

Copyright ©

Es gilt deutsches Urheberrecht.

Die Schrift darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei heruntergeladen, konsumiert, gespeichert oder ausgedruckt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden ohne die schriftliche Einwilligung des Urheberrechtinhabers. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

German copyright law applies.

The work or content may be downloaded, consumed, stored or printed for your own use but it may not be distributed via the internet or passed on to external parties without the formal permission of the copyright holders. It is prohibited to take money for copies or printed versions of the free online version.

Aus dem Institut für Angewandte Physik der Universität Kiel

Eine richtungsstabilisierte Unterwasserbasis für ozeanographische Messungen

Von U. RICHTER

Zusammenfassung: Es wird eine an einem Kabel hängende ozeanographische Meßbasis beschrieben, welche eine feste Richtung gegenüber einem äußeren Koordinatensystem einhält. Bezugssystem ist das Magnetfeld der Erde. Die Meßbasis dient zur Aufnahme von Sonden für richtungsabhängige ozeanographische Messungen. Ein auf dem Induktionsgesetz basierender Kompaß mißt die Richtung der Unterwasserbasis. Als Stellglied dient ein von einem Unterwassermotor angetriebenes Flügelrad. Mit Hilfe eines elektronisch gesteuerten Drehschäkels wird das von einer Verdrillung des Kabels herrührende Stördrehmoment auf einen kleinen Wert reduziert.

Messungen während der 21. „Meteor“-Fahrt im Sommer 1970 ergaben, daß die Meßbasis in der Lage ist, eine Nutzlast in beliebiger Meerestiefe auf $\pm 2^\circ$ genau auszurichten.

A stabilized underwater basis for oceanographic measurements (Summary): An underwater basis is described, which hangs on a cable and keeps its direction relative to an outside coordination system. The reference system is the magnetic field of the earth. The basis is used to carry sensors for direction depending oceanographic measurements. The direction is measured by a compass which operates according to the law of induction. A bladed wheel driven by an underwater motor serves as positioner. By means of a controlled electrical swivel the disturbance torque of the cable is reduced to a neglectable rate.

Measurements during the 21th trip of the 'Meteor' in summer 1970 have shown, that the underwater basis is able to fix an instrumentation load in its direction up to $\pm 2^\circ$ in any depth of the ocean.

Die Aufgabenstellung

Bei einer Vielzahl von Meßaufgaben der Meeresphysik wird die Einhaltung einer konstanten Richtung einer Instrumentensonde relativ zu einem äußeren Koordinatensystem gefordert. Typische Experimente dieser Art sind strömungsabhängige Messungen sowie ein großer Teil der optischen und akustischen Messungen.

Ein sehr häufig angewandtes ozeanographisches Meßverfahren ist das folgende: Eine die Instrumentenlast tragende Meßbasis wird bei ortsfest gehaltenem Schiff an einem Kabel bis zu einer gewünschten Tiefe herabgelassen. Dabei werden laufend die meeresphysikalischen Meßwerte registriert. Die Basis besteht gewöhnlich aus einem stabilen Rohrgestell, an dem Meßfühler und die druckfesten Gehäuse für die Meßelektronik befestigt werden können. Sie dient gleichzeitig als Schutz gegen Beschädigung der Instrumentenlast in rauher See. Das Kabel dient zum Tragen der Basis, zu ihrer Energieversorgung und als Übertragungsstrecke zur Registrierung der Meßdaten an Bord des Schiffes.

Auf die Meßbasis wirken an äußeren Kräften die Torsionskräfte des Kabels, horizontale und vertikale Strömungskräfte, die Schwerkraft und die Zugkraft des Kabels ein, an inneren Kräften die Drehimpulse von rotierenden Teilen auf der Basis.

Für eine Stabilisierung sind nur Bewegungen der Basis um die Aufhängung als Achsenpunkt von Interesse. Einer Auslenkung der Längsachse der Basis aus der Senkrechten soll durch Konstruktion eines tiefen Schwerpunktes entgegengewirkt werden. Daher bleibt als Freiheitsgrad nur die Rotation der Basis um ihre vertikale Achse.

Im folgenden wird die Entwicklung eines aktiven Stabilisierungssystems beschrieben, das die Meßbasis unabhängig von inneren und äußeren Kräften in einer bestimmten Richtung gegenüber einem raumfesten Koordinatensystem festhält. Dabei sollte die stabilisierte Basis für den Einsatz in jeder Meerestiefe geeignet sein und so gering wie möglich aus der Sollrichtung abweichen.

Das Stabilisierungssystem

Das aktive Stabilisierungssystem setzt sich aus einem Grob- und einem Feinregelungsteil zusammen: Von den beiden Hauptstörgrößen wird das Kabeldrehmoment vermittels eines elektronisch gesteuerten Drehschäkels auf einen kleinen Wert reduziert, während das von Maschinen auf der Basis herrührende Störmoment mit Hilfe einer Störwertschaltung kompensiert wird. Ein Rest der beiden Hauptstörmomente zusammen mit dem verbleibenden Einfluß der Vertikal- und Horizontalströmung wird in dem eigentlichen Regelkreis für den Lagewinkel der Meßbasis ausgeregelt.

Ein Hilfsregelkreis zur Ausschaltung des Kabeldrehmomentes

Das von einer Verdrillung des Kabels herrührende Stördrehmoment ist abhängig von der Länge und Dicke des Kabels, von der Belastung und der Hievgeschwindigkeit und erreicht z. B. bei einem 0,8 cm dicken Einleiterkabel und einer 30 kg schweren Meßsonde Maximalwerte von 1 kpcm.

Für eine exakte Richtungsstabilisierung muß dieses große Störmoment ausgeschaltet werden. Dazu verwendet man zweckmäßig einen Drehschäkel.

Ein passiver Drehschäkel mit elektrischen Durchführungen ist aber nicht beliebig leichtgängig, sondern hat ein Haftreibungsmoment M_{HR} , das sich aus den Haftreibungsmomenten des Kugellagers, des Dichtungsringes und denen der Schleifkontakte zusammensetzt. Ist die Haftreibung überwunden, so tritt ein geschwindigkeitsabhängiges Reibungsmoment aus gleitender und rollender Reibung auf, welches jedoch bei den vorkommenden Drehgeschwindigkeiten kleiner als M_{HR} ist.

Bestimmt durch das Gesamtgewicht der Unterwasserbasis und den durch die Bruchgefahr nach unten begrenzten Wellendurchmesser des Drehschäkels, erreicht das Haftreibungsmoment einen Wert, der über den oben angegebenen Maximalwerten für das Stördrehmoment liegt.

Mit Hilfe eines Regelkreises — bestehend aus dem Drehschäkel mit elektrischen Durchführungen, in den zur Überwindung der hohen mechanischen Ansprechschwelle ein elektrischer Unterwassermotor eingebaut wurde, aus einem Drehmomentfühler, der laufend das Kabeldrehmoment mißt auf einen auf Schnelligkeit optimierten, elektronischen Regler — soll das Kabeldrehmoment auf einen kleinen Wert reduziert werden.

Ein an die Verhältnisse in großen Meerestiefen angepaßter Antrieb mußte entwickelt werden. Als solcher kann ein druckbeständiger Elektromotor verwandt werden, der korrosionsschutz gekapselt werden muß. Die erforderliche mechanische Ausgangsleistung betrug 1,5 W bei 500 Upm.

Es wurden Untersuchungen an verschiedenen Motoren der industriellen Fertigung vorgenommen. Die Umrüstung bestand jeweils darin, Öffnungen in das Gehäuse zu bohren und die Motoren anschließend in einem Ölbad (niederviskositäres Hochdrucköl) zu betreiben.

Die besten Ergebnisse brachte ein kollektorloser Gleichstrommotor (AD 5000, Fa. Siemens). Für die Kommutierung dienen bei diesem Motor Hallgeneratoren, deren Verhalten unter Druck untersucht wurde.

Die Hallwechselspannung $U_{H\approx}$ in Abhängigkeit vom Druck P bei einem Querstrom von 30 mA und einem magnetischen Wechselfeld mit konstanter Amplitude zeigt Abb. 1.

Die Druckeffekte sind reversibel.

Die der Kommutierung dienende elektronische Schaltung wurde so dimensioniert, daß die von den Hallgeneratoren gesteuerten Verstärkungstransistoren stark übersteuert wurden und so die Motorwicklungen mit Rechteckimpulsen an die Batteriespannung — U_B geschaltet werden. Dadurch entfällt der Druckeinfluß über die Hallgeneratoren. In Abb. 2 sind Strom- und Drehzahlkennlinie des Motors AD 5000 unter Druck dargestellt.

Die Stromzunahme bei steigendem Druck ist reversibel und eine Folge der Änderungen der Viskosität des Öls, der magnetischen Eigenschaften des Ankers und der auftretenden mechanischen Spannungen in den Lagern.

Den mechanischen Aufbau des aktiven Drehschäkels zeigt Abb. 3. Dieser hat die äußere Form eines Zylinders und besteht aus einem hohlen Schaft (Außendurchmesser 10 mm), durch den zwei Leitungen zu zwei Schleifringen geführt werden. Als Bürsten dienen je zwei Blattfedern mit Goldkontakten. Die Leitung ist an den beiden Enden des Schäkels über Joy-Stecker nach außen geführt. Der durch ein Nadellager zentrierte Schaft endet an der Kopfseite in einer Aufhängung, an der das Kabel befestigt wird. Auf der anderen Seite ist er mit einer versplinteten Mutter an dem tragenden Lager befestigt. Über ein Untersetzungsgetriebe (1 : 25) und eine Kupplung treibt der kollektorlose Gleichstrommotor AD 5000 den Schaft an. Neben dem Motor ist die Kommutierungsschaltung untergebracht. Diese Schaltung wird dem vollen Druck in den verschiedenen Meerestiefen ausgesetzt und läuft dabei einwandfrei. Der Schäkel ist mit Hochdrucköl gefüllt. Zwei Gummibälge sorgen über eine Rohrdurchführung nach außen für den nötigen Druckausgleich.

Die wichtigsten technischen Daten des angetriebenen Drehschäkels seien kurz tabellarisch aufgeführt:

Nutzlast: 200 kg
Belastbarkeit: 1 t
elektr. Durchführungen: 1 (4 vorbereitet)
Versorgungsspannung: 6 V
max. Leistungsaufnahme: 7,8 W
geeignet für alle Tiefen.

Der Drehschäkel soll immer in die Richtung des angreifenden Kabeldrehmoments gesteuert werden. Dazu muß ein aus diesem Drehmoment abgeleitetes Steuersignal zur Verfügung stehen. Wenn dieses Signal von einem fest mit der Basis verbundenen Richtungs-Meßfühler gewonnen wird, so ist durch das Trägheitsmoment der Basis im Wirkungskreislauf ein Glied mit großer Totzeitkonstante enthalten. Deshalb wurde ein geeigneter Meßfühler für das Kabeldrehmoment entwickelt.

Die Anforderungen an den Meßwandler sind hier die Unabhängigkeit von Druck, Temperatur und Feuchtigkeit. Damit verträgt sich am besten ein induktives Meßprinzip. Es besteht darin, die Messung des Drehmomentes über die Torsion einer Feder auf eine Winkelmessung und diese über einen Zeiger auf eine Wegmessung zurückzuführen. Der Weg wird induktiv abgenommen. Die Beziehung zwischen der zu messenden Größe, hier dem Drehmoment M_d und der Meßgröße, dem Weg S , ist für kleine Torsionswinkel gegeben durch

$$S = Z \frac{2 M_d \cdot L}{\pi \cdot \varnothing \cdot r^4}$$

Darin ist Z = Länge des Zeigers
 L = wirksame Länge der Torsionsfeder
 \varnothing = Torsionsmodul
 r = Radius der Torsionsfeder.

Die Torsionsfeder hat hier zwei extreme Forderungen zu erfüllen:

1. Sie soll auch bei geringem Drehmoment, etwa 50 pcm, noch einen meßbaren Torsionswinkel aufweisen.
2. Sie muß als Verbindungsglied zwischen Kabel und Nutzlast eine Tragfähigkeit von 1000 kg haben.

Es wurde ein Federdraht (Draht 4,0 C Din 2076—1.1200) mit einem Durchmesser von 4 mm und einer Zugfestigkeit von 2,1 t verwendet.

Der in der Abb. 7 des Gesamtregelsystems mit II bezeichnete Teil stellt das Blockschaltbild des Hilfsregelkreises dar. Die Übertragungsfunktionen der Regelkreisglieder sind eingezeichnet. Das Kabel bildet die Regelstrecke mit dem Verdrillungswinkel δ als Eingangs- und auch Regelgröße und dem Kabeldrehmoment M_d als Ausgangsgröße. Der Generator des Stellgliedes und der Regelverstärker sind zu einem Block zusammengefaßt. Bei der Strukturierung des Reglers wurde als Gütekriterium die Schnelligkeit bei einem Übergangsprozeß zugrunde gelegt. Das bedingt als Regelverstärker ein proportional wirkendes Glied mit niedrig gelegenen nichtlinearen Ausschlägen.

Der Drehmomentfühler und der aktive Drehschäkel werden jetzt untereinander hängend zwischen Trägersystem und Nutzlast eingefügt (Abb. 8a). Die zugehörige Elektronik und Energieversorgung sind mit auf der Meßbasis untergebracht. Am Regelverstärker wurden eine Verstärkung von $V_R = 15$ und eine tote Zone entsprechend ± 170 pcm eingestellt.

Die Lagewinkelregelung der Meßbasis

Als Orientierungshilfe dient das Erdmagnetfeld, als Meßfühler ein auf dem Induktionsgesetz basierender Kompaß. Der Kompaß arbeitet nach folgendem Prinzip (Abb. 4):

In einem stationären Magnetfeld wird ein z-förmig gebogener Kern aus Mu-Metallblech so angeordnet, daß seine Achse aa' senkrecht auf der Richtung der Feldlinien steht. Die Querbalken A und B mögen wie in Abb. 4 in Feldrichtung zeigen. Wegen der hohen Permeabilität des Mu-Metalls verlaufen die im Querbalken A eintretenden Feldlinien parallel zur Achse aa' nach B und treten dort aus. Wird der Kern 180° um die Achse gedreht, dann treten die Feldlinien bei B ein, werden längs der Achse aa' geführt und treten bei A wieder aus.

Läßt man den Kern um die Achse aa' rotieren, dann erhält der magnetische Fluß zwischen aa' zeitlich einen sinusförmigen Verlauf. Der magnetische Fluß induziert in einer die Achse aa' umfassenden, feststehenden Spule eine Wechselspannung. Die Nulldurchgänge sind eindeutig der Stellung des Z-Kerns im Magnetfeld zugeordnet.

Die Spannung an den Spulenden ist gegeben durch:

$$U_{\sim} = -n \frac{d\varnothing}{dt} = k \cdot n \cdot \omega \cdot |\mathfrak{H}_H| \cdot \sin \omega t$$

Tafel 1 (zu U. Richter)

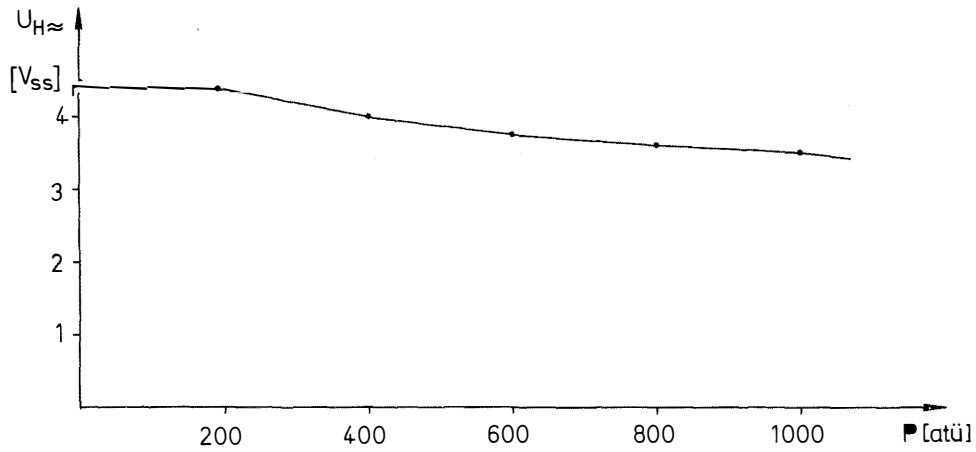


Abb. 1: Hallspannung $U_{H\sim}$ bei konstantem Querstrom und magnetischem Wechselfeld in Abhängigkeit vom äußeren Druck P

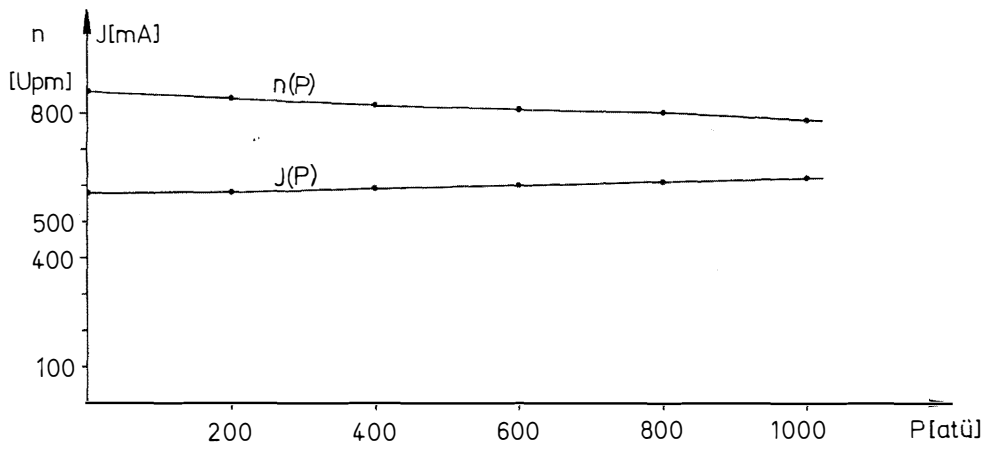


Abb. 2: Stromaufnahme I und Drehzahl n des Hallsondenmotors AD5000 bei Druckbelastung

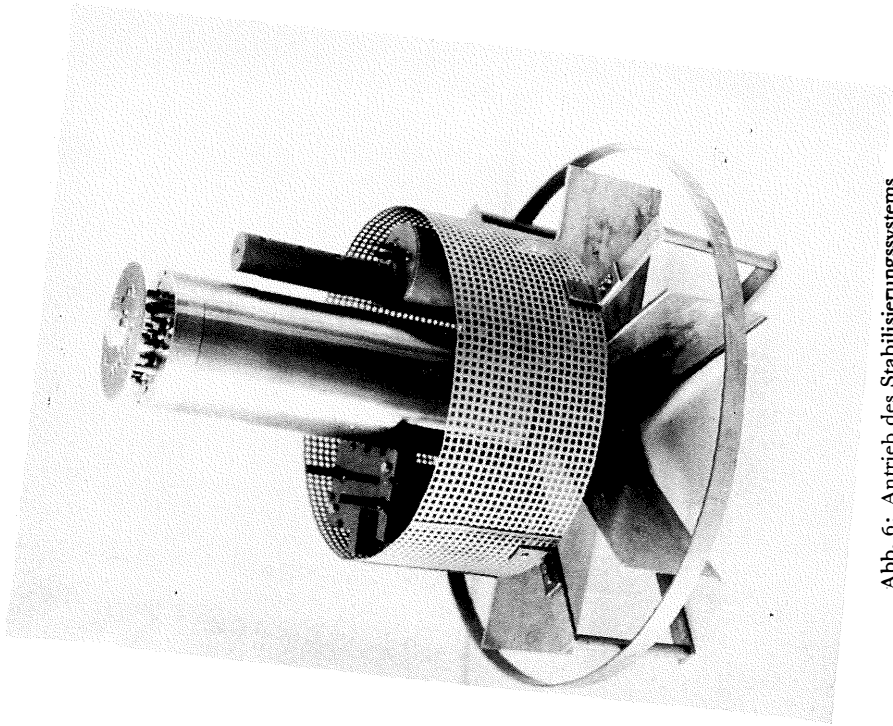


Abb. 6: Antrieb des Stabilisierungssystems

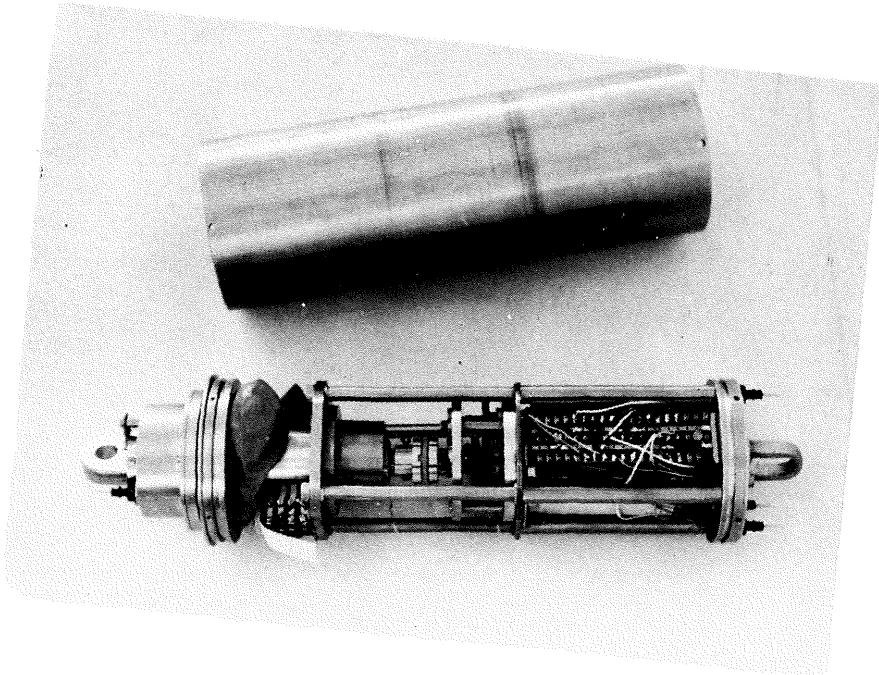


Abb. 3: Mechanischer Aufbau des aktiven Drehschäkels
bei abmontiertem Außenzylinder

Tafel 3 (zu U. Richter)

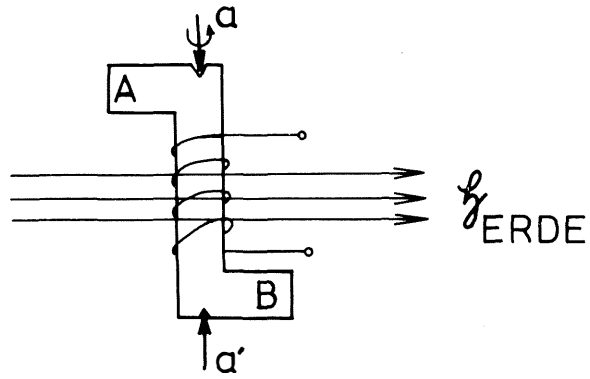


Abb. 4: Meßprinzip des Magnetkompasses

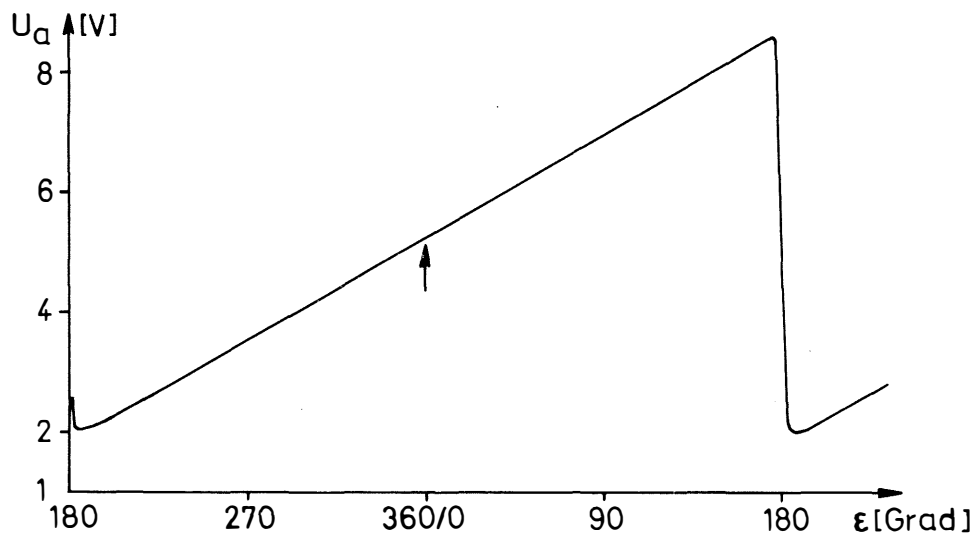


Abb. 5: Kompaßkennlinie

Tafel 4 (zu U. Richter)

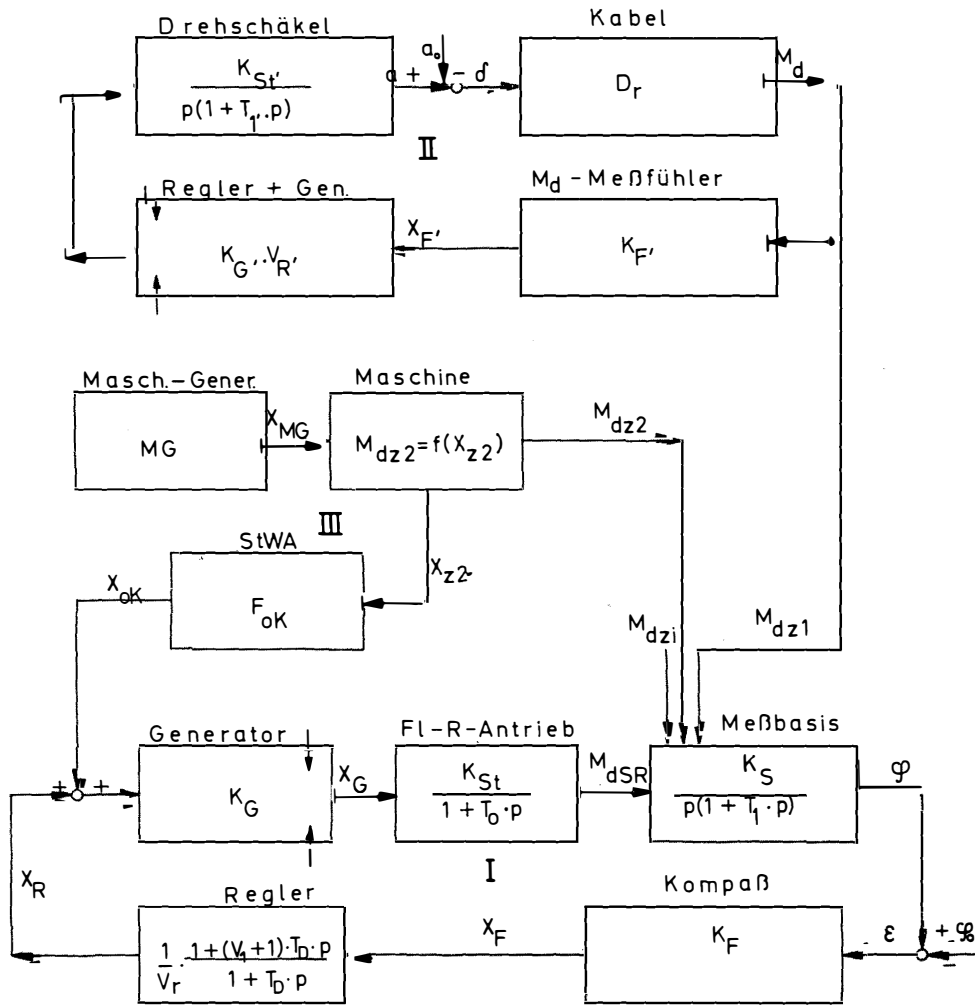


Abb. 7: Das gesamte Stabilisierungssystem der Unterwasserbasis

Dabei ist n = Windungszahl der Spule

\varnothing = Induktionsfluß

ω = Umdrehungsgeschwindigkeit

H_H = Horizontalkomponente des Erdfeldes

k = eine Konstante, abhängig von Material und Form des Z-Kernes.

Die Referenzspannung zur Markierung der augenblicklichen Stellung der Basis wird durch einen kleinen Stabmagneten erzeugt, der auf derselben Achse wie der Z-Kern vor einem Hallgenerator montiert. Da als Antrieb ein hallsondengesteuerter Elektromotor verwendet wurde, sind Markierung und Antrieb in einer Funktion vereinigt.

Der Motor ist samt Aussteuerschaltung in einem Mu-Metalltopf untergebracht.

Ein restliches Störmagnetfeld wird mit Hilfe eines kleinen Magneten kompensiert.

Gegen den Außendruck wird das System von einem aus unmagnetischem Titanstahl gefertigten Gehäuse geschützt.

Das Regelsignal wird durch Phasenvergleich der beiden Wechselspannungen des Meßwertgebers gewonnen.

Die Kennlinie des Fühlers zeigt Abb. 5. Als Sollwert für die Orientierung wurde ein Punkt auf der Mitte der Kennlinie gewählt.

Der zweite Punkt auf der Kennlinie, in dem die Sollwertspannung noch einmal angenommen wird, ist regelungstechnisch labil.

Der Richtungsmeßfühler ist durch folgende Kennwerte charakterisiert:

Meßbereich: 0° bis 351° , umlaufend

Genauigkeit: $\pm 0,13^\circ$ bei vertikaler Lage

Ausgangsamplitude: 19 mV/Winkelgrad

Temperaturfehler: = $\pm 0,5$ Winkelgrad im Bereich 0°C bis 20°C

Druckabhängigkeit: keine.

Als Stellglied für das Stabilisierungssystem wird ein Antrieb benötigt, der unabhängig von äußeren Betriebsbedingungen wie Druck, Temperatur und Strömung ein steuerbares Drehmoment bei gutem Wirkungsgrad liefert. Brauchbar ist eine Anordnung, bei der das Drehmoment eines Motors mit Hilfe eines Flügelrades direkt auf das umgebende Wasser übertragen wird. Bei hinreichend großer Fläche der senkrecht im Wasser stehenden Platten wird schon für sehr geringe Winkelgeschwindigkeiten ein beträchtliches Nutzdrehmoment erzielt. Vermittels einer großen Getriebeuntersetzung kann ein Motor geringer Leistung das erforderliche Antriebsmoment M_{dF} aufbringen.

Als Motor dient der gleiche Typ, der beim Bau des angetriebenen Drehschäkels als druckunabhängiger Unterwassermotor entwickelt wurde.

Abb. 6 zeigt den Antrieb des Stabilisierungssystems. Seitlich rechts am unteren Ende des druckfesten Zylinders für die elektronischen Schaltungen befindet sich der Antriebsmotor mit Kommutierungselektronik und Druckausgleich. Über ein Getriebe (1 : 40) treibt er ein Flügelrad (Radius: 25 cm, Höhe: 12 cm), dessen sechs Flügel im Winkel von 60° zueinander angeordnet sind.

Vier Stahlbögen und ein Ring schützen das Flügelrad vor Schlägen gegen die Bordwand. Antriebsmotor und der auf der gegenüberliegenden Seite des Zylinders untergebrachte Bleiakku werden von einem zylindrischen Käfig aus Gitterblech umgeben, der für ein rotationssymmetrisches Strömungsprofil sorgt.

Der mit I bezeichnete Teil der Abb. 7 stellt das Blockschaltbild des Regelkreises für den Lagewinkel der Basis dar. Regelstrecke ist die in beliebiger Tiefe im Meer hängende Meßbasis, eine Strecke zweiter Ordnung ohne Ausgleich, da bei einer Drehbewegung um die vertikale Achse keine stabile Stellung existiert. Mit M_{dzi} werden die

verschiedenen Störgrößen bezeichnet. Da ein Festwertregelproblem vorliegt und das Drehmoment des Stellgliedes groß ist gegen die Summe der restlichen Störmomente, kann das Problem mit Hilfe einer linearen Regelung gelöst werden.

Zu dem beschriebenen Systemteil muß ein Regler entworfen werden. Stellt man die Forderung, daß bei befriedigenden Stabilitäts- und Güteigenschaften des Systems die bleibende Regelabweichung möglichst verschwinden soll, also

$$\Delta \rho_{bl} \rightarrow 0,$$

dann bieten sich zwei prinzipiell verschiedene Möglichkeiten für die Struktur des Reglers an:

1. ein integraler Reglertyp,
2. ein proportionaler Reglertyp, zusammen mit einer Störwertaufschaltung für die zweite große Störquelle auf der Basis, Maschinen mit offen im Wasser drehenden Teilen, in einem kombinierten System.

Bestimmt durch die hohe Zeitkonstante der Regelstrecke und die Störstruktur wurde ein PD-Regler zusammen mit einer Störwertaufschaltung gewählt. Er hat den Vorteil einer höheren Regelgüte, doch muß die Struktur der offenen Kette an die Basis samt der noch nicht bekannten Nutzlast angepaßt werden.

Der Störfrequenzgang eines allgemeinen geschlossenen Regelkreises lautet:

$$(F_S F_R + 1) x(p) = F_S z(p) \quad (1)$$

wobei F_S der Frequenzgang der Regelstrecke, F_R der Frequenzgang des Reglers ist, in dem außer F_S alle übrigen Frequenzgänge des Regelkreises zusammengefaßt sind,

$p = j\omega$, ω die Kreisfrequenz,
 $x(p)$ die Regelgröße und
 $z(p)$ die Störgröße darstellen.

Mit den Frequenzgängen der Einzelglieder im Regelkreis I nach Abb. 7 wird dann der Störfrequenzgang der Lagewinkelregelung der Meßbasis:

$$[T_0 \cdot T_1 \cdot T_D \cdot p^4 + (T_0 \cdot T_1 + T_D \cdot T_1 + T_0 \cdot T_D) \cdot p^3 + (T_0 + T_1 + T_D) \cdot p^2 + (K_S \cdot K_R \cdot (V_1 + 1) \cdot T_D + 1) \cdot p + K_S \cdot K_R] \cdot \rho(p) = [K_S + K_S \cdot (T_1 + T_0) \cdot p + K_S \cdot T_0 \cdot T_D \cdot p^2] \cdot M_{dz}(p) \quad (2)$$

Dabei sind: $\rho(p)$ der Lagewinkel der Meßbasis,

$M_{dz}(p)$ das Gesamtstördrehmoment,

K_G , K_{St} , K_S , K_F die verschiedenen Übertragungsfaktoren der Regelkreisglieder,

V_1 und $V_R = \frac{1}{V_{\text{eff}}}$ die einstellbaren Verstärkungsfaktoren am PD-Regler,

T_0 und T_1 die Zeitkonstanten von Stellglied und Regelstrecke und T_D die Vorhaltzeit des Reglers.

$K_{St} \cdot K_G \cdot K_F \cdot V_R$ wurde zu K_R zusammengefaßt.

Die das Störverhalten beschreibende DGL lautet dann:

$$T_0 \cdot T_1 \cdot T_D \cdot \rho^{IV} + (T_0 \cdot T_1 + T_D \cdot T_1 + T_0 \cdot T_D) \rho''' + (T_0 + T_1 + T_D) \rho'' + (K_S \cdot K_R \cdot (V_1 + 1) \cdot T_D + 1) \rho' + K_S \cdot K_R \cdot \rho = K_S \cdot M_{dz} + K_S (T_1 + T_0) M'_{dz} + K_S \cdot T_0 \cdot T_D \cdot M''_{dz} \quad (3)$$

Aus dieser Gleichung ersieht man:

1. Nach Abklingen aller zeitlichen Änderungen wird die bleibende Regelabweichung bei einem Stördrehmoment M_{dzo} :

Tafel 5 (zu U. Richter)

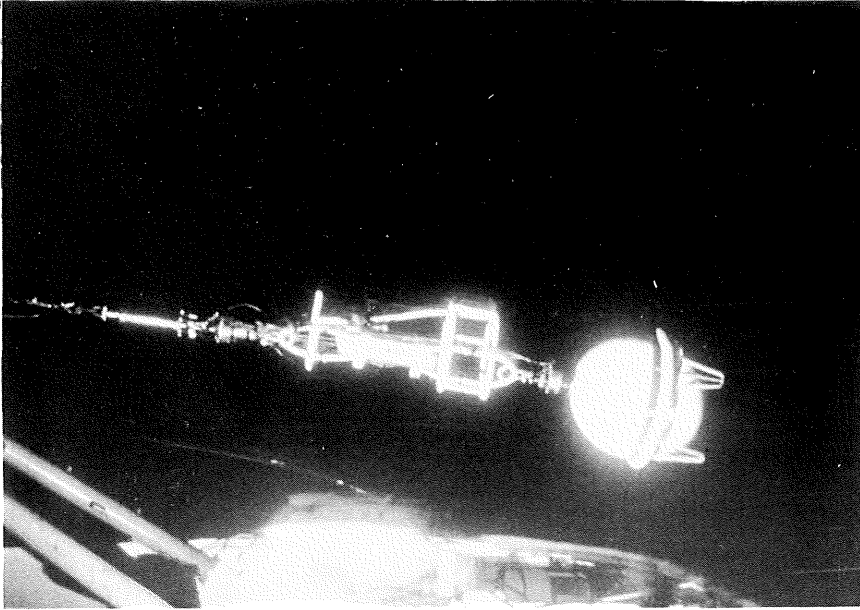


Abb. 8 b: Die vollständige Meßbasis mit einer Schallgeschwindigkeitsmeßsonde als Nutzlast nachts an der Winde der Meteor über dem Wasser hängend

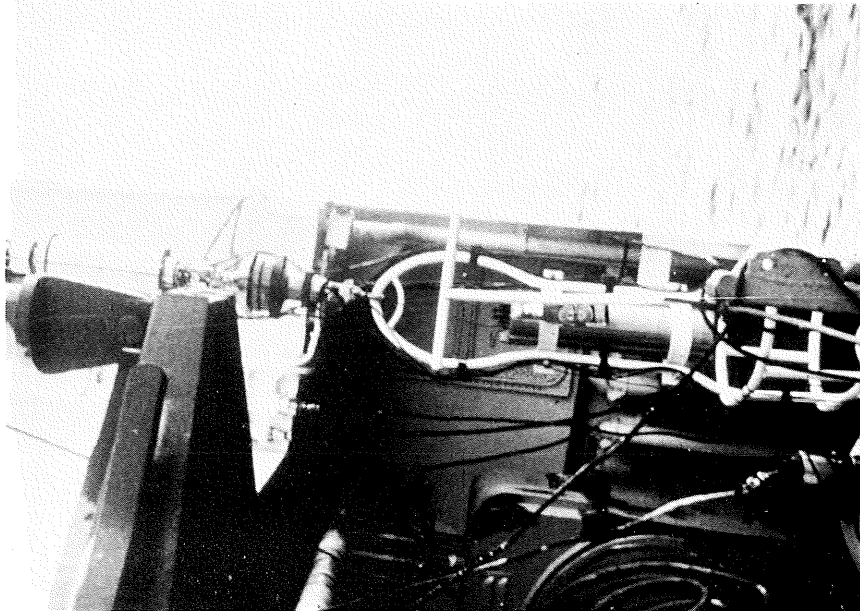


Abb. 8 a: Drehschäkel, Drehmomentmeßfühler und Sonden-gestell für die Messung vorbereitet und vertäut

$$\rho_{bl} = \frac{1}{K_R} M_{dzo} \quad (4)$$

2. Die Bewegung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit wird durch die Zeitkonstante $\left[(V_1 + 1) T_D + \frac{1}{K_S K_R} \right]$ bestimmt, im wesentlichen also durch die Vorhaltzeit des Reglers.

3. Die Winkelbeschleunigung ist durch den Ausdruck $\frac{1}{K_S K_R} (T_1 + T_o + T_D)$ festgelegt, vor allem also durch die Zeitkonstante der Regelstrecke T_1 , da T_1 groß gegen $T_o + T_D$ ist.

Die Daten der Regelstrecke ändern sich mit wechselnden Instrumentenlasten auf der Meßbasis. Die entsprechend einzustellenden optimalen Regelparameter sind in einem Diagramm angegeben. Sie wurden nach dem IAE-Kriterium mit Hilfe einer Nachbildung des Stabilisierungssystems auf dem Analogrechner gewonnen.

Für den Fall, daß sich eine Maschine — z. B. als Teil eines Meßfühlers — mit offen im Wasser drehenden Teilen auf der Basis befindet, entsteht u. U. für die Richtungsstabilisierung ein Stördrehmoment, das eine merkbare bleibende Regelabweichung ρ_{bl} hervorruft. Aus diesem Störwert soll ein Signal abgeleitet werden und über ein geeignetes Zwischenglied derart auf den Generator des Flügelradantriebes gegeben werden, daß durch das entsprechende Antriebsdrehmoment das Stördrehmoment gerade kompensiert wird.

Die betrachtete Maschine M, welche das Stördrehmoment M_{dz2} erzeugt, werde nach Abb. 7 von einem Generator MG mit einer beliebigen Größe x_{MG} gesteuert.

Ein Signal x_{z2} , das von M_{dz2} abhängt, sei aus den Betriebsgrößen der Maschine abgeleitet oder mit Hilfe eines Meßfühlers gewonnen. Z. B. ist $M_{dz2} = f(x_{z2})$, wobei $f(x_{z2})$ im allgemeinen Fall eine nichtlineare Funktion von x_{z2} ist. Dieses Signal wird dann auf ein Übertragungsglied mit der noch zu bestimmenden Übertragungsfunktion F_{ok} gegeben, das es in eine variable Gleichspannung verwandelt. Diese gelangt über eine Addierschaltung, an der auch das Ausgangssignal des PD-Reglers x_R liegt, zum Generator des Flügelradantriebes und erzeugt ein Drehmoment M_{ds2} , welches dem Stördrehmoment M_{dz2} entgegengerichtet ist.

Die Invarianzbedingung lautet hier: In jedem Augenblick muß das Stördrehmoment $M_{dz2}(t)$ durch das Drehmoment der Steuerung $M_{ds2}(t)$ kompensiert werden:

$$M_{dz2}(t) + M_{ds2}(t) = 0 \quad (5)$$

Aus den Übertragungsfunktionen des Störgliedes und der Steuerkette nach Abb. 7 liest man dafür ab:

$$f(x_{z2}) + \frac{K_{ST} \cdot K_G}{1 + T_o p} F_{ok} \cdot x_{z2} = 0 \quad (6)$$

woraus für die gesuchte Übertragungsfunktion des Gliedes der offenen Kette F_{ok} folgt:

$$F_{ok} \cdot x_{z2} = -f(x_{z2}) \cdot \frac{1}{K_G \cdot K_{ST}} (1 + T_o p) \quad (7)$$

Das Signal x_{z2} muß also erst entsprechend der i.a. nichtlinearen Funktion f verarbeitet werden und danach noch ein lineares PD-Glied mit dem Verstärkungsfaktor $\frac{1}{K_G K_{ST}}$ und der Vorhaltzeit T_o durchlaufen. In vielen Fällen genügt schon eine Näherungslösung für F_{ok} .

Aufbau und Meßergebnisse

Der Drehschäkel, der Drehmomentmeßfühler, das Sondengestell mit der Nutzlast und die Stabilisierungseinheit werden so untereinandergehängt, wie es die Abb. 8a und b zeigen.

Durch diese Anordnung ist ein tiefer Schwerpunkt gewährleistet. Die Gesamtlänge der Kette ohne das Sondengestell beträgt 1,80 m. Die Stabilisierungseinheit besteht aus dem Kompaß, dem Flügelradantrieb, der druckgeschützten Elektronik und dem Stromversorgungssystem. Diese Geräte sind von einem kugelförmigen Strömungsschutz umgeben, der das Flügelrad jedoch freiläßt. Ein ringförmiger, elastischer Kunststoffschlauch dämpft Stöße gegen die Bordwand. Die Verbindung von Sondengestell und Stabilisierungseinheit ist so gestaltet, daß eine gegenseitige Verdrehung um die vertikale Achse unterbleibt.

Die Energieversorgung der Nutzlast und der Elektronik der Meßbasis erfolgt über das Einleiterkabel, während die Antriebsmotoren der Regelung von einem mitgeführten Akku gespeist werden.

Während der 21. „Meteor“-Fahrt im Sommer 1970 wurde das Gerät im Zusammenhang mit einer Schallgeschwindigkeits-Meßsonde zum erstenmal in der Tiefsee erprobt. Die Messungen zeigten, daß der Sollwert im ungünstigsten Fall 2 sec nach Einschalten der Regelung erreicht und dann in beliebiger Meerestiefe auf $\pm 2^\circ$ gehalten wird. Während des Hievens und Fierens lag die Genauigkeit, mit der eine Nutzlast in einer Richtung fixiert wird, bei $\pm 4^\circ$.

Einer Stabilisierung auf noch kleinere Winkeltoleranzen sind vor allem durch die Strömungskräfte Grenzen gesetzt. Eine von einem Stördrehmoment verursachte bleibende Regelabweichung ist abhängig von dem Betrag des Störmomentes und (nach Gleichung 4) von dem — durch die Stabilität und Güte merkmale begrenzten — Verstärkungsfaktor des Reglers. Der Betrag einer am Außenrand der Meßbasis (Durchmesser $D = 70$ cm) angreifenden Störkraft, welche eine Regelabweichung von 1° hervorruft, beträgt 0,1 Newton.

Literaturverzeichnis

- ANDERSON, G. A. (1968): Design for Orientation of Balloon-Borne-Equipment. The Review of Scientific Instruments 39, 21—25.
- BLEY, H., GOLDMAN, A. (1963): Elektronische Meßfühler. Franckh'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- IZAWA, K., HAYASHIBE, S. (1957): Zur optimalen Einstellung von Regelungssystemen. Aus G. Müller, Regelungstechnik, Oldenbourg-Verlag, München 1957.
- LERNER, A. J. A. (1963): Schnelligkeitsoptimale Regelungen. R. Oldenbourg-Verlag, München.
- TEUBER, D. (1956): Elektrische Maschinen für die Lageregelung von Raumfahrzeugen. ETZ-A, 86.
- ULANOW, G. M. (1966): Störgrößenaufschaltung. VEB-Verlag Technik, Berlin.