz benötigt werden. Es wird ein Dynamik-Simulationsmodell auf der Basis der *lumped-mass*-Methode vorgestellt. Experimentelle Untersuchungen mit dem ROPOS-System (*Remotely Operated Platform for Oceanographic Science*) bis in eine Tiefe von 1765 m bestätigen überwiegend die hiermit vorhergesagten Bewegungsformen, so dass die Autoren die Ergebnisse auf die gesamte theoretische Tauchtiefe des ROPOS von 5000 m extrapolieren. Es wird u. a. gezeigt, dass allein die vertikal wirkenden Tauch- und Stampfbewegungen vom Schiff an das kabelgebundene Tauchgerät signifikant übertragen werden.

Die hier speziell untersuchten frei hängenden Tiefseeeräteträger können bestenfalls als vereinfachte, spezialisierte ROV angesehen werden, da im ursprünglichen Sinne ein ROV durch auftriebsneutrales Verhalten gekennzeichnet ist, das durch entsprechende Auftriebskörper und Vertikalpropeller auch aufsteigende Bewegungen ohne Kabel-/Windeneinsatz durchführen kann (Abb. 1-10). Dies ist bei dem Konzept der hier untersuchten Geräteträger aufgrund der fehlenden Auftriebsbalancierung nicht möglich, wie bereits erwähnt wurde. Besonders im Falle der Kernprobennamegeräte (*piston-core*) und der ROV für schwere Lasten (z. B. MODUS), ergeben sich während eines Tauchgangs rapide ändernde Massen- und Gewichtsverhältnisse durch das Ausheben von Kernproben aus dem Sediment oder das Absetzen oder Bergen schwerer Stationen auf dem Meeresgrund. Dies kann durch Auftriebskörper in genügend flexibler Form während eines Tauchgangs nicht ausgeglichen werden. Trotz dieser hohen Lastanforderungen entstammen die hier genutzten Multifunktionskabel der ROV-Technologie (Abb. 1-4 und Abb. 1-13, links).

Entwurfskriterien für einen Kabelquerschnitt sind zum einen die Einhaltung des *fail-safe* Gedankens, der zur Dimensionierung der Armierung aber auch zur Berücksichtigung redundanter Leitungen führt, sowie natürlich geometrische Randbedingungen: Den äußeren Schutz des Kabelkerns bilden mehrere Lagen Stahlarmierung, deren Hauptaufgabe es ist, die statischen und dynamischen Lasten beim Fieren und Hieven aufzunehmen. Der Kabelkern selbst wird je nach Bedarf durch mindestens zwei Kupferstränge zur Energieübertragung gebildet. In die Aussparungen der großen Kabelquerschnitte schmiegen sich die zur kontinuierlichen bidirektionalen Video- und Datenübermittlung benötigten glasfaser-optischen Leiter (LWL) mit geringerem Durchmesser. Um nicht die LWL zu gefährden, darf zudem zu keiner Zeit der minimale Biegeradius des Kabels unterschritten werden, woraus sich auch der so genannte Krümmungsbegrenzer (*bending restrictor*) am unteren Kabelende direkt oberhalb der Kabelterminierung (Abb. 1-13, rechts) und auch die großen Durchmesser von Windentrommel und Umlenkrolle (*sheave*) erklären. Aus

den genannten Gründen wird jedes Multifunktionskabel speziell für den zu erwartenden Last- und Einsatzbereich ausgelegt (MACARTNEY [38]).

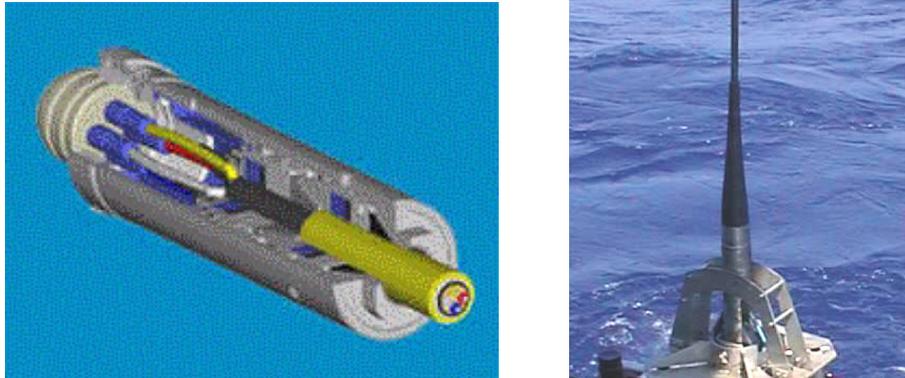


Abb. 1-13: (Links) Schnitt durch eine Kabelterminierung; Terminierung und *bending restrictor* beim MODUS-*umbilical* (rechts)

Aus Eigengewichtsgründen ist der Einsatz Stahl armierter Multifunktionskabel für Tiefseeeräteträger je nach Bauform auf bestimmte Wassertiefen beschränkt, da, anders als bei ROVs üblich, diese eben nicht auftriebsneutral sind. Neueste Technologien setzen daher verstärkt auf den Einsatz von Kevlar- oder Aramidarmierungen, die kaum ein Zehntel des Stahlgewichtes ausmachen, jedoch leicht dieselben Zuglasten ertragen können (MTS [40]). Besonders im Bereich der Zugspannungsverankerungen für Offshoreplattformen werden diese Kompositkabel inzwischen häufig genutzt. Aufgrund fehlender Aufträge für derartige Kabel und den dazu passenden Tiefseewinden aus der Meeresforschungstechnik liegen jedoch erst wenig Erfahrungen über die (hydro-) elastischen Betriebseigenschaften solcher *umbilicals* vor. Um den Erkenntnishorizont für solche langen Kabel im Einsatz zu erweitern, werden daher Prozessor gestützte Systeme entwickelt, die Registrierung, Protokollierung und online-Bewertung der Betriebsparameter von Winde und Kabel erlauben (MASON [42]).

Im Bereich der akustischen Unterwasserkommunikation werden ebenfalls große technologische Erfolge gefeiert. Übertragungsraten von 19.200 bit/s über mindestens 3 km werden heute erreicht. Sollte sich dieser Trend in Zukunft bestätigen und die akustische Daten- und Videoübermittlung in Echtzeit zuverlässig und mit genügend hoher Übertragungsrate direkt vertikal und horizontal durch den Wasserkörper erfolgen können, so würden sich durch den Wegfall der Glasfaserleitungen weitere Spielräume für die Neugestaltung leichter und robuster *umbilicals* ergeben.

1.3 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, einen signifikanten Beitrag zur dynamischen Analyse der hydroelastischen Eigenschaften kabelgebundener Tiefseeeräteträger zu leisten. Die Ergebnisse sollen mit einer experimentellen Validierung eines am ILS entwickelten numerischen Verfahrens zur Berechnung dynamischer Eigenschaften kabelgebundener Geräteträger anhand realer Tiefsee-Einsätze mit einem Prototyp demonstriert werden. Dies setzt die Entwicklung eines geeigneten Meßsystems zur Registrierung, Speicherung und Auswertung relevanter dynamischer Größen, wie z.B. der Kräfte und Beschleunigungen am oberen und unteren Kabelende, voraus.

Das von VANNAHME [54] vorgestellte Simulationsprogramm arbeitet nach der Methode von WEEDE [8] [9] [58] und wurde speziell für geschleppte Systeme entwickelt. Es erlaubt die Vorgabe der Schleppegeschwindigkeit, bzw. der Geschwindigkeit der Queranströmung bei stehendem Schiff, sowie der Kabellänge und der hydrodynamischen Koeffizienten. Neben der stationären Seilkurve und Seilkraft werden dynamische Seilkraftanteile ermittelt, die durch harmonische Anregung oder auch irregulären Seegang induziert werden. Letztere liefern bei den hier untersuchten extremen Kabellängen signifikante Beiträge zur Gesamtbelastung und bestimmen die Ausprägung der resultierenden Oszillationen des Geräteträgers. Nichtlineare dynamische Effekte sind dabei hauptsächlich in den vom Quadrat der Geschwindigkeit abhängigen hydrodynamischen Eigenschaften des genutzten Kabels und Geräteträgers, sowie in der von der Bauart abhängigen inneren Reibungsdämpfung des Kabels begründet. Die Kabelkrümmung spielt im vorliegenden Fall dagegen eine untergeordnete Rolle.

Basis des Programms ist die Finite-Elemente-Methode (FEM), mit der die durch den Seegang induzierten Schwingungserregungen des getauchten Geräteträgers durch Zwangserregung am oberen Aufhängepunkt des getauchten Systems zuverlässig erfasst werden können.

Die Anwendung des Programms für vertikal operierende kabelgebundene Geräteträger bei stehendem Schiff stellt einen vereinfachten Sonderfall für das Simulationsprogramm dar, der trotz der Auslegung für geschleppte Systeme prinzipiell berechenbar ist.

Bei Tauchgängen mit dem hier eingesetzten Geräteträgertyp lassen sich drei Einsatzphasen unterscheiden:

- Phase 1 beginnt mit dem Ausbringen des Geräteträgers mit/ohne Nutzlaststation, entweder über die Hecköffnung des Schiffes oder - wo vorhanden - durch den *moonpool*, und umfasst das Wasern der Struktur und das zügige mehrstündige Fieren zum Meeresboden.
- Phase 2 umfasst die horizontale Operation des Geräteträgers im Nahbereich des Meeresbodens und das kontrollierte Absetzen der Nutzlaststation bzw. die Annäherung und das Andocken an eine Station.
- Phase 3 beginnt mit dem Anheben und Lösen der Systeme vom Meeresboden, also dem Überwinden der Saugkräfte zwischen Struktur und Sedimentboden, und endet mit dem erneuten Durchbrechen der Wasseroberfläche und dem Einholen auf das Arbeitsdeck.

Die Kenntnis kritischer Bewegungseigenschaften des kabelgebundenen Systems dient der Definition der Einsatzgrenzen, die alle drei oben genannten Einsatzphasen umfassen müssen. Das bedeutet, dass in keiner Phase strukturelle Grenzlaster im ‚schwächsten Glied‘ des Tauchsystems überschritten werden dürfen. Dies gilt immer, auch wenn hier drastische Änderungen der die Kräfte und Bewegungen definierenden Größen, wie z. B. Massen, Gewichte und die Kabellänge, von Phase zu Phase vollzogen werden.

Numerische Analysen mit *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dienen in der vorgelegten Arbeit der Vorhersage der hydrodynamischen Koeffizienten der hier untersuchten sehr komplexen Strukturen. Untersucht werden die relevanten Bewegungsrichtungen vertikal auf und ab sowie horizontal vorwärts. Die Bestätigung der Simulationsergebnisse erfolgt über Widerstandsversuche mit maßstäblichen GEOSIM-Modellen, sowie dem Prototyp von MODUS im Schleppkanal der ZE VWS der TU Berlin. CFD-Analysen für einfache und zusammengesetzte zweidimensionale Grundformen ergänzen diese Untersuchungen und können zugleich zur Folgeabschätzung baulicher Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung

der Strukturbewegungen im Bedarfsfall dienen. Eine kurze Betrachtung des Wirbelablöseverhaltens am quer angeströmten Kabel mit Hilfe der dimensionslosen Strouhalzahl rundet diesen Themenkomplex ab.

Zur Vorbereitung von Tiefseeeinsätzen werden in der vorgelegten Arbeit systematische Modelluntersuchungen zum Schwingungsverhalten von Kabel und MODUS-Trägersystem im Versuchstank durchgeführt. Dies dient der Absicherung der numerisch ermittelten Größenordnungen der Bewegungen und dynamischen Lastanteile in der Großausführung. Besonderes Augenmerk wird dabei der Ermittlung der vertikal wirkenden hydrodynamischen Masse auch bei Annäherung des Systems an den Meeresboden gelegt (s. o. Phase 2). Die beim Durchbrechen der Wasseroberfläche auftretenden Lastspitzen werden ebenfalls experimentell ermittelt (zu Phase 1 und Phase 3, s. o.). Dies dient der Dimensionierung von Kraftmesseinrichtungen und Beschleunigungssensoren im Originalmaßstab, sowie der Festlegung benötigter Messfrequenzen und somit der benötigten Messtechnik am getauchten Geräteträger und an Bord des Einsatzschiffes. Der Fokus der Betrachtungen liegt hierbei auf dem neu entwickelten Kraftmesssystem am Tauchgerät, da weltweit nur sehr wenige Erfahrungen mit dem dynamischen Einsatz solcher, auf Dehnmessstechnik beruhenden, Sensoren in Umgebungsdrücken jenseits 300 bar vorliegen.

Die experimentellen und numerischen Untersuchungen dienen der Ermittlung korrekter Koeffizienten, Massen und Gewichte, wie sie zur Dynamikberechnung mit dem Simulationsprogramm benötigt werden. Demgegenüber erlaubt die Mitfahrt bei Tiefseeeinsätzen des Geräteträgers MODUS im Mittelmeer die Protokollierung realer Umweltdaten, sowie die Anwendung des Meßsystems zur Registrierung und Auswertung der dynamischen Parameter beim Einsatz mit unterschiedlichen Nutzlastmodulen.

Die Gegenüberstellung der Übertragungsfunktionen aus Simulation und Messung erlaubt den Vergleich und somit eine Bewertung und evtl. Anpassung des Simulationsprogramms. Die Kräfte und Bewegungen der getauchten Strukturen werden dazu als Folge der durch den Seegang angeregten Bewegungen von Schiff und Kabel unter Zugrundelegung linearen Übertragungsverhaltens spektral analysiert. Dies bedeutet, dass das Energiedichtespektrum der Strukturantwort gleich dem Energiedichtespektrum des Seegangs multipliziert mit dem quadrierten Betrag der Übertragungsfunktion (RAO - *Response Amplitude Operator*) des Schiffes ist. Mit der Fläche unter der Spektralkurve lässt sich somit direkt die zu erwartende signifikante Doppelamplitude der vertikalen Antwortbewegung für die betrachtete Aufwärtsnullstellenperiode (T_0) bezogen auf die signifikante Wellenhöhe der Anregung (H_s) ablesen.

Die Arbeit nutzt diese Modellierung und analysiert anhand der nun bestätigten numerisch ermittelten Übertragungsfunktionen für das italienische Forschungsschiff URANIA den Einfluss des Wellen-Schiff-Begegnungswinkels auf die resultierenden Bewegungen des am Kabel hängenden Systems im relevanten Frequenzbereich. Hierbei wird u. a. der bekannte positive Einfluss bei Arbeit durch einen Mittschiffs gelegenen *moonpool* auf die vertikalen Bewegungsamplituden bestätigt.

2 Physikalisches Modell

2.1 Vorbemerkungen

Wasser ist nicht gleich Wasser und ist daher auch heute noch Gegenstand intensiver Forschungsaktivitäten zu Wasser, zu Land und aus dem Weltraum (ESA [13], UNI BREMEN [53]). Lange bekannt ist allerdings die Temperaturabhängigkeit der kinematischen Zähigkeit (oder Viskosität) von Süß- und Salzwasser, wie sie schon von HOERNER [27] skizziert wird (Abb. 2-1, links).

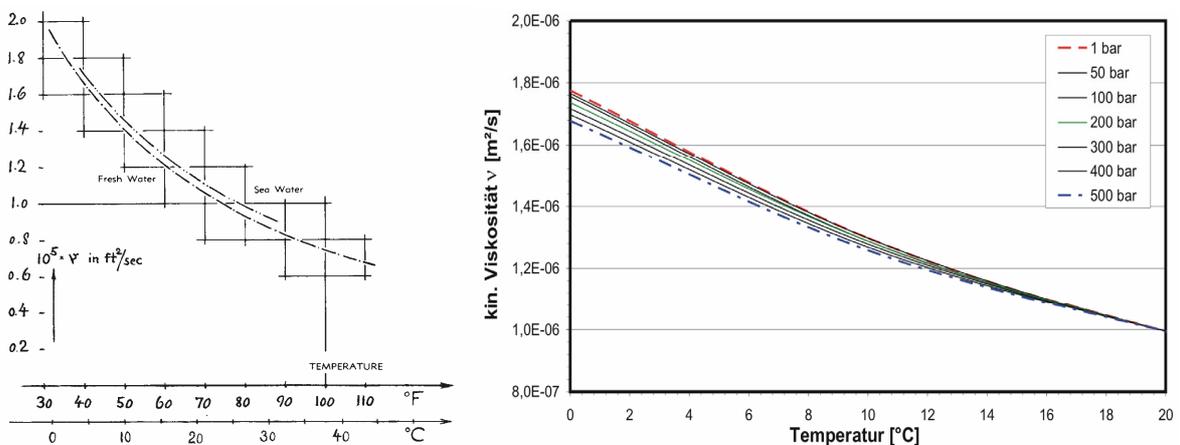


Abb. 2-1: Temperatur- und Druckabhängigkeit der kinematischen Zähigkeit von (links) Süßwasser (*Fresh Water*) und Salzwasser (*Sea Water*) (HOERNER [27]), rechts für Salzwasser (Anm.: $1 \text{ ft}^2/\text{sec} \approx 0,0929 \text{ m}^2/\text{s}$)

Die kinematische Zähigkeit ν ist definiert über den Quotienten aus dynamischer Zähigkeit oder Viskosität η und Dichte ρ eines Newton'schen Fluids:

$$\nu = \eta / \rho \quad (1)$$

$$\nu = \nu(p, T)$$

Aufgrund der Abhängigkeit der Wasserdichte von Salzgehalt, Temperatur T und Druck p zeigt sich ein deutlicher Viskositätsunterschied für das Wasser im sommerlichen Mittelmeer bei $+13$ bis $+20$ °C oder gar $+32$ °C im Oberflächenwasser des roten Meeres, im Vergleich zum antarktischen Weddellmeer bei eisigen -3 bis 0 °C (Abb. 2-1, links).

Der Temperatureinfluss macht sich vor allem in den oberen Wasserschichten bis ca. 100 m Tiefe bemerkbar, darunter bleibt die Temperatur bei normalen Bedingungen vergleichsweise konstant. Die Differenz zwischen Süß- und Salzwasser interessiert hier nur beiläufig, da es nur wenige sehr tiefe und kalte Süßwasserseen gibt, die von Geräteträgern betaucht werden, wie z.B. der Baikalsee oder auch das südliche Kaspische Meer. Alle anderen Szenarien werden durch die Kurve für Salzwasser abgebildet, dessen – im Allgemeinen konstante Dichte - hier mit $1025 \text{ kg}/\text{m}^3$ festgelegt wird. Abb. 2-1 (rechts) verdeutlicht die Druckabhängigkeit der Viskosität, deren Wert bei niedrigen Wassertemperaturen und Drücken zwischen 1 bar und z.B. 500 bar (entspricht einer Tauchtiefe von ca. 5000 m) um bis zu 3 % differieren kann.

Die Kompressibilität des Meerwassers hängt somit zum einen von der Dichteänderung aufgrund von Temperaturunterschieden und zu einem ca. 10-fach größeren Teil von der Druckabhängigkeit der Dichte ab. Dieser Blick auf die extremen Randbereiche ist gewöhnlich nicht notwendig, sollte aber bei der Einsatzplanung eines Tauchgerätes für extreme Tiefen bei der Planung von Tauchgängen im Eismeer beachtet werden⁵.

Als Teil des Gesamtwiderstands spielt die Viskosität als Maß für den (inneren) Reibwiderstand eines Fluids gegen Deformationen aufgrund von Druck- oder Schubspannungen eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der dimensionslosen Reynoldszahl, die das Verhältnis von Trägheitskräften zu Zähigkeitskräften für getauchte Strukturen beschreibt:

$$\text{Re} = u_0 L / \nu \quad (2)$$

mit der Anströmgeschwindigkeit u_0 und einer für den Körper charakteristischen Länge L (z.B. Körperlänge in Bewegungsrichtung oder Kabeldurchmesser). Mit Hilfe der Reynoldszahl lassen sich experimentell ermittelte Ergebnisse für z.B. den dimensionsfreien Widerstandsbeiwert

$$C_d = F_d / (0,5 \rho u_0^2 A) \quad (3)$$

(mit der Widerstandskraft F_d und der Projektionsfläche A) vom voll getauchten Modell auf die Großausführung übertragen, wenn bei geometrischer Ähnlichkeit trotz unterschiedlicher Maßstäbe identische Kennzahlen vorliegen.

Die dimensionslose Keulegan-Carpenter-Zahl (KC-Zahl) setzt die horizontale Wellenpartikelgeschwindigkeit mit der anregenden Wellenperiode T und der charakteristischen Länge L (oder dem entsprechenden Durchmesser D) einer Struktur in Zusammenhang,

$$KC = u_0 T / L. \quad (4)$$

Für Strukturbewegungen in tiefem Wasser ergibt die KC-Zahl das Verhältnis des Umfangs der Wasserpunktteilbahn ($\pi H = 2\pi \zeta_a$) zum Strukturdurchmesser (D) an der Wasseroberfläche,

$$KC = \pi H / D. \quad (5)$$

Die KC-Zahl ist dem Verhältnis von Zähigkeits- und Trägheitskräften (f_d bzw. f_m) proportional, und wird im Besonderen zur Widerstandsprognose von im Wellenfeld harmonisch angeregten, oszillierenden Strukturen genutzt (CLAUSS et al. [7]),

$$\frac{f_d}{f_m} = \frac{C_d}{\pi C_m} \frac{H}{D} \cdot e^{kz} = \frac{1}{\pi^2} \frac{C_d}{C_m} KC \cdot e^{kz}, \quad (6)$$

mit der Wellenzahl $k=2\pi/L$ und dem Wellenträgheitskoeffizienten C_m .

Die sich für maximalen Widerstand und maximale Trägheit ergebenden Werte nehmen mit dem Kreisbahnumfang mit zunehmender Tiefe z' exponentiell ab und haben somit für sehr tief reichende *umbilicals* keine signifikante Bedeutung mehr.

⁵ Das angedeutete Szenario ist Gegenstand des Italienisch-Deutschen Projektes MABEL (*Multidisciplinary Antarctic BEenthic Laboratory*), an dem die TFH Berlin und die TU Berlin mit MODUS beteiligt sind.

2.2 Koordinatensysteme

Das hier vorliegende System aus Schiff / Winde / A-Rahmen / Kabel und Tiefseegeräteträger kann durch drei Koordinatensysteme abgebildet werden. Da es auf offener See schwierig ist, ohne Land- oder Satellitenpeilung⁶ die exakte 3-dimensionale Position eines Schiffes im Seegang zu bestimmen, wird hier von der Vereinfachung eines im Schwerpunkt des Schiffes befindlichen rechtshändigen kartesischen Inertialsystems (X/Y/Z) ausgegangen (Abb. 2-2).

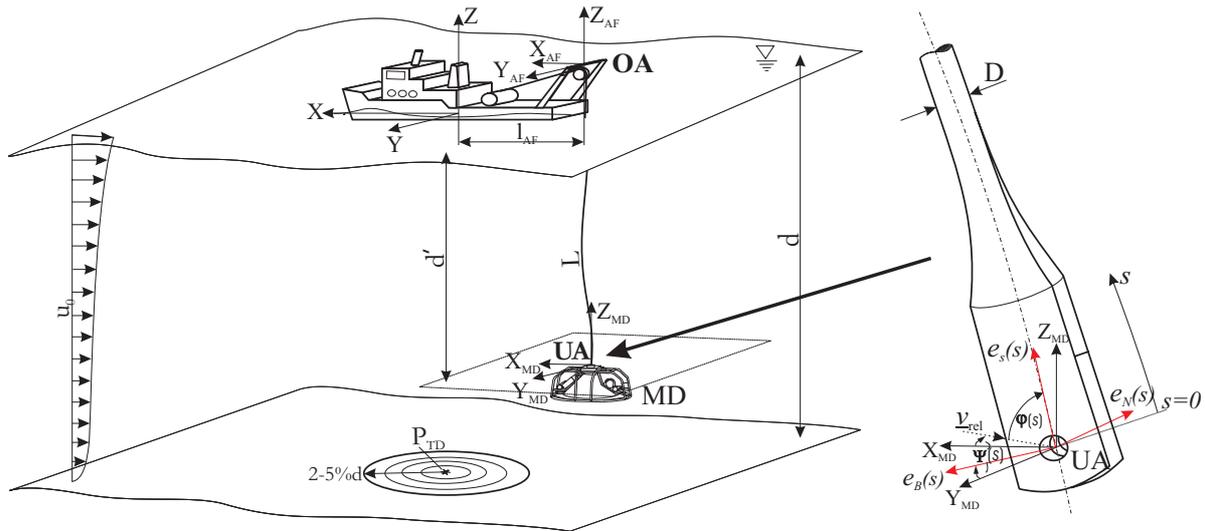


Abb. 2-2: Koordinatensysteme - inertial in der Ruhewasserlinie, bzw. am A-Rahmen (OA) und körperfest am unteren Aufhängepunkt des Kabels (UA); relative Fahrt- oder Anströmgeschwindigkeit (v_{rel}); Neigungs- und Deviationswinkel ($\varphi(s)$, $\psi(s)$); Landepunkt am Meeresboden (P_{TD} -Touch Down Point)

Die positive X-Achse zeigt zum Bug, die Y-Achse stellt die Drehachse der Stampfbewegung dar und zeigt positiv nach Backbord, während die positive Z-Achse nach oben weist. Es wird von stationärer Arbeit unter dynamischer Positionierung des Einsatzschiffes ausgegangen, so dass allein die Queranströmung des Kabels und des Geräteträgers signifikante Querbelastungen auf das getauchte System ausüben können.

Der A-Rahmen ist fest mit dem Schiff verbunden, so dass dessen relevante vertikale Bewegungsamplitude $s(\omega)_{AF}$ und die Bewegung der daran befestigten Umlenkrolle (*sheave*), also des oberen Kabelaufhängepunktes (OA), über den Abstand zum Inertialsystem (l_{AF}) mit der Tauchbewegung s_{33} und der Stampfbewegung s_{55} bestimmt werden kann,

$$s(\omega)_{AF} = s_{33} + l_{AF} \tan(s_{55}). \quad (7)$$

Die aktuelle Kabellänge wird durch die Umdrehungen der Umlenkrolle am A-Rahmen ermittelt. Der Ortsvektor $\vec{r}(s, t)$ zu einem Kabelsegment ist eine Funktion des Ortes (Bogenlänge s) und der Zeit t , und berücksichtigt stationäre und instationäre Kabelkurvenanteile,

⁶ Satellitennavigation wird über das dGPS-System an Bord der F/S URANIA durchgeführt. Die Qualität der Positionsdaten hängt jedoch von der schwankenden Abdeckung des Satellitennetzes ab und ist somit u. U. nicht überall auf See zuverlässig verfügbar. Zudem sind die Daten für vertikal schwingende nicht-militärische Nutzer für den hier vorliegenden Zweck nicht hoch genug aufgelöst. Das System ist daher z. Z. nur zur Bestimmung der Horizontaldrift des Schiffes während eines Tauchgangs geeignet.

$$\bar{r}(s, t) = \bar{r}_{st}(s) + \bar{u}(s, t). \quad (8)$$

Der stationäre Anteil der Kabelkurve verbleibt bei konstanter Queranströmung bzw. Schleppfahrt und Vernachlässigung instationärer Schwingungserregungen am oberen Kabelende. Die instationären Kurvenanteile ergeben sich dagegen aus den instationären Kabellasten d.h. der dynamischen Streckenlast und Schnittlast am Kabelstrang und den zeitlichen Ableitungen der Kabelbewegung $\dot{\bar{r}}(s, t)$, $\ddot{\bar{r}}(s, t)$.

Das untere Kabelende (der untere Aufhängepunkt UA) erhält ein körperfestes Koordinatensystem, $(\bar{e}_s / \bar{e}_B / \bar{e}_N)$, das gegenüber dem Inertialsystem um den Neigungswinkel $\varphi(s)$ und den Deviationswinkel $\psi(s)$ verdreht ist (Abb. 2-2, rechts). Die diesbezüglichen Koordinaten werden durch Multiplikation der Transformationsmatrix $\bar{\bar{A}}$ mit den orthonormierten Basisvektoren des Inertialsystems bestimmt,

$$\bar{\bar{A}} \cdot \begin{Bmatrix} \bar{e}_x \\ \bar{e}_y \\ \bar{e}_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{e}_s(s) \\ \bar{e}_B(s) \\ \bar{e}_N(s) \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

mit

$$\bar{\bar{A}} = \begin{bmatrix} \cos \varphi(s) \cos \psi(s) & \cos \varphi(s) \sin \psi(s) & \sin \varphi(s) \\ -\sin \psi(s) & \cos \psi(s) & 0 \\ -\sin \varphi(s) \cos \psi(s) & -\sin \varphi(s) \sin \psi(s) & \cos \varphi(s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

und den Basisvektoren des begleitenden Dreibeins des jeweiligen Kabelsegmentes,

$$\bar{e}_s(s) = \bar{r}'_{st}(s) \quad \bar{e}_B = \frac{\bar{e}_z(s) \times \bar{r}'_{st}(s)}{|\bar{e}_z(s) \times \bar{r}'_{st}(s)|} \quad \bar{e}_N(s) = \bar{e}_s(s) \times \bar{e}_B(s). \quad (11)$$

Im unteren Aufhängepunkt befindet sich der Ursprung der Bogenlänge s entlang des Kabels sowie der Lastsensor für den Geräteträger. Der Neigungs- und Beschleunigungssensor ist in einer wasserdichten Druckbox versetzt zum Schwerpunkt des Geräteträgers installiert. Die hier gemessenen Daten werden durch eine weitere Koordinatentransformation auf den Gewichtsschwerpunkt (*Center of Gravity* - CoG) des Geräteträgers bezogen (Abb. 2-3).

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & -\cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \alpha & \sin \beta & -\cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{ACC} \\ y_{ACC} \\ z_{ACC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (12)$$

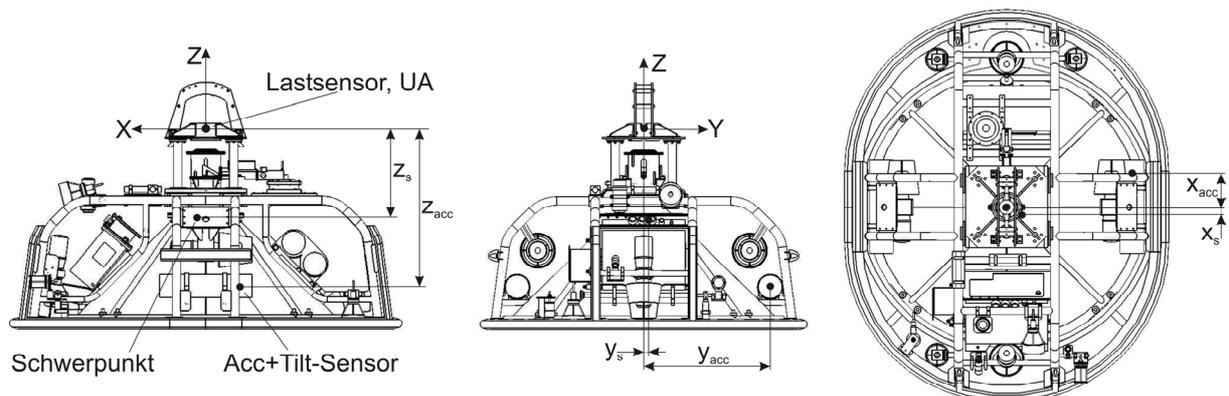


Abb. 2-3: MODUS: Position von Schwerpunkt, Lastsensor, Beschleunigungs- und Neigungssensor (Acc+Tilt-Sensor)

2.3 Kräftegleichgewicht am A-Rahmen

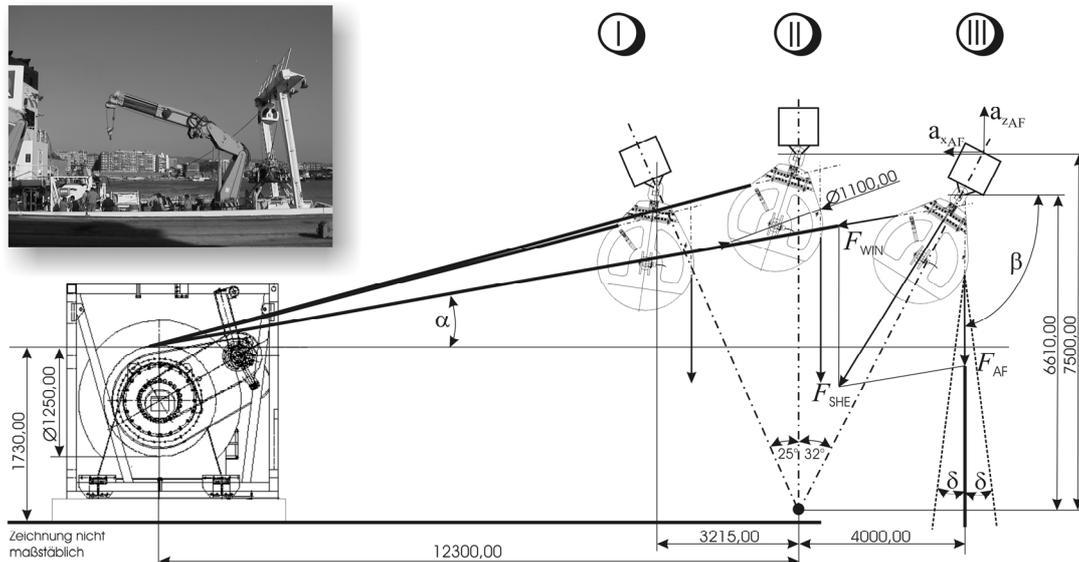


Abb. 2-4: Geometrieverhältnisse für die A-Rahmen-Positionen I bis III am Heck des F/S URANIA (III = Einsatzposition)

Der Einsatz über den A-Rahmen am Heck wird je nach Ausrichtung des Schiffes zur einlaufenden See in den sechs Bewegungsfreiheitsgraden beeinflusst. Besonders signifikante Beiträge liefern die überlagerten Anteile aus Tauch-, Stampf- und Rollbewegung (*heave, pitch, roll*). Abb. 2-4 zeigt die geometrischen Verhältnisse am Arbeitsdeck des Forschungsschiffes URANIA: Das *umbilical* verläuft frei von der Winde zur Umlenkrolle am A-Rahmen, wird dort umgelenkt (hier mit dem Radius 0,55 m), und reicht dann in die Tiefe. Eine Vorrichtung zur aktiven Seegangskompensation (*active heave compensation*) oder Seegangsfolge ist in diesem Fall nicht vorhanden.

Es können drei Arbeitspositionen des A-Rahmens unterschieden werden, die jeweils eigene Windenabrollwinkel α mit sich bringen: Position I ist die Parkposition des Geräteträgers, Position II ist die höchste vertikale Position im Übergang zur Einsatzposition III, die für mehrere Stunden eingehalten werden muss.

Die Gesamtlast des getauchten Systems wird direkt am oberen Aufhängepunkt durch einen Lastsensor in der Achse der Umlenkrolle gemessen. Ihr maximaler Wert resultiert aus der mit der Kabellänge zunehmenden statischen Zuglast plus der Gewichtskraft des Geräteträgers MODUS mit/ohne Bodenstation. Im Seegang kommt ein dynamischer Lastanteil hinzu, zu der die frequenz- und beschleunigungsabhängige hydrodynamische Massenkraft gehört. Die Arbeitsposition III ist somit ausschlaggebend für die Dimensionierung des A-Rahmens, d.h. aller tragender Bauteile wie vertikale und horizontale Kastenträger, Auge und Schekel. Ein Sicherheitsfaktor (= Quotient aus Kabelbruchlast und maximaler Gesamtlast) größer 2 muss berücksichtigt werden.

Stets vergleichbare Größe hat im quasistatischen Fall - also bei geringem Seegang - der Eintauchwinkel β des Kabels ins Wasser. Bei Einsatz von MODUS schwankt dieser um die Vertikale (90°), bei ‚Schleppfischen‘ kann er bis 45° annehmen. Kleine Änderungen des Eintauchwinkels β um $\pm\delta$ treten aufgrund von Stampfbewegungen und/oder bei Drift oder Schleppfahrt stets auf und spielen eine Rolle bei der Deutung

der gemessenen Gesamtlast an der Umlenkrolle, auch wenn hier kurzfristige Schwankungen der Umlenkrolle selbst um den Aufhängepunkt vernachlässigt werden.

Aus geometrischen Gründen muss zwischen der maximalen Kabellast und der an der Umlenkrolle anliegenden Last unterschieden werden. Dies ist beim der Lastsensor an der Umlenkrolle berücksichtigt, der auf die Verhältnisse kalibriert ist und somit die korrekte Kabellast im Rahmen der Messgenauigkeit anzeigt.

Nach Abb. 2-4 ist die vertikale Kabellast F_{AF} am A-Rahmen gleich der statischen Gewichtskraft $F_{AF-stat}$ plus der beschleunigungsabhängigen dynamischen Kraft F_{AF-dyn} in vertikaler Richtung:

$$F_{AF-stat} = w_{Cab} + w_{MD}(+w_{BS}) \quad (13)$$

$$F_{AF-dyn} = \left(\frac{w_{Cab} + w_{MD}(+w_{BS})}{g} + m_{hy} \right) \ddot{s}_{33} \quad (14)$$

$$F_{AF} = F_{AF-stat} + F_{AF-dyn} \quad (15)$$

mit den jeweiligen um die Auftriebskraft reduzierten Massen von Kabel, MODUS und Bodenstation (w_{Cab} , w_{MD} , w_{BS}), der hydrodynamischen Masse m_{hy} , der Erdbeschleunigung g und der Vertikalbeschleunigung \ddot{s}_{33} . Die Kabelschnittlasten an der Windenseite und an der Wasserseite der Umlenkrolle müssen identisch sein, also

$$F_{WIN} = F_{AF}, \quad (16)$$

so dass die resultierende Kraft an der Umlenkrolle F_{SHE} über das Kräfteparallelogramm und den Kosinussatz ermittelt werden kann:

$$F_{SHE} = \sqrt{F_{WIN}^2 + F_{AF}^2 - 2F_{WIN}F_{AF} \cos(\alpha + \beta)}, \quad (17)$$

Die Abb. 2-5 zeigt eine Abschätzung der resultierenden Kräfte für drei α -Werte bei Variation von β und gegebenen Kabel- und Seegangparametern.

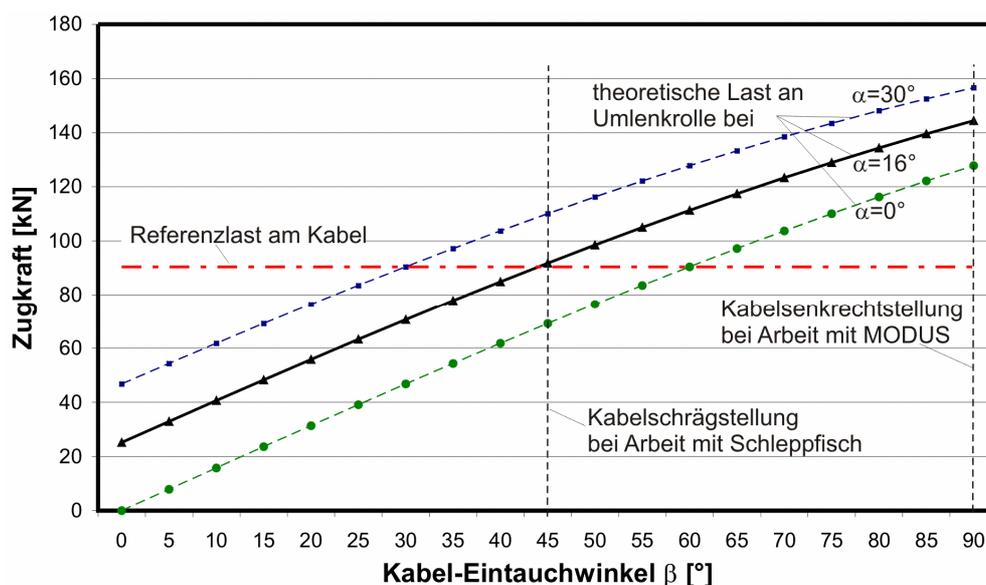


Abb. 2-5: Abschätzung der Kraftverhältnisse an der Umlenkrolle mit theoretischer und gemessener Kabelzugkraft (MODUS+Bodenstation, Wellenperiode $T=4,2$ s, signifikante Wellenhöhe $H_s=0,5$ m, Kabellänge $l=3320$ m)

2.4 Dynamisches Problem

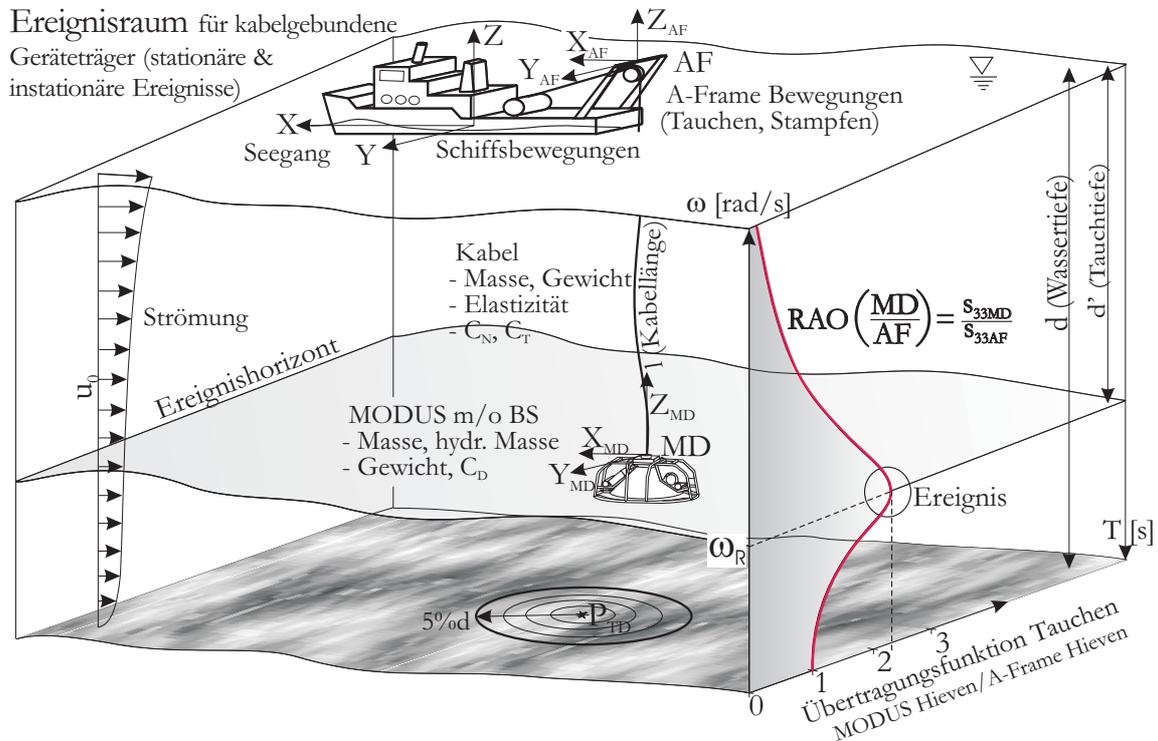


Abb. 2-6: Der *Ereignisraum* basiert auf aktuellen Operations- und Umweltparametern und nutzt die Übertragungsfunktion (RAO) für das Einsatzschiff und den spezifischen Geräteträger

Der *Ereignisraum* verdeutlicht die Abhängigkeit des Bewegungsverhaltens der Komponenten des kabelgebundenen Tauchsystems von Umwelt- und Operationsparametern (Abb. 2-6). Im Zentrum der Betrachtung steht das Schiff mit Winde und A-Rahmen, im Einsatz mit kabelgebundenem Tiefseegeräteträger m/o Bodenstation. Vertikale Schwingungen des Geräteträgers stellen Antwortbewegungen auf resultierende vertikale Oszillationen von Schiff/A-Rahmen und Kabel dar, induziert durch Wind, Seegang und Strömung. Der *Ereignisraum* beschreibt modellhaft die Dimensionen des Einsatzgebietes, das durch die sich stets ändernde Kabellänge l sowie den davon abhängenden horizontalen Aktionsradius des Geräteträgers definiert wird.

Als mit dem unteren Kabelende mitbewegte isobare Fläche ist der *Ereignishorizont* zu verstehen. Neben der Kabellänge werden hierüber die gesamte aktuelle Kabelmasse m_k sowie die Tauchtiefe d' mit dem entsprechenden hydrostatischen Druck festgelegt. Als *Ereignis* ergibt sich folglich der aktuelle Schnittpunkt von *Ereignishorizont* und Kurve der Übertragungsfunktion (RAO), d.h. dem Quotienten der Tauchbewegungen von Geräteträger (S_{33MD}) und A-Rahmen (S_{33AF}).

Die Bewegungsübertragung hängt direkt von der jeweiligen Gesamtmasse des getauchten Systems und der aktuellen Kabellänge ab, die über die zugehörige Schwingungsfrequenz ω bzw. die Schwingungsperiode T aufgetragen wird. Obwohl jedes Tauchsystem somit seine spezifische RAO-Kurve besitzt, ist die allgemeine Form charakteristisch für vertikal schwingende Feder-Masse-(Dämpfer)-Systeme.

Für den Einholvorgang (Hieven) gilt folgende Beschreibung: Im niedrigen Frequenzbereich, also sehr langen Wellen ($\omega \rightarrow 0$), sind die Bewegungsamplituden der Anregung und der Antwort ähnlich groß, so dass der RAO-Wert bei langem Kabel und großer Gesamtmasse bei ca. 1 liegt. Verringert sich die Kabellänge und somit auch die Masse, so steigt die Amplitude des Antwortsignals aufgrund der Elastizität (EA) des Kabels überproportional, bis sich bei Erreichen der Resonanzfrequenz ω_R die maximale vertikale Schwingungsamplitude des Geräteträgers einstellt. Hier kompensieren sich Trägheits- und Rückstellkräfte des Systems. Im Beispiel liegt die Bewegungsvergrößerung bei ω_R beim ca. 2,2-fachen der Amplitude des A-Rahmen (hier als besonderes Ereignis umkreist).

Nach Überschreiten dieses Maximalwertes wird die Anregungsfrequenz zu groß für die getauchte Struktur, die aufgrund von Dämpfung und Trägheit nicht mehr folgen kann, so dass der resultierende RAO-Wert bis zur Wasseroberfläche asymptotisch auf Null abfällt.

Als Besonderheit des MODUS-Geräteträgers ist das Absetzen oder Aufnehmen schwerer Stationen am Meeresgrund zu sehen, bei der abrupt signifikante Änderungen von Masse und Gewicht, und somit die Frequenzverschiebung des RAO-Kurvenmaximums, zum Trägerkonzept gehören.

2.4.1 Spektrale Analyse

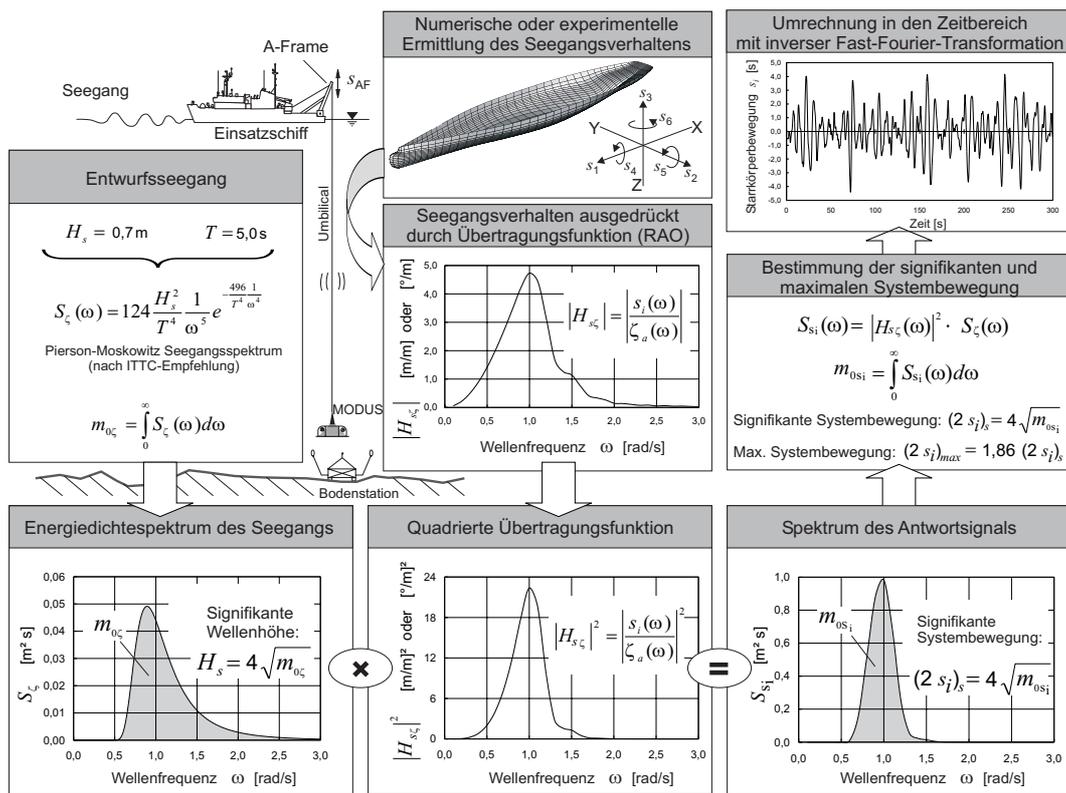


Abb. 2-7: Prinzip der Bestimmung des dynamischen Antwortverhaltens des Einsatzschiffes im Seegang durch Anwendung der Spektralanalyse und Kurzzeitwellenstatistik nach CLAUSS et al. [7] (in VANNAHME [54]).

Wie das Berechnungsschema nach CLAUSS et al. [7] in Abb. 2-7 verdeutlicht, ergibt sich das Spektrum des Antwortsignals aus der Multiplikation des Betrages der quadrierten Übertragungsfunktion mit dem gewählten Seegangsspektrum, hier dem Pierson-Moskowitz-Spektrum.

Aus dessen Fläche folgt mit

$$(2s_i)_s = 4 \sqrt{\int_0^{\infty} S_{s_i}(\omega) d\omega} = 4 \sqrt{m_{0s_{3a}}} \quad (18)$$

die doppelte signifikante Bewegungsamplitude, deren Maximalwert mit $(2s_i)_{\max} = 1,86 \cdot (2s_i)_s$ bestimmt werden kann. Der Faktor 1,86 gilt für ausgereifte Windsee und Tiefwasser und kennzeichnet die für eine Stichprobe von 1000 Wellen ermittelte statistische Überschreitung der 1/3 höchsten Wellenhöhen, d.h. $H_{1000} = 1,86 \cdot H_{1/3}$.

Das Verhältnis des signifikanten Antwortverhaltens zur zugehörigen signifikanten Anregungswellenhöhe ist ein universeller Parameter, der das Bewegungsverhalten für die gewählte spektrale Aufwärtsnullstellenperiode T_0 (*zero up-crossing period*) charakterisiert. Die Transformation des Antwortspektrums des Systems aus dem Frequenzbereich in den Zeitbereich erfolgt durch Anwendung der inversen Fast-Fourier-Transformation (iFFT).

2.4.2 Elastisches Ersatzsystem

Das vertikal schwingende System kann vereinfachend als Feder-Masse-Dämpfer mit einem Freiheitsgrad modelliert werden (Abb. 2-8), mit dessen Hilfe eine Abschätzung der Problembereiche des hydroelastischen Systems erfolgen kann:

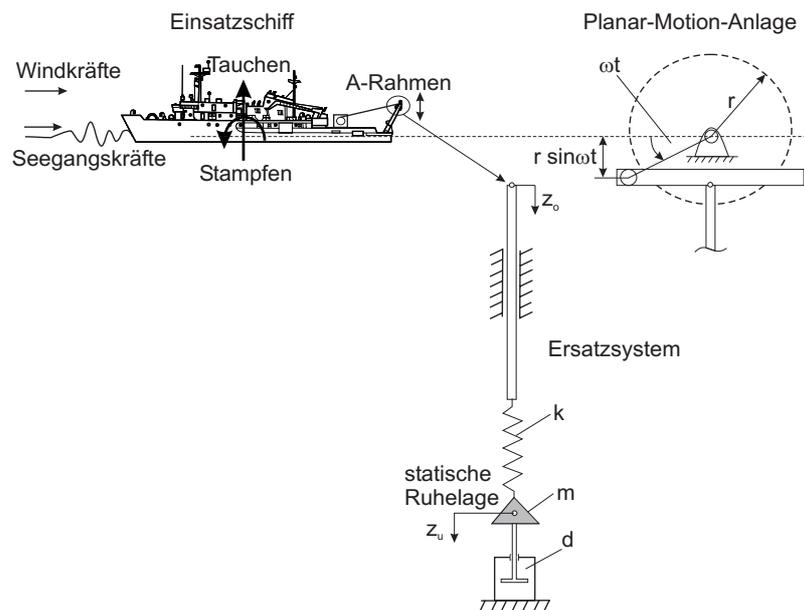


Abb. 2-8: Feder-Masse-Dämpfer Ersatzsystem

Die von der Kreisfrequenz ω abhängige Zwangsbewegung des oberen Punktes $z_o(\omega)$ sei bekannt, denn sie folgt entweder einem Messschrieb einer irregulären Schiffsbewegung oder resultiert aus einer reinen Oszillation einer Planar-Motion-Anlage mit vorgegebener Amplitude, Frequenz und Phasenverschiebung e . Das Verhältnis der komplexen Vertikalamplituden des unteren Punktes $z_u(\omega)$ zum oberen Punkt ist die Übertragungsfunktion des Gesamtsystems (auch Vergrößerungsfaktor V oder *Response Amplitude Operator* RAO genannt), ihr Betrag das Verhältnis der realen Antwort- und Erregungsamplituden,

$$H(\omega) = \frac{z_u(\omega)}{z_o(\omega)} = \frac{z_u}{z_o} e^{i\varepsilon}, \quad \text{mit dem Betrag } |H(\omega)| = \frac{z_u}{z_o}. \quad (19)$$

Über die Kräftebilanz in z-Richtung wird aus dem Ersatzsystem die Bewegungsdifferentialgleichung des linear gedämpften Feder-Masse-Systems hergeleitet,

$$m\ddot{z}_u + F_d + kz_u = kz_o, \quad (20)$$

mit der Masse m , der linearen Federkraft F_d des homogen elastischen *umbilicals*, der Federrate $k=EA/l$ und der Vertikalbeschleunigung \ddot{z}_u des unteren Punktes.

Die Gesamtmasse m_{ges} des getauchten schwingenden Systems setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen: Der Masse der angehängten Last m_{Last} , bestehend aus Eigenmasse m_0 des Geräteträgers mit/ohne Bodenstation, der beschleunigungsabhängigen hydrodynamischen Masse m_{hy} des Geräteträgers mit/ohne Bodenstation für die vertikale Bewegungsrichtung, der im offenen Rahmen des Geräteträgers mit/ohne Bodenstation eingeschlossenen Wassermasse m_{ein} sowie, vereinfachend, einem Drittel der Kabelgesamtmasse m_K , bei aktueller Länge l ($m_K=m_K^*$),

$$\begin{aligned} m_{Last} &= m_{0(MD\ m/o\ BS)} + m_{ein(MD\ m/o\ BS)} + m_{hy(MD\ m/o\ BS)} \\ m_{ges} &= m_{Last} + m_K / 3 \end{aligned} \quad (21)$$

Letzterer Term wird von (SZABO [51]) über eine Energiebetrachtung hergeleitet, bei der davon ausgegangen wird, dass die Masse des elastischen Kabels gleichmäßig über deren Länge verteilt ist, so dass das Element der Länge dz die Masse $m_K dz/l$ und die Geschwindigkeit $(\delta w/\delta t)=z \dot{s}(t)/l$ hat, mit der Vertikalgeschwindigkeit \dot{s} der angehängten Last.

Die kinetische Energie eines Elementes des elastischen Kabels ergibt sich aus

$$\frac{1}{2} \frac{m_K}{l} dz \left(\frac{z \dot{s}(t)}{l} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{m_K}{l^3} \dot{s}(t)^2 z^2 dz, \quad (22)$$

woraus sich mit der kinetischen Energie der angehängten Last m_{Last} die kinetische Energie des Gesamtsystems ergibt,

$$E = \frac{1}{2} m_{Last} \dot{s}(t)^2 + \frac{1}{2} \frac{m_K}{l^3} \dot{s}(t)^2 \int_0^l z^2 dz = \frac{1}{2} \left(m_{Last} + \frac{m_K}{3} \right) \dot{s}(t)^2. \quad (23)$$

Die potentielle Energie des elastischen Kabels folgt aus

$$U = \int_0^{s(t)} \frac{EA}{l} s(t) ds = \frac{1}{2} \frac{EA}{l} s(t)^2. \quad (24)$$

Aus dem Energiesatz $E+U=const$, d.h.

$$\frac{d(E+U)}{dt} = \frac{1}{2} \left(m_{Last} + \frac{m_K}{3} \right) 2 \dot{s} \ddot{s} + \frac{EA}{2l} 2 \dot{s} s = 0 \quad (25)$$

folgt

$$\left(m_{Last} + \frac{m_K}{3} \right) \ddot{s} + \frac{EA}{l} s = 0. \quad (26)$$

Bei harmonischer Anregung ergibt sich hieraus die Eigenkreisfrequenz ω_0 der ungedämpften Vertikal-schwingung der hängenden Last,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_{Last} + \frac{m_K}{3}}} = \sqrt{\frac{EA}{l m_{ges}}} \quad (27)$$

Das Schwingungsverhalten wird also entscheidend durch die hydrodynamische Masse des Geräteträgers, sowie die zu einem Drittel berücksichtigte, kabellängenabhängige Kabelmasse bestimmt.

Die hydrodynamische Masse kann für die hier relevanten moderaten Amplituden als unabhängig von der Erregerfrequenz angesehen werden. Sie lässt sich analytisch jedoch nur für einfache Körper wie Würfel, Zylinder, Kugeln oder Platten berechnen; Daten für komplexe Strukturen wie den MODUS Geräteträger können aber über die Eigenkreisfrequenz aus Schwingversuchen ermittelt werden.

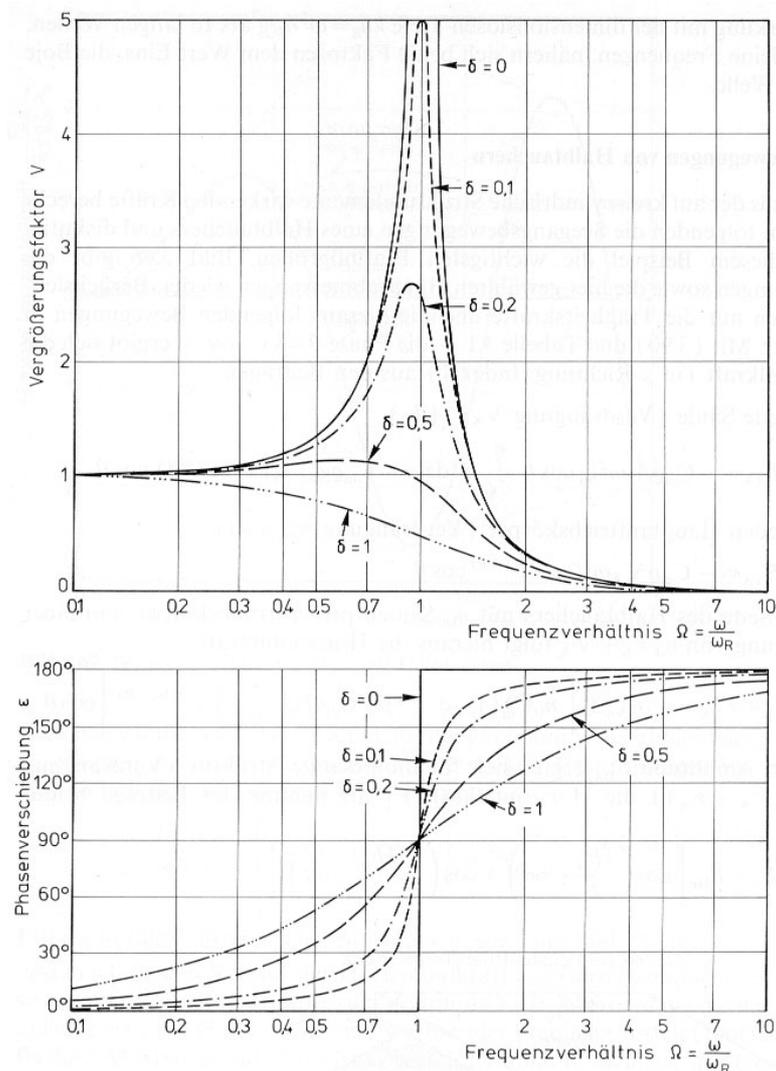


Abb. 2-9: Dämpfungsabhängige Übertragungsfunktionen (oder RAO oder Vergrößerungsfaktoren) mit Phasenverschiebungen einer beispielhaften erzwungenen Schwingung (δ in Abbildung entspricht $d/(m_{ges}\omega_0)$ im Text) (CLAUSS et al. [7])

Die resultierende Resonanzfrequenz ω_R im hier vorliegenden Fall schwach gedämpfter Schwingung ist die um die reibungsabhängige Abklingkonstante $\delta = d/(2m_{ges})$ (Einheit s^{-1}) reduzierte Eigenkreisfrequenz ω_0 der ungedämpften Schwingung,

$$\omega_R = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{k}{m_{ges}} - \frac{d^2}{4m_{ges}^2}}, \quad (28)$$

und der fallabhängigen, charakteristischen Dämpfungskonstante d :

$$\begin{aligned} \text{bei schwacher Dämpfung} \quad d < 2m_{ges}\omega_0 = 2\sqrt{km_{ges}} \\ \text{bei mittlerer Dämpfung} \quad d = 2\sqrt{km_{ges}} \quad (\text{aperiodischer Grenzfall}) \\ \text{bei starker Dämpfung} \quad d > 2\sqrt{km_{ges}} \quad (\text{Kriechfall}). \end{aligned} \quad (29)$$

Die in (19) eingeführte Phasenverschiebung ε ergibt sich nun aus

$$\tan \varepsilon = \frac{d}{m_{ges}\omega_0} \frac{\Omega}{1-\Omega^2}, \quad (30)$$

mit dem Frequenzverhältnis im Resonanzfall $\Omega = \omega_0/\omega_R = 1$, d.h. $\omega_0 = \omega_R$. Beide Kreisfrequenzen (ω_0 und ω_R) können z.B. experimentell ermittelt werden, woraus sich dann auch δ und d bei bekannten Werten für k und m_{ges} ergeben.

Das grundsätzliche Verhältnis zwischen dämpfungsabhängiger Übertragungsfunktion (RAO oder V) und Phasenverschiebung ε einer erzwungenen Schwingung wird in Abb. 2-9 deutlich (δ in der Abbildung entspricht $d/(m_{ges}\omega_0)$ im Text). Bei hohen Wellenfrequenzen nähert sich die Übertragungsfunktion asymptotisch dem Wert Null, d.h. die Vertikalbewegungen der Struktur verschwinden. Im Resonanzfall ist V nur von der Dämpfungskonstante d abhängig und die Phasenverschiebung beträgt 90° . Bei niedrigen Wellenfrequenzen bewegt sich die getauchte Struktur in Phase mit der anregenden Welle, V erreicht den Wert Eins, d.h. z_u und z_o sind identisch.

Während des Fierens/Hievens von kabelgebundenen Geräteträgern werden ebenfalls diese drei Bewegungscharakteristiken durchlaufen (Abb. 2-10). Der erste Bereich reicht von der Wasseroberfläche bis zum Resonanzfall: Aufgrund des relativ kurzen Kabels mit der vergleichsweise kleinen Gesamtmasse erfolgen die Vertikalbewegungen von A-Rahmen und Geräteträger m/o BS mit der größten Frequenz und in Phase. Bei weiterem Anstieg der Kabellänge und entsprechend größerer Gesamtlast wird der Resonanzfall (Bereich zwei) überschritten und die beiden Kabelenden schwingen mit abnehmender Frequenz in Gegenphase (Bereich drei). In der Abbildung sind die von der Kabellänge und der angehängten Masse abhängenden charakteristischen Bewegungsbereiche für einen typischen Seegang mit einer Wellenperiode von $T_0 = 4,0$ s dargestellt, bei dem der Resonanzfall für den Einsatz von MODUS bei einer Kabellänge von ca. 1350 m und für MODUS+BS bei ca. 1000 m liegt.

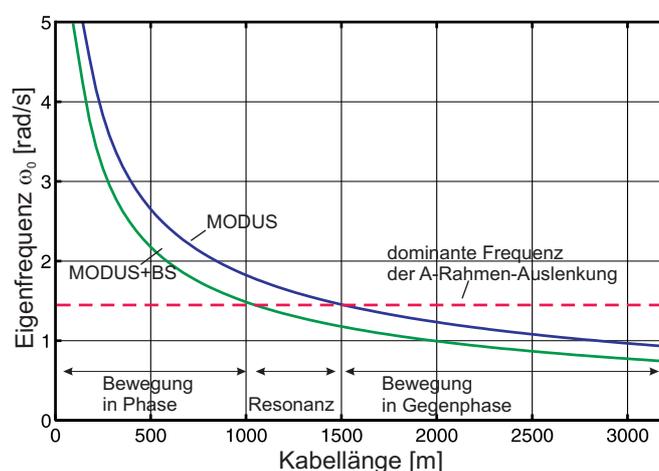


Abb. 2-10: Die Eigenfrequenz der Vertikalschwingung in Abhängigkeit von angehängter Masse und Kabellänge; Wellenperiode $T_0 = 4,0$ s

Durch Berücksichtigung der nichtlinearen Dämpfungskraft

$$F_d = \frac{\rho}{2} A_v C_d \dot{z}_u |\dot{z}_u| \quad (31)$$

wird Gleichung (20) wie folgt erweitert,

$$m_{ges} \ddot{z}_u + \frac{\rho}{2} A_v C_d \dot{z}_u |\dot{z}_u| + k z_u = k z_o = F(t), \quad (32)$$

mit der vertikalen Projektionsfläche des Geräteträgers A_v , dem Dämpfungs- (Widerstands-) Koeffizienten C_d , der Vertikalgeschwindigkeit \dot{z}_u des unteren Punktes und der Erregerkraft $F(t)$.

C_d kann aus Schwingungsversuchen über das Gleichsetzen der Erregerkräfte und der Dämpfungskräfte bei Resonanzfrequenz und Einsetzen der ermittelten Übertragungsfunktion $H(\omega)$ und der Erregeramplitude z_o ermittelt werden. In der vorliegenden Arbeit wird C_d zudem mit Widerstandsversuchen im Schlepptank sowie numerisch mit CFD ermittelt.

Die Lösung von (32) setzt sich aus einem homogenen und einem partikulären Teil zusammen ($z_u = z_{u,h} + z_{u,p}$). Der homogene Teil lautet

$$m_{ges} \ddot{z}_{u,h} + \frac{\rho}{2} A_v C_d \dot{z}_{u,h} |\dot{z}_{u,h}| + k z_{u,h} = 0, \quad (33)$$

und hat die Lösung,

$$z_{u,h} = C_h e^{\frac{-d}{2m_{ges}} t} \cos(\omega_0 t + D_h), \quad (34)$$

mit der Amplitude C_h und der Phase D_h aus den Anfangsbedingungen. Dies entspricht einer harmonischen Schwingung mit gemäß $e^{\frac{-d}{2m_{ges}} t}$ abklingenden Amplituden.

Die partikuläre Lösung von (32) lautet für den eingeschwingenen Zustand

$$F(t) = k \operatorname{Re} \left\{ \tilde{z}_o e^{i\omega t + \varepsilon} \right\}. \quad (35)$$

Durch Einsetzen des Ansatzes $z_{u,p} = \tilde{z}_u e^{i\omega t}$ in (32) und Division durch $e^{i\omega t}$ erhält man

$$-\omega^2 m_{ges} \tilde{z}_u + i \frac{\rho}{2} A_v C_d \tilde{z}_u |\tilde{z}_u| \omega e^{i\omega t} + k \tilde{z}_u = k \tilde{z}_o e^\varepsilon. \quad (36)$$

Durch Verwendung des ersten Gliedes der cos-Reihe wird der Dämpfungsterm linearisiert,

$$\operatorname{Re} \left\{ e^{i\omega t} \right\} = |\cos(\omega t)| \cos(\omega t) \rightarrow \frac{8}{3\pi} \cos \omega t, \quad (37)$$

und man erhält nach Einsetzen von (37) in (36) eine linearisierte Bewegungs-DGL mit frequenz- und amplitudenabhängiger Dämpfungskraft

$$-\omega^2 m_{ges} \tilde{z}_u + i \frac{8}{3\pi} \frac{\rho}{2} A_v C_d \omega^2 \tilde{z}_u^2 + k \tilde{z}_u = k \tilde{z}_o e^\varepsilon. \quad (38)$$

Durch Umstellung von Gleichung (38) erhält man die Übertragungsfunktion für die realen vertikalen Bewegungen des oberen und unteren Kabelendes,

$$H(\omega) = \left| \frac{\tilde{z}_u}{\tilde{z}_o} \right| = \left| \frac{\omega_o^2}{\omega_o^2 - \omega^2 + i \frac{8}{3\pi} \frac{\rho}{2} \frac{A_v}{m} C_d \omega^2 \tilde{z}_u} \right|. \quad (39)$$

Versuchsergebnissen für MODUS folgend, nimmt die Übertragungsfunktion für die vertikalen Bewegungen zwischen oberem und unterem Kabelende bei Resonanzfrequenz Werte bis ca. $H(\omega_R)=2,3$ an. Wird dieser Wert als maximale Lösung der Gleichung (39) zugrunde gelegt, so führt die Annahme einer mittleren typischen Seegangserregung mit $H_s=0,65$ m und der Wellenperiode von $T_0=4,0$ s zu dem für Fieren und Hieven gemittelten vertikalen Widerstandsbeiwert $C_d=1,95$. Ergebnisse von Widerstandsversuchen mit Modellen von MODUS in der Version GEO2 ergeben für Hieven bzw. Fieren Werte zwischen 0,86 und 1,4 (s. a. Kapitel 5.2.2), während CFD-Simulationen für die Großausführung einen Mittelwert von $C_d=2,0$ ergeben (s. a. Kapitel 2.6.3). Es wird im vorliegenden Zusammenhang daher von einem zulässigen Wert zur Veranschaulichung der Problematik ausgegangen. Die resultierende RAO-Kurve für Tauchen ist in Abb. 2-11 dargestellt.

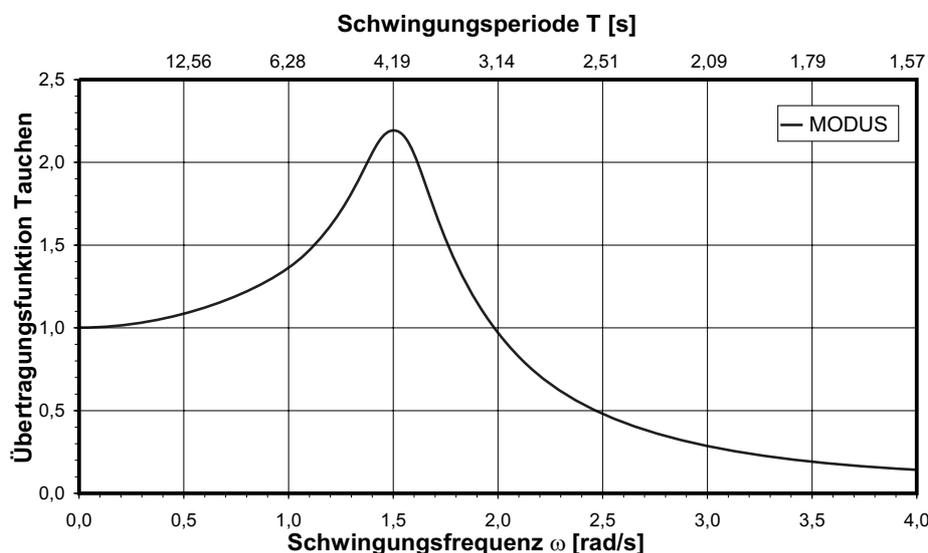


Abb. 2-11: Übertragungsfunktion für Tauchen für MODUS bei Berücksichtigung linearisierter Dämpfungskraft; $C_d=1,95$, Kabellänge 1330 m, Wellenperiode $T_0=4,0$ s, $H_s=0,65$ m

3 Numerische Simulationen

3.1 Hydroelastische Simulationen

Das am ILS der TU Berlin entwickelte Simulationsprogramm TOBO-SIM dient zur Vorhersage der stationären Kabelauslenkung und der instationären Bewegungsübertragung vom Schiff auf geschleppte Sensorträger. Der vorliegende Einsatzfall mit dynamisch positioniertem, stehendem Einsatzschiff und vertikal bis zum Meeresboden operierendem Geräteträger stellt wegen der fehlenden Horizontalgeschwindigkeit des Gesamtsystems und der dadurch zu vernachlässigenden stationären Kabelauslenkung einen Sonderfall dar.

Der Lösungsalgorithmus des Programms basiert auf der Finite-Elemente-Methode. Hierfür wird das Kabel durch n finite Segmente diskretisiert, an deren jeweiligen Endpunkten die Massenkkräfte, bzw. Gewichtskräfte und die hydrodynamischen Reib- und Druckwiderstandskräfte konzentriert angreifen. Ein am unteren Kabelende befestigter Geräteträger stellt somit nur ein weiteres Segment mit extremen Eigenschaften dar.

Die hydrostatische Druckkraft auf die benetzte Kabeloberfläche spielt im vorliegenden – idealisiert vertikalen - Einsatzfall keine Rolle in der Kräftebilanz, da sich die Kraftwirkungen entlang des Umfangs aufheben. Auch werden Torsionsmomente am Kabelsegment nicht berücksichtigt.

Grundlage und Eingangsgröße der hydroelastischen Simulationen ist die experimentelle oder numerische Ermittlung des Seegangsverhaltens des Schiffes in Form der Übertragungsfunktionen $H_{S\zeta}(\omega)$ für alle Starrkörperfreiheitsgrade s_i . Die Übertragungsfunktionen RAO verdeutlichen für ein gewähltes Frequenzspektrum das Antwortverhalten einer Struktur in Stärke und Phasenlage auf eine Anregung durch eine Welle mit der signifikanten Wellenhöhe $H_s=1$ m. Die Registrierungen der Kräfte und Beschleunigungen am A-Rahmen und am Geräteträger erfolgen im Zeitbereich und sind somit erst nach Fast-Fourier-Transformation (FFT) spektral zu analysieren. Die numerische Bestimmung der RAO erfolgt hier mit dem 3D-Diffraktionsprogramm WAMIT [57], Details zu den dort genutzten mathematischen Modellen sind NEWMAN und SCLAVOUNOS [43] zu entnehmen.

Anhand der für die hier vorliegenden Systeme besonders relevanten Roll- und Stampfbewegungen wird das spektrale Analyseverfahren im Folgenden durch eine beispielhafte Untersuchung für das Forschungsschiff F/S URANIA und den kabelgebundenen Geräteträger MODUS m/o Bodenstation näher betrachtet. Mit dem am ILS der TU Berlin entwickelten Simulationsprogramm wird das Antwortverhalten von MODUS ($m_{MD}=1090$ kg) bzw. MODUS plus Station ($m_{MD+BS}=3861$ kg) plus den jeweiligen hydrodynamischen Massen (ca. $m_{hy_MD}=5420$ kg, ca. $m_{hy_MD+BS}=8670$ kg,) und den von den Rohrrahmen eingeschlossenen Wassermassen (ca. $m_{ein_MD}=100$ kg, ca. $m_{ein_MD+BS}=250$ kg) am *umbilical* der Länge 3400 m im Frequenzbereich ermittelt.

Abb. 3-1 zeigt Ergebnisse der sehr unterschiedlichen RAOs für die Tauchbewegung (links) und die Stampfbewegung (rechts) für das F/S URANIA in Seegang von vorne bzw. der Seite. Beim Tauchen spielen die Wellen von der Seite die dominierende Rolle, während beim Stampfen die Wellen von vorn den weitaus größeren Einfluss auf die vertikale Schiffsbewegung im relevanten Frequenzbereich zwischen 0,5 und 2 rad/s ausüben. Die Kurvenverläufe sind entscheidend für die resultierende Übertragung der Bewe-

gung auf die am oberen Kabel-Aufhängepunkt (hier der A-Rahmen) hängenden Strukturen. Dieser Punkt kann je nach Konfiguration des Schiffes am Heck oder auch Mittschiffs liegen.

Durch Kombination der Bewegungsanteile von Tauchen und Stampfen für die beiden untersuchten Anströmrichtungen kann die jeweilige resultierende Vertikalbewegung des Aufhängepunktes bestimmt werden (Abb. 3-2, oben). Im nächsten Schritt werden die RAOs für die Tauchgeräte bestimmt (Abb. 3-2, Mitte). Durch Multiplikation dieser beiden Teilergebnisse ergeben sich die resultierenden RAOs für die getauchten Systeme im Seegang bei signifikanter Wellenhöhe $H_s=1$ m. Die quadrierten Ergebnisse sind in Abb. 3-2 (unten) abgebildet.

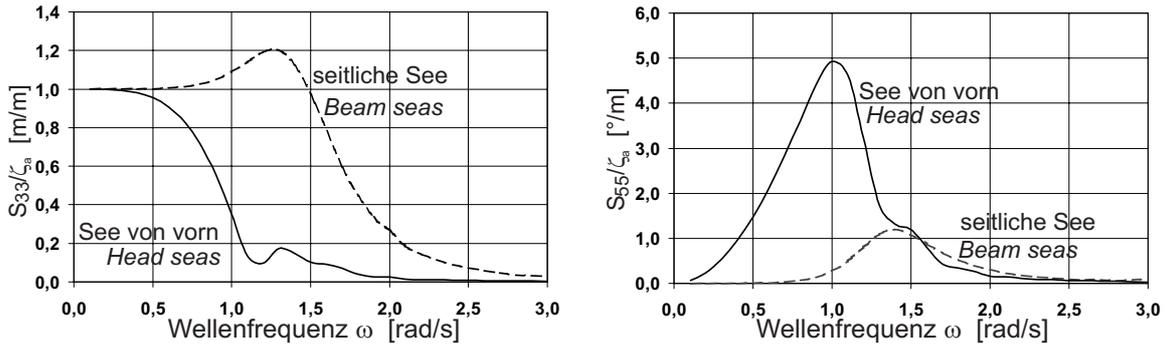


Abb. 3-1: Übertragungsfunktionen für Tauchen (links) und Stampfen (rechts) für F/S URANIA in See von vorn bzw. seitlicher See, ermittelt mit WAMIT [57]

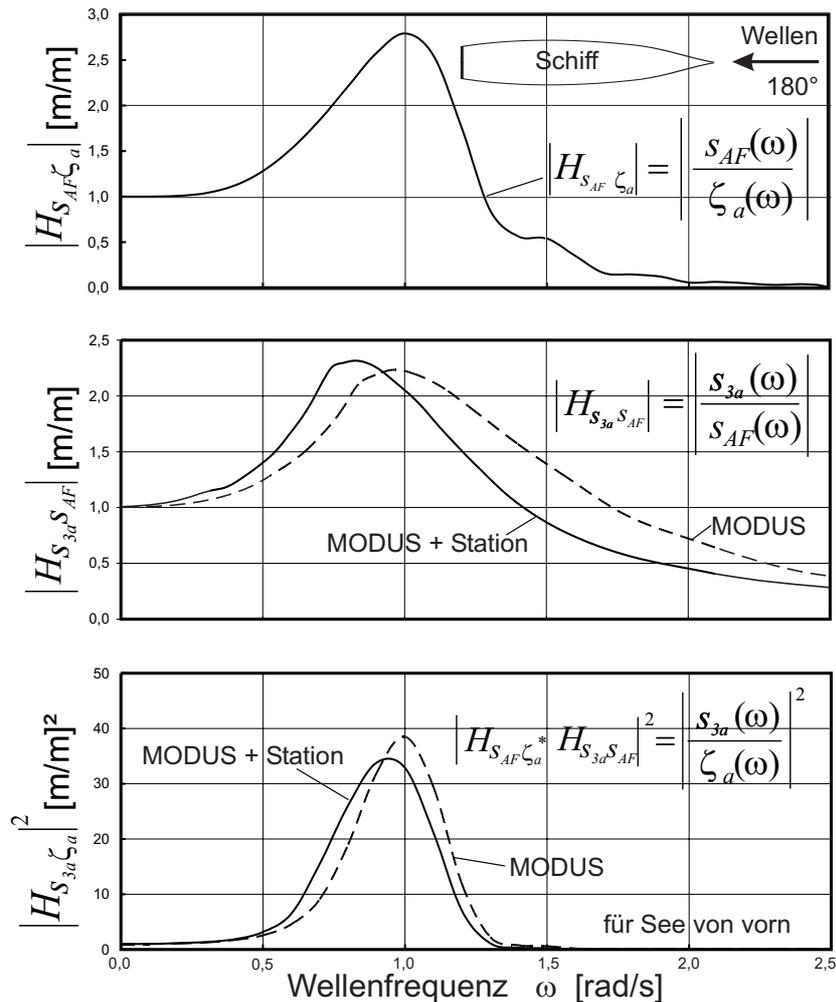


Abb. 3-2: Simulationsergebnisse: Übertragungsfunktionen für: (oben) Tauchen des A-Rahmens bezogen auf den Seegang, (Mitte) das Tauchgerät bezogen auf den A-Rahmen und (unten) das Tauchgerät bezogen auf den Seegang von vorn (quadrirt)

$$\text{RAO - Welle zu Schiff (A-Rahmen)} \quad \left| H_{s_{AF} \zeta_a} \right| = \left| \frac{s_{AF}(\omega)}{\zeta_a(\omega)} \right| \quad (40)$$

$$\text{RAO - A-Rahmen zu Geräteträger} \quad \left| H_{s_{3a} s_{AF}} \right| = \left| \frac{s_{3a}(\omega)}{s_{AF}(\omega)} \right| \quad (41)$$

$$\text{RAO}^2 \text{ - Welle zu Geräteträger} \quad \left| H_{s_{3a} \zeta_a} \right|^2 = \left| H_{s_{AF} \zeta_a} * H_{s_{3a} s_{AF}} \right|^2 = \left| \frac{s_{3a}(\omega)}{\zeta_a(\omega)} \right|^2 \quad (42)$$

Die Multiplikation des Betrags der quadrierten Übertragungsfunktion von Welle zu Tauchgerät mit dem Energiedichtespektrum des Seegangs (hier Pierson-Moskowitz nach ITTC-Empfehlung, Abb. 3-3, oben), erbringt das zugehörige Energiedichtespektrum der Antwortbewegung des Tauchgerätes, hier also des *umbilicals* mit angehängtem MODUS bzw. angehängtem MODUS plus Bodenstation (Abb. 3-3, Mitte bzw. unten).

$$\text{Energiedichtespektrum der Tauch-Antwortbewegung} \quad S_{s_{3a}}(\omega) = \left| H_{s_{3a} \zeta_a} \right|^2 * S_{\zeta}(\omega) \quad (43)$$

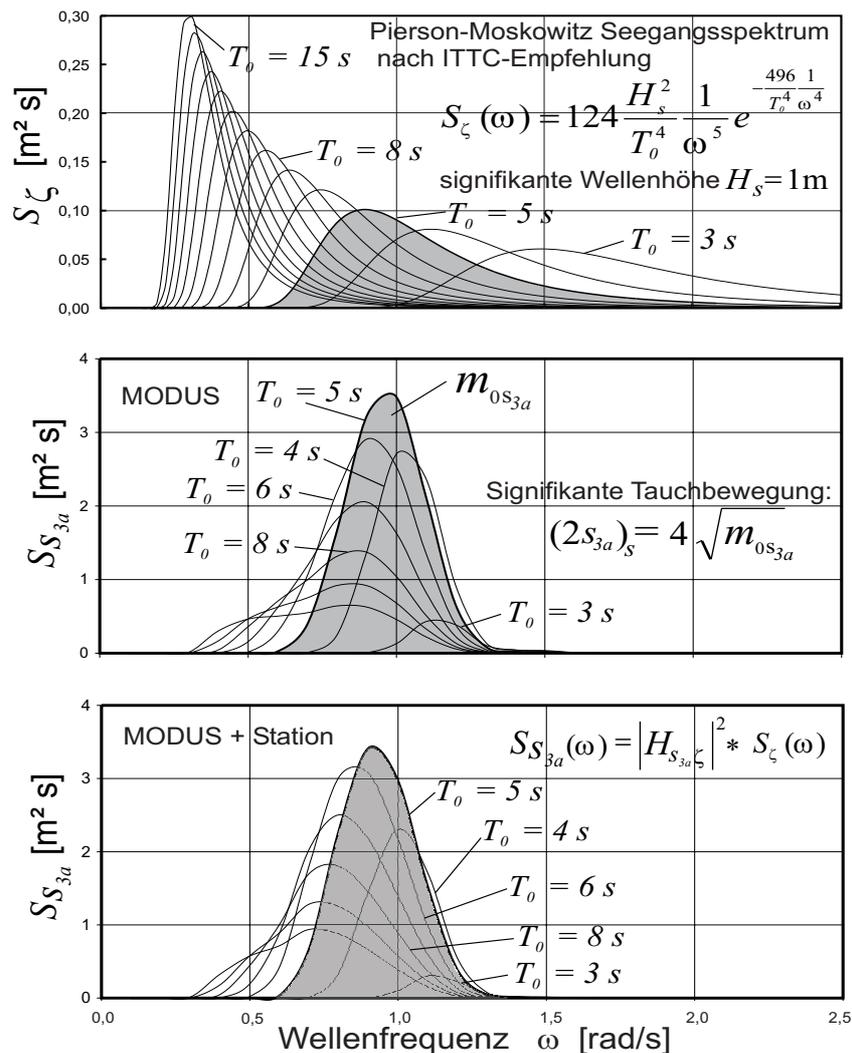


Abb. 3-3: (Oben) P-M-Spektrum des Seegangs und die Energiedichtespektren der Antwortbewegungen von MODUS (Mitte) und MODUS mit Bodenstation (unten) im Seegang von vorn; $m_{MD}=1090 \text{ kg}$, $m_{MD+BS}=3861 \text{ kg}$, Kabellänge=3400 m

3.2 CFD-Simulationen

3.2.1 RANSE und Turbulenzmodellierung

Die numerische Modellierung der Umströmung des Geräteträgers basiert auf der Lösung der dreidimensionalen, nichtlinearen, so genannten Reynolds gemittelten Navier-Stokes Gleichungen (*RANSE* – *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*), also der Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie. Es wird das strömende Fluid als Kontinuum angenommen, dessen Stoffwerte und Zustandsgrößen als kontinuierliche Funktionen im 3D-Raum beschrieben werden können, wie z.B. für den Vektor V für das Geschwindigkeitsfeld

$$V(x, y, z) = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix}. \quad (44)$$

Trotz der Abhängigkeit der Dichte von Druck und Temperatur wird im quasi-stationären Simulationsprozess von konstanter Dichte und somit inkompressiblem Wasser ausgegangen, so dass die numerischen Untersuchungen vereinfachend nur inkompressible Strömungen betrachten. Mit der Kontinuitätsgleichung für den dreidimensionalen Fall wird die Massenerhaltung der Strömung ausgedrückt,

$$u_x + v_y + w_z = 0, \quad (45)$$

wobei u_x die partielle Ableitung in x-Richtung darstellt (andere Richtungen entsprechend).

Mit den Navier-Stokes-Gleichungen wird der Impulserhalt der Strömung (oder theoretisch auch jedes andere Strömungsphänomen) beschrieben,

$$\begin{aligned} \rho(u_t + uu_x + vv_y + ww_z) &= \rho f_1 - p_x + \eta(u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) \\ \rho(v_t + uv_x + vv_y + ww_z) &= \rho f_2 - p_y + \eta(v_{xx} + v_{yy} + v_{zz}) \\ \rho(w_t + uw_x + vw_y + ww_z) &= \rho f_3 - p_z + \eta(w_{xx} + w_{yy} + w_{zz}) \end{aligned}, \quad (46)$$

mit den Beschleunigungen aus Volumenkräften f_i (oder z.B. die Erdbeschleunigung $g=f_3$), dem Druck p , der dynamischen Zähigkeit (oder Viskosität) η und der Zeit t .

Kontinuitäts- und Navier-Stokes-Gleichungen formen zusammen ein System gekoppelter, nichtlinearer partieller Differentialgleichungen, die mit heutigen Mitteln analytisch nicht zu lösen sind. Einen Lösungsweg bietet die Aufteilung der Geschwindigkeiten und des Druckes in einen zeitlichen Mittelwert und einen Schwankungsteil, was die so genannten gemittelten Reynoldsgleichungen ergibt (*RANS*-Gleichungen). Diese enthalten Ableitungen der Reynoldsspannungen,

$$\begin{aligned} -\rho u' u' & & -\rho u' v' & & -\rho u' w' \\ -\rho u' v' & & -\rho v' v' & & -\rho v' w' \\ -\rho u' w' & & -\rho v' w' & & -\rho w' w' \end{aligned}. \quad (47)$$

Die Einführung von Turbulenzmodellen stellt den Zusammenhang zwischen diesen Reynoldsspannungen und den gemittelten Geschwindigkeiten her und erlaubt zudem die Bestimmung der Lösung mit optimierten Rechenzeiten. Ein weit verbreitetes Turbulenzmodell ist das Standard k- ϵ -Modell, in dem k die turbulente kinetische Energie und ϵ deren Dissipationsrate ist, also die pro Zeit- und Masseneinheit in Wärme überführte Energie der Turbulenzbewegung (RODI [48]).

Das hier genutzte kommerzielle CFD-Programm FLUENT [16] nutzt eine implizite Finite-Volumen-Methode (FVM), um die *RANS*-Gleichungen zu lösen. Die Strömung wird als stationär turbulent angenommen und mit dem *RNG* $k-\varepsilon$ (*Re-Normalized Group*) bzw. dem *realizable* $k-\varepsilon$ Turbulenzmodell dargestellt. Beide Modelle erlauben die Vorhersage der Effekte aus Wandschubspannungen, Strömungsablösung und sekundären Strömungen besser als das Standard $k-\varepsilon$ Modell (CHOUDHURY [4]). Im Besonderen bei Strömungen mit stark gekrümmten Stromlinien, Wirbeln und Rotationen, wie sie hier bei den maßstäblichen Modellen vorliegen, hat sich das *realizable* $k-\varepsilon$ Modell gut bewährt. Das *RNG* $k-\varepsilon$ Modell wurde daher bei den Berechnungen für den Prototyp genutzt, während das *realizable* $k-\varepsilon$ Modell für die maßstäblichen Modelle aktiviert wurde.

In wandnahen, reibungsbehafteten Strömungsgebieten verlieren diese Turbulenzmodelle jedoch ihre Gültigkeit. Bei den hier vorliegenden Simulationen werden die wandnahen Grenzschichten daher mit dem logarithmischen Wandgesetz modelliert. Hierbei wird eine Wandfunktion genutzt, bei der von einer logarithmischen Abnahme der Geschwindigkeit vom ungestörten Fernfeld bis auf null in den Wandgrenzschichten ausgegangen wird,

$$\frac{u_0}{u_\tau} = \frac{1}{0,42} \ln(E y^+), \quad (48)$$

mit der Geschwindigkeit im Fernfeld in x-Richtung u_0 , der Wandschubspannungsgeschwindigkeit u_τ , einer empirischen Konstante E (für glatte Wände auf 9,0 gesetzt) und dem dimensionslosen Wert y^+ , der den Wandabstand der laminaren innersten Wandgrenzschicht und der Übergangsschicht zur turbulenten Außenströmung markiert.

3.2.2 Wirbelablösung am Kabel

Der Widerstandsbeiwert C_d eignet sich als Kennzahl zum Vergleich verschiedener Strukturen in Strömungen ähnlicher Reynoldszahl. Abb. 3-4 verdeutlicht z.B. die Abhängigkeit der dimensionslosen Strouhalzahl St von C_d für einfache Grundkörper wie Platten, Zylinder oder stumpfe Quader. Die Strouhalzahl erlaubt den Vergleich des Wirbelablöseverhaltens unterschiedlicher umströmter Körper, wie z.B. *umbilicals*,

$$St = \frac{f_w D}{u_0} = \frac{D}{u_0 T} = \frac{1}{KC}. \quad (49)$$

Diese Kennzahl vereint die Anströmgeschwindigkeit u_0 und den charakteristischen Durchmesser D mit der Wirbelablösefrequenz f_w der sich ausbildenden Kármánschen Wirbelstraße um diesen Körper, wie sie auch in der Momentaufnahme der CFD-Simulation in Abb. 3-4 zu sehen ist⁷. Die St -Zahl entspricht dem Kehrwert der bereits eingeführten KC -Zahl, wenn $D=L$ gilt (vgl. Gleichung 4).

⁷ CFD-Simulationen für Kabel mit $D=0,0254$ m (z.B. das MODUS-*Umbilical*), $u_0=1,0$ m/s und $Re=2,54 \cdot 10^4$ zeigen C_D -Werte, die je nach Wirbelablösezyklus zwischen 1,05 und 1,27 schwanken. Bei einer Ablöseperiode von ca. 0,83 s ergibt das eine Strouhalzahl von ca. 0,192, was gut zu den experimentellen Ergebnissen aus Abb. 3-4 passt.

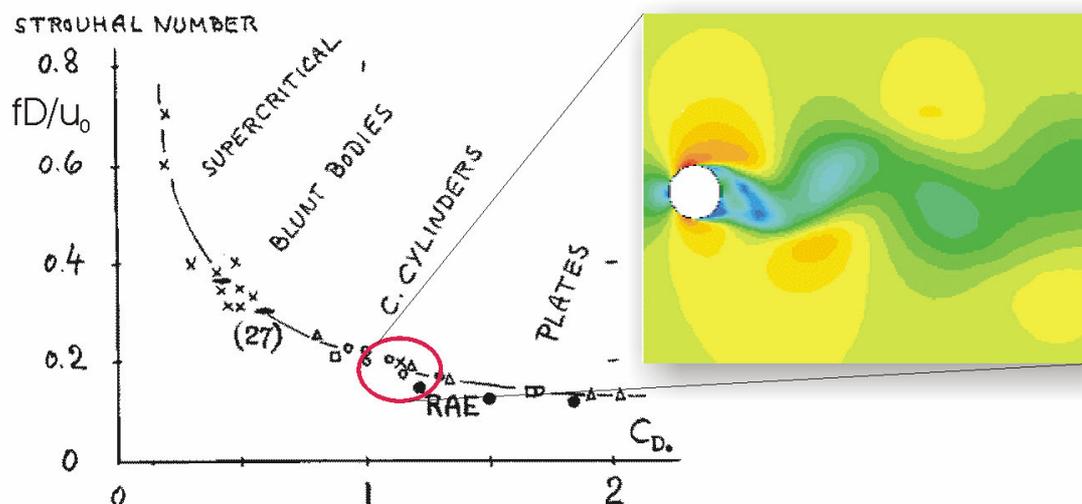


Abb. 3-4: Experimentell bestimmte dimensionslose Strouhalzahlen in Abhängigkeit vom Reibwiderstandskoeffizienten für 2D-Umströmungen unterschiedlicher Körper bei Reynoldszahlen $> 10^3$ (nach HOERNER [27]) und Momentaufnahme eines CFD-Simulationsergebnisses für einen Zylinder (oder Kabel) mit $C_d=1,2$ und $Re=2,54 \cdot 10^4$

Aufgrund der zyklischen Wirbelablösung kann es zu Transversalschwingungen im *umbilical* kommen, die ihrerseits zu sekundären Longitudinalschwingungen führen, die sich der aktuellen vertikalen Grundschwingung des Schiffes und Kabels im Seegang überlagern. Diese schwingungsanregenden Strömungen können in Betrag und Richtung über den mehrere Kilometer langen Kabelstrang beträchtlich variieren. Die resultierenden sekundären Schwingungserscheinungen des getauchten Systems werden hier jedoch nicht näher untersucht, können aber wegen der nichtlinearen Effekte aus horizontaler Ausweichbewegung des Kabels (Kabelkrümmung) und Kabelelastizität durch Überlagerung mit der Primärschwingung Bedeutung für das Gesamtschwingungsverhalten des getauchten Systems erlangen, wie Beispiele aus der Ölindustrie zeigen. Hier führt das Aufschwingen in der Strömung (*vortex shedding*) an vertikalen Fördersträngen (*risers*) immer wieder zur Lockerung des Flansches am Unterwasser-Bohrkopf (*subsea wellhead*), was bis zum unkontrollierten Austritt des produzierten Rohöls oder Gases führen kann.

Gute Übereinstimmungen von CFD-Widerstandsprognosen mit experimentellen Ergebnissen konnten 1998 im Projekt GEOSTAR 1 von GERBER und SCHULZE erzielt werden [20]. Hier wurden Widerstands- und Mobilitätsversuche im großen Umlauftank *UT2* der TU Berlin sowie vergleichende CFD-Analysen für die komplexe Struktur des Prototyps der Flachwasserversion (GEO1) des Geräteträgers MODUS durchgeführt. Die stets vorliegende vereinfachende numerische Modellierung im Vergleich zum Original erweist sich demnach in diesem Fall als vollständig akzeptabel im Hinblick auf die Aussagefähigkeit der CFD-Ergebnisse für den Strukturwiderstand. Auf dieser erfolgreichen Validation basieren die hier durchgeführten CFD-Berechnungen für die Tiefwasserversion von MODUS (GEO2) in der Großausführung und im maßstäblichen Modell (1:5).

3.2.3 MODUS

Modellierung

Die Vorbereitung der CFD-Strömungsanalysen erfolgt durch 3D-Modellierung der zu untersuchenden Struktur mit einem CAD-Programm (*Computer Aided Design*). Im vorliegenden Fall wird das Programm SOLIDWORKS [50] genutzt. Abb. 3-5 zeigt den Geräteträger MODUS als modularen CAD-Entwurf mit

den Hauptbaugruppen Konus (1), Aufnahmevorrichtung der Kabelterminierung (2), offene Rahmenstruktur mit Hilfsaggregaten (3) und den Zusammenbau mit Kabelterminierung und angeedeutetem *umbilical*.

Aufgrund der angenommenen Symmetrie der Modelle und der Umströmung entlang der x-Achse, werden die in CAD hoch aufgelösten, vollständigen Strukturen entlang dieser Symmetrieachse geschnitten und als Halbmodelle dem CFD-Gittergenerator übergeben. Dies reduziert den Speicherbedarf und die benötigte Rechenzeit, ohne dabei - in den vorliegenden Strömungsfällen (!) - negativen Einfluss auf die Ergebnisse zu haben. Die Übertragung von CAD zu CFD erfolgt über die weit verbreitete ACIS-Schnittstelle.

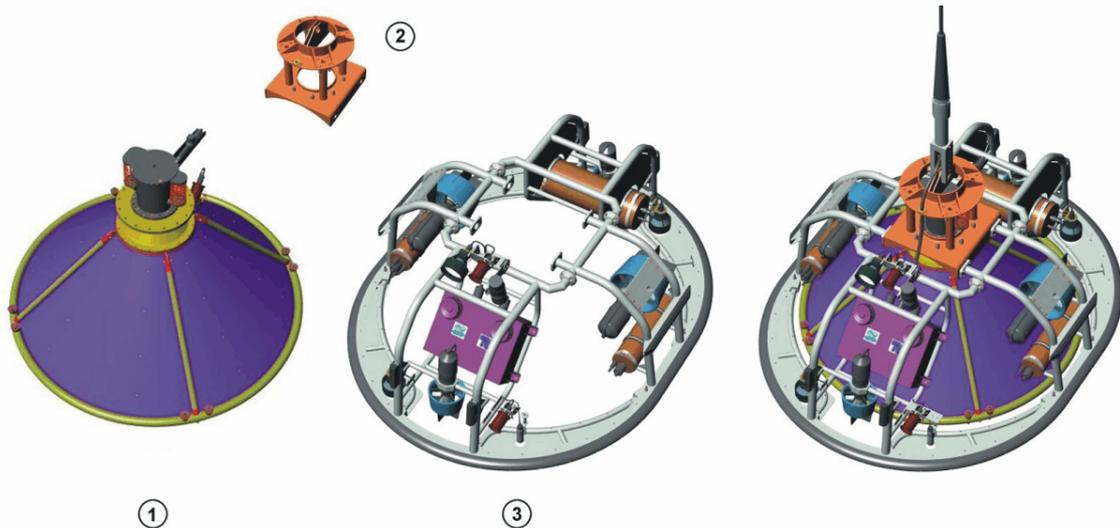


Abb. 3-5: MODUS als modulares Konzept im CAD-Entwurf: ① Andockkonus mit Verriegelungseinheit zum Einfangen der Stationen, ② Schutzgehäuse der Kabelterminierung, ③ offener Rahmen (Aluminium) als Träger der Sensoren und Hilfsaggregate (Motoren, Sonar, Altimeter, Kameras und Scheinwerfer, Tiefseetrafo, Elektronikboxen, Verkabelungen) (JACOB [32])

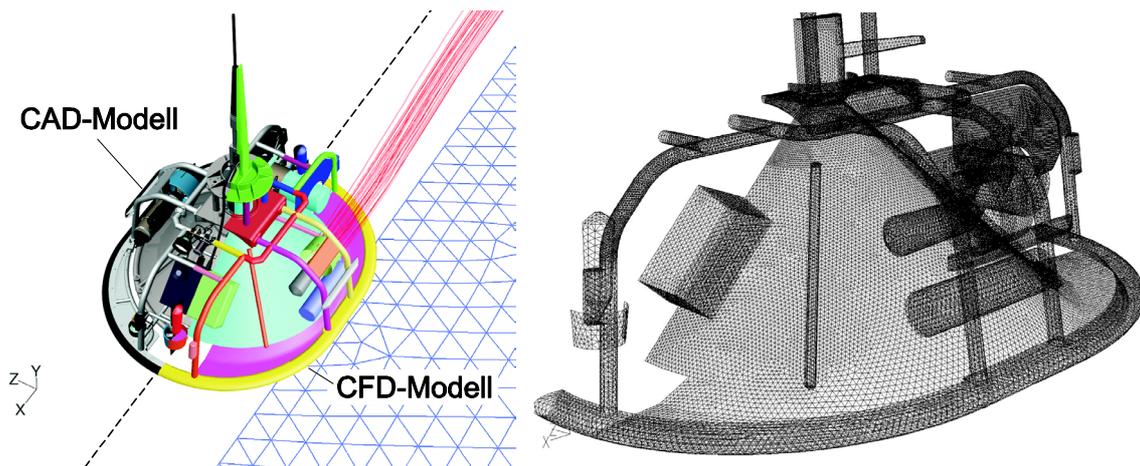


Abb. 3-6: Der MODUS-Prototyp als CAD-Entwurf (links-linke Bildhälfte) und als CFD-Diskretisierung (links-rechte Bildhälfte) mit einem Teil des unteren Rechenraumgitters sowie Gitterdetails

Im Programm GAMBIT (Gittergenerator zu FLUENT) werden die unstrukturierten und z. T. hybriden Rechengitter für die Strömungsanalysen definiert, und schließlich als Volumengitter zum eigentlichen

„Strömungslöser“ FLUENT exportiert. Abb. 3-6 verdeutlicht die hohe erreichbare Detailtreue beim Schritt vom ursprünglichen CAD-Entwurf zur Diskretisierung in CFD, hier dargestellt mit dem unstrukturierten Tetraedergitter an der unteren Rechenraumgrenze und dem errechneten Strahlverlauf für den Backbord-Schubmotor. Die maßstäbliche Modellierung von MODUS in M1:5 ist bereits in Abb. 1-12 zu sehen, dort gekoppelt mit dem offenen Rahmen der Bodenstation in Stahl und für die CFD-Analysen.

Die vergleichenden Untersuchungen von GERBER und SCHULZE [20] wurden mit einem CFD-Modell im Maßstab 1:1 erstellt, die Detailtreue ähnelt der in Abb. 3-7, links. Wie Abb. 3-7 (rechts) zeigt, wurde die Detaillierung des CFD-Modells in M1:5 noch einmal deutlich reduziert, um das in den Experimenten genutzte sehr einfache Blechmodell besser zu repräsentieren. Tab. 3-1 listet die wichtigsten Parameter und Gitterdimensionen der berechneten Halbmodelle von MODUS, bzw. MODUS ohne inneren Konus bzw. MODUS+Bodenstation im Vergleich zum Modell der Großausführung auf.

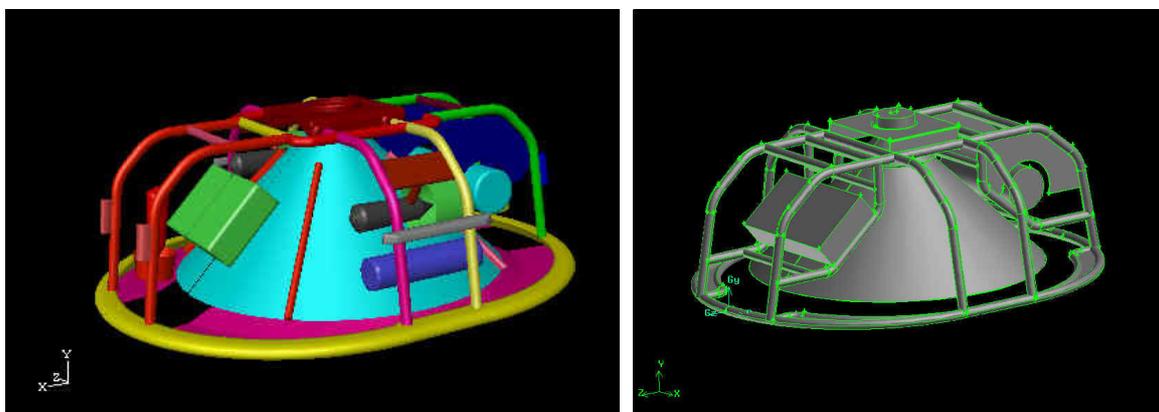


Abb. 3-7: CFD-Modelle für MODUS in M1:1 (links) und in M1:5 zeigen Unterschiede im Grad der Detailmodellierung

Tab. 3-1: Dimensionen der CFD-Halbmodelle

Daten für CFD-<u>Halbmodelle</u>	MODUS M1:1	MODUS+ Bodenstation M1:1*	MODUS M1:5	MODUS ohne Konus M1:5	MODUS+ Bodenstation M1:5
Rechengitter (gerundet): Zellen/Flächen/Knoten	895.000/ 1.870.000/189.000	-	760.000/ 190.000/162.000	519.600/ 1.085.000/110.000	1.098.000/ 2.290.000/233.000
Flächenprojektion in x = vorwärts [m ²]	0,746	1,55	0,026 (0,03)	0,017	0,062
Flächenprojektion in y = vertikal [m ²]	2,63	4,025	0,082 (0,105)	0,052	0,161
Flächenprojektion in z = seitwärts [m ²]	1,91	3,6	0,073 (0,076)	0,043	0,144

* Diese Daten wurden vom Modell in M1:5 hochgerechnet!

Achtung: Es ist zu beachten, dass die Lateralpläne der ganzen Körper den doppelten Flächen der jeweiligen halben Körper in Tab. 3-1 entsprechen, also z.B. für MODUS in M1:1 $A_{\text{vertikal}} = 5,26 \text{ m}^2$.

Die Abweichungen in den Details bei den CFD-Modellen in M1:5 im Vergleich zu den CFD-Modellen in M1:1 und natürlich beider Modellmaßstäbe gegenüber den jeweiligen Metall-Originalen, spiegeln sich u. a. in etwas zu kleinen Projektionsflächen bei den CFD-Modellen wider, wie beispielhaft die in Tab. 3-1 in Klammern verzeichneten ‚korrekten‘ Werte für MODUS in M1:5 verdeutlichen.

Durchführung

Berechnet werden Widerstandskräfte für Horizontalfahrt, sowie vertikale Auf- und Abwärtsfahrt für mindestens zwei Fahrtgeschwindigkeiten (0,2/0,4/0,6 m/s in M1:1 bzw. 0,18/0,27 m/s in M1:5). Die

Geschwindigkeiten sind so gewählt, dass sie für die hier untersuchte Gruppe kabelgebundener Trägersysteme repräsentativ für den realen Einsatz sind.

In Abb. 3-8 und Abb. 3-9 werden Simulationsergebnisse mit Messergebnissen für die Modelle in M1:1 und M1:5 verglichen. Details zu den Widerstandsversuchen sind in Kapitel 5.2 zu finden.

Die Simulationen der horizontalen Fahrten des Prototyps ermitteln darüber hinaus den Gleichgewichtszustand zwischen Strukturwiderstand und Antriebsschub der Motoren als Funktion der Anström- bzw. Schlepp-Geschwindigkeit. Zu diesem Zweck werden die Düsenpropeller der Schubmotoren durch Scheiben ersetzt, die in FLUENT im so genannten *fan*-Modell mit einem äquivalenten Drucksprung in der Propellerebene belegt werden. Die hierdurch ‚beschleunigten‘ Partikel beeinflussen das gesamte Nachstromfeld von MODUS.

Die Untersuchungen prognostizieren die Strahlverläufe und ermöglichen somit die Optimierung der Einbaupositionen der Schuberzeuger, so dass die beschleunigten Partikel keine Rahmenstruktur anstrahlen (Abb. 3-6, links und Abb. 3-10, Mitte).

Neben der horizontalen Fahrtrichtung ist die Kenntnis der Stärke und Form der vertikalen Strukturumströmung besonders wichtig. Diese beeinflusst den Körperwiderstand sowie das Nachstromgebiet (*wake*) während der stundenlangen Transits von der Oberfläche zum Meeresgrund, sowie bei quasistationärer Arbeit auf einer vorgegebenen Tiefe.

Probleme können dann entstehen, wenn die präzise Positionierung in oder über einer horizontalen Grenzschicht oder die Probenahme aus einer bestimmten Tiefenschichtung gefordert wird (BIO-DEEP [2]). Hierzu durchgeführte CFD-Analysen dokumentieren, dass sich aufgrund der durch die Schiffsbewegungen induzierten vertikalen Oszillationen des Geräteträgers weit in den Raum reichende Nachstromgebiete ausbilden, die nahe dem Probenahmegebiet zur Vermischung der Schichten und somit Beeinträchtigung der Probenqualität führen können (Abb. 3-10, oben und unten). Auch bei der Landung des Geräteträgers mit der Bodenstation auf dem Meeresboden spielt dieses Phänomen eine wichtige Rolle, da hier Sedimentverwirbelungen mit drastisch ansteigender hydrodynamischer Masse der vertikal schwingenden Systeme einhergehen (vgl. Kapitel 5.1).

Auswertung

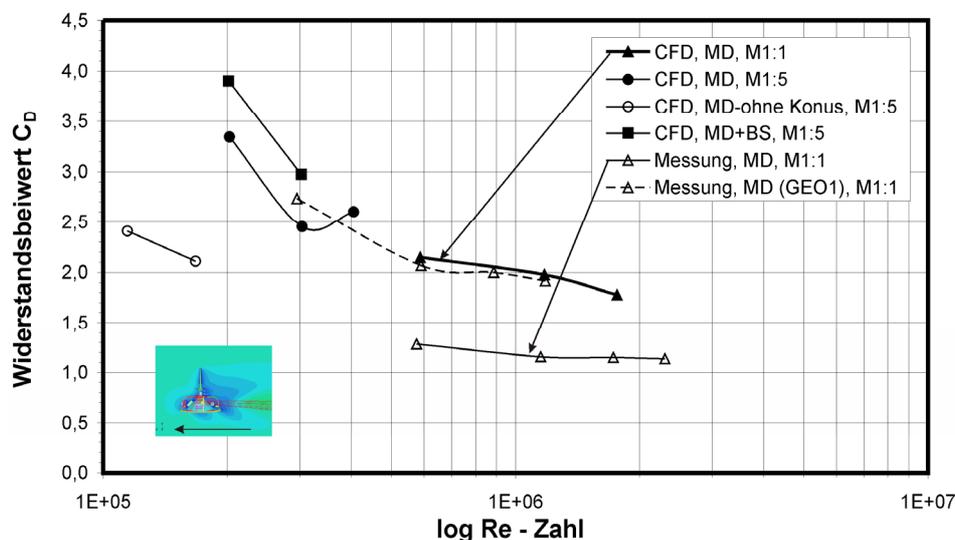


Abb. 3-8: Berechnete Widerstandsbeiwerte für MODUS in M1:5 und M1:1 jeweils für die horizontale Bewegungsrichtung im Vergleich mit experimentell ermittelten Werten für die Prototypen GEO1 und GEO2.

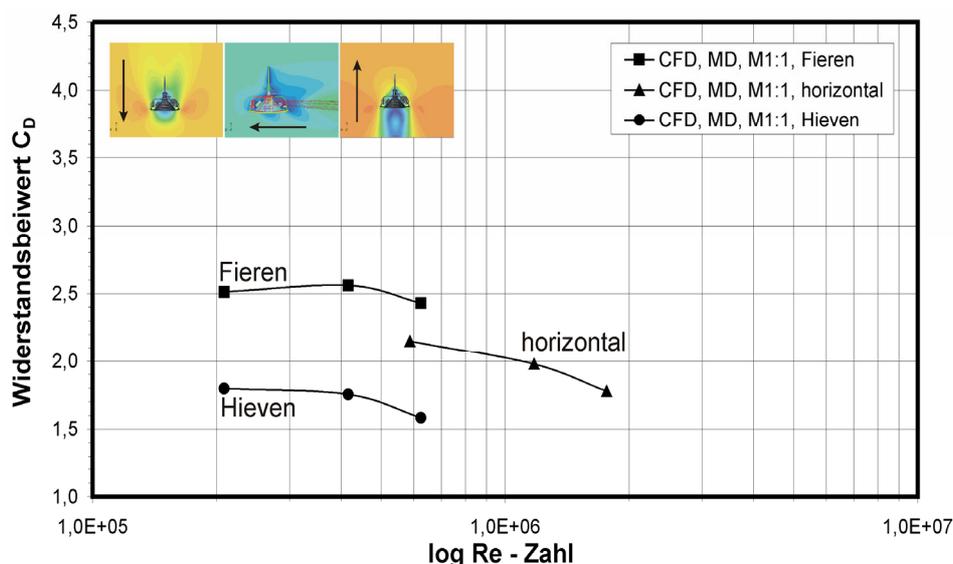


Abb. 3-9: Berechnete Widerstandsbeiwerte für MODUS in M1:1 für die Bewegungsrichtungen Fieren, horizontal vorwärts und Hieven

Der qualitative Vergleich der CFD-Ergebnisse für die horizontale Bewegungsrichtung des Prototyps von MODUS in der Version GEO2 zeigt gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Werten (Abb. 3-8).

Der quantitative Vergleich der Kurve der Widerstandsbeiwerte für die Großausführung (M1:1) der Version GEO2 in Abb. 3-8 zeigt demgegenüber für die numerischen Ergebnisse einen Verlauf, der um bis zu $C_d=0,85$ größere Werte aufweist als bei der dazu nahezu parallel verlaufenden Kurve der experimentell ermittelten Daten für das Metall-Original. So liegen die Horizontal-Werte für die CFD-Simulationen zwischen $C_d=2,15$ und $C_d=1,8$ und für die Messungen zwischen $C_d=1,3$ und $C_d=1,15$, im Re-Zahlenbereich zwischen $5,5E+05$ bis $2,5E+06$. Dies ist zum einen auf die bereits erwähnte geringfügig kleinere Projektionsfläche der CFD-Modelle gegenüber den jeweiligen Metall-Originalen zurückzuführen (Tab. 3-1). Unsicherheiten bestehen jedoch zum anderen auch bei der numerischen Bestimmung der Ablösepunkte der Strömung an den zahlreichen Streben der Struktur und den daraus resultierenden fehlerhaften, d.h. in diesem Fall zu großen Druckwiderstandskräften. Zudem befindet sich der relevante Reynoldszahlenbereich sehr nahe dem kritischen Umschlagsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung, wodurch instationäre Strömungsschwankungen zu erwarten sind.

Zur weiteren Annäherung der CFD-Ergebnisse an die Messergebnisse sind noch weitere intensive Untersuchungen z.B. zum Einfluss des CFD-Gitters in Wandnähe und im Nachstromgebiet durch Variation der Auflösung der wandnahen Grenzschicht oder Gitteradaptionen im Bereich großer Gradienten sowie Simulationen mit instationären Berechnungsverfahren empfehlenswert.

Ergänzt wurde in Abb. 3-8 das Messergebnis für die Version GEO1 von MODUS. Der direkte Vergleich mit dem Messergebnis der Version GEO2 ist jedoch nicht zulässig, da die Version GEO1 im großen Umlauftank UT2 der ZE VWS und die Version GEO2 in der völlig andersartigen tiefen Schlepprinne der ZE VWS untersucht wurde. Die Ergebnisse für Fieren und Hieven für die Version GEO2 liegen dagegen im Bereich der Erwartungen, die durch Experimente mit ähnlichen kegelförmigen Körpern in der Literatur begründet werden (z.B. HOERNER [27]) (Abb. 3-9).

Mit Gleichung (31) ergeben sich somit Widerstandskräfte für MODUS in M1:1 für Fieren von ca. $F_{d,Fieren}=2426$ N (bei $C_d=2,5$) und für Hieven von ca. $F_{d,Hieven}=1746$ N (bei $C_d=1,8$), jeweils mit

$A=5,26 \text{ m}^2$, und für Horizontalfahrt von ca. $F_{d,\text{horizontal}}=550 \text{ N}$ (bei $C_d=2,0$) mit $A=1,49 \text{ m}^2$ und jeweils $\dot{z}_u=0,6 \text{ m/s}$ und $\rho=1025 \text{ kg/m}^3$.

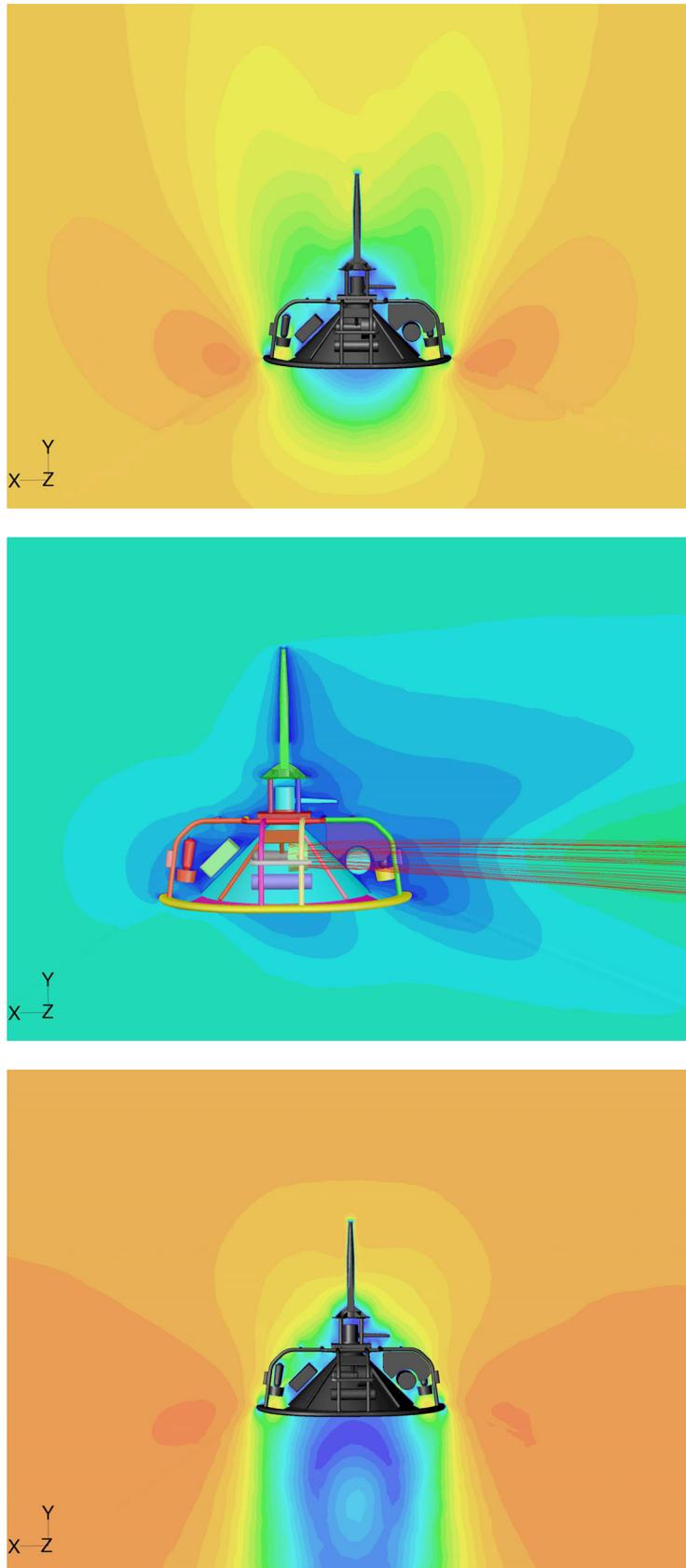


Abb. 3-10: Isflächen repräsentieren gemittelte Geschwindigkeiten (*velocity magnitude*) im Strömungsgebiet im Nahbereich von MODUS für (v.o.n.u.): Fieren, Horizontalfahrt, Hieven.

3.2.4 2D-Grundformen

Die Änderung der Struktur des getauchten Geräteträgers, sei es durch feste oder flexible bauliche Maßnahmen wie Klappen, Flügel, Gitter, Ballasttanks etc., erlaubt die gezielte Beeinflussung der Widerstandskraft sowie der hydrodynamischen Massenkraft. Letztere, ermittelt durch Integration des Druckfeldes, das aus der Relativbeschleunigung von Fluid und Bauteil folgt, ist entscheidend für Frequenz und Periode der Vertikalschwingung des Systems in der betrachteten Bewegungsrichtung.

Tab. 3-2: CFD-Ergebnisse für 2D-Grundformen bei Anströmung horizontal und vertikal (auf- und abwärts). Geschwindigkeit 0,4 m/s, Reynoldszahl zwischen $4 \cdot 10^5$ und $9 \cdot 10^5$

Form des 2D-Körpers												
	Fläche m ²	Reynoldszahl										
Strömungsrichtung	Widerstandskraft F [N], Widerstandsbeiwert C _p											
→	F _{Total}	22.26	45.84	44.77	69.15	366.75	266.13	153.18	965.56	90.03	330.93	316.37
	F _{Druck}	17.58	38.71	39.75	63.84	366.36	264.46	149.16	956.39	88.70	329.70	314.85
	F _{Reib}	4.68	7.13	5.02	5.31	0.39	1.67	4.02	9.17	1.34	1.23	1.52
	C _D	0.15	0.28	0.30	0.43	1.11	0.81	0.46	3.15	0.28	0.74	0.68
↓	F _{Total}	423.50	2656.79	2069.77	2778.28	337.28	441.51	587.96	3343.45	367.93	235.21	195.95
	F _{Druck}	423.40	2652.04	2066.03	2768.74	333.22	438.47	585.90	3336.80	367.56	233.46	193.79
	F _{Reib}	0.10	4.75	3.74	9.54	4.06	3.04	2.06	6.65	0.36	1.75	2.16
	C _D	2.90	16.36	13.72	17.11	1.02	1.34	1.78	10.90	1.16	0.53	0.42
↑	F _{Total}	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	344.54	467.32	610.09	3435.34	s.o.	317.69	236.57
	F _{Druck}	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	343.04	467.06	609.85	3430.28	s.o.	317.60	235.44
	F _{Reib}	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	1.50	0.26	0.24	5.06	s.o.	0.097	1.13
	C _D	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	1.05	1.42	1.85	11.20	s.o.	0.71	0.51

Tab. 3-2 stellt für exemplarische 2D-Grundformen die mit CFD ermittelten Ergebnisse der Widerstandskräfte für die drei untersuchten Fahrtrichtungen horizontal und vertikal (auf- und abwärts) für Reynoldszahlen von $Re=4 \cdot 10^5$ bis $Re=9 \cdot 10^5$ zusammen. Je nach Art des Körpers (geschlossen oder segmentiert) und Ausrichtung zur Anströmung zeigen sich signifikante Unterschiede in den Anteilen von Druck- und Reibwiderstandskraft am Gesamtwiderstand. Diese Eigenschaft lässt sich, aufgrund der bestätigten Gültigkeit der CFD-Ergebnisse im hier untersuchten Kontext, gezielt zur Feineinstellung der hydrodynamischen und hydroelastischen Eigenschaften des umströmten Geräteträgers einsetzen, wenn z.B. der Druck- und Reibwiderstand oder die Transparenz und somit auch die hydrodynamische Masse der Struktur erhöht oder verringert wird.

Wie die Beispiele der Tabelle deutlich machen, bleiben bei ähnlicher Funktionalität des Bauteils, wie sie z.B. das bei MODUS und Bodenstation verwendete *re-entry*-Verfahren mit seinem Konus/Spitze-Prinzip verlangt, noch viele Variationsmöglichkeiten bei der Form- und Oberflächengestaltung. Deutlich wird aber auch, dass eine für eine Bewegungsrichtung optimale Struktur für eine andere Richtung völlig konträre Eigenschaften aufweisen kann. Viele Systeme führen darüber hinaus neben der ‚globalen‘ Hauptbewegung (Fieren, Hieven etc.) auch noch ‚lokale‘ Schwingungen parallel zur Hauptbewegungsachse aus, wodurch kontinuierliche Wechsel der ‚lokalen‘ Bewegungsrichtung um 180° verbunden sind. Dies ist auch im Fall der hier untersuchten Geräteträger zu beachten, die durch Fieren und Hieven auf Position gebracht werden und vor Ort aktiv horizontal verfahren werden. Deshalb sollten alle relevanten Anströmrichtungen (hier: vertikal auf und ab sowie horizontal voraus) mit ihrem jeweiligen Einfluss auf das Betriebsverhalten bei der Bestimmung des Gestaltungs-Optimums ins Kalkül gezogen werden.

4 Meßsystem

4.1 Konzept

Die Erfassung von Betriebsparametern an räumlich weit verteilten Messaufnehmern ist heute gängige Praxis z.B. in der Verfahrenstechnik oder bei der Streckenüberwachung in der Bahntechnik. Nur wenige Anwendungen sind jedoch aus der Tiefseetechnik bekannt, bei der es neben der robusten Auslegung der Hardware im Besonderen um die zeitkongruente Registrierung dynamischer Parameter in nahezu Echtzeit geht. Solange die Daten allein auf dem Schiff anfallen, sind die Anforderungen leicht zu erfüllen. Kommt jedoch die Erfassung auf dem getauchten System hinzu, so kann nur noch mit Datensätzen in diskreten Zeitfenstern (*frames*) gearbeitet werden. Dies beruht zum einen auf sehr heterogenen Datensätzen der verschiedenen Sensoren und zum anderen auf dem ‚Flaschenhals‘ aus Winde/Drehübertrager und *umbilical*/Glasfaserleitungen sowie begrenzten Datenübertragungsraten über die Telemetrie, die eine Übermittlung der Daten in Echtzeit erschweren. Abb. 4-1 verdeutlicht das neu entwickelte Meßsystem mit seinen Über- und Unterwasserkomponenten.

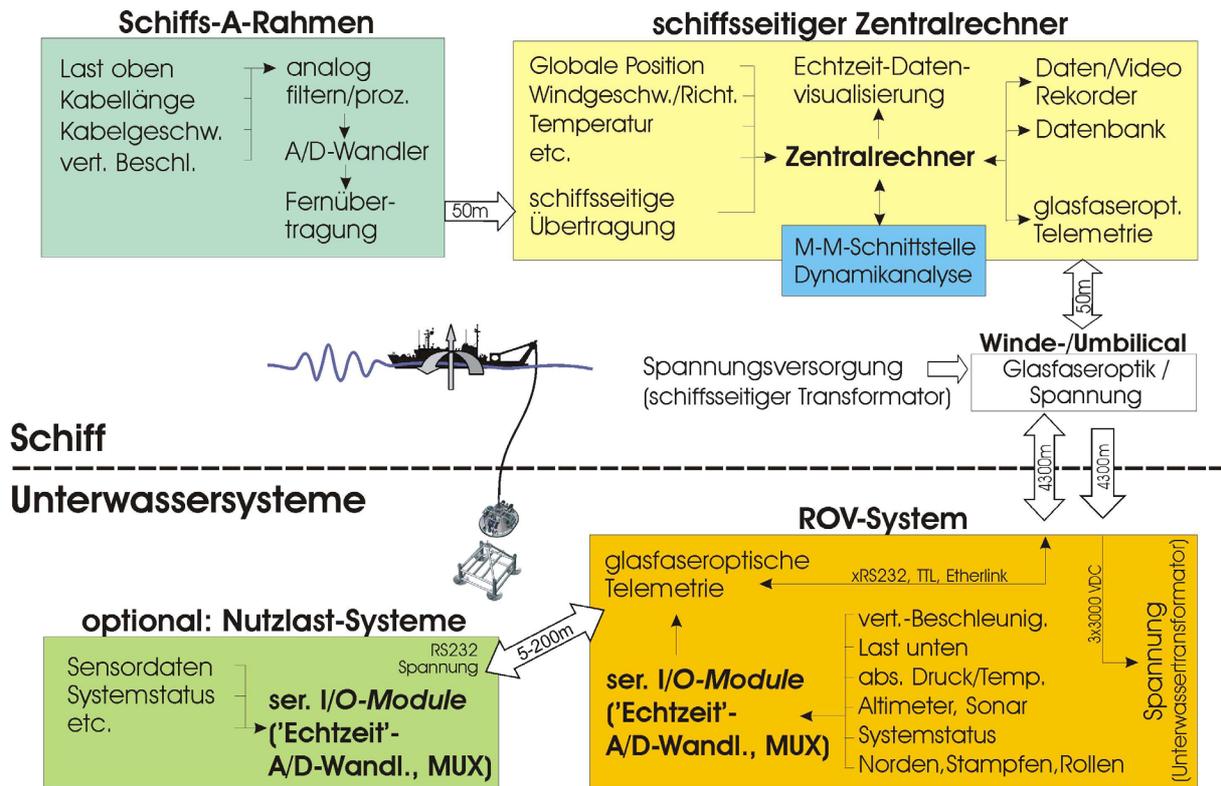


Abb. 4-1: Schema des neuen Messsystems für dynamische Bewegungsgrößen kabelgebundener Tiefseeeräteträger

In der folgenden Tab. 4-1 sind die Messgrößen detailliert zusammengestellt, während im Anhang B Datenblätter der wichtigsten verwendeten Sensoren zusammengefasst sind.

Tab. 4-1: Eigenschaften der wichtigsten Instrumente zur Messung der Dynamik von Schiff und Geräteträger

Instrument am Schiff	Hersteller	Messbereich	Auflösung	Messtakrate	Übertragungstakrate
Beschleunigungssensor, zweiachsig	TU Berlin	± 2 g	5 mg	250 Hz	3 Hz
OSTAR Kompass - Norden - Neigung, x/y - Temperatur	Falmouth Scientific, Inc., USA.	0-360° $\pm 45^\circ$ -10 - +40°C	± 2 Grad $\pm 0,2$ Grad 0,5 °C	10 Hz 10 Hz 10 Hz	3 Hz 3 Hz 3 Hz
Umlenkrolle - Zugkraft - Kabellänge - Kabelgeschwindigkeit	MacArtney, Dänemark	0-100 kN 0-9999,9 m 0-99 m/s	100 N 0,1 m 0,2 m/s	analog abhängig von Drehbewegung	10 Hz 10 Hz 10 Hz
Instrument am Geräteträger	Hersteller	Messbereich	Auflösung	Messtakrate	Übertragungstakrate
Beschleunigungssensor, zweiachsig	TU Berlin	± 2 g	5 mg	250 Hz	3 Hz
OSTAR Kompass - Norden - Neigung, x/y - Temperatur	Falmouth Scientific, Inc., USA.	0-360° $\pm 45^\circ$ -10 - +40°C	± 2 Grad $\pm 0,2$ Grad 0,5°C	10 Hz 10 Hz 10 Hz	3 Hz 3 Hz 3 Hz
Lastzelle	TU Berlin	0-10 kN	10 N 12 Bit	Analog	3 Hz
Drucksensor, abs.	Keller, Schweiz	1-400 bar ($\pm 0,05$ % FS)	$\leq 0,01$ %FS 12 Bit	Analog	3 Hz
Altimeter	TriTech, UK	0 - 100 m	1 mm	200 kHz	1,6 Hz
Sonar	TriTech, UK	bis 300 m	-	325 kHz, 675 kHz	115 kBaud
elektrotechnische Messungen (U, I)	TU Berlin	-	12 Bit	3 Hz	3 Hz

Der A-Rahmen ist mit einer Einheit aus Neigungs- und Beschleunigungssensor sowie einem Kraftmessglied ausgestattet. Auch die Kabellänge und die Kabelgeschwindigkeit werden über Magnetgeber an der Umlenkrolle ermittelt. Alle Messwerte vom A-Rahmen werden nach A/D-Wandlung über ein 50 m langes Kabel an den Zentralrechner im Überwachungsraum übertragen, wo sie durch die globale Schiffsposition, Windgeschwindigkeit und -Richtung, Luftdruck und Lufttemperatur ergänzt werden. Hier erfolgen zudem die Visualisierung der registrierten Bewegungen der getauchten Komponenten, die Speicherung der Daten in einer speziellen Datenbank, sowie die Aufzeichnung der Unterwasser-Videsequenzen.

Die Zuordnung der Videsequenzen zu den Dynamikdaten erfolgt durch Überlagerung von Einsatz- und Operationsparametern wie Projekt-ID, Tauchgang-ID, Datum, CPU-Zeit, Kompassdaten, Roll- und Stampfwinkel und Tiefe (bzw. Druck [dbar]) direkt vom Steuerrechner auf das Videosignal (*video overlay system*). Hierzu wird das VGA-Signal des Steuerrechners in einem Signalverteiler auf vier einzelne Linien gelegt, die dann jeweils durch Passieren eines Normenwandlers an das PAL-Signal angepasst und mit den vier Videokanälen zusammenschaltet werden.

Über die Mensch-Maschine-Schnittstelle am Steuerplatz ist die Interaktion mit dem Zentralrechner und somit dem getauchten System möglich. Die zugehörige Bedienoberfläche ist mit der Software LabVIEW realisiert.

Eine erste Analyse der Bewegungsdynamik wird nach Übertragung der Rohdaten zu einem separaten Rechner möglich. Zum geregelten Datenzugriff nutzt die Softwarearchitektur so genannte *named-pipe* Schnittstellen des Betriebssystems, um mehrere PCs im LAN (*local area network*) auf dem Schiff zu verlin-

ken. Das bewirkt, dass der zentrale Steuerrechner nicht überlastet wird, der in der gegenwärtigen Ausbaustufe unter dem Betriebssystem MS Windows XP arbeitet.

Von der Deckeinheit der glasfaseroptischen Telemetrie verläuft ein weiteres 50 m langes Datenkabel zur Winde. Hier werden die Steuersignale wie auch die 3x3 kVolt DC Versorgungsspannung des Geräteträgers in das 4300 m lange *umbilical* eingespeist. Letztere wurde zuvor aus der 400 V Bordspannung eines stabilisierten Generators des Schiffes transformiert.

Ein Drehübertrager (*slip ring*) ermöglicht die kontinuierliche Daten- und Spannungsübermittlung über die drehende Windentrommel. Das *umbilical* ist im unteren Kabelaufhängepunkt terminiert, so dass das Spannungskabel im Unterwasser-Transformator und das Datenkabel in der druckfesten Telemetrie-Box münden. Die Datenübertragung bietet zehn serielle *full duplex* Schnittstellen mit einer maximalen Übertragungsrate von 115 kBaud für den Datenverkehr, sowie vier analoge Videokanäle mit jeweils 5 MHz Bandbreite.

Der Geräteträger ist mit einer weiteren Einheit aus Neigungs- und Beschleunigungssensor versehen, die baugleich derjenigen am A-Rahmen ist. Hinzu kommen die Kraftmesswaage, ein Absolutdrucksensor, ein Altimeter und ein Dualfrequenzsonar. Vier Einheiten von Kameras und Leuchten stehen zur Verfügung, um Aufnahmen z.B. auch der Kabelbewegungen direkt oberhalb von MODUS zu machen. So lässt sich Taumeln des Geräteträgers oder eine *slack* Situation am Kabel auch visuell sofort erkennen und mit den zeitgleich erfassten Messwerten in Bezug setzen (Abb. 1-3).

Die Nutzlastmodule, wie z.B. die Bodenstationen, sind direkt an den Geräteträger gekoppelt. Andere, wie z.B. Probenamerosetten, hängen an einem bis zu 200 m langen sekundären *umbilical* unter ihm und erlauben dadurch das Eintauchen in z.B. hoch korrosive Medien. Je nach Anwendung und Ausstattung liefern die Module Statusdaten ihrer Sensorkomplexe oder auch eigene Kompass-, Neigungs- und Beschleunigungswerte. Da der Geräteträger unabhängig von diesen Subsystemen operiert, werden diese zusätzlichen Daten über bis zu zwei separate bidirektionale Schnittstellen der Telemetrie hinauf zum Schiff und dort direkt zum Operator des Nutzlastmoduls übertragen. Der ‚Kunde‘ des Geräteträgereinsatzes erhält somit unmittelbaren Zugriff auf die von ihm gesuchten Daten aus der Tiefsee.

4.2 Messdatenerfassung

Die Dynamikdaten fallen je nach Sensortyp mit unterschiedlichen Abtastraten an (Tab. 4-1). Da nicht jeder Sensor eine eigene Schnittstelle zum Datenerfassungsrechner hat, müssen daher bei der Übertragungsrate Kompromisse eingegangen werden. Dies trifft z.B. bei den kombinierten Einheiten aus Neigungs- und Beschleunigungssensor zu, deren höchstmögliche Datenübertragungsrate durch ein gemeinsames Protokoll auf den größten gemeinsamen Wert gebracht wird.

Entscheidendes Kriterium für die Wahl einer geeigneten Übertragungsrate stellt die Einhaltung der so genannten Nyquist-Frequenz dar. Sie berücksichtigt, dass eine Frequenzauflösung der gemessenen Zeitreihe nur bis zur halben Abtastfrequenz möglich ist, dass also z.B. eine Abtastung mit 10 Hz nur Schwingungen von 5 Hz richtig erfassen kann. Zumindest diese halbe auflösbare Abtastfrequenz muss zur Auflösung der vorliegenden Systembewegungsfrequenzen von der Datenerfassung erreicht werden, um *Aliasing* Effekte zu vermeiden (NYQUIST [44], HOEFELD [26]).

Aus den genannten Gründen werden die Sensordaten aus mehreren seriellen Kanälen in den Datenstrom gespleisst (*multiplexed*). Die Kommunikation und Umsetzung der entsprechenden Protokolle wird vom Kommunikations-Server Programm (*daqserver.dll*) realisiert (Abb. 4-2, links). Dies wird beim Start der Steueroberfläche automatisch aktiviert und verarbeitet die Datenströme der zuvor konfigurierten Sensoren. Der Zugriff auf die seriellen Schnittstellen erfolgt durch eigenständige, voneinander unabhängige Programmteile (*threads*), da es ansonsten aufgrund der hohen Datenraten und der Vielzahl der Kanäle zu Datenverlusten kommen könnte.

Die empfangenen Datensätze, Fehlermeldungen und konvertierten Daten werden mit Zeitstempeln versehen und in chronologischer Reihenfolge zur späteren Weiterverarbeitung in Datenpuffern, den so genannten *queues* gespeichert (Abb. 4-2, rechts). Die aktuellen Messwerte und die ggf. davon abgeleiteten Größen stehen der Steueroberfläche am Zentralrechner dagegen ständig zur Verfügung, so dass aufgrund der hohen Updaterate einige Messwerte auf Rundinstrumenten mit Analogcharakter dargestellt werden können. Da Anfangs- und Endzeiten der Messintervalle nicht exakt übereinstimmen, ergeben sich bei der Speicherung der *queues* Wartezeiten bis zu einer halben Intervalllänge (z. Z. ca. 166 ms), bis ein kompletter Datensatz, d.h. eine Zeile in der Protokolldatei, synchron vorliegt und mit einer Taktrate von ca. 333 ms geschrieben werden kann.

Durch die Zwischenspeicherung der Daten berücksichtigt das vorliegende Konzept sowohl die gemessenen Mittelwerte als auch die Extremwerte inklusive Vorzeichen jedes Sensors. Dadurch gehen auch Daten aus höherer Abtastfrequenz, wie z.B. die Beschleunigungen, nicht verloren.

Durch Konfiguration der Datenloginitialisierung vor Beginn des Tauchgangs kann die Aufzeichnung (*logging*) für alle Sensoren einzeln zu- oder abgeschaltet werden. Bei Zuschaltung aller Sensoren wird pro Datensatz, also pro Zeile im Datenlog, ein Speicherplatz von ca. 400 Byte belegt. Dies ergibt bei einer Einsatzzeit von z.B. sechs Stunden ein Datenaufkommen von ca. 25,92 MByte (=400 Byte*3 Hz*3600 s*6 h), was wegen der Speicherung im Steuerrechner an Bord des Schiffes, und der dort vorhandenen mehreren GByte Speicher, kein Volumenproblem darstellt.

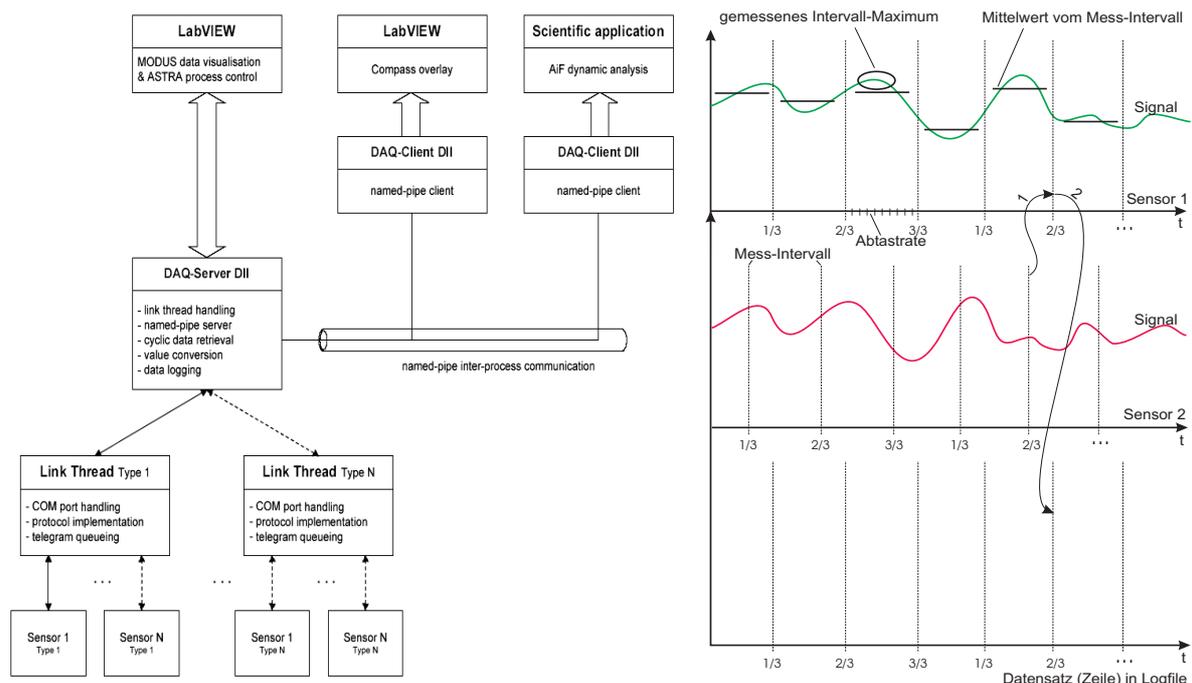


Abb. 4-2: (Links) Softwaremodule der Datenerfassung und (rechts) Schema der synchronisierten Datenprotokollierung

4.3 Sensorsysteme

4.3.1 A-Rahmen: Messung von Zugkraft/Kabelgeschwindigkeit/Kabellänge

Die Lastmessung am oberen Aufhängepunkt erfolgt über die als Biegestab ausgearbeitete Achse der Umlenkrolle (Modell LE 216 der Schweizer Fa. *Vibro-Meter SA*, Datenblatt im Anhang). Der Stab verwendet eine Wheatstonesche-Vollbrücke und ist für Lasten bis 100 kN ausgelegt. Die Signale zwischen 4 mA und 20 mA werden direkt im Gehäuse verstärkt, um über weite Distanzen störungsfrei übertragen werden zu können. Die Standardkalibrierung ergibt bei 0 kN=4 mA ($\pm 0,25$ mA) und bei Auslegungslast 100 kN=16 mA (± 3 %).

Ein weiterer Sensor in der Hydraulikölpumpe der Winde dient zur redundanten Überwachung der aktuellen Zuglast direkt an der Winde. Der Sensor setzt den zum Aufbringen der Drehgeschwindigkeit benötigten Öldruck der Pumpe in Beziehung zur aktuellen Last. Somit kann hier ein Notstopp bei Überlast umgehend greifen, ohne auf Sekundärsensoren wie dem am *sheave* angewiesen zu sein. Die an der Umlenkrolle registrierte Last ist grundsätzlich von den geometrischen Verhältnissen zwischen Winde, A-Rahmen und Umlenkrolle abhängig, wie in Abb. 2-4 skizziert ist.

Die Kabellänge und Kabelgeschwindigkeit wird ebenfalls direkt an der Umlenkrolle gemessen. Hierzu sind auf einem Radius in 32er Teilung Metallstifte in die Kunststoffrolle eingearbeitet (Abb. 4-3). Diese Stifte lösen bei Passieren eines induktiven Sensors Impulse aus, deren Taktrate der Ermittlung der gesuchten Daten dient.

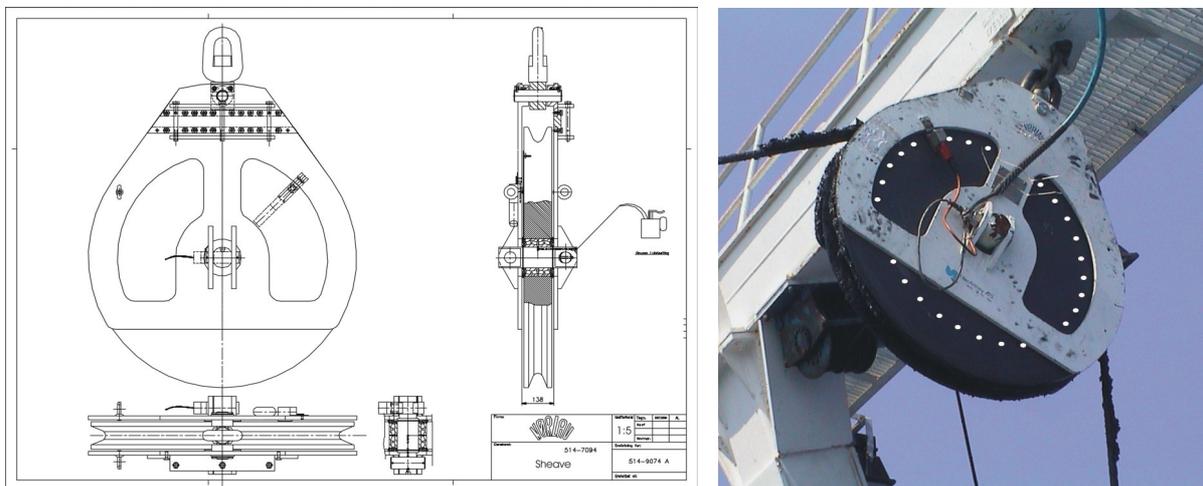


Abb. 4-3: (Links) Zeichnung der Umlenkrolle mit Lastsensor in der Drehachse sowie induktivem Sensor für Kabellänge und -geschwindigkeit (MACARTNEY [39]) und montiert am A-Rahmen (Metallstifte wurden nachgezeichneten)

4.3.2 Geräteträger: Messung der Zugkraft

Ein speziell entwickeltes System ist die Kraftmesswaage (KMW) am Geräteträger (Abb. 4-4, Zeichnung im Anhang). Ihre Funktion vereint das Halten der angehängten Lasten und das Messen der daraus resultierenden Dehnungen an den Halteflanschen. Die Dehnungen werden über Dehnmessstreifen (DMS) registriert, deren Messschaltung pro Halteflansch mit zwei Wheatstone-Vollmessbrücken realisiert ist. Das Schema der DMS-Applikation (siehe Anhang) erlaubt die Messung von Zug- und Druckkräften und kom-

pensiert störende Einflüsse aus Temperaturschwankungen, Torsion und Biegung. Das redundante Messsystem reduziert die Gefahr eines Totalausfalls der Kraftmesswaage, da der Ausfall je einer Vollbrücke pro Flansch durch Abgriff der Alternativbrücke kompensiert werden kann.

Der Haltebolzen lagert in den beiden Halteflanschen, wird jedoch im (auszuschließenden) Bruchfall eines Flansches zusätzlich sicher vom Mittelsteg abgefangen, um den die Gabel der Kabelterminierung greift (siehe Abb. 4-4, Mitte-unten). Die maximalen zu erwartenden Spannungen und Dehnungen in der Konstruktion wurden mit der FE-Methode vorausberechnet, so dass der nötige Sicherheitszuschlag in den Flanschdicken berücksichtigt werden konnte.



Abb. 4-4: Die Kraftmesswaage nach der Metallbearbeitung (links oben und unten), nach DMS-Applikation, Verkabelung und Verguss der Klebezonen (Mitte oben) und im eingebauten Zustand (Mitte unten und rechts)

Die Dehnungen werden als Widerstandsänderungen in Form analoger Spannungswerte registriert und von Bauelementen zur Signalkonditionierung verstärkt (Module 3B18 von *Analog Devices*, Datenblatt im Anhang), digitalisiert und in den allgemeinen Datenstrom zum Schiff eingebettet. Dort registriert erfolgt die Interpretation der Spannungswerte mit Hilfe der Kalibrierkurven (Abb. 4-7, rechts) und die grafische Darstellung der Kräfte im Zeitbereich.

Die gemessenen Kräfte lassen sich grundsätzlich über das Kräftegleichgewicht an der Gabel der Kabelterminierung gemäß Abb. 4-5 bestimmen, mit der Haltekraft am unteren Kabelende $F_{\text{cab}} = F_{\text{sys}(1)} + F_{\text{sys}(2)}$ mit den Flanschanteilen $F_{\text{sys}(1)}$ und $F_{\text{sys}(2)}$.

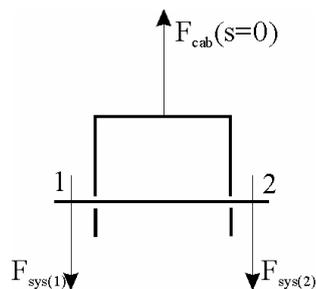


Abb. 4-5: Kräfte am unteren Kabelaufhängepunkt (UA)

Da die Gabel der Kabelterminierung durch z.B. Kippbewegungen des Geräteträgers oder *slack* des Kabels nicht immer senkrecht zum Haltebolzen steht, sind die Lastanteile in 1 und 2 als ungleich anzunehmen. Aus diesem Grund werden die Lasten kontinuierlich in beiden Flanschen gemessen und mit den Kalibrierkurven für die jeweiligen Kanäle der Messbrücken abgeglichen.

4.3.3 Messung von Neigung und Beschleunigung

Die Beschleunigungssensoren des oberen und unteren Kabelendes nutzen Bauelemente der Fa. *Analog Devices* (Model ADXL202-AQC, Datenblatt im Anhang). Die zweiachsigen Sensoren decken einen Messbereich von ± 2 g ab. Die Messwerte unterliegen Bauart bedingt Schwankungen, die von der Umgebungstemperatur und den Neigungswinkeln in x und y ($xTilt$ bzw. $yTilt$) der Sensorachsen zur Gravitationsachse abhängen. Aus diesem Grund werden hier die Beschleunigungssensoren jeweils in Einheit mit elektronischen zweiachsigen Kompassen genutzt (Model OSTAR der Fa. *FSI-Falmouth Scientific*, Datenblatt im Anhang) (Abb. 4-6, links). Letztere ermitteln kontinuierlich neben Temperatur und Nordausrichtung (*heading*) auch den Stampfwinkel $xTilt$ (*pitch*) und den Rollwinkel $yTilt$ (*roll*), womit die resultierende ‚wahre‘ Vertikalbeschleunigung parallel zur z-Achse bestimmt werden kann.

Zur Reduzierung des Offsetwinkels in der Nulllage des A-Rahmen-Sensors wird dieser starr auf einem Winkelblech oder einem justierbaren Bügel montiert, mit dem die zur Vertikalen gekippte Lage des A-Rahmens in Tauchposition ausgeglichen wird (s. a. Abb. 2-4). Diese Maßnahme verringert den maximalen Winkelausschlag des Sensors, ohne zusätzliche Trägheitskräfte einzubringen, wie dies bei selbsttätig ausgleichenden oder ‚schwimmenden‘ Lagerungen des Sensors der Fall wäre. Abb. 4-6 (rechts) zeigt den Sensor montiert auf dem Winkelblech in Parkposition des A-Rahmens. Der Einfluss der Nulllage auf die Messwerte wird im Abschnitt 4.4.2 näher erörtert.



Abb. 4-6: (v. l. n. r.) Kompass und Beschleunigungssensor als Einheit - montiert am A-Rahmen in Parkposition

4.4 Labortests und Kalibrierung

4.4.1 Kraftmesswaage

Nicht jeder Sensor kann vor Einbau vom Anwender kalibriert werden. Dies ist auch nicht notwendig, da diese standardmäßig ab Werk für genau spezifizierte Einsatzbedingungen (Druck, Temperatur, Feuchte etc.) kalibriert ausgeliefert werden. Ein anderes Bild bieten Eigenbauten wie hier die Kraftmesswaage

(KMW) am Geräteträger. Zum Testen und Kalibrieren wird diese in einem speziellen Zugmessstand über den vollen spezifizierten Arbeitsbereich belastet. Hierzu wird ein Original Kupplungszapfen einer Bodenstation (*docking-pin*) in die MODUS-Kupplungseinheit (*latch device*) eingehängt. Ein Haltegeschirr aus Stahltrossen simuliert die Gabel der Kabelterminierung und hält das *latch device* (siehe Abb. 4-4, Mitte-unten). Durch ein Hydrauliksystem wird Druck bis 300 bar auf die Druckdosen aufgebracht, die die Messanordnung vertikal strecken. Die erzielten Kalibrierkurven für Gesamtlasten bis über 100 kN für die vier Kanäle der vier Wheatstoneschen Messbrücken (KMW1-4) sind Abb. 4-7 (rechts) zu entnehmen, die Kraftkurven der beiden Druckmessdosen (P1, P2) sind als unterbrochene Linien ebenfalls dargestellt. Die Kurven für zunehmende und abnehmende Belastung (*up* bzw. *down*) machen unterschiedlich ausgeprägte Hystereseverluste in der KMW und im Haltegeschirr deutlich.

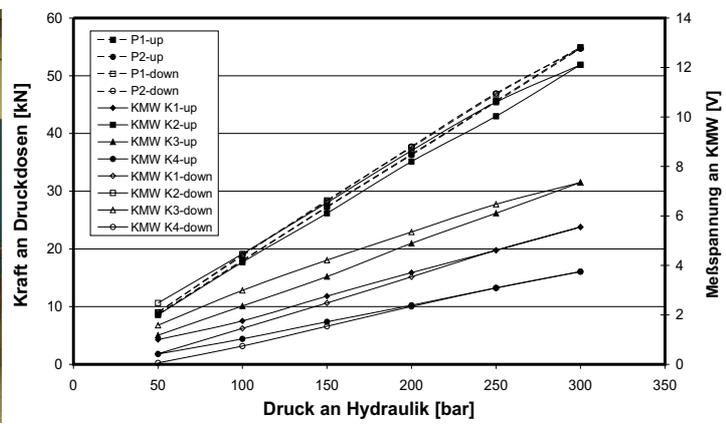


Abb. 4-7: Kalibrierung der neuen Kraftmesswaage (KMW) am MODUS in einem speziellen Zugmessstand (links) und ermittelte Kalibrierkurven für vier Kanäle der KMW (K1-K4) mit Kraftkurven der Druckdosen (P1, P2) bei zunehmender (*up*) und abnehmender Last (*down*)

Schwer zu testen sind Einflüsse durch dynamische Belastungen mit einer Wechselferioden von ca. 4-5 s, wie sie im Einsatz im Seegebiet vorliegen. Da die Kraftamplituden vom Seegang und vom jeweiligen Tauchsystem abhängen, ist zudem der zu erwartende relevante Wertebereich der Kalibrierkurven und somit der Einfluss von Hysterese im Vorhinein nur grob einzuschätzen. Die Kurven für die Kanäle 1+4 zeigen recht kleine Steigungen, wodurch deren Auflösung eingeschränkt ist. Da es sich hierbei jedoch um einen Prototypen handelt, sind die erzielten Ergebnisse für die Kanäle 2+3 als sehr zufrieden stellend anzusehen und somit einsatztauglich.

4.4.2 Sensoren für Neigung und Beschleunigung

Die gemessenen Beschleunigungen sind abhängig von der jeweiligen Einbaulage der Sensoren (Abb. 4-8). Die von der Senkrechten bzw. Waagerechten abweichenden Kippwinkel werden hier mit $xTilt$ für die Schiffslängsachse bzw. $zTilt$ für die Hochachse bezeichnet.

Werden die Sensoren jeweils nur um eine Achse geneigt, so ergeben sich die Winkelfunktionen in Tab. 4-2 für die x - und z -Komponenten der Beschleunigungen am A-Rahmen bzw. am Geräteträger (Index AF für A-Rahmen und MD für MODUS).

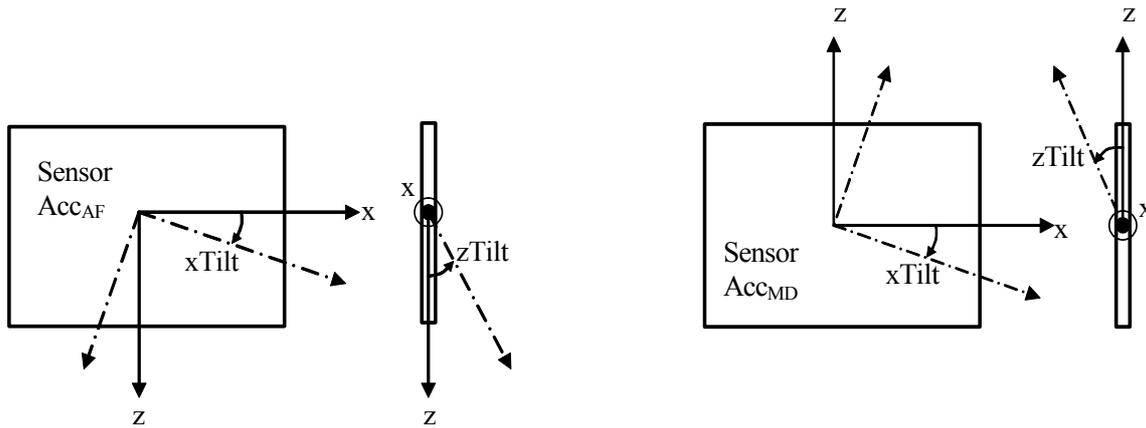


Abb. 4-8: Einbaulage der zweiachsigen Beschleunigungssensoren (links) am A-Rahmen und (rechts) am MODUS

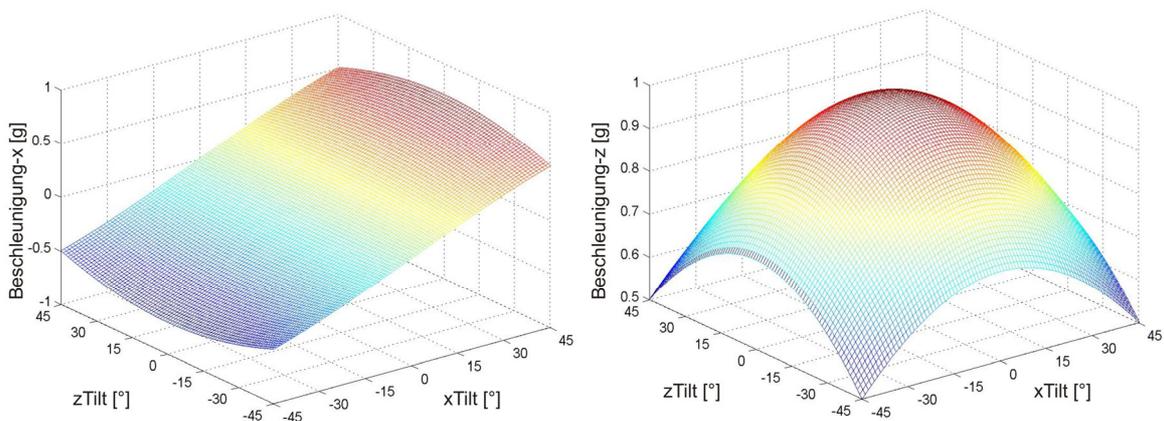
Tab. 4-2: Winkelabhängigkeit der Beschleunigungskomponenten bei einachsigem Neigen

Beschleunigungskomponente	xTilt	zTilt
x-Komponente: a_{xAF}	$\cos(xTilt)$	$-\sin(zTilt)$
z-Komponente: a_{zAF}	$-\sin(xTilt)$	$-\cos(zTilt)$
x-Komponente: a_{xMD}	$\cos(xTilt)$	$\sin(zTilt)$
z-Komponente: a_{zMD}	$-\sin(xTilt)$	$\cos(zTilt)$

Im allgemeinen Fall neigt sich der Sensor jedoch gleichzeitig um beide registrierten Achsen, so dass die Winkelanteile der Beschleunigungen zu den Resultierenden \hat{a}_x und \hat{a}_z komponentenweise multipliziert werden müssen,

$$\begin{aligned}
 \hat{a}_{xAF} &= -\cos(xTilt)\sin(zTilt) \\
 \hat{a}_{zAF} &= \sin(xTilt)\cos(zTilt) \\
 \hat{a}_{xMD} &= \cos(xTilt)\sin(zTilt) \\
 \hat{a}_{zMD} &= -\sin(xTilt)\cos(zTilt)
 \end{aligned}
 \tag{50}$$

Die Flächenrepräsentationen der idealisierten Beschleunigungen sind in Abb. 4-9 für die x-Komponente (links) und die z-Komponente (rechts) dargestellt. Die Flächen stellen die störungsfreien, idealen Beschleunigungen bei Kippen des Sensors um beide Achsen dar.

Abb. 4-9: Flächen der idealisierten Beschleunigungen für den vollen zweiachsigen Arbeitsbereich der Sensoren xTilt bzw. zTilt von $\pm 45^\circ$ für die x-Komponente (links) und die z-Komponente (rechts)

Im Einsatz treten Abweichungen von diesen Idealflächen aufgrund von Temperaturschwankungen am Sensor und Messfehlern des Neigungsgebers auf (vgl. Datenblatt im Anhang). Die Abweichungen der hier verwendeten Sensorkonfigurationen werden als Offsetwerte mit einfachen Kippversuchen auf einem Sinustisch mit einem Fehler von ca. $\pm 5\%$ bestimmt und in Abb. 4-10 als interpolierte Fehlerflächen jeweils für die x- und z-Komponente der Sensoren am A-Rahmen und am MODUS für den relevanten Arbeitsbereich von jeweils $\pm 25^\circ$ aufgetragen.

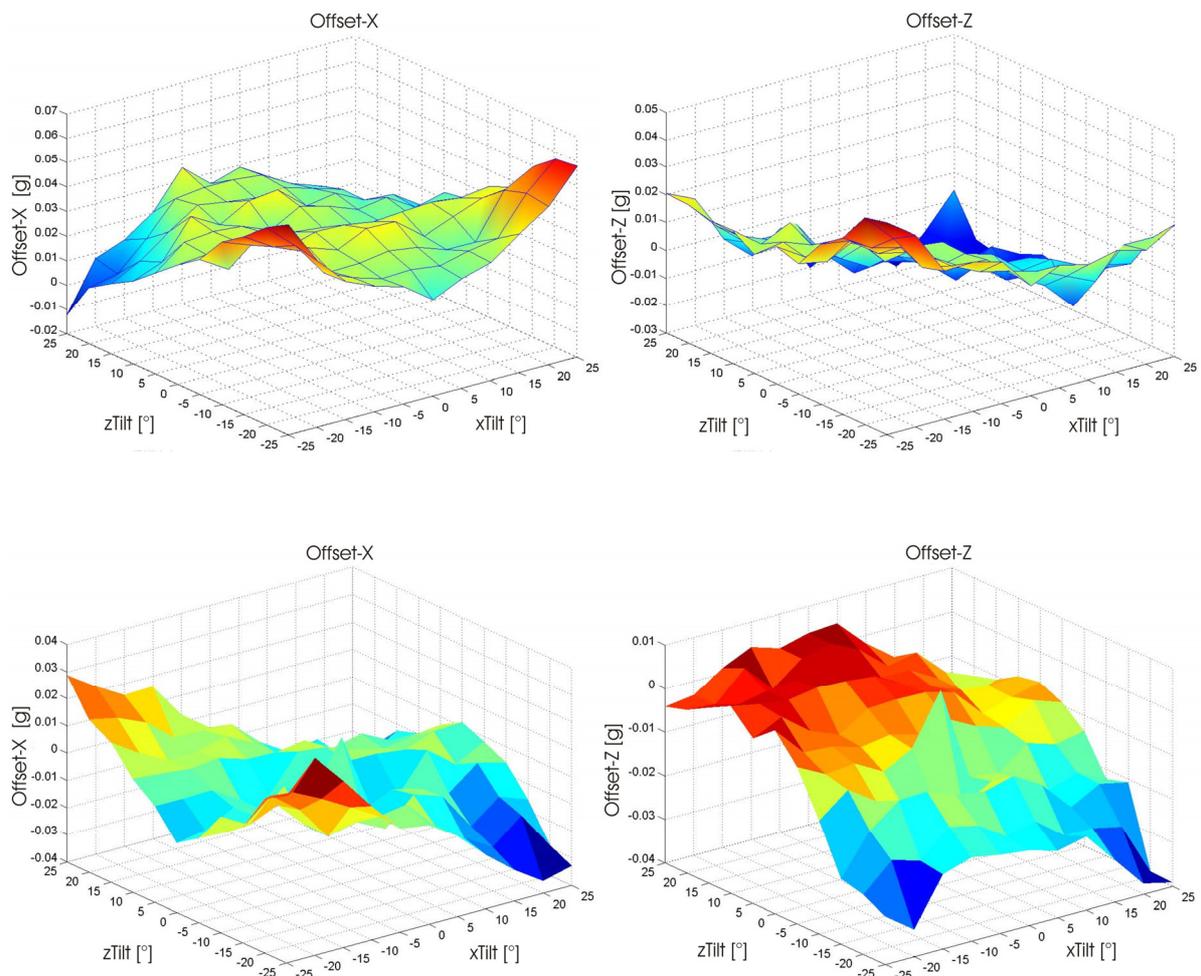


Abb. 4-10: Flächen der gemessenen Abweichungen für x- und zTilt von $\pm 25^\circ$ für die x- und z-Komponente des Sensors am A-Rahmen (oben) bzw. am MODUS (unten)

Die Ergebnisse der Tests zeigen folgende maximale Abweichungen von den Idealwerten für die x- bzw. z-Richtung am A-Rahmen bzw. MODUS (Tab. 4-3):

Tab. 4-3: Abweichung der gemessenen Beschleunigungskomponenten von den Idealwerten

Sensor	Offset-x (max.) [g]	Offset-z (max.) [g]
A-Rahmen	0,06	0,03
MODUS	0,04	-0,04

Die Extremwerte liegen jeweils an den Bereichsgrenzen und sind deshalb tolerierbar. Zur Bestimmung von Zwischenwerten der gemessenen Stützwerte wird das Verfahren der bilinearen Interpolation genutzt. Hierbei werden zunächst die Sensordatenabweichungen an den gesuchten Zwischenwerten unter Gewichtung des Abstandes zu den gemessenen Daten ermittelt. Im nächsten Schritt werden die gemessenen Beschleunigungswerte an den betreffenden Winkelpositionen für beide Achsen mit den ermittelten Zwischenwerten der Abweichungen korreliert und so der ‚wahre‘ Beschleunigungswert ermittelt. Das Prinzip der Methode ist in Abb. 4-11 dargestellt.

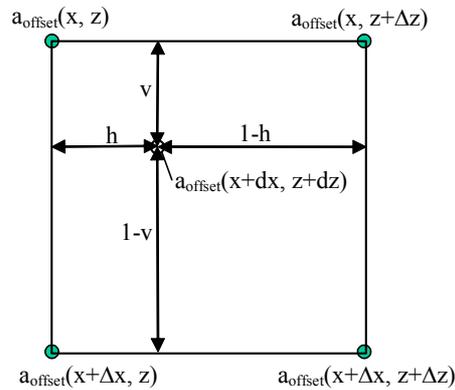


Abb. 4-11: Schema der bilinearen Interpolation

Der zu interpolierende Wert an der Position $(x+dx, z+dz)$ ergibt sich aus den vier umliegenden (bekannten) Datenpaaren mit $x \leq x+dx < x+\Delta x$, $z \leq z+dz < z+\Delta z$ und den horizontalen bzw. vertikalen Zwischenabständen $h=dz/\Delta z$ und $v=dx/\Delta x$:

$$\begin{aligned} a_{\text{offset}}(x+dx, z+dz) = & a_{\text{offset}}(x, z) \cdot h \cdot v + a_{\text{offset}}(x, z+\Delta z) \cdot (1-h) \cdot v \\ & + a_{\text{offset}}(x+\Delta x, z) \cdot h \cdot (1-v) + a_{\text{offset}}(x+\Delta x, z+\Delta z) \cdot (1-h) \cdot (1-v) \end{aligned} \quad (51)$$

Für den A-Rahmen bzw. den MODUS gelten somit die korrigierten Beschleunigungen für beide Achsen:

$$\begin{aligned} \hat{a}_{xAF} &= -\cos(xTilt) \sin(zTilt) - a_{\text{offset}_x} \\ \hat{a}_{zAF} &= \sin(xTilt) \cos(zTilt) - a_{\text{offset}_z} \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \hat{a}_{xMD} &= \cos(xTilt) \sin(zTilt) - a_{\text{offset}_x} \\ \hat{a}_{zMD} &= -\sin(xTilt) \cos(zTilt) - a_{\text{offset}_z} \end{aligned}$$

Die winkelunabhängige Beschleunigung lautet dann jeweils für den A-Rahmen und MODUS

$$\begin{aligned} a_{x_n} &= a_x - \hat{a}_x \\ a_{z_n} &= a_z - \hat{a}_z \end{aligned} \quad (53)$$

woraus sich die winkelunabhängigen vertikalen Beschleunigungen am A-Rahmen bzw. MODUS ergeben

$$\begin{aligned} a_{vAF} &= a_{x_n} \cdot \cos(xTilt) \sin(zTilt) - a_{z_n} \cdot \sin(xTilt) \cos(zTilt) \\ a_{vMD} &= a_{x_n} \cdot \cos(xTilt) \sin(zTilt) + a_{z_n} \cdot \sin(xTilt) \cos(zTilt) \end{aligned} \quad (54)$$

5 Tankversuche

Die im Folgenden vorgestellten Versuchsreihen wurden zum einen an Versuchsfeldern der TU Berlin (Teile a und b) und zum anderen bei Tiefseeinsätzen mit dem bereits vorgestellten Forschungsschiff F/S URANIA durchgeführt.

Teil a) untersucht das vertikale Schwingverhalten des beispielhaften Schwingungssystems und davon abgeleitete Größen, wie z.B. die hydrodynamische Masse oder die Bedingungen für das Auftreten von *slack-cable* Situationen, wie es während der Tauchgänge mit MODUS in der Tiefsee beobachtet werden kann (Abb. 1-3). Hierfür wurde der so genannte Tiefwassertank am Institut für Land- und Seeverkehr genutzt (Tankmaße L/B/T=4,0 m/1,3-0,88 m/4,0 m - Abb. 5-1).

Teil b) dient mit Hilfe von Widerstandsversuchen in der tiefen Schlepprinne der ZE VWS der TU Berlin (Tankmaße L/B/T=250 m/8,0 m/4,8 m) zur Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten C_d für verschiedene Bewegungsrichtungen.

5.1 Schwingungsversuche

5.1.1 Aufbau und Modellsystem

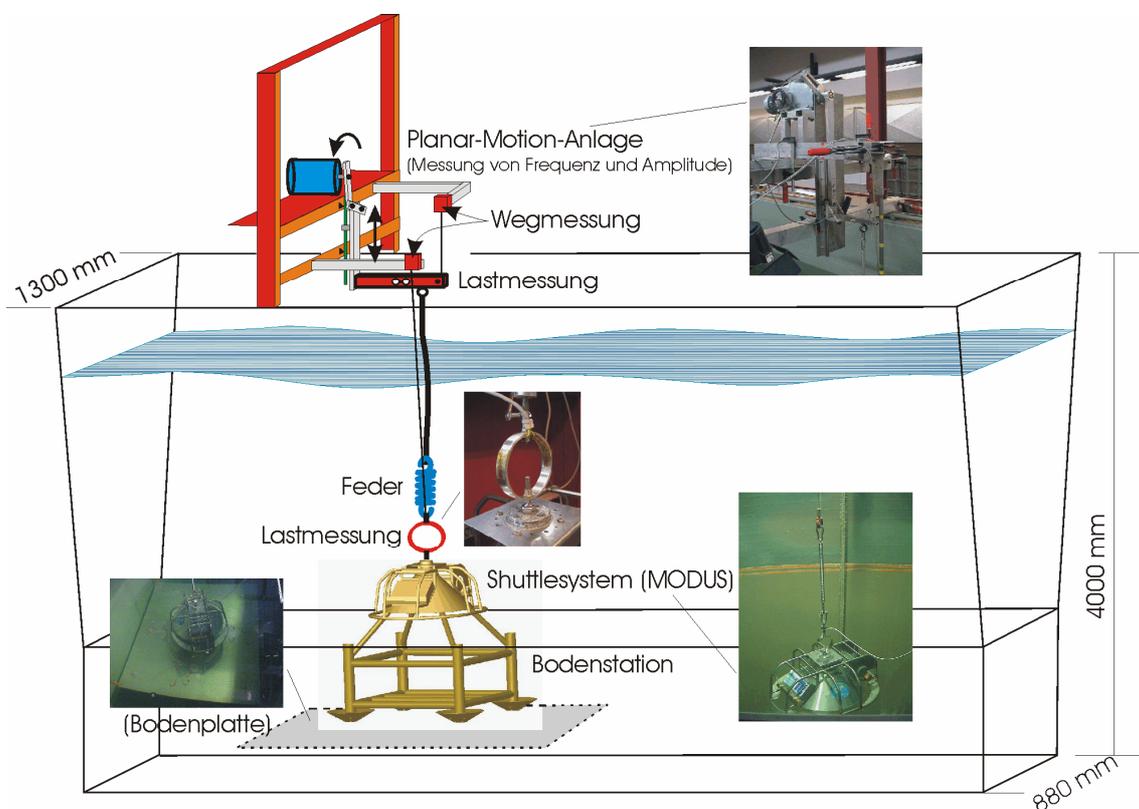


Abb. 5-1: Versuchsaufbau für Schwingungsversuche im Tiefwassertank

Die Schwingungsversuche ermitteln das vertikale Bewegungsverhalten von Stahlmodellen von MODUS mit bzw. ohne Bodenstation im Maßstab 1:5 (vgl. Abb. 1-12, Mitte).

Mit der vertikalen *Planar-Motion*-Anlage (PMA) werden die an Kabel und Feder befestigten Modelle in kinematische harmonische Oszillationen um die statische Ruhelage versetzt, wie das Ersatzsystem in Abb. 2-8 verdeutlicht.

Trimmgewichte an den Modellen sorgen für maßstäbliche Massenverhältnisse μ nach dem Newtonschen Ähnlichkeitsgesetz (Index S für die Großausführung, M für das Modell),

$$\mu = \frac{m_S}{m_M} = \frac{\rho_S}{\rho_M} \lambda^3 = 1,025 \cdot 125 = 128,125, \quad (55)$$

mit dem Wasserdichtenverhältnis ρ_S/ρ_M und dem Längenverhältnis $\lambda=L_S/L_M=5$.

Zur Simulation beispielhafter äquivalenter Kabellängen von 390 m bzw. 1060 m werden zwei Federn mit unterschiedlichen Dimensionen und Federraten wie folgt bestimmt,

$$\frac{k_S}{k_M} = \frac{(E_S A_S / L_S)}{(E_M A_M / L_M)} = \frac{\rho_S}{\rho_M} \lambda^2 = 1,025 \cdot 25 = 25,625, \quad (56)$$

mit dem Verhältnis der Federraten k_S/k_M und den jeweiligen Elastizitäten $E_S A_S$ bzw. $E_M A_M$.

Für Referenzversuche mit einer Kugel und einer Scheibe werden zwei weitere Federn kleinerer Federate genutzt. Tab. 1-1 listet die relevanten Daten der realen Strukturen auf, also die Prototypen von MODUS und Bodenstation sowie deren Stahlmodelle im Maßstab M1:5, während Tab. 5-1 die Federeigenschaften zusammenfasst.

Tab. 5-1: Eigenschaften der Modellversuchsfedern

Eigenschaften	Feder 1 Fa. Gutekunst Typ RZ-144EX	Feder 2 Fa. Gutekunst Typ RZ-177PX	Feder 3	Feder 4
Federrate k [N/m]	922	2510	42,1	84,4
äquivalente Kabellänge L [m]	1060	390	-	-



Abb. 5-2: Die Kraftmesswaagen am oberen (links) und unteren Ende des Testkabels

Die Versuchsanordnung erlaubt die simultane Messung der vertikalen Wegamplituden sowie die durch die Haltekräfte hervorgerufenen Dehnungen am oberen und unteren Ende eines Edelstahlkabels (OA, bzw. UA). Zu diesem Zweck sind zwei Kraftmesswaagen in den Haltestrang eingebaut. Abb. 5-2 zeigt links den Biegestab am oberen Kabelende und rechts den Kraftmessring der neu entwickelten unteren Kraftmesswaage mit den DMS-Applikationen.

Die obere Kraftmesswaage ist an der PMA befestigt, über die während der Versuche eine harmonische Vertikalbewegung mit variierbarer Amplitude und Frequenz aufgebracht werden können. Am unteren Ende des Kabels befindet sich die jeweilige Feder, die die untere Kraftmesswaage und daran die Versuchslast trägt (Abb. 5-1).

Die vertikalen Bewegungen des oberen Kabelendes sowie der Versuchslast werden über Weggeber registriert, bei denen die Linearbewegung direkt in eine Widerstandsänderung umgesetzt wird. Bauartabhängig arbeiten diese mit Rückzugskräften von ca. 0,5 N (Geber oben) bzw. ca. 2,5 N (Geber unten). Die Rückzugskräfte vermindern das Ausschlagen am unteren Umkehrpunkt im gleichen Maß, wie sie den oberen Umkehrpunkt nach oben ziehen, wodurch sich die Einflüsse auf die Wegamplituden der Waage halten und daher hier vernachlässigt werden.

Der Quotient aus Antwortwegsignal $S_{Si}(\omega)$ zu Erregerwegsignal $S_{\zeta}(\omega)$ ergibt die Übertragungsfunktion $H_{S_{\zeta}}(\omega)$ =RAO des schwingenden Systems. Hierüber lässt sich die form- und richtungsabhängige hydrodynamische Masse m_{hy} der angehängten Last des vertikal schwingenden Systems bestimmen,

$$m_{hy} = \frac{k}{(2\pi)^2} T_M^2 - m_0, \quad (57)$$

mit der Schwingungsperiode des Modells $T_M=2\pi/\omega_R$, der Federrate k und der Eigenmasse m_0 des Modells. Die Umrechnung der Perioden vom Modell auf die Großausführung (T_S) erfolgt über den Größenmaßstab λ (=5) mit

$$T_S = \sqrt{\lambda} T_M. \quad (58)$$

Durch Einhängen einer Bodenplatte in den Tank kann im Weiteren die Annäherung des Geräteträgers an den Meeresboden simuliert werden. Die Platte wird in stufenweise verringerten Abständen zum Modellboden waagrecht eingehängt, so dass das Modell nicht bis zum realen Tankboden mit seinen beschränkten Interventionsmöglichkeiten und Sichtverhältnissen herabgelassen werden muss (siehe Detail in Abb. 5-1).

Die analogen Messwerte für Dehnungen (=Kräfte) und Wege liegen in einem Messbereich von 0-10 V vor. Sie werden von einem Messverstärker (Modell Scadas II der Fa. *Difa Measuring Systems*⁸) aufgenommen. Die Dehnungswerte werden als Widerstandsänderungen mit Wheatstoneschen Vollbrückenschaltungen aufgenommen und mit einem Tiefpass gefiltert, die Wegsignale, bleiben hingegen ungefiltert. Alle Signale werden verstärkt und digitalisiert. In einem separaten Messrechner erfolgt die Registrierung für jeweils 2^{11} (=2048) bzw. 2^{12} (=4096) digitalisierte Messwerte mit einer Abtastfrequenz von 200 Hz mit einem eigens erstellten Programm. Die Ergebnisse werden als Kurvenverläufe visualisiert.

⁸ Der Mikroprozessor des Verstärkers (Typ 212-0) hat einen 12 Bit/800 kHz A/D-Wandler mit 72 dB Dynamikbereich.

5.1.2 Durchführung

Die Schwingungsversuche dienen der Bestimmung der vertikal wirkenden hydrodynamischen Massen von MODUS und MODUS plus Bodenstation sowie von einer Scheibe und einer Kugel, die als Referenzkörper mit bekannten Eigenschaften dienen. MODUS ohne Konus wird wegen der geringen praktischen Relevanz hier nicht näher untersucht.

Die Messungen beginnen jeweils mit der Ermittlung der Eigenkreisfrequenzen ω_0 der freien, ungedämpften Feder-Masse-Systeme. Die dann folgenden freien, gedämpften Schwingungen erfolgen voll getaucht in Wasser bei fester Kabellänge. Die Ergebnisse zeigen den dämpfenden Einfluss des Wassers auf den jeweiligen Schwinger und führen zu den Resonanzfrequenzen ω_R .

Um die Anfangswerte für Masse, Gewicht und Auslenkung leichter identifizieren zu können, werden die Kanäle des Signalverstärkers für die ruhenden getauchten Systeme auf Null gesetzt, so dass die Messwerte um die jeweiligen Offsetwerte in Luft bzw. Wasser oszillieren. Zur Bestimmung der Übertragungsfunktionen wird dann der obere Aufhängepunkt durch die *Planar-Motion*-Anlage in harmonische Sinusschwingungen versetzt, mit jeweils fester Amplitude und Variation der Periode im relevanten Bereich von 0,75-2,5 s.

Durch Einbringen der Bodenplatte unter das getauchte System wird dann die Auswirkung begrenzter Wassertiefe auf die Übertragungsfunktion bestimmt. Der zu verzeichnende Anstieg der hydrodynamischen Masse von MODUS bei Verringerung des Bodenabstands bestätigt entsprechende Untersuchungen von Tauch-, Roll- und Querschwingungen von teilgetauchten zweidimensionalen Kreis- und Lewisprofilen sowie von Containerschiffen im Flachwasser (KEIL [33]). Das gleiche Phänomen beschreibt CLAUSSE et al. [7] für einfache, tief getauchte dreidimensionale Körper. Hier wird der Grad der Bodenannäherung mit dem Quotienten b/d dimensionslos aufgetragen, mit b der Höhe des getauchten Körpers und d dem Abstand zum Boden, gemessen von der Oberkante des Körpers (vgl. Abb. 5-9).

Nach Beendigung der Schwingungsversuche werden die jeweiligen Modellsysteme aus dem Wasser gehoben. Die Zugkraftverläufe bei Durchbrechen der Oberfläche sind charakteristisch für die hier untersuchten Strukturen. Sie zeigen den dominanten Einfluss einzelner Bauelemente wie z.B. dem Konus oder den Tellerfüßen der Bodenstation. Erfahrungen aus der Praxis werden bestätigt, die sehr hohe Belastungen am Kabel und am A-Rahmen für das Durchbrechen der *splash-zone* verzeichnen.

5.1.3 Auswertung

Freie und erzwungene Vertikalschwingungen

Die Zeitschriebe (2048 Werte=10,24 s) der Kraftverläufe für die beiden Referenzkörper Kugel und Scheibe sowie die Modelle von MODUS mit/ohne Bodenstation zeigen die erwarteten charakteristischen Eigenschwingungsformen in Luft und Wasser (Abb. 5-3: Kugel und Scheibe, Abb. 5-4: MD und MD+BS). Ergänzend zeigen die Abb. 5-5 und Abb. 5-6 die vertikalen Auslenkungen (Wege) über der Zeit, hier jedoch für 4096 Registrierungen, d.h. 20,48 s. Weitere ausgewählte Messschriebe für Zugkräfte und Auslenkungen sind dem Anhang C zu entnehmen.

Der Vergleich des logarithmischen Dekrements für jeweils zwei aufeinander folgende maximale Auslenkungsamplituden \hat{z}_i bzw. \hat{z}_{i+1} , verdeutlicht die hohe Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen mit

Beteiligung des Geräteträgers, und die davon stark abweichende Dämpfungscharakteristik der Kugel (Abb. 5-7).

$$\Lambda = \ln \frac{\hat{z}_i}{\hat{z}_{i+1}}. \quad (59)$$

Die Werte sind auf die jeweiligen maximalen Auslenkungen und unter Nullsetzen der jeweiligen Startzeiten normiert dargestellt.

Obwohl die Versuchskörper aufgrund ihrer differierenden Gewichtskräfte mit unterschiedlichen Federn versehen sind, ergeben sich zusammenfassend speziell für die Kräfte und Wege der in Wasser stark gedämpften Schwingungen von MODUS mit/ohne Station sehr ähnliche Kurvencharakteristiken. Dies ist auf die hydrodynamische Dominanz der MODUS-Geometrie und der vergleichsweise hohen hydrodynamischen Transparenz der - im Versuch leeren - Bodenstation bei den in der Praxis sehr relevanten Vertikalschwingungen zurückzuführen.

Der Einbau der Feder mit der Federrate $k=2510 \text{ N/m}$ ergibt ein reales Kabel der Länge 390 m. Die Erregeramplitude entspricht mit 0,024 m einer realen Amplitude von 0,12 m. Ergebnisse für die Übertragungsfunktionen zeigen die signifikante Verstärkung (bis zur Verdoppelung) der vertikalen Antwortamplituden im Resonanzfall (Abb. 5-8). Die Resonanzfrequenzen liegen für MODUS bei $\omega_R = 2,92 \text{ rad/s}$ und für MODUS+BS bei $\omega_R = 2,45 \text{ rad/s}$.

Beispielhafte Schwingungsbilder für die Modelle von MODUS und MODUS plus Bodenstation am Kabel der (virtuellen) Länge von 390 m bzw. 1060 m und der Erregeramplitude von 0,024 m sind im Anhang zu finden.

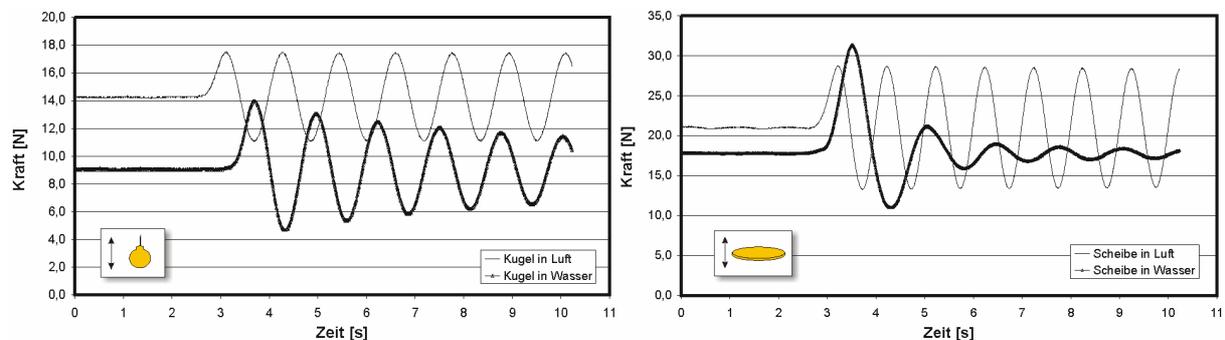


Abb. 5-3: Kraftverläufe für Eigenschwingungen einer Aluminiumkugel (links, $m=1,46 \text{ kg}$, $\varnothing=0,1 \text{ m}$, $k=42,1 \text{ N/m}$) bzw. einer Stahlscheibe (rechts, $m=2,14 \text{ kg}$, $\varnothing=0,16 \text{ m}$, $k=84,4 \text{ N/m}$) in Luft und Wasser.

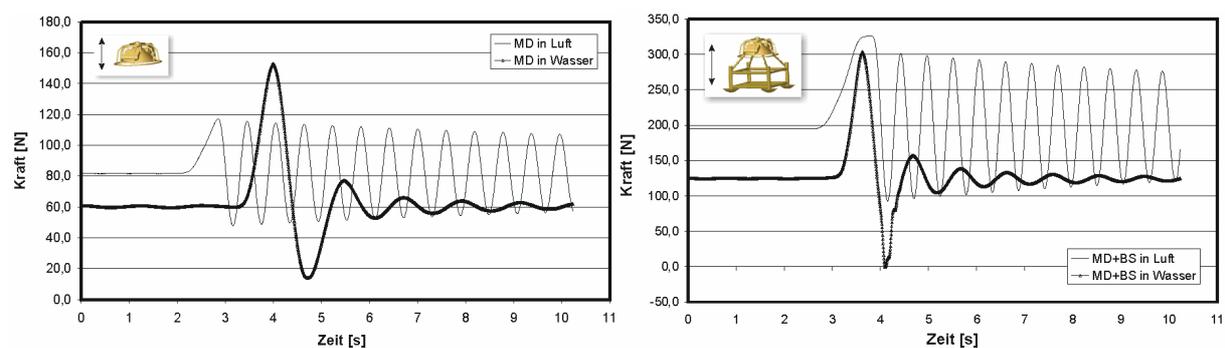


Abb. 5-4: Kraftverläufe für Eigenschwingungen der Modelle von MODUS (links, $k=922 \text{ N/m}$) und MODUS+Bodenstation (rechts, $k=2510 \text{ N/m}$) in Luft und Wasser, M1:5.

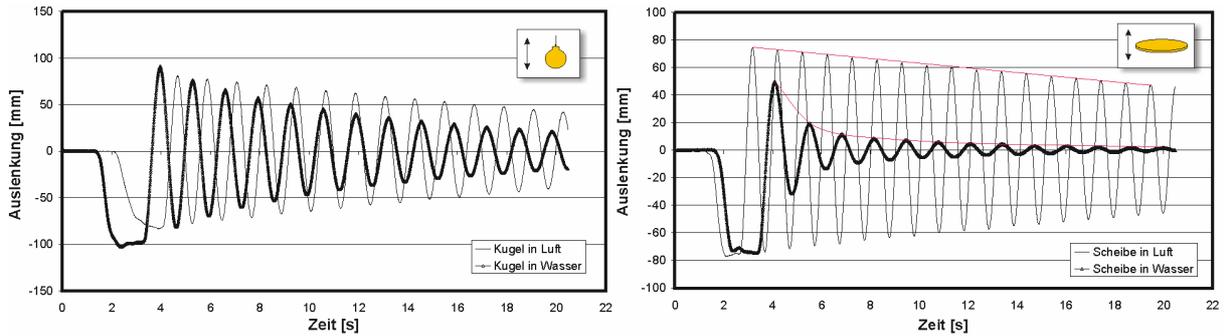


Abb. 5-5: Auslenkungen für Eigenschwingungen einer Aluminiumkugel (links, $m=1,46$ kg, $\varnothing=0,1$ m, $k=42,1$ N/m) bzw. einer Stahlscheibe (rechts, inkl. Einhüllende, $m=2,14$ kg, $\varnothing=0,16$ m, $k=84,4$ N/m) in Luft und Wasser.

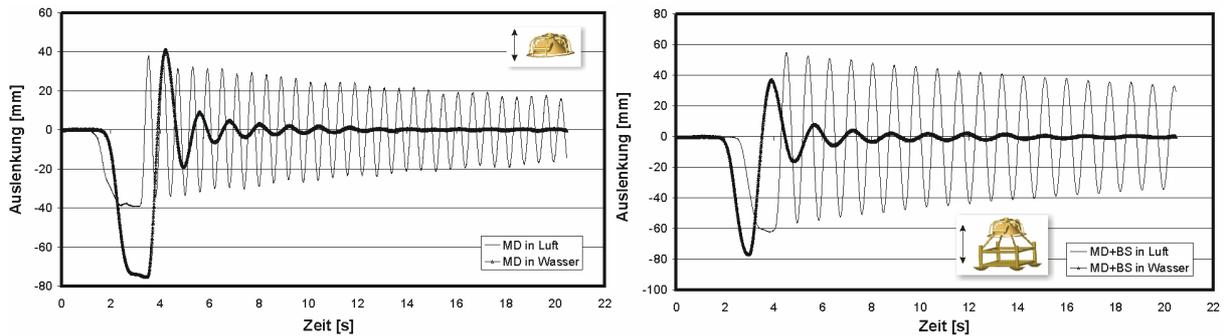


Abb. 5-6: Auslenkungen für Eigenschwingungen der Modelle von (links) MODUS und (rechts) MODUS+Bodenstation; beide mit $k=922$ N/m, in Luft und Wasser, M1:5.

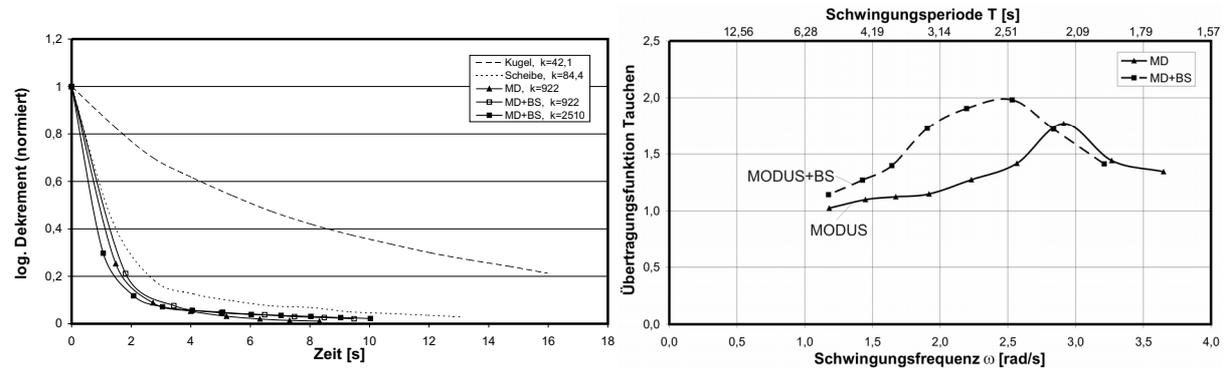


Abb. 5-7: Links: Logarithmisches Dekrement der freien gedämpften Schwingungen aus Abb. 5-5 und Abb. 5-6

Abb. 5-8: Rechts: Übertragungsfunktionen für Tauchen von MODUS m/o Bodenstation bei Kabellänge ca. 390 m

Vertikalschwingungen bei Bodenannäherung

Durch Einbau der Feder mit $k=922$ N/m wird das Kabel maßstäblich auf 1060 m verlängert. Als Folge ergeben sich die auf die Großausführung übertragenen Kurvenverläufe in Abb. 5-9 für die Übertragungsfunktionen von MODUS und MODUS+Bodenstation. Die Maxima der Schwingungsfrequenzen liegen für MD bei $\omega_R=1,90$ rad/s bzw. für MD+BS bei $\omega_R=1,44$ rad/s. Ergänzend sind die RAO-Verläufe für MODUS bei Annäherung an den Boden dargestellt. Der Quotient b/d (=Gesamthöhe Tauchkörper/Abstand Oberkante Tauchkörper bis Boden) beschreibt diese Annäherung. Deutlich sind die mit abnehmendem Bodenabstand verringerten Antwortamplituden zu erkennen, die mit einer Verschiebung der Peakfrequenzen ω_R zu kleineren Werten einhergehen. Dies ist in erhöhter hydrodynami-

scher Masse aufgrund eines vergrößerten Druckfeldes kurz über dem Boden begründet, da die Eigenmasse sowie die Kabellänge im Versuch unverändert geblieben sind.

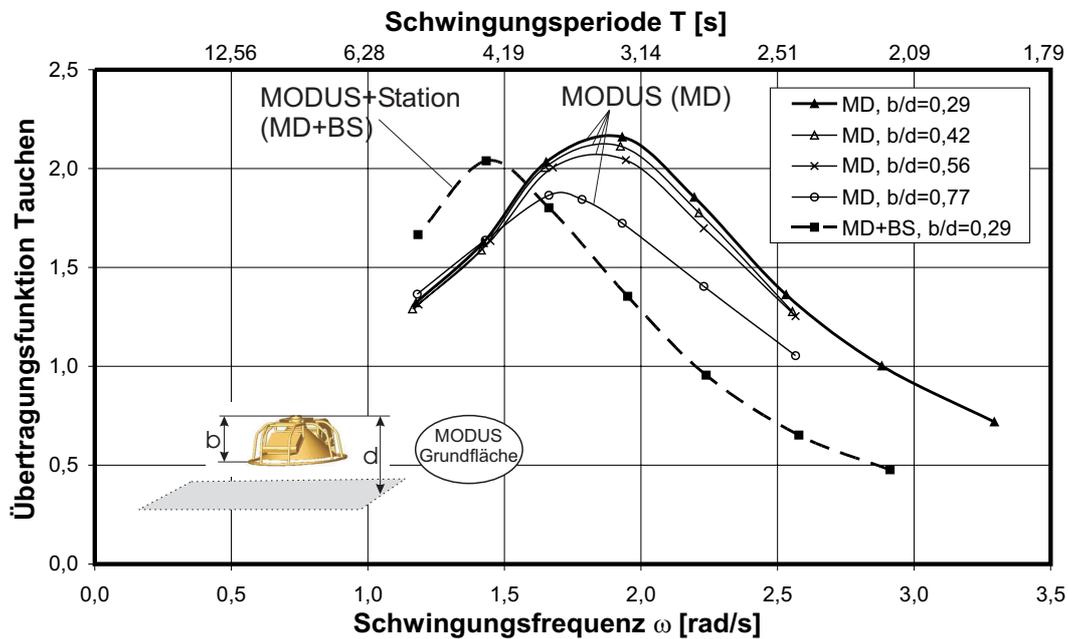


Abb. 5-9: Änderung der Übertragungsfunktionen für Tauchen in Betrag und Position der Maxima bei Verringerung des Bodenabstands von MODUS; Ergänzend: RAO für MD+BS im ‚Freiwasser‘. Kabellänge ca. 1060 m

Die Ergebnisse für die mit der Modell-Eigenmasse ($m_0=8,50$ kg) normierten hydrodynamischen Massen, sowie für die maximalen Verstärkungen RAO_{max} und die zugehörigen Frequenzen ω_R für MODUS im ‚Freiwasser‘ und bei Bodenannäherung sind in Tab. 5-2 zusammengestellt.

Das Verhältnis der ermittelten hydrodynamischen Massen zur Eigenmasse ist für die untersuchte Bodenannäherung in Abb. 5-10 dimensionsfrei dargestellt. Ergänzt wurden Ergebnisse einer analytischen Berechnung der hydrodynamischen Masse bei Vertikalschwingungen eines einfachen ovalen Kegels bei der gleichen Operation.

Tab. 5-2: Hydrodynamische Masse von MODUS bei Bodenannäherung

MODUS (M1:5, $m_0=8,50$ kg)	Bodenabstand, b/d			
	0,29	0,42	0,56	0,77
normierte Masse: m_{hy}/m_0	5,10	5,18	5,27	6,67
RAO_{max}	2,20	2,13	2,08	1,87
ω_R [rad/s]	1,90	1,86	1,85	1,70
MODUS +Bodenstation (M1:5, $m_0=19,7$ kg)	0,29			
normierte Masse: m_{hy}/m_0	3,52			
RAO_{max}	2,05			
ω_R [rad/s]	1,44			

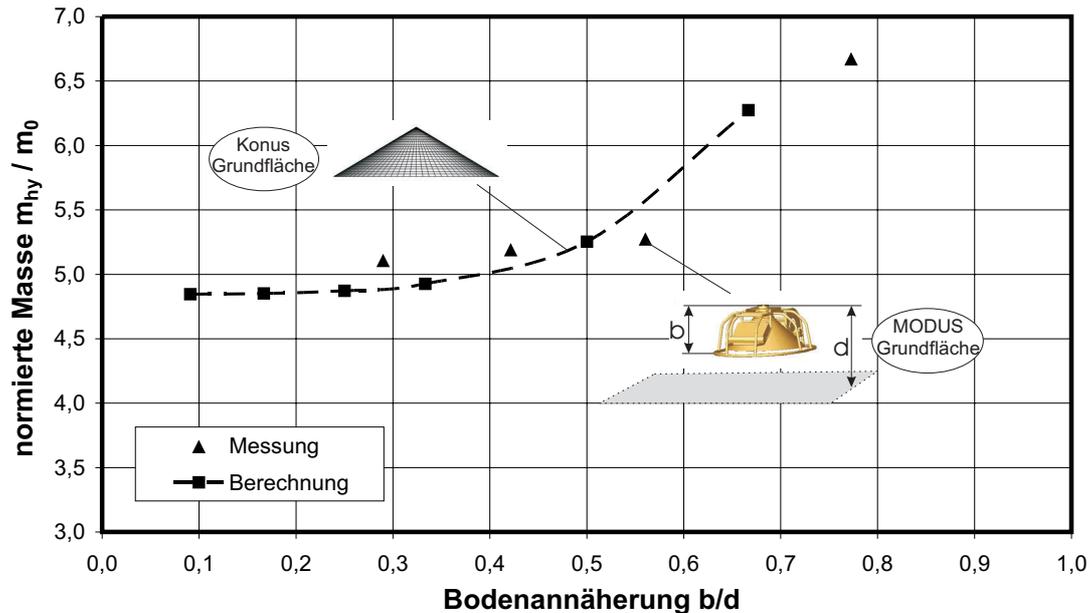


Abb. 5-10: Zunahme der hydrodynamischen Masse bei Verringerung des Bodenabstands; Messung und Berechnung; Eigenmasse $m_{0(MD,M1:5)}=8,50$ kg

Das 3D-Diffraktionsprogramm WAMIT [57] berechnet für einen einfachen elliptischen Kegel mit den Hauptabmessungen von MODUS in M1:1 (L/B/H [m]: 2,88/2,35/1,02, vergleiche Tab. 1-1) Werte mit guter Übereinstimmung besonders für den Freiwasserbereich. Dieser nahezu unbeeinträchtigte Bereich erstreckt sich nach Messung und Berechnung mit einem b/d-Verhältnis von etwa 0,4 bis kurz über den Boden. Der ermittelte dramatische Anstieg des beschleunigungsabhängigen Massenanteils direkt vor einer Landung spielt im Normalbetrieb von MODUS demnach keine entscheidende Rolle, da die Landung des Geräteträgers selbst z. Z. nicht zu dessen Einsatzprofil zählt. Beim Absetzen von Stationen am Boden wirkt sich der beobachtete Effekt jedoch wie beschrieben auf die Gesamtmasse aus.

Die Umrechnung des Ergebnisses aus Abb. 5-10 z.B. für den Freiwasserbereich mit $m_{hy}/m_0=5,1$ und $b/d=0,29$, ergibt für MODUS bei Berücksichtigung der Modellmasse $m_0=8,50$ kg und dem Maßstabsfaktor bei Salzwasser ($\lambda=128$) die hydrodynamische Masse der Großausführung: $m_{hy_MD}=5,1*m_0*\lambda=43,35$ kg *128=5548 kg und für MODUS+BS (s. a. Tab. 5-2): $m_{hy_MD+BS}=3,52*19,7$ kg*128=8876 kg.

Durchbrechen der Wasseroberfläche

Das Durchbrechen der Wasseroberfläche beim Ausbringen und Einholen der Tauchgeräte stellt eine extreme Belastung des Kabels und des oberen Aufhängepunktes dar. Dies gilt, obwohl das Kabel selbst in dieser Phase noch keinen relevanten Beitrag zur Last liefert. Die hier erzielten Versuchsergebnisse belegen dies eindrucksvoll: Abb. 5-11 (links) zeigt einen kontinuierlichen Anstieg der Zugkraft für das MODUS-Modell in M1:5 bis zum plötzlichen Austritt aus dem Wasser und dem freien Ausschwingen an der Luft. Da der Konusinnenraum nicht schnell genug belüftet wird, wird das Kraftmaximum für diese Operation durch den Saugeffekt des Konus hervorgerufen.

Ein zweiphasiges Bild zeigt die Kurve für MODUS+Bodenstation in M1:5 (Abb. 5-11, rechts). Der Saugeffekt des Konus beim Durchbrechen der Oberfläche zeigt sich hier im ersten Teil der Kurve bis $t=3$ s mit einhergehendem maximalem Kraftaufkommen. Bei Austreten des Konus aus dem Wasser fällt die Zugkraft abrupt ab. Die hierdurch induzierte Schwingung des Systems spiegelt sich in der oszillierenden Haltekraft wider. Die Schwingung setzt sich bis zum vollständigen Austritt der Struktur, hier die Fußtrichter der BS, aus dem Wasser fort. Frei an Luft schwingt das System dann ungestört aus.

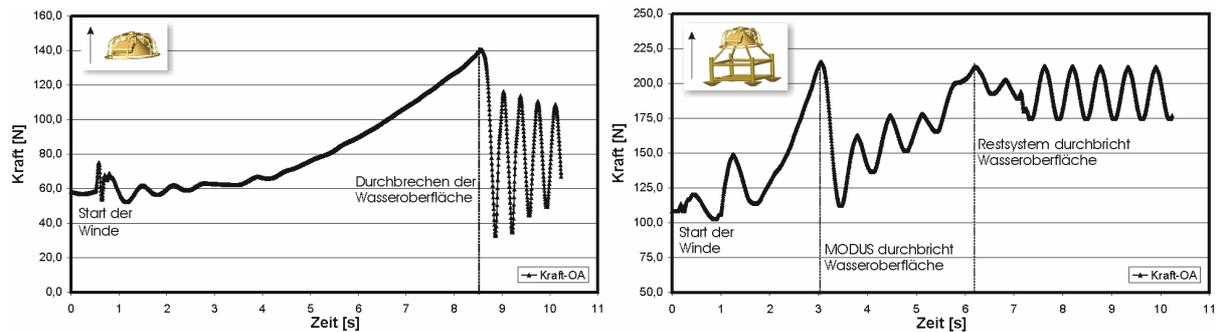


Abb. 5-11: Zugkraftverläufe beim Austauschen von MODUS (links) und MODUS+Bodenstation (rechts) in M1:5

Die ermittelten Quantitäten und die Ausschwingcharakteristiken können wegen der Installation an relativ weichen Federelementen nicht direkt mit der Realität verglichen werden. Sie verdeutlichen jedoch durch Überhöhung der Bewegungsamplituden sehr eindrücklich die vorherrschenden Phänomene am Kabelaufhängepunkt.

5.2 Widerstandsversuche

Die experimentelle Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten ist trotz großer Fortschritte der numerischen Simulation notwendige und gängige Praxis. Die Messergebnisse dienen dabei der Verifikation und ‚Kalibrierung‘ der auf empirischen Verfahren beruhenden rechnergestützten Analysewerkzeuge. Sind diese dann jedoch auf das vorliegende Problem eingestellt, lassen sich schnell und kostengünstig Strukturvariationen untersuchen und Prognosen für noch nicht erstellte Prototypen abgeben.



Abb. 5-12: Der Prototyp sowie Modelle von MODUS (GEO2) im Maßstab 1:3 und 1:5

Wegen der hohen Kosten für realitätsnahe Modelle ist der Entwickler stets bemüht kleine, gut handhabbare, jedoch dem Prototyp ähnliche Modelle zu testen. Ähnlichkeit liegt dann vor, wenn die dimensionslosen Reynoldszahlen – oder bei schwimmenden Systemen unter Welleneinfluss die Froudezahlen – von Modell und Großausführung übereinstimmen. Diesem Gedanken folgend sind in den 1960er und Anfang 1970er Jahren besonders im Schiffbau die so genannten GEOSIM-Versuche (*GEOMETRICAL SIMI-*

lar) durchgeführt worden (z.B. LUTHRA [37]). Ein ähnliches Ziel verfolgen die hier durchgeführten Widerstandsversuche mit zwei maßstäblichen Modellen in M1:5 und M1:3 sowie dem Prototyp des Geräteträgers MODUS in der Tiefwasserrinne der ZE VWS der TU Berlin (Abb. 5-12).

Die Ergebnisse sollen helfen, die für die Hydrodynamik und Hydroelastik relevanten Einflüsse bei der Wahl des Abbildungsmaßstabs sowie den notwendigen Grad der Diskretisierung von Modellen zu bestimmen, sowie die Vorhersagegenauigkeit von Modellversuchen zu ermitteln.

Die Versuchskörper werden an einem 5-Komponenten-Messbiegestab an der justierbaren Messbühne des Schlepptwagens 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 dreier Versuchskörper mit ein und demselben Messaufbau zu ermitteln. Abb. 5-13 zeigt die drei Versuchskörper, nämlich das Modell in M1:5 in Horizontalfahrt, das Modell in M1:3 in Vertikalstellung und den Prototyp und Abb. 5-14 zeigt die untersuchten Einbaukonfigurationen der Widerstandsversuche.



Abb. 5-13: Widerstandsversuche in der Tiefwasserrinne der ZE VWS der TU Berlin (v.l.n.r.): Modelle von MODUS in M1:5, M1:3 (hier für Vertikalfahrt hochkant montiert) und der Prototyp

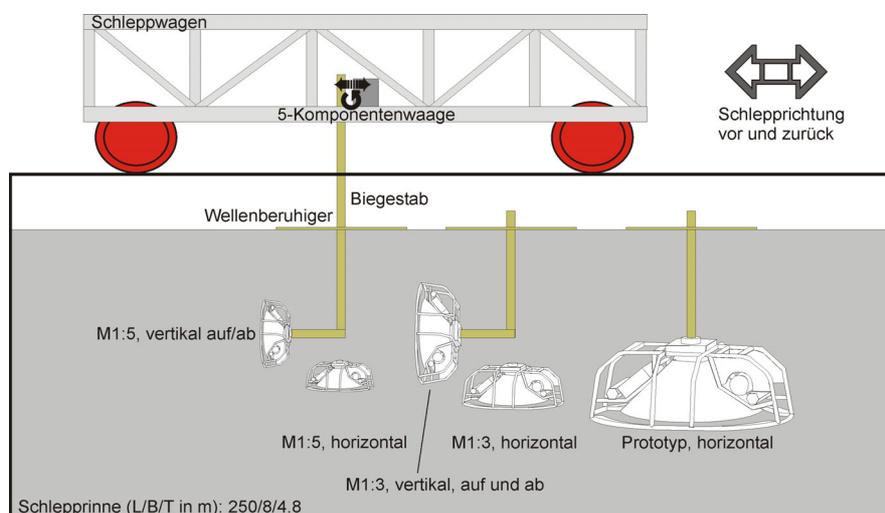


Abb. 5-14: Konfigurationen der Widerstandsversuche (v.l.n.r.): Modelle von MODUS in M1:5, M1:3 und der Prototyp für vertikale und horizontale Fahrt

5.2.1 Konfigurationen und Durchführung

Wie schon in Abschnitt 1.3 erläutert, durchläuft der Geräteträger MODUS im Einsatz drei Hauptphasen: Fieren, Horizontalfahrt und Hieven. Den drei Hauptbewegungsrichtungen sind Vertikaloszillationen überlagert, die durch den Seegang auf das Einsatzschiff, bzw. den A-Rahmen und das *umbilical* übertragen werden. Aufgrund seiner Bauform ergeben sich für den Geräteträger je nach Fahrtrichtung sehr unterschiedliche Widerstandsbeiwerte, die zumindest für die Modelle durch entsprechende Einbaulagen ermittelt werden können (Abb. 5-14). Der Prototyp kann wegen begrenzter Traglast des Biegestabes und begrenzter Kanaldimension nur in Horizontalrichtung geschleppt werden.

Dem modularen Konzept des MODUS-Prototyps wird durch zwei getrennte Versuchsreihen Rechnung getragen: Bei der ersten Messreihe wird mit minimalen Anbauten ausgetrimmt gefahren (GEO2-a, minimal), bei der zweiten mit nahezu vollständig ausgerüstetem und somit ebenfalls getrimmtem System (GEO2, voll).

Die Widerstandsbeiwerte werden über den zugehörigen Reynoldszahlen aufgetragen. Die für jeden Messpunkt konstanten Schleppgeschwindigkeiten richten sich dabei nach den im Original vorliegenden Werten, liegen also für alle Richtungen zwischen $v_S=0,2$ m/s und $v_S=1,0$ m/s, wobei die Modellgeschwindigkeiten (v_M) über den jeweiligen Maßstabsfaktor (Längenverhältnis) λ bestimmt werden (siehe Tab. 5-3),

$$v_M = \frac{v_S}{\sqrt{\lambda}}. \quad (60)$$

Die technische Mindestgeschwindigkeit des Schleppwagens von 0,12 m/s begrenzt die Messreihe nach unten, während das Auslegungsmoment des Biegestabes den oberen Grenzwert darstellt. Untersucht werden sowohl stationär als auch dynamisch erreichte Fahrtgeschwindigkeiten. Bei ersterem Verfahren wird nach längerem Stillstand des Schleppwagens, und einer damit zusammenhängenden Rinnenberuhigung, kurz bis zur Testgeschwindigkeit beschleunigt und nach wenigen Sekunden die Messung gestartet. Nach Ende der Messung wird dann abgestoppt.

Bei letzterem Verfahren werden Geschwindigkeitsprofile gefahren, bei denen aus der jeweils erreichten Messgeschwindigkeit direkt auf die nächst höhere beschleunigt wird. Hierdurch sollen eventuelle Einflüsse durch Anfahrt und Abstoppen ermittelt werden. Die Messergebnisse stellen die jeweiligen Mittelwerte der einzelnen Messintervalle dar, wodurch turbulente Schwankungsbewegungen geglättet werden (siehe die Messschriebe im Anhang C).

Tab. 5-3: Richtungen und Geschwindigkeiten der Anströmung bei Widerstandsversuchen

MODUS	Bewegungsrichtungen und -geschwindigkeiten [ms ⁻¹]		
	vertikal (abwärts)	horizontal	vertikal (aufwärts)
Modell, M1:5	0,18/0,27/0,36/0,45/0,9	wie vorne	wie vorne
Modell, M1:3	0,12/0,23/0,35/0,46/0,58	wie vorne	wie vorne
Prototyp (GEO2-a, minimal)	-	0,2/0,4/0,6/0,8	-
Prototyp (GEO2, voll)	-	0,2/0,4/0,6/0,8	-

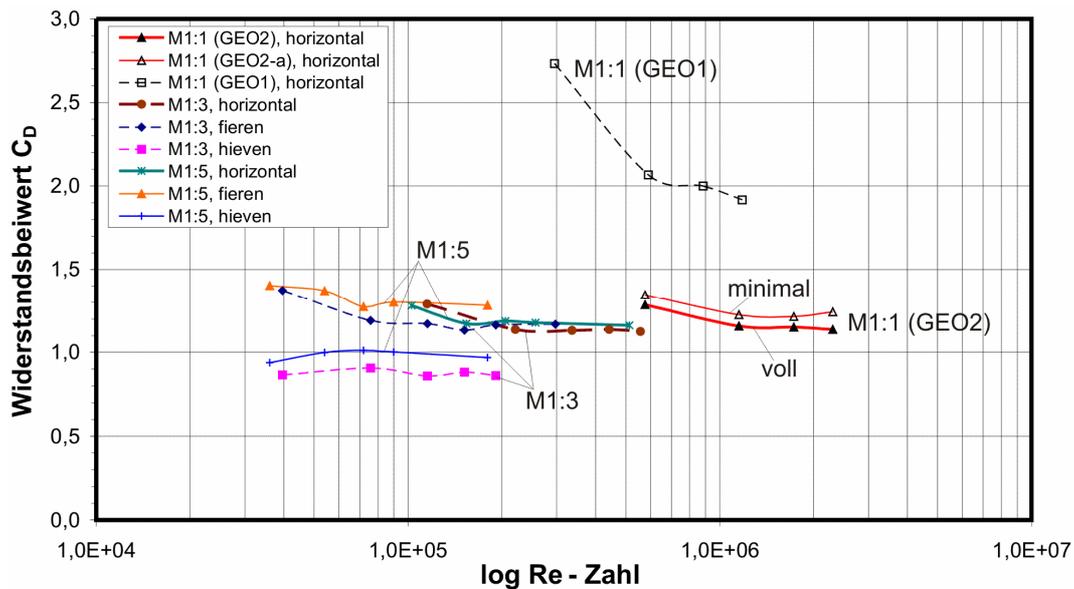


Abb. 5-15: Widerstandsbeiwerte vs. Reynoldszahlen für Experimente mit MODUS in M1:5, M1:3 und die Prototypen für Flachwasser (GEO1) und Tiefwasser (GEO2)

5.2.2 Auswertung

Der Auswertung liegen die Ergebniskurven in Abb. 5-15 zugrunde. Im Bereich kleiner und mittlerer Reynoldszahlen ($3,5E+04$ bis $6,0E+05$) liegen die Ergebnisse der Modelle, mit durchgezogenen Linien in M1:5 und mit unterbrochenen Linien in M1:3. Im oberen Re-Zahlenbereich liegen die Ergebnisse für die Großausführungen ($3,0E+05$ bis $2,5E+06$). Für die Modelle sind dabei deutlich unterscheidbare C_d -Wertebereiche für die drei Anströmrichtungen zu erkennen. So zeigen die Messungen für das Fieren (also gegen die Konusöffnung) signifikant größere Beiwerte als für die Aufwärtsrichtung (Hieven), nämlich $C_{d,Fieren}=1,2$ bis $1,4$ und $C_{d,Hieven}=0,86$ bis $1,0$. Dazwischen liegen die jeweiligen Messwertekurven für die Horizontalrichtung ($C_{d,horizontal}=1,13$ bis $1,29$), die aufgrund der im Vergleich zur Breite größeren Längenausdehnung der Körper im Bereich höherer Re-Zahlen liegen ($1,0E+05$ bis $5,5E+05$). Letztere Kurven zeigen für alle Körper sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr ähnliche Verläufe.

Wie erwartet verlaufen die Messwerte der Prototypen für die Horizontalrichtung ebenfalls sehr ähnlich, wengleich der Unterschied von der Flachwasserversion (GEO1) zur hydrodynamisch günstigeren Bauform der Tiefwasserversion (GEO2, GEO2-a) überdeutlich hervortritt. Diese deutlich höheren C_d -Werte für den GEO1-Prototyp resultieren zum einen aus einem höheren Strukturwiderstand und zum anderen aus einem nur schwer zu beziffernden Einfluss der anderen Versuchsstrecke (GEO1-Versuche: großer Umlauftank UT2 der ZE VWS, GEO2-Versuche: tiefe Schlepprinne der ZE VWS), mit differierenden Turbulenzparametern und Versuchsfelddimensionen. Daher lassen sich die Kurven für GEO1 und GEO2, GEO2-a nur eingeschränkt miteinander vergleichen und können hier aufgrund fehlender Referenzversuche der beiden Versionen in den jeweiligen anderen Tanks nur der grundsätzlichen Validation der Ergebnisse dienen. Demgegenüber zeigt der direkte Vergleich der Widerstandskräfte für die GEO2-Version mit minimalen Anbauten (GEO2-a) mit der voll ausgerüsteten Version (GEO2) das erwartete Bild: Aufgrund der Differenz der Projektionsflächen von gut 10 % (ca. $1,63 \text{ m}^2$ - voll ausgerüstet, ca. $1,46 \text{ m}^2$ - minimal ausgerüstet) ergeben sich leichte ‚Vorteile‘ für die Vollversion. Der qualitative Vergleich zeigt für beide Ausrüstungszustände der GEO2-Version und die Modelle gute Übereinstimmung bei den Kurvenverläufen für identische Fahrtrichtung.

6 Tiefseeinsätze

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten Einsätze mit dem Geräteträger MODUS zur Anwendung und Verifikation des Messsystems und zu Validationen der Ergebnisse aus Modellversuchen und Simulationen genutzt werden. Die Beschreibung der Konfigurationen der Tauchgänge zielt auf die Erläuterung der exemplarisch untersuchten Einsätze mit dem Geräteträger beim Absetzen und Bergen unterschiedlicher Bodenstationen im Mittelmeer, s. a. GERBER und CLAUSS [21]. Zugleich wird ein grober Einblick in die Praxis solcher Einsätze gegeben. Die Auswertung der Messergebnisse stellt für die jeweiligen Tauchgänge u. a. Zeitprofile von Kabellänge und Kabelzugkraft sowie Beispielplots besonders signifikanter Änderungen dynamischer Parameter im Kontext der Analyse von Systemanregung und -antwort dar. Die mit Fast-Fourier-Transformationen ermittelten Frequenzspektren der Vertikalschwingungen verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Kabellänge, Gesamtmasse und Resonanzfrequenz für ausgesuchte Zeitbereiche.

6.1 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 Tab. 1-1 zusammengefasst. Aus der Vielzahl der bisher durchgeführten Tauchfahrten wurden Messergebnisse folgender Konfigurationen näher untersucht (Tab. 6-1):

Tab. 6-1: Konfiguration der untersuchten Tauchgänge

Tauchmodule (BS-Version)	Masse [kg]	Gewicht [N]	Einsatzmonat / Einsatzort / Einsatzzweck	Aufenthaltsdauer tiefer als 1000 m ca. [min]	durchschnittliche Umweltparameter (ca.-Werte)	siehe auch
<i>Umbilical</i> [pro m]	2,276	18,3	-	s. u.	s. u.	Abb. 1-4
<i>MODUS stand-alone</i>	1090	7350	s. u.; s. u.; Tests + Transits von/zu Stationen	120 260	s. u.	Abb. 6-5 Abb. 6-6
MODUS + BS (GNDT-SN1)	2523	15551	Mai 2003; östlich Sizilien; Bergen der Station	100	Wind: 4,2 m/s, Wellenhöhe: 0,6 m Wellen/Schiff: 180° Wassertemperatur: 18°C	Abb. 6-1 Abb. 6-2
MODUS + BS (ORION-N2)	2747	17101	Dezember 2003; nördlich Sizilien; Absetzen der Station	175	Wind: 2,7 m/s, Wellenhöhe: 0,4 m Wellen/Schiff: 180° Wassertemperatur: 11°C	Abb. 6-12
MODUS + BS (ORION-N1)	3861	20829	Dezember 2003; nördlich Sizilien; Absetzen + Bergen der Station	165 210	Wind: 3,3 m/s, Wellenhöhe: 0,5 m Wellen/Schiff: 180° Wassertemperatur: 11°C	Abb. 6-11 Abb. 6-8

Eine Tauchkonfiguration besteht jeweils aus *umbilical* und MODUS, mit oder ohne Nutzlastmodul. Bedeutende Differenzen bestehen bei den Nutzlastmodulen, die, wenn es Bodenstationen sind, je nach Sensorbestückung sehr unterschiedliche Massen und Gewichte haben können, wie Tab. 6-1 zeigt. MO-

DUS wird im realen Einsatz zum Absetzen und Bergen von Stationen stets in der GEO2-Tiefseeversion mit so genannter Vollausrüstung betrieben, also inkl. Konus und allen Sensorkomponenten. Abweichungen hiervon werden besonders erwähnt. Die Tabelle fasst Einsatzdaten wie Einsatzmonat, Einsatzort, Einsatzzweck und durchschnittliche Umweltparameter wie Windgeschwindigkeit, Wellenhöhe, Wellen/Schiff-Begegnungswinkel (180° =direkt von vorn) und Wassertemperatur an der Oberfläche sowie die Tauchphasen und Messintervalle zusammen.

Zur leichteren Identifikation sind die zugehörigen Abbildungen der Kurvenverläufe vermerkt. Die im Folgenden angegebenen Werte sind circa-Werte; statt der Tauchtiefe (gemessen in dbar) ist die ausgegebene Kabellänge in m (*cable payout*) angegeben, da zwischen beiden Größen stets eine geringe Differenz vorliegt, wie in Abb. 6-14 und Abb. 6-15 zu erkennen ist.

Die untersuchten Tauchgänge zeigen nur einen Ausschnitt aus den bisher mit MODUS durchgeführten Einsätzen. Weitere Absetz- und Bergungsfahrten sowie Einsätze mit einer ferngesteuerten Probenahmerosette erfolgten mit den Projekten GEOSTAR1+2 [19] und BIODEEP [2].

6.2 Auswertung

Bergung der Station GNDT-SN1

Die Lokation liegt ca. 18 sm nordöstlich der ostsizilianischen Hafenstadt Augusta. Die Bergung erfolgte nach ca. achtmonatiger autonomer Arbeit der Station im Auftrag der italienischen Behörde für Seismologie und Vulkanologie (INGV). Die Bodenstation war nicht mit allen verfügbaren Sensoroptionen bestückt, so dass eine relativ geringe Masse von 1433 kg zu tragen war. Der Einsatz erfolgte in schwachem Seegang mit $H_s=0,3$ m bei Wind der Stärke 3 bft. Der Schiffsbug wurde mit Hilfe der dynamischen Positionierung kontinuierlich in die Hauptwind- und Wellenrichtung gestellt, so dass laut Definition ein Wellen-Schiff-Begegnungswinkel von 180° vorlag.

Abb. 6-1 zeigt die Verläufe (die Profile) der Kräfte am oberen und unteren Kabelaufhängepunkt sowie das zugehörige Kabellängenprofil im Zeitbereich für diesen Bergungseinsatz. Das Fieren erfolgt typischerweise in zwei Abschnitten, dem bis auf kleinere Stopps kontinuierlichen Hauptabschnitt bis ca. 50 m über Grund und dem behutsamen Annähern an das Ziel (hier die Station) bei der endgültigen Kabellänge von ca. 2112 m. Das Aufsetzen auf die Station wird durch den ‚Einbruch‘ der Kraftkurven sehr deutlich (Abb. 6-2). In dieser Phase reduziert sich das am A-Rahmen hängende Gewicht um das des Geräteträgers, so dass allein das Gewicht des lose durchhängenden Kabels registriert wird (Relaxphase). Nach der Ankoppelung wird das Kabel gestrafft und der Geräteträger mitsamt der Station vom Boden geliftet. Hierbei wird das Kabel stark gedehnt. Wegen der Überwindung der Bodensaugkräfte und der plötzlichen Reduzierung der maximalen Kabeldehnung beim Abheben vom Boden kommt es zu signifikanten Kraftspitzen, die zum kurzfristigen Aufschwingen des getauchten Systems führen. Die in der Abbildung eingetragene gestrichelte Linie für die vom Hersteller spezifizierte Arbeitslast des hier genutzten *umbilicals* Nr. 03379 (Fa. Rochester, USA) von 89 kN wird vom vorliegenden Lastschrieb (noch) nicht erreicht. Trotz des moderaten Seegangs und der ausgegebenen Kabellänge von ca. 2112 m wird jedoch bereits eine Maximallast von 76 kN protokolliert. Der Sicherheitsspielraum wird also allein bei Ausschöpfen der spezifizierten statischen Einsatzgrenze (Tauchtiefe 4000 m, höchste Nutzlast 30 kN) bereits deutlich verringert.

Die Kraftkurven zeigen bei geringeren Kabellängen und großer angehängter Masse größere Schwingungsamplituden als bei großen Kabellängen und geringen Massen. Dies wird besonders für die Hievphase in Abb. 6-1 sowie für die Tauchgänge mit größerer Tauchtiefe sichtbar.

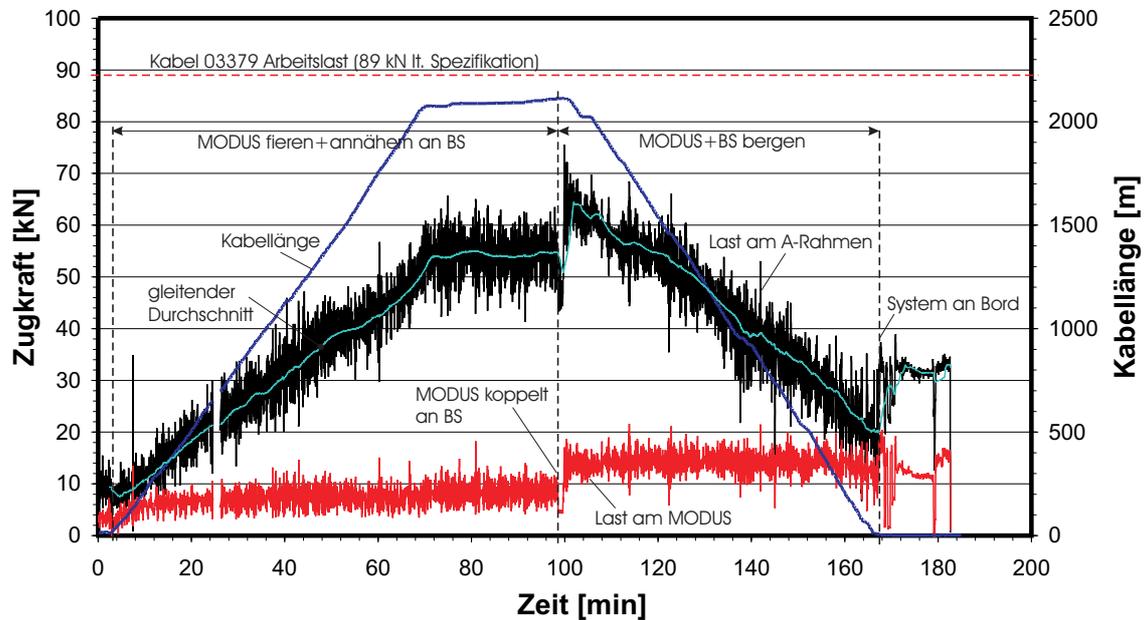


Abb. 6-1: Bergung der Bodenstation GNDT-SN1 mit MODUS: Kraftverläufe am oberen und unteren Aufhängepunkt und Kabellänge; maximale Kabellänge 2112 m; ($m_{MD}=1090$ kg, $m_{BS-GNDT-SN1}=1433$ kg)

Die Korrelation der Kraftverläufe am oberen und unteren Kabelende lässt sich über den Kreuzkorrelationskoeffizienten ($\rho_{X,Y}$) bestimmen. Hierbei wird die Kovarianz der beiden Datensätze (z.B. X und Y) ermittelt und durch das Produkt aus deren Standardabweichungen (σ_X , σ_Y) dividiert,

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad -1 \leq \rho_{X,Y} \leq 1, \quad (61)$$

wobei gilt,

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{n} \sum (X_i - \mu_X)^2 \quad (62)$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{n} \sum (Y_i - \mu_Y)^2$$

Der Extremwert $\rho_{X,Y}=-1$ bedeutet vollständige negative Korrelation, d.h. niedrige Werte des einen Datensatzes hängen exakt mit hohen Werten des anderen zusammen, die Bewegung erfolgt in Gegenphase. Entsprechend bedeutet der positive Extremwert $\rho_{X,Y}=1$ vollständige positive Korrelation, d.h. eine exakte Übereinstimmung zwischen den jeweiligen hohen bzw. jeweiligen niedrigen Ausschlägen der beiden Datensätze, d.h. die Bewegung erfolgt in Phase. Ein Wert von $\rho_{X,Y}=0$ steht für keine Korrelation.

Die Analyse für die Ankoppelphase von MODUS an die Bodenstation zeigt, dass zwischen den Kraftverläufen am oberen und unteren Lastsensor eine hohe positive Korrelation besteht, also eine hohe Übereinstimmung zwischen den Signalphasen der Lastschwingungen am A-Rahmen des Schiffes und der

Schwingungsantwort des getauchten Systems. Dieser hohe Wert wird bei der hier vorliegenden Konfiguration und Kabellänge (2112 m) durch das Anheben der Station sogar noch deutlich verstärkt, wie die Details in Abb. 6-2 zeigen.

Die $\rho_{x,y}$ -Werte für die drei Lastfälle lauten: MODUS vor dem Ankoppeln ($\rho_{x,y}=0,79$), MODUS abgesetzt auf der Station am Boden mit entspanntem Kabel ($\rho_{x,y}=0,89$), und MODUS gekoppelt mit der Bodenstation nach Abheben vom Boden ($\rho_{x,y}=0,97$). Diese große Übereinstimmung der Phasen des oberen und unteren Lastverlaufs ist auch in den Detailvergrößerungen aus Abb. 6-1 in Abb. 6-3 und Abb. 6-4 zu sehen.

Während des Andockens von MODUS an die Bodenstation, also der Relaxphase, lässt sich am unteren Lastsensor weiterhin eine Zugkraft von ca. 4,3 kN registrieren (zwischen ca. Minute 98,5 und 99,5, Abb. 6-2). Dies ist auf das ‚Abkippen‘ der Terminierung des lose durchhängenden *umbilicals* und der durch das Moment erzeugten resultierenden Zugbelastung an der Kabeleinspannung auch in dieser Entlastungsphase zurückzuführen.

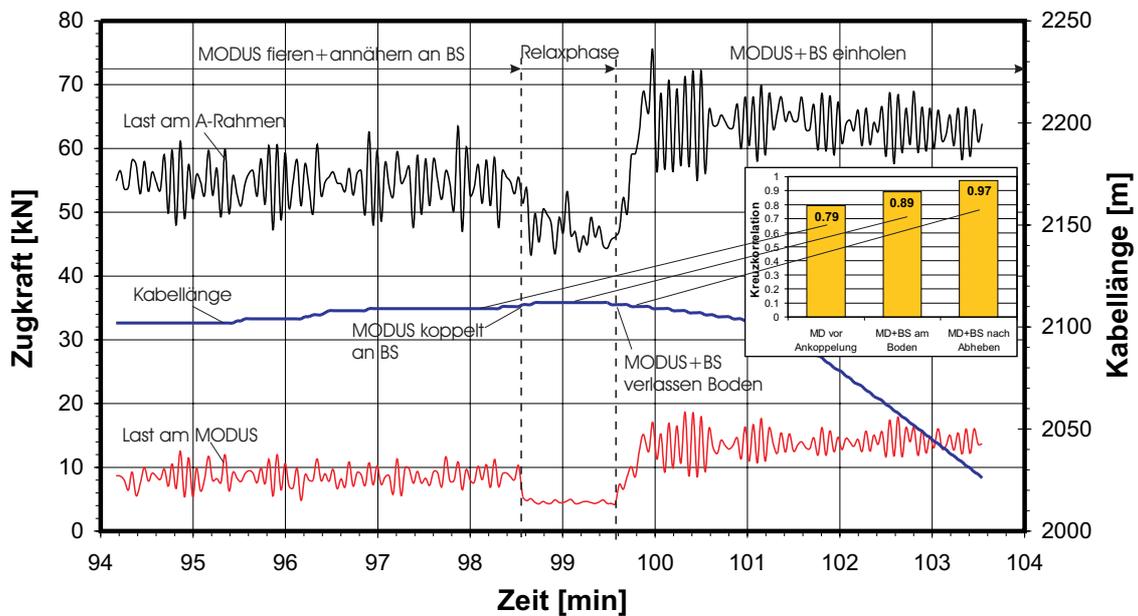


Abb. 6-2: Detail der Kopplungsphase aus Abb. 6-1: Kraftverläufe am oberen und unteren Aufhängepunkt sowie Kabellänge während Annäherung, Ankoppelung und Kabelentspannung sowie Anheben der Bodenstation; tiefster Punkt bei Kabellänge 2112 m

Die Entstehung von *slack*-Situationen, also der kurzfristigen Entlastung des unteren Kabelendes (d.h. $F_{Z,MD}=0$ kN), kann verschiedene Ursachen haben. Als Einsatz bedingte Ursachen sind Änderungen der Drehgeschwindigkeit und besonders Stopps der Windentrommel zu identifizieren.

Im Detail aus Abb. 6-1 ist zwar noch kein *slack* aber doch die Tendenz dorthin zu erkennen (Abb. 6-3). In dem Beispiel wird der Geräteträger konstant mit durchschnittlich 36 m/min gefiert. Die Fierbewegung sorgt für ein stetiges ‚Aufschwimmen‘ auf der Druckblase, die sich vor dem offenen Konus von MODUS ausbildet. Bei geringen Schwankungen der Abwärtsgeschwindigkeit durch z.B. kurzfristige Überlagerung der Vertikalbewegung des Schiffes mit der Fierbewegung kann der Geräteträger ins Taumeln geraten oder das Kabel plötzlich lose fallen, gefolgt von erneuter Kabelstraffung mit anschließender *snap-load*.

Durch abruptes Abstoppen der Winde (zu erkennen am Plateau der Kabellängenkurve) ergibt sich ein kurzfristiger drastischer Kraftanstieg am Kabel. Dies ist beim Fieren zum einen auf den Wegfall der der Abwärtsbewegung entgegen gerichteten Widerstandskraft des Geräteträgers ($F_{d,Fieren}=2426\text{ N}$, s. a. Kapitel 3.2.3) und zum anderen an der weiterhin abwärts schiebenden mitbewegten Wassermasse des Nachstroms zurückzuführen.

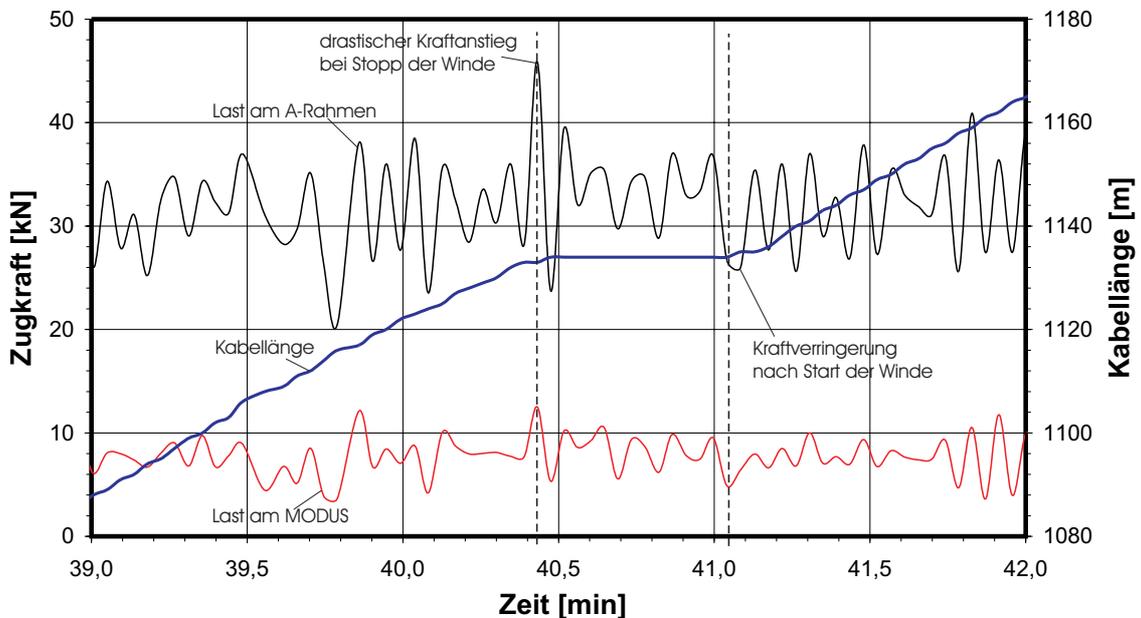


Abb. 6-3: Drastische Änderung der Zugkraft am oberen und unteren Kabelende als Folge von Windenmanövern beim Fieren; Kabellänge bei Stopp ca. 1134 m; ($m_{MD}=1090\text{ kg}$); Detail aus Abb. 6-1

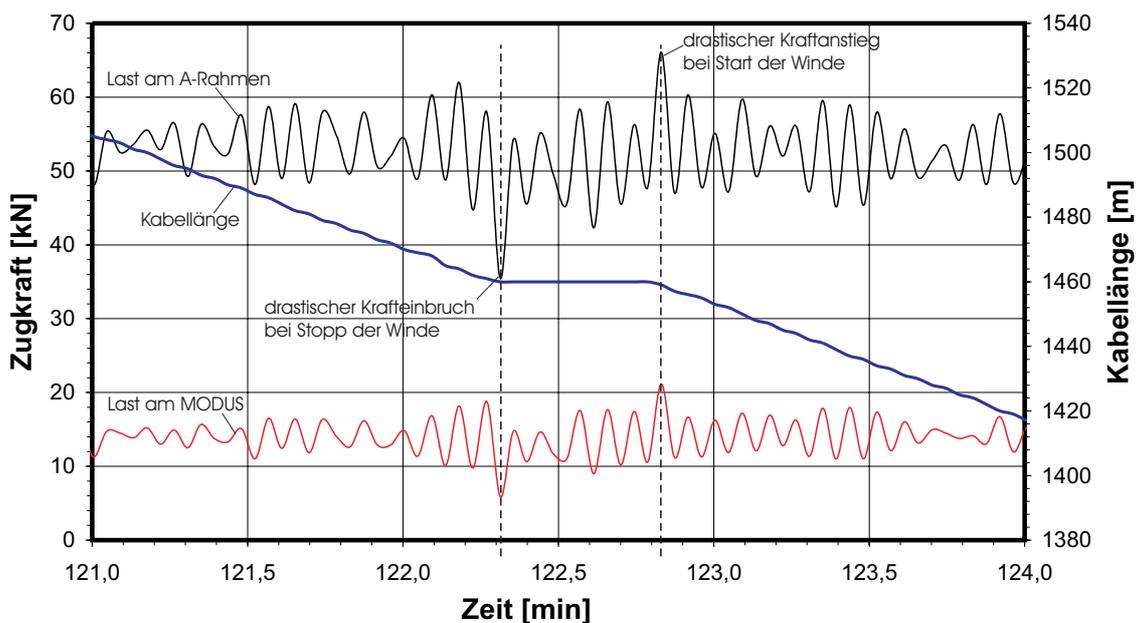


Abb. 6-4: Drastische Änderung der Zugkraft am oberen und unteren Kabelende als Folge von Windenmanövern beim Hieven; Kabellänge bei Stopp ca. 1460 m; ($m_{MD}=1090\text{ kg}$, $m_{BS}=1433\text{ kg}$); Detail aus Abb. 6-1

Das Steigern der Fiergeschwindigkeit kann im Extremfall über das Aufschaukeln zum Umschlagen des Geräteträgers führen, wie in Tankversuchen mit dem Modell in M1:5 sowie bei Versuchen mit dem Prototyp beobachtet werden kann⁹.

Beim Wideranfahen der Winde wird das gegenteilige Phänomen sichtbar, bei dem die Zugkraft zunächst abfällt, um anschließend das ‚normale‘ Lastniveau bei Abwärtsbewegung zu erreichen.

Die Abb. 6-4 zeigt ein vergleichbares Detail aus Abb. 6-1 für den Hievvorgang. Auch hier ist die Tendenz zu *slack* aufgrund eines Windenmanövers zu erkennen, auch wenn noch keine *slack*-Situation vorliegt. In dem Beispiel wird die Winde während des Hievens bei Minute 122,3 plötzlich angehalten, wodurch die der Bewegung entgegen gerichtete geschwindigkeitsabhängige Widerstandskraft des Geräteträgers abrupt entfällt ($F_{d,Hieven}=1746\text{ N}$, s. a. Kapitel 3.2.3), was zum Einbruch der Last am oberen und unteren Kabelende führt. Während der folgenden Haltesituation stellt sich das um die Widerstandskraft verringerte Kraftniveau ein. Das umgekehrte Phänomen ist beim Wideranfahen der Winde zu erkennen, bei dem zunächst der Widerstand und die beschleunigungsabhängige hydrodynamische Masse des Geräteträgers sowie der Einfluss der Kabeldehnung überwunden werden muss, was zu einem kurzfristigen drastischen Kraftanstieg am oberen und unteren Kabelende führt. Die Abbildung zeigt darüber hinaus noch einmal die sehr hohe Übereinstimmung der Phasen der Lastverläufe an A-Rahmen und Geräteträger.

Da vollkommen gleichmäßiges Ab- und Aufspulen des Kabels nicht erreichbar ist, müssen das Kabel und der obere Aufhängepunkt am A-Rahmen die hieraus resultierenden z. T. peitschenartigen Zugkraftstöße (*snap-loads*) verkraften können, die sich von der Einleitungsstelle, hier dem Ort des *slacks* direkt über dem Geräteträger, in Form einer Zugspannungswelle entlang dem Kabel ausbreiten. Die Geschwindigkeit c dieser Welle beträgt

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_K}}, \quad (63)$$

mit dem Elastizitätsmodul E und der Dichte ρ_K des Kabels¹⁰.

Durch Reflexion an den Kabelenden wird die Zugspannung der Welle durch Überlagerung kurzfristig verdoppelt, wodurch es bei Überschreiten der erlaubten Kabelzugkraft zum Bruch des Kabels kommen kann (FEYRER [15]).

Tauchgänge mit MODUS *stand-alone*

Zur Funktionsüberprüfung des Geräteträgers und seiner Komponenten nach längerer Wartung und zur Vorbereitung des Bergungstauchgangs GNDT-SN1 wurde ein Testtauchgang mit MODUS *stand-alone* durchgeführt. Hierbei wurde die Winde beim Fieren alle 250 Kabelmeter gestoppt, so dass für jeweils ca. 3-5 min allein der Einfluss der Schiffsbewegungen auf die Vertikalbewegungen des getauchten Systems ermittelt werden konnte. Maximal ausgegebene Kabellänge war 2250 m, die nach ca. 120 min erreicht wurde (Abb. 6-5).

⁹ Entsprechende ‚Fallversuche‘ wurden während Tests im Projekt GEOSTAR mit dem GEO 1-Prototyp bis in 200 m Wassertiefe durchgeführt. Das strömungsgünstige Ausrichten, d.h. Torkeln und Umschlagen des Geräteträgers konnte durch die Schwankung und plötzliche signifikante Abnahme der Kabellast indirekt gemessen werden.

¹⁰ Bei dem E-Modul des vorliegenden *umbilicals* von ca. $E=4,9 \cdot 10^{10}\text{ N/m}^2$ und der (geschätzten) Kabeldichte von $\rho_K=4500\text{ kg/m}^3$ ergibt sich eine Geschwindigkeit der Zugspannungswelle von $c=3300\text{ m/s}$.

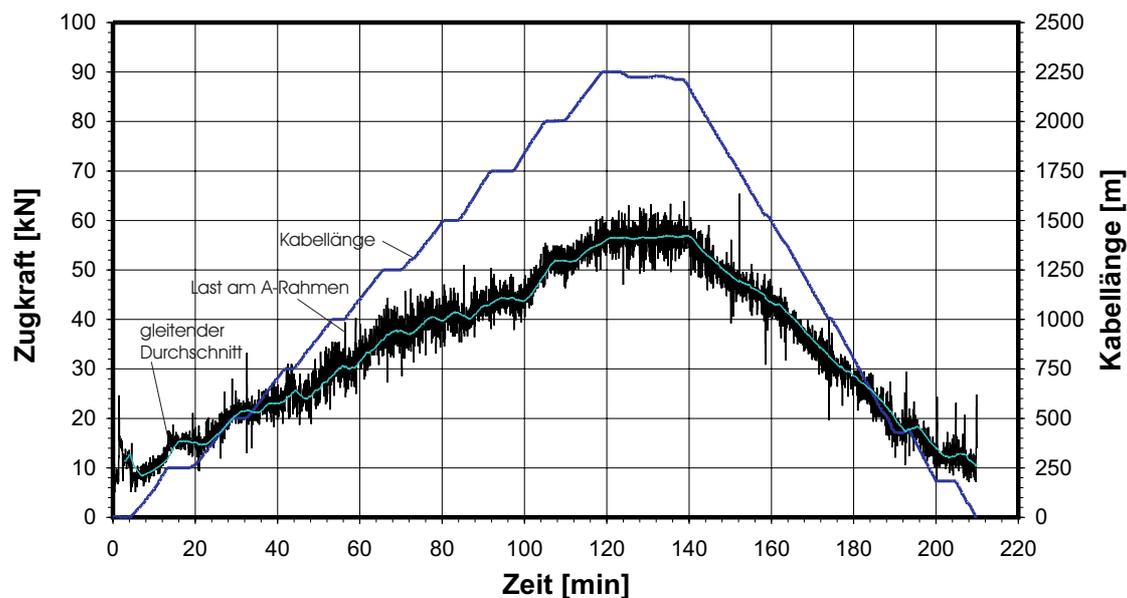


Abb. 6-5: Verläufe für Kraft am oberen Aufhängepunkt und Kabellänge während eines Testtauchgangs mit MODUS mit kurzen Stops alle 250 m während des Fierens; maximale Kabellänge 2250 m; ($m_{MD}=1090$ kg)

Ein Tauchgang im Rahmen des Projektes BIODEEP im östlichen Mittelmeer hatte die Videobegutachtung (*survey*) des Meeresbodens und der dort befindlichen Tiefseebecken zum Ziel (Abb. 6-6).

Zunächst wurde das ROV jedoch 20 min an einer ungünstigen Lokation auf 650 m Kabellänge gefiert und von dort mit dem Schiff bei ca. zwei Knoten Fahrt in 40 min zu einem günstigeren Einsatzgebiet geschleppt. Das dann folgende Absenken brachte den Geräteträger bis in Sichtkontakt zum Meeresboden bei einer Kabellänge von ca. 3400 m. Das anschließende *survey* des abfallenden Bodens reichte bis zu einer Kabellänge von 3505 m. Die Gesamtmasse des Kabels erreichte dabei einen Wert von 7966 kg, das Gewicht lag bei 64050 N. Dies addiert sich mit der Masse von MODUS ($m_{MD}=1090$ kg, Gewicht: $w_{MD}=7350$ N) zur ‚statischen‘ Gesamtmasse am A-Rahmen von 9056 kg. Reduziert um den Auftrieb ergibt sich die statische Gesamtlast am A-Rahmen von ca. 71400 N, was in der Registrierung vom A-Rahmen bestätigt wird.

Details aus Abb. 6-6 stellen die Zugkraftverläufe für Fieren und Hieven des Geräteträgers bei ähnlichen Kabellängen (ca. 1000 m, 1500 m, 2300 m und 3380 m bzw. 3505 m) gegenüber (Abb. 6-7, links Fieren, rechts Hieven). Die unterschiedlichen Zugkraftniveaus verdeutlichen den Einfluss des vertikalen Strömungswiderstandes, der bei Abwärtsbewegung zur Verringerung und beim Hieven zur Vergrößerung der Last am A-Rahmen führt, wie schon bei Abb. 6-3 und Abb. 6-4 beschrieben wurde. Bei vergleichbarer Masse aber geringerer resultierender Vertikallast schwingt der Zugkraftverlauf beim Fieren mit höheren Frequenzen als beim Hieven, wie Tab. 6-2 verdeutlicht.

Tab. 6-2: Frequenzen der Zugkraftschwingungen für Fieren und Hieven bei ähnlichen Kabellängen; MODUS *stand-alone*

Kabellänge [m]	ω - Fieren [rad/s]	ω - Hieven [rad/s]
900 / 1000	1,46 / 1,42	1,29 / -
1500 / 1600	1,36 / 1,39	- / 1,26
2230	1,42	1,34
3340 / 3505	1,33 / -	- / 1,24

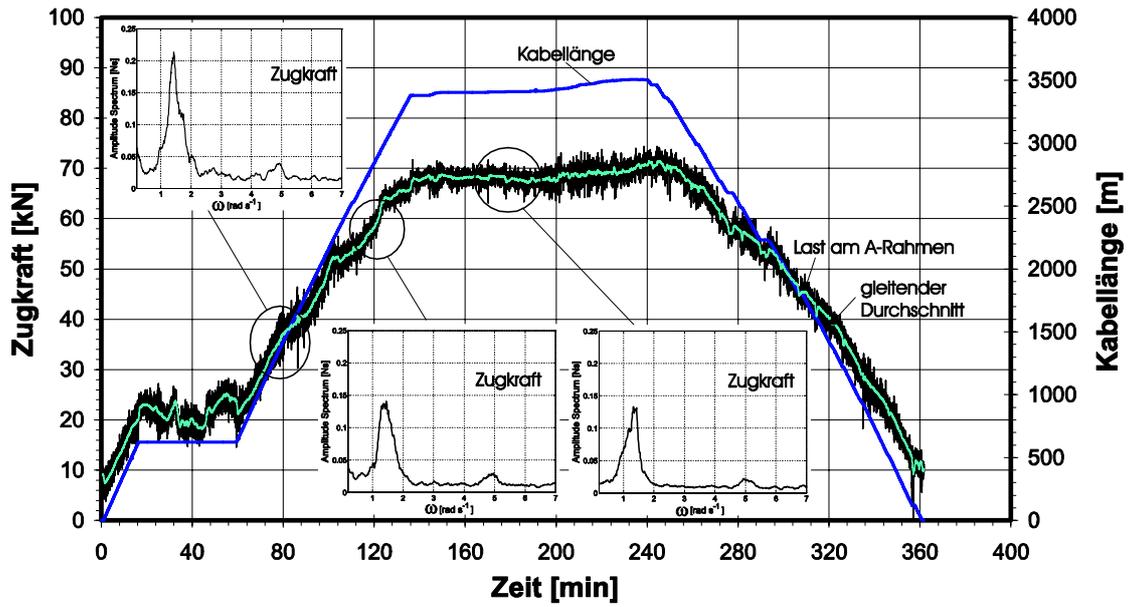


Abb. 6-6: Kraftverlauf am oberen Aufhängepunkt, Kabellänge und beispielhafte Amplitudenspektren für einen Beobachtungstaugang; MODUS *stand-alone*, maximale Kabellänge 3505 m; ($m_{MD}=1090$ kg)

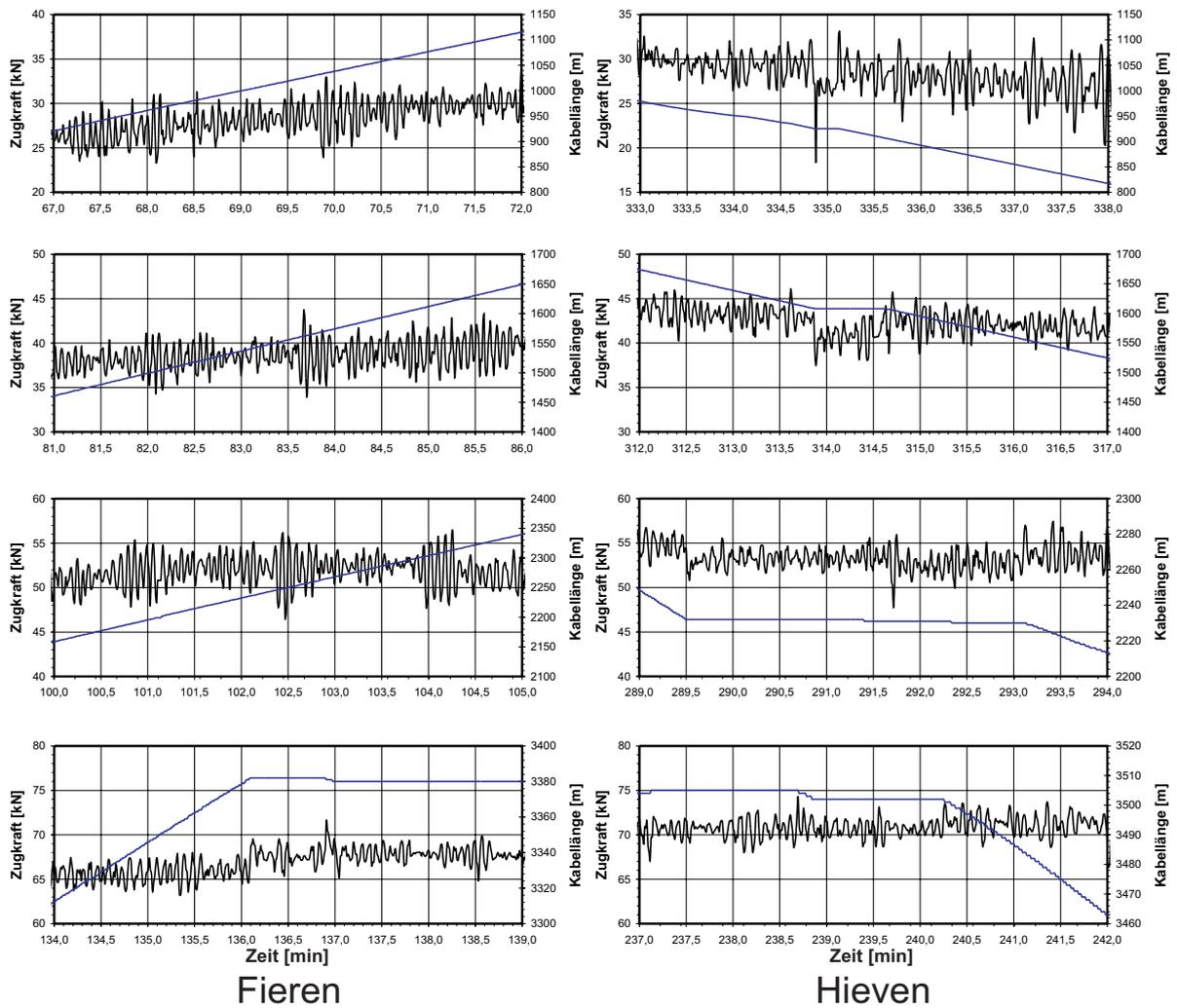


Abb. 6-7: Details zu Abb. 6-6: Zugkräfte am A-Rahmen für ähnliche Kabellängen jeweils für Fieren (links) und Hieven (rechts)

Absetzen der Stationen ORION-N1 und ORION-N2

Im Rahmen des Projektes ORION wurden zwei Bodenstationen unterschiedlicher Ausstattung im Seegebiet des *Marsili-Mountain* Unterwasservulkans¹¹ inmitten des Tyrrhenischen Meeres nördlich Siziliens bei einer Kabellänge von ca. 3400 m abgesetzt.

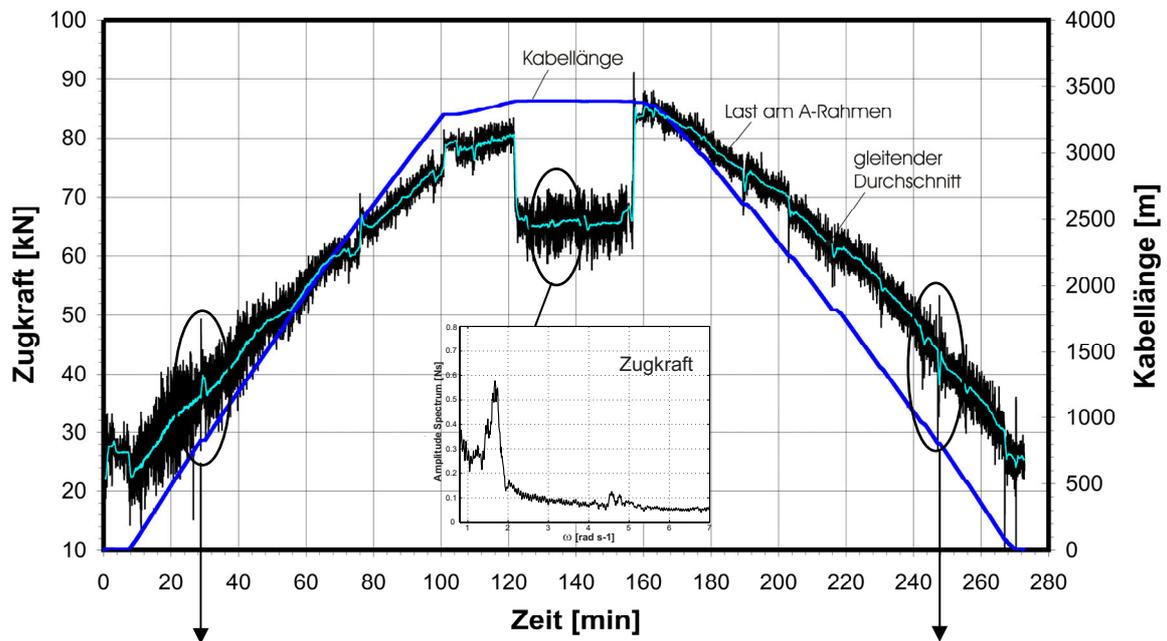


Abb. 6-8: Kraftverlauf am oberen Aufhängepunkt, Kabellänge für das Absetzen, Testen und sofortige Bergen der Station ORION-N1; maximale Kabellänge 3393 m; ($m_{MD}=1090$ kg, $m_{BS-ORION-N1}=2771$ kg)

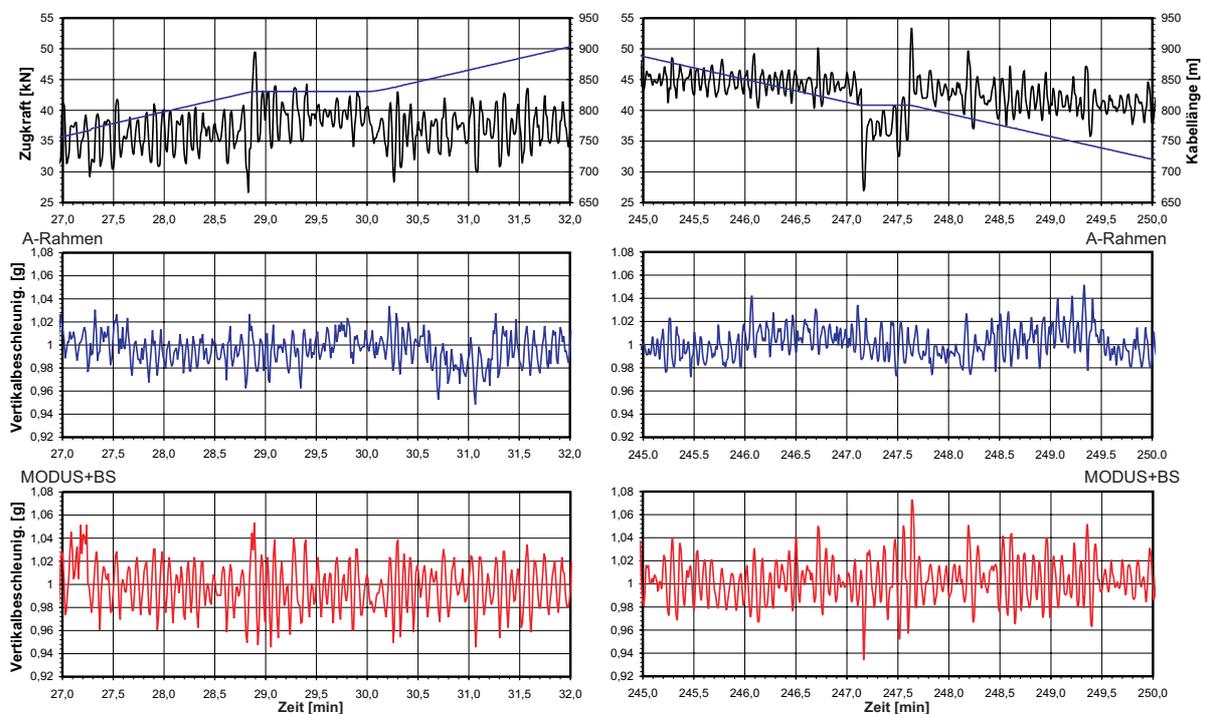


Abb. 6-9: Details zu Abb. 6-8: Zugkraft, Kabellänge und Vertikalbeschleunigungen am A-Rahmen und Vertikalbeschleunigung am MODUS (mit Bodenstation ORION-N1); jeweils für Fieren (links) und Hieven (rechts); Kabellänge um 820 m

¹¹ Der Marsili-Mountain ist ca. 65 km lang und 40 km breit. Die Spitze des über 2900 m hohen Berges endet ca. 500 m unter der Wasseroberfläche. Nach neuesten Erkenntnissen ist dieser größte Europäische Vulkan noch aktiv und wird daher intensiv erforscht.

Die erste Station war die zuvor schon im Projekt GEOSTAR 2 genutzte, hatte also eine Masse von 2771 kg. Aufgrund technischer Probleme mit der Kupplungseinheit am MODUS musste die Station jedoch nach Aufsetzen auf dem Meeresboden sofort wieder geborgen werden, wodurch bereits zu diesem Zeitpunkt Messdaten auch der Bergung der Station erfasst werden konnten (Abb. 6-8).

Ein Blick auf Details dieses vermeintlich missglückten Einsatzes verdeutlicht noch einmal die Auswirkungen plötzlicher Stopps der Winde auf Zugkraft und Vertikalbeschleunigung am A-Rahmen und auf die Vertikalbeschleunigung des Geräteträgers (Abb. 6-9). Hier lassen sich die stark vergrößerten Oszillationsweiten der Vertikalbeschleunigungen am unteren Kabelende gegenüber dem A-Rahmen gut erkennen.

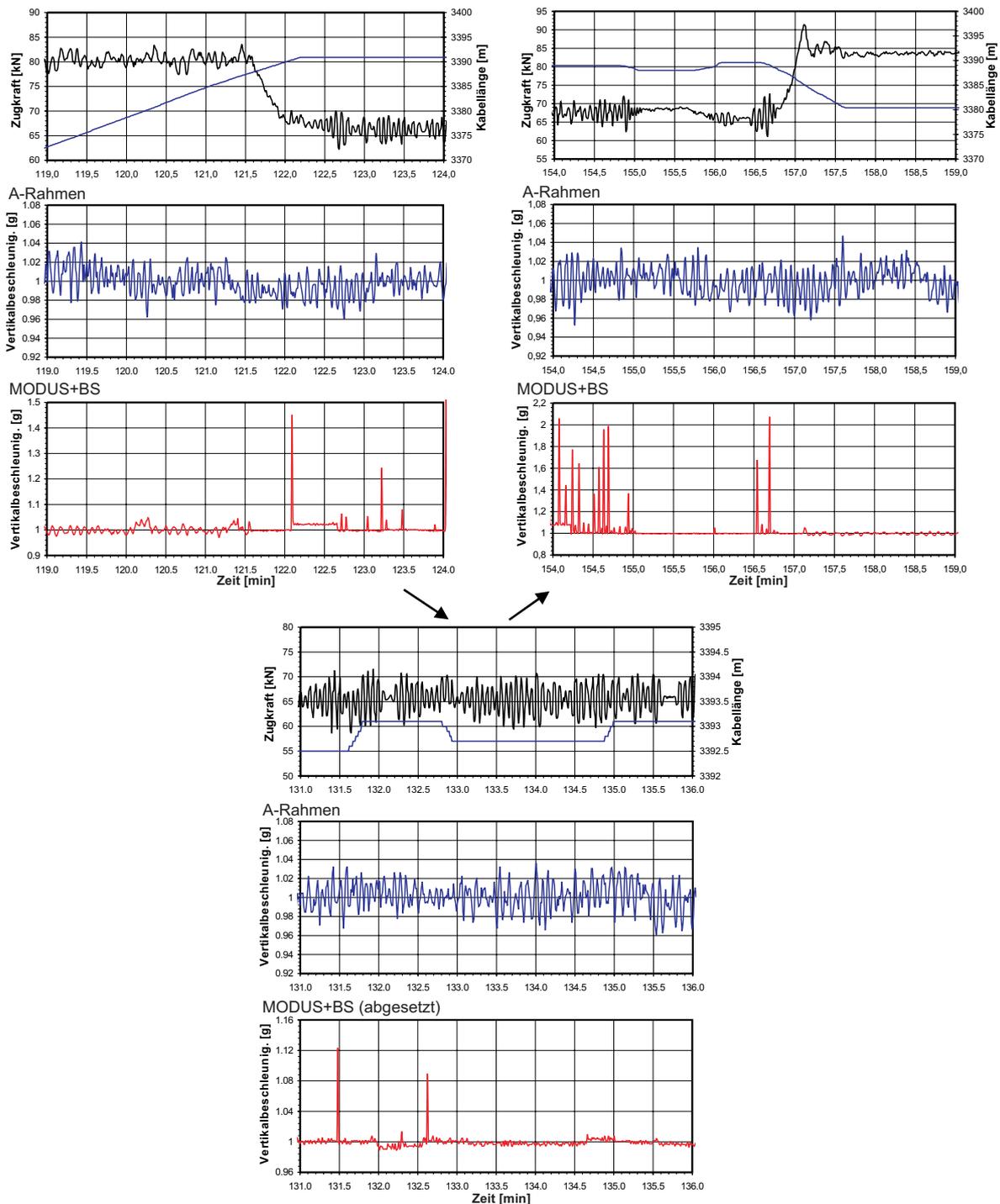


Abb. 6-10: Details zu Abb. 6-8: Zugkraft, Kabellänge und Vertikalbeschleunigung am A-Rahmen und Vertikalbeschleunigung am MODUS für Absetzen (o-links), Kabelntension (unten) und Anheben der Station (o-rechts) (siehe Zeitverlauf)

Nach Austausch des schadhaften Linearaktuators des Kupplungsmechanismus konnte der zweite Absetzversuch erfolgreich beendet werden (Abb. 6-11), und auch die zweite Station (ORION-N2) konnte noch am gleichen Tag in wenigen Kilometern Entfernung zu ORION-N1 abgesetzt werden (Abb. 6-12).

Die in Abb. 6-11 eingefügten Amplitudenspektren für drei ausgewählte Einsatzphasen und ähnliche Kabellänge bestätigen mit deutlichen Frequenzunterschieden eindrucksvoll den Einfluss der differierenden Gesamtmasse beim Fieren mit MODUS+BS (größte Masse (ca. 6.000 kg) – kleinste Resonanzfrequenz (ca. 0,85 rad/s)), Aufsetzen am Boden (Kabelentspannung: kleinste Masse (ca. 2600 kg) – größte Resonanzfrequenz (1,70 rad/s)) und Hieven nur mit MODUS (mittlere Masse (ca. 3200 kg) und Resonanzfrequenz (1,05 rad/s)). Weitere Ergebnisdaten hierzu sind Tab. 7-1 zu entnehmen.

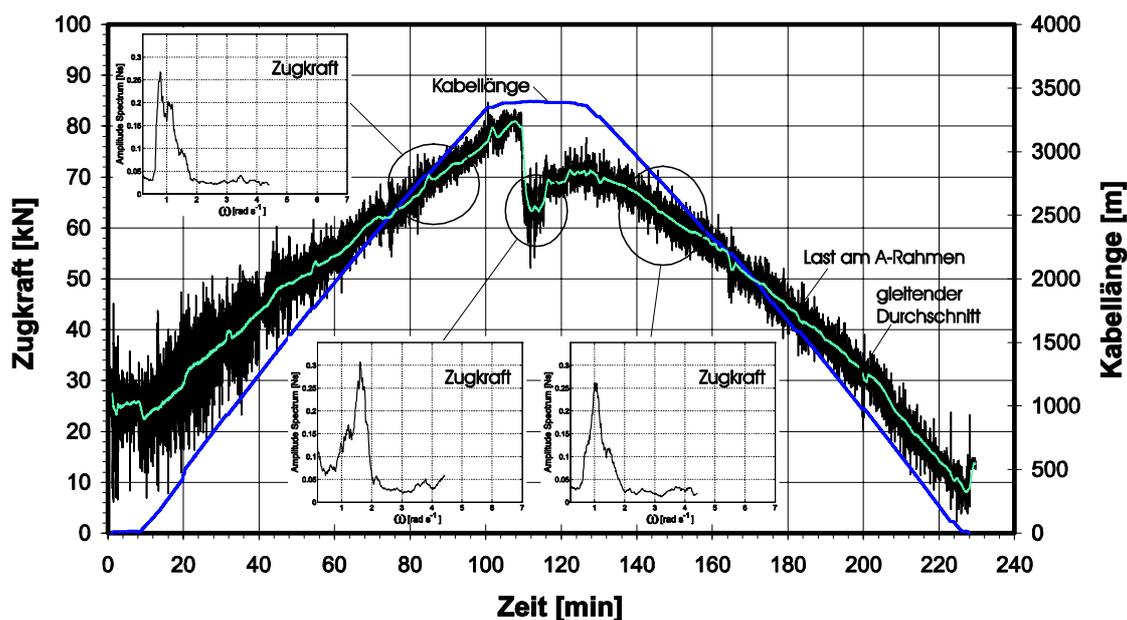


Abb. 6-11: Kraftverlauf am oberen Aufhängepunkt, Kabellänge und beispielhafte Amplitudenspektren für das Absetzen der Station ORION-N1; maximale Kabellänge 3396 m; ($m_{MD}=1090$ kg, $m_{BS-ORION-N1}=2771$ kg)

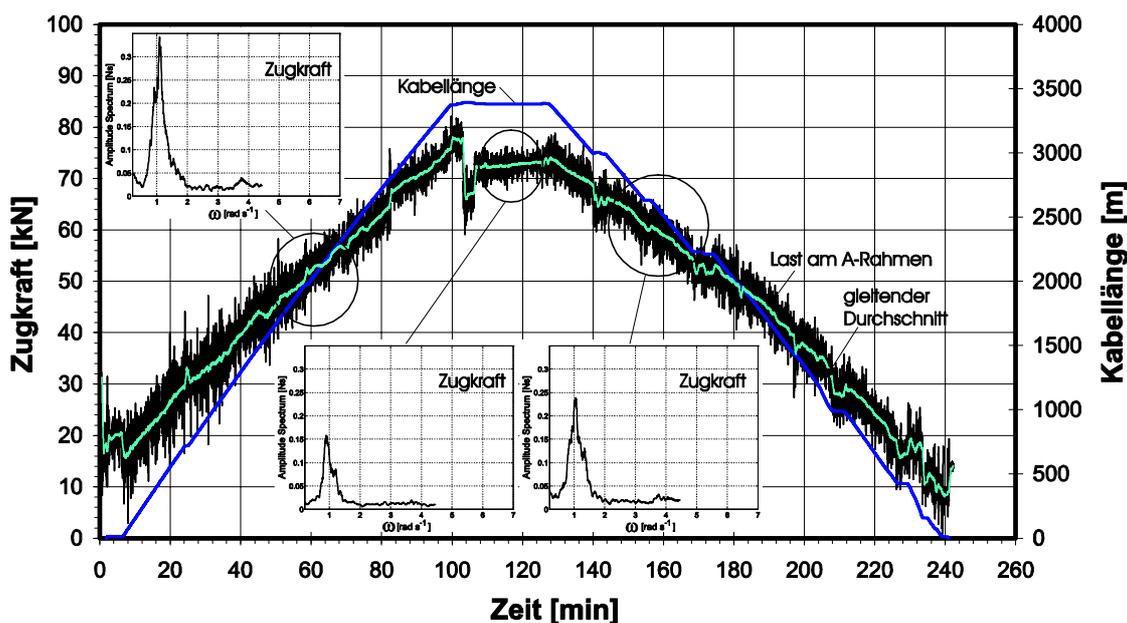


Abb. 6-12: Kraftverlauf am oberen Aufhängepunkt, Kabellänge und beispielhafte Amplitudenspektren für das Absetzen der Station ORION-N2; maximale Kabellänge 3450 m; ($m_{MD}=1090$ kg, $m_{BS-ORION-N2}=1657$ kg)

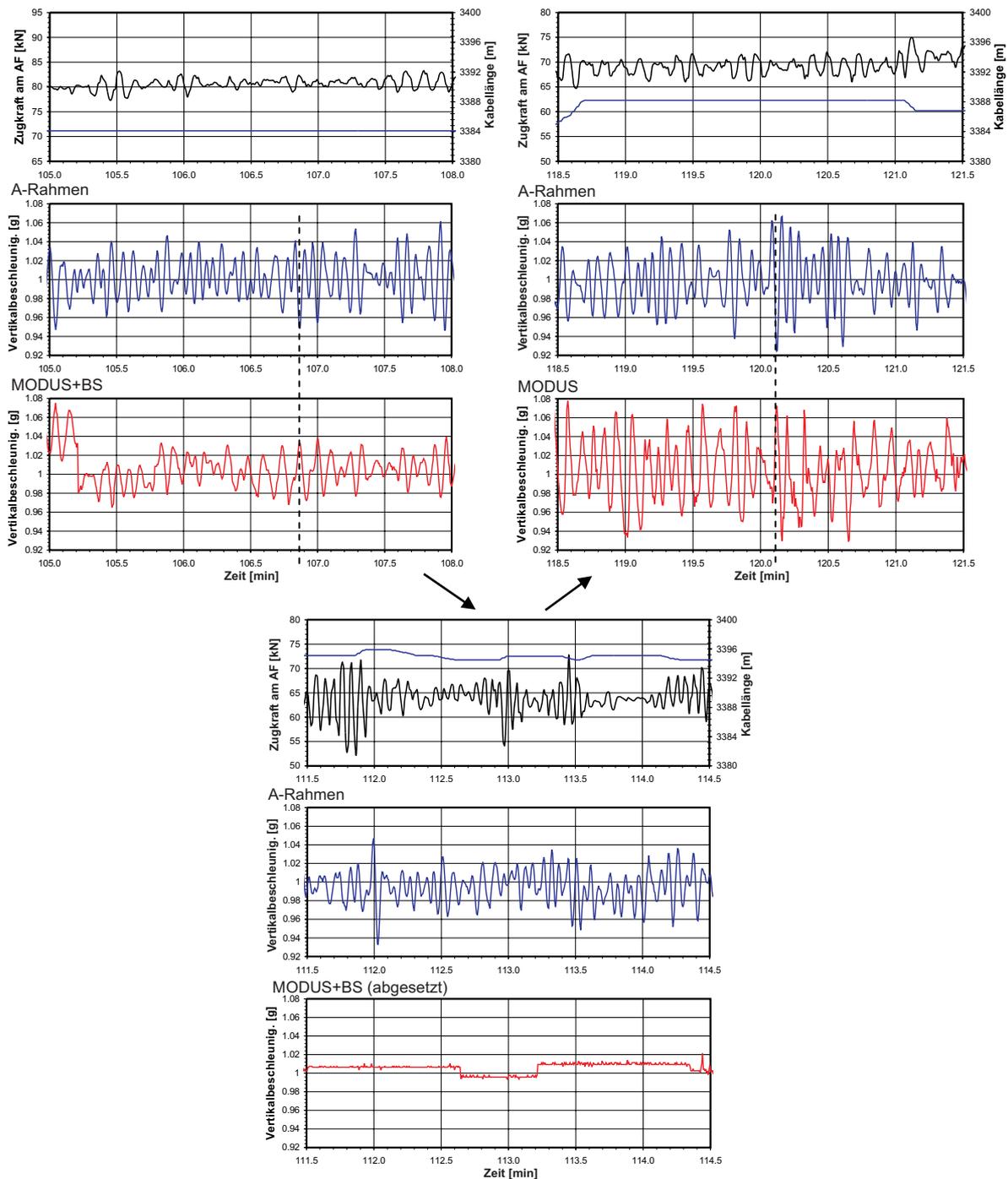


Abb. 6-13: Details zu Abb. 6-11: Zugkraft, Kabellänge und Vertikalbeschleunigung am A-Rahmen und Vertikalbeschleunigung am MODUS für die Phasen kurz vor Absetzen der Station (oben links), Kabelentspannung (unten) und kurz nach Anheben von MODUS (oben rechts); gestrichelte Linien zeigen Bewegungen in Gegenphase

Die Detailvergrößerungen der Registrierungen der Abb. 6-8 und Abb. 6-11 für unterschiedliche Tauchphasen aber ähnliche Kabelängen verdeutlichen die Wechselbeziehungen zwischen Kraftverläufen und Vertikalbeschleunigungen am oberen und unteren Kabelende. Während im Besonderen am Meeresboden das Aufsetzen und das Abheben der Strukturen zu drastischen Vertikalstößen und Vertikalbeschleunigungen am unteren Kabelende führen (Abb. 6-10), verstärken sich die Oszillationsweiten der Messwerte ebenfalls signifikant durch Reduzierung der Masse durch das Abkoppeln der Nutzlast (hier der Bodenstation), wie in Abb. 6-13 (oben rechts) zu sehen ist. Besonders die Situationen mit abgesetztem Geräteträger

und Kabelentspannung zeichnen sich durch vergleichsweise starke Oszillationen der Zugkräfte mit verringerten Vertikalbeschleunigungen am A-Rahmen auf.

In Abb. 6-13 ist die schon in Kapitel 2.4.2 beschriebene Bewegung in Gegenphase von A-Rahmen und Geräteträger bei Überschreitung der last- und kabellängenspezifischen Resonanzfrequenz gut zu erkennen (siehe z.B. die gestrichelten Markierungen).

6.3 Bemerkungen zur Tiefenmessung

Die Messung dynamischer Einsatzgrößen unterliegt wie alle Messungen systematischen und zufälligen Fehlern, die zusammen die Messunsicherheit ergeben (DUBBEL [12]):

$$\text{Messergebnis} = \text{Messwert} + \text{Messunsicherheit}$$

Grundsätzlich beruhen systematische Fehler auf der Unvollkommenheit der Maßverkörperung, der Messgeräte, der Messverfahren und des Messobjektes, und lassen sich prinzipiell durch Korrekturen, wie z. B. die hier vorgenommene Temperaturkompensation bei den Beschleunigungssensoren, ausgleichen. Die zufälligen Fehler werden dagegen von Änderungen der Maßverkörperung, der Messgeräte, der Messverfahren, des Messgegenstandes und der Umwelt sowie von temporären Einflüssen der Beobachter hervorgerufen, die während der Messung nicht erfassbar sind und somit prinzipiell nicht korrigierbar sind. Letztere können aufgrund der regellosen Schwankungen durch Bestimmung der Standardabweichungen durch Stichproben abgeschätzt und durch Fehlerberechnungen und -filterungen eingegrenzt werden.

Das hier vorliegende Messsystem nutzt zahlreiche Sensoren, die auf unterschiedlichen Messprinzipien, Auflösungen und Messfrequenzen beruhen (Tab. 4-1). Betrachtet man beispielhaft die Bestimmung der erreichten Tauchtiefe des Geräteträgers, so stößt man auf Fehler, die aus der prozentual von der Tauchtiefe abhängenden Genauigkeit (relativer Fehler) des Messwertes der verwendeten Sensoren resultieren. So hat der eingesetzte Absolutdrucksensor im Temperaturbereich von 10-40°C bis zu einem Druck von 400 bar einen relativen Fehler von $\pm 0,05\%$ der Tiefe in *full-scale* (FS - siehe das Datenblatt des Drucksensors im Anhang). Bei angezeigter Tauchtiefe von z.B. 3400 m ist daher mit einer Abweichung von $3400 \text{ m} * (\pm 0.0005) = \pm 1,7 \text{ m}$ zu rechnen.¹² Ein anderes Problem liegt bei der Längenmessung an der Umlenkrolle vor. Hier wird reines Abrollen des Kabels vorausgesetzt, prinzipiell muss jedoch von geringfügigem Schlupf des gut geschmierten Kabels in der Rollennut ausgegangen werden.

Die Abb. 6-14 und Abb. 6-15 zeigen die prozentualen Abweichungen der Tiefenmesswerte für den Drucksensor am Geräteträger und den Kabellängensensor am A-Rahmen jeweils für Fieren und Hieven. Während erstere Abbildung den Einsatz von MODUS *stand-alone* in beide Richtungen beschreibt, zeigt letztere den Einsatz von MODUS *stand-alone* beim Fieren und beim Hieven nach Aufnahme einer Station am Meeresboden. Für beide Szenarien ergibt sich für die untersuchten Einsatz Tiefen eine Reduzierung der Sensordatenabweichung mit ansteigender Kabellänge, wie auch die Ausschnittsvergrößerungen für die unteren Umkehrpunkte zwischen Fieren und Hieven verdeutlichen. Es zeigt sich die lastabhängige Dehnung Δl des *umbilicals*, die zur Vergrößerung der Tiefe, also des Druckes, auch ohne Kabelzugabe am A-Rahmen führt. Die Dehnung ε eines einaxial gezogenen Kabels setzt sich aus einem stationären und einem instationären, dynamischen Anteil zusammen, $\varepsilon = \varepsilon_{\text{stat}} + \varepsilon_{\text{dyn}}$,

¹² Bei Erweiterung des Temperaturbereiches auf -10-80°C halbiert sich bereits die zu erwartende Genauigkeit auf 0,1 % FS.

$$\varepsilon_{stat} = \frac{F_{stat}}{EA}, \quad \varepsilon_{dyn} = \frac{F_{dyn}}{EA}, \quad (64)$$

mit der stationären Kabelzugkraft F_{stat} und der dynamischen Kabelzugkraft F_{dyn} , der Kabellänge l und der Dehnsteifigkeit EA . Über das Hookesche Gesetz lässt sich die stationäre Dehnung Δl des Kabels bestimmen,

$$\Delta l = \frac{F_{stat} l}{EA}, \quad (65)$$

die sich also bereits im stationären Fall linear mit zunehmendem Kabeleigengewicht und der Kabellänge erhöht. Die Mittelwerte der Kurven für die Sensordatendifferenzen werden sich daher mit wachsender Einsatztiefe in den positiven Wertebereich hinein entwickeln, also hin zu überproportionalem Druckanstieg.

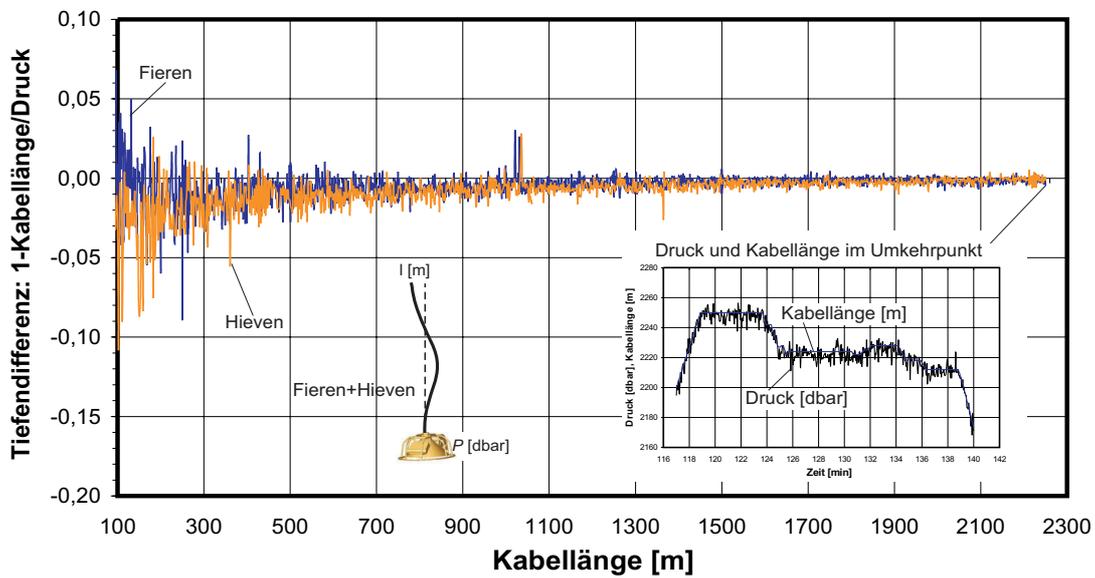


Abb. 6-14: Prozentuale Abweichung der Sensordaten für Kabellänge und Absolutdruck für einen Tauchgang mit MODUS *stand-alone* (nach Abb. 6-5), maximale Kabellänge 2250 m, $m_{MD}=1090$ kg

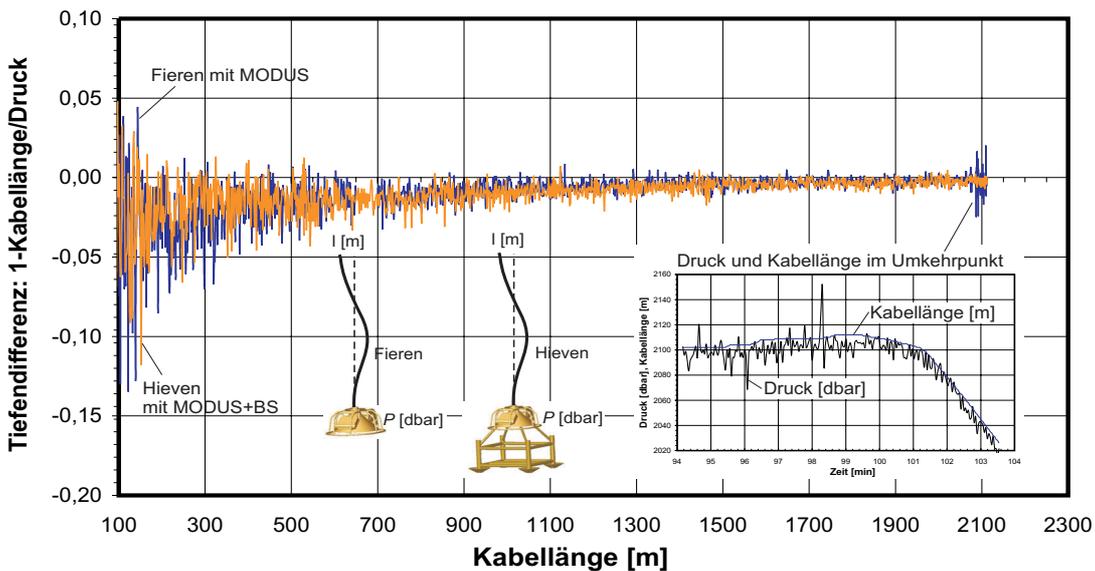


Abb. 6-15: Prozentuale Abweichung der Sensordaten für Kabellänge und Absolutdruck für einen Bergungstauchgang (nach Abb. 6-1), max. Kabellänge 2110 m. Fieren: MD allein, Hieven: MD+BS, ($m_{MD}=1090$ kg, $m_{BS-GNDT-SN1}=1433$ kg)

7 Validationen

7.1 Vergleich von Messung und Simulation

Die Kurven in Abb. 7-1 zeigen die Gegenüberstellung der resultierenden Übertragungsfunktionen für Tauchen aus Messergebnissen von Schwingversuchen im Versuchstank und aus Simulationsergebnissen. Analysiert werden Vertikalschwingungen mit 1060 m Kabellänge und angehängtem MODUS bzw. MODUS und Bodenstation.

Bei den Kurven für MODUS ist eine gute Übereinstimmung der Resonanzfrequenzen und der zugehörigen maximalen RAO-Werte (ca. 2,17) zu erkennen. Deutliche Abweichungen treten dagegen im abfallenden Kurvenstück für höhere Frequenzen auf. Hier ermittelt die Berechnung deutlich geringere Dämpfungswerte als die Messung. Sehr gute Übereinstimmung liegt dagegen im ansteigenden Kurvenstück bis zur Resonanzfrequenz von ca. $\omega_R=1,89$ rad/s vor (vgl. Abb. 5-9).

Die Ergebnisse für MD+BS zeigen ein ähnliches Bild, hier nur zu kleineren Frequenzen und RAO-Werten (ca. 2,05) verschoben. Wie schon zuvor zeigt die Kurve der Messwerte einen steileren Verlauf als die der Simulationsergebnisse, wobei die größten Abweichungen, wie schon bei MD *stand-alone*, besonders im Bereich höherer Frequenzen zu finden sind, also jenseits der Resonanzfrequenz von ca. $\omega_R=1,44$ rad/s.

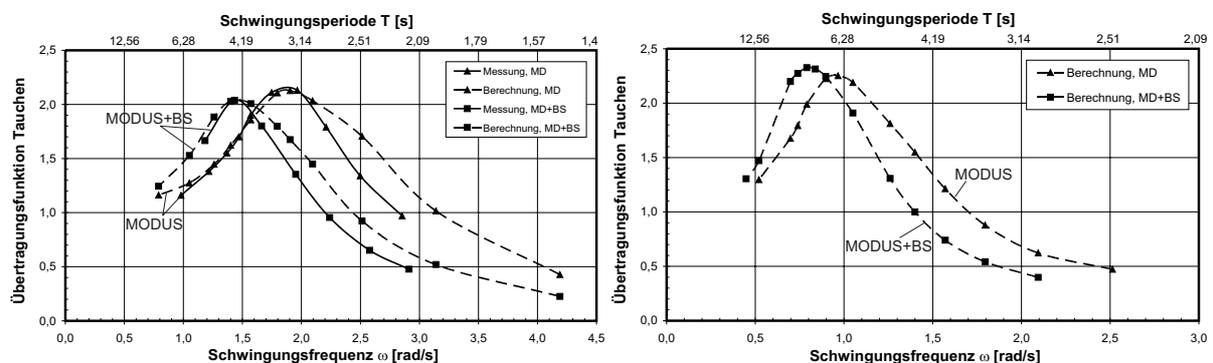


Abb. 7-1: Messergebnisse aus Tankversuchen und Simulationsergebnisse für Übertragungsfunktionen für Tauchen für MODUS (MD) und MODUS+Bodenstation (MD+BS), Kabellänge ca. 1060 m

Abb. 7-2: Simulationsergebnisse für Übertragungsfunktionen für Tauchen für MODUS (MD) und MODUS+Bodenstation (MD+BS), Kabellänge ca. 3400 m

Die Verlängerung des Kabels bewirkt eine Erhöhung der Masse des schwingenden Systems, was zur Verringerung der Resonanzfrequenz der Übertragungsfunktion der Vertikalbewegung führt. Die Simulationsergebnisse in Abb. 7-2 für MODUS bzw. MODUS plus Station für die Kabellänge von 3400 m entsprechen weitgehend den Erwartungen, denn gegenüber den Kurven für 1060 m Kabellänge liegt hier die Resonanzfrequenz für MODUS bei ca. $\omega_R=0,96$ rad/s und für MODUS plus BS bei ca. $\omega_R=0,79$ rad/s.

Diese Resonanzfrequenzen sind in Tab. 7-1 zusammen mit analytisch bestimmten Werten und Ergebnissen gemessener Amplitudenspektren der Zugkraft aus Abb. 6-8, Abb. 6-11 und Abb. 6-12, sowie ent-

sprechenden Simulationsergebnissen aufgetragen. Die Daten geben Auskunft über Resonanzfrequenzen beispielhafter Tauchkonfigurationen und Kabellängen.

Die nahezu identischen Ergebnisse für die analytischen Abschätzungen und die Messungen geben Hinweis auf die tatsächlich geringen nichtlinearen Einflüsse bei den untersuchten Einsätzen. Demgegenüber verdeutlichen die guten Übereinstimmungen der Simulationen mit den analytischen Werten und den Messwerten eine sehr zufrieden stellende Modellierung der Realität im Simulationsprogramm.

Tab. 7-1: Resonanzfrequenzen: Analytische Abschätzungen, Messdaten und Simulationsergebnisse

Belastungsfall	Kabellänge	ω_R Abschätzung	ω_R Messung (Amplitudenspektren)	ω_R Simulation	s. a. Grafik
-	[m]	[rad/s]	[rad/s]	[rad/s]	-
MD	1060	1,82	-	1,84	-
MD	2750	1,04	1,05	1,05	Abb. 6-11
MD	3400	0,91	0,91	0,96	Abb. 6-12
MD+BS	1060	1,49	-	1,43	-
MD+BS	2000	1,1	1,1	1,09	Abb. 6-12
MD+BS	2800	0,86	(0,85)*	0,84	Abb. 6-11
MD+BS	3400	0,77	-	0,79	Abb. 3-2
Kabel solo	3400	1,68	1,67	1,71	Abb. 6-8, Abb. 6-11
* Hier liegt kein exakt zu bestimmender Wert vor, siehe Grafik					

7.2 Einfluss des Begegnungswinkels von Wellen und Schiff

Jedem Schiff sind spezifische Übertragungsfunktionen eigen, abhängig u. a. von den sechs Bewegungsfreiheitsgraden und dem jeweiligen Wellen-Schiff-Begegnungswinkel. Aus der Untersuchung beispielhafter Konfigurationen lassen sich weit reichende Erkenntnisse für unterschiedliche Betriebsbedingungen ableiten. Ein Beispiel ist die denkbare Verschiebung des oberen Aufhängepunktes des Kabels (*suspension point*) z.B. vom Heck zum Hauptspant, also in den Bereich der Drehachse für das Stampfen. In diesem Bereich befindet sich häufig ein seitlicher A-Rahmen oder aber – bei Spezialschiffen der Offshoretechnik - ein mittschiffs gelegener *moonpool*.

Die für den *moonpool* geltenden Simulationen berücksichtigen, wegen der hier bedeutungslosen Stampfbewegung, allein Anteile der vertikalen Schiffsbewegung in Form der entsprechenden Übertragungsfunktionen für Tauchen (s_{33}), bzw. beim seitlich angeströmten Schiff für Tauchen und Rollen ($s_{33}+s_{44}$).

Die Auswirkungen auf die resultierenden Vertikalbewegungen für die drei oben genannten Einsatzkonfigurationen werden mit Simulationen näher betrachtet. Die Abb. 7-3 (a-c) zeigen Ergebnisse für das F/S URANIA in See von vorn sowie in seitlicher See, jeweils für MODUS mit und ohne Bodenstation und Arbeit vom Heck bzw. durch einen *moonpool*.

Da die Bodenstationen beliebig modular ausgerüstet werden können, wird hier beispielhaft die im Projekt ORION genutzte Station mit einer Masse von 2771 kg (plus eingeschlossener Wassermasse von ca. 150 kg) und einem Gewicht in Seewasser von 13479 N untersucht. Der Geräteträger MODUS hat eine

Masse von 1090 kg plus ca. 100 kg vom MODUS-Rahmen eingeschlossener Wassermasse; sein Gewicht beträgt ca. 7350 N. Die Wassertiefe wird beispielhaft auf 3400 m gesetzt.

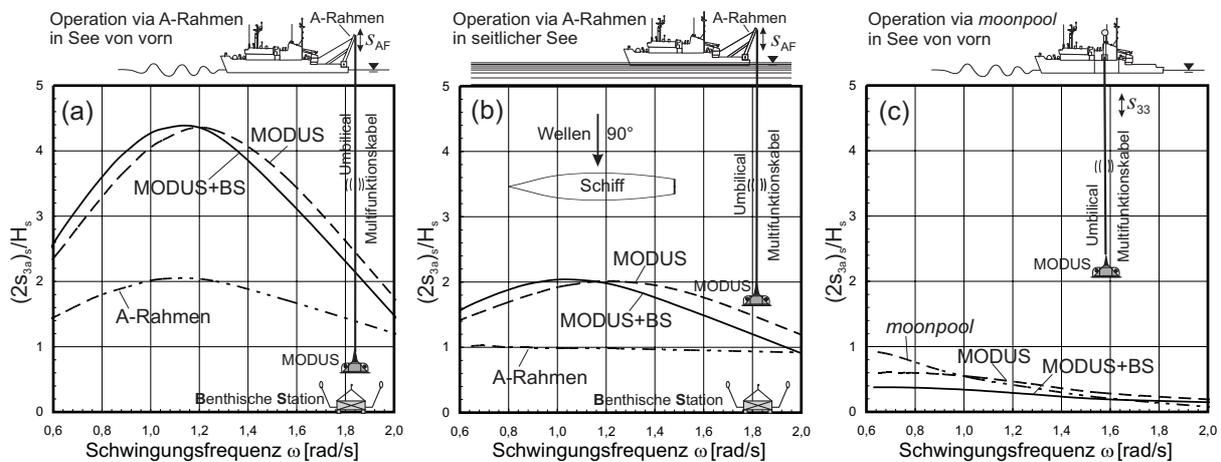


Abb. 7-3: Einfluss des Wellen-Schiff-Begegnungswinkels auf die signifikante Vertikalbewegung bezogen auf die signifikante Wellenhöhe für das *umbilical*, MODUS und MODUS+Bodenstation: für a) Seegang von vorn, b) seitlichen Seegang und c) Seegang von vorn und Arbeit durch einen *moonpool* (vgl. CLAUSS et al.[6])

Die signifikante Wellenhöhe $H_s = 1,0$ m der Anregung führt je nach Einsatzvariante zu signifikant erhöhten Doppelamplituden der Vertikalbewegungen des A-Rahmens, bzw. der getauchten Systeme MODUS und MODUS plus Station:

Fall a) zeigt den ‚Standardfall‘ mit Seegang von vorn, also einem Wellen-Schiff-Begegnungswinkel von 180° . Durch die achterliche Position des A-Rahmens ergeben sich maximale, von der Stampfbewegung des Schiffes dominierte RAO-Werte an Schwingungsfrequenzen, die mit zunehmender angehängter Last abnehmen. Die Verstärkung der Eingangsbewegung liegt hier bei einem Wert von gut 2 für den A-Rahmen bei der Resonanzfrequenz $\omega_R = 1,1$ rad/s und reicht bis zu $RAO = 4,4$ bei MODUS ($\omega_R = 1,2$ rad/s) bzw. MODUS plus Station ($\omega_R = 1,14$ rad/s).

Fall b) zeigt das Ergebnis für seitlichen Seegang, also den Begegnungswinkel 90° . Hier spielen Stampfbewegungen eine untergeordnete Rolle, dominierend sind Roll- und Tauchbewegungen. Durch den kürzeren Hebelarm (halbe Schiffsbreite) entspricht die Antwortdoppelamplitude des A-Rahmens mit einer Verstärkung von ca. 1 der Anregung. Auch die Antwortdoppelamplituden für die getauchten Systeme zeigen mit jeweils $RAO = 2$ deutlich kleinere Werte als im Fall a). Die zugehörigen Resonanzfrequenzen liegen für MODUS bei ca. $\omega_R = 1,25$ rad/s und MODUS plus Station bei ca. $\omega_R = 1,05$ rad/s.

Im Fall c) wird der *suspension point* gedanklich in den Schwerpunkt des Schiffes verlegt, wie dies bei Betrieb über einen *moonpool* im Idealfall zutrifft. Selbst bei Seegang von vorn (180°) können die Stampf- und Rollbewegungen in Bezug auf die Vertikalbewegungen vernachlässigt werden. Die Kurve für die Übertragungsfunktion der Tauchbewegung ist nochmals flacher als in den Fällen a) und b), so dass auch die resultierenden Antwortdoppelamplituden der Vertikalbewegungen von A-Rahmen, MODUS bzw. MODUS+Bodenstation deutlich unterhalb der Anregung von 1 m liegen. Die Bewegungen sind so stark gedämpft, dass von Kriechfällen ohne diskrete Resonanzfrequenzen gesprochen werden kann.

7.3 Ableitungen für den Entwurf aktiver Seegangskompensationseinrichtungen

Anlagen zur Seegangskompensation dienen der Reduzierung der Variation (der Schwingungsweite) der hydrodynamischen Kräfte auf den Geräteträger bzw. die Nutzlast. Besonders das Durchbrechen der Wasseroberfläche stellt eine kritische Belastung auf das kabelgebundene System dar, wie auch in dieser Arbeit durch Versuche gezeigt wird. Aber auch das Landen von Strukturen in großen Wassertiefen auf dem Meeresboden bedeutet eine enorme Belastung für das Kabelmanagement am Schiff. Hauptlastanteile resultieren aus der Froude-Krylov-Kraft (im oberflächennahen Bereich), der Druckkraft beim Eintauchen in die Wasseroberfläche (*slamming load*), sowie der hydrodynamischen Masse und der Reibungskraft des Körpers während des gesamten Tauchgangs.

Der Einsatz von Seegangskompensatoren ist in der Offshore Öl- und Gasindustrie an Bord von Bohr- und Förderanlagen, bei der Installation von Komponenten zur Unterwasserproduktion und auch beim Betrieb von käfiggebundenen ROVs tägliches Geschäft. Unterschieden werden aktive und passive Systeme. Die ersteren variieren aktiv die Kabellänge durch z.B. hydraulisch betätigte Kabelstraffer oder geeignete Windentrommelbewegungen. Die letzteren beziehen die vertikalen Feder-Dämpfer-Eigenschaften der getauchten Struktur und des Kabels in die Hiev-Kompensation mit ein.

Für den Einsatz speziell mit *moonpools* schlägt ein neuerer Ansatz die Synchronisation der Vertikalbewegungen der Nutzlastmodule mit den Wellenamplituden bei Durchbrechen der Wasseroberfläche vor (SAGATUN et. al. [49]). Hierbei wird die Wellenerhebung im *moonpool* kontinuierlich durch einen ‚vorausschauenden‘ (*feed-forward*) Regelalgorithmus erfasst, und zur Synchronisation der Steuerung des Windenmotors mit der Wellenamplitude genutzt. Signifikante Vorteile gegenüber herkömmlichen Systemen entstehen durch Kombination von aktiven Seegangskompensatoren und Wellen-Synchronisation der Winde, so dass Reduzierungen der Kabelspannungs-Variation je nach Seegang und Art der getauchten Struktur von über 50 % erreicht werden können. Dies führt zur Verringerung der Maximalspannungen, aber auch zur Vermeidung von *slack-cable* Situationen, die durch den kurzfristigen drastischen Rückgang der Kabelzugkraft charakterisiert sind.

Seegangskompensatoren für den Einsatz mit einem Trägersystem wie dem MODUS müssen entweder auf einen breiten Last-, Frequenz- und Amplitudenbereich ausgelegt sein, oder durch den leichten Austausch oder die Ab-/Zuschaltung von Hydraulikaggregaten modular skalierbar sein. Dies gilt besonders bei noch größeren Traglasten, wie sie in der Offshoretechnik bewegt werden. Der Grund liegt in der bereits erwähnten Hauptfunktion dieser Systeme, nämlich dem Absetzen und Aufnehmen schwerer Lasten am Meeresboden. Hierdurch können sich Masse, Gewicht und Volumen des Systems während eines Tauchgangs drastisch ändern. Hinzu kommt, dass das Seegebiet, die Jahreszeit und die Tauchtiefe des Einsatzes stark variieren können und somit das resultierende vertikale Schwingungsverhalten stark differieren kann.

Die Anwendung einer *feed-forward* Strategie sollte sowohl temporäre Wellenerhebungen im relevanten Amplituden- und Frequenzbereich als auch das experimentell bestimmte grundsätzliche Seegangs-Übertragungsverhalten des Schiffes auf das am Kabel hängende System berücksichtigen. Der in der vorliegenden Arbeit vorgestellte ‚Ereignisraum‘ ist spezifisch für jedes Einsatzfahrzeug und jeden Geräteträger und kann als Basis für die Entwicklung eines globalen, frequenzunabhängigen Kompensationsalgorithmus dienen. Die Kenntnis der Vergrößerungsfunktion und der Phasenkorrelation der Zugkraftverläufe am oberen und unteren Kabelende könnte dann zur entscheidenden Reduzierung der Lastvariationsweite für kabelgebundene Systeme genutzt werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz kabelgebundener Geräteträger in der Tiefsee ist sowohl aus der Meeresforschung als auch der marinen Rohstoffgewinnung nicht mehr wegzudenken. Im Fokus des Interesses ist in beiden Bereichen das so genannte ultra-Tiefwasser, heute definiert als der Tiefenbereich unterhalb 1500 m.

Je nach Systemkonfiguration und Operationsmodus kann das dynamische Verhalten der vertikal gekoppelten Struktur bestehend aus Schiff, Kabel und Tauchgerät im Seegang signifikant beeinflusst werden. Schlüsselrollen bei der Vorhersage der zu erwartenden Bewegungsübertragung vom Schiff auf das Tauchsystem spielen der Begegnungswinkel des Schiffes zur einlaufenden See, die Position des Aufhängepunktes des Lastkabels entlang der Längs- und Querachse des Schiffes und natürlich die Lastverhältnisse, die sich mit der Kabellänge stetig ändern, sowie hydrodynamische und hydroelastische Effekte.

Durch das Absetzen oder Aufnehmen von Nutzlast am Seeboden können sich Masse, Gewicht und Angriffsfläche des Shuttle-Systems drastisch ändern. Die Massenbilanz, jedoch nicht die Gewichtsbilanz, muss dabei die vom (Rohr-) Rahmen der Struktur eingeschlossene Wassermasse berücksichtigen. Die richtungsabhängige hydrodynamische Masse der beschleunigten getauchten Struktur wird zudem maßgeblich durch deren geometrische Eigenschaften beeinflusst. Obwohl das Tauchsystem vielfach nur geringes Gewicht in Seewasser aufweist (z.B. bei auftriebsneutraler Bauart), kann die Veränderung der Gesamtmasse durch das Nutzlastmodul somit zu einer Verschiebung der Übertragungsfunktion in energiereiche Schwingungsbereiche führen. Hierin begründetes gefährliches Resonanzverhalten führt immer wieder zu Schäden an Geräten bis hin zu Totalverlusten oder sogar Unfällen bei der Schiffsbesatzung.

Die vorliegende Arbeit wurde begleitend zur Entwicklung, Herstellung und dem Einsatz des Tiefseeeräteträgers MODUS angefertigt. Auch wenn dieser ursprünglich für das Absetzen und Bergen schwerer wissenschaftlicher Stationen für die Tiefsee im Europäischen Projekt GEOSTAR entwickelt wurde, so hat sein flexibles und modulares Konzept darüber hinaus bereits zu mehreren Einsätzen bei Folgeprojekten geführt. Wichtige Impulse für die technische Entwicklung des Geräteträgers konnten durch den Aufbau eines Messsystems mit Datenbank für Einsatz- und Betriebsparameter am Schiff und am getauchten Gerät im Rahmen dieser Arbeit gegeben werden.

Entwicklung eines Messsystems

Die Entwicklung des Messsystems zur zeitkongruenten Registrierung, Speicherung und Auswertung relevanter Bewegungsparameter erlaubt die Bewertung und die Validation numerisch erzielter Vorhersagen. Das hier vorgestellte Konzept berücksichtigt die verschiedenen Messsensoren mit ihren spezifischen Messprinzipien, Messgrößen, Messfrequenzen und Datenstrukturen. Letztere werden nur dann aufbereitet und interpretiert, wenn dies aussagenneutral und in Echtzeit möglich ist. Die online Überwachung des Einsatzes am Steuerpult und das Nachbereiten der Daten wird gleichermaßen erleichtert.

Erfahrungen konnten mit Prototypen von eigens erstellten Messsensoren gewonnen werden, deren Funktionalität überzeugt, deren Zuverlässigkeit jedoch z. T. noch optimiert werden kann. Die gewonnenen Daten aus Versuchsfeldern und Tiefsee-Einsätzen bis in 3700 m Tiefe erlauben die Optimierung der Messgeräte und zeigen Perspektiven und Grenzlasten für die Weiterentwicklung ähnlicher Geräteträger.

Numerische Modellierungen

Was für Modellversuche gilt, trifft auf Feldeinsätze mit Prototypen noch weit mehr zu: sie sind kostspielig, zeitaufwendig und Risiko behaftet. Entlastung bieten numerische Simulationen der zu erwartenden Phänomene. Die vorliegende komplexe Struktur des exemplarischen kabelgebundenen Geräteträgers wurde daher in Teilproblemfelder zerlegt und zum einen auf hydrodynamische und zum anderen auf hydroelastische Belastungen im Einsatz untersucht. Erstere nutzen ein etabliertes kommerzielles CFD-Programm um die viskose turbulente Umströmung und den resultierenden Widerstand des Geräteträgers am Kabel für die relevanten Bewegungsrichtungen zu bestimmen. Letztere nutzen ein am ILS entwickeltes Simulationsprogramm, welches seegangsinduzierte irreguläre Bewegungen am oberen Kabelaufhängepunkt mit nichtlinearen Effekten aus Queranströmung, Krümmung und Dehnung des Kabels verknüpft.

Die Aussagekraft der erzielten Ergebnisse der beiden numerischen Verfahren wird mit maßstäblichen *GEOSIM*-Modellen sowie dem Prototyp des Geräteträgers durch Schwingungs- und Widerstandsversuche mit gutem Erfolg bestätigt. In einer exemplarischen Anwendung wird zudem die Abhängigkeit des vertikalen Bewegungsverhaltens vom Begegnungswinkel zwischen Wellen und Schiff durch Berechnungen für Einsätze über einen A-Rahmen am Heck bzw. einen Mittschiffs gelegenen *moonpool* verdeutlicht. Weitere Bestätigung für die Richtigkeit der Simulationsergebnisse wird durch Vergleich mit Messeergebnissen mit dem MODUS Prototyp bei Feldeinsätzen erzielt.

Messung der Einsatzparameter und Validationen

Mehrere Seeinsätze mit unterschiedlichen Europäischen und nationalen Italienischen Projekten konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu Validationen der Versuche, Simulationen und Messsysteme mit dem Geräteträger MODUS genutzt werden. Repräsentative Messschriebe für Kräfte und Beschleunigungen verdeutlichen die Dynamik des kabelgebundenen Systems und zeigen anhand von *slack-cable* Situationen und daraus resultierenden *snap-loads* die prinzipiellen Schwachstellen dieser Technik auf. Ungewünschte Lastsituationen entstehen demnach nicht nur durch temporäre charakteristische Kombinationen von Seegang, RAO Schiff / Kabellänge / Geräteträger, sondern auch durch vermeidbares abruptes Stoppen der Winde an Bord des Schiffes. Hier könnte bereits die Implementierung einer simplen Regelung für automatische Anfahr- und Abstopprampen in die Windensteuerung Abhilfe schaffen und zur Verlängerung der Kabellebensdauer führen.

Das geometrieabhängige starke Dämpfungsverhalten des MODUS-Trägersystems erleichtert den Einsatz beim Absetzen und Bergen von Strukturen am Meeresboden. Die Annäherung an den Boden bleibt jedoch die entscheidende Operationsphase, da durch die vertikalen Schwingungen zum einen große Mengen von Sediment aufgewirbelt werden, die Sensoren oder Motoren zusetzen können und es zum anderen zu einem drastischen Anstieg der hydrodynamischen Masse kurz über dem Boden kommt, was zu einer Verkleinerung der Resonanzfrequenz des gesamten Feder-Masse-Dämpfer-Systems führt.

Ausblick

Neben der Absicherung der Funktionalität des Geräteträgers müssen die zuverlässige und redundante Registrierung und Speicherung der Einsatzdaten in einem ausfallsicheren RAID-Rechnersystem mit Datenspiegelung und die nutzerfreundliche Aufbereitung der Informationen Ziele der weiteren technischen Entwicklung sein.

Schon an Bord des Schiffes können die aufgenommenen Daten durch leistungsfähige Grafiksysteme in Echtzeit 3-dimensional visualisiert werden. Dies kann zur Kontrolle der Bewegungszustände des kabelgebundenen Systems in einer virtuellen Umgebung (*virtual reality*) und somit z.B. zur Schulung von Bedienungspersonal dienen.

Die Anwendung einer *feed-forward* Analyse des aktuellen Seegangs kann durch Überlagerung mit einem integrativen Modell des Bewegungsübertragungsverhaltens vom Seegang über das Schiff auf den kabelgebundenen Gräteträger zur Optimierung der Zuglastvariationen des Kabels führen. Der Operator des Tauchgerätes erhält damit im Verbund mit den zugrunde liegenden Lastschrieben und RAO-Werten eine Vorstellung vom aktuellen Betriebszustand und kann mit Hilfe einer Seegangskompensationsanlage möglichen Gefahrensituationen wirkungsvoller entgegenwirken.

Kommerzieller Nutzen einer optimierten Einsatzsteuerung entsteht mit jeder eingesparten Arbeitsstunde Offshore, bzw. mit jeder Verlängerung der Kabellebensdauer. Gerade bei den hier untersuchten sehr großen Einsattiefen sind zutreffende Vorhersagen, Interpretationen und problemangepasstes Handeln entscheidend für einen sicheren Betrieb und bleiben interessante Forschungsgebiete.

9 Verzeichnisse

9.1 Literatur

- [1] Beranzoli L., Braun T., Calcara M., Casale P., de Santis A., D'Anna G., Di Mauro D., Etiopie 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] BIODEEP (2001), *BIOTEchnology from the DEEP-First Cruise Report*, EU-Projekt EVK3-CT2000-42, Koordination Universität Mailand-Bicocca, Italien.
- [3] Cermelli C., Morrison D., Guinn M. (2003), *Progression of Ultradeep Subsea Deployment Systems*, Offshore Technology Conference, Paper-No. OTC 15147, 5.-8. May 2003, Houston, Texas, USA.
- [4] Choudhury D. (1993), *Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling*, Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107, Lebanon, NH 03766 USA.
- [5] Clauss G.F., Hoog S., Gerber H. (2001), *Design and Deepwater Tests of MODUS – the Deployment and Recovery Vehicle for GEOSTAR 2-Sea-floor Stations*, Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Stavanger, Norway, June 17-22.
- [6] Clauss G.F., Hoog S., Vannahme M., Gerber H., Gasparoni F., Calore D. (2002), *MODUS-Space Shuttle for Deepwater Interventions*, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 6.-9. May 2002, Paper-No. OTC 14051.
- [7] Clauss G.F., Lehmann E., Östergaard C. (1988), *Meerestechnische Konstruktionen*, Springer Verlag, Berlin, ISBN 3-540-18964-5.
- [8] Clauss G.F., Saroukh A. und Weede H. (1998), *Prediction of Limiting Seastates for Pipelaying Operations*, Proceedings of the 11th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE) Symposium, July 5-9, 1998, Lisbon, Portugal, Vol. IV, Paper-No. OMAE98/98-611.
- [9] Clauss G.F., Weede H. und Saroukh A. (1991), *Offshore Pipelaying - Significance of Dynamic Stresses and Motions during Laying Operations*, in Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 6-9 May 1991, Vol. IV, pp. 553-565, Paper-No. OTC 6760.
- [10] Driscoll F.R., Lueck R.G., Nahon M. (2000), *Development and validation of a lumped-mass dynamics model of a deep-sea ROV system*, Applied Ocean Research, 22, 169-182, Elsevier.
- [11] Driscoll F.R., Lueck R.G., Nahon M. (2000), *The motion of a deep-sea remotely operated vehicle system. Part 1: motion observations, Part 2: analytical model*, Ocean Engineering, 27, Elsevier.
- [12] Dubbel (1995), Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Auflage, ISBN 3-540-57650-9, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [13] European Space Agency (ESA) (2003), *Meer Land Luft – Die Erforschung der Weltmeere aus dem All*, Internet, ESA Portal-Austria.
- [14] Ferro R.S.T., Hou E.H. (1984), *Selected review of hydrodynamic force coefficient data on stranded wires used in fishing gear*, Technical Report 31, Scott Fish Res.
- [15] Feyrer K. (2000), *Drahtseile: Bemessung, Betrieb, Sicherheit*, ISBN 3-540-67829-8, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.
- [16] Fluent, Version 6.1 (2002), *Online Manual zur CFD-Software*, Fluent Deutschland GmbH, Darmstadt.
- [17] Fridmann A.L. (1986), *Calculation for fishing gear designs*, Fishing News Books Ltd., Farnham, Surrey, England.

-
- [18] Gasparoni F., Favali P., Smriglio G., Gerber H., Clauss G., Marvaldi J., Fellmann D., Millot C., Montagner J.F., Marani M. (2000), *Results and Perspectives from the first Mission of the European abyssal observatory GEOSTAR*, Oceanology Int. 2000 Conference, Brighton, UK.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Gerber H.W., Clauss G.F. (2005), *Space Shuttle MODUS – Key System for the Installation of Networks of Benthic Station*, Proceedings OMAE '05 Conference, OMAE2005-67107, Khalkidhiki, Greece.
- [22] Giese K. (1989), *Ein Beitrag zur Untersuchung des nichtlinearen statischen und dynamischen Verhaltens flexibler Leitungen im Meer*, Dissertation RWTH Aachen.
- [23] GOOS (2004), *The Global Ocean Observing System*, Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), UNESCO.
- [24] Grebe H. (1997), *Allgemeines mathematisches Modell für Strangverbindungen zwischen mobilen Tiefseeeräten und ihren Mutterstationen*, Aachen, Verlag Shaker.
- [25] Hahlbeck W.-H. (1976), *Die Bewegungsgleichungen eines ideal biegsamen, undehnbaren, strömungsbelasteten schweren Fadens bei räumlicher ungleichförmiger Bewegung und ihre Lösung für ein Modell eines pelagischen 1-Schiff-Schleppnetzsystems*, Dissertation, Universität Rostock.
- [26] Hoefeld J. (1983), *Verfahren zur Auswertung und Beurteilung von Messungen an Bauteilen im Meer*, Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen TH Aachen, Selbstverlag.
- [27] 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.
- [28] Hoffmann E.-O. (1995), *Verhalten flexibler Verbindungsleitungen zwischen bewegten Unterwassergeräten und schwimmenden Stationen*, Aachen, Verlag Shaker.
- [29] Huang S., Vassalos D. (1995), *Analysis of Taut-Slack Marine Cable Dynamics*, Proc. of the 14th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symp. (OMAE), Copenhagen, Denmark, Vol. 1-B, pp. 4001-406., June 18-22.
- [30] IODP (2004), *Integrated Ocean Drilling Program*, IODP Management International Inc., c/o U.T. Institute for Geophysics, Austin, Texas, USA.
- [31] Interactive Visualization Systems - IVS (2003), *3D-Software Fledermaus*, Fredericton, NB, Canada.
- [32] Jacob T. (1999), *Parameterorientierte Konstruktion und Entwicklung eines mobilen Tiefseedockgerätes*, Diplomarbeit am FG VIII der Technischen Fachhochschule (TFH) Berlin, 31.08.1999.
- [33] Keil H. (1974), *Die hydrodynamischen Kräfte bei der periodischen Bewegung zweidimensionaler Körper an der Oberfläche flacher Gewässer*, Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Hannover, Bericht Nr. 305, Februar 1974.
- [34] Klecza W., Kreuzer E. (1992), *Zur Modellierung von Unterwasserrobotern*, ZAMM Zeitschrift für angewandte Mechanik, (4): T53-T55.
- [35] Kuypers F. (2002), *Physik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, Band 1, 2. Auflage, ISBN 3-527-40368-X, WILEY-VCH Verlag, Weinheim.
- [36] Linke P., Pfannkuche O. (2000), *Videogesteuerte Positionierung und Einsatz von Landersystemen in der Tiefsee*, Meeresforschungstechnik 2000 plus, 1. Nordd. Symposium, 13. Jan. 2000, Geomar Kiel.
- [37] Luthra G. (1970), *Modellfamilien-Untersuchung zur Ermittlung der Erhöhung des zähigkeitsbedingten Widerstands auf flachem Wasser*, Schiff und Hafen, S. 1007.
- [38] MacArtney A/S Underwater Techn. (1999), Technische Auskunft (*umbilical*), Esbjerg, Dänemark.
- [39] MacArtney A/S Underwater Techn. (1999), Manual zu Winde, Umlenkrolle, Esbjerg, Dänemark.
-

-
- [40] Marine Technology Society (MTS) (1999), *Operational Effectiveness of Unmanned Underwater Systems*, MTS ROV Committee, edited by Robert L. Wernli, Washington D.C., USA.
- [41] Markoulidis P. (1989), *Nichtlineare statische und dynamische Analyse von Seilen, Kabeln und flexiblen Leitungen im Seegang unter Anwendung des Finite-Elemente-Verfahrens*, Dissertation RWTH Aachen, Aachen.
- [42] Mason P. (2002), *Winch Operations and the CLAM System (Cable Logging And Monitoring)*, Proceedings of the Inmartech 2002 Conference, October 7th - 11th at JAMSTEC Headquarters, 2-15 Natsushima, Yokosuka 237-0061 Japan.
- [43] Newman J.N., Scлавounos P.D. (1988), *The Computation of Wave Loads on Large Offshore Structures*, Proc. of Int. Conf. on Behaviour of Offshore Structures (BOSS), pages 605-622, June 1988, Trondheim, Norway.
- [44] Nyquist H. (1924), *Certain Factors Affecting Telegraph Speed*, Journal of the A.I.E.E., Vol. 43, pages 324-346, 1924.
- [45] Papazoglou V.J., Mavrakos S.A., Triantafyllou M.S. (1990), *Non-Linear Cable Response and Model Testing in Water*, Journal of Sound and Vibration, 140, 103-115.
- [46] Pearl J., Winegarden C. (2000), *Underwater Vehicles in the Scientific Arena*, UnderWater Magazine, Article reprint, September/October 2000.
- [47] Priede, I.G. (1998), *ALIPOR – Autonomous Lander instrument platforms for oceanographic research*, 3rd MAST Conference, Lisbon.
- [48] Rodi, W. (1993), *Turbulence models and their application in hydraulics - a state-of-the-art review*, Int. Assoc. for Hydraulic Research, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 3rd edition, 104 pp.
- [49] Sagatun S. I., Johansen T. A., Fossen T. I., Nielsen F.G. (2002), *Wave synchronizing crane control during water entry in offshore moonpool operations*, Proc. IEEE Conf. Control Applications, Glasgow.
- [50] SolidWorks (2002), Handbuch zu 3D CAD-Software, SolidWorks Deutschland GmbH, D-82008 Unterhaching.
- [51] Szabo I (1959), *Einführung in die Technische Mechanik*, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1959.
- [52] 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, UK.
- [53] Universität Bremen, Institut für Umweltverfahrenstechnik (2003), *Das Internetportal für Wasser und Abwasser* (www.wasser-wissen.de).
- [54] Vannahme M. (2001), *Dynamische Analyse getauchter Schleppsysteme*, Dissertation am Institut für Land- und Seeverkehr (ILS - Fakultät V) der Technischen Universität Berlin, ISBN 3-89820-254-2, Mensch-und-Buch-Verlag, Berlin.
- [55] Vannahme M., Clauss G.F. (2002), *Non-linear Dynamics of Vertically Tethered and Towed Body Systems*, Proceedings of the 10th Int. Congress of the Int. Maritime Assoc. of the Mediterranean (IMAM), 13-17 May 2002, Crete, Hellas, Paper-No. 133.
- [56] Vassalos D., Huang S., Kourouklis A. (2005), *Model Testing and Prediction of Snap Loading of Tethered Subsea Units*, 2nd Int. Workshop on Appl. Offshore Hydr., Rio de Janeiro, Brazil, 14.-15. April.
- [57] WAMIT, Version 5.1 (1994), *Wave Analysis M.I.T.*, Handbuch zur Software des Department of Ocean Engineering Mass. Institute of Technology, Massachusetts.
- [58] Weede H. (1990), *Dynamik Offshoretechnischer Linientragwerke am Beispiel der Pipelineverlegung*, Dissertation, Institut für Schiffs- und Meerestechnik (ISM) der Technischen Universität Berlin, Dissertationsdruck Darmstadt.
-

9.2 Abbildungen, Tabellen

Abbildungen

Abb. 1-1:	Einsatzfacetten kabelgebundener Trägersysteme: ① Geschleppter Sensorträger (Schleppfisch), ② mobiles Schwerlastträgersystem mit Bodenstation, ③ käfiggestütztes ROV, ④ mobiles Trägersystem zur kontrollierten Probenahme, ⑤ Satellitenverbindung zu Fahrzeugen und Sensoren (z.B. ARGOS, Inmarsat, dGPS), ⑥ Kranschiff, ⑦ Offshore-Plattform (<i>Tension Leg Platform</i> - TLP), ⑧ Schiff mit A-Rahmen	1
Abb. 1-2:	Beispiele für 3D-Visualisierungen von Forschungsergebnissen: (links) Topologie des Meeresbodens mit Isobaren; (rechts) gewichtete Modellierung der Erdkruste (IVS [31])	2
Abb. 1-3:	Entwicklung einer <i>slack-cable</i> Situation am MODUS- <i>umbilical</i> (Kabelreflexion verstärkt dargestellt)	3
Abb. 1-4:	(v.l.n.r.) Schnitt durch das <i>umbilical</i> von MODUS (Durchmesser 0,254 m (1 Zoll), Masse 2,276 kg/m) sowie eine Auswahl weiterer <i>umbilical</i> und beispielhafter Kabelstrukturen (nicht maßstabsgetreu)	3
Abb. 1-5:	Geschleppter Sensorträger (Hydrophon)	6
Abb. 1-6:	Schallquelle (Schleppfisch) und Empfänger (Hydrophon) als tief geschleppte Einheit.....	6
Abb. 1-7:	Tief geschleppter Sensorträger mit Depressor zur Bewegungsentkoppelung	7
Abb. 1-8:	Bodengängiges Förderfahrzeug mit Förderschlauch in Girlandenform zur Bewegungsentkoppelung.....	7
Abb. 1-9:	Käfiggebundenes ROV im Tiefseeinsatz	8
Abb. 1-10:	Tiefseegeräteträger bei Annäherung an eine Bodenstation. Einsatzphasen (v. l. n. r.): Ausbringen/Einholen, Transit, Abkoppeln bzw. Ankoppeln und Anheben der Nutzlast	8
Abb. 1-11:	(v.l.n.r.) Der MODUS Prototyp für Flachwasser (GEO1), MODUS für Tiefwasser (GEO2) im CAD-Schnittbild sowie als Prototyp (GEO2), jeweils mit Bodenstation.....	9
Abb. 1-12:	(v.l.n.r.) CAD- und Stahlmodell von MODUS (jeweils Maßstab 1:5) und Prototyp von MODUS sowie eine Testversion der Bodenstation.....	12
Abb. 1-13:	(Links) Schnitt durch eine Kabelterminierung; Terminierung und <i>bending restrictor</i> beim MODUS- <i>umbilical</i> (rechts)	15
Abb. 2-1:	Temperatur- und Druckabhängigkeit der kinematischen Zähigkeit von (links) Süßwasser (<i>Fresh Water</i>) und Salzwasser (<i>Sea Water</i>) (HOERNER [27]), rechts für Salzwasser (Anm.: $1 \text{ ft}^2/\text{sec} \approx 0,0929 \text{ m}^2/\text{s}$)	18
Abb. 2-2:	Koordinatensysteme - inertial in der Ruhewasserlinie, bzw. am A-Rahmen (OA) und körperfest am unteren Aufhängepunkt des Kabels (UA); relative Fahrt- oder Anströmgeschwindigkeit (v_{rel}); Neigungs- und Deviationswinkel ($\varphi(s)$, $\psi(s)$); Landepunkt am Meeresboden (P_{TD} - <i>Touch Down Point</i>)	20
Abb. 2-3:	MODUS: Position von Schwerpunkt, Lastsensor, Beschleunigungs- und Neigungssensor (Acc+Tilt-Sensor).....	21
Abb. 2-4:	Geometrieverhältnisse für die A-Rahmen-Positionen I bis III am Heck des F/S URANIA (III = Einsatzposition)	22
Abb. 2-5:	Abschätzung der Kraftverhältnisse an der Umlenkrolle mit theoretischer und gemessener Kabelzugkraft (MODUS+Bodenstation, Wellenperiode $T=4,2 \text{ s}$, signifikante Wellenhöhe $H_s=0,5 \text{ m}$, Kabellänge $l=3320 \text{ m}$)	23

Abb. 2-6:	Der <i>Ereignisraum</i> basiert auf aktuellen Operations- und Umweltparametern und nutzt die Übertragungsfunktion (RAO) für das Einsatzschiff und den spezifischen Geräteträger24
Abb. 2-7:	Prinzip der Bestimmung des dynamischen Antwortverhaltens des Einsatzschiffes im Seegang durch Anwendung der Spektralanalyse und Kurzzeitwellenstatistik nach CLAUSS et al. [7] (in VANNAHME [54]).25
Abb. 2-8:	Feder-Masse-Dämpfer Ersatzsystem.....26
Abb. 2-9:	Dämpfungsabhängige Übertragungsfunktionen (oder RAO oder Vergrößerungsfaktoren) mit Phasenverschiebungen einer beispielhaften erzwungenen Schwingung (δ in Abbildung entspricht $d/(2m_{ges}\omega_0)$ im Text) (CLAUSS et al. [7]).....28
Abb. 2-10:	Die Eigenfrequenz der Vertikalschwingung in Abhängigkeit von angehängter Masse und Kabellänge; Wellenperiode $T_0=4,0$ s29
Abb. 2-11:	Übertragungsfunktion für Tauchen für MODUS bei Berücksichtigung linearisierter Dämpfungskraft; $C_d=1,95$, Kabellänge 1330 m, Wellenperiode $T_0=4,0$ s, $H_s=0,65$ m31
Abb. 3-1:	Übertragungsfunktionen für Tauchen (links) und Stampfen (rechts) für F/S URANIA in See von vorn bzw. seitlicher See, ermittelt mit WAMIT [57]33
Abb. 3-2:	Simulationsergebnisse: Übertragungsfunktionen für: (oben) Tauchen des A-Rahmens bezogen auf den Seegang, (Mitte) das Tauchgerät bezogen auf den A-Rahmen und (unten) das Tauchgerät bezogen auf den Seegang von vorn (quadriert).....33
Abb. 3-3:	(Oben) P-M-Spektrum des Seegangs und die Energiedichtespektren der Antwortbewegungen von MODUS (Mitte) und MODUS mit Bodenstation (unten) im Seegang von vorn; $m_{MD}=1090$ kg, $m_{MD+BS}=3861$ kg, Kabellänge=3400 m.....34
Abb. 3-4:	Experimentell bestimmte dimensionslose Strouhalzahlen in Abhängigkeit vom Reibwiderstandskoeffizienten für 2D-Umströmungen unterschiedlicher Körper bei Reynoldszahlen $>10^3$ (nach HOERNER [27]) und Momentaufnahme eines CFD-Simulationsergebnisses für einen Zylinder (oder Kabel) mit $C_d=1,2$ und $Re=2,54*10^4$37
Abb. 3-5:	MODUS als modulares Konzept im CAD-Entwurf: ① Andockkonus mit Verriegelungseinheit zum Einfangen der Stationen, ② Schutzgehäuse der Kabelterminierung, ③ offener Rahmen (Aluminium) als Träger der Sensoren und Hilfsaggregate (Motoren, Sonar, Altimeter, Kameras und Scheinwerfer, Tiefseetrafo, Elektronikboxen, Verkabelungen) (JACOB [32]).....38
Abb. 3-6:	Der MODUS-Prototyp als CAD-Entwurf (links-linke Bildhälfte) und als CFD-Diskretisierung (links-rechte Bildhälfte) mit einem Teil des unteren Rechenraumgitters sowie Gitterdetails38
Abb. 3-7:	CFD-Modelle für MODUS in M1:1 (links) und in M1:5 zeigen Unterschiede im Grad der Detailmodellierung39
Abb. 3-8:	Berechnete Widerstandsbeiwerte für MODUS in M1:5 und M1:1 jeweils für die horizontale Bewegungsrichtung im Vergleich mit experimentell ermittelten Werten für die Prototypen GEO1 und GEO2.40
Abb. 3-9:	Berechnete Widerstandsbeiwerte für MODUS in M1:1 für die Bewegungsrichtungen Fieren, horizontal vorwärts und Hieven41
Abb. 3-10:	Isoflächen repräsentieren gemittelte Geschwindigkeiten (<i>velocity magnitude</i>) im Strömungsgebiet im Nahbereich von MODUS für (v.o.n.u.): Fieren, Horizontalfahrt, Hieven.42
Abb. 4-1:	Schema des neuen Messsystems für dynamische Bewegungsgrößen kabelgebundener Tiefseegeräteträger44
Abb. 4-2:	(Links) Softwaremodule der Datenerfassung und (rechts) Schema der synchronisierten Datenprotokollierung.....47

Abb. 4-3:	(Links) Zeichnung der Umlenkrolle mit Lastsensor in der Drehachse sowie induktivem Sensor für Kabellänge und -geschwindigkeit (MACARTNEY [39]) und montiert am A-Rahmen (Metallstifte wurden nachgezeichnet)	48
Abb. 4-4:	Die Kraftmesswaage nach der Metallbearbeitung (links oben und unten), nach DMS-Applikation, Verkabelung und Verguss der Klebezonen (Mitte oben) und im eingebauten Zustand (Mitte unten und rechts)	49
Abb. 4-5:	Kräfte am unteren Kabelaufhängepunkt (UA)	49
Abb. 4-6:	(v. l. n. r.) Kompass und Beschleunigungssensor als Einheit - montiert am A-Rahmen in Parkposition	50
Abb. 4-7:	Kalibrierung der neuen Kraftmesswaage (KMW) am MODUS in einem speziellen Zugmessstand (links) und ermittelte Kalibrierkurven für vier Kanäle der KMW (K1-K4) mit Kraftkurven der Druckdosen (P1, P2) bei zunehmender (up) und abnehmender Last (down).....	51
Abb. 4-8:	Einbaulage der zweiachsigen Beschleunigungssensoren (links) am A-Rahmen und (rechts) am MODUS.....	52
Abb. 4-9:	Flächen der idealisierten Beschleunigungen für den vollen zweiachsigen Arbeitsbereich der Sensoren xTilt bzw. zTilt von $\pm 45^\circ$ für die x-Komponente (links) und die z-Komponente (rechts)	52
Abb. 4-10:	Flächen der gemessenen Abweichungen für x- und zTilt von $\pm 25^\circ$ für die x- und z-Komponente des Sensors am A-Rahmen (oben) bzw. am MODUS (unten)	53
Abb. 4-11:	Schema der bilinearen Interpolation.....	54
Abb. 5-1:	Versuchsaufbau für Schwingungsversuche im Tiefwassertank	55
Abb. 5-2:	Die Kraftmesswaagen am oberen (links) und unteren Ende des Testkabels.....	56
Abb. 5-3:	Kraftverläufe für Eigenschwingungen einer Aluminiumkugel (links, $m=1,46$ kg, $\varnothing=0,1$ m, $k=42,1$ N/m) bzw. einer Stahlscheibe (rechts, $m=2,14$ kg, $\varnothing=0,16$ m, $k=84,4$ N/m) in Luft und Wasser.....	59
Abb. 5-4:	Kraftverläufe für Eigenschwingungen der Modelle von MODUS (links, $k=922$ N/m) und MODUS+Bodenstation (rechts, $k=2510$ N/m) in Luft und Wasser, M1:5.	59
Abb. 5-5:	Auslenkungen für Eigenschwingungen einer Aluminiumkugel (links, $m=1,46$ kg, $\varnothing=0,1$ m, $k=42,1$ N/m) bzw. einer Stahlscheibe (rechts, inkl. Einhüllende, $m=2,14$ kg, $\varnothing=0,16$ m, $k=84,4$ N/m) in Luft und Wasser.	60
Abb. 5-6:	Auslenkungen für Eigenschwingungen der Modelle von (links) MODUS und (rechts) MODUS+Bodenstation; beide mit $k=922$ N/m, in Luft und Wasser, M1:5.....	60
Abb. 5-7:	Links: Logarithmisches Dekrement der freien gedämpften Schwingungen aus Abb. 5-5 und Abb. 5-6.....	60
Abb. 5-8:	Rechts: Übertragungsfunktionen für Tauchen von MODUS m/o Bodenstation bei Kabellänge ca. 390 m	60
Abb. 5-9:	Änderung der Übertragungsfunktionen für Tauchen in Betrag und Position der Maxima bei Verringerung des Bodenabstands von MODUS; Ergänzend: RAO für MD+BS im ‚Freiwasser‘. Kabellänge ca. 1060 m.....	61
Abb. 5-10:	Zunahme der hydrodynamischen Masse bei Verringerung des Bodenabstands; Messung und Berechnung; Eigenmasse $m_{0(MD_M1:5)}=8,50$ kg	62
Abb. 5-11:	Zugkraftverläufe beim Austauschen von MODUS (links) und MODUS+Bodenstation (rechts) in M1:5	63
Abb. 5-12:	Der Prototyp sowie Modelle von MODUS (GEO2) im Maßstab 1:3 und 1:5	63
Abb. 5-13:	Widerstandsversuche in der Tiefwasserrinne der ZE VWS der TU Berlin (v.l.n.r.): Modelle von MODUS in M1:5, M1:3 und der Prototyp.....	64

Abb. 5-14:	Konfigurationen der Widerstandsversuche (v.l.n.r.): Modelle von MODUS in M1:5, M1:3 und der Prototyp für vertikale und horizontale Fahrt.....	64
Abb. 5-15:	Widerstandsbeiwerte vs. Reynoldszahlen für Experimente mit MODUS in M1:5, M1:3 und die Prototypen für Flachwasser (GEO1) und Tiefwasser (GEO2).....	66
Abb. 6-1:	Bergung der Bodenstation GNDT-SN1 mit MODUS: Kraftverläufe am oberen und unteren Aufhängepunkt und Kabellänge; maximale Kabellänge 2112 m; ($m_{MD}=1090$ kg, $m_{BS-GNDT-SN1}=1433$ kg)	69
Abb. 6-2:	Detail der Kopplungsphase aus Abb. 6-1: Kraftverläufe am oberen und unteren Aufhängepunkt sowie Kabellänge während Annäherung, Ankoppelung und Kabelentspannung sowie Anheben der Bodenstation; tiefster Punkt bei Kabellänge 2112 m	70
Abb. 6-3:	Drastische Änderung der Zugkraft am oberen und unteren Kabelende als Folge von Windenmanövern beim Fieren; Kabellänge bei Stopp ca. 1134 m; ($m_{MD}=1090$ kg); Detail aus Abb. 6-1	71
Abb. 6-4:	Drastische Änderung der Zugkraft am oberen und unteren Kabelende als Folge von Windenmanövern beim Hieven; Kabellänge bei Stopp ca. 1460 m; ($m_{MD}=1090$ kg, $m_{BS}=1433$ kg); Detail aus Abb. 6-1	71
Abb. 6-5:	Verläufe für Kraft am oberen Aufhängepunkt und Kabellänge während eines Testtauchgangs mit MODUS mit kurzen Stopps alle 250 m während des Fierens; maximale Kabellänge 2250 m; ($m_{MD}=1090$ kg)	73
Abb. 6-6:	Kraftverlauf am oberen Aufhängepunkt, Kabellänge und beispielhafte Amplitudenspektren für einen Beobachtungstauchgang; MODUS <i>stand-alone</i> ; maximale Kabellänge 3505 m; ($m_{MD}=1090$ kg)	74
Abb. 6-7:	Details zu Abb. 6-6: Zugkräfte am A-Rahmen für ähnliche Kabellängen jeweils für Fieren (links) und Hieven (rechts)	74
Abb. 6-8:	Kraftverlauf am oberen Aufhängepunkt, Kabellänge für das Absetzen, Testen und sofortige Bergen der Station ORION-N1; maximale Kabellänge 3393 m; ($m_{MD}=1090$ kg, $m_{BS-ORION-N1}=2771$ kg)	75
Abb. 6-9:	Details zu Abb. 6-8: Zugkraft, Kabellänge und Vertikalbeschleunigungen am A-Rahmen und Vertikalbeschleunigung am MODUS (mit Bodenstation ORION-N1); jeweils für Fieren (links) und Hieven (rechts); Kabellänge um 820 m	75
Abb. 6-10:	Details zu Abb. 6-8: Zugkraft, Kabellänge und Vertikalbeschleunigung am A-Rahmen und Vertikalbeschleunigung am MODUS für Absetzen (o-links), Kabelentspannung (unten) und Anheben der Station (o-rechts) (siehe Zeitverlauf)	76
Abb. 6-11:	Kraftverlauf am oberen Aufhängepunkt, Kabellänge und beispielhafte Amplitudenspektren für das Absetzen der Station ORION-N1; maximale Kabellänge 3396 m; ($m_{MD}=1090$ kg, $m_{BS-ORION-N1}=2771$ kg)	77
Abb. 6-12:	Kraftverlauf am oberen Aufhängepunkt, Kabellänge und beispielhafte Amplitudenspektren für das Absetzen der Station ORION-N2; maximale Kabellänge 3450 m; ($m_{MD}=1090$ kg, $m_{BS-ORION-N2}=1657$ kg)	77
Abb. 6-13:	Details zu Abb. 6-11: Zugkraft, Kabellänge und Vertikalbeschleunigung am A-Rahmen und Vertikalbeschleunigung am MODUS für die Phasen kurz vor Absetzen der Station (oben links), Kabelentspannung (unten) und kurz nach Anheben von MODUS (oben rechts); gestrichelte Linien zeigen Bewegungen in Gegenphase	78
Abb. 6-14:	Prozentuale Abweichung der Sensordaten für Kabellänge und Absolutdruck für einen Tauchgang mit MODUS <i>stand-alone</i> (nach Abb. 6-5), maximale Kabellänge 2250 m, $m_{MD}=1090$ kg	80
Abb. 6-15:	Prozentuale Abweichung der Sensordaten für Kabellänge und Absolutdruck für einen Bergungstauchgang (nach Abb. 6-1), max. Kabellänge 2110 m. Fieren: MD allein, Hieven: MD+BS, ($m_{MD}=1090$ kg, $m_{BS-GNDT-SN1}=1433$ kg).....	80

Abb. 7-1:	Messergebnisse aus Tankversuchen und Simulationsergebnisse für Übertragungsfunktionen für Tauchen für MODUS (MD) und MODUS+Bodenstation (MD+BS), Kabellänge ca. 1060 m.....	81
Abb. 7-2:	Simulationsergebnisse für Übertragungsfunktionen für Tauchen für MODUS (MD) und MODUS+Bodenstation (MD+BS), Kabellänge ca. 3400 m.....	81
Abb. 7-3:	Einfluss des Wellen-Schiff-Begegnungswinkels auf die signifikante Vertikalbewegung bezogen auf die signifikante Wellenhöhe für das <i>umbilical</i> , MODUS und MODUS+Bodenstation: für a) Seegang von vorn, b) seitlichen Seegang und c) Seegang von vorn und Arbeit durch einen <i>moonpool</i> (vgl. CLAUSS et al.[6]).....	83
Abb. 9-1:	MODUS: Zugkräfte und Amplituden am oberen und unteren Kabelende; Maßstab M1:5; Federrate $k_M=2510$ N/m; Erregeramplitude 0,024 m, Frequenzen von ca. 0,42 Hz bis ca. 1 Hz	117
Abb. 9-2:	MODUS+Bodenstation: Zugkräfte und Amplituden am oberen und unteren Kabelende; Maßstab M1:5; Federrate $k_M=2510$ N/m; Erregeramplitude 0,024 m, Frequenzen von ca. 0,42 Hz bis ca. 1 Hz.	119
Abb. 9-3:	MODUS: Zugkräfte und Amplituden am oberen und unteren Kabelende; Maßstab M1:5; Federrate $k_M=922$ N/m; Erregeramplitude 0,024 m, Frequenzen von ca. 0,42 Hz bis ca. 1 Hz	121
Abb. 9-4:	MODUS+Bodenstation: Zugkräfte und Amplituden am oberen und unteren Kabelende; Maßstab M1:5; Federrate $k_M=922$ N/m; Erregeramplitude 0,024 m, Frequenzen von ca. 0,42 Hz bis ca. 1 Hz.	123
Abb. 9-5:	Widerstandskräfte für MODUS in M1:5: (Links) Horizontalfahrt und (rechts) Hieven	125
Abb. 9-6:	Widerstandskräfte für MODUS in M1:3: (Links) Horizontalfahrt und (rechts) Hieven	125
Abb. 9-7:	Widerstandskräfte für MODUS in M1:1, jeweils für Horizontalfahrt: Links für Minimalausrüstung und rechts für Vollausrüstung	125

Tabellen

Tab. 1-1:	Hauptmerkmale: F/S URANIA, <i>umbilical</i> , MODUS, Nutzlastmodule und Modelle	11
Tab. 3-1:	Dimensionen der CFD-Halbmodelle	39
Tab. 3-2:	CFD-Ergebnisse für 2D-Grundformen bei Anströmung horizontal und vertikal (auf- und abwärts). Geschwindigkeit 0,4 m/s, Reynoldszahl zwischen $4 \cdot 10^5$ und $9 \cdot 10^5$	43
Tab. 4-1:	Eigenschaften der wichtigsten Instrumente zur Messung der Dynamik von Schiff und Geräteträger	45
Tab. 4-2:	Winkelabhängigkeit der Beschleunigungskomponenten bei einachsigem Neigen.....	52
Tab. 4-3:	Abweichung der gemessenen Beschleunigungskomponenten von den Idealwerten.....	53
Tab. 5-1:	Eigenschaften der Modellversuchsfedern.....	56
Tab. 5-2:	Hydrodynamische Masse von MODUS bei Bodenannäherung	61
Tab. 5-3:	Richtungen und Geschwindigkeiten der Anströmung bei Widerstandsversuchen.....	65
Tab. 6-1:	Konfiguration der untersuchten Tauchgänge	67
Tab. 6-2:	Frequenzen der Zugkraftschwingungen für Fieren und Hieven bei ähnlichen Kabellängen; MODUS <i>stand-alone</i>	73
Tab. 7-1:	Resonanzfrequenzen: Analytische Abschätzungen, Messdaten und Simulationsergebnisse	82

9.3 Symbole, Abkürzungen

Symbole (alphabetisch)

A	Fläche, Querschnitt	[m ²]
A _h	horizontale Projektionsfläche	[m ²]
A _v	vertikale Projektionsfläche	[m ²]
C	(Wellen-) Geschwindigkeit	[m/s]
C _a	Koeffizient der hydrodynamischen Masse	[-]
C _d	Reibwiderstandsbeiwert ($=F_d/(0,5 \rho u_0^2 A)$)	[-]
C _m	Trägheitskoeffizient ($C_m=1+C_a$)	[-]
C _n	Widerstandsbeiwert, normal	[-]
C _p	Druckwiderstandsbeiwert, ($=F_p/(0,5 \rho u_0^2 A)$)	[-]
C _t	Widerstandsbeiwert, tangential	[-]
d	Dämpfungskonstante	[kg/s]
D	Kabeldurchmesser	[m]
d	Wassertiefe	[m]
d'	Tauchtiefe	[m]
E	Elastizitätsmodul (<i>Young's Modulus</i>)	[N/m ²]
E	kinetische Energie	[Nm]
f _d , F _d	(Wellen-) Widerstandskraft	[N]
f _m	Wellenträgheitskraft	[N]
f _w	Wirbelablösefrequenz	[1/s]
g	Erdbeschleunigung (=9,81)	[m/s ²]
H(ω)	Übertragungsfunktion (auch RAO)	[-]
H _s	signifikante Wellenhöhe (=Durchschnitt der 1/3 höchste Wellen)	[m]
Index M	Modell	[-]
Index S	Großausführung	[-]
k	Wellenzahl ($=2\pi/L$)	[-]
k _(S,M)	Federrate ($=EA/l$), auch mit Index S bzw. M (s.o.)	[N/m]
KC	Keulegan-Carpenter-Zahl ($=u_0 T/L$)	[-]
KK	Kreuzkorrelation	[-]
L	charakteristische Länge	[m]
l	Kabellänge	[m]
l _{AF}	Hebelarm Drehachse/A-Rahmen	[m]
m	Masse ($=m_0+m_{hy}$)	[kg]
m ₀	Eigenmasse, auch als m _{MD} und m _{BS}	[kg]
m _{ein}	eingeschlossene (mitbewegte) Wassermasse	[kg]
m _{ges}	Gesamtmasse ($=m_0+m_{hy}+m_{ein}+m_K/3$)	[kg]
m _{hy}	hydrodynamische Masse	[kg]
m _K	Masse des Kabels	[kg]
P	Druck	[Pa]
Re	Reynoldszahl, ($=u_0 L/\nu$)	[-]
St	Strouhalzahl, ($=f_w L/u_0$)	[-]
T	Temperatur	[°C]

t	Zeit	[s]
T_0	Aufwärtsnullstellenperiode	[1/s]
U	potentielle Energie	[Nm]
u_0	ungestörte Anströmgeschwindigkeit	[m/s]
x	Koordinate in Längsrichtung (positiv zum Bug zeigend)	[-]
y	Koordinate in Querrichtung (positiv nach Backbord zeigend)	[-]
z	Koordinate in Vertikalrichtung (positiv nach oben zeigend)	[-]
z_{AF}	vertikale Auslenkung des A-Rahmens	[m]
z_{MD}	vertikale Auslenkung des MODUS	[m]
η	dynamische Zähigkeit (Viskosität)	[Ns/m ²]
Λ	logarithmisches Dekrement	[-]
λ	Maßstabsverhältnis Großausführung zu Modell	[-]
μ	Massenverhältnis	[-]
ν	kinematische Zähigkeit, ($=\eta/\rho$)	[m ² /s]
ρ_K	Kabeldichte	[kg/m ³]
ρ_{salz}	Dichte, Salzwasser (=1025)	[kg/m ³]
$\rho_{\text{süß}}$	Dichte, Süßwasser (=1000)	[kg/m ³]
$\rho_{x,y}$	Kreuzkorrelationskoeffizient zwischen x und y	[-]
$\sigma_{x,y}$	Standardabweichung von x bzw. y	[-]
ω	Erregerkreisfrequenz, ($=2\pi/T$)	[rad/s]
ω_0	Eigenkreisfrequenz	[rad/s]
ω_R	Resonanzkreisfrequenz	[rad/s]
$\zeta_a(\omega)$	Wellenamplitude	[m]

Abkürzungen (alphabetisch)

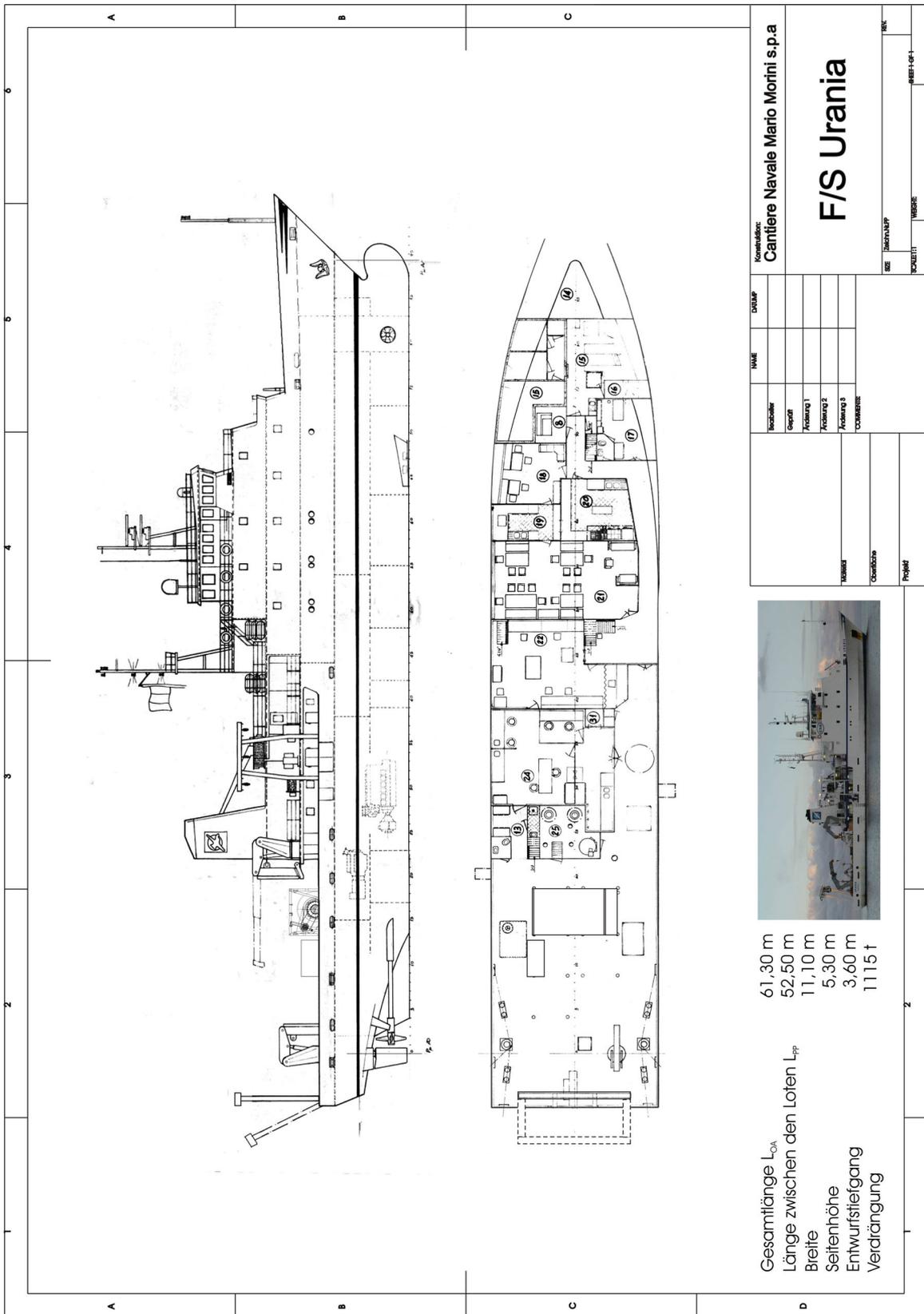
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V.
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
BIODEEP	<i>BIOTEchnology from the DEEP</i>
BMW A	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
BS	<i>Bottom Station</i> oder <i>Benthic Station</i> (Bodenstation)
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DYALEKT	<i>Dynamische Analyse der hydroelastischen Eigenschaften kabelgebundener Tiefseegeräteträger</i>
GEOSTAR	<i>GEophysical and Oceanographic STation for Abyssal Research</i>
GOOS	<i>Global Ocean Observation System</i>
MD	Kurzform von MODUS
MODUS	<i>MOBILE DOCKER FOR UNDERWATER SCIENCES</i>
ODP	<i>Ocean Drilling Program</i>
ORION	<i>Ocean Research by Integrated Observation Networks</i>
RANSE	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations</i>
RAO	<i>Response Amplitude Operator</i> (Übertragungsfunktion)
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i>
UUV	<i>Unmanned Underwater Vehicle</i>

10 Anhang

A	Konstruktionszeichnungen	99
A.1	Forschungsschiff F/S URANIA	100
A.2	Winde Cormac 4000/25,4-89 ROV	101
A.3	Umbilical Rochester 03379.....	102
A.4	Kabelumlenkrolle	103
A.5	MODUS-Geräteträger für 4000 m Einsatztiefe	104
A.6	Kraftmesswaage am MODUS	105
B	Messtechnik	106
B.1	Neigungssensor (OSTAR-Compass) – Datenblatt.....	107
B.2	Beschleunigungssensoren (Typ ADXL202/AQC) – Datenblatt.....	108
B.3	Lastsensor an der Umlenkrolle- Datenblatt.....	109
B.4	Lastsensor am MODUS – DMS-Applikation	110
B.5	Messverstärker – Datenblatt.....	111
B.6	Drucksensor – Datenblatt	112
B.7	Telemetrie – Datenblatt	113
C	Ausgewählte Messergebnisse	114
C.1	Beispieldatenprotokoll.....	115
C.2	Schwingversuche MD und MD+BS in M1:5.....	117
C.3	Widerstandsversuche M1:5, M1:3, M1:1	125

A Konstruktionszeichnungen

A.1 Forschungsschiff F/S URANIA



61,30 m
52,50 m
11,10 m
5,30 m
3,60 m
1115 t

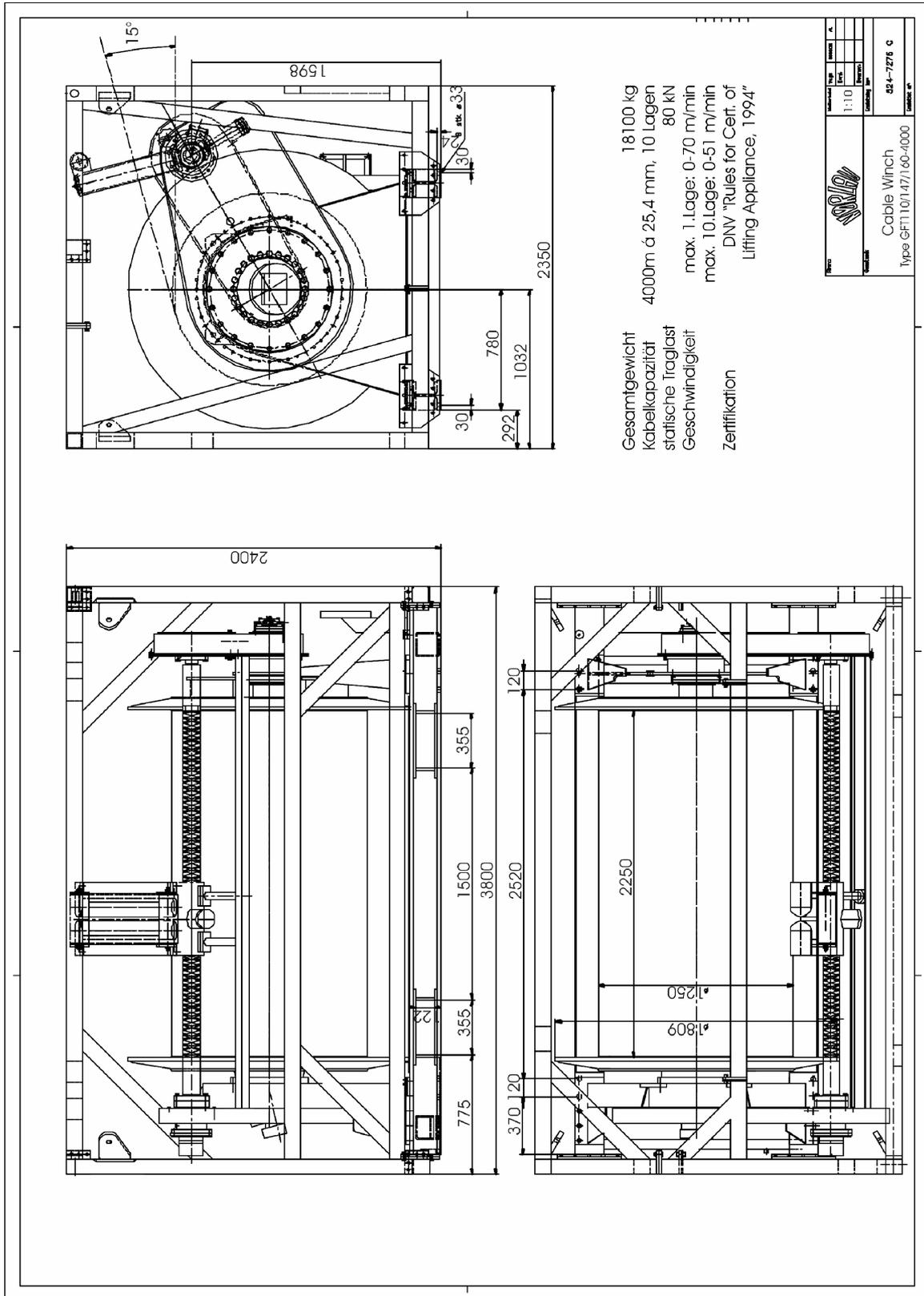
Gesamtlänge L_{OA}
Länge zwischen den Loten L_{PP}
Breite
Seitenhöhe
Entwurfstiefe
Verdrängung



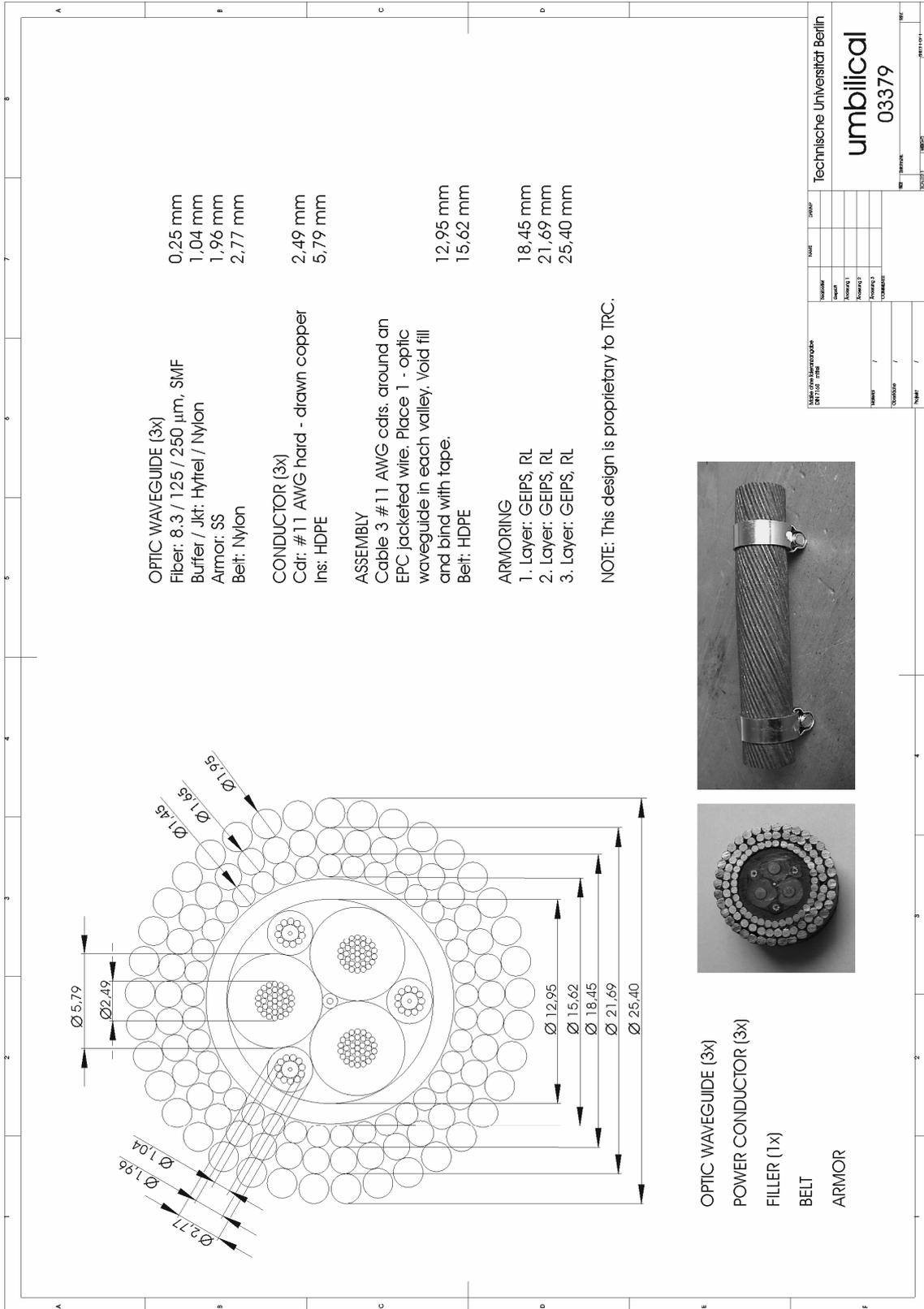
Konstruktions: Cantiere Navale Mario Morini s.p.a		NAME	DESIGN
Hersteller	Projekt		
Geograf	Architektur 1		
Architektur 1	Architektur 2		
Architektur 2	Architektur 3		
Architektur 3	COMMENTS		
NUMERO	COMMENTS		
PROJEKT			
SCALE	DATE		
NO. OF SHEETS	TOTAL NO. OF SHEETS		

F/S Urania

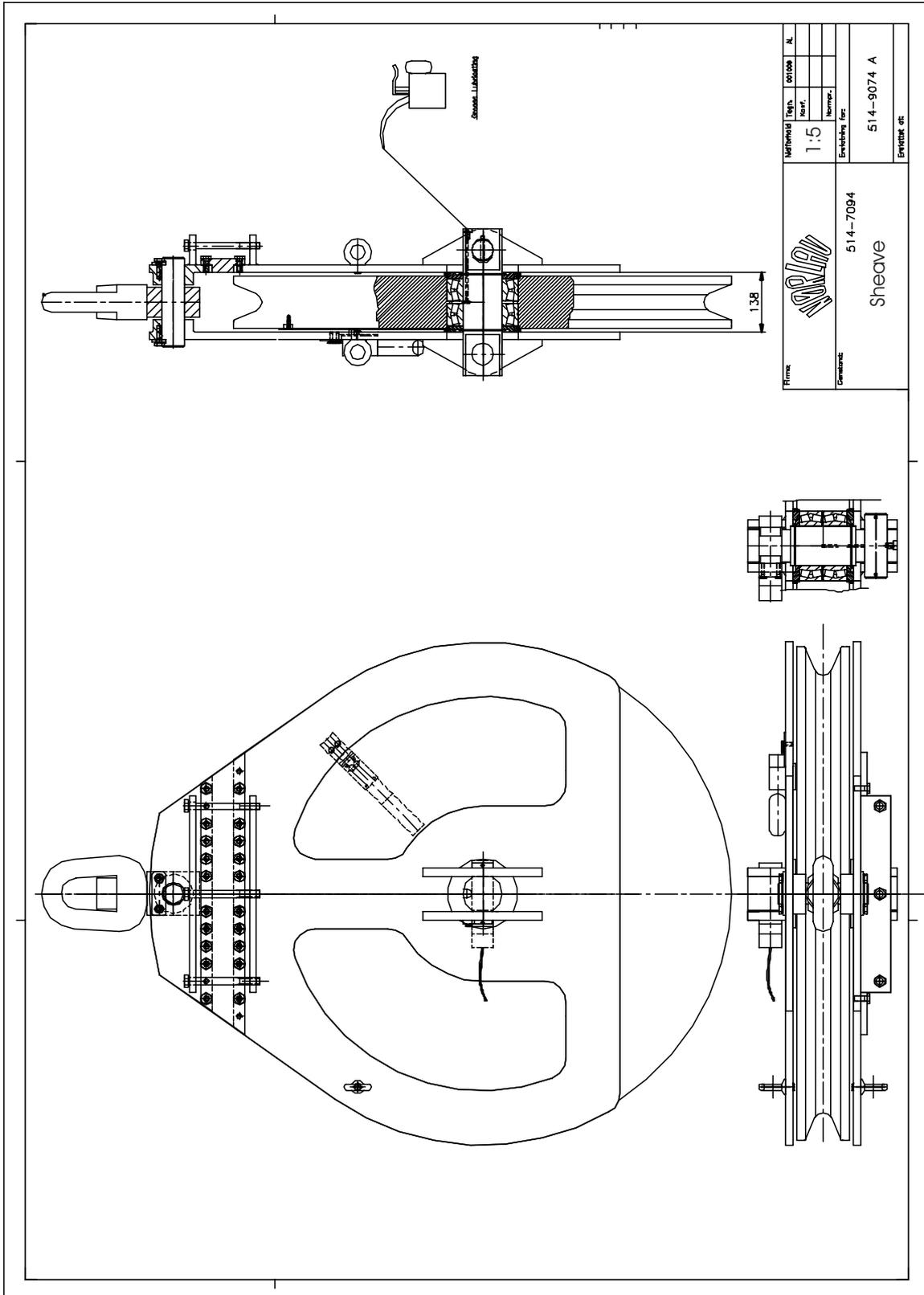
A.2 Winde Cormac 4000/25,4-89 ROV



A.3 Umbilical Rochester 03379



A.4 Kabelumlenkrolle



B Messtechnik

B.1 Neigungssensor (OSTAR-Compass) – Datenblatt**OSTAR COMPASS SPECIFICATIONS**

Instrument Parameter	Magnetic Vector Direction	Gravity Vector Direction	Computed Heading *	Computed Tilt	Temperature
Units	Degrees	G's	Degrees	Degrees	Celsius
Range	+ 2 Gauss	+ 2	0 - 360	0 to 45	-10 to +40
Accuracy	± 0.0010	± 0.040	± 2.0	± 0.20	0.50
Resolution	0.0005	0.005	0.01	0.01	0.01

* Specified @ +/- 40 Degree Latitude Maximum & +/- 15 Degree Tilt

Power Input	6 - 16 VDC @ 45 mA
Alignment	Sensors to Card Mounting Holes ± 0.5 Degrees
Sampling Rate	3 Samples / Second Max
Turn On Time	1.5 Seconds Power to 1st Data
Output	RS-232 or RS-485 Serial Data
Format	ASCII Encoded Data In Physical Units
Output Data Types	Hx, Hy, Hz, Heading, Tx, Ty, Tilt, Temperature User Selectable
Baud Rates	9.6 K or 19.2 K Baud
Output Filter	Boxcar, User Settable 2 - 1000 Samples
Output Selection	Continuous, Scaled, Raw Counts
Calibration	Initial Factory Computer Controlled Helmholtz & Tilt
Field Calibration	User Hard Iron Rotation Calibration with Quality Factor
Dimensions	Printed Circuit Card, 35 mm x 70 mm x 10mm high, Four Each Mounting Holes 2.54 x 2.54 mm in from corners with 4-40 standoffs
Connector	Molex 4 pin housing with lock, #2695

Specifications Subject to Change without Notice

 **Excellence In Instrumentation**

Rev. 1Vb (6/22/01)

1400 Route 28A, P.O. Box 315 • Cataumet, MA 02534-0315 • email: fsi@falmouth.com
Telephone: 508/564-7640 • Facsimile: 508/564-7643 • Website: www.falmouth.com

B.2 Beschleunigungssensoren (Typ ADXL202/AQC) – Datenblatt

ADXL202/ADXL210—SPECIFICATIONS ($T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , $T_A = +25^\circ\text{C}$ for J Grade only, $V_{DD} = +5\text{ V}$, $R_{SET} = 125\text{ k}\Omega$, Acceleration = 0 g , unless otherwise noted)

Parameter	Conditions	ADXL202/JQC/AQC			ADXL210/JQC/AQC			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
SENSOR INPUT	Each Axis							
Measurement Range ¹		±1.5	±2		±8	±10		g
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.2			0.2		% of FS
Alignment Error ²			±1			±1		Degrees
Alignment Error	X Sensor to Y Sensor		±0.01			±0.01		Degrees
Transverse Sensitivity ³			±2			±2		%
SENSITIVITY	Each Axis							
Duty Cycle per g	T1/T2 @ +25°C	10	12.5	15	3.2	4.0	4.8	%/g
Sensitivity, Analog Output	At Pins X _{FILT} , Y _{FILT}		312			100		mV/g
Temperature Drift ⁴	Δ from +25°C		±0.5			±0.5		% Rdg
ZERO g BIAS LEVEL	Each Axis							
0 g Duty Cycle	T1/T2	25	50	75	42	50	58	%
Initial Offset			±2			±2		g
0 g Duty Cycle vs. Supply			1.0	4.0		1.0	4.0	%/V
0 g Offset vs. Temperature ⁴	Δ from +25°C		2.0			2.0		mg/°C
NOISE PERFORMANCE								
Noise Density ⁵	@ +25°C		500	1000		500	1000	μg/√Hz
FREQUENCY RESPONSE								
3 dB Bandwidth	Duty Cycle Output		500			500		Hz
3 dB Bandwidth	At Pins X _{FILT} , Y _{FILT}		5			5		kHz
Sensor Resonant Frequency			10			14		kHz
FILTER								
R _{FILT} Tolerance	32 kΩ Nominal		±15			±15		%
Minimum Capacitance	At X _{FILT} , Y _{FILT}	1000			1000			pF
SELF TEST								
Duty Cycle Change	Self-Test “0” to “1”		10			10		%
DUTY CYCLE OUTPUT STAGE								
F _{SET}			125 MΩ/R _{SET}			125 MΩ/R _{SET}		kHz
F _{SET} Tolerance	R _{SET} = 125 kΩ	0.7		1.3	0.7		1.3	kHz
Output High Voltage	I = 25 μA		V _S – 200 mV			V _S – 200 mV		mV
Output Low Voltage	I = 25 μA			200			200	mV
T2 Drift vs. Temperature			35			35		ppm/°C
Rise/Fall Time			200			200		ns
POWER SUPPLY								
Operating Voltage Range		3.0		5.25	2.7		5.25	V
Specified Performance		4.75		5.25	4.75		5.25	V
Quiescent Supply Current			0.6	1.0		0.6	1.0	mA
Turn-On Time ⁶	To 99%		160 C _{FILT} + 0.3			160 C _{FILT} + 0.3		ms
TEMPERATURE RANGE								
Operating Range	JQC	0		+70	0		+70	°C
Specified Performance	AQC	-40		+85	-40		+85	°C

NOTES

¹For all combinations of offset and sensitivity variation.

²Alignment error is specified as the angle between the true and indicated axis of sensitivity.

³Transverse sensitivity is the algebraic sum of the alignment and the inherent sensitivity errors.

⁴Specification refers to the maximum change in parameter from its initial at +25°C to its worst case value at T_{MIN} to T_{MAX}.

⁵Noise density (μg/√Hz) is the average noise at any frequency in the bandwidth of the part.

⁶C_{FILT} in μF. Addition of filter capacitor will increase turn on time. Please see the Application section on power cycling.

All min and max specifications are guaranteed. Typical specifications are not tested or guaranteed.

Specifications subject to change without notice.

B.3 Lastsensor an der Umlenkrolle- Datenblatt

Load
Force
Measuring
234-3008

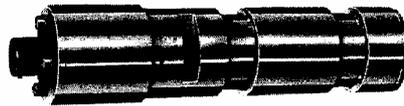
LE 210 Series



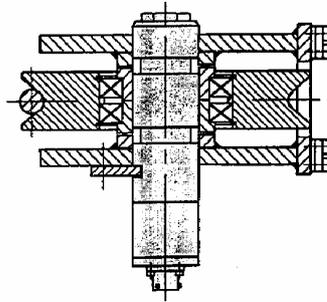
Load Measuring Pins 2-Wire; 4 to 20 mA

FEATURES

- Temperature-compensated transducers with strain gauges in full-bridge configuration
- Available in 10 standard ranges from 2.5 to 1250 kN
- Integrated 2-wire signal amplifier for transmission over great distances
- EMC execution for reliable trouble-free operation
- Rugged design corresponding to the quality characteristics of the LB 210 series
- Simple installation for cost-savin solutions to construction problems



MOUNTING EXAMPLE



TYPICAL APPLICATIONS

When forces acting on mechanical constructions are measured, the additional equipment required can often be costly and difficult to install. The load measuring pin offers an excellent solution since it acts as a direct element in the assembly, replacing a non-instrumented pin or shaft. The LE is a result of continual development of the well established LB series. The integral signal amplifier makes it ideal for applications in which separate signal conditioning is difficult to install and where the monitoring electronics are positioned at extended distances.

APPLICATION FIELDS

- Load measuring devices and overload protecting instruments on:
 - cranes, hoisting gear, elevators and winches

Owing to the EMC execution of the LE load measuring pins their operation remains trouble-free and reliable even in electromagnetically difficult environmental conditions.

SPECIFICATIONS (Standard Version)*

LE 210 Series

DESIGN

The load measuring pin has 2 circular grooves and an axial bore. Inside the central bore, adjacent to the external grooves, the 4 strain gauges are mounted in a full-bridge configuration. This positioning and orientation of the strain gauges has been optimized by means of the finite element method (FEM).

OPERATING PRINCIPLE

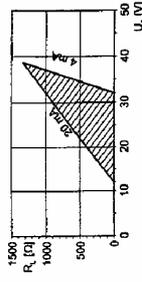
When a force is applied to the load measuring pin along its sensitive axis, the effect on the strain gauge bridge results in an output signal proportional to the applied force and which is converted by the integrated electronics to a standard 4 to 20 mA output. The line amplifier, realized in SMD (surface mounted device) technique, is protected by an appropriate circuitry against environmental radiation.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

- Function principle : Full-bridge strain gauge
- Supply voltage : 5/10/0 Ω
- Rated current : Rated 4 to 20 mA; maximal 3.5 to 25 mA
- Output signal : 12 to 32 V DC with protected polarity reversal
- Power supply : < 0.25 % of f_{sd} (LE 220 & LE 221 : 0.5 %)
- Non-linearity : < 0.5 % of f_{sd} (LE 220 & LE 221 : 0.8 %)
- Repeatability : ± 0.1 % of f_{sd}
- Operating temperature : -25°C to +80°C
- Storage temperature : -55°C to +125°C
- Temperature influence : ± 0.02 % / K
- Temperature influence on amplification/gain : ± 0.02 % / K
- Long term stability : < 1 % of f_{sd} / year no-cumulative
- of zero : < 0.5 % of f_{sd} / year no-cumulative
- Influence on measurement signal : According to the cosine function
- shift of force angle with respect to measurement axis

ELECTRICAL CONNECTION

- Output connector : Axial, type MS 3112 E 10-6P
- Configuration : 2-wires
- Connection cable assembly : Options 3, 6, 12, 20 m with:
 - straight conductor / MS 3118, 110, 6S
 - shielded conductor / MS 3118, 110, 6S/50
 - 4P* / Straight MS 08 EC 10 6S/50
- Load resistance : Admissible resistance of the 2-wire circuit at the connection of the LE 210
 - load resistance R_L
 - supply voltage U_s



MECHANICAL CHARACTERISTICS

- Material : LB load measuring pin : stainless steel 1.4057
- LE transmitter housing : stainless steel 1.4305
- Nominal load (f_{sd}) : Refer to table on page 3
- Overload admissible : 150 % of rated load without influence on the measurement
- Overload at rupture : ≥ 500 % of rated load according to the type
- Standard calibration : 0 kN = 4 mA 30.25 mA
- EMC : f_{sd} in kN = 16 mA 3.3 %
- Protection class : according to EN 50082-2 (1991)
- Fit : IP 68 according to DIN 40050
- Lubrication : C7 / H6
- Weight : Oiler 4 DIN 3405 D or M10 DIN 3405 A according to the LE type
- * For the special load measuring pins, some characteristics are not always valid.

B.5 Messverstärker – Datenblatt

3B18 Specifications

(typical @ +25°C and ±15 V dc, and +24 V dc Power)

Description	Model 3B18
	Input Range
Standard Range	±30 mV (3 mV/V sensitivity @ $V_{exc} = +10V$) ±10 mV (3 mV/V sensitivity @ $V_{exc} = +3.33 V$)
Custom Ranges	±5 mV to ±500
	Output Range
Voltage ($R_L > 2 K\Omega$)	-10 V to +10 V
Current ($R_L = 0$ to 850Ω) ¹	4 mA to 20 mA or 0 mA to 20 mA
Maximum Current Output Span	0 mA to 31 mA
	Accuracy ²
Initial @ +25°C	±0.1% Span
Nonlinearity ²	±0.01% Span
	Stability vs. Temperature
Voltage Output	
Zero	±3 $\mu V/^\circ C$ (RTI)
Span	±25 ppm of Reading/ $^\circ C$
Current Output ³	
Zero	±25 ppm of Span/ $^\circ C$
Span	±25 ppm of Reading/ $^\circ C$
	Bridge Excitation
Voltage user-selectable	+10 V or +3.33 V
Voltage, tolerance	±2%
Voltage vs. Temperature	±0.0015%/ $^\circ C$
	Bridge Resistance Range
$V_{exc} = +10.0 V$	300 Ω to 1 k Ω
$V_{exc} = +3.33 V$	100 Ω to 10 k Ω
Zero and Span Adjustment Range ⁴	±5% of Span
Input Bias Current	+25 nA
Input Resistance	100 M Ω
Bandwidth, -3 dB	20 kHz
Output Rise Time, 10% to 90% Span	24 μs
	Common-Mode Voltage (CMV)
Input-to-Output, Continuous	±10 V peak, maximum
Transient	ANSI/IEEE C37.90.1-1989
	Common Mode Rejection (CMR)
1 k Ω Source Imbalance, 50/60 Hz	100 dB
	Input Protection, Signal and Excitation Voltage
Continuous	130 V rms maximum
Transient	ANSI/IEEE C37.90.1-1989
Voltage Output Protection	Continuous Short to Ground
Current Output Protection	130 V rms, continuous
	Power Supply Voltages ⁵
±15 V dc Supplies	
Rated Operation	±(13.5 V dc to 16.5 V dc)
Current	+50 mA, -15 mA
Sensitivity	±0.01% span/V
+24 V dc Loop Supply	
Rated Operation	+12 V dc to +30 V dc
Current	+27 mA @ $I_{out} = 20$ mA
Sensitivity	±0.0002% span/V
Mechanical Dimensions	3.15" x 3.395" x 0.775" (80.0 mm x 86.2 mm x 19.7 mm)
	Environmental
Temperature Range	
Rated Performance	-25°C to +85°C
Storage	-55°C to +85°C
Relative Humidity, 24 hours	0 to 95% @ +60°C non-condensing
RFI Susceptibility	±0.5% Span error @ 400 MHz, 5 Watt, 3 ft

¹ For a 0 mA to 20 mA range, a typical minimum output current is 10 μA .

² Includes the combined effects of repeatability, hysteresis, and nonlinearity.

³ With respect to the voltage output.

⁴ A wide range of custom zero suppression and span is available with the 3B18-00 model, using the AC1310 ranging card.

⁵ +24 V dc loop power is required for driving the current output at loads up to 850 Ω . If a current output load of 400 Ω or less is applied, +15 V dc is sufficient for loop power. If only voltage output is used, loop power is not required.

B.6 Drucksensor – Datenblatt



SPEZIFIKATIONEN

STANDARD-DRUCKBEREICHE (FS) UND ÜBERDRUCK IN BAR

PR-33		-1	1	3	10	30			
PAA-33	Bemerkung:		1	3	10	30			
PA-33	Die Bereiche + / - / ± 0,1, 0,2 oder 0,5 bar werden		1	3	10	30	100	300	1000
PR-35 S	durch den 1 bar Transmitter realisiert.	-1	1	3	10	30			
PAA-35 S	Genauigkeit für diese Bereiche: 1 mbar (10...40°C)		1	3	10	30			
PA-35 S			1	3	10	30	100	300	
Überdruck		-1	3	7	20	60	200	300	1000

Alle Zwischenbereiche für den Analogausgang aus den Standardbereichen durch Spreizung ohne Mehrpreis.
Option: Abgleich direkt auf Zwischenbereiche mit Mehrpreis.

Lager-/Betriebstemperatur	-40...80 °C
Kompensierter Standard-Bereich	10...40 °C (-10...80 °C opt.)
Genauigkeit (10...40 °C) (1) (2) (3)	0,05 %FS
Genauigkeit (-10...80 °C) (1) (2) (3)	0,1 %FS
Ausgaberate	100 Hz
Auflösung	≤ 0,01 %FS
Langzeitstabilität typ.	Bereich ≤ 2 bar: 0,5 mbar Bereich > 2 bar: 0,05 %FS

(1) Linearität + Hysterese + Reproduzierbarkeit + Temperaturkoeffizienten + Nullpunkt + Bereichstoleranz
(2) Genauigkeit und Auflösung gelten bei Basismessbereich
(3) Linearität: Beste Gerade

Ausgangssignal	4...20 mA, 2 Leiter	0...10 V, 3 Leiter
Speisung (U)	8...28 Vcc	13...28 Vcc
Bürdenwiderstand (Ω)	(U-5V) / 0,02A	> 5 000
Elektrischer Anschluss	- MIL C-26482 Stecker (6 polig) - Binder-Stecker 723 (5 polig) - DIN-Stecker 43650 (4 polig)	
Programmierung	RS485 (2 Leiter) / optional PROG30, Adapter K106	
Isolation	100 MΩ / 50 V	

Druckfestigkeit	10 Mio. Druckzyklen 0...100 %FS bei 25 °C
Vibrationsfestigkeit	20 g, 20 bis 5 000 Hz
Schockfestigkeit	20 g sinus 11 msek.
Schutzart	IP65 optional: - IP 67 -IP68 (mit Kabel)
CE-Konformität	EN 50081-2, EN 50082-2
Material in Mediumkontakt	Rostfreier Stahl 316L (DIN 1.4435) / Viton
Gewicht	Serie 33 ≈ 140 g; Serie 35 S ≈ 160 g
Totvolumenänderung	< 0,1 mm ³

Optionen

Alle Druckbereiche zwischen 0,5 und 1000 bar / Andere kompensierte Temperaturbereiche / Speisung 32 V / Elektrischer Kabelausgang / Ölfüllung: Für Sauerstoffbetrieb, Olivenöl, Tief-temperaturöl / Andere Druckanschlüsse / Andere Steckeranschlüsse / Andere Materialien

Polynomische Kompensation

Hierbei handelt es sich um eine mathematische Formel, mit deren Hilfe der exakte Druckwert (P) in Abhängigkeit von den Signalen der Druckaufnehmer (S) und der Temperaturaufnehmer (T) ermittelt werden kann. Der Mikroprozessor des Drucktransmitters ermittelt den Wert P aufgrund des folgenden Polynoms:

$$P(S,T) = A(T) \cdot S^0 + B(T) \cdot S^1 + C(T) \cdot S^2 + D(T) \cdot S^3$$

Für die Koeffizienten A(T)...D(T) gilt temperaturabhängig:

$$A(T) = A_0 \cdot T^0 + A_1 \cdot T^1 + A_2 \cdot T^2 + A_3 \cdot T^3$$

$$B(T) = B_0 \cdot T^0 + B_1 \cdot T^1 + B_2 \cdot T^2 + B_3 \cdot T^3$$

$$C(T) = C_0 \cdot T^0 + C_1 \cdot T^1 + C_2 \cdot T^2 + C_3 \cdot T^3$$

$$D(T) = D_0 \cdot T^0 + D_1 \cdot T^1 + D_2 \cdot T^2 + D_3 \cdot T^3$$

Der Drucktransmitter wird werkseitig bei verschiedenen Druck- und Temperaturstufen gemessen. Die entsprechenden Werte von (S) erlauben danach, auf der Grundlage der exakten Druck- und Temperaturwerte die Koeffizienten A0...D3 zu ermitteln. Diese werden im EEPROM des Mikroprozessors gespeichert.

Während des Betriebs des Drucktransmitters misst der Mikroprozessor die Signale (S) und (T), errechnet die Koeffizienten temperaturabhängig und ermittelt durch Auflösung der Gleichung P(S,T) den exakten Druckwert.

Die Berechnungen und Umwandlungen erfolgen mindestens 100-mal pro Sekunde. Die theoretische Auflösung liegt zwischen 0,01 und 0,005%. In der Praxis allerdings ist die Präzision aufgrund der Abgleichgenauigkeit auf 0,05% begrenzt.

ZUBEHÖR SERIE 30

Jeder Serie 30 Transmitter hat auch eine digitale Schnittstelle (RS485 halbduplex), die der Gebraucher nutzen kann. Der Transmitter wird über den Konverter K106 (RS232-RS485) an einen PC oder Laptop angeschlossen. Zwei Programme stehen zur Verfügung:

PROG30:

Geräteeinstellungen

- Informationen abfragen (Druck- und Temperaturbereich, Software-Version etc.)
- Aktueller Druckmesswert anzeigen
- Einheiten wählen
- Transmitter nullen
- Analogausgang umprogrammieren (z.B. andere Einheit, anderer Druckbereich)
- Geräteadresse einstellen (für einen Bus-Betrieb)

READ30: Messdatenerfassung mit bis zu zehn Serie 30 Drucktransmittern mit Grafik

- Schnelles Auslesen und Darstellen der Drucksignale in einer Grafik
- Dokumentation von dynamischen Messungen
- Bis zu 10 Transmitter an einem seriellen Anschluss (Bus Betrieb)

SOFTWARE PROG30



Sie können die Transmitter auch in Ihre eigene Software einbinden. Dafür stehen Ihnen eine Dokumentation, eine DLL und LabView VI's zur Verfügung.

AUSTAUSCH DES STECKERANSCHLUSSES (optional)

Bei Laboranwendungen besteht die Anforderung, Drucktransmitter an verschiedenen Messpunkten mit verschiedenartigen elektrischen Anschlüssen einsetzen zu können. Für diesen Fall kann KELLER verschiedene Anschlussstecker liefern. Das Auswechseln der Stecker erfolgt mit einem mitgelieferten Werkzeug.

Änderungen vorbehalten

3/00

KELLER AG für Druckmesstechnik
KELLER Gesellschaft für Druckmesstechnik mbH

St. Gallerstrasse 119
Schwarzwaldstrasse 17

CH-8404 Winterthur
D-79798 Jestetten

Tel. 052 - 235 25 25
Tel. 07745 - 9214 - 0

Fax 052 - 235 25 00
Fax 07745 - 9214 - 50

B.7 Telemetrie – Datenblatt

Sensor data	
Number of I/O's	10 of full duplex @ max. 2 Mb/sec.
Format	RS232, RS422. CL and TTL
Subsea connector type	Subconn® Micro 8 pin
Topside connector type	Min D9 pin male
Sensor voltage Output	12-24 VDC and 110-220 VAC
Sensor power Output	180/350 W(o) 24 VDC
Multibeam data	
Number of up links	4 up link @ min. 100 Mb/sec. or 4 @ min. 5,5 MHz.
Format	(Pseudo) ECL or pseudo video
Link between topside and subsea	3 optical fibres Single Mode
Topside connector type	BNC's
Multibeam power supply Output	24 VDC
Top side unit	
Power supply	110/220 VAC
Tolerance	85-264 VAC
Power Output	Same as Power supply
Dimensions	19" rack mount - 1 U (44,45 mm)
Subsea unit	
Power supply	110 / 220 VAC (from vehicle)
Tolerance	90-132 VAC and 180-264 VAC
Power consumption	Approx. 10 VA
Dimensions	Ø174 mm - 650 mm long
Depth rating	4000 MSW
Material	Titanium grade 5
Weight	35 kg. (air) – 18 kg. (water)

C *Ausgewählte Messergebnisse*

C.1 Beispieldatenprotokoll

Teile a, b und c eines Ausschnittes eines Logfiles eines Tiefseeinsatzes (Bedeutungen siehe unten).

Project ORION
Mission 1
Vessel R/V Urania
Cable 3379
Dive 59
Date 14.12.2003

Unit	Time-stamp	Xavg	Xmax	Yavg	Ymax	Unit	Time-stamp	Xavg	Xmax	Yavg	Ymax	Unit	Time-stamp	Xtilt	Ytilt	Tilt	Heading	Temp.	Unit	Time-stamp	Xtilt	Ytilt
GMT1	08:49:07	-0,032	-0,042	1,03	1,053	GMT2	08:49:08	-0,249	-0,3	0,962	0,982	FS11	08:49:07	2,93	2,34	3,76	243,41	13,17	FSI2	08:49:08	-13	-0,05
GMT1	08:49:08	-0,032	-0,043	1,028	1,037	GMT2	08:49:08	-0,251	-0,319	0,966	0,994	FS11	08:49:08	2,51	2,45	3,51	240,11	13,17	FSI2	08:49:08	-13,18	-0,38
GMT1	08:49:08	-0,03	-0,039	1,007	1,026	GMT2	08:49:09	-0,252	-0,32	0,97	1,003	FS11	08:49:08	1,68	2,28	2,84	243,4	13,17	FSI2	08:49:09	-13,12	-0,2
GMT1	08:49:08	-0,03	-0,038	0,986	1,003	GMT2	08:49:09	-0,255	-0,323	0,968	0,994	FS11	08:49:08	0,64	2,28	2,36	240,38	13,17	FSI2	08:49:09	-13,21	0,57
GMT1	08:49:09	-0,034	-0,045	0,978	0,994	GMT2	08:49:09	-0,259	-0,344	0,972	0,994	FS11	08:49:09	-0,52	2,34	2,41	240,94	13,17	FSI2	08:49:09	-13,65	0,74
GMT1	08:49:09	-0,038	-0,049	0,994	1,011	GMT2	08:49:10	-0,262	-0,303	0,978	1,007	FS11	08:49:09	-1,95	2,75	3,37	241,82	13,17	FSI2	08:49:10	-13,98	0,41
GMT1	08:49:09	-0,044	-0,053	0,99	1,003	GMT2	08:49:10	-0,265	-0,309	0,98	1,017	FS11	08:49:09	-3,12	2,81	4,19	238,78	13,17	FSI2	08:49:10	-14,16	-0,37
GMT1	08:49:10	-0,044	-0,057	0,981	0,992	GMT2	08:49:10	-0,265	-0,326	0,98	1,007	FS11	08:49:10	-3,8	2,98	4,83	239,64	13,17	FSI2	08:49:10	-14,07	-0,9
GMT1	08:49:10	-0,044	-0,053	0,979	0,994	GMT2	08:49:11	-0,259	-0,33	0,972	0,992	FS11	08:49:10	-4,23	2,87	5,13	240,69	13,17	FSI2	08:49:11	-13,73	-1,1
GMT1	08:49:10	-0,045	-0,055	0,992	1,007	GMT2	08:49:11	-0,251	-0,33	0,96	0,992	FS11	08:49:10	-4,78	3,03	5,66	237,48	13,17	FSI2	08:49:11	-13,28	-0,69
GMT1	08:49:11	-0,042	-0,053	1,017	1,034	GMT2	08:49:11	-0,242	-0,31	0,952	0,976	FS11	08:49:11	-5,4	3,02	6,19	239,23	13,17	FSI2	08:49:11	-12,74	0,44
GMT1	08:49:11	-0,04	-0,049	1,028	1,044	GMT2	08:49:12	-0,235	-0,292	0,943	0,976	FS11	08:49:11	-4,81	2,85	5,59	237,99	13,17	FSI2	08:49:12	-12,52	1,72
GMT1	08:49:11	-0,039	-0,053	1,028	1,04	GMT2	08:49:12	-0,235	-0,299	0,946	0,972	FS11	08:49:11	-3,07	2,72	4,1	238,68	13,17	FSI2	08:49:12	-12,58	2,45
GMT1	08:49:12	-0,04	-0,048	1,03	1,041	GMT2	08:49:13	-0,237	-0,276	0,952	0,976	FS11	08:49:12	-1,21	2,58	2,85	239,34	13,17	FSI2	08:49:13	-12,7	2,6
GMT1	08:49:12	-0,04	-0,053	1,032	1,041	GMT2	08:49:13	-0,239	-0,319	0,958	1,003	FS11	08:49:12	0,09	2,71	2,71	237,85	13,17	FSI2	08:49:13	-12,81	2,45
GMT1	08:49:13	-0,04	-0,049	1,036	1,045	GMT2	08:49:13	-0,239	-0,303	0,96	0,984	FS11	08:49:13	0,7	2,88	2,97	239,74	13,17	FSI2	08:49:13	-12,71	2,05
GMT1	08:49:13	-0,039	-0,049	1,022	1,036	GMT2	08:49:14	-0,241	-0,326	0,962	0,984	FS11	08:49:13	0,82	2,7	2,82	237,26	13,17	FSI2	08:49:14	-12,62	1,61
GMT1	08:49:13	-0,036	-0,045	1,003	1,022	GMT2	08:49:14	-0,245	-0,323	0,966	0,99	FS11	08:49:13	0,43	2,46	2,5	237,58	13,17	FSI2	08:49:14	-12,85	1,04
GMT1	08:49:14	-0,035	-0,044	0,992	1,003	GMT2	08:49:14	-0,252	-0,325	0,972	1,007	FS11	08:49:14	-0,09	2,36	2,36	238,64	13,17	FSI2	08:49:14	-13,19	0,67
GMT1	08:49:14	-0,036	-0,048	0,992	1,005	GMT2	08:49:15	-0,261	-0,299	0,98	0,998	FS11	08:49:14	-0,82	2,34	2,49	234,99	13,17	FSI2	08:49:15	-13,75	0,33
GMT1	08:49:14	-0,04	-0,049	0,994	1,003	GMT2	08:49:15	-0,266	-0,319	0,986	1,021	FS11	08:49:14	-1,65	2,58	3,07	237,95	13,17	FSI2	08:49:15	-14,31	-0,07
GMT1	08:49:15	-0,042	-0,052	0,988	0,998	GMT2	08:49:15	-0,269	-0,333	0,984	1,01	FS11	08:49:15	-2,38	2,8	3,68	236,55	13,17	FSI2	08:49:15	-14,38	0,09
GMT1	08:49:15	-0,04	-0,052	0,982	0,998	GMT2	08:49:16	-0,266	-0,316	0,982	1,004	FS11	08:49:15	-2,82	2,81	3,98	233,61	13,17	FSI2	08:49:16	-14,28	0,43
GMT1	08:49:15	-0,042	-0,052	0,986	1,003	GMT2	08:49:16	-0,261	-0,305	0,972	0,998	FS11	08:49:15	-3,37	2,79	4,37	236,86	13,17	FSI2	08:49:16	-13,94	0,83
GMT1	08:49:16	-0,04	-0,049	1	1,018	GMT2	08:49:16	-0,252	-0,3	0,962	0,986	FS11	08:49:16	-3,97	2,74	4,83	233,52	13,17	FSI2	08:49:16	-13,62	0,95
GMT1	08:49:16	-0,042	-0,052	1,017	1,026	GMT2	08:49:17	-0,245	-0,325	0,953	0,986	FS11	08:49:16	-4,34	2,96	5,26	233,8	13,17	FSI2	08:49:17	-13,05	0,85
GMT1	08:49:16	-0,04	-0,052	1,03	1,036	GMT2	08:49:17	-0,242	-0,31	0,95	0,974	FS11	08:49:16	-3,76	2,84	4,71	232,73	13,17	FSI2	08:49:17	-12,66	0,21
GMT1	08:49:17	-0,04	-0,052	1,032	1,044	GMT2	08:49:17	-0,242	-0,313	0,95	0,976	FS11	08:49:17	-2,42	2,67	3,61	231,58	13,17	FSI2	08:49:17	-12,77	-0,43
GMT1	08:49:17	-0,04	-0,052	1,037	1,047	GMT2	08:49:18	-0,241	-0,303	0,952	0,98	FS11	08:49:17	-1,13	2,71	2,94	235,1	13,17	FSI2	08:49:18	-12,58	-0,4
GMT1	08:49:17	-0,036	-0,049	1,04	1,051	GMT2	08:49:18	-0,242	-0,313	0,95	0,976	FS11	08:49:17	-0,01	2,63	2,63	232,64	13,17	FSI2	08:49:18	-12,6	0,03

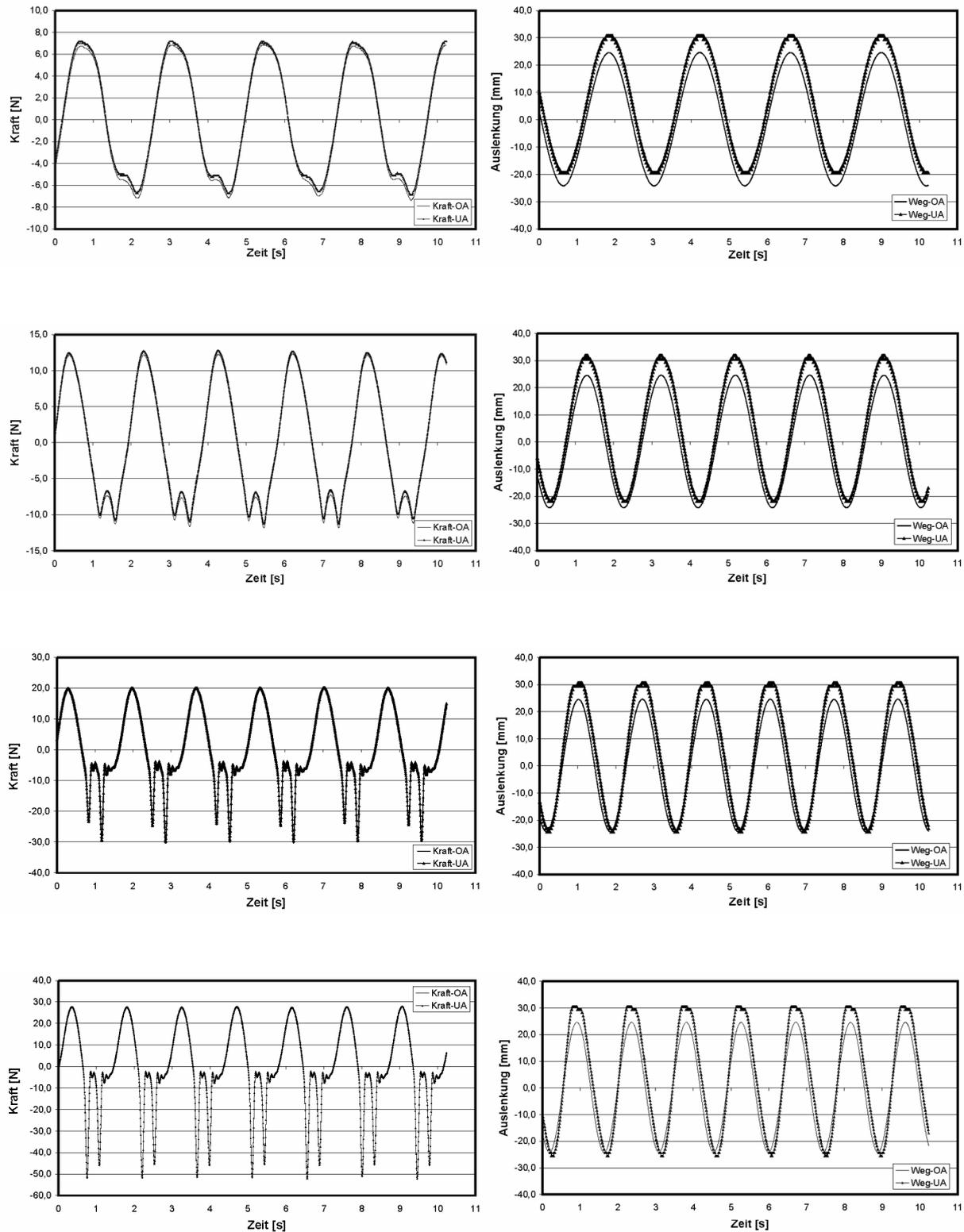
Tilt	Heading	Temp.	Unit	Time-stamp	Depth	Dmin	Unit	Time-stamp	time [min]	Pmax	Cable	Speed	Unit	Time-stamp	V.1.1	V.1.2	V.1.3	V.1.4	V.1.5	V.1.6	V.1.7	V.1.8	
13	57,28	27,33	ALT1	08:49:08	9,477	9,019	WNC1	08:49:08	122,35712	71,6	85,1	3384,1	0	HCB1	08:49:07	0,32	0,12	0,04	0,06	0	0	0	0
13,18	57,18	27,33	ALT1	08:49:08	9,611	9,019	WNC1	08:49:08	122,36295	70,7	85,1	3384,1	0	HCB1	08:49:08	0,35	0,21	0,47	0,04	0	0	0	0
13,12	57,04	27,33	ALT1	08:49:08	9,69	9,019	WNC1	08:49:09	122,36878	69,9	85,1	3384	0,2	HCB1	08:49:08	0,34	0,12	0,8	0,18	0	0	0	0
13,23	57,97	27,33	ALT1	08:49:09	9,763	9,019	WNC1	08:49:09	122,37461	70,1	85,1	3384	0,2	HCB1	08:49:08	0,46	0,1	0,32	0,12	0	0	0	0
13,67	58,79	27,33	ALT1	08:49:09	9,956	9,019	WNC1	08:49:09	122,38044	68,9	85,1	3383,9	0	HCB1	08:49:09	0,4	0,17	0,53	0,19	0	0	0	0
13,99	58,94	27,33	ALT1	08:49:09	9,779	9,019	WNC1	08:49:09	122,38626	69,1	85,1	3383,9	0,2	HCB1	08:49:09	0,35	0,11	0,08	0,11	0	0	0	0
14,16	58,46	27,33	ALT1	08:49:10	9,828	9,019	WNC1	08:49:09	122,39209	69,7	85,1	3383,9	0,2	HCB1	08:49:09	0,27	0,1	0,35	0,2	0	0	0	0
14,1	57,84	27,33	ALT1	08:49:10	9,822	9,019	WNC1	08:49:11	122,39792	72,2	85,1	3383,8	0	HCB1	08:49:10	0,28	0,08	0,29	0,04	0	0	0	0
13,78	57,02	27,33	ALT1	08:49:10	9,729	9,019	WNC1	08:49:11	122,40375	71,8	85,1	3383,8	0	HCB1	08:49:10	0,14	0,04	0,29	0,17	0	0	0	0
13,29	56,71	27,33	ALT1	08:49:11	9,713	9,019	WNC1	08:49:11	122,40958	71,8	85,1	3383,7	0,2	HCB1	08:49:11	0,47	0,07	0,18	0,14	0	0	0	0
12,75	56,97	27,33	ALT1	08:49:11	9,703	9,019	WNC1	08:49:11	122,41541	72,7	85,1	3383,6	0,2	HCB1	08:49:11	0,39	0,19	0,09	0,13	0	0	0	0
12,64	5,8	27,33	ALT1	08:49:12	9,762	9,019	WNC1	08:49:11	122,42124	73,9	85,1	3383,6	0,2	HCB1	08:49:11	0,56	0,16	0,08	0,06	0	0	0	0
12,83	58,5	27,33	ALT1	08:49:12	9,84	9,019	WNC1	08:49:12	122,42707	73,1	85,1	3383,5	0	HCB1	08:49:11	0,41	0,2	0,01	0,04	0	0	0	0
12,97	58,71	27,33	ALT1	08:49:12	9,892	9,019	WNC1	08:49:13	122,43289	72,5	85,1	3383,5	0,2	HCB1	08:49:12	0,3	0,15	0,53	0	0	0	0	0
13,05	58,88	27,33	ALT1	08:49:13	9,979	9,019	WNC1	08:49:13	122,43872	72,3	85,1	3383,5	0,2	HCB1	08:49:12	0,46	0,25	0,39	0,16	0	0	0	0
12,88	58,37	27,33	ALT1	08:49:13	10,064	9,019	WNC1	08:49:13	122,44455	72,2	85												

Legende zum Datenlog mit dem Geräteträger MODUS

Sensor-einheit	Sensor (Einbauort)	Messwert	Bedeutung	Einheit
GMT 1	MODUS - Beschleunigungssensor	Xavg, Xmax	X-Komponente durchschnittliche / maximale	g
		Yavg, Ymax	Y-Komponente durchschnittliche / maximale	g
FSI1	MODUS - OSTAR Kompass	Xtilt, Ytilt	Sensorneigung X- / Y-Komponente	°
		Tilt	Gesamtsensorneigung zur Erdbeschleunigungsachse	°
		Heading	Nordausrichtung des Sensors	°
		Temp	Temperatur des Sensors	°C
GMT2	AFRAME – Beschleunigungssensor	(siehe oben)	(siehe oben)	g
FSI2	AFRAME - OSTAR Kompass	(siehe oben)	(siehe oben)	°
ALT1	MODUS - Altimeter	Depth, Dmin	Distanz zum Seeboden - aktuelle und bisher kleinste	M
WNC1	URANIA - MacArtney Winde	Pull, Pmax	Zuglast am A-Rahmen - aktuelle und bisher maximale	kN
		Cable	Aktuelle Kabellänge	m
		Speed	Aktuelle Kabelgeschwindigkeit	m/s
HCB1	MODUS - A/D Messung	8 x 4 Kanäle	zahlreiche Statusdaten	-
CPU-Zeit		Time-stamp	jeder Sensor wird separat erfasst	hh:mm:ss (:ms)

C.2 Schwingversuche MD und MD+BS in M1:5

Abb. 9-1: MODUS: Zugkräfte und Amplituden am oberen und unteren Kabelende; Maßstab M1:5; Federrate $k_M=2510$ N/m; Erregeramplitude 0,024 m, Frequenzen von ca. 0,42 Hz bis ca. 1 Hz



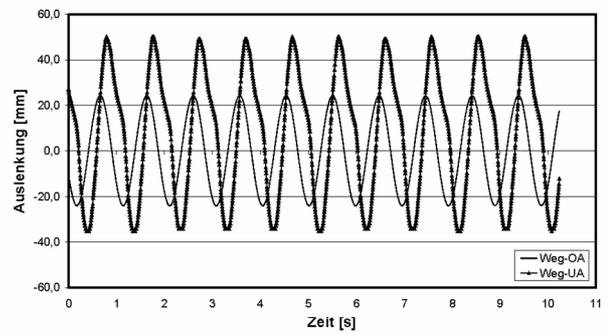
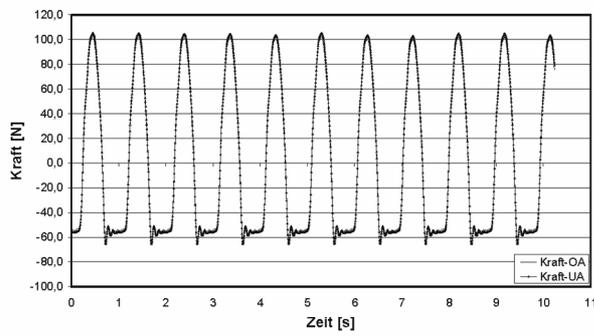
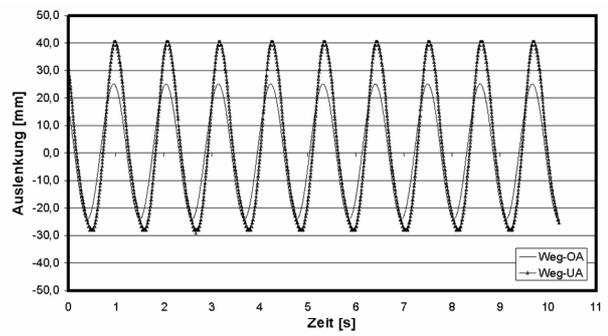
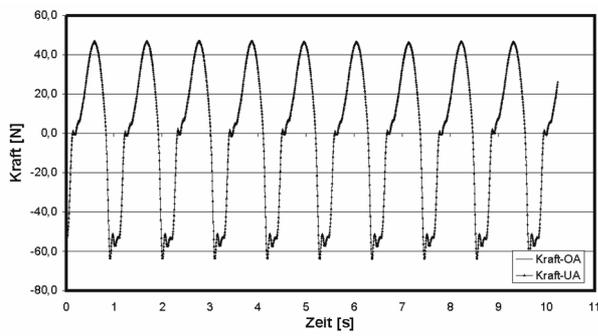
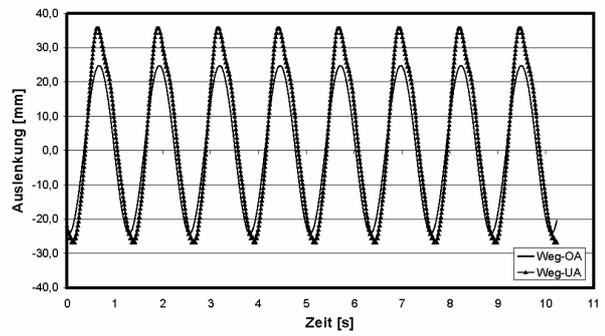
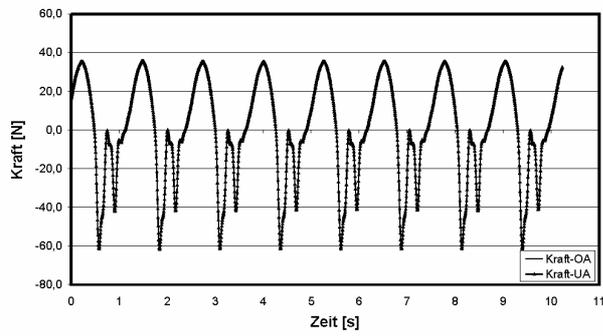
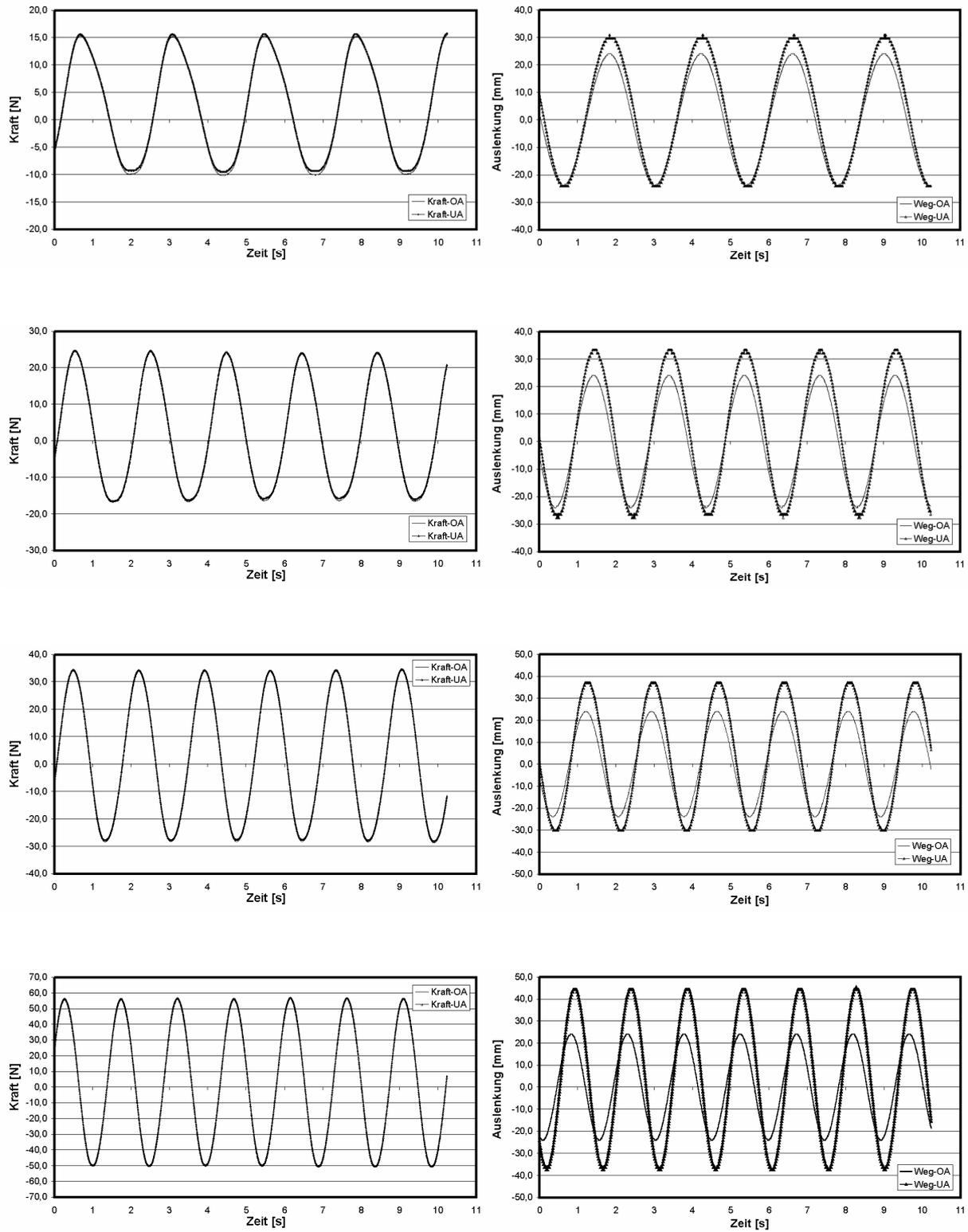


Abb. 9-2: MODUS+Bodenstation: Zugkräfte und Amplituden am oberen und unteren Kabelende; Maßstab M1:5; Federrate $k_M=2510 \text{ N/m}$; Erregeramplitude 0,024 m, Frequenzen von ca. 0,42 Hz bis ca. 1 Hz.



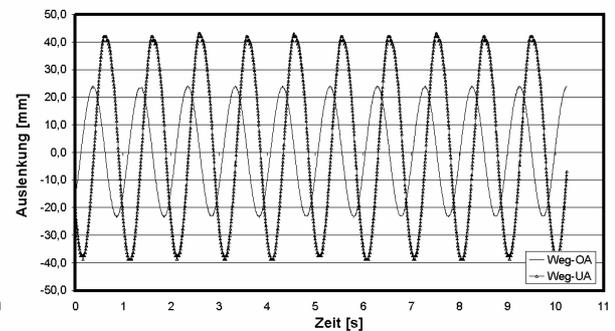
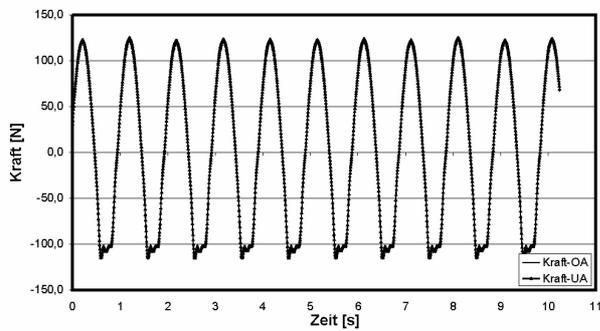
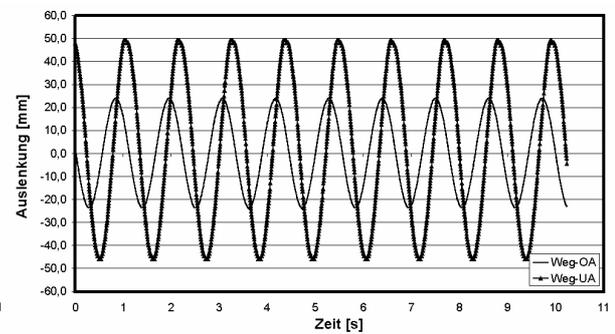
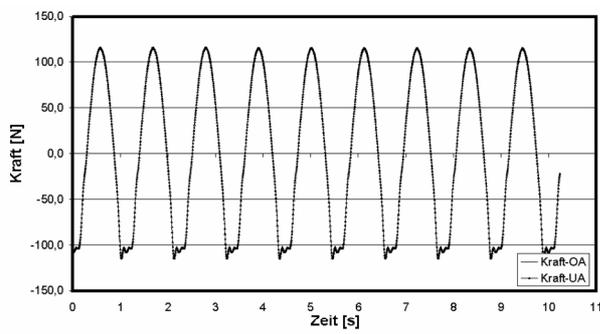
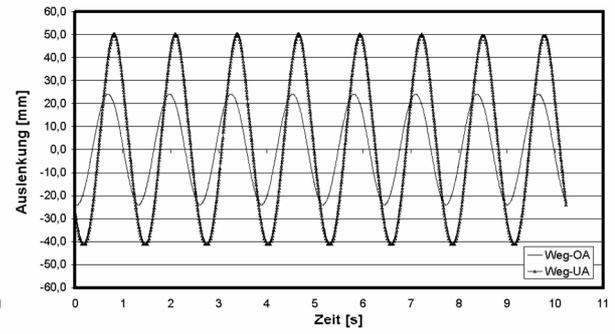
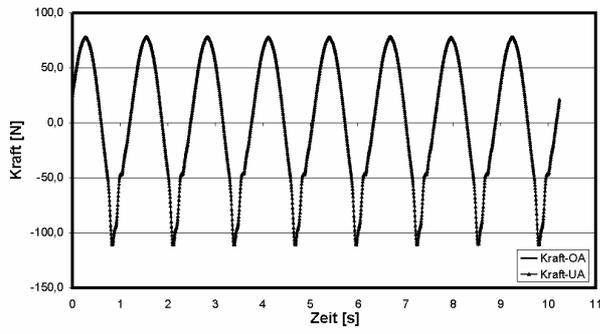
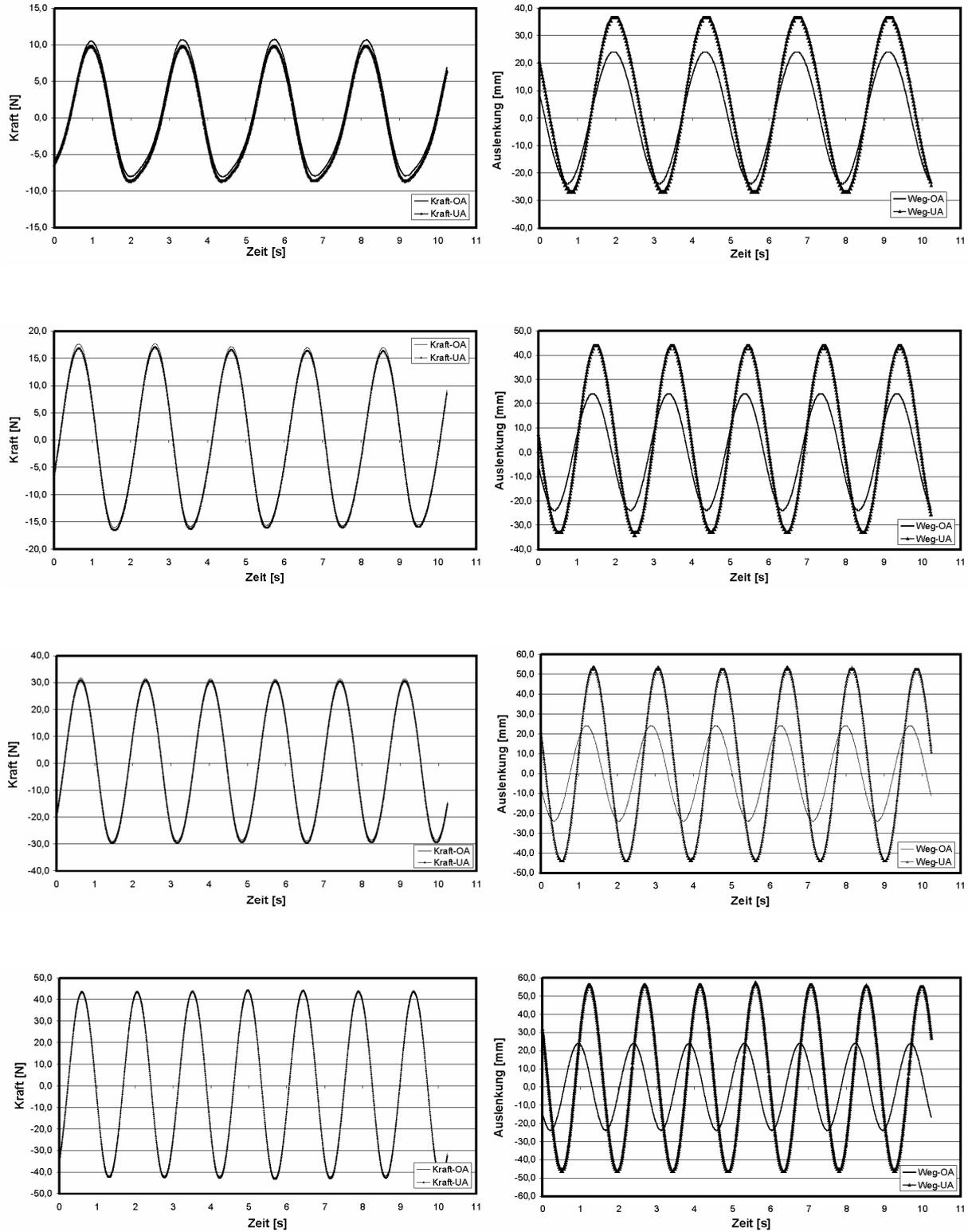


Abb. 9-3: MODUS: Zugkräfte und Amplituden am oberen und unteren Kabelende; Maßstab M1:5; Federrate $k_M=922 \text{ N/m}$; Erregeramplitude 0,024 m, Frequenzen von ca. 0,42 Hz bis ca. 1 Hz



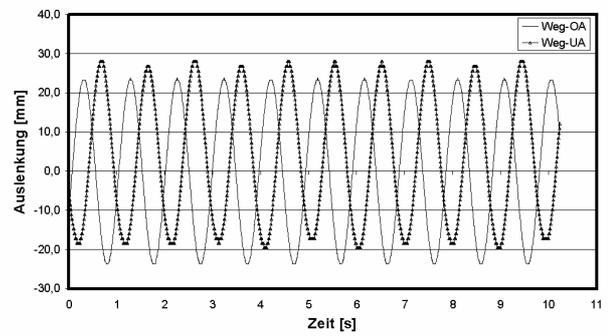
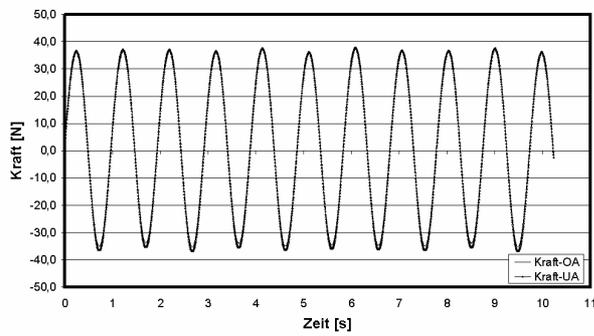
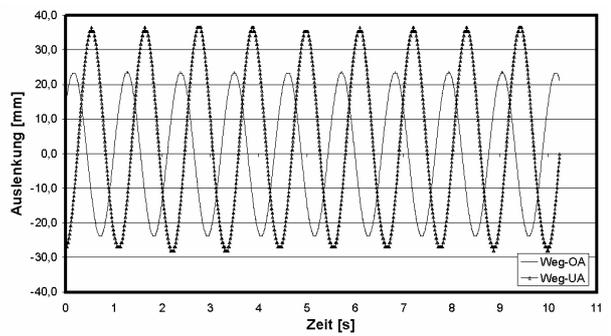
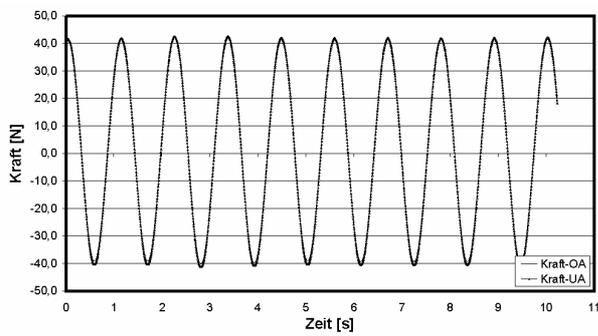
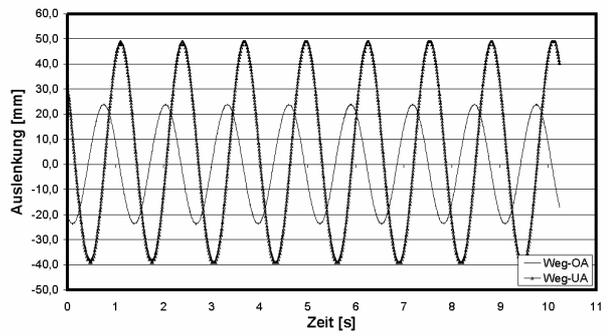
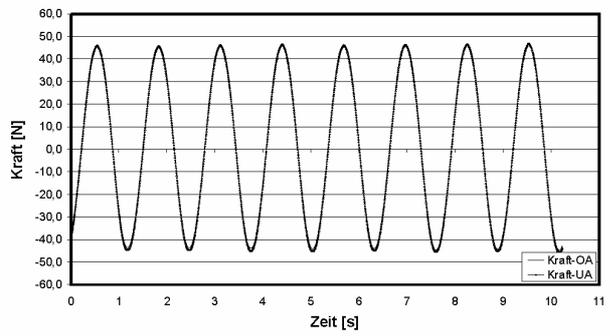
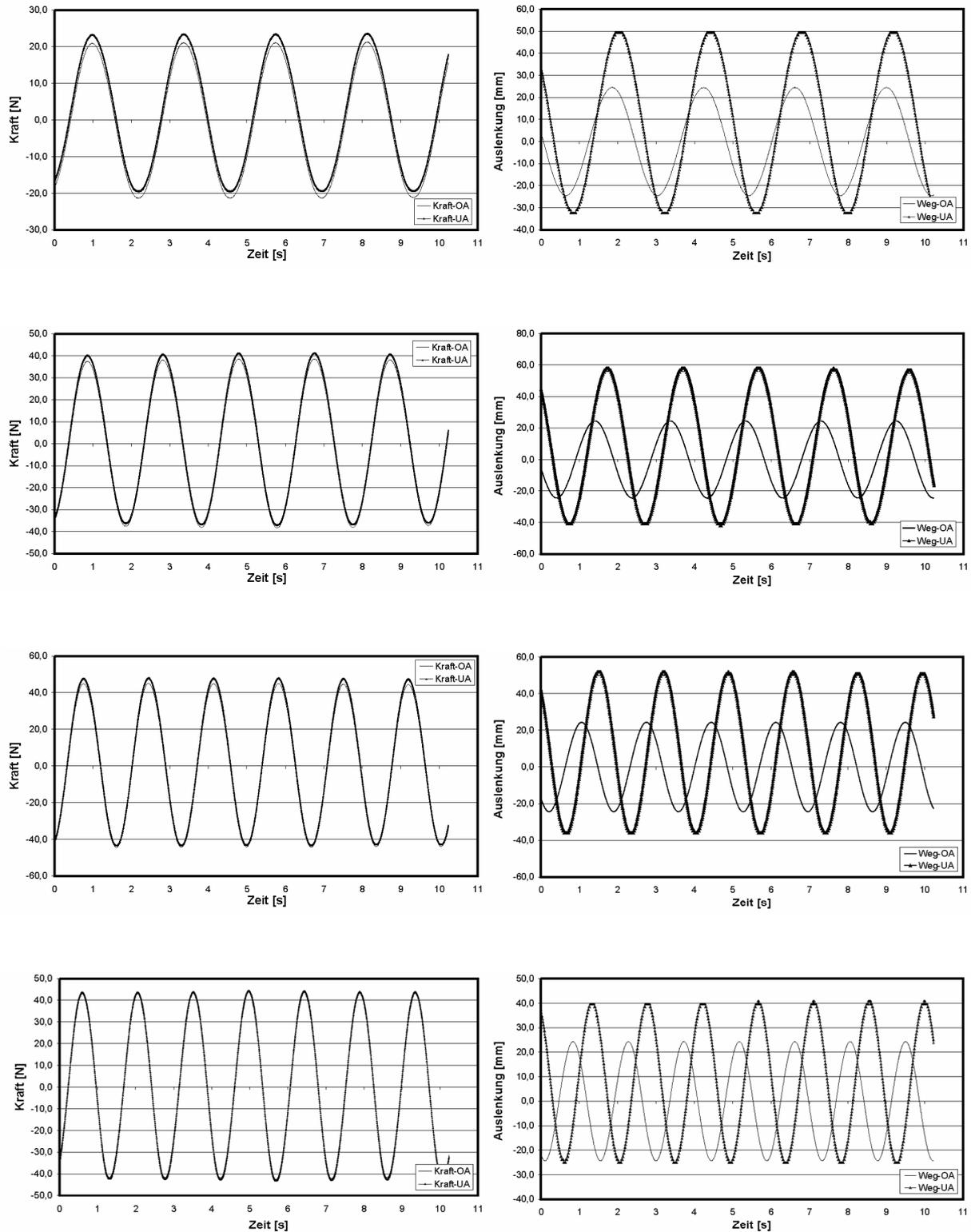
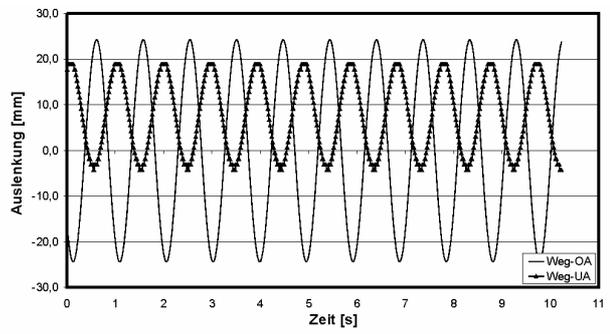
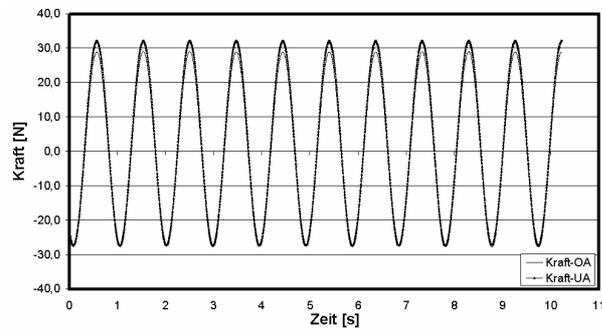
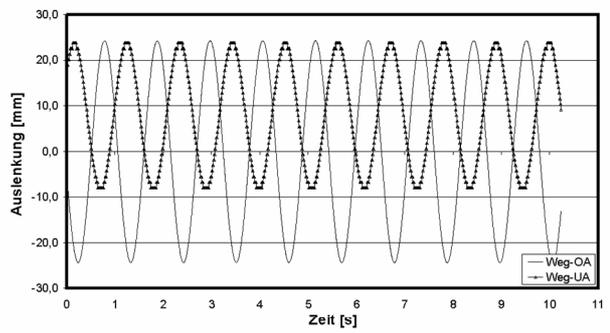
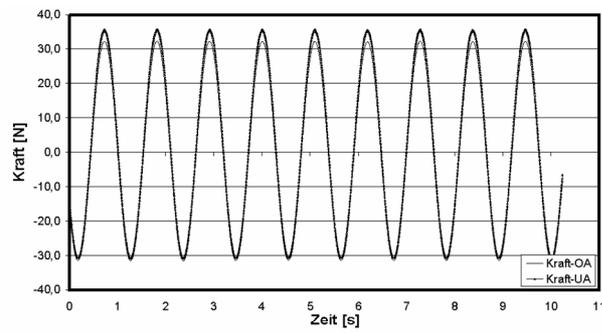
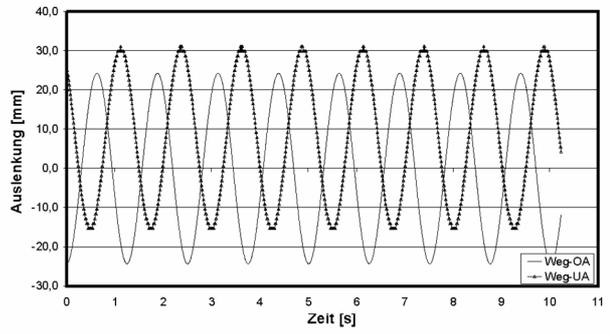
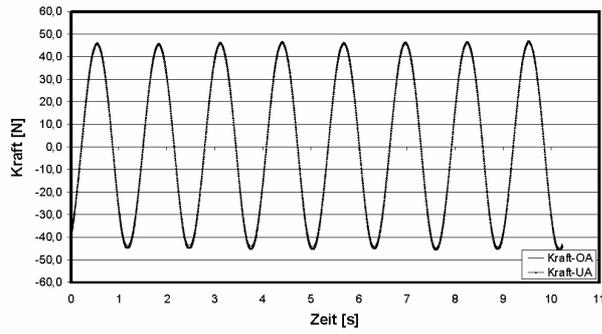


Abb. 9-4: MODUS+Bodenstation: Zugkräfte und Amplituden am oberen und unteren Kabelende; Maßstab M1:5; Federrate $k_M=922 \text{ N/m}$; Erregeramplitude 0,024 m, Frequenzen von ca. 0,42 Hz bis ca. 1 Hz.





C.3 Widerstandsversuche M1:5, M1:3, M1:1

Messergebnisse aus Schleppversuchen für unterschiedliche Anströmrichtungen (horizontal vorwärts und Hieven) und jeweils vier aufeinander aufsetzende Fahrtgeschwindigkeiten, z. T. mit Einblendung des gleitenden Durchschnitts. Alle Daten wurden bei Schleppfahrten an der Tiefwasserrinne der ZE VWS der TU Berlin gewonnen.

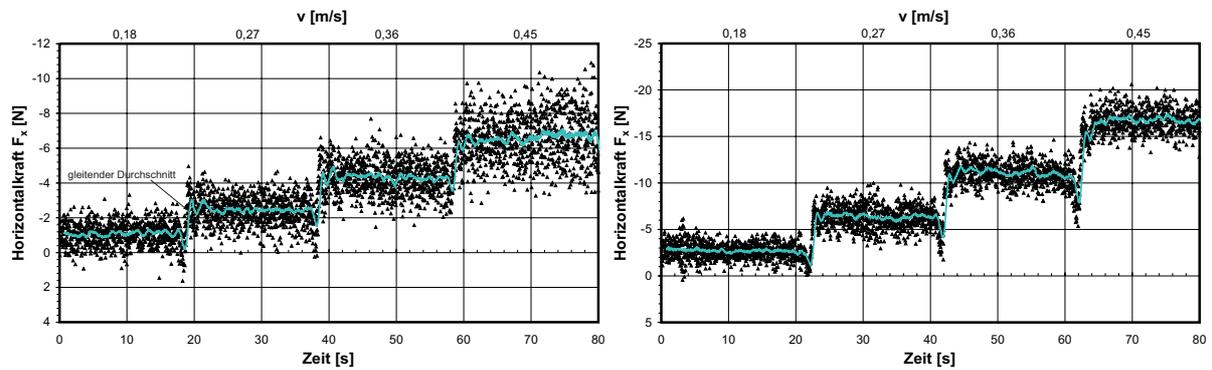


Abb. 9-5: Widerstandskräfte für MODUS in M1:5: (Links) Horizontalfahrt und (rechts) Hieven

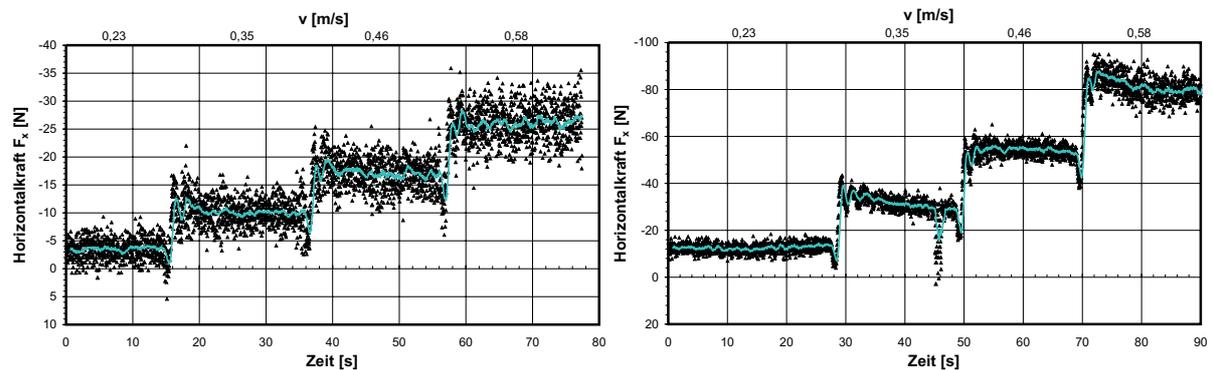


Abb. 9-6: Widerstandskräfte für MODUS in M1:3: (Links) Horizontalfahrt und (rechts) Hieven

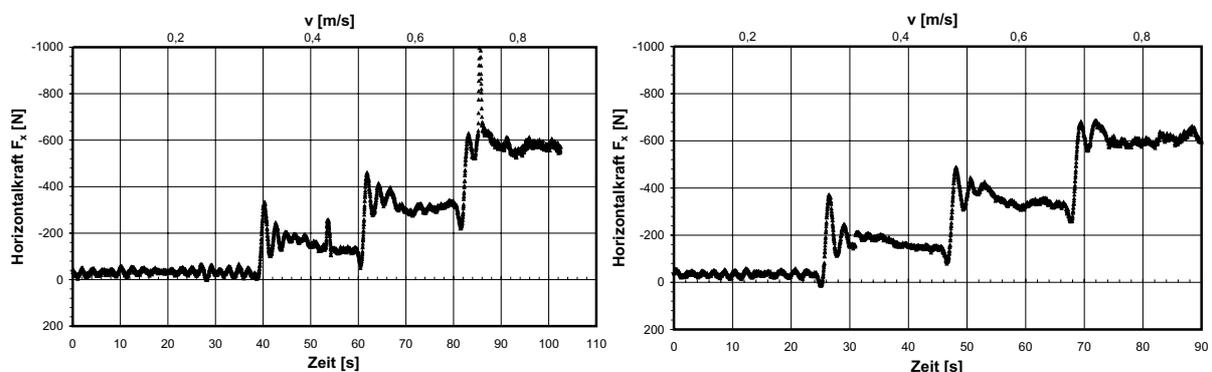


Abb. 9-7: Widerstandskräfte für MODUS in M1:1, jeweils für Horizontalfahrt: Links für Minimalausrüstung und rechts für Vollausrüstung

11 Index

A

Abklingkonstante	28
Ähnlichkeitsgesetz (Newton)	56
Aliasing-Effekt	46
Aufwärtsnullstellenperiode	17, 26

B

bending restrictor	14
Beschleunigungssensor	50
bilineare Interpolation	54
Bodenannäherung	61
Bodensaugkraft	68

C

Computational Fluid Dynamics (CFD)....	16
fan-Modell	40
Gittergenerator	38
realizable k- ϵ Turbulenzmodell.....	36
RNG k- ϵ Turbulenzmodell.....	36
Standard k- ϵ -Modell	35
Strömungslöser	39
Computer Aided Design (CAD)	37
CTD-Sonden	6

D

Dämpfungskonstante	29
Datalogging	47
DMS-Applikation	49
Druckmessdose	51

E

Eigenkreisfrequenz	58
Eintauchwinkel	22
Elastizität	56
Energiedichtespektrum	34
Ereignis	24
-horizont	24
-raum	24

F

fail safe	14
Fast-Fourier-Transformation (FFT)	67
Feder-Masse-Dämpfer-System	58
feed-forward	84
Finite-Differenzen-Methode	14
Finite-Elemente-Methode	13, 27
Finite-Volumen-Methode	36

full duplex Schnittstelle	46
---------------------------------	----

G

GEOSIM-Versuche	64
GEOSTAR	9
Global Ocean Observing System	2

H

hydrodynamische Masse (added mass)....	57
Hystereseverluste	51

I

Inertialsystem	20
Integrated Ocean Drilling Program	2

J

Jojo-Effekt	2
-------------------	---

K

Kalibrierkurve	51
Keulegan-Carpenter-Zahl	19
kinematische Zähigkeit (Viskosität)	18
Kontinuitätsgleichung	35
Korrelationskoeffizient	69
Kovarianz	69
Kraftmesswaage	48

L

local area network (LAN)	45
logarithmisches Dekrement	58
lumped-mass-Methode	14

M

Marsili-Mountain	75
Mensch-Maschine-Schnittstelle	45
Messverstärker	57
miner	6
MODUS	9
moonpool	1, 82
Multifunktionskabel	siehe umbilical

N

Nachstromgebiet (wake)	40
Nutzlastmodule	12
Nyquist-Frequenz	46

P

Pierson-Moskowitz-Spektrum	34
Planar-Motion-Anlage	56

R

RANS-Gleichungen.....	35
Resonanzfrequenz.....	57, 81
Response Amplitude Operator (RAO).....	17
Reynoldszahl.....	19, 66

S

Schlepp

-fisch (tow fish)	5
-geschwindigkeit.....	65
-wagen.....	64

Schwingung

longitudinal	37
transversal	37

Seegangskompensation	84
----------------------------	----

Signalkonditionierung	49
-----------------------------	----

signifikante Wellenhöhe	17
-------------------------------	----

slack-cable.....	2, 13
------------------	-------

snap loads.....	2, 72
-----------------	-------

splash zone	2
-------------------	---

Standardabweichung.....	69
-------------------------	----

Starrkörperfreiheitsgrade	57
---------------------------------	----

Strouhalzahl	36
--------------------	----

Strukturwiderstand.....	37
-------------------------	----

suspension point.....	82
-----------------------	----

T

Temperaturabhängigkeit.....	18
-----------------------------	----

U

Übertragungsfunktion (RAO)	24, 57
----------------------------------	--------

Übertragungsrate.....	15, 46
-----------------------	--------

umbilical	3, 9, 79
-----------------	----------

Umlenkrolle (sheave)	14
----------------------------	----

V

Vehicles

Autonomous Underwater - (AUV)	1
-------------------------------------	---

Remotely Operated - (ROV)	1
---------------------------------	---

Unmanned Underwater - (UUV)	1
-----------------------------------	---

Versorgungsspannung	46
---------------------------	----

video overlay system	45
----------------------------	----

Videobegutachtung (survey)	73
----------------------------------	----

W

WAMIT.....	32, 62
------------	--------

Wegsignal	57
-----------------	----

Antwort	57
---------------	----

Erregung.....	57
---------------	----

Wellen-Synchronisation	84
------------------------------	----

Wheatstonesche-Vollbrücke.....	48
--------------------------------	----

Widerstand	4
------------------	---

Beiwert.....	65
--------------	----

Kräfte, Momente.....	64
----------------------	----

Versuche	64
----------------	----

Wirbelablösefrequenz.....	36
---------------------------	----

Z

Zugspannungswelle	72
-------------------------	----