

DEUTSCHER WETTERDIENST

Seewetteramt

Einzelveröffentlichungen

Nr. 53

Die Entwicklung von Seegangs-Meßbojen
mit kreiselstabilisierten Meßwertaufnehmern
für Beschleunigung und Bojenlage

von

August Lang

Instrumentenamt Hamburg



Hamburg
1966

EINZELVERÖFFENTLICHUNGEN

des Seewetteramtes

- Nr. 1 (1953): Höhe, Länge und Steilheit der Meereswellen im Nordatlantik (H. U. Roll) (vergriffen)
- Nr. 2 (1952, Nachdruck 1953): Die Nebelverhältnisse der Unterelbe im Jahrzehnt 1939-1948 (G. Hartenstein und H. Markgraf)
- Nr. 3 (1954): Die Nebelverhältnisse im Küstengebiet der Weser- und Emsmündung (P. Bintig und H. Markgraf)
- Nr. 4 (1954): Klimatologie der Nordwesteuropäischen Gewässer
Teil 1: Temperatur des Oberflächenwassers und Temperatur - Differenz Luft - Wasser (H. J. Bullig und P. Bintig)
Teil 2: Windverhältnisse (H. Markgraf und P. Bintig)
- Nr. 5 (1954): Atlas der Monatswerte von Wassertemperatur, Wind und Bewölkung auf dem Seeweg Europa—Südamerika (H. J. Bullig)
- Nr. 6 (1954): Die Größe der Meereswellen in Abhängigkeit von der Windstärke (H. U. Roll) (vergriffen)
- Nr. 7 (1955): Die vorherrschenden Winde auf dem Atlantischen Ozean im Januar und Juli nach Beobachtungen deutscher Schiffe aus dem Zeitraum 1925—1939 (H. Markgraf)
- Nr. 8 (1956): Die Meereswellen in der südlichen Nordsee (H. U. Roll)
- Nr. 9 (1956): Laderaum - Meteorologie, Vorträge auf der Arbeitstagung am 20. Juni 1956 in Hamburg (vergriffen)
- Nr. 10 (1956): Klimatologie der Nordwesteuropäischen Gewässer
Teil 3: Lufttemperatur, Bewölkung, Niederschlag, Nebel.
Tabellen-Anhang zu den Teilen 1 bis 3 (H. Markgraf u. P. Bintig)
- Nr. 11 (1956): Beiträge zur Klimakunde Südwest-Arabiens. Das Klima von Sana. Das Klima von Jemen (C. Rathjens sen., C. Rathjens jun., E. Samlenski und G. Kerner)
- Nr. 12 (1957): Sturmwetterlagen bei Island 1950—1954 (H. O. Mertins)
- Nr. 13 (1957): Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1953
- Nr. 14 (1957): Nebel in der Deutschen Bucht
A: Das Nebelvorkommen bei den Feuerschiffen (P. Bintig)
B: Synoptisch-aerologische Untersuchungen verbreiteter Dauernebel der südlichen Nordsee (H. Markgraf)
- Nr. 15 (1957): Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1954
- Nr. 16 (1958): Zur Niederschlagsmessung auf See: Ergebnisse von Vergleichsmessungen auf Feuerschiffen und benachbarten Inseln (H. U. Roll)
- Nr. 17 (1958): Statistik der Meereswellen in der Nordsee (O. Petri)
- Nr. 18 (1958): Die winderzeugten Meereswellen, Teil I: Beobachtungen des Seeganges und Ermittlung der Windsee aus den Windverhältnissen (H. Walden).
Heft 1: Text; Heft 2: Abbildungen
- Nr. 19 (1958): Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1955
- Nr. 20 (1959): Statistisch-synoptische Untersuchung über das Verhalten von Tiefdruckgebieten im Bereich von Grönland (H. Walden)
- Nr. 21 (1959): Zur Theorie der Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche (W. Brogmus)
- Nr. 22 (1959): Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1956
- Nr. 23 (1959): Hamburger Wetterdaten für das Bauwesen (R. Reidat)
- Nr. 24 (1960): 1. Über die Entwicklung von Beschleunigungsschreibern für Seegangsmessungen. — 2. Ein einfaches Verfahren für den kraftschlüssigen Antrieb von Registriertrommeln, insbesondere zur Verhütung von Schriebstörungen bei meteorologischen Registrierungen auf Schiffen (A. Lang)
- Nr. 25 (1960): Die vorherrschenden Winde auf dem Atlantischen Ozean im April und Oktober (H. Markgraf)
- Nr. 26 (1960): Der Seegang bei den Feuerschiffen „Flensburg“, „Kiel“ und „Fehmarnbelt“ (H. Walden)
- Nr. 27 (1960): Ergebnisse der 3. Laderaum-meteorologischen Forschungsfahrt auf TS „Düsseldorf“ an die Westküste Südamerikas, 1958 (E. Höller)
- Nr. 28 (1960): Beiträge zur Meteorologie Mittelamerikas (insbesondere El Salvadors) (W. H. Portig)
- Nr. 29 (1961): Klimatologie des Mittelmeeres. Teil 1: Windkarten (H. Markgraf)
- Nr. 30 (1961): Vergleichsmessungen des Seeganges mit verschiedenen Meßgeräten und ihre Auswertung (H. Walden u. J. Piest)
- Nr. 31 (1961): Die Luft- u. Wassertemperaturen auf den Fischfangplätzen bei Island (H. U. Roll)
- Nr. 32 (1961): Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1957
- Nr. 33 (1962): Einige Methoden und Probleme aus dem Bereich der Maritimen Klimatologie (H. Markgraf)
- Nr. 34 (1962) Über den Geländeeinfluß auf Windrichtung und Windgeschwindigkeit im Raum Hamburg (E. Franken)

DEUTSCHER WETTERDIENST
Seewetteramt

Einzelveröffentlichungen
Nr. 53

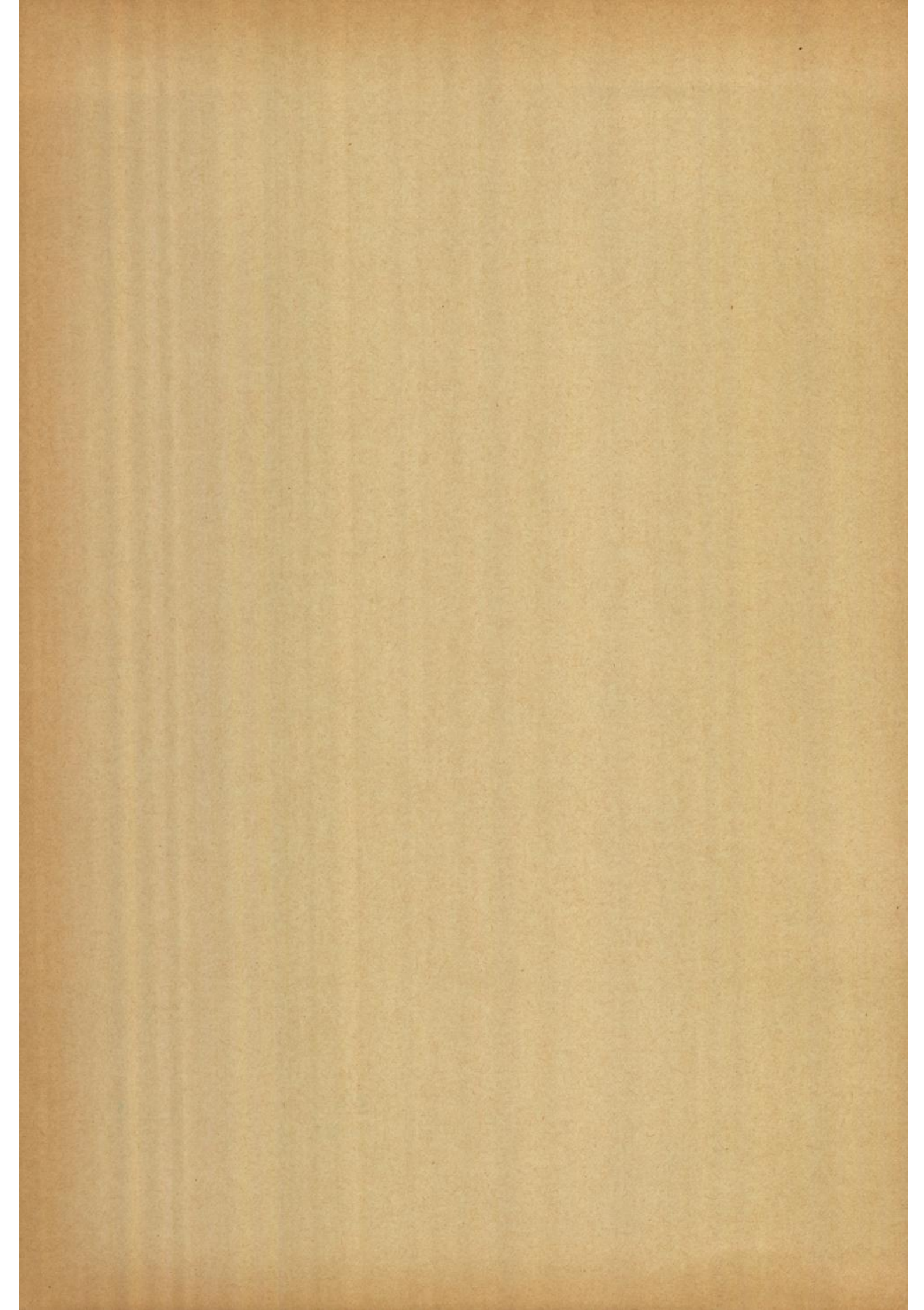
Die Entwicklung von Seegangsmessbojen
mit kreiselstabilisierten Meßwertaufnehmern
für Beschleunigung und Bojenlage

von
August Lang
Instrumentenamt Hamburg



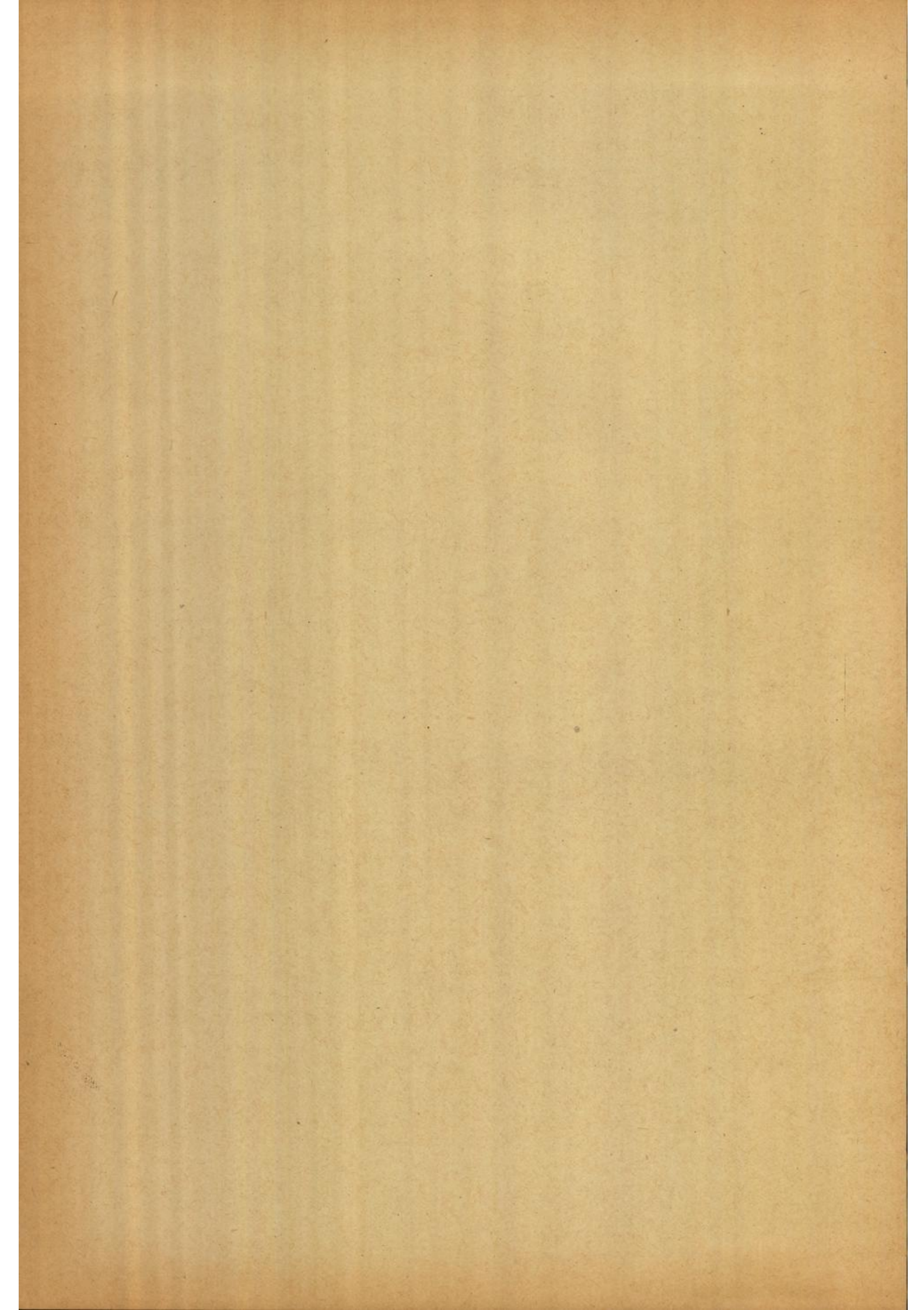
Hamburg
1966

Wetteramt München
Handbücherei Nr. 4320



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	5
1. Probleme und Ziele der Seegangsmessung	5
2. Der "Seegangs-Beschleunigungsschreiber" des Deutschen Wetterdienstes	6
3. Die "Seegangsmeßboje Type WPR" zur Messung von Wellenhöhe, Periode und Richtung	10
3.1 Prinzipieller Aufbau der "Seegangsmeßboje Type WPR"	10
3.2 Aufbau der "Seegangsmeßboje Type WPR"	12
3.3 Speicherung und Wiedergabe der Meßwerte	13
3.4 Meßgenauigkeit der kreiselstabilisierten Aufnehmer für Beschleunigung und Lage	13
4. Grundlagen, Aufbau und Eichung der verwendeten Meß- und Wand- lersysteme	
4.1 Beschleunigungsaufnehmer	14
4.2 Eichverfahren für Beschleunigungsaufnehmer	15
4.3 Filterung und Doppelintegration der Vertikal-Beschleuni- gungs-Meßwerte	16
4.4 Pendelkreisel- und Lagengebersystem	17
4.5 Magnetkompaß mit lichtelektrischer Abtasteinrichtung	18
4.6 Bemerkungen zur elektrischen Schaltung der "Seegangsmeß- boje Type WPR"	20
5. Ausblick für die weitere Entwicklung der Seegangsmeßbojen	21
Literaturhinweise	22
Anhang: 19 Abbildungen	



Zusammenfassung

Nach kurzer Darstellung des Problems und der Ziele der Seegangsmessung auf dem freien Meer wird ein Überblick über Meßprinzip und Arbeitsweise des vom Seewetteramt für Messungen in der Deutschen Bucht eingesetzten mechanischen "Seegang-Beschleunigungsschreibers" und über die Methode der analogen Umwandlung der Meßwerte, sowie der Analyse der spektralen Energieverteilung gegeben. Anschließend werden die Ergebnisse von Untersuchungen der Meßfehler diskutiert, die durch Abweichungen der Beschleunigungs-Meßachse von der Vertikalen bedingt sind, und nachgewiesen, daß die zur Erfassung langwelliger Energieteile erforderliche Meßgenauigkeit nur mit neuartigen elektronischen Beschleunigungsaufnehmern erreicht werden kann, die durch geeignete Kreiselssysteme vertikal stabilisiert sind. Es wird über Erfahrungen mit einer Versuchsboje berichtet, bei der durch Anwendung eines kardanisich aufgehängten Pendelkreisels zur Stabilisierung der Meßachse außerdem die meßtechnischen Voraussetzungen zur Erfassung der Bojenlage im Seegang gegeben sind und damit die wesentlichen Grundlagen zur Berechnung des Richtungsspektrums der Seegangsenegie. Die grundsätzliche Gesamtkonzeption einer freitreibenden Seegangsmessboje für Amplitude, Periode und Richtung unter Anwendung der Linienfolger-Umwandlung als Speicher methode wird in Aufbau und Funktion erläutert. Aufnehmer, Filter und Integratoren werden an einer Beschleunigungs-Eichanlage untersucht. Es wird über einen Magnetkompaß mit lichtelektrischer Abtasteinrichtung berichtet, der für die Zuordnung der Azimutlage der freitreibenden Meßboje gegen magnetisch Nord eingesetzt werden kann.

Abschließend wird ein Ausblick für die Möglichkeit der Entwicklung von selbstintegrierenden Seegangsmessbojen gegeben.

1. Probleme und Ziele der Seegangsmessung

Untersuchungen des Seegangs und der Dünung werden heute in vielen schiffahrttreibenden Ländern mit zunehmender Intensität betrieben. Dabei stehen nicht allein wissenschaftlicher Forschungsdrang, sondern hauptsächlich praktische Erwägungen im Vordergrund. Für das Seeverhalten der Schiffe und für den Küstenschutz sind Erkenntnisse der Umwandlung von Wind- in Seegangsenegie von größter Bedeutung. Erfahrungsgemäß haben die vom Wind aufgeworfenen Meereswellen einen wesentlich stärkeren Einfluß auf ein fahrendes Schiff als der herrschende Wind selbst. Die Wetterdienste aller schiffahrttreibenden Nationen sind daher seit langem bestrebt, in den Seewetterberichten auch Vorhersagen über Seegang und Dünung aufzunehmen. Wenn man bedenkt, daß der internationale Schiffswetterschlüssel seit seiner allgemeinen Einführung vor 35 Jahren Beobachtungen des Seegangs enthält, so ist es bemerkenswert, daß auch heute noch keine regelmäßigen Seegangs-

vorhersagen ausgestrahlt werden. Das vorliegende umfangreiche maritime Beobachtungsmaterial enthält zwar Schätzwerte der Wellenhöhen und Perioden, aber diese Angaben genügen nicht für die Bestimmung der maßgebenden Faktoren zur Umrechnung von Wind- in Wellenenergie. Bei der starken Unregelmäßigkeit, die dem Beobachter das Aussehen der Meeresoberfläche bietet, kann die physikalische Struktur und sonstige Beschaffenheit der einzelnen Wellenkomponenten nur mit Hilfe geeigneter registrierender Seegangsmeßgeräte erfaßt werden. Die Entwicklung derartiger Geräte geht heute dahin, Wellenhöhe, Periode und Richtungsverteilung des Seegangs sowohl in Flachwassergebieten, wie auch auf den Meeren und Ozeanen mit höchster Meßgenauigkeit zu registrieren und anschließend mit Hilfe elektronischer Rechenmethoden die spektrale Energieverteilung hinsichtlich Perioden und Richtungen zu analysieren. Auf diese Weise lassen sich die Gesetzmäßigkeiten der Seegangsstruktur erkennen. Ein weiteres Ziel der Untersuchungen ist es, Aufschluß über die Umwandlung der spektralen Energieverteilung beim Einlaufen in die flachen Gewässer des Küstenvorfeldes zu gewinnen. Auf dem freien Meer ist die Messung des Seegangs ein besonders schwieriges Problem. Es gibt hier bisher nur wenige meßtechnische Möglichkeiten zur Registrierung der Seegangsfaktoren.

2. Der "Seegangs-Beschleunigungsschreiber" des Deutschen Wetterdienstes

Beim Instrumentenamt Hamburg des Deutschen Wetterdienstes wird die Entwicklung von Seegangsmeßgeräten für die freie See seit vielen Jahren und in enger Zusammenarbeit mit dem Seewetteramt mit wachsender Intensität betrieben. Die erforderlichen finanziellen Voraussetzungen für diese Arbeiten ergaben sich aus verschiedenen vom Seewetteramt übernommenen Forschungsaufträgen.

Über Grundlagen, Meßprinzip, Einsatz und Ergebnisse der deutschen Seegangsmeßbojen mit Beschleunigungsschreibern wurde mehrfach berichtet ^{1,2)}. Mit den ersten, zunächst sehr einfachen mechanischen Beschleunigungsmeßgeräten konnten nur maximale und kennzeichnende Wellenhöhen ermittelt werden. Als Meßgröße wird dabei die Vertikalbeschleunigung benutzt, die an einem durch den Seegang auf- und abbewegten Schwimmkörper auftritt. Das verwendete Meßsystem besteht im Grundprinzip aus einer an Federn aufgehängten "seismischen Masse". Diese besitzt bei auftretenden Bewegungen ihrer Halterung ein gewisses Beharrungsvermögen, d.h. sie ist bestrebt, in ihrer relativen Ruhe zu verharren, bis sie der Bewegung des Schwimmkörpers folgt. Die Größe dieses Effektes ist der auftretenden Beschleunigung proportional. Ein mit der Masse gekoppeltes Schreibsystem zeichnet mit einer Tintenfeder den zeitlichen Verlauf der Beschleunigungsmeßgröße auf einer Registriertrommel auf. Aus der Registrierung können über entsprechende Eichkonstanten durch rechnerische Methoden Höhe und Periode sowie die Energie der Meereswellen ermittelt werden.

Dies Grundprinzip der Seegangsmessung aus dem zeitlichen Verlauf der Beschleunigungsmeßgröße oder, genauer definiert, aus der Vertikalbeschleunigung eines Schwimmkörpers und ihrem von der Wellenperiode bestimmten Ablauf wird auch an dem inzwischen weiterentwickelten Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit photographischer Registrierung benutzt. Seit einigen Jahren werden vom Seewetteramt bei interessanten Wetterlagen regelmäßig Seegangsmeßbojen in der Elbmündung und in der Deutschen Bucht eingesetzt. Die dabei verwendeten Meßgeräte registrieren die Vertikalbeschleunigung einer magnetisch aufgehängten "seismischen Masse" auf einem mit konstanter Geschwindigkeit ablaufenden Film (Abb. 1 im Anhang).

Nach Entwicklung des Films ist der zeitliche Verlauf der an der Boje aufgetretenen Vertikalbeschleunigung durch die Grenze zwischen einem geschwärzten und ungeschwärzten Filmtteil aufgespeichert. Für die Auswertung durchläuft der Meßfilm einen lichtelektrischen Wandler, der den zeitlichen Ablauf der registrierten Beschleunigungswerte über ein Photoelement wieder in analoge Meßspannungen umwandelt (Abb.2).

Dieser Meßspannungsverlauf bildet den Ausgangspunkt für das unmittelbar folgende elektronische Integrations- und Analysenverfahren. In einem Analog-Rechenverfahren erhält man die Energiedichte des Seegangs in der üblichen Vergleichseinheit cm^2/sec für alle in Betracht kommenden Frequenzen und somit das Energiespektrum. Die absolute Einheit der Energiedichte bezogen auf die Einheitsfläche ergibt sich aus der Multiplikation mit dem spezifischen Gewicht des Wassers und der Fallbeschleunigung, sowie Integration über das betrachtete Frequenzintervall. Abb. 3 zeigt das Blockschema für die Gewinnung des Seegangsspektrums aus der Beschleunigungsmessung mit Filmregistrierung nach dem Fourier-Analysenverfahren.

In Abb. 4 ist die Kurve der spektralen Energieverteilung einer am 3.11.1961 beim Leuchtturm Mellum Plate durchgeführten Seegangsmessung dargestellt, die aus einer 20 min-Registrierung entsprechend 5 m Film-länge analysiert und deren markante Punkte direkt mit einem x-y-Plotter aufgezeichnet wurden. Für die Analyse eines Meßfilms werden etwa 2 1/2 Stunden benötigt.

-Die in Holland, England und den USA entwickelten Meßbojen arbeiten ebenfalls nach dem Beschleunigungs-Meßprinzip, wenn auch die Verfahren im einzelnen recht unterschiedlich sind. Ein wesentliches Merkmal unserer Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet ist die generelle Anwendung von Meßwertspeichern innerhalb der Boje. Wie das Blockschema Abb. 3 zeigt, ist der meßseitige Aufwand bei diesem Verfahren besonders gering, so daß eine größere Anzahl von Meßstellen mit Bordpersonal, d.h. ohne Einsatz besonderer Meßtrupps simultan betrieben werden kann. Außerdem sind keine die Messungen störenden Schwimmkabel zur Boje erforderlich. Der zur Durchführung der Analyse erforderliche elektronische Aufwand

wird in eine Auswertzentrale verlegt. Auf diese Weise lassen sich Meßprogramme auf breiter Basis mit erträglichem Kosten- und Personalaufwand durchführen. In den USA, wo bei derartigen Forschungsprogrammen mit ungewöhnlich großem elektronischem Aufwand gearbeitet wird, ist man neuerdings ebenfalls bestrebt, meßseitige Einrichtungen zu entwickeln, die das hiesige Prinzip verfolgen. In einer derartigen Fragen betreffenden Fachsitzung an der TH Massachusetts hat Dr. Keily vor einiger Zeit dringend die Entwicklung von Meßbojen gefordert, die mit etwas niedrigeren als "astronomischen Kosten" erstellt werden können.

Trotz aller Bemühungen bleibt vorläufig der Weg zu unkomplizierten Meßeinrichtungen schwierig, weil mit dem weiteren Eindringen in die Struktur des Seegangs immer weitere Informationen mit größerer Meßgenauigkeit notwendig werden. So können z.B. mit dem oben beschriebenen Seegangs-Beschleunigungsschreiber des Deutschen Wetterdienstes lange Dünungswellen nicht registriert werden, obwohl der Energieanteil dieser Wellen erheblich ist. Die Grenze der Meßempfindlichkeit mechanischer Beschleunigungsaufnehmer liegt in dem in Betracht kommenden Frequenzbereich von 0,05 bis 1,5 Hz bei etwa $2 \cdot 10^{-3} g$, (g = Fallbeschleunigung) so daß die geringen Beschleunigungswerte langer Dünungswellen damit nicht mehr erfaßt werden. Dringend notwendig sind auch Angaben über die Richtung des Seegangs bzw. über seine spektrale Richtungsverteilung. Die Veränderungen der Meeresoberfläche werden außerdem nur dann exakt gemessen, wenn die Meßboje allen Bewegungen folgt und der Meßfühler die wahre Vertikalbeschleunigung aufnimmt. Da die Meßboje an den Hängen der Wellen eine Schräglage einnimmt, wird ein fest mit dem Bojenkörper verbundener Beschleunigungsaufnehmer nicht die der Wellenbewegung entsprechende Vertikalbeschleunigung b aufnehmen, sondern die sich aus dem Abweichwinkel ergebende Komponente b' . Der Anteil der Fallbeschleunigung g wird ebenfalls in Abhängigkeit vom Cosinus des Kippwinkels α auf g' reduziert (Abb.5).

Dabei ist vorausgesetzt, daß der Meßwertaufnehmer nicht auf die aus den Orbitalbewegungen der Wellen resultierenden Horizontalbeschleunigungen anspricht.

Da die b -Komponente teilweise als positiver und z.T. als negativer Wert auftritt, die Fallbeschleunigung g jedoch nach unten gerichtet ist, treten am Beschleunigungsaufnehmer außerdem Störungen der Meßwertlinearität auf. Letztere ist aber Voraussetzung für die Anwendung unkomplizierter elektronischer Auswertmethoden.

Nach theoretischen Arbeiten von M.J. Tucker ³⁾ kann der durch Kippbewegungen der Meßboje bedingte Fehler berechnet werden, wenn man das wahre Seegangsspektrum zum Zeitpunkt der Messung kennt. Die dafür erforderlichen Vergleichsmessungen mit absoluten Verfahren (z.B. photographische oder Ultraschall-Meßmethoden) konnten bisher nur an wenigen Punkten im Küstenvorfeld bei relativ geringen Wassertiefen (etwa 20 m)

durchgeführt werden. Störeffekte durch Meßortunterschiede zwischen Meßboje und Vergleichsgerät, Fesselstörungen an der Meßboje sowie die Gezeiten beeinflussen die Messungen, so daß derartige Vergleiche nicht zu absolut sicheren Ergebnissen führen. Trotz dieser Schwierigkeiten und Mängel wurden bei mehrfach in der Jademündung durchgeführten Vergleichsmessungen zwischen Meßbojen mit Beschleunigungsaufnehmern und gefilmten Wellenprofilen wertvolle Erkenntnisse für die weitere Entwicklung der Seegangmeßgeräte gewonnen. Parallel zu diesen mit vielen Einzelwerten durchgeführten Vergleichsmessungen wurden im Tank der Schiffbau-Versuchsanstalt Hamburg Messungen an künstlich erzeugten Wellen mit sinusförmigen Profilen und parallelen Kämmen durchgeführt. Als zuverlässiges Vergleichsnormale wurde hier eine Ultraschall-Wellensonde des St. Anthony Falls Hydraulic Lab. der Universität Minnesota benutzt. Bei Wellenhöhen bis 41 cm und verschiedenen Perioden wurden an Meßbojen mit fest eingebauten Beschleunigungsschreibern fehlerhafte Anzeigen mit Erniedrigungen der Wellenhöhe um 6 bis 7 % ermittelt, die im wesentlichen durch Abweichungen der Beschleunigungsrichtung von der Vertikalen bedingt sind (siehe Tabelle).

Vergleich der im Tank mit Ultraschallwellensonde und Meßboje an verschiedenen Wellenprofilen ermittelten Wellenhöhen

Wellenprofil	Anzahl der Wellen	Durchlaufzeit am Standort der Ultraschallsonde in sek	Frequenz in Hz	Wellenhöhen in cm		Abweichung der Meßboje in cm
				Ultrasch. sonde	Meßboje	
1	7	16,45	0,413	38,4	35,6	-2,8
2	7	16,0	0,437	40,0	37,1	-2,9
3	8	15,7	0,508	40,0	37,2	-2,8
4	10	16,0	0,625	31,0	29,0	-2,0

Zwischen gefesselten und freitreibenden Meßbojen ergaben sich dagegen bei den Tankversuchen keine Meßwertunterschiede. Fesselfehler treten offenbar nur bei den unregelmäßigen Wellenprofilen im freien Seegang und mit längeren Halteleinen bzw. Schwimmkabeln auf. Ein bemerkenswertes Resultat ergab die Untersuchung von Eigenfrequenzeinflüssen der Meßboje. Nach dem Durchlauf von etwa 20 Einzelwellen konstanter Höhe und Periode treten an der Meßboje Tauchschwingungen auf, die durch die Eigenfrequenz der Boje bestimmt sind.

Bei unregelmäßigem Verlauf der einzelnen Wellenprofile im freien Seegang wurden derartige Störungen bisher nicht festgestellt. Einflüsse der Bojen-Eigenfrequenz auf das Meßergebnis können aber nicht ausgeschlossen werden.

Die Eigenfrequenz der Meßbojen wurde aus Beschleunigungsregistrierungen im Tank ermittelt. Dabei wurde die freischwimmende Boje einmalig kurz eingetaucht und die nachfolgende gedämpfte Schwingung aufgezeichnet.

Für die neue Glasfaser-Polyester-Meßboje in der Form nach dem Schema Abb. 7 ergibt sich bei einem Gesamtgewicht von 24 kg ein Eigenfrequenzwert von $f = 1,12$ Hz. Der Wert liegt bereits in einem Frequenzbereich mit sehr geringen Energieanteilen, und aus den aufgenommenen spektralen Energieverteilungskurven ergaben sich bisher keine Anhaltspunkte für Eigenfrequenzeinflüsse.

Nach den bisher durchgeführten Untersuchungen und Vergleichsmessungen läßt sich der "Seegangs-Beschleunigungsschreiber" des Deutschen Wetterdienstes bei objektiver Beurteilung folgendermaßen charakterisieren:

1. Einfaches und robustes mechanisches Seegangs-Meßgerät mit automatischer photographischer Aufzeichnung (Speicherung) des Beschleunigungsverlaufs in der freitreibenden Boje.
 2. Meßbereich der erfaßbaren Seegangsfrequenz etwa 0,1 bis 3 Hz
 3. Meßfehler der Wellenhöhe 6 bis 7 % *)
 4. Meßfehler der Wellenperiode 1 %
 5. Keine Angaben der Seegangsrichtung
3. Die "Seegangsmeßboje Type WPR" zur Messung von Wellenhöhe, Periode und Richtung

3.1 Prinzipieller Aufbau der "Seegangsmeßboje Type WPR"

Die Forderungen nach einer besseren meßtechnischen Erfassung der langwelligen Energieteile, besonders auch der Dünungsenergie, sowie nach Meßeinrichtungen zur Bestimmung der Richtungsverteilung des Seegangs führten zur Untersuchung der Möglichkeiten für eine Weiterentwicklung des "Seegangs-Beschleunigungsschreibers".

Die mit dem "Seegangs-Beschleunigungsschreiber" erzielten Meß- und Versuchsergebnisse zeigen, daß eine weitere Entwicklung dieses Gerätetyps nur sinnvoll ist, wenn folgende wesentlichen Forderungen erfüllt werden können:

- a) Höhere Meßgenauigkeit und größere Meßbereich-Auflösung. Das ist nur zu erreichen durch konsequenten Übergang von mechanischen zu elektronischen Beschleunigungsaufnehmern.
- b) Anwendung von geeigneten Kreiselsystemen zur Vertikal-Stabilisierung der Beschleunigungsachse in der vom Seegang bewegten Boje.

In den USA wurden im Rahmen der Satelliten-Programme elektronische Beschleunigungsaufnehmer mit hervorragenden Meßeigenschaften entwickelt, die seit einiger Zeit für kommerzielle Verwendung freigegeben sind (**). Beim Instrumentenamt Hamburg durchgeführte Versuchs-

*) Der Meßfehler wurde an künstlichen Wellen extremer Steilheit ermittelt. Im freien Seegang müssen die aufgelagerten kurzen Wellen bei der Doppelintegration der Beschleunigungsmeßwerte herausgefiltert werden, so daß die Abweichungen der ermittelten Wellenhöhen dann erheblich größer sind.

***) System Donner Corpor. Concord, Calif.

messungen mit derartigen Aufnehmern erwiesen ihre große Überlegenheit gegenüber mechanischen Beschleunigungs-Meßgeräten durch eine um den Faktor 5 gesteigerte Meßgenauigkeit. Auch Versuche mit kardanischn aufgehängten Pendelkreiseln hatten günstige Ergebnisse. Im Tank konnten bei künstlichen Wellen Stabilisierungsgenauigkeiten von $\pm 1^\circ$ erreicht werden. Durch Ausnutzung der Kardanbewegungen gegenüber der stabilisierten Kreiselachse ergaben sich die meßtechnischen Voraussetzungen für eine Erfassung der jeweiligen Bojenneigung in zwei azimuthal um 90° versetzten Ebenen. Diese Meßdaten bilden die wesentliche Grundlage zur Berechnung der spektralen Verteilung der Energie auf die Laufrichtung der Wellenkomponenten.⁴⁾

Messungen mit einer ersten Versuchsboje, die mit derartigen Einrichtungen ausgerüstet ist, bestätigen die bedeutende meßtechnische Überlegenheit sowohl der elektronischen Beschleunigungsaufnehmer wie auch der Kreisel-Stabilisierung. Nachteilig waren zunächst die Stromversorgung des verwendeten Schiffskreisels aus dem Netz und das benötigte relativ schwere Schwimmkabel. Außerdem fehlten noch die notwendigen Meßdaten über die jeweilige Orientierung der Meßboje gegenüber der geographischen Nordrichtung, sowie die elektronischen Einrichtungen zur Filterung und Doppelintegration der Beschleunigungsmeßspannung für eine unmittelbare Registrierung der Meßdaten.

Bei Versuchsmessungen vor BÜsum konnten mit direkter Kabelübertragung außer den Beschleunigungsmeßwerten auch die Neigungswinkel der Meßboje in zwei um 90° azimuthal versetzten Ebenen auf einem Plotter (x-y-Schreiber) registriert werden. Unter Zwischenschaltung eines Impulsgebers wird im Polarkoordinaten-Diagramm die Häufigkeitsverteilung der Bojenbewegung mit 4 Schreibpunkten je Sekunde aufgezeichnet. Die Mittelachse der auf diese Weise registrierten Punktwolke in Abb. 6 kennzeichnet die mittlere Richtung des Seegangs. Die Feststellung der Bojenlage gegenüber geographisch Nord mußte bei den BÜsumer Versuchen mit optischen Hilfsmitteln erfolgen.

Die Methode der direkten Umwandlung der Beschleunigungsmeßwerte in den Weg-Spannungs-Verlauf d.h. Durchführung der elektronischen Filterung und Doppelintegration in der Meßboje ergab bei weiteren Versuchen eine wesentliche Verringerung des Rauschpegels und der Driftfehler an den Operationsverstärkern, so daß der gesamte Umwandlungsprozeß günstiger verläuft.

Nach den angeführten Versuchen und Vorarbeiten soll der neue Aufbau einer freitreibenden Seegangsmeßboje insgesamt folgende Forderungen berücksichtigen:

- a) Messung des zeitlichen Verlaufs der an einer durch Pendelkreisel stabilisierten Vertikalachse auftretenden Beschleunigung in Form einer analogen Spannung.

- b) Elektronische Filterung und Doppelintegration der Beschleunigungsmeßspannung im Analog-Rechenverfahren mit Operationsverstärkern, sowie Registrierung des zeitlichen Verlaufs der Wegspannung.
- c) Registrierung des zeitlichen Verlaufs des Bojenazimuts gegenüber der magnetischen Nordrichtung.
- d) Messung und Registrierung des zeitlichen Verlaufs der Bojen-Neigungswinkel gegenüber der vertikalen Achse des Pendelkreises in zwei um 90° azimuthal versetzten Ebenen.
- e) Betrieb aller Meßeinrichtungen und Wandler aus einer in die Boje eingebauten Akkubatterie für ca 4 Std. Betriebszeit.

3.2 Aufbau der "Seegangsmessboje Type WPR"

Das Blockschema Abb. 7 zeigt den Bojenkörper und die prinzipielle Anordnung der Meß- und Versorgungseinrichtungen innerhalb der Boje. Der Glasfaser-Polyester-Bojenkörper ist aus zwei kegelstumpfförmigen Schalen zusammengesetzt. Sein Durchmesser beträgt etwa 80 cm, die Höhe etwa 30 cm. An der Oberseite befindet sich ein wasserdicht zu verschließender Deckel mit Tragbügeln. Der Meßkopf ist in der Bojenmitte angebracht. Sein Aufbau ist in Abb. 8 schematisch dargestellt.

Das in einem Kardanrahmen aufgehängte Pendelsystem besteht aus einem Asynchronkreisel, dem oben aufgesetzten Magnetkompaß mit lichtelektrischer Abtastung und dem als Pendelgewicht an der Unterseite des Kreises angebrachten elektronischen Beschleunigungsaufnehmer.

Das kardanische System steuert über seitenelastische Kupplungen zwei Potentiometer-Lagengeber für die Bojen-Neigungswinkel in zwei um 90° azimuthal versetzten Ebenen.

Eine Akkubatterie 30 Volt/6 Amperestunden und ein angeschlossener Transistorgenerator liefern die erforderlichen Betriebsspannungen. Die dem Generator zugeführte Gleichspannung wird in eine dreiphasige Wechselspannung 30 Volt/400 Hz umgewandelt. Die Analog-Rechenschaltung für die elektronische Filterung und Doppelintegration der Beschleunigungswerte ist als austauschbarer Einschub mit dem Dual-Operationsverstärker gekoppelt. Meßkopf, Analogrechner, Transistorgenerator und Akkubatterie sind auf einer der Bojenform angepaßten Halterung angebracht und durch flexible Kabel mit Kupplungssteckern untereinander verbunden. Für die Registrierung bzw. Speicherung der Meßwertkomponenten: Wellen- Wegverlauf, x- und y-Neigungslagen der Boje gegen die Vertikale und Azimut-Winkellage der Boje gegen magnetisch Nord sind zwei getrennte Lichtpunkt-Linienschreiber mit Photopapier-Registrierung für je zwei Komponenten vorgesehen. Zur Zeit wird die Übertragung der Meßwerte noch über ein 100 m langes Mikrofonkabel vorgenommen, wobei die Registrierung auf Kompensations-Linienschreibern erfolgt.

3.3 Speicherung und Wiedergabe der Meßwerte

Der vorstehend erläuterte Gesamtaufbau der freitreibenden Seegangsmessboje setzt voraus, daß der aufgezeichnete zeitliche Verlauf aller Meßkomponenten dem Registrierstreifen vollautomatisch wieder entnommen und in analoge Spannungswerte umgewandelt werden kann. Diese Möglichkeit bietet die Anwendung eines Kurvenfolgerverfahrens. Gegenüber allen bisher bekannten Verfahren zur Speicherung und Wiedergabe von Meßwerten erfordert diese Einrichtung einen erheblich geringeren Gesamtaufwand. Der wesentliche Baustein des Systems ist ein nach lichtelektrischem Prinzip arbeitender Linienabtaster, der mit einem Kompensationsschreiber gekoppelt ist und die Abtastung jeder Linienregistrierung vollautomatisch durchführt. Über ein Folgepotentiometer wird der abgetastete Kurvenverlauf direkt in analoge Meßspannungen umgewandelt (Abb. 9).

Da auf diese Weise jede nicht kreuzende Tinten- oder Lichtzeiger-Linienregistrierung beliebig oft mit großer Genauigkeit abgetastet und wieder in analoge Meßspannungen umgewandelt werden kann, ist für die Speicherung von Meßwerten praktisch jeder Linienschreiber verwendbar. Bei Seegangsmessungen im Frequenzbereich von 0,02 ... 2 Hz sind für die naturgetreue Aufzeichnung der Einzelkomponenten Lichtzeiger-Galvanometer mit Photopapierregistrierung besonders geeignet. Derartige Registriergeräte können unter Verwendung geeigneter Einzelteile in kleinen Abmessungen und für Batteriebetrieb erstellt werden.

Die erzielbare Gesamtauflösung beträgt bei Anwendung des Linienfolgers für eine Amplitudenbreite von 50 mm je Komponente 1:500, d.h., 1/10 mm Amplitudenhub auf dem Registrierstreifen wird noch in analoge Ausgangsspannung umgewandelt. Gegenüber dem Film-, Magnetband- oder Magnetkernspeicher hat das Linienfolgerverfahren den Vorteil der Direkteinspeisung in die Analog-Analysieranlage, benötigt also keine weiteren Umwandlungssysteme.

3.4 Meßgenauigkeit der kreiselstabilisierten Aufnehmer für Beschleunigung und Lage

Der mit den Seegangsproblemen beschäftigte Theoretiker wird stets Meßgenauigkeiten fordern, die über den gegenwärtig realisierbaren Möglichkeiten liegen. Bereits nach Vorlage der ersten Ergebnisse mit dem "Seegangsbeschleunigungsschreiber" wurde zwecks weiterer Erfassung der langwelligen Energieanteile eine Erhöhung der Meßgenauigkeit um einen Faktor 10 gefordert. Die entsprechende Meßgenauigkeit von $\pm 2,5 \times 10^{-4}g$ kann in dem erforderlichen Frequenzbereich nur mit elektronischen Beschleunigungsaufnehmern erreicht werden, ganz abgesehen von den das Endergebnis beeinflussenden Fehleranteilen aus Abweichungen der Vertikalachse, zeitlichen Ablaufschwankungen der Registrierung und Analogrechenfehlern.

Die nachstehend zusammengefaßten Meßgenauigkeitsangaben der Meßsysteme und Stabilisierungseinrichtungen haben sich bei den Arbeiten an der Versuchsboje als realisierbar erwiesen und bilden z.Z. die Eichgrundlage der "Seegangboje Type WPR" mit kreiselstabilisierten Aufnehmern für Beschleunigung und Lage:

- a) Beschleunigungsmessung, Meßbereich $\pm 1g$, Meßgenauigkeit $\pm 2,5 \times 10^{-4}g$
- b) Pendelkreiselstabilisierung, Meßgenauigkeit ± 1 Grad
- c) Lagewinkelmessung, Meßbereich $\pm 40^{\circ}$, Meßgenauigkeit ± 1 Grad
- d) Genauigkeit der Zeitachse für alle registrierten Meßwerte ± 1 %
- e) Azimutmessung gegen magnetisch Nord, Winkelmeßgenauigkeit ± 3 Grad
- f) Umwandlungsgenauigkeit der Registrierungen für je 50 mm max.
Amplitudenbreite 0,2 %

4. Grundlagen, Aufbau und Eichung der verwendeten Meß- und Wandlerysteme

4.1 Beschleunigungsaufnehmer

Der Beschleunigungsaufnehmer (Type 4310 der Firma System Donner Corp. Concord/Calif.), ist ein volltransistorisiertes Meßsystem hoher Präzision. Bei einer Linearität von besser als 0,05 % vom Endwert beträgt die Ausgangsspannung $\pm 7,5$ Volt. Die Nullpunktstabilität und Linearität werden durch ein hochempfindliches Miniatur-Servosystem erreicht. Funktion und Aufbau sind in nachstehendem Schema dargestellt (Abb.10).

Wird der Aufnehmer in seiner empfindlichen Achse beschleunigt, so versucht die seismische Masse zunächst in ihrer relativen Ruhe zu verharren, um anschließend der Bewegung des Gehäuses zu folgen. Jede Lageänderung der Masse erzeugt jedoch im Detektor sofort eine proportionale Spannungsänderung, die den nachgeschalteten Operations-Verstärker entsprechend beaufschlagt. Die verstärkte Ausgangsspannung gelangt in die mit der seismischen Masse verbundene Rückstellspule, die jede Lageänderung der Masse über den Detektor kompensiert. Die auf den Eingang des Servomechanismus wirkende Kraft ist der Beschleunigungsgröße proportional, während die Rückstellkraft des Servomechanismus dem durch die Rückstellspule fließenden Strom proportional ist. Die Beschleunigungsmeßgröße kann daher am Arbeitswiderstand als analoge Spannungsgröße abgegriffen werden. Für die Aufzeichnung des Beschleunigungsverlaufs mittels Lichtpunktlinienschreiber kann der proportionale Rückstellstrom direkt niederohmig zwischen Punkt 1 und 2 abgegriffen werden. Dem der Beschleunigung der Wellenbewegung entsprechenden Ausgangssignal des Beschleunigungsaufnehmers ist eine der Fallbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) analoge Gleichspannung überlagert. Diese wird im Hinblick auf die weitere elektronische Integration kompensiert. Das wird durch eine bei Punkt 7 (Abb.10) an die Rückstellspule geführte konstante Kompensationsspannung erreicht. Die Einstellgenauigkeit des Aufnehmers ist für den Meßbereich von $\pm 1g$ besser als $5 \cdot 10^{-4}g$.

4.2 Eichverfahren für Beschleunigungsaufnehmer

Die notwendige Grundlage jeder Messung ist eine zuverlässige Eichung des verwendeten Meßgerätes. Mit der fortschreitenden Entwicklung der Seegangsmessgeräte wurden die Einrichtungen für die Durchführung von Vertikalbeschleunigungs-Eichungen systematisch den steigenden Anforderungen an die Meßgenauigkeit angepaßt. Prinzip und Arbeitsweise einer bewährten Beschleunigungs-Eichanlage sind in folgender Schema-Zeichnung dargestellt (Abb. 11).

Der statisch und dynamisch ausgewuchtete Dreharm wird von einem Motor über ein Regelgetriebe mit kontinuierlich einstellbarer Drehzahl angetrieben. Die Kontinuität der Drehung sowie die minutliche Umlaufzahl werden registriert. Der drehbar angebrachte Beschleunigungsaufnehmer wird durch eine Parallelführung mittels Kettentrieb ständig in seiner empfindlichen Vertikalachse gehalten und nimmt in der durch den Dreharm beschriebenen Kreisbahn die einer reinen Sinusschwingung entsprechenden Beschleunigungszustände auf. Die Amplitude dieser Schwingungen kann wahlweise auf 1 bzw. 0,5 m eingestellt werden. Die Betriebs- und Meßspannungen werden über Schleifring-Kollektoren mit Feinkontakten übertragen. Eine Netzeinheit liefert die stabilisierten Betriebsspannungen für den Beschleunigungsaufnehmer. Beschleunigungsmeßwerte und Drehzahl werden mit Kompensationsschreibern registriert. Die Eichung des Aufnehmers erfolgt im allgemeinen in je 10 Drehzahlstufen für die Amplitude $A = 1$ m, wobei die Wellenhöhe $h = 2 A$ ist.

Für die maximale Vertikalbeschleunigung jeder Drehzahlstufe gilt:

$$b_{\max} = A \frac{4\pi^2}{T^2} \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \right] \quad (1)$$

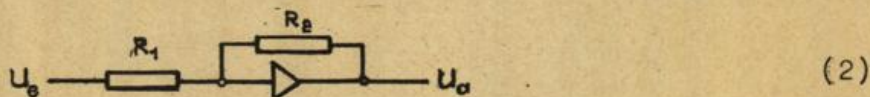
wobei T die Wellenperiode in Sekunden ist.

Abb. 12 zeigt den an der Beschleunigungs-Eichanlage aufgenommenen Verlauf der Ausgangsspannung in Volt in Abhängigkeit von der Vertikalbeschleunigung für den Meßbereich von $\pm 1,2 g$.

Der unterschiedliche Umwandlungswirkungsgrad infolge der notwendigen Filterung und Doppelintegration der Beschleunigungs-Ausgangsspannungen läßt eine direkte Anwendung der Eichkurven nicht zu. Sie dienen lediglich der Funktions- und Linearitäts-Kontrolle des elektronischen Beschleunigungsaufnehmers. Nach der Übernahme des Filter- und Integrationsvorganges in die Meßboje hat es sich als notwendig erwiesen, die Eichwerte der Wellenhöhe über den in Betracht kommenden Perioden- bzw. Frequenzbereich für die verschiedenen Filterbereiche an der Eichanlage in Form absoluter Spannungswerte aufzunehmen. Die Vertikalbeschleunigungs-Meßspannung wird während der Eichung in der gleichen Weise wie beim späteren Meßvorgang sofort gefiltert, doppelt integriert und dann als Weg-Spannungs-Verlauf registriert. Aus den graphisch aufgetragenen Werten (siehe Abb. 13) läßt sich für die nachfolgende Fourier- bzw. Autokorrelations-Analyse der absolute Energie-Maßstab errechnen.

4.3 Filterung und Doppelintegration der Vertikal-Beschleunigungs-Meßwerte

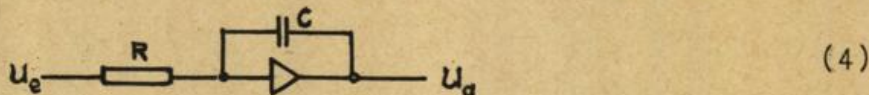
Die Filterung und Doppelintegration der Vertikal-Beschleunigungs-Meßwerte erfolgt mit Hilfe des Analog-Rechenverfahrens 5) 6). Diese Technik beruht auf der Möglichkeit, die in Form einer elektrischen Spannung gegebenen Meßwerte durch bestimmte Schaltmaßnahmen zu verändern. Dafür werden sogenannte Gleichstrom-Rechenverstärker (Operationsverstärker), Ohmsche Widerstände (R in Megohm) und Kondensatoren (C in Mikrofarad) benutzt. Bezeichnet U_e die Eingangsspannung, U_a die Ausgangsspannung der folgenden Schaltanordnung für die Multiplikation mit einem bestimmten Faktor



so gilt die Gleichung:

$$\frac{-U_a}{U_e} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

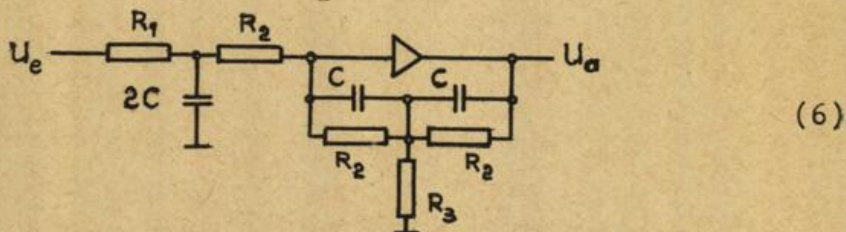
Für eine einfache Integration ist folgende Schaltanordnung maßgebend:



Es gilt die Gleichung:

$$U_a = \frac{1}{RC} \int_{t_0}^t U_e dt \quad (5)$$

wobei die Integration von der Anfangszeit t_0 bis zur Zeit des Abbruchs der Rechenoperation t erfolgt. Die doppelte Integration erfordert zwei derartige Integrationsstufen. Da die Eingangs-Meßspannungen (U_e) in dem gegebenen Frequenzbereich von gewissen Störspannungen, dem sogenannten "Rauschen" überlagert sind, müssen zur Ausschaltung von Drift-Erscheinungen an den Rechenverstärkern (Verlagerungen des Null-Punktes) entsprechende elektrische Filter angewendet werden. Die Auswahl geeigneter Filterschaltungen ist deshalb ein besonderes Problem. Für die gleichzeitige Filterung und Doppelintegration hat sich die nachstehend angegebene, in den USA entwickelte Schaltung *) bewährt, die mit einem einzigen Rechenverstärker alle Operationen durchführt.



*) Donner Corpor. Concord, Calif. (Operational Amplifiers-Applications)

Für die Schaltung gilt die Gleichung:

$$U_a = - \left(\frac{1}{R_1 C} \right)^2 \int_0^t \int_0^{t^*} U_e dt dt^* \quad (7)$$

(t^* = Zeit, * nur aus formalen Gründen)

Die Wirksamkeit der Filter wird bei konstanten Integrations-Widerständen R_1 durch die Widerstände R_2 und R_3 bestimmt. Es gilt:

$$\frac{1}{R_3} = 2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (8)$$

Die Ausgangsspannung U_a wird bei sinusförmiger Eingangsspannung U_e um den Filterfaktor β verringert, wobei

$$\beta = \frac{(\omega R_1 C)^2}{1 + (\omega R_1 C)^2} \quad (9)$$

ist (ω = Kreisfrequenz).

Bei der Beschleunigungseichung mit anschließender Filterung und Doppelintegration nach Schaltung (6) wird für die Filter-Widerstände $R_2 = 1,5 \dots 5,0$ die absolute Ausgangsspannung U_a direkt bestimmt, so daß eine gesonderte Berechnung des Verlustfaktors entfällt.

In Abb. 13 sind die an der Eichanlage bei verschiedenen Frequenzen für 5 verschiedene Filter-Widerstände mit konstanter Wellenhöhe $h = 2$ m registrierten absoluten Ausgangsspannungen U_a dargestellt.

Der Verlauf der Eichkurven zeigt, daß eine naturgetreue Aufzeichnung der sichtbaren Wellen niedriger Frequenz nur bei Anwendung sehr weicher Filter ($R_2 = 5$) erfolgt. Die jeweiligen Grenzbedingungen sind dadurch gekennzeichnet, daß in Abhängigkeit vom herrschenden Seegang schließlich am Ausgang des Doppel-Integrators eine unzulässige Drift des Nullpunktes auftritt. Es müssen deshalb die für den Seegang zulässigen Filter-Widerstände R_2 und R_3 entsprechend gewählt werden. In der Praxis werden austauschbare Filterkästen mit fertiger Programmierung verwendet.

4.4 Pendelkreisel- und Lagengebersystem

Wie bereits in Abb. 9 dargestellt, wird zur Stabilisierung der vertikalen Meßachse ein kardanisch aufgehängter Pendelkreisel mit Asynchronmotor für dreiphasige Wechselspannung 30 Volt, 400 Hz, verwendet. Kreisel- und Kardanrahmen sind in Präzisionskugellagern aufgehängt und mit je einem Potentiometer-Lagengeber gekoppelt. Damit werden die Neigungslagen der Boje gegenüber der stabilisierten Vertikalachse in zwei azimuthal um 90° versetzten Ebenen in Form analoger Ausgangs-Meßspannungen auf das Registriergerät übertragen. Beschleunigungsaufnehmer und Magnetkompaß mit lichtelektrischer Abtastung sind fest mit dem Kreisel verbunden und bilden mit dem unterhalb der Aufhängung liegenden Schwerpunkt das Pendelsystem. Sämtliche Stromzuführungen und Meßspannungs-

leitungen führen über axiale Punkt-Kontakt-Systeme. Die zusätzlichen Reibungsverluste an der Kreiselaufhängung sind auf diese Weise besonders gering. Abb. 14 zeigt den Aufbau eines derartigen beim Instrumentenamt Hamburg hergestellten Systems.

Der Pendelkreisel besitzt bei Auslenkungen seiner Achse um 35° gegen die Vertikale eine Präzessionsdauer von 11 Min. In Abb. 15 ist die an einem x-y-Schreiber registrierte Präzessionskurve dargestellt.

Infolge der unterschiedlichen Lagerabstände der kardanischen Aufhängung zeigt die Kurve einen elliptischen Verlauf. Für die Stabilisierung ist diese konstruktionsbedingte Abweichung nicht von Bedeutung. Die Abweichungen der Kreiselachse von der Vertikalen im natürlichen Seegang betragen nach mehrfachen im Anschluß an die Messungen durchgeführten Kontrollen weniger als ± 1 Grad.

Die Lagengeber-Systeme sind über seitenelastische Kupplungen mit der Kreisel- bzw. Kardanrahmen-Aufhängung verbunden. Sie bestehen aus je einem Präzisions-Ringpotentiometer mit 800 Ohm Widerstands-Änderung für einen Drehwinkel von 110° , die über zusätzliche Eichpotentiometer von je 1500 Ohm Widerstand geeicht werden. Abb. 16 zeigt die Schaltung mit Plotter für den Eichvorgang.

Die Auslenkung der Kreiselachse wird an einer Winkelskala am Meßkopfgehäuse für die x- bzw. x-Lage eingestellt und die Auslenkspannung am Plotter registriert. Bei Anwendung besonders berechneter Eichschablonen werden bei richtiger Einstellung der Potentiometer unverfälschte Kreise für 10° bis 40° Auslenkung am Plotter aufgezeichnet.

Die Registrierung der Neigungskomponenten in der Boje kann vorerst nur in getrennten Linienschreibern erfolgen. Bei gleichzeitiger Umwandlung der Registrierungen in analoge Spannungswerte bei der Auswertung kann die Häufigkeitsverteilung der Bojenlagen mit dem Plotter direkt auf ein Polarkoordinaten-Diagramm übertragen werden (siehe Abb. 6). Voraussichtlich wird aber eine digitale Auswertmethode zur Anwendung kommen, wobei die spektrale Verteilung der Seegangsennergie mit den ermittelten Richtungskomponenten des Seegangs in Beziehung gebracht wird.

4.5 Magnetkompaß mit lichtelektrischer Abtasteinrichtung

Azimutkreisel mit Lagengeber zur notwendigen Azimutorientierung des Richtungsspektrums kommen infolge ihres Gewichtes sowie des erheblichen Raum- und Strombedarfs für den Einbau in die Boje nicht in Betracht. Unter Anwendung quantitativer Lichtmeßmethoden mit Hilfe von Silizium-Photoelementen wurden deshalb Versuche zur lichtelektrischen Abtastung kleiner Magnetkompassse durchgeführt.

Die zunächst mit ringförmigen Graukeilen aus Kunststoff vorgenommenen Versuche zur Abtastung der Kompaßstellung hatten kein befriedigendes Ergebnis. Der unvermeidliche hohe Grundspannungspegel und die geringe Amplitude der Ausgangsspannungen ergaben im Endeffekt keine ausreichende Meßgenauigkeit.

Nach Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Herstellung präziser Ringblenden in Form einer archimedischen Spirale wurde eine für die geforderte Meßgenauigkeit von ± 3 Grad ausreichende Linearität über den ganzen Azimutbereich bei genügend kleinem Grundspannungspegel erreicht.

In Abb. 17 sind Meßprinzip und Aufbau eines Kompasses mit lichtelektrischer Abtasteinrichtung dargestellt. Die Linsenlampe beleuchtet über eine schmale Spaltblende das Photoelement. In dem Strahlengang bewegt sich eine mit dem Kompaßrotor verbundene Ringblende, die am Außenumfang in Form einer archimedischen Spirale ausgebildet ist. Je nach Lage der durch zwei Magnetstäbe herbeigeführten Nordstellung des Rotors gegenüber dem Gehäuse wird das durch die Spaltblende gelangende Licht mehr oder weniger abgeblendet, und das Photoelement liefert über den Arbeitswiderstand eine entsprechende Ausgangsspannung.

Da der Kurzschlußstrom des Photoelementes in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke eine nahezu lineare Charakteristik besitzt, ist bei Anwendung ausreichend kleiner Arbeitswiderstände auch die Ausgangsspannung annähernd linear. Sie wird mittels nachgeschaltetem Gleichspannungsverstärker bis in den Voltbereich verstärkt und kann dann mit normalen Spannungsschreibern registriert werden. Die Einschwingperiode des Rotors wird durch eine Oldämpfungseinrichtung mit dem Dämpfungsverhältnis $k = 2$ gedämpft.

Da der Kompaß zusammen mit dem Beschleunigungsaufnehmer durch den Pendelkreisel vertikal stabilisiert werden soll, mußte der Aufbau den am Kreiselsystem gegebenen Verhältnissen entsprechend gewählt werden. Die Kompaßrose ist ein trichterförmiger Rotor, mit dem Ringblende, Dämpfungszylinder und Magnetstäbe fest verbunden sind. Der Rotor ist mittels Stahlspitzen-Steinlager in einem Leichtmetallgehäuse aufgehängt. Kippbewegungen des Rotors werden mit einer nach oben verlängerten Achse abgefangen. Der Gehäuse-Deckel besitzt einen Zeigerschaft mit Kreuzmarke zur Eichung und Kontrolle der Bojenneigungskomponenten. Im Oberteil des Zeigerschaftes wird die Achse in einem Steinlager geführt. Infolge der ständigen Vertikalstellung der Kompaßachse durch den Pendelkreisel, sowie des tiefliegenden Rotorschwerpunktes treten bei der Bauweise nur sehr geringe Reibungseffekte auf.

Der mit dem Rotor verbundene Dämpfungszylinder taucht mit seinen angebogenen Flügeln in ein Dämpfungsgefäß mit Silikonöl ein. Eine unten am Dämpfungszylinder angebrachte Ringfläche dämpft gleichzeitig achsiale Schwingungen des 2,5 Gramm wiegenden Rotors.

Das Silizium-Photoelement ist in einem Kunststoffhalter eingekittet und mit dem Gehäuse verschraubt. Die Anschlüsse des Photoelementes sind mit außenliegenden Miniatursteckern verbunden. In einem zylindrischen Halter am Unterteil des Gehäuses ist die Linsenlampe federnd eingesetzt. Die Ableitung ihrer Wärme erfolgt durch mehrere Belüftungsschlitze. Die in einem besonderen Herstellungsverfahren gefertigte Spaltblende ist

innerhalb des Gehäuses angebracht. Zur weitgehenden Ausschaltung von Alterungs- und Schwärzungsfehlern wird die Lampe mit einer um 40 % geringeren Aufnahmeleistung betrieben. Schwankungen der Lampenspannung von 1 % ergeben eine Änderung der Ausgangsspannung von 3 %. Bei einem an der Akkubatterie während des Meßzeitraumes ermittelten Spannungsabfall von weniger als 0,5 % bleiben daher die von der Lichtquelle hervorgerufenen Meßfehler der Abtasteinrichtung innerhalb der geforderten Meßgenauigkeit von ± 3 Grad. Bei Untersuchungen der Temperaturabhängigkeit des ganzen Systems ergaben sich für je 10 Grad Änderung nur maximale Abweichungen der Ausgangsspannung von $30 \mu\text{V}$. Die Anzeigege- nauigkeit des Gerätes erreicht $\pm 2,5$ Winkelgrad und liegt damit inner- halb der geforderten Toleranz von ± 3 Winkelgrad. Die Ausgangsspannung beträgt bei 50-facher Verstärkung für den Winkelbereich von 3 bis 360 Grad 0,15 bis 4,0 Volt, wobei die Grundpegelspannung den Betrag von 0,15 Volt erhält. Der tote Winkel von 3 Grad ist bedingt durch die Übergangsstelle zwischen minimaler und maximaler Abblendung des Pho- toelementes. Eine Kompensation des Kompasses ist nicht erforderlich, weil die Eichung der Abtasteinrichtung unter den Betriebsbedingungen der Boje erfolgt. Abb. 18 zeigt für die Winkelabweichungen von 3 bis 360 Grad gegen magnetisch Nord die maßgebenden Ausgangsspannungen.

4.6 Bemerkungen zur elektrischen Schaltung der "Seegangsmesboje Type WPR"

Die gesamte elektrische und elektronische Einrichtung der freitreiben- den "Seegangsmesboje Type WPR" erfordert im Vergleich zu dem unter Ab- schnitt 2 beschriebenen "Seegangs-Beschleunigungsschreiber" einen er- heblichen Mehraufwand. Viele Teile mußten auf ihre Betriebssicherheit sehr eingehend erprobt werden. Sie haben sich aber bei den ersten Ver- suchseinsätzen als ausreichend robust erwiesen. Der transistorisierte Generator (Hersteller: C. Plath, Hamburg) liefert nach Überwindung des Kreisel-Anlauf-Moments sehr konstante Betriebsspannungen. Die notwendige Frequenzstabilität wurde mit einem gesonderten Sinusgenerator erreicht, der durch unterschiedliche Belastungen der Endstufe nicht beeinflußt wird. Diese Schaltmaßnahme ermöglicht auch den ungestörten Betrieb des Eingang- schoppers im Operationsverstärker aus dem 400 Hz-Generator. Die Eichein- stellungen der Lagengeber werden durch Abgleich der am Kardanrahmen ange- brachten Hilfswiderstände erreicht. Der Anschlußpunkt 7 des Beschleuni- gungs-Aufnehmers erhält über den Arbeitswiderstand eine konstante Hilfs- spannung zur Kompensation der Fallbeschleunigung. Der Filterwirkungs- grad wird durch die markierten Widerstände R_2 und R_3 bestimmt. Da der Operationsverstärker einen in sich abgeschlossenen Bauteil bildet, wur- den für die erforderliche Filterwahl austauschbare Einheiten entwickelt, die jeweils auch die erforderliche Programmierung für den Doppel-Inte- grator enthalten.

Die Schaltung des Operations-Verstärkers wurde nicht angegeben, weil bei diesem Gerät verschiedene Verstärker mit sehr unterschied-

lichen Schaltungen verwendet werden. Ebenso wurde die Schaltung der vorgesehenen Registriergeräte nicht dargestellt, weil die Entwicklung kleiner Lichtpunktlinienschreiber noch nicht abgeschlossen ist.

Außerdem sind z.Z. noch Klein-Kompensographen in Erprobung. Infolge ungleicher Belastung der Akku-Batterie (30V) durch die unterschiedlichen Verbraucher muß mit einer maximalen Dauerlast von 48 Watt gerechnet werden. Bei der vorhandenen Gesamtkapazität von 7 Amperestunden beträgt die Betriebszeit der Meßboje etwa 4 Stunden. Abb. 19 zeigt die Gesamtschaltung der "Seegangsmeßboje Type WPR".

5. Ausblick für die weitere Entwicklung der Seegangsmeßbojen

Die sich aus der theoretischen Behandlung von Seegangsproblemen ergebende Forderung nach weiteren Informationen mit größerer Meßgenauigkeit bedingt immer die Entwicklung komplizierterer und kostspieligerer Geräte.

Während der "Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit photographischer Aufzeichnung" wegen seiner Unkompliziertheit und seiner geringen Herstellungskosten verhältnismäßig leicht auf breiter Basis eingesetzt werden kann, ist das bei der wesentlich komplizierteren "Seegangsmeßboje Type WPR mit kreiselstabilisierten elektronischen Aufnehmern" schon erheblich schwieriger. Erst wenn die Entwicklung geeigneter und betriebssicherer Einrichtungen für eine telemetrische Datenübermittlung abgeschlossen ist, können diese Schwierigkeiten beseitigt werden, und die Boje würde damit den meisten wissenschaftlichen Forderungen genügen. Ausschlaggebend sind dann nur die Kosten. Weitere theoretische Erkenntnisse der Struktur des Seegangs werden aber dazu führen, für manche der nur mit breitem Einsatz zu lösenden Aufgaben auch einfache Meßbojen (z.B. mit integrierenden Einrichtungen) mit erträglichem Aufwand zu verwenden.

An dieser Stelle möchte der Verfasser allen Mitarbeitern und Instituten, die durch Förderung, fachliche Beratung und Hilfe bei der Durchführung von Versuchen mitgewirkt haben, seinen besonderen Dank aussprechen:

dem Leiter des Instrumentenamtes Herrn Prof. Dr. Baumbach und dem Leiter des Dezernats M2 des Seewetteramtes Herrn Dr. Walden für die verständnisvolle Förderung der Arbeiten und der Bereitstellung von Projektmitteln,

Herrn Dr. Piest für viele wertvolle Anregungen,

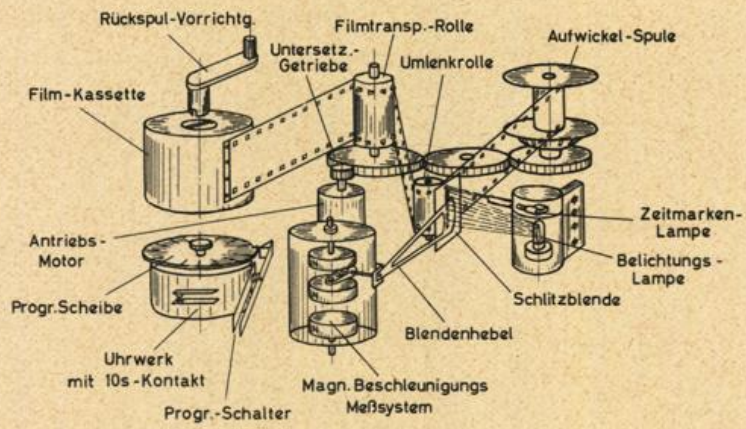
meinen Mitarbeitern Herrn Fischer, Herrn Thormann und Herrn Lindner für gute fachliche Unterstützung,

dem Hydrographischen Institut, Herrn Dr. Christoph, für manchen wertvollen Hinweis auf dem Kreiselgebiet und auch sonstigen vielfachen Hilfen,

ferner dem Wasser- und Schifffahrtsamt Wilhelmshaven, der Schiffbau Versuchsanstalt Hamburg, den Außendienststellen auf dem Bauhof Wedel des Wasser- und Schifffahrtsamtes Hamburg und der Pegelaußenstelle Büsum des Marschenbauamtes Heide für die vielfältige Unterstützung bei der Durchführung von Versuchsmessungen.

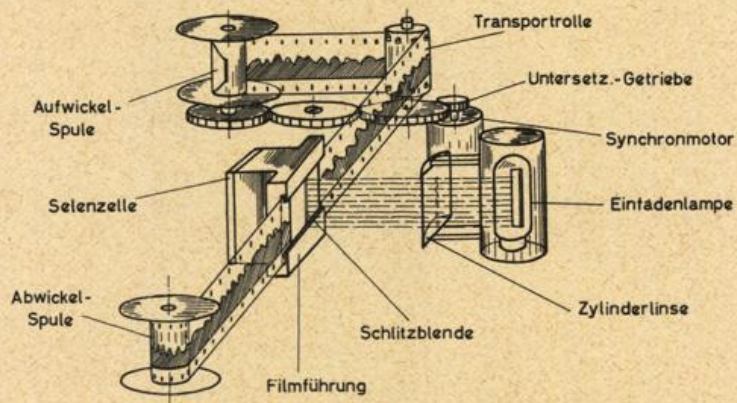
Literaturhinweise

1. A. Lang: Über die Entwicklung von Beschleunigungsschreibern für Seegangsmessungen
Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröffentlichung Nr. 24 (1960)
2. H. Walden und J. Piest: Vergleichsmessungen des Seegangs mit verschiedenen Meßgeräten und ihre Auswertung.
Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröffentlichung Nr. 30 (1961)
3. M.J. Tucker: The Accuracy of Wave Measurements made with Vertical Accelerometers. Deep Sea Res. Vol. 5 (1959)
4. D.E. Cartwright: A Brief Survey of Methods for Finding the Direction of Sea Waves.
The Dock and Harbour Authority Nr. 492 (Okt. 1961)
5. H. Siems: Seegangsanalyse mittels Analogrechner,
Sonderdruck Rohde und Schwarz Vertr. GmbH (1962)
6. W. Mildner: Anleitung zum praktischen Gebrauch des elektronischen Analogrechners.
Sonderdruck Rohde und Schwarz Vertr. GmbH (1959)



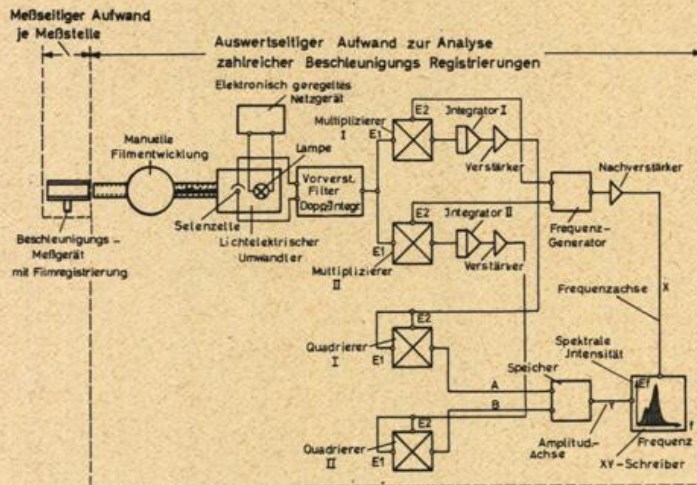
Schema des Seegangs-Beschleunigungsschreibers
mit Filmregistrierung.

Abb. 1



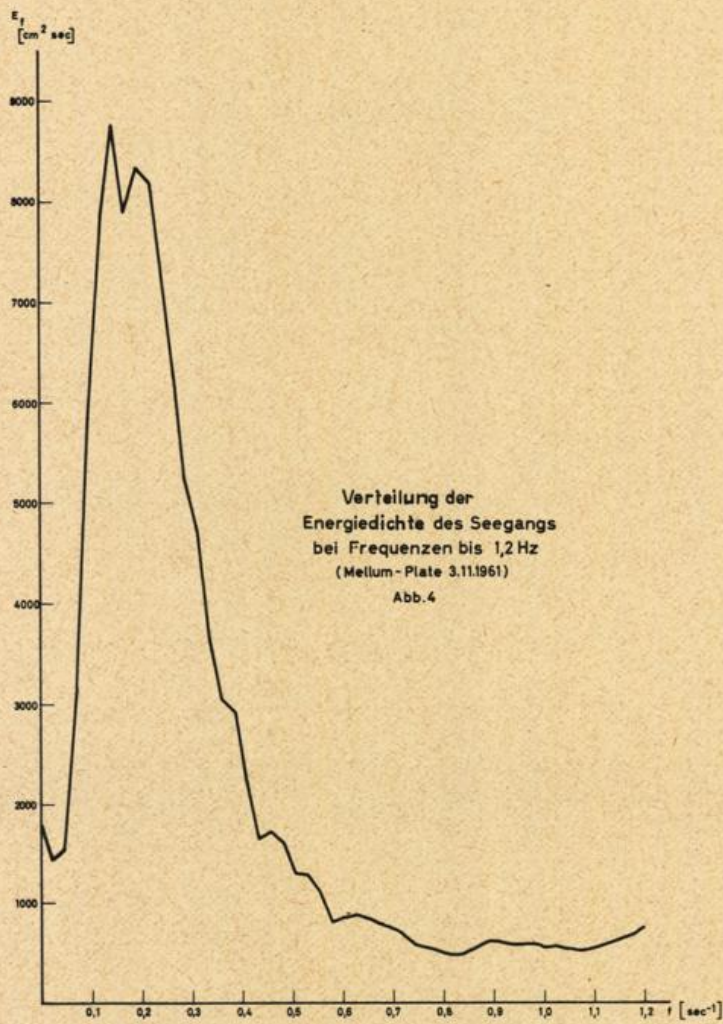
Schema des lichtopt. Umwändlers

Abb. 2



Blockschema für die Gewinnung des Seegangsspektrums aus der Beschleunigungsmessung m. Filmregistrierung

Abb. 3



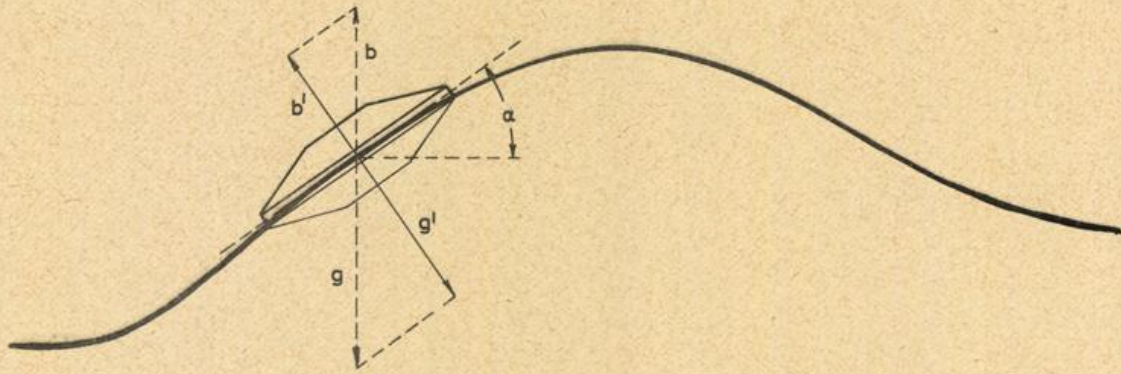
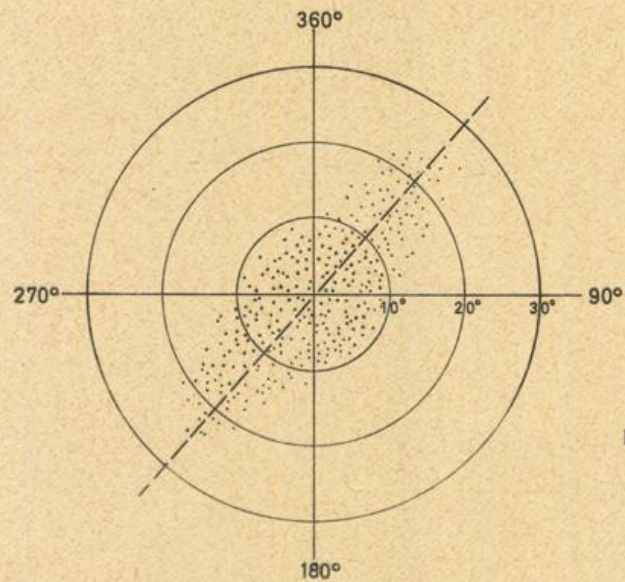


Abb.5 Fehler der Komponenten von g und b durch Schräglage der Boje an den Wellenhängen



Meßzeit: 5 min
Auflösung: 4 Punkte/s

Abb.6 Häufigkeitsverteilung der Bojenlage im Richtungsdiagramm

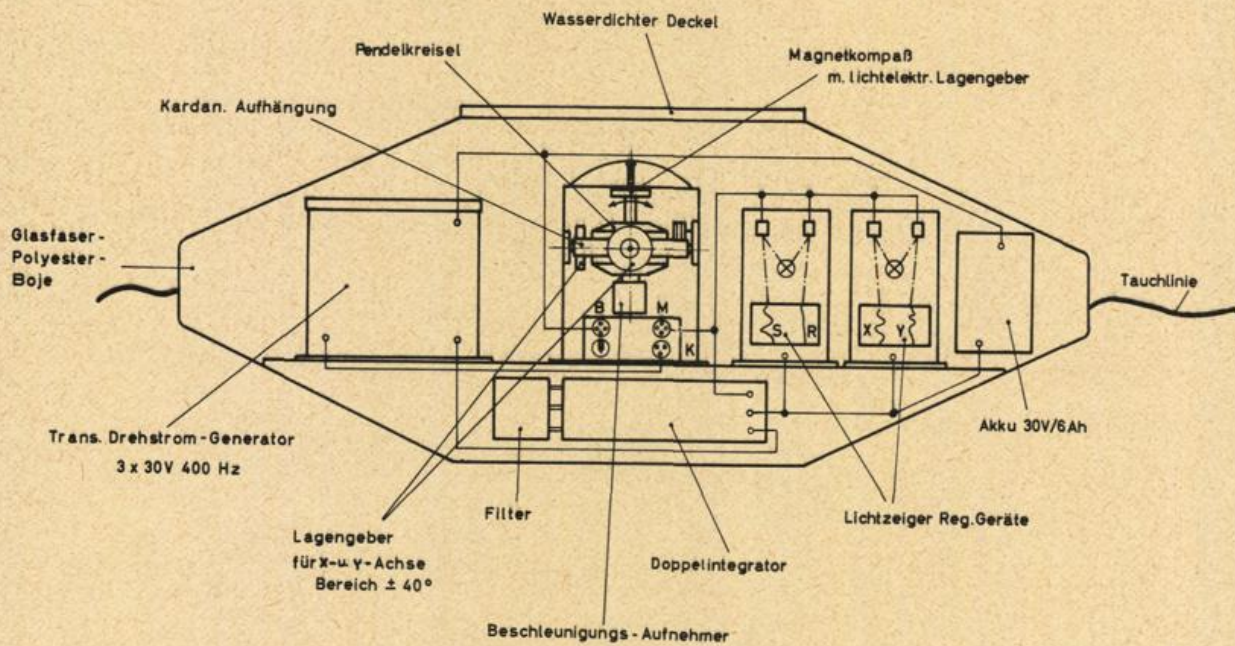


Abb.7 Blockschema der freitreibenden Seegangs-Meßboje mit kreiselstabilis. Aufnehmern für Beschleunigung und Lage

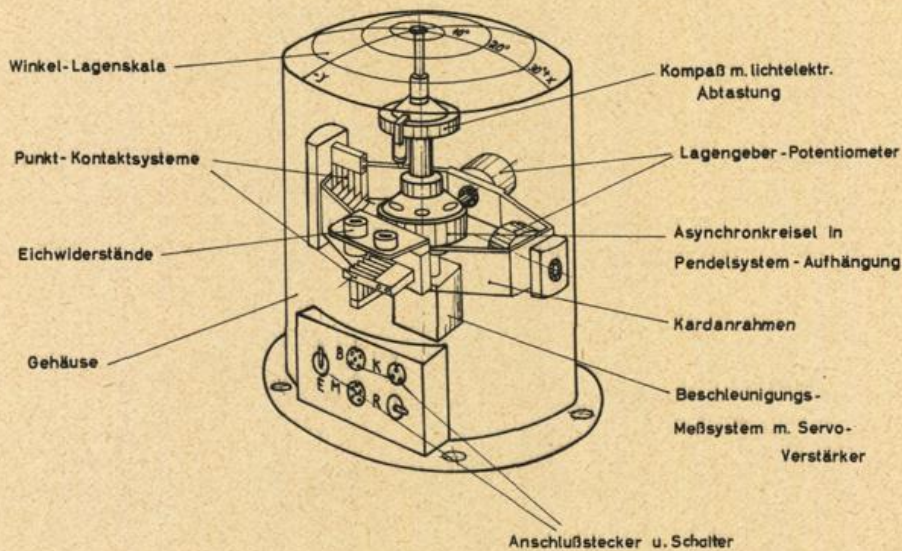


Abb.8 Meßkopf z. Seegangsmeßboje mit Kreiselstabil.
Aufnehmern für Beschleunigung und Lage
(schem. Durchsicht)

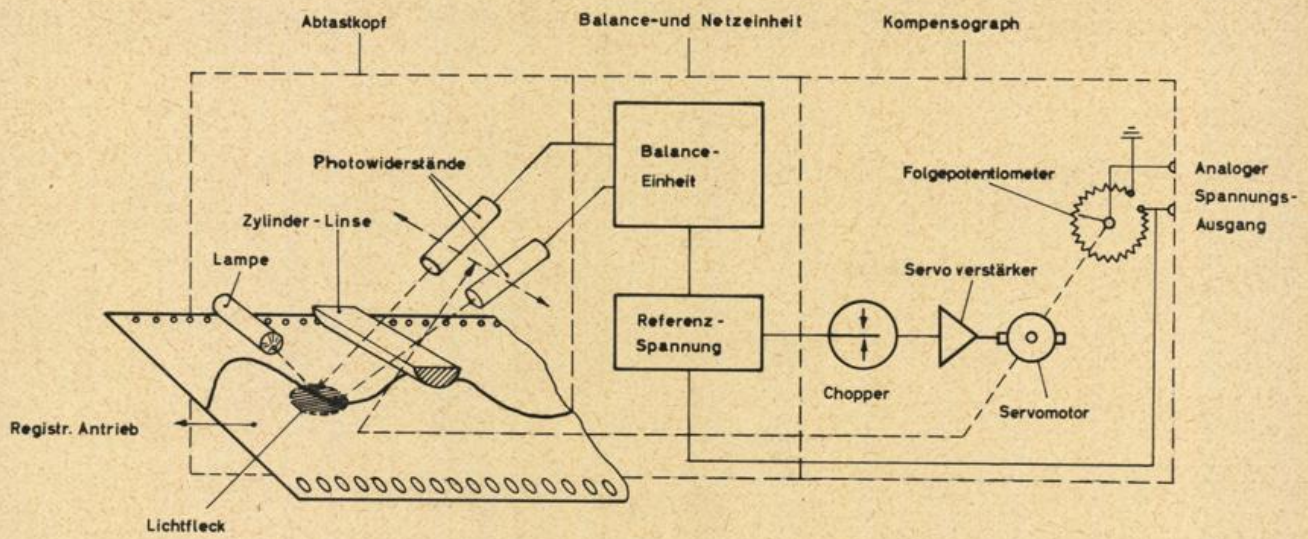
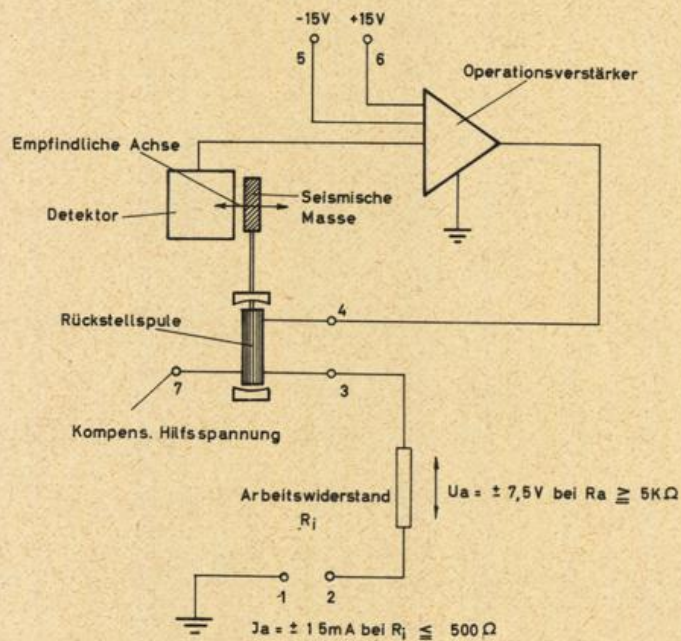


Abb. 9 Blockschema des Linienfolgersystems



Beschleunigungsaufnehmer „Donner 4310“
schematisch

Abb. 10

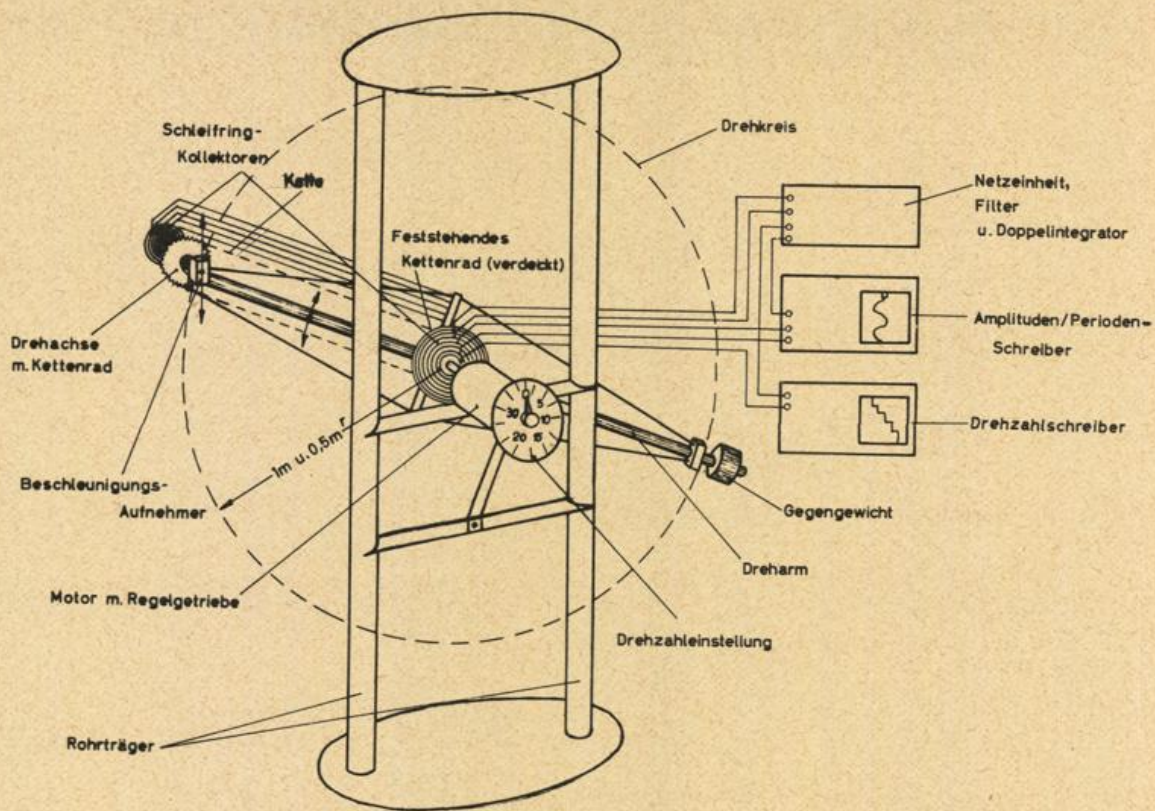
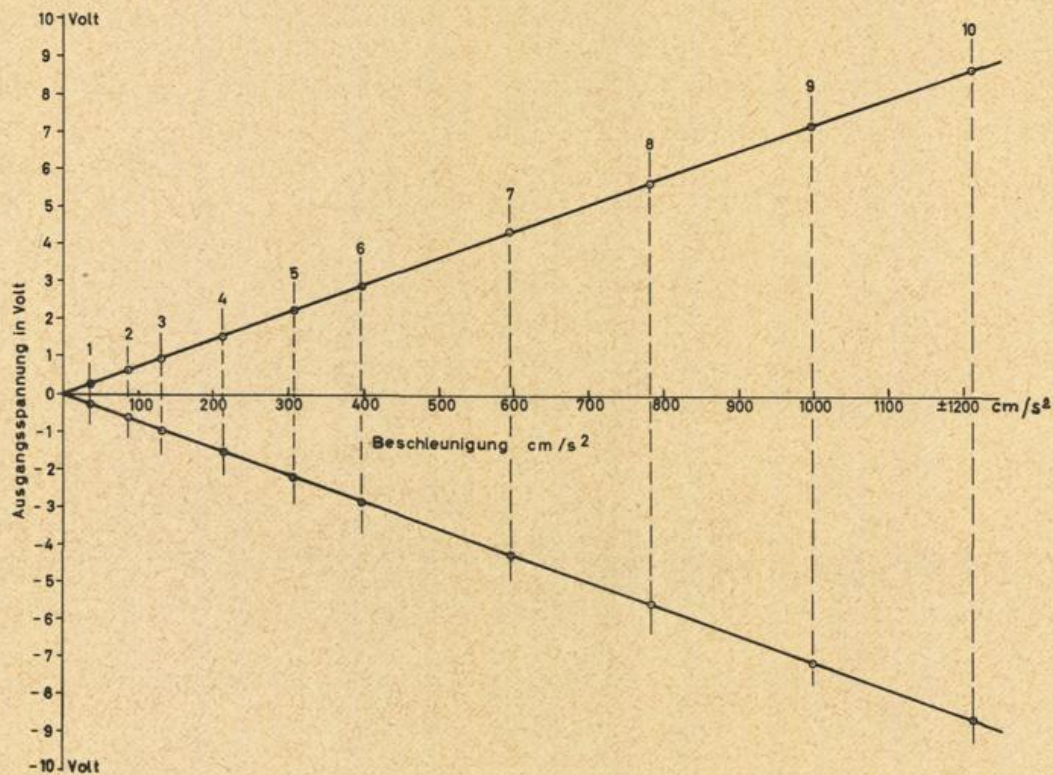


Abb.11 Schema der Beschleunigungs-Eichanlage



Eichkurven eines elektronischen Beschleunigungsaufnehmers

Abb.12

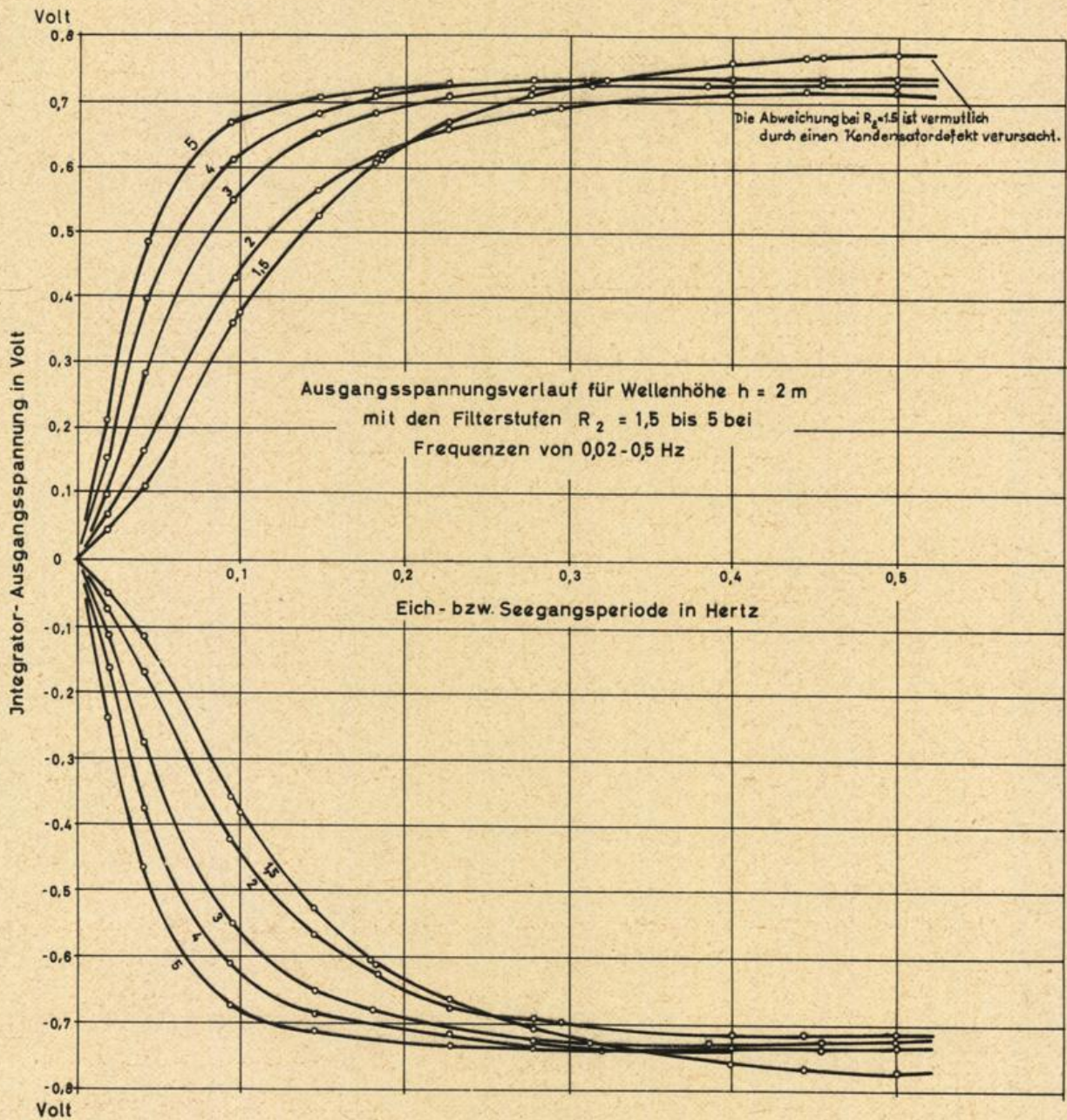


Abb.13 Verlauf der Ausgangsspannungen bei Wellenhöhe $h = 2$ m mit verschiedenen Filtern und Frequenzen von 0,02 - 0,5 Hz

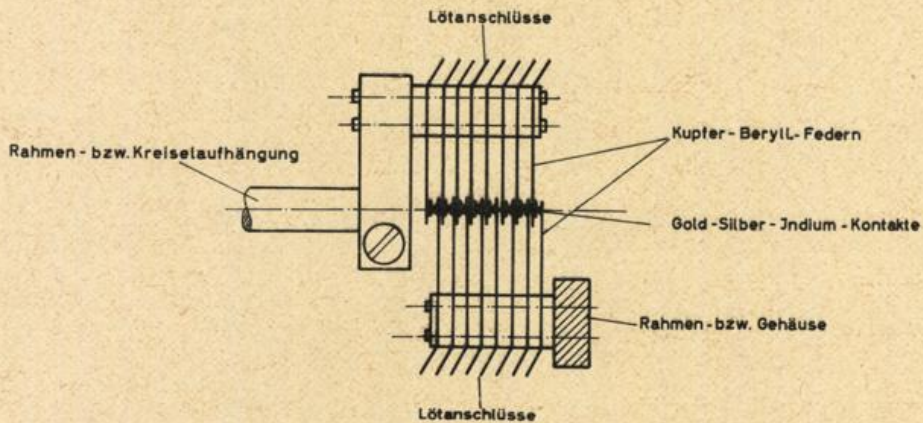


Abb.14 Schemat. Aufbau des axialen Punktkontaktsystems

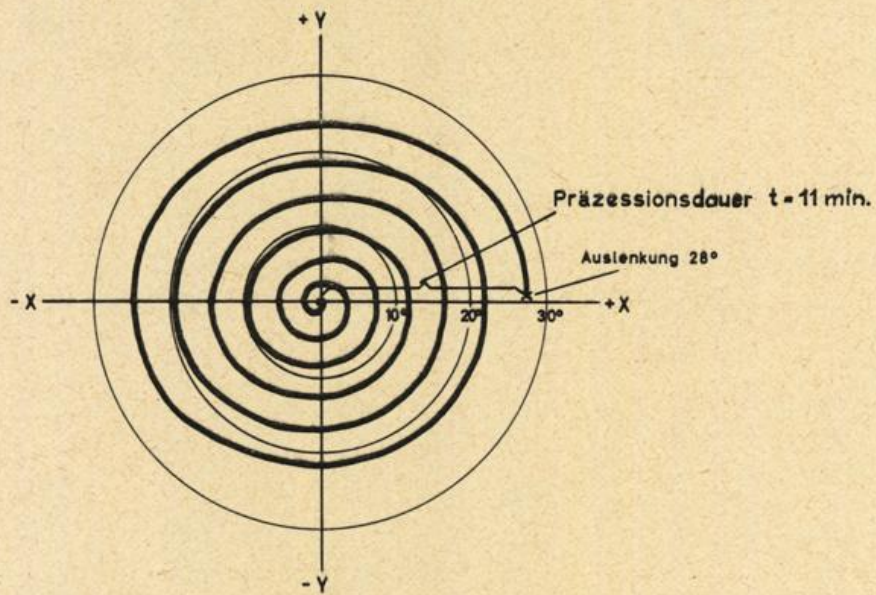


Abb.15 Präzessionskurve des Pendelkreisels KA 6
 Aufnahme: Lagengeber - Plotter

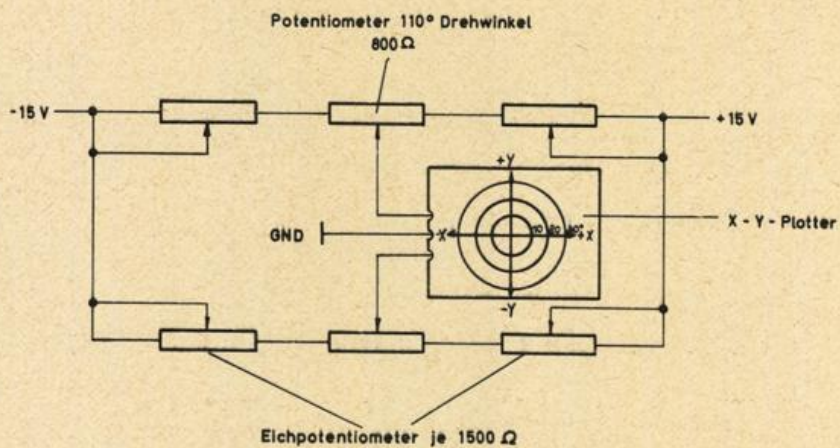


Abb.16 Schaltung der Bojen - Lagengeber

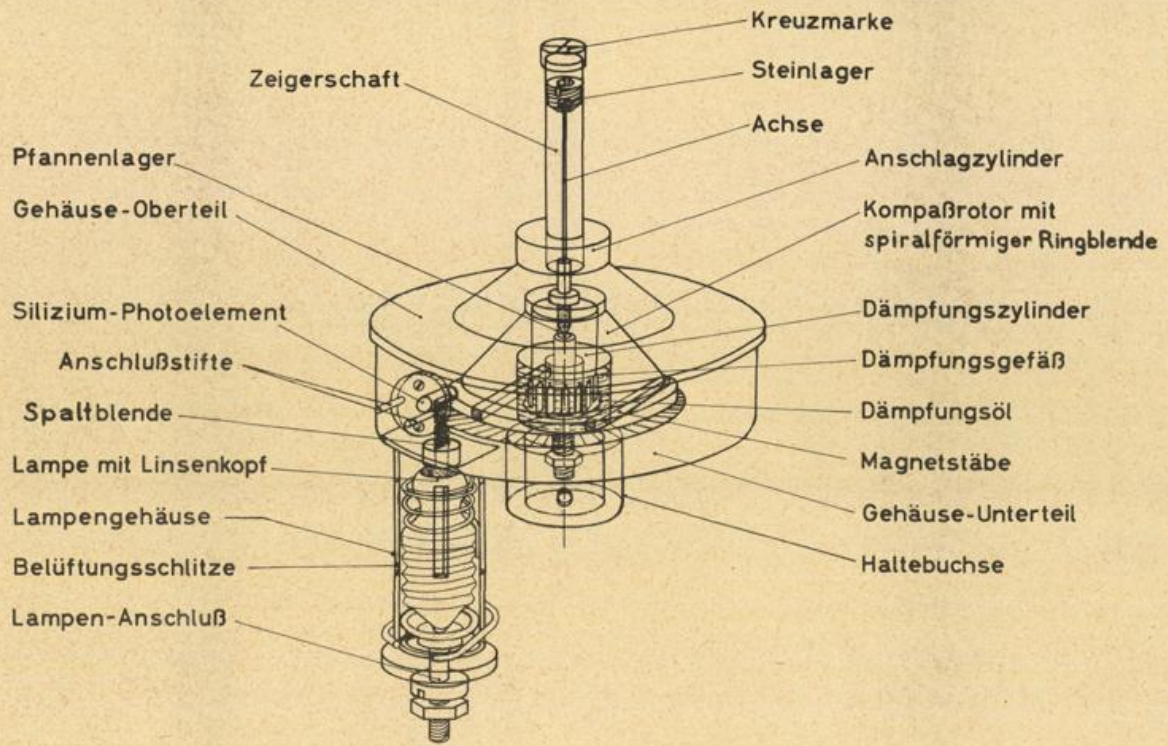
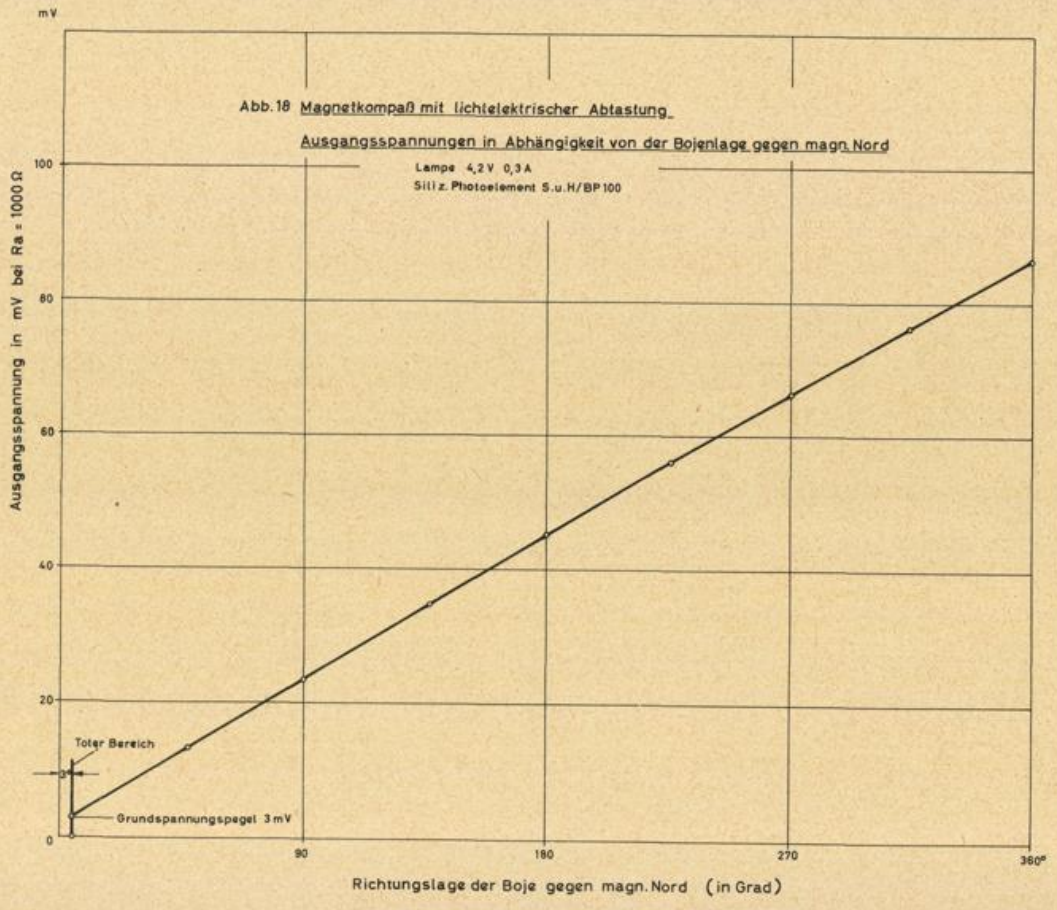
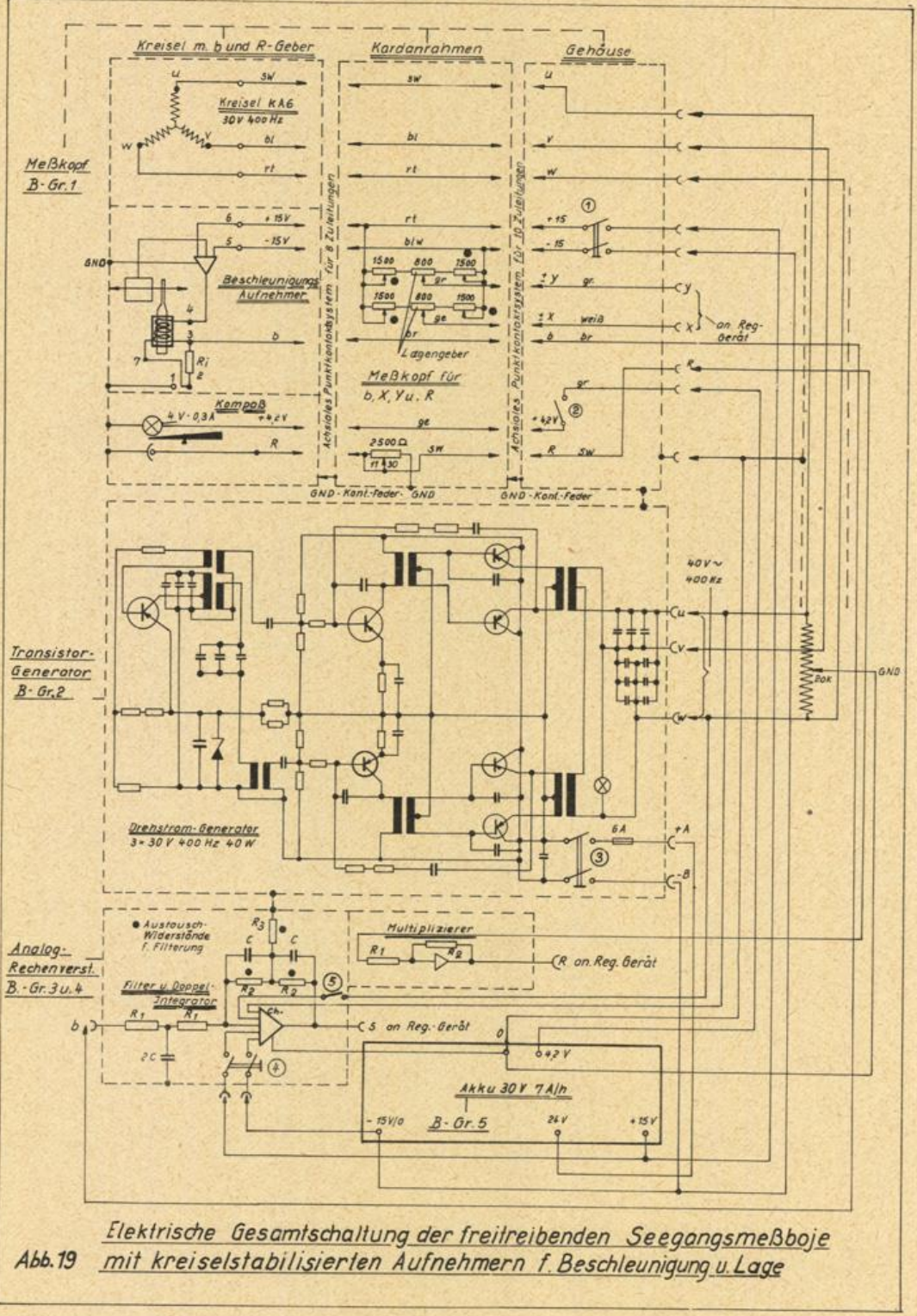
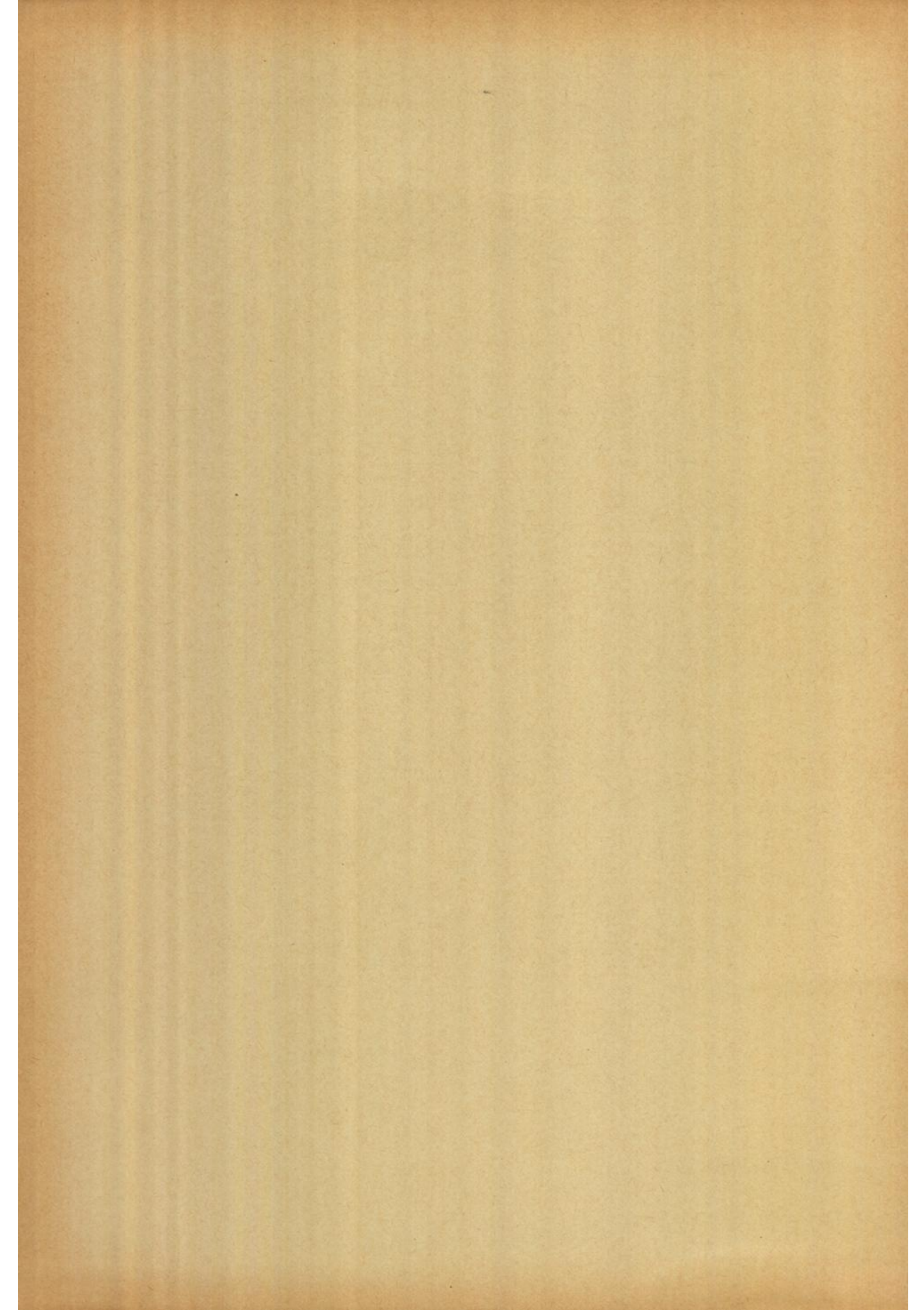


Abb. 17 Magnetkompaß mit lichtelektrischer Abtasteinrichtung





Elektrische Gesamtschaltung der freitreibenden Seegangmeßboje
 Abb.19 mit kreiselstabilisierten Aufnehmern f. Beschleunigung u. Lage



- Nr. 35 (1962) Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1958
- Nr. 36 (1962) Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1959
- Nr. 37 (1963) Klimatologie des Mittelmeeres. Teil 2: Temperatur, Bewölkung, Niederschlag, Nebel (H. Markgraf)
- Nr. 38 (1963) Zur Klimatologie des Nordatlantischen Ozeans. Teil 1: Text (C. Pflugbeil)
- Nr. 39 (1963) Zur Klimatologie des Nordatlantischen Ozeans. Teil 2: Tabellen (C. Pflugbeil und E. Steinborn)
- Nr. 40 (1963) Zur Klimatologie des Nordatlantischen Ozeans. Teil 3: Abbildungen (C. Pflugbeil und E. Steinborn)
- Nr. 41 (1964) Die Eigenschaften der Meereswellen im Nordatlantischen Ozean (H. Walden)
- Nr. 42 (1964) Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1960
- Nr. 43 (1964) Die Bestimmung des Tiefwasserseegangs aus seinen skalar-spektralen Komponenten bei bekannten Windverhältnissen (J. Piest)
- Nr. 44 (1964) Die Kälte der Winter im norddeutschen Raum; Teil 1: Herstellung homogener Reihen der Kältesummen (H. Müller-Annem)
- Nr. 45 (1965) Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1961
- Nr. 46 (1965) Gleichzeitige Seegangsmessungen in der Deutschen Bucht mit dem „Seegangsbeschleunigungsmesser mit photographischer Registrierung“ und ihre Auswertung zum Studium des Seegangs beim Einlaufen in das Wattenmeer (H. Walden, A. Lang u. J. Piest).
- Nr. 47 (1965) Die Windgeschwindigkeits-Äquivalente der Beaufortgrade nach Beobachtungen deutscher Bordwetterwarten (H. Walden)
- Nr. 48 (1965) Die Kälte der Winter im norddeutschen Raum. Teil 2: Herstellung langjähriger Reihen der Zahl der Wintertage. Ableitung einer Winter- und Kältezah (H. Müller-Annem)
- Nr. 49 (1965) Darstellung ausgewählter täglicher Höhenwinde in den Tropen zwischen 10° und 80° Westlänge (W. Rudloff)
- Nr. 50 (1965) Aerologische Monatskarten der Tropen für das Internationale Geophysikalische Jahr 1957—1958. Teil 1: 300 mb und 300/500 mb (W. Rudloff, O. Höflich u. G. Heise)
- Nr. 51 (1965) Aerologische Monatskarten der Tropen für das Internationale Geophysikalische Jahr 1957—1958. Teil 2: 200 mb und 200/300 mb (W. Rudloff, O. Höflich u. G. Heise)
- Nr. 52 (1966) Meteorologische Beobachtungen von deutschen Feuerschiffen der Nord- und Ostsee (Bundesrepublik) 1962
- Nr. 53 (1966) Die Entwicklung von Seegang-Meßbojen mit kreiselstabilisierten Meßwertaufnehmern für Beschleunigung und Bojenlage (A. Lang)

