

DEUTSCHER WETTERDIENST

Seewetteramt

Einzelveröffentlichungen

Nr. 46

Gleichzeitige Seegangsmessungen in der Deutschen
Bucht mit dem »Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit
photographischer Registrierung« und ihre Auswertung
zum Studium des Seegangs beim Einlaufen
in das Wattenmeer

von

Dr. Hans Walden

Ing. August Lang

und

Dr. Jürgen Piest



Hamburg

1965

Wetteramt München

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)

DEUTSCHER WETTERDIENST

Seewetteramt

Einzelveröffentlichungen

Nr. 46

Gleichzeitige Seegangsmessungen in der Deutschen
Bucht mit dem »Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit
photographischer Registrierung« und ihre Auswertung
zum Studium des Seegangs beim Einlaufen
in das Wattenmeer

von

Dr. Hans Walden

Ing. August Lang

und

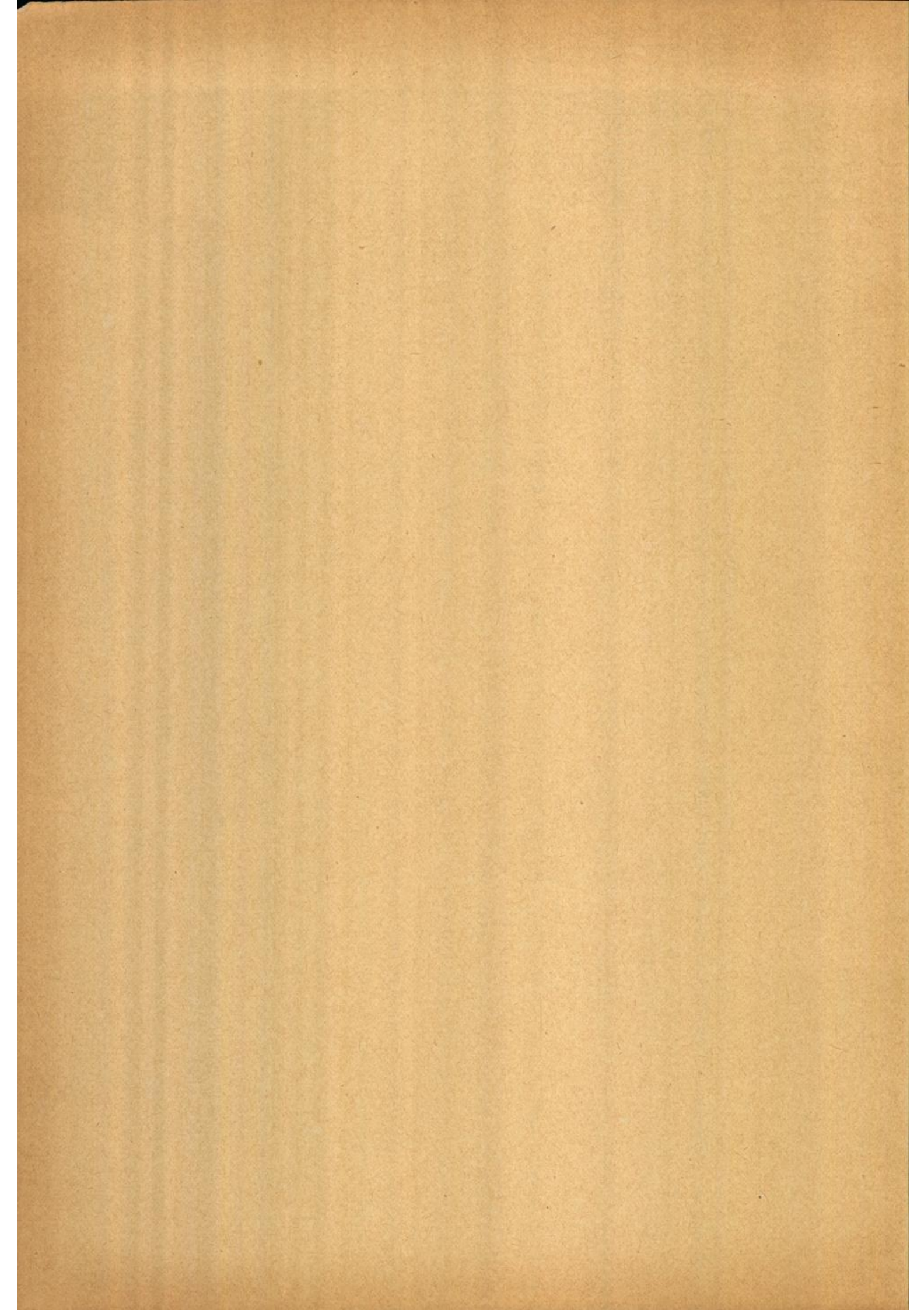
Dr. Jürgen Piest

Wetteramt München

Handbücherel Nr. 3935

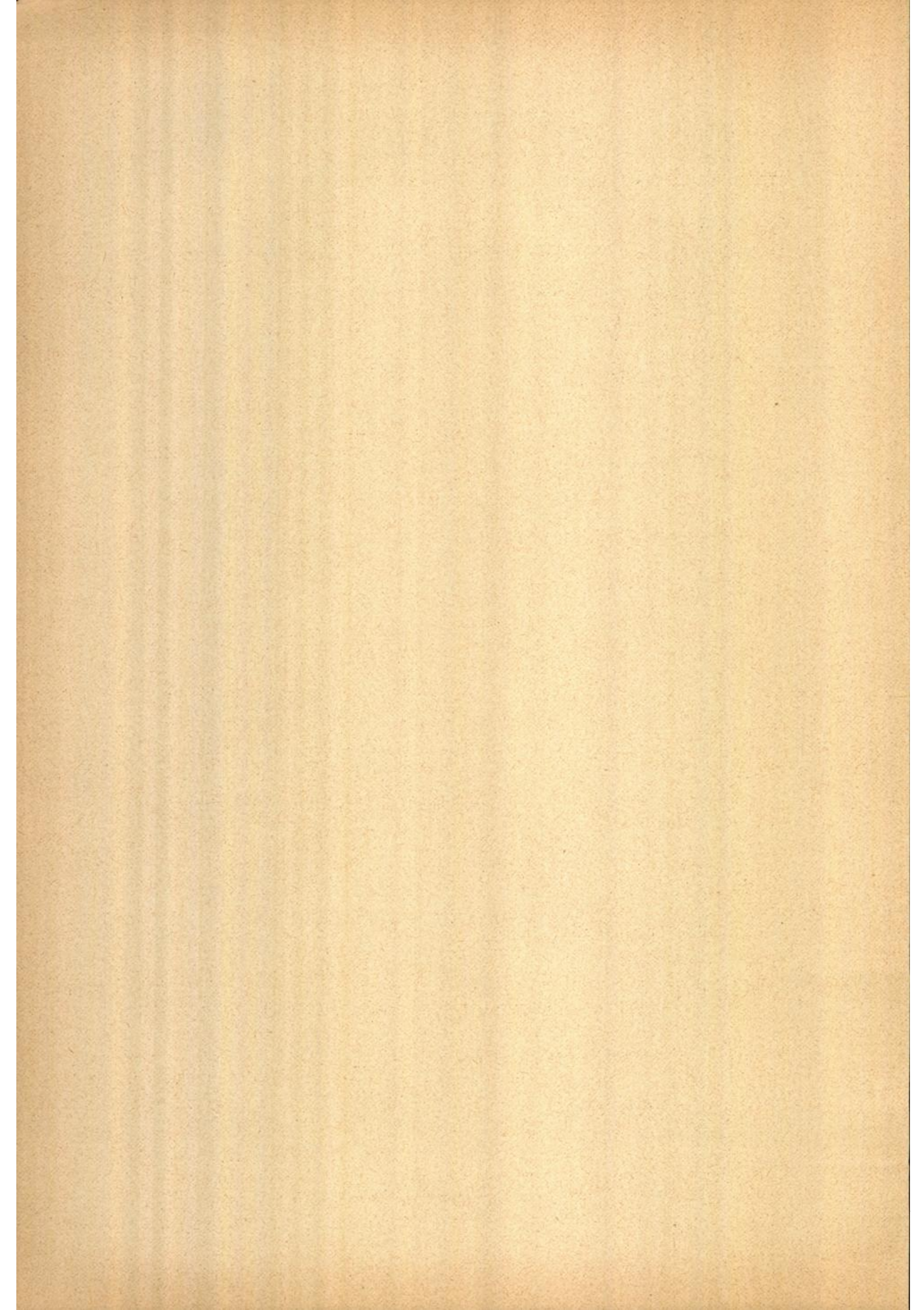


Hamburg
1965



Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. Einleitende Übersicht über die Arbeiten 1959-1961	7
B. Meßgeräte	
1. Der Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit photographischer • Registrierung	8
2. Zur Linearität des magnetischen Meßkopfes	11
3. Kinematographische Meßapparatur	14
C. Art der Auswertung	
1. Die elektronische Integration	
a) Integrationsverfahren und Aufbereitung der Meßdaten	15
b) Das Integrationsfilter	18
c) Welches Integrationsfilter ist anzuwenden?	21
d) Probe-Vergleichsmessung außerhalb des Wassers	24
e) Anpassung und Eichung der Integrationsergebnisse	27
2. Auswertung der Registrierungen	28
a. Häufigkeitsverteilung der sichtbaren Wellen	28
b. Ermittlung des Energiespektrums	32
D. Vergleichsmessungen am Leuchtturm Mellum Plate	32
1. Darstellung der Meßergebnisse	
a) Vergleichsmessung vom 4. Dezember 1960	33
b) Vergleichsmessungen vom 17. März 1959, 28. Mai 1960, 29. Mai 1960 und 3. November 1961	34
2. Umrechnung der aus der Beschleunigungsmessung erhaltenen Auswerte-Ergebnisse auf das „wahre“ Spektrum	37
E. Gleichzeitige Seegangsmessungen in der Deutschen Bucht	42
1. Meßstationen	42
2. Meßergebnisse	43
3. Diskussion der Ergebnisse	45
F. Zusammenfassung und Kommentar zum Gesamtergebnis des Forschungsvorhabens	47
1. Meßinstrumente	47
2. Auswerteverfahren	49
3. Simultane Seegangsmessungen in der Deutschen Bucht	50
G. Herkunft der Geldmittel und Dank für Unterstützung	51
Literatur	53
Abbildungs-Verzeichnis	55



Liste der Symbole

a	Konstante bei der Berechnung der Magnetfelder
\bar{a}	Extremwert-Ordinaten
\bar{a}_{Bi}	Extremwert-Ordinaten der Bi-Registrierung
\bar{a}_F	Extremwert-Ordinaten der F-Registrierung
b_1, \dots, b_6	Koeffizienten in der Formel für die Umrechnungsfunktion
Bi	Abkürzung für doppelt integrierte Beschleunigungsregistrierung
c_1, c_2	Abkürzung für $a e' e$ bei der Berechnung des Magnetfeldes
$c_{\%}$	Quotient $H_{\%}/H$ (vgl. Lit.9)
C	Kapazität des Kondensators
\bar{C}, \bar{C}_1	Umrechnungsfaktoren bei der Integration
d	Schwankungshöhe (doppelte Amplitude) von Sinuswellen
d_1	Schwankungshöhe von Sinuswellen auf der Registrierung
D	Abkürzung für komplizierten Ausdruck bei der Berechnung der magnetischen Kräfte
\bar{d}	Mittel der Schwankungshöhen (aus <u>allen</u> Schwankungen) in einer Klasse
e, e'	Polstärken von Magneten
E_f	Spektrum (frequenz-spektrale Intensitätsdichte), erhalten aus einer kinematographischen Seegangsregistrierung
$E_f^{(Bi)}$	Spektrum (frequenz-spektrale Intensitätsdichte), erhalten aus einer doppelt integrierten Beschleunigungs-Seegangsregistrierung
E_f^*	Spektrum (frequenz-spektrale Intensitätsdichte) einer Bi-Registrierung, korrigiert mit Hilfe der Umrechnungsfunktion
f	Frequenz der Meereswellen
F	Abkürzung für kinematographische Registrierung
g	Schwerebeschleunigung
\bar{H}	mittlere Höhe der sichtbaren Wellen in einem Seegang
$\bar{H}_{1/3}$	kennzeichnende Wellenhöhe
$\bar{H}_{1/10}$	Durchschnittshöhe des „oberen Zehntels“ der sichtbaren Wellen
$\bar{H}_{\%}$	Wellenhöhe an der unteren Grenze der $\%$ -höchsten Wellen
R	elektrischer Widerstand
R_1, R_2	elektrische Widerstände
s, s_1, s_2	Entfernungen zwischen den Polen der Magnete

S	Schwankungshöhe (vom Berg zum Tal)
\bar{S}	mittlere Schwankungshöhe
t	Zeit
t_0	Anfangszeit
T	Periode
T_L	längste Periode von praktischer Bedeutung „im Spektrum“
\bar{T}	verdoppelte Halbperioden = „Schwankungsperioden“
$\bar{\bar{T}}$	mittlere Periode der sichtbaren Wellen
$\bar{T}_{1/3}$	kennzeichnende Seegangsperiode
\bar{T}_m	Perioden-Klassenmittelwerte für sichtbare Wellen
\bar{T}_{Bi}, \bar{T}_F	Schwankungsperioden (verdoppelte Halbperioden) für Bi bzw. F
U_a	Ausgangsspannung am Analogrechner
U_e	Eingangsspannung am Analogrechner
x_i	Einheiten der Abszisse auf der Bi-Registrierung
z_i	Einheiten der Ordinate auf der Bi-Registrierung
β	„Filterfaktoren“
ΔK	magnetische Rücktriebskraft
ΔK_0	Betrag einer Rücktriebskraft auf den Mittelmagneten
Δs_0	Ausschlag, hervorgerufen durch die magnetische Kraft
ζ	vertikale Auslenkung an der Meeresoberfläche
κ_e	Vorschub der Eichschaukel-Registrierung
κ_m	Vorschub des Seegangs-Beschleunigungsschreibers
ξ	Filterfaktor für drei hintergeschaltete Einzelfilter (= β^3)
$\xi_{op}, \xi_{op}(f), \xi_{op}(T)$	(optimale) Filterfunktion
σ	spektrale Umrechnungsfunktion
σ_s	Umrechnungsfaktor für sichtbare Wellen
ψ	zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeit
ψ^*	reduzierte relative Häufigkeit
ψ_{Bi}	zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeit aus Bi-Registrierung
ω	Kreisfrequenz

A. Einleitende Übersicht über die Arbeiten 1959-1961

Dieser Bericht schließt an eine Veröffentlichung an, die im Jahre 1961 als Einzelveröffentlichung des Deutschen Wetterdienstes - Seewetteramt - in Hamburg erschien. Sie behandelt den ersten Teil der Arbeiten für ein mit Mitteln des ERP-Sondervermögens getragenes Forschungsvorhaben, das laut Weisung des Geldgebers die „Messung des Seeganges, insbesondere seiner spektralen Struktur, in der Deutschen Bucht unter Verwendung gleichzeitig arbeitender Registriergeräte“ zum Gegenstand hatte.

Die im ersten Bericht beschriebenen Vergleichsmessungen des Seegangs mit dem „Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit Film-Ritz-Registrierung“ und ihre Auswertung führten zu der Erkenntnis, es empfehle sich, den Registrierteil des Gerätes so abzuändern, daß die Beschleunigungs-Aufzeichnungen zwecks doppelter Integration unmittelbar einem Analogrechner zugeführt werden können. Das Instrumentenamt Hamburg des Deutschen Wetterdienstes hat den Umbau nach den Plänen eines der Berichterstatter (A. Lang) vorgenommen und außerdem noch den Meßkopf neu konstruiert. Als das neue Gerät, der „Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit photographischer Registrierung“, durch weitere Seegangs-Vergleichsmessungen am Leuchtturm Mellum Plate erprobt war, wurden vier Geräte des Typs bei einer Firma in Auftrag gegeben und gebaut. Nach ihrer Fertigstellung konnte im April 1960 mit der eigentlichen Aufgabe des Forschungsvorhabens, nämlich mit gleichzeitigen Messungen des Seegangs an verschiedenen Stellen in der Deutschen Bucht begonnen werden. Es sollte festgestellt werden, in welcher Weise die spektrale Struktur des Seegangs von der Wassertiefe abhängt bzw. welchen Änderungen das Seegangsspektrum unterworfen ist, wenn die Wellen aus der freien Nordsee oder aus der äußeren Deutschen Bucht in die Flachwassergebiete vor den deutschen Nordseeküsten einlaufen. Der Bericht zeigt, daß dieses Hauptziel der Arbeiten nur zum Teil erreicht wurde. Es traten Schwierigkeiten grundsätzlicher Art auf, die im Prinzip der benutzten Meßmethode begründet liegen (s. dazu Seite ¹⁰ X). „Kinderkrankheiten“ des Seegangs-Beschleunigungsschreibers konnten nach und nach behoben werden. Außerdem gab es Schwierigkeiten bei der Bedienung des Gerätes an den Meßstationen. Die nebenamtlichen Beobachter waren zwar gut eingewiesen, aber mit dem Gerät doch nicht so gut vertraut, um mancher Schwierigkeiten Herr zu werden, die sich kurz vor, während oder nach der Messung zeigten. Bei vielen dieser Simultan-Messungen war daher nur eine der Registrierungen auswertbar. Sie stellt zwar eine brauchbare Einzel-

Seegangsmessung dar, aber der Vergleich mit anderen zur gleichen Zeit gewonnenen Messungen, auf den es ankam, konnte nicht angestellt werden. Immerhin sind einige der Simultan-Messungen gelungen. Über sie zu berichten, ist ein wesentlicher Zweck dieser Ausarbeitung.

Das Verfahren der Auswertung wurde weiter rationalisiert; auch hierüber wird Bericht erstattet. Um Unterlagen für die Umrechnung der mit dem Seegangs-Beschleunigungsschreiber gewonnenen Meßgrößen auf „wahre Werte“ zu erhalten, mußten mehrere Seegangs-Vergleichsmessungen - wieder am Leuchtturm Mellum Plate - vorgenommen werden. Auch sie werden in dem vorgelegten Bericht beschrieben.

Nicht zuletzt wurden im Rahmen des Gesamt-Vorhabens viele Erkenntnisse gesammelt, die für die Durchführung von Seegangsmessungen auf „tiefem“ Wasser (ohne Benutzung von Festpunkten) und für die Auswertung der Registrierungen von großer Bedeutung und wahrscheinlich bleibendem Wert sind.

Meßgeräte

1. Der Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit photographischer Registrierung

Über Vergleichsmessungen des Seegangs zur Erprobung und „Eichung“ des Seegangs-Beschleunigungsschreibers mit Film-Ritz-Registrierung und ihre Ergebnisse wurde in der Einzelveröffentlichung Nr. 30 des Deutschen Wetterdienstes - Seewetteramt - berichtet (Lit.9).

Die Aufzeichnung der Meßergebnisse durch Ritzen eines Blankfilms mit Hilfe eines Edelsteins stellt zwar eine einfache, wenig störanfällige Art der Registrierung dar, aber die Auswertung dieses „Mikroschriebes“ bereitet Schwierigkeiten und ist sehr zeitraubend. Das Instrumentenamt Hamburg des Deutschen Wetterdienstes entschloß sich daher im Jahre 1958, einen Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit Filmaufzeichnung zu entwickeln. Hauptzweck der Neukonstruktion war es, das Gerät mit einem solchen System der Meßwerte-Speicherung zu versehen, daß die Registrierung vollautomatisch doppelt integriert und bei Vorhandensein eines geeigneten Analogrechners im gleichen Arbeitsgang analysiert werden kann. Im Zuge der Neukonstruktion wurde auch der Meßkopf geändert.

Die Eigenschaften des neuen Geräts hat sein Konstrukteur (A. Lang) in Einzelveröffentlichung Nr. 24 des Deutschen Wetterdienstes - Seewetteramt - beschrieben (Lit.3). Es seien hier daher nur die wesentlichen Züge des „Seegangs-Beschleunigungsschreibers mit photographischer Registrierung“ wiedergegeben.

Der Beschleunigungs-Meßkopf besteht jetzt aus einem etwa 5 cm langen Rohr, an dessen Enden sich je ein Magnet befindet. Von ihnen wird eine dazwischen „schwebende“ gleichfalls magnetische „Masse“ von 15 g in Null-Lage gehalten. Die Masse befindet sich an einem Hebel, der um eine horizontale, an der Seite des Rohres befindliche Achse drehbar ist. Da die bei der Auslenkung aus der Ruhelage auftretenden Winkel klein sind, gehen Beschleunigungskomponenten parallel zur Grundplatte des Gerätes im Rahmen der angestrebten Genauigkeit nicht ein. Erfasst werden also nur solche Bewegungen, die senkrecht auf der Gerätebasis stehen.

Auf mechanischem Wege werden die Bewegungen der Masse gegenüber dem Gerät auf eine Hebelblende übertragen, die sich vor einem Schlitz auf und ab bewegt. Diese Einrichtung befindet sich dicht über einem Normalfilm (35 mm Breite), der mit konstantem Vorlauf transportiert wird. Auf der anderen Seite der Schlitzblende liegt ein elektrisch betriebenes Lämpchen. Es belichtet, soweit es Blende und Schlitz gestatten, den Film. Die Bewegungen der Blende, die denen der „Masse“ proportional sind, werden also auf dem sich gleichfalls bewegenden Film abgebildet. Der entwickelte Filmstreifen ist unten schwarz und oben durchsichtig (Abb.1). Die Grenze zwischen den geschwärzten und den transparenten Flächen des Films stellt die vom Meßkopf gemessene Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit dar.

Über ein Schwingmotor-Uhrwerk mit elektrischem Antrieb werden Zeitmarken auf den Film gegeben, die als kleine schwarze Striche erscheinen. Das Uhrwerk betreibt auch eine Programmierereinrichtung, die

- 1) die Festsetzung der Registrierdauer auf 20 min oder auf 40 min und
- 2) eine Auslösung der Gerätefunktionen nach einer vorher eingestellten Zeitspanne ermöglicht.

Der Film wird durch einen Gleichstrom-Motor, Drehzahl 2250 U/min mit Untersetzungsgetriebe 1000:1 mit einem Vorschub von 170 mm/min transportiert. In 20 min werden etwa 3,4 m, in 40 min rund 6,8 m Film belichtet.

Die Filmkassetten können Normalfilm bis zu 10 m Länge aufnehmen. Da bei wenig starkem Seegang Registrierungen von 20 min Dauer ausreichen, wurden oft nur Filme von 5 m Gesamtlänge benutzt.

Der Motor und die Glühbirnen für die Filmbelichtung (Registrierung und Zeitmarken) wurden anfangs mit Klein-Akkus betrieben. Als sich jedoch herausstellte, daß das Nachladen auf den Meßstellen Schwierigkeiten und Ausfälle verursachte, wurde auf kleine Primär-

Elemente übergegangen. Zuletzt wurde mit gutem Erfolg pro Gerät eine Pertrix-Hochleistungsbatterie für Geräte Type 210 4,5 Volt eingesetzt, die eine Belastung von 200 Milliampère für 6 Stunden garantiert und das Format einer gewöhnlichen Taschenlampenbatterie besitzt.

Mit Hilfe einer besonderen Vorrichtung (vergl. Lit.2, Abb.13) war es möglich, die Magnete der Meßköpfe so einzustellen, daß die Anzeige linear ist; d.h., daß Beschleunigung und Ausschlag im gesamten Meßbereich stets im gleichen Verhältnis zueinander stehen.

Als weiteres Hilfsgerät wurde beim Instrumentenamt Hamburg des Deutschen Wetterdienstes eine sog. „Eichschaukel“ (vergl. Lit.2, Abb.16) gebaut, die der Erprobung und Eichung von Beschleunigungsmessern bei genau vertikal gehaltenem Meßkopf dient. Mit dieser Anlage ist es möglich, Beschleunigungen zu erzeugen, deren zeitlicher Ablauf sinusförmig ist. Solche Streifen geben die Handhabe, die Registrier-Genauigkeit zu prüfen und die Beziehungen zwischen Größe der Beschleunigung und entsprechender Auslenkung auf dem Filmstreifen zu ermitteln.

Der eigentliche Seegangs-Beschleunigungsschreiber ist während der Messung durch einen sehr robusten eisernen Kasten geschützt. Mit besonderen Halterungen wird er an einem Rettungsring fest angebracht, so daß er den Änderungen der Meeresoberfläche durch den Seegang folgt (vergl. Lit. 9, Bildtafel 1, Abb.1).

Die Umstellung des Gerätes auf die photographische „Schwarz-Weiß“-Registrierung ermöglichte eine bedeutende Verbesserung sowie die Rationalisierung und Automatisierung der Auswertung.

Hinsichtlich der Genauigkeit der Aufzeichnung hat der neue Seegangs-Beschleunigungsschreiber gegenüber dem alten den Vorzug, daß eventuelle Nullpunkt- und Empfindlichkeitsschwankungen durch Ermüdungserscheinungen von Haltefedern infolge des magnetischen Rücktriebs entfallen. Ein weiterer Fortschritt ist, daß nur noch Beschleunigungen vertikal zur Geräte-Grundplatte angezeigt werden. Allerdings werden hierdurch noch nicht die „Fehler“ beseitigt, die dadurch entstehen, daß das Gerät auch in Schräglage (am Hang von Wellen) beschleunigt wird und dabei nur ein Teil der vertikalen Beschleunigung (in Abhängigkeit vom Kosinus des Kippwinkels), daneben jedoch auch eine Komponente eventueller horizontaler Beschleunigung erfaßt und registriert wird.

Die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen von M.J. TUCKER (Lit.7) erlauben es, die durch diesen Effekt bedingte Verfälschung eines durch Beschleunigungsmessung erhaltenen Spektrums quantitativ zu berechnen, wenn man das wahre Spektrum des Seegangs zum Zeitpunkt

der Messung kennt. Die beim Leuchtturm Mellum Plate durchgeführten Vergleichsmessungen liefern die empirischen Unterlagen für eine solche Rechnung. Die Untersuchung wurde im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes durchgeführt. Es ergab sich, daß Seegangs-Beschleunigungsmessungen mit einem Gerät, dessen Meßkopf fest an der Grundplatte montiert ist, im langwelligen Teil des Seegangsspektrums nicht zu zuverlässigen Ergebnissen führen.

Es ist versucht worden, durch geeignete Bearbeitung der Registrierungen die beschriebenen Meßverfälschungen zu korrigieren (siehe Abschn. C 1b). Einen weiteren Fehler muß man dadurch erwarten, daß der Schwimmkörper, der das Meßgerät trägt, den Bewegungen kurzer Wellen nicht trägheitsfrei folgt. Daher ist es nötig gewesen, das Gerät nach dem Umbau durch Vergleichsmessungen im natürlichen Seegang neu zu „eichen“; d.h. Reduktionsgrößen zu ermitteln, die eine Rückführung der Meßergebnisse auf wahre Werte ermöglichen.

2. Zur Linearität des magnetischen Meßkopfes

Die Linearität der Anzeige des magnetischen Meßkopfes wurde durch rein empirische Maßnahmen, und zwar durch geeignetes Drehen eines der Magneten und richtige Bemessung der Magnetabstände erreicht.

Abb. 2 gibt das Ergebnis einer Linearitätsprobe wieder. In der Abszisse ist der durch die Art der Anzeige vergrößerte Ausschlag aufgetragen, der sich ergab, wenn der Schwebemagnet, also die seismische Masse, mit kleinen Gewichten belastet wurde. Durch Befestigung eines Waagebalkens an der Drehachse des Schwingmagneten wurde erreicht, daß diese Messungen mit Zusatzkräften nach oben und nach unten vorgenommen werden konnten.

Die mathematische Behandlung des Problems ist dadurch erschwert, daß 3 Magnete, davon ein beweglicher, im Spiele sind. Die Einstellung der Magnetfelder auf zueinander passende Stärken geschieht durch Drehung eines der festen Magneten um seine vertikale Achse. Aus diesem Grunde sind die gleichnamigen Magnetpole nicht mehr genau übereinander angeordnet. Streng genommen ist also eine dreidimensionale Betrachtung erforderlich.

Es wurde jedoch in eindimensionaler Betrachtungsweise und unter vereinfachten Ausgangsbedingungen eine Rechnung ausgeführt, die zeigt, daß man dann die größtmögliche „Linearisierung“ erhält, wenn die Magnete so stehen, daß man bei gleich großen Kräften nach oben und nach unten gleich große Ausschläge erhält.

Es handelt sich um 3 Magnete, die mit jeweils gleichnamigen Polen einander gegenüberstehen.

Nach dem COULOMBSchen Gesetz ist die Kraft K zwischen 2 Magnetpolen der Polstärken e' und e

$$K = \frac{a}{s^2} e' e \quad (1)$$

wobei s die Entfernung der beiden Pole und a eine von der Entfernung unabhängige positive Konstante ist. Bezeichnet man das Produkt $ae'e$ für die gegenseitige Kraftwirkung zwischen Mittelmagnet und oberem Magnet abgekürzt mit c_1 und $ae'e$ entsprechend für das untere System mit c_2 , so erhält man für den Fall des Kräftegleichgewichts

$$g + c_1 \frac{1}{s_1^2} - c_2 \frac{1}{s_2^2} = 0 \quad (2)$$

wobei g die Schwerkraft der Erde bedeutet und die Achse nach unten orientiert ist.

Die Gegenpole der Magneten ergeben eine Verdoppelung des Effektes, die gedanklich den Größen c_1 und c_2 zugeschlagen werden kann, ohne daß die Rechnung oder das Ergebnis dieser mehr prinzipiellen Untersuchung geändert werden. Ebenso könnte man unter g die durch den Auftrieb verminderte Schwerkraft verstehen.

Erfährt der Schwingmagnet eine kleine Auslenkung Δs , die man wegen ihrer Kleinheit als reine Translation betrachten kann, nach unten, so ergibt sich eine Rücktriebskraft ΔK zu

$$\Delta K = g + c_1 \frac{1}{(s_1 + \Delta s)^2} - c_2 \frac{1}{(s_2 - \Delta s)^2} \quad (3)$$

Gl.(3) kann man in eine Taylor-Reihe nach Δs entwickeln:

$$\begin{aligned} \Delta K = g + \frac{c_1}{s_1^2} \left[1 - 2 \frac{\Delta s}{s_1} + 3 \frac{\Delta s^2}{s_1^2} - 4 \frac{\Delta s^3}{s_1^3} + \dots \right] \\ - \frac{c_2}{s_2^2} \left[1 + 2 \frac{\Delta s}{s_2} + 3 \frac{\Delta s^2}{s_2^2} + 4 \frac{\Delta s^3}{s_2^3} + \dots \right] \end{aligned}$$

und erhält

$$\Delta K = g - \Delta s \left(\frac{c_1}{s_1^3} + \frac{c_2}{s_2^3} \right) + (\Delta s)^2 \left(\frac{c_1}{s_1^4} - \frac{c_2}{s_2^4} \right) + \dots \quad (4)$$

Man erkennt, daß die Rückstellkraft wesentlich nichtlinear ist. Um eine möglichst gute Linearisierung zu erreichen, muß angestrebt werden, solche Verhältnisse zu schaffen, daß der Faktor des quadratischen Gliedes in Gl.(4) verschwindet. Dies ist dann erreicht, wenn das untere Magnetfeld so geschwächt wird, daß die Feldkonstanten sich verhalten wie die 4. Potenzen der Magnetabstände; dann nämlich wird in Gl.(4) der zweite Klammerausdruck = 0.

Nunmehr wird die Betrachtung auf Auslenkungen in beiden Richtungen erweitert und gefordert: Wenn eine Kraft vom Betrage ΔK_0 einmal in der einen, sodann in der anderen Richtung auf den mittleren Magneten wirkt, dann sollen die resultierenden Ausschläge betraglich beidemal = Δs_0 sein. Die Forderungen entsprechen Gln.(5) und (6), die sich an Gl.(3) anschließen:

$$\Delta K_0 = g + c_1 \frac{1}{(s_1 + \Delta s_0)^2} - c_2 \frac{1}{(s_2 + \Delta s_0)^2} \quad (5)$$

$$-\Delta K_0 = g + c_1 \frac{1}{(s_1 - \Delta s_0)^2} - c_2 \frac{1}{(s_2 - \Delta s_0)^2} \quad (6)$$

Nimmt man dazu die Gleichung für den Ruhezustand (Gl.(2)), so hat man ein System von 3 Gleichungen, in dem man z.B. s_1 , ΔK_0 und c_1 vorgeben und dann s_2 , c_2 und Δs_0 berechnen kann. Auch könnte man die Größen ΔK_0 , Δs_0 , s_1 und s_2 als bekannt voraussetzen und daraus die „Feldkomponenten“ c_1 und c_2 bestimmen. Durch verschiedene Umschreibungen und Einsetzungen erhält man aus Gl.(2), (5) und (6) folgende Gleichungen:

$$c_1 = \frac{\Delta K_0 \left[\frac{1}{s_2^2} - \frac{1}{(s_2 + \Delta s_0)^2} + \frac{1}{s_2^2} - \frac{1}{(s_2 - \Delta s_0)^2} \right]}{D} \quad (7)$$

$$c_2 = \frac{\Delta K_0 \left[-\frac{1}{(s_1 + \Delta s_0)^2} + \frac{1}{s_1^2} - \frac{1}{(s_1 - \Delta s_0)^2} + \frac{1}{s_1^2} \right]}{D}, \quad (8)$$

wobei

$$D = \left[\frac{1}{(s_1 + \Delta s_0)^2} - \frac{1}{s_1^2} \right] \left[\frac{1}{s_2^2} - \frac{1}{(s_2 - \Delta s_0)^2} \right] - \left[\frac{1}{(s_1 - \Delta s_0)^2} - \frac{1}{s_1^2} \right] \left[\frac{1}{s_2^2} - \frac{1}{(s_2 + \Delta s_0)^2} \right].$$

Durch Umrechnung ergibt sich:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{(\Delta s_0^2 - 3 s_2^2) (s_1^2 - \Delta s_0^2)^2 s_1^2}{(\Delta s_0^2 - 3 s_1^2) (s_2^2 - \Delta s_0^2)^2 s_2^2} \quad (9)$$

Vernachlässigt man das Quadrat der kleinen Größe Δs_0 gegen das Quadrat der Magnetabstände, so folgt:

$$\frac{c_1}{c_2} \approx \frac{s_1^4}{s_2^4} \quad (10)$$

Die Aussage von Gl.(10) ist gleichbedeutend mit der oben getroffenen Feststellung, daß man, wenn die Magnetfelder so eingestellt werden, daß gleiche Kräfte nach unten und oben gleiche Ausschläge ergeben, gleichzeitig die größtmögliche Linearisierung erreicht.

3. Kinematographische Meßapparatur

Eine Seegangsregistrierung soll mindestens 200 der vorkommenden längeren Wellen umfassen. Bei grober See muß die Registrierdauer daher bei 20 min liegen.

Die zur Verfügung stehende Pathex-Filmkamera Webo 16 gestattete in ihrer ursprünglichen Form bei 7-8 Bildern pro Sekunde Daueraufnahmen bis zu 5 min. Es war daher bei den ersten Vergleichsmessungen beim Leuchtturm Mellum Plate nötig, mit zwei 16 mm-Filmkameras zeitlich überlappend aufzunehmen.

Inzwischen wurden die Kameras teils von der Fa. Pathex, zum wesentlichen Teil vom Instrumentenamt Hamburg des Deutschen Wetterdienstes für durchgehende Aufnahmen bis etwa 33 min Dauer für 8 Bilder pro sec hergerichtet.

Es können jetzt Kassetten für 120 m 16 mm-Film verwendet werden. Je ein Wechselstrom-Motor sorgen für den Antrieb der Kamera und der Aufwickelspule. Das Problem, den Motorantrieb auf die unterschiedliche Drehgeschwindigkeit der Spule (je nach Menge des aufgespulten Films) einzustellen, wurde durch Einbau einer Rutschkuppelung gelöst.

Außerdem wurde vom Instrumentenamt Hamburg des DWD ein Zeitmarkengeber für die Kamera gebaut. Alle 15 sec wird eine Glühbirne unter Strom gesetzt, die den Rand des Filmstreifens durch einen kleinen Schacht kurzzeitig beleuchtet und entsprechend eine Strich-

marke hinterläßt. Zeitmarken können auch von Hand zu beliebiger Zeit eingegeben werden, um bestimmte markante Ereignisse zu kennzeichnen. Der Zeitgeber wird von einem Synchronwerk für 50 Hz angetrieben.

C. Art der Auswertung

1. Die elektronische Integration

a) Integrationsverfahren und Aufbereitung der Meßdaten

Auf die doppelte Integration der Beschleunigungs-Registrierung kann nicht verzichtet werden. In Lit. 9 ist bereits die Frage angeschnitten worden, ob es nicht möglich sei, zunächst das Spektrum der Beschleunigung zu ermitteln und es dann dadurch doppelt zu integrieren, daß man die „Intensitätsdichten“ im Beschleunigungsspektrum an allen Stellen einzeln durch $(2\pi f)^4$ (f = Frequenz) dividiert. Dies Verfahren bringt einmal Ungenauigkeiten mit sich; zum anderen wird für die Auswertung der Messungen nach „sichtbaren Wellen“, also den im Seegang tatsächlich in Erscheinung tretenden Wellen, die Zeitfunktion der Auslenkungen (senkrechter Weg der Wasseroberfläche an einem bestimmten, festen Punkt als Funktion der Zeit) benötigt.

Es hatte sich herausgestellt (Lit.9), daß die Integrationen von Seegangsregistrierungen mit einem mechanisch arbeitenden Integrationsgerät umständlich, zeitraubend und relativ ungenau waren. Zur Rationalisierung und Verbesserung der notwendigen doppelten Integration wurde ein Analogrechner der Fa. Donner (USA) beschafft.

Das Rechnen mit analogen Spannungsfunktionen hat zur Voraussetzung, daß die Registrierung - im vorliegenden Falle die Schwarz-Weiß-Registrierung auf Normalfilm - in elektrische Werte umgewandelt wird. Diese Aufgabe wird von einem licht-elektrischen Spezial-Umwandler gelöst, der im Instrumentenamt Hamburg des Deutschen Wetterdienstes von einem der Berichterstatter (A.Lang) konstruiert wurde. Das Gerät ist in Lit. 3 kurz beschrieben. Der Registrierfilm wird an einem Spalt von der Länge der Filmbreite (Registrierbereich) vorbeigezogen, durch den Licht auf eine Photozelle geworfen wird. Von der Photozelle erfaßt wird also die jeweils mittlere Helligkeit, die außer von der Registrierung auch von der Breite des Spaltes abhängt. Aus diesem Grunde ist der Spalt sehr schmal gewählt. Die optische Funktion wird in elektrische Spannung umgewandelt und kann als „analoge Funktion“ einem Rechner zugeleitet werden.

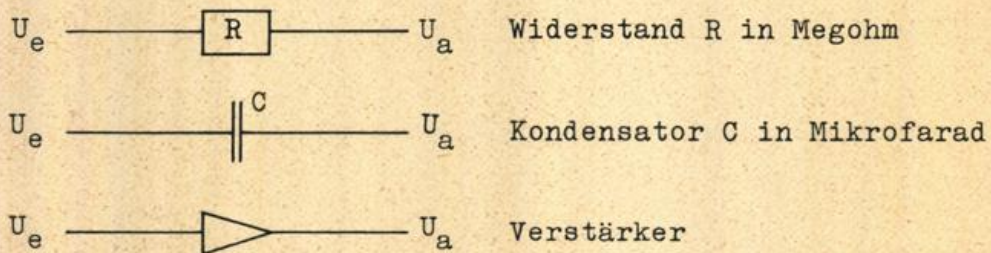
Eine wesentliche Voraussetzung für die zu fordernde Genauigkeit bei der Umwandlung ist die, daß der Film an den geschwärzten Stellen eine gleichmäßige und bei allen Filmen eine gleichmäßig tiefe Schwärzung aufweist. In dieser Hinsicht sind zeitweise Schwierigkeiten aufgetreten, die nach und nach beseitigt werden konnten.

Von großer Bedeutung ist es auch, daß die Lampe, deren Licht durch den Spalt und den Registrierfilm auf die Photozelle fällt, mit konstanter Helligkeit brennt; denn Helligkeitsschwankungen würden sich der Seegangsregistrierung als Störfunktion überlagern. Aus diesem Grunde wurde ein Regelgerät eingesetzt, mit dessen Hilfe der Lampe ein Gleichstrom von genau konstanter Spannung zugeführt werden kann.

Die am Umwandler ausgehende analoge Spannungsfunktion kann abgegriffen und mittels Schreibgerät aufgezeichnet werden. Dies ist geschehen, um festzustellen, inwieweit die Beschleunigungsregistrierung von der Analog-Funktion „linear“ wiedergegeben wird. Durch optisch vergrößerte Abbildung des Lichtspaltes auf die Selenzelle und durch Anwendung einer aus den Kennlinien der Zelle berechneten Abdeckschablone ist die „lineare“ Wiedergabe gelungen.

Das Prinzip der elektrischen Integration wurde in einem Bericht der Fa. Rohde & Schwarz, die den von der Fa. Donner, USA, gekauften Analogrechner (vergl. Abb.3) in Hamburg aufstellte, beschrieben (Lit.5).

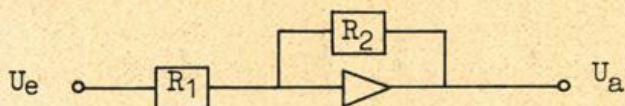
Die Analog-Rechentechnik beruht auf der Möglichkeit, eine eingegebene elektrische Spannung durch Schalt-Maßnahmen in bestimmter Weise umzuformen. Folgende Schalt-Elemente werden benutzt:



Mit U_e und U_a sind Ein- und Ausgangsspannung bezeichnet.

Durch Kombination dieser Schalt-Elemente lassen sich verschiedene Rechenschritte ausführen, und zwar u.a.:

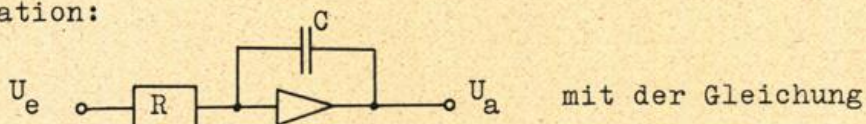
- 1) Verstärkung; d.h. Multiplikation mit einem konstanten Faktor:



Für das Verhältnis von Ausgangs- und Eingangsspannung erhält man folgende Gleichung:

$$\frac{U_a}{U_e} = - \frac{R_2}{R_1} : \quad (11)$$

2) Integration:



mit der Gleichung

$$U_a = - \frac{1}{RC} \int_{t_0}^t U_e dt \quad (12)$$

wobei die Integration von der Anfangszeit t_0 bis zur Zeit des Abbruchs der Operation, t , läuft. Für die doppelte Integration sind zwei dieser Integrationsstufen erforderlich.

Um zu verhindern, daß die der Analog-Spannung überlagerten Störspannungen mitintegriert werden, müssen Filter angewendet werden. Sie werden im folgenden Abschnitt behandelt.

Die Rechengenauigkeit des Analogrechners wird mit 1 % angegeben; d.h., daß jede auf die infinitesimal kleine Zeiteinheit bezogene Operation die Genauigkeit von 1 % besitzt. Abweichungen werden nicht in einer Richtung aufintegriert, sondern gleichen sich im Laufe der Rechnung statistisch teilweise wieder aus.

Die Genauigkeit der vom licht-elektrischen Umwandler abgegebenen Analog-Meßspannung liegt gleichfalls nahe 1 %. Somit sind die Geräte hinsichtlich ihrer Genauigkeit aufeinander abgestimmt.

Das Ergebnis der doppelten Integration kann mit Hilfe eines geeigneten Schreibgerätes als Registrierung aufgezeichnet bzw. sofort für die weitere Analogrechnung, z.B. zwecks Fourier-Analyse, verwendet werden.

Zu einem späteren Zeitpunkt wurde im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes eine Anlage beschafft, die es gestattet, eine analoge Spannungsfunktion automatisch zu digitalisieren. Dabei wird in äquidistanten, einstellbaren Zeitabständen der Funktionswert, d.h. die elektrische Spannung gemessen; diese Werte werden in digitaler Form fortlaufend auf einen Lochstreifen gestanzt. Sie sind damit

in einer Form gespeichert, die eine automatische digitale Weiterverarbeitung gestattet.

b) Das Integrationsfilter

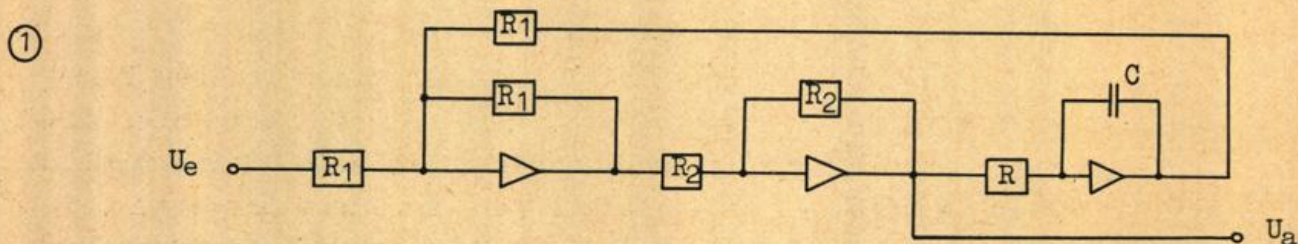
Jede Registrierung ist von „Störungen“ überlagert. Sind sie über den in Frage kommenden Frequenzbereich ungefähr gleichmäßig verteilt, so spricht man von „Weißem Rauschen“. Die „Störungen“ können der zu messenden Erscheinung, in unserem Falle dem Seegang, als Schwingungen anderen Ursprungs aufgesetzt sein; sie können ihre Ursache auch in instrumentellen Unzuverlässigkeiten und Unsauberkeiten bei der Auswertung haben.

Die verhältnismäßig langen und flachen Seegangsanteile am langwelligen Ende des Energiespektrums bewirken andererseits recht geringe Beschleunigungen. In einem bestimmten, jedoch von Fall zu Fall nicht immer gleichen Band kleiner Frequenzen sind Störschwankungseinflüsse zum Teil wesentlich größer als die registrierten Beschleunigungen.

Da die doppelte Integration der Beschleunigungsgrößen auf eine Division durch $(2\pi f)^4$ zurückgeht, werden Störschwankungen, die der Registrierung überlagert sind, im niederfrequenten (= langwelligen) Bereich sehr stark vergrößert. Man ist gezwungen, diesen Effekt durch den Einsatz von Filtern zu beseitigen.

Nach dem Vorbild der in den Niederlanden verwendeten Geräte (Lit.2) und auf Grund von Vorschlägen von Herrn Dipl.-Ing. W. Mildner, Fa. Rohde & Schwarz Vertriebs-Gesellschaft Köln, werden in dem von uns benutzten Analogrechner zur doppelten Integration 3 Filter benutzt. Eins von ihnen liegt vor der ersten Integrationsstufe (hier „Vorfilter“ genannt), von den beiden übrigen ist je eines (hier „Nachfilter“ genannt) hinter den beiden Integrationsstufen angeordnet.

Das „Nachfilter“ wurde von Herrn W. Mildner angegeben und bewirkt eine Regelungsautomatik in dem Sinne, daß die integrierte Kurve auch bei Vorkommen extremer Ausschläge immer wieder auf ein bestimmtes Maß zurückgeholt wird. Es wird deshalb auch „Regelfilter“ genannt. Es besteht aus zwei Verstärkereinheiten und einer Integrationseinheit nach folgendem Schaltschema:



Das stabile Verhalten des Regelfilters wird durch starke Rückkopplung der Verstärker des Filters erreicht (Die Rückkopplung ist ein prinzipielles Merkmal der Analog-Rechenverstärker).

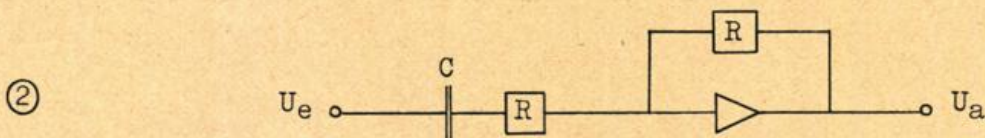
Bei Eingabe einer sinusförmigen Spannung der Kreisfrequenz ω bewirkt das Filter eine Veränderung des sonst zu erwartenden Ausgangswertes um den Faktor

$$\beta = \frac{RC\omega}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}} \quad (13)$$

Man findet die Berechnung dieser Größe bei H. Siems (Lit.6). Sie wird dort unter Benutzung einer Leitwert-Matrix bestimmt. Zum gleichen Ergebnis sind wir mit Rechnungen auf der Grundlage von Differential-Gleichungen gelangt.

Beliebig schwankender Wechselstrom, wie ihn die von einer Seegangsregistrierung abgenommene Analogfunktion darstellt, ist als Gemisch von zahlreichen, einander überlagernden Sinusschwingungen aufzufassen.

Für das sog. „Vorfilter“ wurde zunächst ein Bandpaßfilter (läßt bestimmtes Frequenzband „passieren“), später ein Hochpaßfilter (läßt hohe Frequenzen „passieren“) verwendet. Versuche ergaben jedoch, daß, wenn eine definierte Filterwirkung erreicht werden soll, noch ein Verstärker nachgeschaltet werden muß. Es ergibt sich dann das folgende Schaltschema:



Dies Filter wirkt genau wie ein Regelfilter.

Wenn bei den Operationen zur Integration von „Regelfiltern“ gesprochen wird, so ist ein Gesamtfilter gemeint, dessen zwei „Nachfilter“ das Schaltschema ①, das „Vorfilter“ die Form ② besitzen.

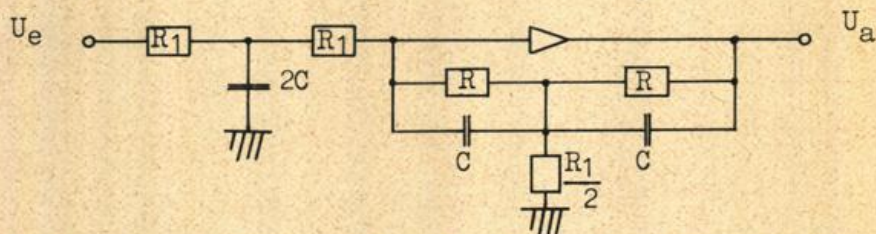
Unter „normalem Filter“ oder „Norm-Filter“ sei ein Integrationsfilter verstanden, bei dem alle drei Einzelfilter nach Form ② aufgebaut sind.

Es wurde zunächst als möglich betrachtet, daß die einzelnen Schaltelemente bzw. die verschiedenen Filter sich gegenseitig in unerwünschter Weise beeinflussen könnten. In Versuchsserien wurden daher zunächst Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz der Beeinflussung durch jedes Filter einzeln unterzogen. An Hand der Meßergebnisse wurde als-

dann auf theoretischem Wege berechnet, welche Wirkung die ganze Filter- und Integrationsschaltung auf eine sinusförmige Schwingung ausüben muß. Die Resultate wurden mit Messungen verglichen. Es ergab sich Übereinstimmung, d.h., daß sich die Schaltelemente gegenseitig nicht beeinflussen.

Auch mit Schwingungsgemischen (Seegangsregistrierungen) wurden Versuche in dieser Hinsicht angestellt. Bei Verwendung von Filtern verschiedenen „Härtegrades“ (weiches Filter: RC relativ groß; hartes Filter: RC relativ klein) kamen wir zu folgenden Feststellungen: Ein relativ weiches Filter läßt erwartungs- und definitionsgemäß „Intensität“ noch in einem nieder-frequenten Bereich durch, in dem ein härteres Filter schon vollständige oder partielle Auslöschung bewirkt. Auffälligerweise war bei Verwendung eines weichen Filters jedoch die „Intensität“ im hochfrequenten Bereich teilweise gemindert (gegenüber einem härteren Filter). Es ist nicht sicher, ob dieser Effekt auf mangelhafte Folgefähigkeit des Schreibgerätes zurückzuführen ist.

Zu einem späteren Zeitpunkt wurde für Arbeiten im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes von Herrn Dipl.- Ing. H. Siems, Fa. Rohde & Schwarz Vertriebs-Gesellschaft Köln (Lit.6), eine Schaltung vorgeschlagen, die die gleiche Wirkung hat wie 2 Integrations- und 2 Filterschaltungen, die hintereinander geschaltet sind:



Diese Schaltung spart gegenüber der Normalfilter-Schaltung 3 Verstärker und gegenüber der Regelfilter-Schaltung sogar 7 Verstärker ein. Auch hier wurde eine eingehende Prüfung mit Sinusschwingungen und mit Frequenzgemischen durchgeführt. (Diese Filterschaltung wurde bei allen Messungen nach dem 4. Dezember 1960 angewendet.)

Die Formel (13) zur Bestimmung der Filterfaktoren enthält den Ausdruck $R \cdot C$, also das Produkt von Widerstand und Kondensator-Kapazität. R und C sind willkürlich wählbar. Welches Filter für die vorliegenden Zwecke günstige Eigenschaften besitzt und als „optimal“ anzusehen ist, mußte durch Versuche geklärt werden.

Es ist anzustreben, daß der Wirkungsbereich des Filters möglichst scharf begrenzt ist, d.h., daß die Filterfunktion steil abfällt und nach Möglichkeit annähernd Rechteckform besitzt (vergl. Lit.9, S.26 und Abb.27). Eine einfache Überlegung, unterstützt durch Rechnungen,

ergab, daß das Gesamtfilter dann am steilsten abfällt, wenn R·C in allen drei Einzelfiltern gleich groß gewählt wird.

c) Welches Integrationsfilter ist anzuwenden?
.....

Bei der bis 1961 erreichten Meß- und Auswertungsgenauigkeit ist es nicht möglich, für alle Seegangsmessungen ein und dasselbe Integrationsfilter zu benutzen. Vielmehr muß versucht werden, ein Filter einzusetzen, dessen Begrenzung nahe am langwelligen Ende des zu erwartenden Spektrums liegt.

Zur Auffindung von Integrationsfiltern mit einer für unsere Zwecke „optimalen“ Wirksamkeit wurden besondere empirische Untersuchungen angestellt. Jede der zu diesen Versuchen herangezogenen Beschleunigungs-Registrierungen wurde viermal, und zwar je besonders mit einem anderen Filter doppelt integriert. Dabei war sichergestellt, daß die Registrierung keinen Dünungsanteil enthielt. Das zu erwartende wahre Spektrum zeigt dann am langwelligen Ende einen annähernd glatten und verhältnismäßig steilen Abfall. - Ein zu hartes Filter bewirkt nun, daß ein Teil der längeren (echten) Seegangskomponenten gelöscht wird und daher im Spektrum nicht erscheint. Ein zu weiches Filter ist nicht in der Lage, die starke Vergrößerung des Rauscheffektes infolge doppelter Integration zu verhindern. Dem wahren Spektrum ist dann im langwelligen Grenzbereich ein Störspektrum angesetzt, so daß man im allgemeinen ein (Gesamt-) Spektrum mit zwei großen Maxima erhält. Von den 4 eingesetzten Filtern wurde in einer ersten Grobeinteilung dasjenige als am besten geeignet bezeichnet, bei dessen Anwendung in der doppelt integrierten Registrierung die langwelligen Störschwankungen als Überlagerungswelle noch gerade erkennbar sind.

Außerdem wurden die 4 Spektren aus der doppelt integrierten Beschleunigungsregistrierung (= „Bi-Registrierung“) mit dem Spektrum aus der „objektiven“ oder „direkten“ Messung mit der Filmkamera (F) verglichen. Für viele Stellen auf der Abszisse wurden die Quotienten aus dem Bi- und dem F-Spektrum berechnet. Diese Werte, über der Frequenz f als Abszisse aufgezeichnet, ergeben eine Umrechnungsfunktion (vgl. „Eichfunktion“, Lit.9, S.71), auf die wir im Abschnitt D 2 genauer zu sprechen kommen.

Welches Integrationsfilter auf die einzelne Registrierung angewendet werden muß, ist leider nicht von vornherein bekannt. In verhältnismäßig umfangreichen Arbeiten wurde versucht, die Frage zu lösen. An Hand der Vergleichsmessungen auf dem Leuchtturm Mellum Plate haben wir uns bemüht, ein Prinzip zu finden, nach dem für jede Registrierung von vornherein entschieden werden konnte, welches Filter für die

betreffende Seegangsart geeignet sein würde.

Das Auffinden einer Art Regel über die Wahl des optimalen Filters wäre für eine schnelle und treffende Auswertung der von Feuerschiffen und Wattstationen mit Seegangs-Beschleunigungsschreibern angestellten Messungen von großer Bedeutung gewesen.

Zunächst war bei Vergleichsmessungen, für die also Registrierungen F und Bi vorlagen, versucht worden, eine Beziehung zwischen unterer Grenzfrequenz des F-Spektrums und des optimalen Integrationsfilters zur Bestimmung der Bi-Registrierung und des Bi-Spektrums ausfindig zu machen. Als „untere Grenzfrequenz“ wurde vorläufig die Größe T_L , die „längste Periode von praktischer Bedeutung“ im Spektrum (vgl. Lit.10), gewählt. Da zwischen der längsten Periode, bis zu der sich die Spektralkurve erstreckt, und der „totalen Energie“ sowie somit der Höhe der Windsee nach Auffassung der meisten Seegangsforscher ein Zusammenhang bestehen müßte, hielten wir es für möglich, daß die Größe T_L das Spektrum überhaupt in einer für unsere Zwecke wünschenswerten Weise charakterisiert.

Es muß angestrebt werden, daß für alle Fälle von Windsee eine Beziehung zwischen bestimmten meßbaren Eigenschaften des Seegangs und der anzuwendenden (optimalen) Filterfunktion $\xi_{op}(f)$ bzw. $\xi_{op}(T)$ ermittelt wird. Zunächst wurde gefragt, ob man diese Forderung erfüllen kann, indem man durch geeignete Wahl von RC die Filterfunktion so festlegt, daß der Funktionswert ξ_{op} an der von Fall zu Fall unterschiedlichen Stelle T_L stets denselben Wert annimmt.

Aus der Formel

$$\xi_{op} = \left[\frac{\frac{2\pi RC}{T_L}}{1 + \left(\frac{2\pi RC}{T_L}\right)^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (14)$$

ist ersichtlich, daß in der Formel für ξ_{op} als einzige Variable die Größen $\frac{RC}{T_L}$ und RC auftreten. Die Forderung $\xi_{op} = \text{const.}$ ist erfüllt, wenn $\frac{RC}{T_L} = \text{const.}$; d.h., daß RC der Periode T_L proportionel gewählt werden muß.

Aus drei Vergleichsmessungen am Turm Mellum Plate wurden T_L aus dem F-Spektrum und das optimale RC nach Augenschein (durch Probieren) bestimmt. Für $\frac{RC}{T_L}$ erhielten wir in den drei Fällen die Werte: 0,30; 0,25 und 0,24; hierfür waren bereits alle Umrechnungen zwecks Vergleichbarkeit der beiden Registrierungen vorgenommen. Wir begnügten uns mit dem „runden“ Wert 0,3 und setzten also $RC = 0,3 \cdot T_L$.

In Anlehnung an niederländische Vorgänge (Lit.2) legten wir fünf „Stärkeklassen“ der Windsee fest; für jede von ihnen wurde eine „längste Periode von praktischer Bedeutung“ (T_L) als maßgebend oder charakteristisch betrachtet, und zwar: $T_L = 2,5, 4, 7, 10$ und 15 sec. Aus $RC = 0,3 \cdot T_L$ ließen sich hierfür die zugehörigen RC-Werte bestimmen.

Abgesehen davon, daß sich die Verwendung fester Filter nicht verwirklichen ließ, weil wie später (Abschn. D 2) gezeigt werden wird, infolge von Unterschieden beim Vorschub von Meßgerät und Auswertegeräten ein Filter anderer Größe wirksam ist, erwies sich dies Verfahren bei Versuchen zur praktischen Anwendung jedoch als unzureichend, weil 1) T_L nicht von vornherein bekannt ist und 2) die Abweichungen von $RC = 0,3 T_L$ im Einzelfall zu groß sind.

Es mußte daher nach anderen Merkmalen gesucht werden, die eine Handhabung boten, sofort das günstigste Integrationsfilter anzuwenden. Eine Größe, die aus visuellen Beobachtungen bekannt sein dürfte, ist die mittlere Periode der sichtbaren Wellen in einer Windsee, \bar{T} . Untersuchungen ergeben jedoch sehr bald, daß man aus \bar{T} allein das optimale Filter nicht ableiten kann; es wurde gefunden, daß für verschiedene Seegänge mit gleichem \bar{T} unterschiedliche Filter zur Erzielung einer optimalen Auswertung der Beschleunigungsregistrierung verwendet werden mußten.

Es ist aber plausibel, daß die Steilheit ein geeignetes Merkmal für die Filterwahl sein könnte, weil das Verhalten des Seegangs-Beschleunigungsschreibers im Seegang stark von der Steilheit der Wellen abhängt. Die Steilheit einer Welle ist definiert durch das Verhältnis ihrer Höhe H zur Länge L . Als ein Maß für die Steilheit eines Seegangs führten wir den Quotienten $\frac{\bar{H}^{1/3}}{(\bar{T})^2}$ ein. Die kennzeichnende Wellenhöhe $\bar{H}^{1/3}$ wird ebenso wie die mittlere Periode der sichtbaren Wellen des betreffenden Seegangs, \bar{T} , im allgemeinen aus visuellen Beobachtungen bekannt sein. (Man hätte statt \bar{T} besser $\bar{T}_{1/3}$, die sog. kennzeichnende Periode, wählen sollen; jedoch stand zum Zeitpunkt der Untersuchungen die Größe $\bar{T}_{1/3}$ aus den Registrierungen noch nicht zur Verfügung.) Es zeigte sich jedoch, daß auch die Steilheit kein zufriedenstellendes Merkmal bei der Filterwahl darstellt.

Im Rahmen der Untersuchung von drei Vergleichsregistrierungen schien sich anzudeuten, daß die kennzeichnende Wellenhöhe $\bar{H}^{1/3}$ einer bestimmten Filterstärke zugeordnet werden kann. Später, bei Vorliegen weiterer Vergleichsmessungen, zeigte sich, daß diese Beziehung zu starken Streuungen unterliegt und daß die optimale Filterstärke sowohl von $\bar{H}^{1/3}$ als auch von der mittleren Steilheit der Windsee abzuhängen scheint.

Außerdem ergab sich bei praktischen Anwendungsversuchen, daß weder $\bar{H}_{1/3}$ noch \bar{T} genau genug beobachtet zu werden pflegen, als daß sie als Merkmale für die Bestimmung der optimalen Filterstärke mit ausreichender Zuverlässigkeit benutzt werden könnten.

Insgesamt gesehen sind die umfangreichen Versuche, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem das optimale Integrationsfilter von vornherein für jede Seegangs-Registrierung angegeben werden kann, fehlgeschlagen.

Aus diesem Grunde konnte nicht darauf verzichtet werden, jede Beschleunigungsregistrierung 2 bis 4mal mit verschiedenen Filtern zu integrieren, um das beste Ergebnis herauszusuchen.

Unseres Erachtens besteht noch die Möglichkeit, von bestimmten Merkmalen der nicht-integrierten Beschleunigungs-Registrierung auf die jeweils günstigste Filterstärke zu schließen. Die Durchführung entsprechender Untersuchungen wurde zwar erwogen, konnte wegen Auslaufens des Forschungsprojektes jedoch nicht mehr verwirklicht werden.

d) Probe-Vergleichsmessung außerhalb des Wassers

Am 4. Juli 1959 wurde auf dem Hof des Instrumentenamtes Hamburg des Deutschen Wetterdienstes eine Vergleichsmessung von 4 min Dauer durchgeführt, deren hauptsächliches Ziel es war, die Wirkungsweise verschiedenartiger Integrationsfilter zu erproben.

Von einer geeigneten Person wurde der Seegangs-Beschleunigungsschreiber von Hand in unregelmäßiger Weise, möglichst nur senkrecht, auf- und abbewegt. Das Gerät wurde dabei aufrecht gehalten, so daß höchstens schwache Kippbewegungen auftraten. Der Versuch fand dicht neben einer senkrechten Meterskala statt und wurde gefilmt. Es wurde darauf geachtet, daß die Kamera-Bildachse horizontal gerichtet war, um Bildverzerrungen auszuschließen. Man erhält auf diese Weise eine zwar nicht exakte, aber doch sehr brauchbare Testmöglichkeit zwischen den beiden Registrierarten.

Die kinematographische Registrierung („F“) wurde in der üblichen Weise aufbereitet. Die Beschleunigungsregistrierung wurde mit 5 Integrationsfiltern verschiedener „Stärke“ - R·C lag zwischen 1,0 und 3,0 - auf dem Analogrechner je besonders doppelt integriert und aufgezeichnet. Die Vorlaufgeschwindigkeiten am Meßgerät und am Umsetzer waren gleich groß gewählt, so daß besondere Reduktionen von R·C nicht nötig waren.

Von den verschiedenen Bi-Registrierungen und der F-Registrierung wurden time-series genommen und das Mittelniveau jeder Registrierung bestimmt. Dies war nötig, weil die Ordinatenwerte der Schwankungen an

deren Extremwertstellen ausgemessen werden sollten.

Es wurde angestrebt, jede einzelne „Schwingung“ auf der F-Registrierung mit der zugehörigen Erscheinung auf der Bi-Registrierung in Vergleich zu setzen. Es gelang, auch die einzelnen „Schwingungen“ einander zuzuordnen. Alsdann wurden alle sog. Schwankungshöhen (Ordinatenabstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Extremen ungleichen Vorzeichens), alle Extremwert-Ordinaten (Abstände von der Mittellinie) und die Zeitabstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Extremwerten ungleichen Vorzeichens ausgemessen. Hierbei sind alle Schwankungen - und nicht nur etwa die Null-Durchgangs-„Wellen“ berücksichtigt worden. Diese Auswahl erschien angebracht, weil dieser Versuch ein verhältnismäßig schmales Spektrum ergeben mußte und die den Rippelwellen entsprechenden kurzen Schwankungen nicht vorhanden waren. Die Zeitabstände wurden verdoppelt und wie in Lit. 9 als „verdoppelte Halbperioden“ bezeichnet.

Diese „Perioden“ wurden dann in Klassen eingeteilt, von denen jede eine Klassenbreite von 1 sec besitzt. Dabei wurde von den verdoppelten Halbperioden der F-Registrierung ausgegangen. Die folgende kleine Tabelle gibt die Anzahl der Werte pro Klasse, wobei die Klasse durch ihren Mittelwert gekennzeichnet ist:

Tabelle

Klasse:	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5
Anzahl der Werte:	1	29	32	25	26	15	5	1	-	1

Das bedeutet, daß z.B. „Schwingungen“ mit „Perioden“ zwischen 4 und 5 sec 26 mal in der Registrierung auswertbar auftraten.

Abb. 4 enthält die Mittelwerte (pro Klasse) der Schwankungshöhen als Abhängige von den „Perioden“-Klassen-Mittelwerten gemäß F-Registrierung. „Schwingungen“ der Perioden zwischen 6 und 7 sec waren mit ca. 1,20 also die durchschnittlich größten.

Nunmehr wurden für jede einzelne „Welle“ Differenzen der gemessenen Werte gebildet und zwar zwischen jeweils einer der 5 Bi-Registrierungen und der F-Registrierung. Dies geschah für:

- a) die Extremwertordinaten,
- b) die Schwankungshöhen und
- c) die Schwankungsperioden.

Aus Darstellungsgründen sollte erreicht werden, daß in allen Fällen in denen der Bi-Wert kleiner als der zugehörige F-Wert war, die Dif-

ferenz ein negatives Vorzeichen erhielt. Bei den Minima (Größen unterhalb der Mittellinie) mußte zu diesem Zweck das Vorzeichen umgekehrt werden.

Die Differenzen wurden wieder nach 1 sec-Klassen doppelter Halbperioden der F-Registrierung geordnet und pro Klasse der Mittelwert der Differenzen gebildet. Das Ergebnis ist für die 5 verschiedenen Integrationsfilter $R \cdot C = 1,0; 1,2; 1,5; 2,0$ und $3,0$ in den Abb. 5 bis 7 wiedergegeben.

Die Darstellungen Abb. 5 und 6 zeigen, daß die Auslenkungen im Falle der Differenzen der Extremwert-Ordinaten und der Schwankungshöhen im allgemeinen nur für die kleinsten der aufgefundenen Perioden, nämlich im Bereich 1 bis 2 sec, durch die unter Anwendung verschiedener Filter doppelt integrierte Beschleunigungsmessung wiedergegeben wurden. Je länger die Periode, umso größere Unterschiede in Gestalt von Verlusten treten auf, und zwar erwartungsgemäß am meisten bei den stärksten Filtern. Nur für das weiche Filter $R \cdot C = 3,0$ zeigt die Kurve für alle „Perioden“ eine geringe Abweichung der Bi-Werte von den F-Werten. Es darf nicht übersehen werden, daß gewisse Schwankungen der in Abb. 5 und 6 wiedergegebenen Differenzen-Kurven durch den geringen Umfang des Kollektivs bedingt sein können. Die Anzahl der Extremwerte beträgt nur 68.

Bei den „Perioden“ ist keine systematische Änderung der Differenzen der Bi- und zugehörigen F-Werte in Abhängigkeit von der Filterstärke zu erkennen. Lediglich beim stärksten Filter ($R \cdot C = 1,0$) zeigt sich für die langen „Perioden“ 6 bis 7 sec eine Neigung zum Kleinerwerden der aus den Bi-Registrierungen gewonnenen „Perioden“-Werte, während sie bei kleinen „Perioden“ größer ausfallen als bei der F-Registrierung. Auch bei den Filtern mittlerer Stärke ergibt sich eine Tendenz zu dieser „Nivellierung“ der mit der Beschleunigungsmessung ermittelten „Perioden“. Dagegen erhält man bei weichem Filter sowohl im kurzwelligen als im relativ langwelligen Bereich bei der Bi-Registrierung eine nicht der Wirklichkeit entsprechende Verlängerung der „Perioden“. In Übereinstimmung mit den am Ende des Abschnitts C 1 b getroffenen Feststellungen ist dasjenige Integrationsfilter als am meisten geeignet zu bezeichnen, bei dem sich diese Erscheinung noch eben andeutet.

Faßt man die Ergebnisse der 3 Abbildungen zusammen, so ergibt sich, daß zur Erzielung einer möglichst naturgetreuen Verteilung der sichtbaren Wellen eine weiche Filterung die günstigste ist.

e) Anpassung und Eichung der Integrationsergebnisse

Die Zeitskalen der kinematographischen Registrierung („F“) und der Aufzeichnung mit dem Seegangs-Beschleunigungsmesser sind unterschiedlich. Durch Zeitnahme des Beginns und der Beendigung beider Messungen mit der Stoppuhr und durch Eingabe zusätzlicher Zeitmarken in die F-Registrierung wurde jedoch dafür gesorgt, daß die beiden Zeitskalen aufeinander bezogen werden können.

Die Gleichmäßigkeit des Vorschubs wurde kontrolliert. Sie war in der Regel gut. Bei der Messung am 17.3.1959 stellte sich bei der Beschleunigungsregistrierung eine Verlangsamung um 0,38 % pro Minute heraus. Trotzdem wurde der Mittelwert der Vorlaufgeschwindigkeit als konstanter Vorschub für die Aufbereitung verwendet. Inzwischen ist die Vorlauftechnik am Gerät weiter verbessert worden.

Die aus der doppelt integrierten Beschleunigungsregistrierung (=„Bi“) benötigten Ordinatenwerte (time series) wurden unter Benutzung eines übergelegten Rasters bestimmt (vgl. Lit.9). Bei bestimmten, zu einem späteren Zeitpunkt ausgeführten Integrationen (Messung vom 3.11.1961, siehe Abschn. D 1b) wurden die Ordinatenwerte mit der in Abschn. C 1 a beschriebenen Apparatur automatisch abgelesen.

Für Abszisse (Zeit) und Ordinate (Auslenkung) werden unterschiedliche Umrechnungsfaktoren \bar{C}_1 bzw. \bar{C} benötigt.

Sind x_1 und z_1 die Einheiten der Abszisse und der Ordinate auf der Bi-Registrierung, t die (wahre) Zeit und ζ die (in cm ausgedrückte registrierte) Auslenkung, so geht die Umrechnung nach folgenden Formeln vor sich:

$$\begin{aligned} \text{Abszisse: } t &= \bar{C}_1 \cdot x_1 \\ \text{Ordinate: } \zeta &= \bar{C} \cdot z_1. \end{aligned}$$

Dabei gehen in \bar{C}_1 ein: Vorschub im Seegangs-Beschleunigungsschreiber, Vorschub im licht-elektrischen Umsetzer und Vorschub des Schreibgeräts.

Um festzustellen, welche wahre Auslenkung im Seegang der registrierten Auslenkung ζ entspricht, muß eine Eichung vorgenommen werden. Hierzu wurde die beim Instrumentenamt Hamburg entwickelte Eichschaukel (vgl. Lit.3) benutzt. Mit diesem Gerät können auf Normalfilm Registrierungen von einfachen Sinusschwingungen für eine bekannte (einstellbare) Höhe d (doppelte Amplitude) und für beliebige Perioden hergestellt werden. Nach der doppelten Integration einer solchen Aufzeichnung mittels licht-elektrischem Umsetzer und Analogrechner

erhält man eine sinus-ähnliche Schwingung, die auf dem Registrierpapier die Schwankungshöhe d_1 besitzt.

Das Verhältnis von d zu d_1 ist maßgebend für die Berechnung des Umrechnungsfaktors \bar{C} . In die Bestimmungsgleichung

$$\bar{C} = \xi \frac{d}{d_1} \frac{\kappa_e^2}{\kappa_m^2} \quad (15)$$

gehen auch

κ_e = Vorschub der Eichschaukel-Registrierung,

κ_m = Vorschub des Seegangs-Beschleunigungsschreibers während der Messung

und der „Filterfaktor“ ξ ein.

Zur Verwendung des Filters ist zu bemerken: Auch bei der Integration der mit der Eichschaukel hergestellten einfachen harmonischen Welle ist ein (Integrations-) Filter einzuschalten, um die langen, nicht vermeidbaren Nullpunktschwankungen zu eliminieren. Die geringe Abschwächung, welche die Auslenkungen der doppelt integrierten Eichregistrierung (Sinusschwingung) dadurch erfahren, muß kompensiert werden. Dies geschieht durch Anbringen der Größe ξ in Gl.(15). Das Verhältnis $\frac{\xi}{d_1}$ ist eine Konstante unter der Voraussetzung, daß d unverändert gehalten wird; es ist insbesondere unabhängig von der Periode der Test-Sinusschwankung.

2. Auswertung der Registrierungen

Nach beendeter Aufbereitung wurden die doppelt integrierten Beschleunigungsregistrierungen (Bi) und die kinematographischen Registrierungen (F) in ein und derselben Art und Weise ausgewertet. Für die Vergleichsmessungen auf dem Leuchtturm Mellum Plate wurden sowohl die Häufigkeitsverteilungen der sichtbaren Wellen als auch die (eindimensionalen) Energiespektren, bei den Simultanmessungen an verschiedenen Meßgeräten in der Deutschen Bucht nur die Energiespektren ermittelt.

a. Häufigkeitsverteilung der sichtbaren Wellen

Wir haben die Häufigkeitsverteilungen der sichtbaren Wellen nach den im Prinzip gleichen Methoden bestimmt wie in Lit. 9 Abschnitt D2 angegeben. Die Auswerte-Arbeiten wurden jedoch durch den Einsatz eines elektronischen Schnellrechners (IBM 650 des Instituts für An-

gewandte Mathematik der Universität Hamburg) in hohem Maße rationalisiert.

Es wurde ein Programm ausgearbeitet, zu dessen Durchführung in die IBM 650 folgende Größen eingegeben werden mußten:

- a) Die Zahlenwerte der vorher bestimmten, auf ein willkürliches Niveau bezogenen Extremwert-Ordinaten (in Ablese-Einheiten) in zeitlicher Reihenfolge und ihrer Abstände auf der Abszisse (Zeitachse).
- b) Das für jede Registrierung schon vorher aus einer Ordinatenfolge (time series) errechnete arithmetische Mittel. Durch diesen Wert wird die Maschine in die Lage versetzt, Null-Durchgangs-Wellen (oder „zero-crossing“-Wellen) auf der Registrierung von solchen Schwankungen zu unterscheiden, welche die Mittellinie nicht anschnitten.
- c) Umrechnungsfaktoren für die Ordinate, \bar{C} , und für die Abszisse, \bar{C}_1 , zur Umwandlung der Ableseeinheiten in Einheiten der wahren Maßskalen.

In Ausführung der durch das Programm gegebenen Befehle leistete die Maschine folgende Arbeiten:

- a) Umrechnung der eingegebenen Zahlenwerte in Größen der wahren Maßeinheiten (Anbringen von \bar{C} und \bar{C}_1).
- b) Die Extremwertordinaten (Auslenkungen von der Mittellinie) \bar{a} werden auf das Mittelniveau bezogen, in bestimmter Weise statistisch geordnet und Klassen zugewiesen, die vorher selbsttätig gewählt worden waren.
- c) Die Zahl der Klassen und ihre Breite werden bestimmt. Die Klassenanzahl soll in jedem Falle höchstens 25 betragen, jedoch soll die Klassenbreite innerhalb dieses Rahmens so klein wie möglich sein. Daß nicht immer die gleiche Klasseneinheit gewählt wird, liegt daran, daß der Wertebereich bei verschiedenen Seegangsmessungen unterschiedlich ist, und daß für die Breite bestimmte ganzzahlige Größen zugelassen waren.
- d) Die Maschine sucht die Null-Durchgangsschwankungen (zero crossings) heraus und berechnet für sie die Schwankungshöhen S zwischen zwei aufeinanderfolgenden Extremen entgegengesetzten Vorzeichens sowie die zugehörigen Abszissenwerte (verdoppelte Halbperioden), \bar{T} .
- e) Die Maschine nimmt eine zweidimensionale Häufigkeitsauszählung mit Schwankungshöhen und verdoppelten Halbperioden als Koordinaten vor. Hierzu wird wieder selbsttätig eine Klasseneinteilung ermittelt und zwar gesondert für Schwankungshöhen S und für

verdoppelte Halbperioden \bar{T} . Bei den \bar{T} -Werten wurden nur ausgewählte Vielfache von 0,1 sec zugelassen.

Nach bestimmten Umrechnungen wurden von der Maschine schließlich ausgegeben:

- a) Die absolute Häufigkeit (in Klassen)
der Extremwertordinaten,
der doppelten Halbperioden,
der Schwankungshöhen S und
der Perioden \bar{T} .
- b) Die „reduzierte“ relative Häufigkeit (in Klassen)
der Extremwertordinaten,
der doppelten Halbperioden,
der Schwankungshöhen S und
der Perioden \bar{T}

(Der Zusatz „reduziert“ besagt, daß die Klassen sämtlich auf die Breite „1“ gebracht worden sind; vgl. Lit.9, S. 36),

- c) die absolute zweidimensionale Verteilung,
- d) die reduzierte relative zweidimensionale Verteilung und
- e) die Mittelwerte \bar{H} (mittlere Höhe der sichtbaren Wellen), $\bar{H}_{1/3}$ (kennzeichnende Wellenhöhe), $\bar{H}_{1/10}$ (Durchschnittshöhe des „oberen Zehntels“ der sichtbaren Wellen) und \bar{T} (mittlere Periode der sichtbaren Wellen).

Aus diesen vom elektronischen Schnellrechner gelieferten Zahlen bzw. Verteilungen sind mit einer Tisch-Rechenmaschine noch folgende Rechnungen durchgeführt worden:

- a) Für jede Registrierung wurde aus der zweidimensionalen Verteilung die kennzeichnende Periode $\bar{T}_{1/3}$ bestimmt.
- b) Aus der absoluten Häufigkeitsverteilung Berechnung der sog. „charakteristischen Kurven“ zur statistischen Beurteilung der Qualität der Messung (vgl. Lit.9, S. 36).
- c) Rechnerische Glättung der reduzierten relativen Häufigkeitsverteilung.
- d) Da die automatisch bestimmten Klassenbreiten bei den jeweils korrespondierenden F- und Bi-Registrierungen u.U. unterschiedlich sein können, mußten für Vergleiche zwischen den Registrierungen, z.B. für die Ermittlung der σ_s -Werte zur Umrechnung der Bi-Meßergebnisse auf die wahren Seegangswerte („Eichung“ des Seegangs-Beschleunigungsschreibers, vgl. Lit.9, S. 30), bei einigen Häufigkeitsverteilungen alle Zahlenwerte auf gleiche Klassenbreiten umgerechnet werden.

Die zweidimensionalen Verteilungen wurden beim Zeichnen der Isolinien noch subjektiv etwas ausgeglichen.

Die „charakteristischen Kurven“ kennzeichnen die Häufigkeitsverteilung der Wellen verschiedener Höhe. Ihre Bedeutung wird in Abb. 8 erläutert. Auf der Abszisse sind Klassen des Quotienten von „individuellen“ Schwankungshöhen, S , durch die mittlere Schwankungshöhe \bar{S} , also von „normierten“ Schwankungshöhen, aufgetragen. Die Ordinate gibt die Häufigkeit 0 bis 100 % wieder.

Die Schwankungshöhen in einem „gaußischen“ Seegang folgen nach M.S. LONGUET-HIGGINS (Lit.4) der „Raleigh“-Verteilung (s. Abb.8). Die Aufsummierung der Häufigkeitswerte, ausgehend von sehr großen $\frac{S}{\bar{S}}$ -Werten in Richtung kleinerer $\frac{S}{\bar{S}}$ ergibt die statistische Summenhäufigkeits-Verteilung nach M.S. LONGUET-HIGGINS (Lit.4). Die Flächen unter beiden Kurven sind gleich 1, wenn $100\% = 1$ in der Ordinate gesetzt wird.

Wir stellen uns zunächst den Fall vor, daß in einem Seegang alle $\frac{S}{\bar{S}}$ -Werte gleich groß sind. Dies gilt z.B. für rein sinusförmige Wellen. $\frac{S}{\bar{S}}$ ist = 1, und alle $\frac{S}{\bar{S}}$ -Werte fallen somit in die Klasse, die den Wert 1 enthält. Die Verteilungskurve ist zu einer senkrechten Linie zusammengedrückt und stellt den Extremfall einer „spitzen“ Verteilungsfunktion dar. Die Summenverteilung ist treppenförmig; sie springt an der Stelle 1 von 0 auf 100 %. - Kommen allen Klassen von $\frac{S}{\bar{S}}$ (bis zu einer größten Klasse) gleich viele Wellen zu, so erhält man eine blockförmige „Kurven“-Form, bei deren Aufsummierung sich eine geneigte Gerade ergibt. Sie beginnt auf der Abszisse beim Wert +2 und erreicht die Ordinate durch $\frac{S}{\bar{S}} = 0$ definitionsgemäß bei 1 bzw. 100 %.

Dreht man die Abb. 8 um 90° nach rechts, so daß die %-Achse zur Abszisse wird, so entspricht die Summenhäufigkeitsverteilung, die der Raleigh-Verteilung zugeordnet ist, der charakteristischen Kurve, die sich für einen „gaußischen“ Seegang mit schmalen Spektrum nach LONGUET-HIGGINS ergibt. Abweichungen von der Raleigh-Verteilung in Richtung einer „spitzeren“ Verteilung (stärkere Konzentration der $\frac{S}{\bar{S}}$ -Werte auf eine bestimmte Größe) bewirken einen mehr stufenförmigen Verlauf der charakteristischen Kurve mit flacher Neigung im Mittelteil. Weicht die Wellenverteilung von der Raleigh-Funktion in Richtung der Gleichverteilung über alle $\frac{S}{\bar{S}}$ -Klassen ab (blockförmige Verteilung), so nähert sich die charakteristische Kurve mehr einer Geraden mit entsprechend steilerem Verlauf im Kurven-Mittelteil.

b. Ermittlung des Energiespektrums
.....

Für alle Vergleichsmessungen wurde das (eindimensionale) Energiespektrum des Seegangs mittels Autokorrelations-Analyse bestimmt. Die notwendigen umfangreichen Rechnungen sind größtenteils auf dem elektronischen Schnellrechner IBM 650 des Instituts für Angewandte Mathematik der Universität Hamburg durchgeführt worden. Auf eine Erläuterung des Verfahrens kann verzichtet werden, da sich gegenüber der Beschreibung in Lit. 9 Abschn. D 3b nichts Wesentliches geändert hat.

Ein Teil der Spektren wurde auf der neuen Rechenanlage TR4 des gleichen Instituts berechnet, nachdem im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes die benötigten Rechenprogramme in ALGOL geschrieben worden waren.

D. Vergleichsmessungen am Leuchtturm Mellum Plate

Mit dem im Jahre 1958 geänderten Seegangs-Beschleunigungsschreiber wurde im Rahmen des Forschungsprojektes, über das hier berichtet wird, eine Reihe von Vergleichsmessungen am Leuchtturm Mellum Plate vorgenommen. Von ihnen waren fünf für eine weitere Bearbeitung geeignet. Die folgende Aufstellung enthält die Daten dieser Messungen und Angaben über die zur Meßzeit jeweils herrschenden Wetterverhältnisse.

Datum	W i n d			Temperatur		Bemerkungen
	Richtung	geschätzte Bft-Stärke	gemessen ⁺⁾ Knoten	Luft °C	Wasser °C	
17.3.1959	105°	5	24-25			Wind etwas böig
28.5.1960	310°	3	11	11,0	11,3	
29.5.1960	360°	5	20	10,5	11,5	
4.12.1960	240°	8-9		10,0	8,1	Wind gegen Ende der Messung 260° 6-7 Bft +)
3.11.1961	315°	8	46	10,0	11,5	

+) mit Hand-Anemometer 5-6 m oberhalb oberster Plattform des Turms (etwa 35 m Höhe).

Die direkte („objektive“) Messung des Seegangs erfolgte in jedem Falle mittels kinematographischer Aufnahmen (F-Registrierung).

1. Darstellung der Meßergebnisse

a) 4. Dezember 1960

An der Vergleichsregistrierung vom 4.12.1960 werden nicht nur die Spektralbetrachtungen, sondern auch alle Auswertungen nach sichtbaren Wellen ausführlich gebracht. Diese Messung wird daher gesondert behandelt.

Zunächst werden die Ergebnisse der Auswertung nach sichtbaren Wellen wiedergegeben. Die Abbn. 9, 10, 11 und 12 enthalten reduzierte relative Häufigkeitsverteilungen ψ^* (siehe auch S. 32) der Extremwertordinaten \bar{a} , und zwar getrennt nach Minima und Maxima, der Null-Durchgangs-Schwankungshöhen S und der Null-Durchgangs-Schwankungsperioden \bar{T} (verdoppelte Halbperioden) sowie die charakteristischen Kurven für die F-Registrierung und für die mit unterschiedlichen Integrationsfiltern erhaltenen Bi-Registrierungen.

Scharfe Filter (RC klein) bewirken bei den Extremwert-Ordinaten (Abb.9) und bei den Schwankungshöhen (Abb.10) erwartungsgemäß eine Raffung der Häufigkeiten um einen „zentral“ gelegenen Wert, während weiche Filter (in Abb.9) eine Verbreiterung der Verteilung, in Abb. 10 eine Verschiebung in Richtung größerer Werte von S , hervorrufen. Zu scharfe Filter ergeben sehr starke Verfälschungen.

In Abb. 11 ist die Betonung längerer Perioden bei Gebrauch von weichen Filtern verständlich; jedoch überrascht die Abweichung von den aus der F-Registrierung gewonnenen Häufigkeiten. Auffällig sind die geringen Häufigkeitswerte für alle Bi-Registrierungen bei $\bar{T} = 2$ bis 3 sec.

Die charakteristischen Kurven (vgl. Lit.9) für die Messung vom 4.12.1960 (Abb. 12) verlaufen für Bi - entsprechend den spitzeren Verteilungen in Abb. 10 - flacher als für F.

Mit den Abbn. 13 bis 17 sind die „reduzierten“ (auf Klassenbreite 1 gebrachten) zweidimensionalen Häufigkeitsverteilungen ψ der Null-Durchgangs-Schwankungen als Funktion der Schwankungshöhe S und der Schwankungsperiode (verdoppelte Halbperiode) \bar{T} für die F- und für die mit verschiedenen Integrationsfiltern erhaltenen Bi-Registrierungen dargestellt.

Daß in Abb. 17 im Maximumbereich sehr viel kleinere Häufigkeitswerte auftreten als in den übrigen Abbildungen, hat seinen Grund darin, daß die Verteilung bei Hinzurechnung der hier nicht eingezeichneten sehr kleinen Werte eine wesentlich größere Fläche umfaßt.

Ein überschläglicher Vergleich zeigt, daß keine der Bi-Verteilungen das zweite Maximum enthält, das die F-Registrierung ergibt. Das Hauptmaximum ist in allen Bi-Registrierungen in Richtung geringerer Schwankungshöhen und kleinerer Perioden gegenüber F verschoben. Beim Gebrauch des weichen Filters $RC = 2,2$ erhält man bei Bi eine von F stark abweichende Verteilung. Die relativ besten Ergebnisse liefern mittlere Filterstärken.

Die Beziehung zwischen den zweidimensionalen reduzierten relativen Häufigkeiten aus F- und zugehöriger Bi-Messung ψ bzw. ψ_{Bi} für sichtbare Wellen ist in Lit. 9, S. 71, durch den Quotienten $\frac{\psi_{Bi}}{\psi} = \sigma_s$ als „Empfindlichkeit hinsichtlich sichtbarer Wellen“ definiert.

Die Abbn. 18 bis 21 geben diese Größe als zweidimensionale Funktion der Schwankungshöhe S und der Schwankungsperiode \bar{T} für 4 verschiedene Integrationsfilter. Die Berechnung von σ_s zielt auf die Ermittlung einer „Umrechnungsfunktion“, mit deren Hilfe man die Bi-Meßergebnisse auf die wahren Wellengrößen beziehen kann, wenn keine „direkte“ Messung vorliegt.

Das beste Ergebnis wurde mit dem Filter $RC = 1,67$ (Abb.20) erzielt. Dort weichen die σ_s -Werte insgesamt gesehen am wenigsten von 1,0 ab.

Abb. 22 enthält eine Gegenüberstellung der f-spektralen Verteilungen der Energiedichte E_f für die F-Messung und für die vier Bi-Registrierungen. Das scharfe Filter $RC = 0,91$ bewirkt eine äußerst starke Schrumpfung des Spektrums und eine leichte Verschiebung des Hauptgipfels in Richtung größerer Frequenzen; das Nebenmaximum wird aber gut erfaßt. Weiche Filter ergeben eine gute Anpassung für Frequenzen $f > 0,16$; aber im Bereich $f < 0,16$ nimmt E_f wesentlich zu große Werte an. Daß die Beschleunigungsmessung auch im Bereich von $f \sim 0,6$ zu wenig Energie bringt, liegt wahrscheinlich daran, daß der Beschleunigungsmesser die Spitzen der Wellenkämme infolge teilweisen Eintauchens in die Käme und die tiefsten Senken der Täler durch den entgegengesetzten Effekt nicht erfaßt. Das Verhältnis zwischen den mittels F-Messung einerseits und durch die Beschleunigungsmessung andererseits bestimmten spektralen Energiedichten wird im Abschnitt D 2 behandelt werden.

b) Vergleichsmessungen vom 17. März 1959, 28. Mai 1960, 29. Mai 1960
.....
und 3. November 1961
.....

Angaben über die Wetterlage während der Vergleichsmessungen vom 17. März 1959, 28. Mai 1960, 29. Mai 1960 und 3. Nov. 1961 findet man auf S. 37. In allen vier Fällen wurde der Seegang direkt („objektiv“) registriert mittels kinematographischer Aufnahmen. Die gleich-

zeitig gewonnenen Beschleunigungsregistrierungen sind mit Hilfe des Analogrechners mehrmals, und zwar mit Integrationsfiltern jeweils unterschiedlicher Stärke, integriert worden. Wir haben alle Messungen spektral und, mit Ausnahme derjenigen vom 3. November 1961, auch nach sichtbaren Wellen ausgewertet. Die Spektralanalyse wurde auf digitaler Basis nach dem Autokorrelationsverfahren vorgenommen. Bei der Integration der Beschleunigungsregistrierungen vom 3. November 1961 wurde die für die Berechnung des Spektrums benötigte Ordinalfolge (time series) automatisch mit Hilfe einer Digitalisierungsanlage aufgenommen.

Bei der Auswertung nach sichtbaren Wellen wurden die reduzierten relativen Häufigkeiten ψ^*

der Extremwertordinaten \bar{a} ,

der Schwankungshöhen S

und der Schwankungsperioden \bar{T} (verdoppelte Halbperioden)

sowie die zweidimensionalen Häufigkeitsverteilungen nach Art der Abbn. 13 bis 17 für die F-Registrierungen und alle Bi-Registrierungen berechnet und graphisch dargestellt.

Auf die Wiedergabe dieser Darstellungen, die sehr aufwendig sein würde, wird hier verzichtet, weil das Schwergewicht dieses Berichtes auf der Untersuchung der Seegangsspektren liegt. Unterlassen wurde für diese Vergleichsmessungen auch eine systematische Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den F- und den verschiedenen Bi-Registrierungen, soweit es sich um Häufigkeiten der sichtbaren Wellen handelt, denn das bisher vorliegende Material ist zu spärlich, als daß aus diesen unter sich recht unterschiedlichen Resultaten endgültige quantitative Schlüsse über die Eigenarten der Beschleunigungsmessung hinsichtlich sichtbarer Wellen gezogen werden könnten. Es ist deshalb auch darauf verzichtet worden, „Umrechnungskurven“ („Eichkurven“) zur Korrektur der Bi-Verteilungen für sichtbare Wellen zu berechnen.

Die Ergebnisse der spektralen Auswertung werden in den Abbn. 23 bis 26 gebracht. F-Spektren und die mit verschiedenen Integrationsfiltern erhaltenen Bi-Spektren werden einander gegenübergestellt. Fast überall im gesamten oberen und mittleren Frequenzbereich erhält man bei der F-Messung größere Energiedichten als mit der Beschleunigungsmessung. Dies Resultat entspricht der Erwartung. Im langwelligen (nieder-frequenten) Teil des Spektrums tritt die bekannte Überhöhung der Bi-Werte auf, die man durch passende Filter einzuschränken versucht. Sie ist eine Folge davon, daß die gemessenen Beschleunigungsgrößen in diesem Spektralbereich z.T. kleiner als das seegangsfremde „Weiße Rauschen“ sind und die Störungen durch die doppelte Integration gleichfalls stark vergrößert werden.

Die relativ beste Anpassung an die direkte Messung (F) erreicht man mit verhältnismäßig weichen Integrationsfiltern. Der Abfall des Spektrums an der niederfrequenten Flanke ist trotz der Überhöhung in diesem Band in der Regel mit ausreichender Sicherheit zu erkennen. Schon Filter mittlerer Stärke (z.B. Messung vom 29. Mai 1960, Abb. 25) können eine so bedeutsame Schwächung der Energiedichte im niederfrequenten Bereich bewirken, daß die Form des Spektrums übermäßig stark abgewandelt wird.

Bei der Messung vom 3. Nov. 1961 tritt auch bei dem bisher benutzten weichsten Filter mit $RC = 2,2$ am langwelligen Ende ein steiler Abfall auf, ohne daß sich ein zweites (irreales) Maximum im Bereich noch niedrigerer Frequenzen zeigt. Es wurden daher Versuche mit sehr weichen Filtern ($RC = 2,5$; $RC = 3,3$; $RC = 5,0$) gemacht. Mit ihnen erhält man zwar stark erhöhte E_f -Werte im niederfrequenten Bereich, aber es ist ganz unmöglich, die „Lage“ der langwelligen Flanke des Spektrums zu bestimmen.

Eine im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens durchgeführte Untersuchung, bei der die Wirkung der bei der Integration angewendeten Filter auf die Form des Spektrums durch nachträgliche Rechnung wieder eliminiert wurde, ergab, daß in diesem Fall das Auftreten eines Maximums und des Abfalls zum langwelligen Ende hin nicht reell gemessen, sondern nur durch die Filterung erzwungen wurde. Wendet man keine Filterung an, so ist das Maximum der Spektralkurve lediglich durch eine kleine Unregelmäßigkeit im Kurvenverlauf angedeutet; im übrigen steigt die Kurve nach langen Perioden zu ständig an.

Diese Erscheinung, die bei der Auswertung der Registrierungen vom 3. Nov. 1961 erstmalig beobachtet wurde und einen gewissen Rückschritt hinsichtlich der Meßgenauigkeit bedeutet, kann möglicherweise dadurch erklärt werden, daß in diesem Falle der Anteil kurzweilliger Energie im Seegang besonders hoch war. Auf diese Weise dürften außergewöhnlich starke Neigungsschwankungen des in der wellenbewegten Meeresoberfläche treibenden Meßgerätes aufgetreten sein, die entsprechend starke Störeffekte hervorgerufen haben.

Das F-Spektrum zeigt im hochfrequenten Bereich einheitlich wesentlich höhere Werte der Energiedichte als die entsprechenden Bi-Spektren.

Hauptursache dafür ist wahrscheinlich der bereits erwähnte Umstand, daß der Seegangs-Beschleunigungsschreiber kurze Wellen nicht voll erfaßt. Andererseits sind geringe Ungenauigkeiten bei der Auswertung des 16 mm-Kinofilms nicht ganz auszuschließen. Für die großen Unterschiede von F und allen Bi am 17. März 1959 (Abb.23) haben wir keine Erklärung finden können. Möglicherweise

hat Gischt brechender Wellen die Auswertung der kinematographischen Aufnahmen beeinflußt.

Die Folgerungen, die aus der Gegenüberstellung der F- und der Bi-Spektren gezogen werden können, sind im nächsten Abschnitt behandelt.

2. Umrechnung der aus der Beschleunigungsmessung erhaltenen Auswerte-Ergebnisse auf das „wahre“ Spektrum

Die Messung des Seegangs durch Bestimmung der vertikalen Beschleunigung ist ein „indirektes“ Verfahren, weil die Veränderungen der Meeresoberfläche nur insoweit vollständig und korrekt erfaßt werden, als sie auf das Meßgerät übertragen werden. Selbst wenn die Bewegungen des Gerätes in jeder Weise richtig vermessen und die Auswertung verzerrungsfrei vorgenommen werden kann, erhält man nicht das „originale“ Auf und Ab der Wasseroberfläche an einem gegebenen punktförmigen Ort. Unkorrektheiten treten u.a. im Zusammenhang mit dem Unterschneiden des Gerätes auf spitzen Wellenkämmen, dem Kippen am Wellenhang und infolge der Fesselung auf. Es wurde daher von vornherein erwartet, daß die Meßergebnisse nach ihrer rechnerischen Auswertung auf den wahren Seegang noch „reduziert“ werden mußten. Diesem Zwecke dienten hauptsächlich die Vergleichsmessungen am Leuchtturm Mellum Plate.

Im ersten Bericht über die von diesem Projekt getragenen Forschungsarbeiten (Lit.9) wurden die „direkt“ („objektiv“) gemessenen Spektren mit denen, die durch die Beschleunigungsmessung gewonnen wurden, in Vergleich gebracht, indem man den Quotienten der Energiedichten E_f und $E_f^{(Bi)}$ an vielen Stellen des Energiespektrums bildete. Die Größe $\frac{E_f^{(Bi)}}{E_f}$ = σ wurde dort mit „Empfindlichkeit“ bzw. „Eichfaktor“ oder „Eichfunktion“ bezeichnet. Wir wollen, da es sich nicht um eine eigentliche instrumentelle Eichung handelt, nicht mehr von „Eichung“, sondern vielmehr von „Umrechnung“ sprechen.

Es wurde gezeigt, daß das Auswerte-Ergebnis einer Registrierung stark davon abhängt, welches Integrationsfilter jeweils verwendet wird. Somit ist die Größe σ auch eine Abhängige des Filters.

Es muß hier erwähnt werden, daß die tatsächliche Wirkung des am Analogrechner eingestellten Integrationsfilters RC_0 von der Größe RC abweicht. Bezeichnet man die Vorschubgeschwindigkeit des Meßgerätes mit κ_m und die des photoelektrischen Umsetzers mit κ_s , so ergibt sich für die Größe des effektiven Filters:

$$RC_0 = \frac{\kappa_s}{\kappa_m} RC. \quad (16)$$

Aus diesem Grunde haben wir es nicht mit wenigen Filtern, bei denen RC_0 eine glatte Zahl ist, zu tun, sondern praktisch können sehr viele Werte von RC_0 auftreten.

Die folgende Tabelle enthält die RC-Werte, die bei den von uns durchgeführten Integrationen benutzt wurden, sowie die dazugehörenden RC_0 -Werte. Das Zeichen „N“ deutet an, daß bei der Integration „normale“ Filter verwendet worden sind (s. Abschn. C 1b).

Datum der Vergleichsmessung	RC	RC_0
17. 3.1959	1,2	1,14
	N 1,5	1,43
	1,5	1,43
	2,2	2,10
28. 5.1960	0,5	0,67
	0,83	1,12
	1,43	1,93
	N 1,5	2,02
29. 5.1960	1,2	1,66
	1,5	2,07
	N 1,5	2,07
	2,0	2,76
4.12.1960	0,91	1,22
	1,5	2,01
	1,67	2,24
	2,2	2,95
3.11.1961	1,2	1,27
	1,5	1,59
	2,0	2,12
	2,2	2,34

In Abschnitt C 2b und c wurde die Bestimmung eines „optimalen“ Filters erörtert und festgestellt, daß solche Filter gefunden werden können. Auch diese Filter können alle möglichen Werte innerhalb der Grenzen von ungefähr 1 bis 3 annehmen.

Die Abbn. 27 bis 31 bringen die Empfindlichkeiten σ , wie sie sich für 5 verschiedene Vergleichsmessungen bei Verwendung unterschiedlicher Integrationsfilter ergeben. Diese Kurven sind sämtlich durch Bildung übergreifender Mittel zwischen je 11 benachbarten σ -Werten gebildet worden, um Erscheinungen der Streuung zu beseitigen.

Wir haben alsdann versucht, durch Zusammenfassung der Kurven, die mit einem bestimmten Filter gewonnen wurden, und durch ihre Mittelung „Umrechnungskurven“ zu bestimmen, die für das betreffende

diskrete Filter gültig sein sollten.

Die Umrechnungskurven haben sich in der Praxis nicht bewährt, weil bei den effektiven Filtern RC_0 zu viele Zwischenwerte auftraten.

Es wurde daher eine Tabelle berechnet, die Umrechnungsgrößen für die Eingänge RC_0 -Werte = 0,5; 0,6; ... 3,0 und Frequenzen f = 0,04; 0,06; 0,08; ... 0,90 enthält. Als Unterlage für diese Tabelle sind die geglätteten σ -Kurven Abb. 27-31 benutzt worden. σ wurde in Abhängigkeit von RC_0 (d.h., für konstantes f) nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen. Dabei wurde eine lineare Beziehung zwischen σ und RC_0 angenommen. Die erhaltenen ausgeglichenen σ -Werte wurden sodann in Abhängigkeit von f betrachtet und nochmals subjektiv ausgeglichen.

Wie bereits in Abschnitt C 2b erwähnt, ergab sich die Notwendigkeit, für die Durchführung der Spektralanalysen auf der neuen Rechenanlage TR4 des Instituts für Angewandte Mathematik der Universität Hamburg auch die Rechenprogramme neu zu schreiben. Damit wurde es möglich, die Umrechnung der Bi-Spektren in die programmierte Rechnung einzubeziehen. Es erschien jedoch in hohem Maße unwirtschaftlich, zu Beginn jeder Analysenrechnung die 1144 Werte der Umrechnungstabelle in die Maschine einzugeben. Statt dessen haben wir eine mathematische Beziehung zwischen σ , RC_0 und f abgeleitet, mit deren Hilfe die Maschine die Umrechnungsfaktoren berechnen kann.

Als empirische Ausgangswerte dienten in diesem Falle die ursprünglichen, nicht geglätteten Umrechnungswerte σ , welche sich aus den Vergleichsmessungen ergeben hatten. Zur Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate muß zunächst eine mathematische Formel angegeben werden, durch die sich die ausgeglichene Funktion darstellen lassen soll. Die Konstanten in dieser Formel werden dann mit Hilfe des Ausgleichsverfahrens bestimmt.

Im allgemeinen wird man versuchen, eine solche mathematische Form aus theoretischen Überlegungen heraus zu gewinnen. Die im vorliegenden Falle auf diese Weise erhaltene Formel war jedoch so kompliziert, daß ihre Wahl in Anbetracht der erheblichen Streuung der empirischen Daten nicht gerechtfertigt erschien. Es wurde daher statt dessen die Form eines Polynoms gewählt, für die sich die Ausgleichsrechnung besonders einfach gestaltet.

Hinsichtlich der Variablen RC_0 wurde, wie bereits im Falle der oben beschriebenen Ableitung der Umrechnungstabelle, eine lineare Abhängigkeit gewählt. Der Verlauf der Umrechnungsfunktion σ in Abhängigkeit von f für $RC_0 = \text{const.}$ ist in seinen wesentlichen Zügen

durch frühere Untersuchungen bekannt. Er entspricht etwa den Kurven in Abb. 32. Das Abfallen der Kurven gegen Null im Bereich kleiner Frequenzen wird durch die Wirkung der Integrationsfilter erzwungen. Im Bereich zwischen $f = 0,7$ und $f = 0,9$ besitzen die Kurven einen Wendepunkt. Die genannten Züge im Kurvenverlauf werden durch ein Polynom 3 Grades wiedergegeben, in dem das von f freie Glied gleich Null gesetzt wird. Damit erhält man für die Umrechnungsfunktion die folgende mathematische Form:

$$\sigma = (b_1 + b_2 RC_0) f + (b_3 + b_4 RC_0) f^2 + (b_5 + b_6 RC_0) f^3 \quad (17)$$

Die Formel enthält 6 Konstante b_1, \dots, b_6 , für welche die Ausgleichsrechnung die folgenden Werte ergab:

$$\begin{aligned} b_1 &= + 1,576 \\ b_2 &= + 1,177 \\ b_3 &= - 1,981 \\ b_4 &= - 2,515 \\ b_5 &= + 0,555 \\ b_6 &= + 1,358 \end{aligned}$$

Abb. 32 zeigt die nach Gl. (17) berechneten Umrechnungskurven für bestimmte konstante Werte von RC_0 . Es sei betont, daß der glatte Verlauf der Kurven durch die Ausgleichsrechnung erzwungen wurde und nicht über die sehr starke Streuung der als Grundlage benutzten empirischen Werte hinwegtäuschen darf. Die Kurven zeigen, daß die Empfindlichkeit der „Meßeinheit“ Beschleunigungsmesser-elektronischer Integrator je nach Filterstärke für Perioden zwischen 2 und 3 Sekunden ($f = 0,33$ bis $0,5$) ein Maximum aufweist. Wellen kleinerer Periode folgt der Schwimmkörper nur unvollkommen, die Intensität langer Wellen wird durch die Integrationsfilter geschwächt; diese beiden Effekte bewirken kleine Empfindlichkeiten in den Randbereichen der Abb. 32.

Die Abbn. 33 bis 35 stellen die Umrechnungsfunktion σ in Abhängigkeit von RC_0 dar. Eingetragen wurden empirische Werte von σ , die auf die Frequenzbereiche $0,15 \leq f \leq 0,2$; $0,45 \leq f \leq 0,5$; $0,85 \leq f \leq 0,9$ entfallen. Außerdem wurden die nach Gl. (17) berechneten σ -Kurven eingezeichnet, die sich ergeben, wenn man f konstant setzt, und zwar gleich den Grenzen der genannten Frequenzbereiche. Entsprechend dem linearen Ansatz für σ in Abhängigkeit von RC_0 ergeben sich Geraden. Die Abbildungen vermitteln einen Eindruck der sehr starken Streuung der empirischen Werte. Man erhält zugleich eine Aussage über die

Güte der Approximation insgesamt, und damit über die Zweckmäßigkeit des Ansatzes der Gl. (17).

Für kleine Werte f , d.h. für lange Wellen (Abb.33), deuten die empirischen Werte einen etwas steileren Verlauf der Umrechnungsfunktion σ in Abhängigkeit von RC_0 an, als er durch die Geraden wiedergegeben wird. Für den mittleren und hohen Frequenzbereich (Abbn.34, 35) liegen die Geraden in befriedigender Weise etwa in der Längsachse der Punktwolke.

Der Verlauf der Umrechnungsfunktion nach Gl. (17) ist im Frequenzbereich zwischen $f = 0,15$ und $f = 0,9$ durch die empirischen Unterlagen hinreichend gesichert. Der Kurvenverlauf für $f < 0,15$ muß als Extrapolation angesehen werden. Wie bereits oben erwähnt, wurde dabei angenommen, daß die Integrationsfilter im niederfrequenten Bereich einen Abfall der Kurven gegen Null erzwingen. Die Anwendung der Formel Gl. (17) im Bereich kleiner Frequenzen ist aber nicht in jedem Falle erlaubt. Vielmehr muß vorher von Fall zu Fall entschieden werden, bis zu welcher Grenzfrequenz die Messung im langwelligen Bereich noch zuverlässig ist. Bisher ist es jedoch nicht gelungen, hierfür eindeutige Kriterien zu schaffen. Wie die Abbn. 23-25 zeigen, fällt die sich aus der Beschleunigungsmessung ergebende spektrale Energiedichte $E_f^{(B1)}$ im langwelligen Bereich nach kleinen Frequenzen hin zunächst ab, um dann erneut markant anzusteigen. Wie im Abschnitt D 1b bereits erwähnt, ist ein solcher Anstieg, falls er zu Intensitäten führt, die mit denen des Hauptmaximums vergleichbar sind, stets darauf zurückzuführen, daß das reelle Seegangsspektrum von langwelligen Fehlerstörungen überlagert wird. Bei entsprechenden Untersuchungen stellte sich heraus, daß die oben genannte und gesuchte Grenzfrequenz zuverlässig mit der Stelle identifiziert werden kann, bei welcher der fehlerhafte Anstieg beginnt.

In einzelnen Fällen besonders extremer Seegangsverhältnisse tritt der nicht-reelle Anstieg im langwelligen Bereich überhaupt nicht in Erscheinung, z.B. bei der Vergleichsmessung vom 3.11.1961 (Abb.26). Untersuchungen haben ergeben, daß dann bereits das Hauptmaximum des reellen Spektrums so stark von Fehlerschwankungen überlagert ist, daß es durch die Analyse nicht mehr zuverlässig erfaßbar ist. In solchen Fällen war eine Festlegung des Spektralbereichs, in dem die Messung zuverlässige Ergebnisse liefert, bisher nicht möglich.

Mit Hilfe der Umrechnungsfunktion σ nach Gl. (17) korrigiert man also die sich aus der Beschleunigungsmessung ergebende spektrale

Energiedichte $E_f^{(Bi)}$ mittels $E_f^* = \frac{1}{\sigma} E_f^{(Bi)}$ auf eine Energiedichte E_f^* , von der anzunehmen ist, daß sie dem wahren Wert nahekommt.

E. Gleichzeitige Seegangsmessungen in der Deutschen Bucht

Wesentliche Aufgabe des Forschungsprojektes war es, den Seegang an verschiedenen Stellen der Deutschen Bucht zu messen und dabei die zu vermutenden Unterschiede seiner spektralen Struktur festzustellen. Nach theoretischen Überlegungen ist zu erwarten, daß sich der Seegang bei seinem Einlaufen aus der freien Nordsee in die Deutsche Bucht umwandelt. Zunächst müßten die längeren Wellen-Komponenten „Boden fühlen“ und daher abgeschwächt oder sogar vernichtet werden. Bei ablandigem Wind spielt die Länge der Windbahn (Fetch), d.h., der Abstand von der Küste, eine hervorragende Rolle. Je länger die Windstrecke über See ist, umso stärker werden im Spektrum nach bisherigen Kenntnissen auch relativ langwellige Seegangsanteile vertreten sein.

1. Meßstationen

Der Seegangs-Beschleunigungsschreiber wurde von seinem Konstrukteur für die Messung von Seegangsspektren gebaut. Der Vorschub des Registrierfilms ist entsprechend groß, und der Film ist nach spätestens 40 min durchgelaufen. Es ist nicht möglich, in einem so kleinen und handlichen Gerät Registriermaterial und Energiespeicher für langdauernde Registrierungen unterzubringen. Aus diesem Grunde konnten keine Dauermessungen des Seegangs angestellt werden. Für die spektralen Vergleiche waren ohnehin nicht alle Wetterlagen geeignet. So kam es darauf an, die Meßgeräte in Situationen einzusetzen, bei denen die Unterschiede in der spektralen Struktur der Wellen vermutlich deutlich in Erscheinung treten würden.

Die Meßstationen sollten möglichst auf unterschiedlicher Wassertiefe gelegen sein. Es war erwünscht, daß sie in einer Reihe etwa entlang einer geraden Linie lagen. Sie mußten telefonisch oder über Sprechfunk erreichbar sein, weil ihnen der Zeitpunkt der Messung durchgesprochen werden mußte. Da sich der Meßtermin nach den Windverhältnissen in der Deutschen Bucht richtete, konnte die Entscheidung, ob gemessen werden sollte, erst einen halben bis einen Tag vorher getroffen werden. Die Anweisung zur Messung wurde den Stationen im Mittel etwa 6 Stunden vor dem Meßtermin durchgerufen.

Als geeignete Meßstationen erwiesen sich die deutschen Feuerschiffe „P 12“, „Elbe 1“, „Elbe 2“ und „Elbe 3“. Abb. 36 enthält eine Karte der Deutschen Bucht mit den Positionen dieser Feuerschiffe; eingetragen sind auch einige Linien gleicher Wassertiefe sowie die Wassertiefen bei den 4 genannten Feuerschiffen.

Das Einsetzen der Geräte war freundlicherweise von den Feuerschiffs-Besatzungen übernommen worden. Sie waren in die Handhabung des Seegangs-Beschleunigungsschreibers genau eingewiesen worden.

Zuletzt wurden die Messungen auf Neuwerk erweitert, wo durch den dortigen Leuchtturmwärter ein Gerät im Watt an der NW-Küste der Insel ausgebracht wurde.

Bei der Festlegung der Meßtermine war auf die Gezeiten zu achten. Da der Gezeitenstrom während der Messung möglichst schwach sein sollte, bot sich die Zeit um Niedrig- und Hochwasser als Einsatzzeit an. Das Gerät durfte aber nicht während des Strom-Kennens ausgesetzt sein, weil zu dieser Zeit das Schiff an der Ankerkette schwoit und dann nicht mehr der gewünschte Abstand von 125-150 m zwischen Schiff und Meßgerät sichergestellt ist.

Im allgemeinen war jedes Feuerschiff mit 6 Kassetten ausgerüstet, die je einen Registrierfilm enthielten. Sie wurden nach 6 Messungen zusammen mit den Meßgeräten an das Seewetteramt zurückgeschickt.

Über Schwierigkeiten, die bei der Durchführung der Simultanmessungen auftraten, vergleiche Abschn. A.

2. Meßergebnisse

Zur Darstellung in diesem Bericht haben wir insgesamt 4 Simultan-Messungen aus den Jahren 1960 und 1961 ausgewählt, bei denen jeweils mindestens an 2 Stationen die Messung gelungen war. Bei allen 4 Messungen trat in der Deutschen Bucht Wind aus dem Nordwest-Sektor auf. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über Datum und Zeitpunkt der Messungen, über den mittleren Wind in der Deutschen Bucht zum Zeitpunkt der Messungen sowie über die Stationen, deren Messungen zu auswertbaren Registrierungen geführt haben.

lfd. Nr.	Datum	Zeitpunkt des Beginns der Messung	Windrichtung	Windstärke (Bft)	Meßstationen
1	22.4.1960	14 ⁰⁰	WNW-NW	6-7	Elbe 2 Elbe 3
2	10.6.1960	18 ⁰⁰	NW	3	Elbe 2 Elbe 3
3	19.7.1961	15 ⁰⁰	WNW	5	Elbe 1 Elbe 3 Neuwerk
4	29.7.1961	10 ⁰⁰	WNW	4-5	P 12 Elbe 2 Elbe 3

Zunächst sei über die Wetterlagen zu den Zeitpunkten der 4 Messungen berichtet.

20. April 1960:

Das Wetter über der Nordsee wird durch tiefen Druck über dem Nordmeer und ein kräftiges Hoch westlich der Britischen Inseln bestimmt. Ein Randtief zieht von Island in Richtung auf Mittelskandinavien. Ein Kaltluftausbruch auf seiner Rückseite erfaßt das südliche Nordmeer und die östliche Nordsee. Etwa ab 21.4. 00 MGZ steht in der Deutschen Bucht Windstärke 5 Bft, zunächst aus NNW, dann langsam rückdrehend. Das Windfeld über der Nordsee reicht von der Deutschen Bucht bis zu den Orkney- und Shetland-Inseln und besitzt somit eine Gesamtlänge von etwa 500 sm; der Fetch genau in Windrichtung ist aber nur etwa 150 sm lang. Man muß jedoch damit rechnen, daß schräg zur Windrichtung laufende Wellenkomponenten auftreten, die eine bedeutend längere Strecke unter Windeinwirkung gewandert sind. Der Kaltluftausbruch erreicht seinen Höhepunkt mit mittlerer Windstärke 6 etwa am 22.4. 11 MGZ, also 3 Stunden vor der Messung.

10. Juni 1960:

Ein schwaches Tiefdruckgebiet über Schottland tritt am 9.6. 00 MGZ auf die nördliche Nordsee über und zieht bis zum 10.6. 18 MGZ langsam bis vor die Südwestküste Norwegens. Ein Windfeld mit überwiegend westlichen Winden breitet sich auf seiner Südseite über die Nordsee ostwärts aus und erreicht am 9.6. 15 MGZ die Deutsche Bucht. Am 10.6. 10 MGZ herrschen von der englischen Küste bis zur Deutschen Bucht überwiegend westliche Winde, Stärke 3-5 Bft (Fetchlänge etwa 300 sm). Daß der Wind an den Meßstationen auf Nordwest gedreht ist, geht vermutlich auf einen überlagernden Seewindeffekt im Bereich der Flußmündungen zurück.

19. Juli 1961:

Die Wetterlage ist bestimmt durch hohen Druck westlich der Britischen Inseln und tiefen Druck über Skandinavien. Über Dänemark entwickelt sich ein Trogtief. In der Deutschen Bucht steht seit dem 18.7. 06 MGZ Wind aus WNW bis NW Stärke 5 Bft. Das Windfeld weitet sich nach Nordwesten aus und reicht am 19.7. 00 MGZ bis zu den Shetlands. Die Fetchlänge beträgt jetzt 500 sm. Die mittlere Windrichtung im Windfeld ist NW, die maximale Windstärke liegt bei 6 Bft, der Wind ist stark böig.

29. Juli 1961:

Ein kräftiges Tief wandert von Südsandinavien in Richtung auf das Nordkap. Seit mehr als 3 Tagen steht über der Nordsee ein Westnordwestwind. Die Länge des Windfeldes beträgt etwa 400 sm. Bis zum 28.7. 00 MGZ treten in den östlichen Teilen des Windfeldes (Länge dieses Bereichs etwa 200 sm) noch Windstärken bis zu 7 Bft auf. Bis zum 29.7. 10 MGZ nimmt der Wind langsam bis auf Stärke 5 Bft ab, er ist jedoch noch stark böig. Die mittlere Windrichtung zum Meßtermin ist NW.

Von jeder Beschleunigungsregistrierung wurden 2 Integrationen mit unterschiedlich starker Filterung durchgeführt. Die Filterstärken wurden empirisch bestimmt, wie in Abschnitt C 1c beschrieben. Zu allen 20 Bi-Registrierungen haben wir die Spektren berechnet. Die Ordinatenfolgen wurden im allgemeinen „von Hand“ abgelesen; lediglich bei der Bi-Registrierung Messung Nr. 4, Station P 12, RC = 2,0 wurde die automatische Digitalisierungsanlage benutzt. Alle Spektren haben wir mit Hilfe von Gl. (17) umgerechnet.

3. Diskussion der Ergebnisse

Abbildungen 37-40 zeigen die erhaltenen Spektralverteilungen. Wie man ganz allgemein feststellt, sind für 2 Integrationen der gleichen Beschleunigungsregistrierung die Unterschiede in den Spektralverteilungen im langwelligen Teil besonders groß. Dies zeigt deutlich die Unsicherheit, die den Seegangs-Beschleunigungsmessungen allgemein und insbesondere der in Abschnitt D 2 beschriebenen Umrechnungsfunktion noch anhaftet. Der Verlauf dieser Funktion wird im langwelligen Spektralbereich, abgesehen von der Filterstärke, überwiegend durch den in Abschnitt B 1 beschriebenen „Kippfehler“ bestimmt. Die Größe dieses Fehlers hängt jedoch nicht nur von der Intensität der langwelligen Seegangskomponenten, sondern vom Gesamtverlauf des Spektrums ab und kann daher von Messung zu Messung verschieden ausfallen.

Vergleicht man die Abb. 37 mit den Abbn. 39, 40, so fällt auf, daß trotz der größeren Windstärke während der Messung Nr. 1 im Frequenzbereich rechts vom spektralen Maximum deutlich geringere Intensitäten auftreten. Wir vermuten, daß diese Unterschiede nicht reell sind, sondern daß infolge der mehrfach durchgeführten Verbesserungen am Meßgerät sich dessen Empfindlichkeit im kurzwelligen Spektralbereich bis zur Durchführung der Messungen Nr. 3 und 4 erhöht hat.

In Abb. 40 weist das Spektrum zu P 12, RC = 2,0, im Frequenzbereich $f > 0,3$ auffallend geringe Intensitäten auf. Nach neueren empirischen Untersuchungen über die Unterschiede zwischen visueller und automatischer Ablesung der Ordinatenfolge könnte diese Erscheinung zum Teil dadurch erklärt werden, daß Störschwingungen, die durch unvermeidbare kleine Ungenauigkeiten bei der Ablesung in die Meßdaten eingehen, bei Anwendung des automatischen Verfahrens relativ schwach ausfallen.

Wie die Erörterungen der beiden vorausgegangenen Absätze zeigen, erscheint es nicht sinnvoll, aus den vorgelegten Meßergebnissen bereits quantitative Schlüsse zu ziehen. Statt dessen sind nach unserer Auffassung bereits auf der Grundlage dieser ersten Meßergebnisse die folgenden wichtigen Aussagen mehr prinzipieller Art möglich:

Beim Einlaufen des Seegangs aus der freien Nordsee in die Flachwassergebiete der Deutschen Bucht nimmt die Intensität der langwelligen Komponenten ab. Dieser Wesenszug ist leicht verständlich und wurde von vornherein erwartet. Überraschenderweise nimmt jedoch zugleich die Intensität in einem bestimmten kurzwelligen Bereich des Spektrums zu. Dieser „Spektrums-Verschiebungs-Effekt“ des auf flaches Wasser auflaufenden Seegangs war bisher nicht allgemein bekannt. Er geht jedoch aus den vorgelegten Ergebnissen aller 4 Messungen so deutlich hervor, daß an seinem Bestehen kein Zweifel sein kann.

Einen besonders extremen Fall dieser Erscheinung zeigt die Abb. 39. Das spektrale Maximum der Messung der Wattstation Neuwerk fällt, verglichen mit den üblichen Spektren, weit in Richtung des kurzwelligen Spektralbereichs heraus. Im Bereich der spektralen Maxima der Messungen Elbe 1 und Elbe 3 treten bei Neuwerk keine wesentlichen Seegangintensitäten mehr auf. Interessanterweise tritt fast exakt bei der Frequenz des spektralen Maximums des Spektrums Neuwerk auch im Spektrum Elbe 3 ein sekundäres Maximum auf. Die Vermutung liegt nahe, daß bestimmten Seegangskomponenten mit Perioden zwischen 2 und 2,5 Sekunden im Bereich der Elbmündung unter den auftretenden Windbedingungen besonders günstige Entwicklungsmöglichkeiten zukommen. - Für den kurzwelligen Bereich $f > 0,5$ liegt das Spektrum der Station Neuwerk unter dem der Station Elbe 3. Dies steht in einem gewissen

Gegensatz zum oben aufgestellten Prinzip der Spektrumsverschiebung. Wir vermuten, daß hier lokale Windunterschiede ins Spiel kommen, welche gerade im kurzwelligen Spektralbereich eine erhebliche Verschiedenheit der spektralen Intensitäten hervorrufen können.

Die in allen Frequenzbereichen sehr gute Übereinstimmung der Spektren der beiden Integrationen der Messung Neuwerk (Abb. 39) lassen vermuten, daß dies Spektrum auch im langwelligen Spektralbereich bis etwa $f = 0,1$ zuverlässig bestimmt werden konnte. Um so bemerkenswerter ist die Tatsache, daß im Bereich der spektralen Maxima in den Messungen von Elbe 1 und Elbe 3 ein sekundäres Maximum nicht einmal angedeutet ist. In diesem Falle scheinen also beim Auflaufen auf das Watt die längeren, aus der freien Nordsee stammenden Seegangskomponenten vollständig vernichtet worden zu sein. Diesen Sachverhalt kann man in Beziehung setzen zu der bereits mehrfach aufgestellten Hypothese vom „eigenständigen Watt-Seegang“. Es sei jedoch davor gewarnt, das Ergebnis dieser einen Messung bereits als Stützung dieser Hypothese anzusehen. Wir vermuten, daß in anderen Fällen, besonders bei ausgesprochen schweren Seegangsverhältnissen in der freien Nordsee, der Seegang über dem Watt sich nicht nach solchen einfachen Gesetzen bestimmt, sondern von der freien See her merklich beeinflusst wird. Das Ergebnis der Messung Nr. 3 (Abb. 39) zeigt jedoch mit aller Deutlichkeit, daß ein auf flaches Wasser auflaufender Seegang Umwandlungen erfährt, die für die praktische Bestimmung des Seeganges außerordentlich wichtig sind, die aber heute noch kaum bekannt und in ihren Grundzügen keineswegs verstanden sind.

F. Zusammenfassung und Kommentar zum Gesamtergebnis des Forschungsvorhabens

Unsere Forschungsarbeiten umfaßten innerhalb der gestellten Aufgabe in der Hauptsache drei Teilbereiche. Es sind dies:

1. Entwicklung und Bereitstellung geeigneter Meßinstrumente,
2. Verfahren zur Auswertung der Beschleunigungsregistrierungen,
3. Gleichzeitige Seegangsmessungen in der Deutschen Bucht an Stellen mit unterschiedlicher Wassertiefe.

1. Meßinstrumente

Da die Messungen des Seegangs nicht auf ausgesprochene Flachwassergebiete beschränkt bleiben und zumindest teilweise in Wassertiefen von mehr als 30 m ausgeführt werden sollten, kam bei

den zur Verfügung stehenden Mitteln praktisch nur eine auf der Beschleunigungsmessung beruhende Meßmethode in Betracht. Es wurde erkannt, daß die Aufzeichnung (Registrierart) so erfolgen muß, daß die Integration maschinell bzw. elektronisch vorgenommen werden kann. Der daraufhin entwickelte neue „Seegang-Beschleunigungsschreiber mit photographischer Registrierung“ ist auch so konstruiert, daß Beschleunigungen parallel zur Grundplatte von der Aufzeichnung absolut ausgeschlossen sind. Die Vergleichs-Seegangsmessungen zwischen unseren Beschleunigungsschreibern und einem kinematographischen Verfahren sowie anderen „direkten“ Meßmethoden an einem eigens für die Zwecke dieses Forschungsvorhabens errichteten Meßpfehl am Leuchtturm Mellum Plate (Außenjade) stellen unseres Wissens die erstmalige Prüfung von Beschleunigungsmessern im natürlichen Seegang dar. Die Gegenüberstellung der Meßergebnisse zeigte, daß infolge der zeitweise geneigten Lage des treibenden Beschleunigungsschreibers an den Wellenhängen der langwellige Teil des Seegangsspektrums mit diesen Geräten nur unvollkommen erfaßt werden kann. Wir fanden dies Ergebnis bestätigt durch Arbeiten von M.J. TUCKER (Lit.7) auf theoretischer Grundlage. Es ist daher dringend ratsam, für eine Stabilisierung der Meßeinrichtungen von Seegang-Beschleunigungsschreibern zu sorgen.*

Unseres Erachtens ist die Messung des Seegangs auf tiefem Wasser mit treibenden Beschleunigungsgeräten aussichtsreich, wenn auch bei grober See Schwierigkeiten beim Ausbringen und Einholen zu erwarten sind. Andere Methoden, z.B. die Stereo-Photographie der Meeresoberfläche von zwei Flugzeugen aus (Unternehmen SWOP, Lit.1) sind entweder sehr aufwendig oder enthalten untragbare Ungenauigkeiten der Messung.

Andererseits hat sich während der Arbeiten im Rahmen des Projektes immer wieder gezeigt, daß die Messung des Seegangs mit Hilfe der Beschleunigung sehr schwierig ist. Es ist daher dringend ratsam, an Stellen, an denen Pfähle oder feste Bauwerke errichtet werden können, andere, auf direkter Wellenhöhenmessung beruhende Meßmethoden zu verwenden.

* Solche Geräte sind inzwischen in England, Holland und Deutschland gebaut worden. Das deutsche Gerät nach der Konstruktion von A. Lang (Deutscher Wetterdienst - Instrumentenamts Hamburg) ist kreiselstabilisiert.

2. Auswerteverfahren

Die unbedingt notwendige doppelte Integration der Beschleunigungsregistrierungen bereitete anfangs Schwierigkeiten. Sie gelang schließlich in zufriedenstellender Weise mit einem für diesen Zweck beschafften Analogrechner. Die Registrierung muß zuvor mit Hilfe eines besonders entwickelten licht-elektrischen Umsetzers in eine „analoge“ elektrische Spannungsfunktion verwandelt werden. Die Genauigkeitsverluste bei diesem Integrationsverfahren halten sich in erträglichen Grenzen. - Gewisse Schwierigkeiten bereitete die Frage, welche Filter im Einzelfall zu benutzen sind.

Um die Messungen, z.B. gleichzeitige Messungen an verschiedenen Stellen in der Deutschen Bucht, in einfacher Weise zum Vergleich bringen zu können, mußten die (skalaren) Energiespektren berechnet werden. Dies geschah mit der Autokorrelationsmethode nach J.W. TUKEY (Lit.8), wobei wegen des Umfangs der Rechnungen elektronische Schnellrechner eingesetzt werden mußten.

Die Erfahrungen mit den Methoden zur Integration und zur Spektralanalyse haben gezeigt, daß es dringend ratsam ist, die Meßgrößen nicht vor der zweifachen Integration zu speichern (registrieren); vielmehr sollten die vom Meßkopf ausgegebenen Größen möglichst sofort doppelt integriert werden. Die Speicherung in Form einer Registrierung verursacht Ungenauigkeiten, die im langwelligen Teil des Spektrums bei der zweifachen Integration sehr stark vergrößert werden und die eigentliche Messung überdecken können. - Es ist zwar zweckmäßig, die Funktion der doppelt integrierten Beschleunigung (Kurve der Wasserstandsauslenkung als Abhängige von der Zeit) sofort zu digitalisieren, weil dadurch die Gefahr von weiteren Ungenauigkeiten bzw. überlagernden „Störungen“ stark verringert wird, andererseits besitzt eine Analog-Speicherung (Registrierung) während der Messung den Vorteil, daß alle Registrierungen nachher im Labor digitalisiert werden können und man so mit einer einzigen Digitalisierungs-Anlage auskommt.

Auch die „sichtbaren Wellen“, die durch die zweifach integrierte Registrierung der vertikalen Beschleunigung wiedergegeben werden, lassen sich statistisch behandeln und zusammenfassen. Hierbei können Merkmale des betreffenden Seegangs abgeleitet werden, die für den Vergleich der Wellen z.B. an verschiedenen Orten geeignet sind.

Wir waren uns im klaren darüber, daß die Meßergebnisse mit dem „Seegangs-Beschleunigungsschreiber mit photographischer Registrierung“ mit bestimmten Abweichungen von der Wirklichkeit und daher von direkten Messungen behaftet sein mußten. Sie zu finden, war der hauptsächliche Zweck der Vergleichsmessungen am Leuchtturm Mellum Plate. Es

wurden schließlich Umrechnungsfaktoren ermittelt, mit deren Hilfe die aus Beschleunigungsmessungen bestimmten Spektren korrigiert werden sollten. Die hierbei auftretenden Schwierigkeiten sind nur zum Teil überwunden worden.

Die wesentlichen Ursachen für die Abweichungen, nämlich die zeitweilige nicht-vertikale Lage des Gerätes an den Wellenhängen, überlagernde Ungenauigkeiten usw., wurden ausfindig gemacht und werden bei der Neukonstruktion von Seegangs-Beschleunigungsmessern weitgehend beseitigt.

Wir halten es für unbedingt erforderlich, daß die Meßeigenschaften aller Beschleunigungsschreiber für die Seegangsmessung durch Vergleich mit Methoden der „direkten“ Messung im natürlichen Seegang geprüft werden.

3. Simultane Seegangsmessungen in der Deutschen Bucht

Es waren fünf Meßstationen an Orten mit verschiedener Wassertiefe in der Deutschen Bucht mit Seegangs-Beschleunigungsschreibern ausgerüstet. Sie setzten die Geräte auf Weisung des Seewetteramts gleichzeitig aus. Die Meßtermine wurden so ausgesucht, daß die Windverhältnisse eine interessante Seegangsverteilung in der Deutschen Bucht erwarten ließen. Es traten besonders anfangs häufig Störungen oder Bedienungsfehler auf, so daß in vielen Fällen Vergleichsmöglichkeiten zwischen mehreren Stationen nicht zustande kamen. Wenn - wie in unserer Lage - kein Spezialpersonal eingesetzt werden kann, müssen die Geräte sehr robust und möglichst einfach zu bedienen sein.

Die Messungen haben - wie an vier Simultanmessungen gezeigt wird und wie auch bereits aus visuellen Beobachtungen bekannt war - ergeben, daß sich die energetische Zusammensetzung eines aus der freien Nordsee einlaufenden Seegangs in der Deutschen Bucht stark verändert. Insbesondere hat sich die Erwartung bestätigt, daß dabei im langwelligen Teil des Spektrums die ursprünglich vorhandene Energie in Fortfall kommt. - Die Ableitung quantitativer Folgerungen gestatten unsere Ergebnisse noch nicht.

Unseres Wissens neu ist dagegen die Feststellung, daß beim Einlaufen der Windsee in flacheres Wasser in bestimmten Teilen des Spektrums auf der kurzwelligen Seite des Energiemaximums eine Energiezunahme eintritt. Diese Erkenntnis ist ein wichtiger Schritt auf dem Wege zur vollständigen Erforschung der Vorgänge, die sich beim Einlaufen des Tiefwasser-Seegangs in die Flachsee vollziehen. Möglicherweise wandelt sich beim Ausbränden langer Seegangskomponenten ein Teil der langwelligen Energie in kurzwelligere um, während der andere

Teil anderweitig dissipiert wird und der Wellenbewegung verloren geht. Es ist auch zu bedenken, daß, solange im Seegang lange und entsprechend hohe Wellen vorhanden waren, in ihren Tälern die Ausbildung neuer, kurzer Wellen behindert war und daß dieser „Schutzeffekt“ bei Verschwinden der großen Wellen in Fortfall kommt.

Die Ergebnisse der Simultanmessung vom 19.7.1961 (Abb.39) stützen die von Beobachtern des Seegangs im Wattgebiet aufgestellte Behauptung, im Flachwasser bilde sich ein „eigenständiger“ Seegang aus, der von Wellen im tieferen Wasser unbeeinflusst ist (aber natürlich von der Stärke des herrschenden Windes und von der Wassertiefe abhängt). Dieser Auffassung können wir uns zwar nicht voll anschließen; wir halten es aber für möglich, daß über einem ausgedehnten Gebiet mit geringer, in Wellenlaufrichtung nicht mehr wesentlich abnehmender Wassertiefe schließlich nur sehr schwache Anteile von Wellenbewegungen aus dem tieferen Wasser übrig bleiben. Das Verhalten von langen Wellenkomponenten im seichten Wasser wird sich durch die genaue Beobachtung von Dünungen aus der Nordsee bzw. solchen, die sich bereits im Europäischen Nordmeer gebildet haben, über solchen Seegebieten im Küstenvorfeld feststellen lassen, die sich durch eine geringe, nahezu gleichbleibende Wassertiefe auszeichnen.

Die Erfahrungen aus den Forschungsarbeiten, über die hier berichtet wurde, haben uns gelehrt, welche Wege beschritten werden müssen, um zu quantitativen Ergebnissen in dem vorliegenden Problem zu gelangen. Mit genauer arbeitenden Meßgeräten und Auswerteinrichtungen wird man weitere Einblicke in die Vorgänge bei der Umwandlung des Seegangs beim Einlaufen in die seichten Küstengewässer erhalten. Diese Erkenntnisse werden schließlich dazu führen, daß man in der Lage ist, das Seegangsverhalten an Stellen, an denen nicht gemessen wurde, auf Grund der Bodenkonfiguration und natürlich der meteorologischen Gegebenheiten zu berechnen.

G. Herkunft der Geldmittel und Dank für Unterstützung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes
„Messungen des Seegangs, insbesondere seiner
spektralen Struktur, in der Deutschen Bucht
unter Verwendung gleichzeitig arbeitender
Registriergeräte“

vorgenommen. Die Geldmittel für die Durchführung des Projektes stellte die Bundesrepublik Deutschland aus dem ERP-Sondervermögen in mehreren Abschnitten zur Verfügung. Die Untersuchungen wurden von verschiedenen Stellen des Deutschen Wetterdienstes, und zwar vom Instrumentenamts Hamburg, vom Zentralamt in Offenbach (Main)

und vom Seewetteramt in Hamburg, hier insbesondere von der Holle-
rithgruppe, unterstützt. Maßgebliche Hilfe leistete auch das Wasser-
und Schiffsamtsamt Wilhelmshaven.

Folgenden Damen und Herren, Institutionen und Firmen sei an dieser
Stelle für ihre Hilfe, ihre Mitarbeit oder ihr Entgegenkommen beson-
ders gedankt:

Herr Dr. J. Albrecht, Hamburg

Herr Dipl.-Ing. H. Siems, Köln

Herr Dipl.-Ing. H. Schifferdecker, Köln

Besatzungen des Leuchtturms Mellum Plate

Herr J. Sperling, Neuwerk

Besatzungen der Schiffe „OLDEOOG“ und „LURCH“
(Wasser- und Schiffsamtsamt Wilhelmshaven)

Besatzungen der Feuerschiffe „Elbe 1“, „Elbe 2“,
„Elbe 3“ (WSA Cuxhaven) und „P 12“ (WSA Tönning)

Institut für Angewandte Mathematik der Universität
Hamburg

Bundesverteidigungsministerium im Rahmen des For-
schungsvorhabens „Verfahren für die Berechnung der
Windsee, der Dünung und der Brandung in Nord- und
Ostsee“

Wasser- und Schiffsämter Wilhelmshaven, Cuxhaven
und Tönning

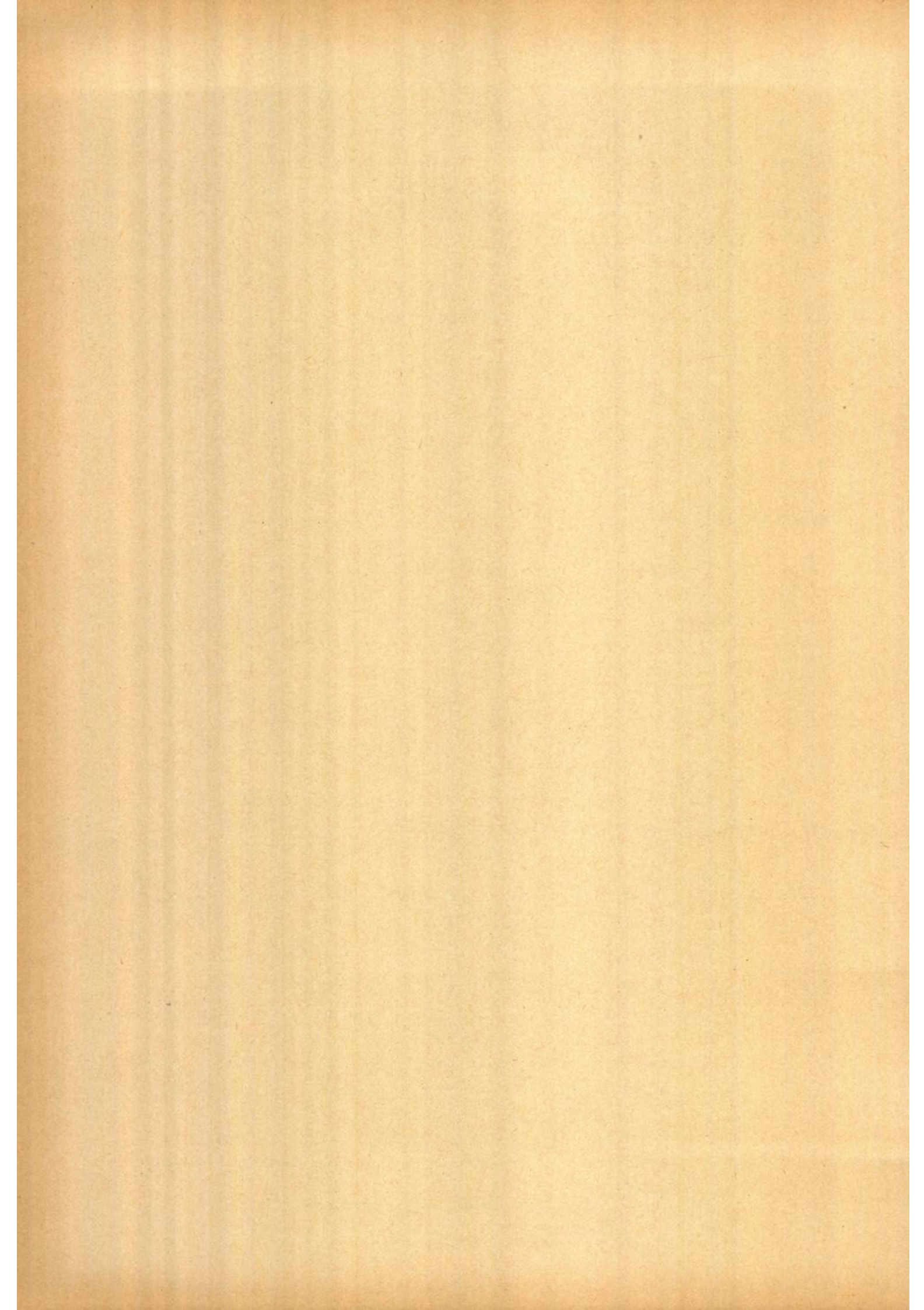
Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg

Fa.: Rohde & Schwarz Vertriebs-GmbH, Zweignieder-
lassungen Hamburg und Köln

Die Reinzeichnungen wurden von Frl. R. Bremer und von Frl. D.-K.
Becker, die Schreibarbeiten von Frau D. Onken ausgeführt.

Literatur

1. Chase, J., L.J. Cote, W. Marks, E. Mehr, W.J. Pierson, jr., F.C. Rönne, G. Stephenson, R.C. Vetter, and R.G. Walden: The directional spectrum of a wind generated sea as determined by the stereo wave observation project. Techn. Rep. Res. Div., Coll. of Eng. New York University, 1957
2. Dorrestein, R.: A wave recorder for use on a ship in the open sea. Proc. Symp. on the behaviour of ships in a seaway. Wageningen, 1957, S. 406-417
3. Lang, A.: Über die Entwicklung von Beschleunigungsschreibern für Seegangsmessungen. Einz. Veröff. DWD-Seewetteramt - Nr. 24 (1960)
4. Longuet-Higgins, M.S.: On the statistical distribution of the heights of sea waves. Journ. of Mar. Res. XI, No. 3, S. 245-266 (1952)
5. Mildner, W.: Anleitung zum praktischen Gebrauch des elektronischen Analogrechners. Rohde & Schwarz GmbH, Köln, 1959
6. Siems, H.: Bericht über die Fourieranalyse mittels Analogrechner. Fa. Rohde & Schwarz Vertriebs GmbH, Köln
7. Tucker, M.J.: The accuracy of wave measurements made with vertical accelerometers. Deep-Sea Res., Vol. 5, 1959
8. Tukey, J.W. und R.W. Hamming: Measuring noise color I. Bell Tel. Labor., Murray Hill, New Jersey 1949
9. Walden, H. und J. Piest Vergleichsmessungen des Seegangs mit verschiedenen Meßgeräten zur Prüfung des Seegangs-Beschleunigungsschreibers mit Film-Ritz-Aufzeichnung und ihre Auswertung. Einzelveröffentl. DWD-Seewetteramt - Nr. 30 (1961)
10. Walden, H.: Die winderzeugten Meereswellen, Teil I. DWD-Seewetteramt - Einzelveröffentlichung Nr. 18 (1958) (Heft 1 + 2)



Abbildungs-Verzeichnis

- Abb.1 „Schwarz-Weiß“-Film-Registrierung
- Abb.2 Linearitätsprobe für das Beschleunigungs-Meßelement mit „magnetischer Feder“
- Abb.3 Analogrechner zur doppelten Integration
- Abb.4 Testversuch im Instrumentenamt Hamburg:
Durchschnittliche Schwankungshöhe \bar{d} als Funktion der „Perioden“-
Klassenmittelwerte \bar{T}_m (F-Registrierung). Beigefügte Zahlen:
Anzahl der Werte pro Klasse
- Abb.5 Testversuch im Instrumentenamt Hamburg:
Differenz der Extremwertordinaten der integrierten Beschleuni-
gungsregistrierungen, \bar{a}_{Bi} , zu denjenigen der F-Registrierung,
 \bar{a}_F , als Funktion der Perioden-Klassenmittelwerte \bar{T}_m bei Anwen-
dung verschiedener Integrations-Regelfilter
- Abb.6 Testversuch im Instrumentenamt Hamburg:
Differenz der Schwankungshöhen der integrierten Beschleunigungs-
registrierungen, \bar{d}_{Bi} , zu denjenigen der F-Registrierung, \bar{d}_F , als
Funktion der Perioden-Klassenmittelwerte \bar{T}_m bei Anwendung ver-
schiedener Integrations-Regelfilter
- Abb.7 Testversuch im Instrumentenamt Hamburg:
Differenz der Schwankungsperioden der integrierten Beschleuni-
gungsregistrierungen, \bar{T}_{Bi} , zu denjenigen der F-Registrierung,
 \bar{T}_F , als Funktion der Perioden-Klassenmittelwerte \bar{T}_m bei An-
wendung verschiedener Integrations-Regelfilter
- Abb.8 Zur Erläuterung der Bedeutung der charakteristischen Kurve
- Abb.9 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, reduzierte
relative Häufigkeitsverteilung ψ^* der Extremwertordinaten \bar{a}
- Abb.10 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, reduzierte
relative Häufigkeitsverteilung ψ^* der Null-Durchgangs-
Schwankungshöhen S
- Abb.11 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, reduzierte
relative Häufigkeitsverteilung ψ^* der Null-Durchgangs-
Schwankungsperioden \bar{T}
- Abb.12 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, charakteri-
stische Kurven

- Abb.13 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
Kamera-Registrierung, zweidimensionale reduzierte relative
Häufigkeitsverteilung ψ der Null-Durchgangs-Schwankungen
als Funktion der Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \bar{T}
- Abb.14 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC = 0,91$;
zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilung
der Null-Durchgangs-Schwankungen als Funktion der Schwankungs-
höhe S und Schwankungsperiode \bar{T}
- Abb.15 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC = 1,5$;
zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilung
der Null-Durchgangs-Schwankungen als Funktion der Schwan-
kungshöhe S und Schwankungsperiode \bar{T}
- Abb.16 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC = 1,67$;
zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilung
der Null-Durchgangs-Schwankungen als Funktion der Schwan-
kungshöhe S und Schwankungsperiode \bar{T}
- Abb.17 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC = 2,2$;
zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilung
der Null-Durchgangs-Schwankungen als Funktion der Schwan-
kungshöhe S und Schwankungsperiode \bar{T}
- Abb.18 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC = 0,91$;
Umrechnungsfunktion für sichtbare Wellen σ_s als Funktion der
Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \bar{T}
- Abb.19 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC = 1,5$;
Umrechnungsfunktion für sichtbare Wellen σ_s als Funktion der
Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \bar{T}
- Abb.20 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC = 1,67$;
Umrechnungsfunktion für sichtbare Wellen σ_s als Funktion der
Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \bar{T}

- Abb.21 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC=2,2$;
Umrechnungsfunktion für sichtbare Wellen σ_s als Funktion der
Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \bar{T}
- Abb.22 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
Spektralverteilungen E_f als Funktion der Frequenz f
- Abb.23 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 17.3.1959,
Spektralverteilungen E_f als Funktion der Frequenz f
- Abb.24 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 28.5.1960,
Spektralverteilungen E_f als Funktion der Frequenz f
- Abb.25 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 29.5.1960,
Spektralverteilungen E_f als Funktion der Frequenz f
- Abb.26 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 3.11.1961,
Spektralverteilungen E_f als Funktion der Frequenz f
- Abb.27 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
spektrale Umrechnungsfunktion σ als Funktion der Frequenz
 f , geglättet durch übergreifende Mittel
- Abb.28 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 17.3.1959,
spektrale Umrechnungsfunktion σ als Funktion der Frequenz
 f , geglättet durch übergreifende Mittel
- Abb.29 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 28.5.1960,
spektrale Umrechnungsfunktion σ als Funktion der Frequenz
 f , geglättet durch übergreifende Mittel
- Abb.30 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 29.5.1960,
spektrale Umrechnungsfunktion σ als Funktion der Frequenz
 f , geglättet durch übergreifende Mittel
- Abb.31 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 3.11.1961,
spektrale Umrechnungsfunktion σ als Funktion der Frequenz
 f , geglättet durch übergreifende Mittel
- Abb.32 Umrechnungsfunktion σ in Abhängigkeit von der Frequenz f
für $RC_0 = 0,7$, $RC_0 = 1,2$, $RC_0 = 2,0$, $RC_0 = 3,0$

- Abb.33 Empirische Umrechnungswerte für den Frequenzbereich $0,15 \leq f \leq 0,20$ sowie Umrechnungsfunktion σ in Abhängigkeit von RC_0 für $f = 0,15$ und $f = 0,20$
- Abb.34 Empirische Umrechnungswerte für den Frequenzbereich $0,45 \leq f \leq 0,50$ sowie Umrechnungsfunktion σ in Abhängigkeit von RC_0 für $f = 0,45$ und $f = 0,50$
- Abb.35 Empirische Umrechnungswerte für den Frequenzbereich $0,85 \leq f \leq 0,90$ sowie Umrechnungsfunktion σ in Abhängigkeit von RC_0 für $f = 0,85$ und $f = 0,90$
- Abb.36 Seekartenausschnitt Deutsche Bucht; Lage der Meßstationen „P 12“, „Elbe 1“, „Elbe 2“, „Elbe 3“, Neuwerk
- Abb.37 Simultanmessung vom 22.4.1960 (Wind WNW 6 Bft), Seegangsspektren von „Elbe 2“ und „Elbe 3“ unter Benutzung verschiedener Integrationsfilter. Frequenz-spektrale Intensitätsdichte E_f als Funktion der Frequenz f
- Abb.38 Simultanmessung vom 10.6.1960 (Wind NW 3 Bft), Seegangsspektren von „Elbe 2“ und „Elbe 3“ unter Benutzung von verschiedenen Integrationsfiltern. Frequenz-spektrale Intensitätsdichte E_f als Funktion der Frequenz f
- Abb.39 Simultanmessung vom 29.7.1961 (Wind WNW 5 Bft), Seegangsspektren von „Elbe 1“, „Elbe 3“ und Neuwerk unter Benutzung verschiedener Integrationsfilter. Frequenz-spektrale Intensitätsdichte E_f als Funktion der Frequenz f
- Abb.40 Simultanmessung vom 2.8.1961 (Wind N 2-3 Bft), Seegangsspektren von „P 12“, „Elbe 2“ und „Elbe 3“ unter Benutzung von verschiedenen Integrationsfiltern. Frequenz-spektrale Intensitätsdichte E_f als Funktion der Frequenz f



Abb.1 Schwarz-Weiß-Film Registrierung

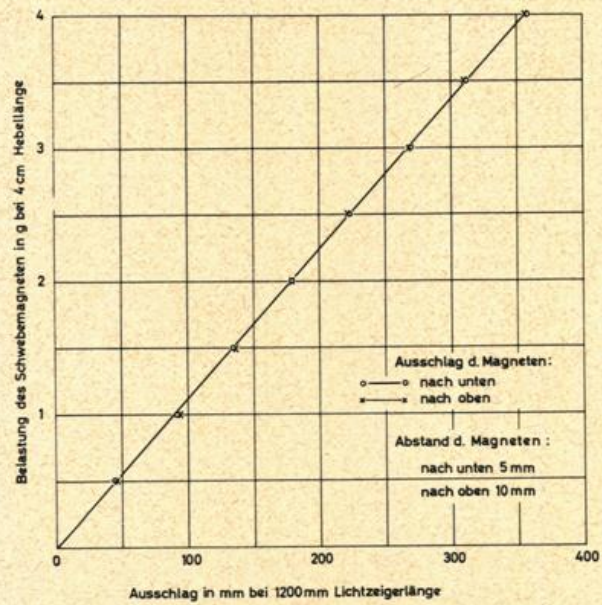


Abb.2 Linearitätsprobe für das Beschleunigungs-Meßelement mit "magnetischer Feder"

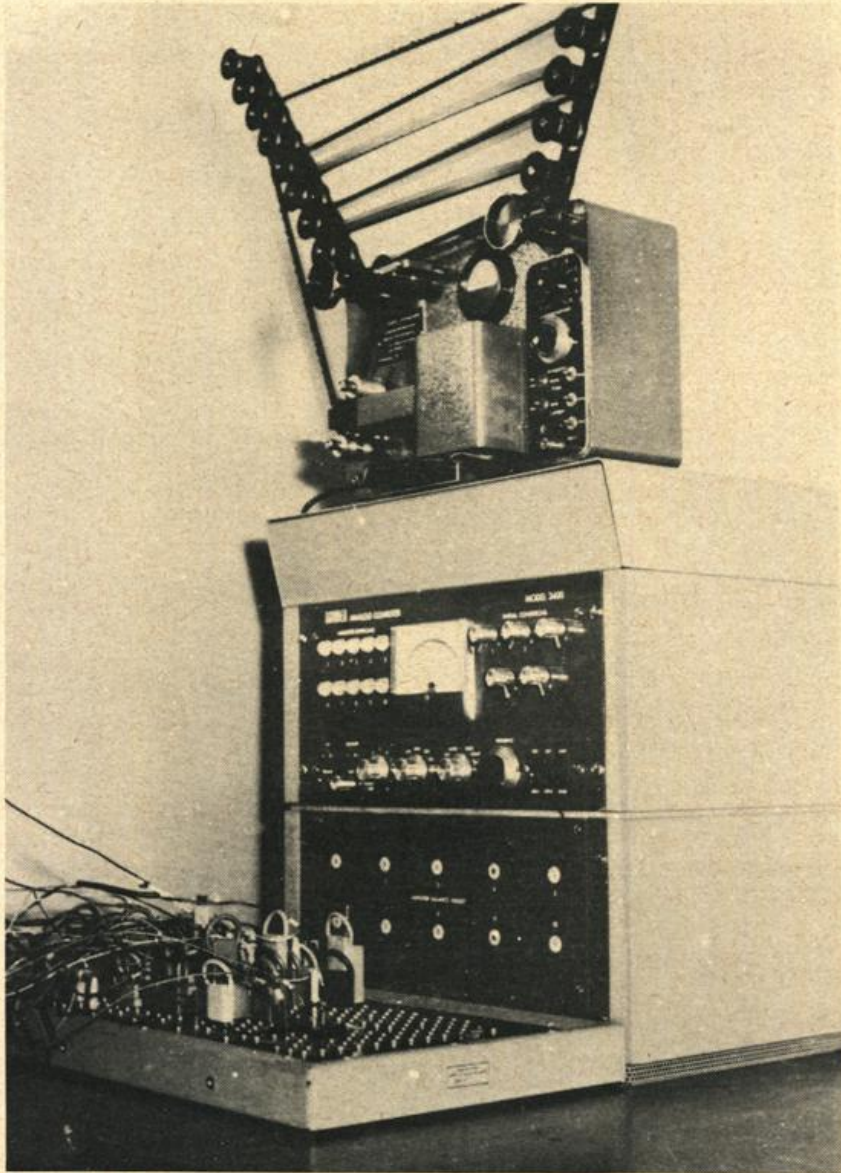
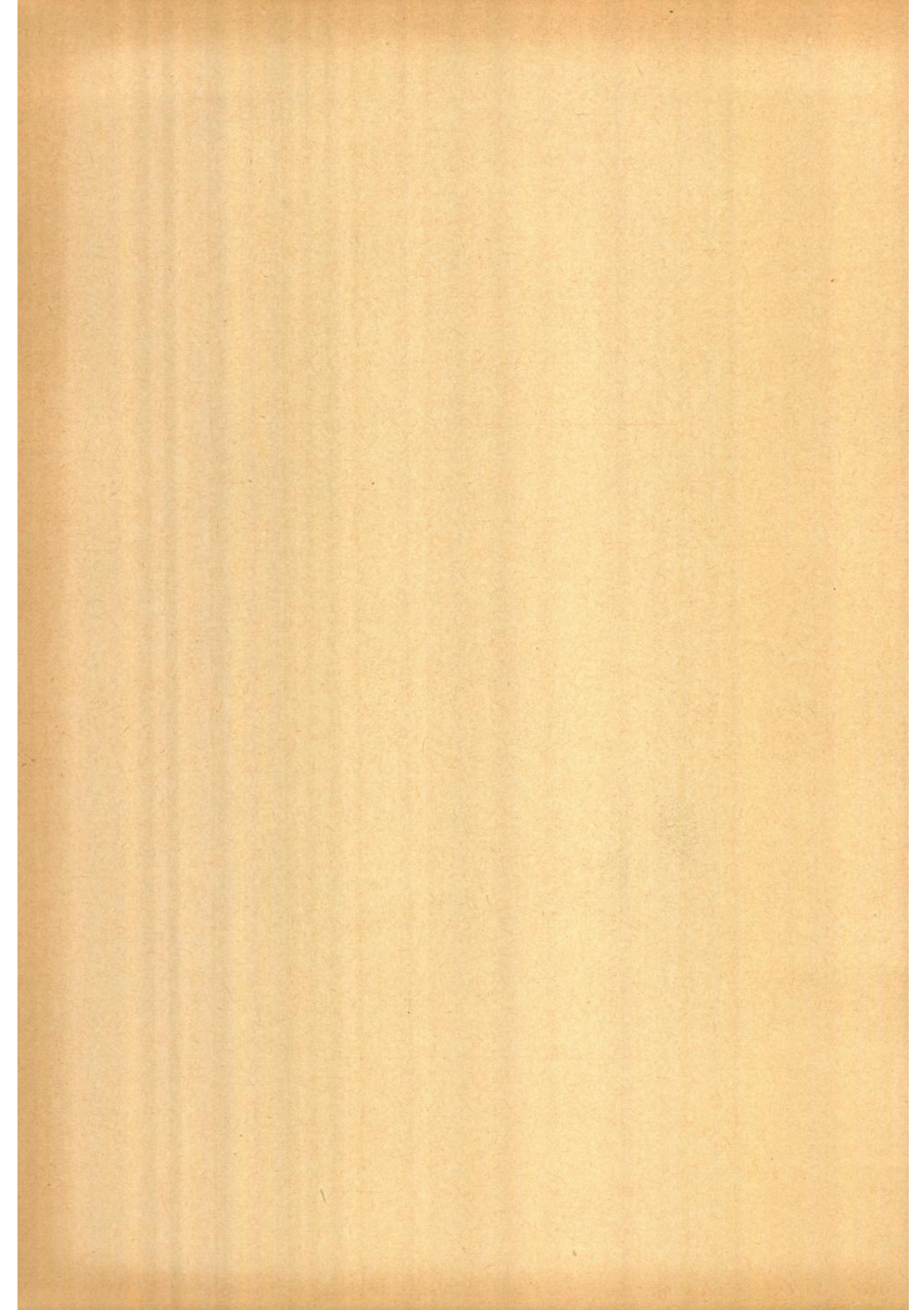


Abb.3 Analogrechner zur doppelten Integration



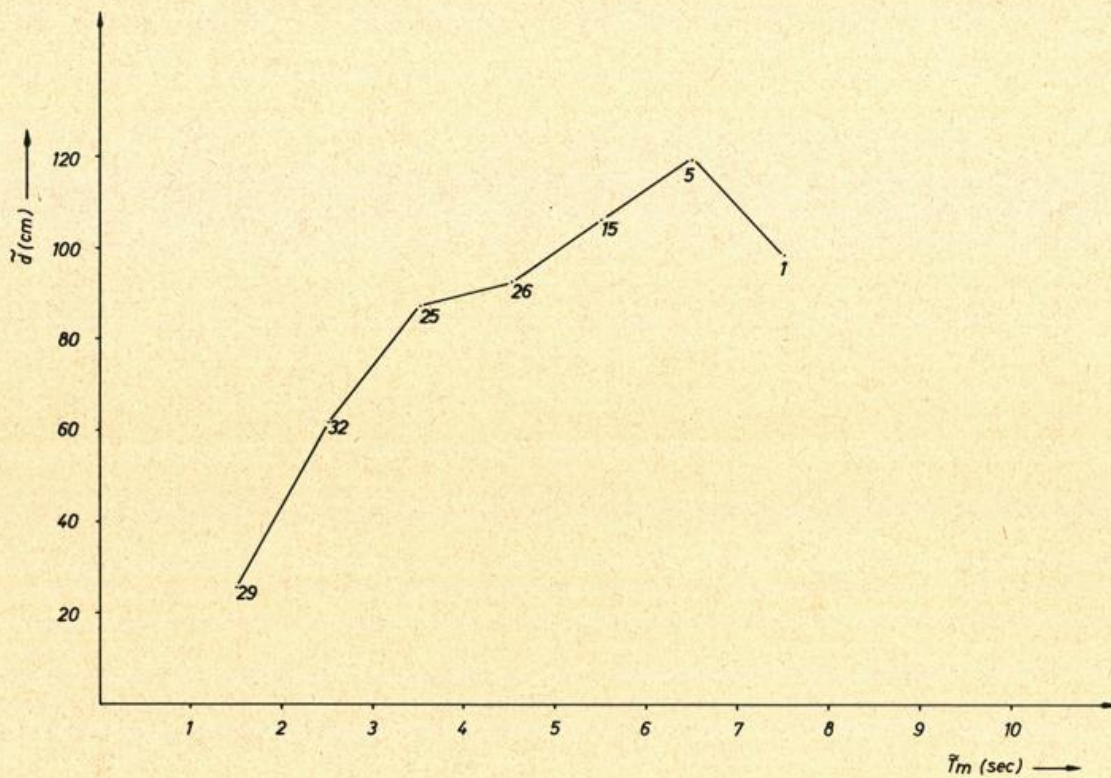


Abb.4 Testversuch im Instrumentenamt Hamburg:
 Durchschnittliche Schwankungshöhe \bar{d} als Funktion der „Perioden“-
 Klassenmittelwerte \bar{T}_m (F-Registrierung). Beigefügte Zahlen:
 Anzahl der Werte pro Klasse

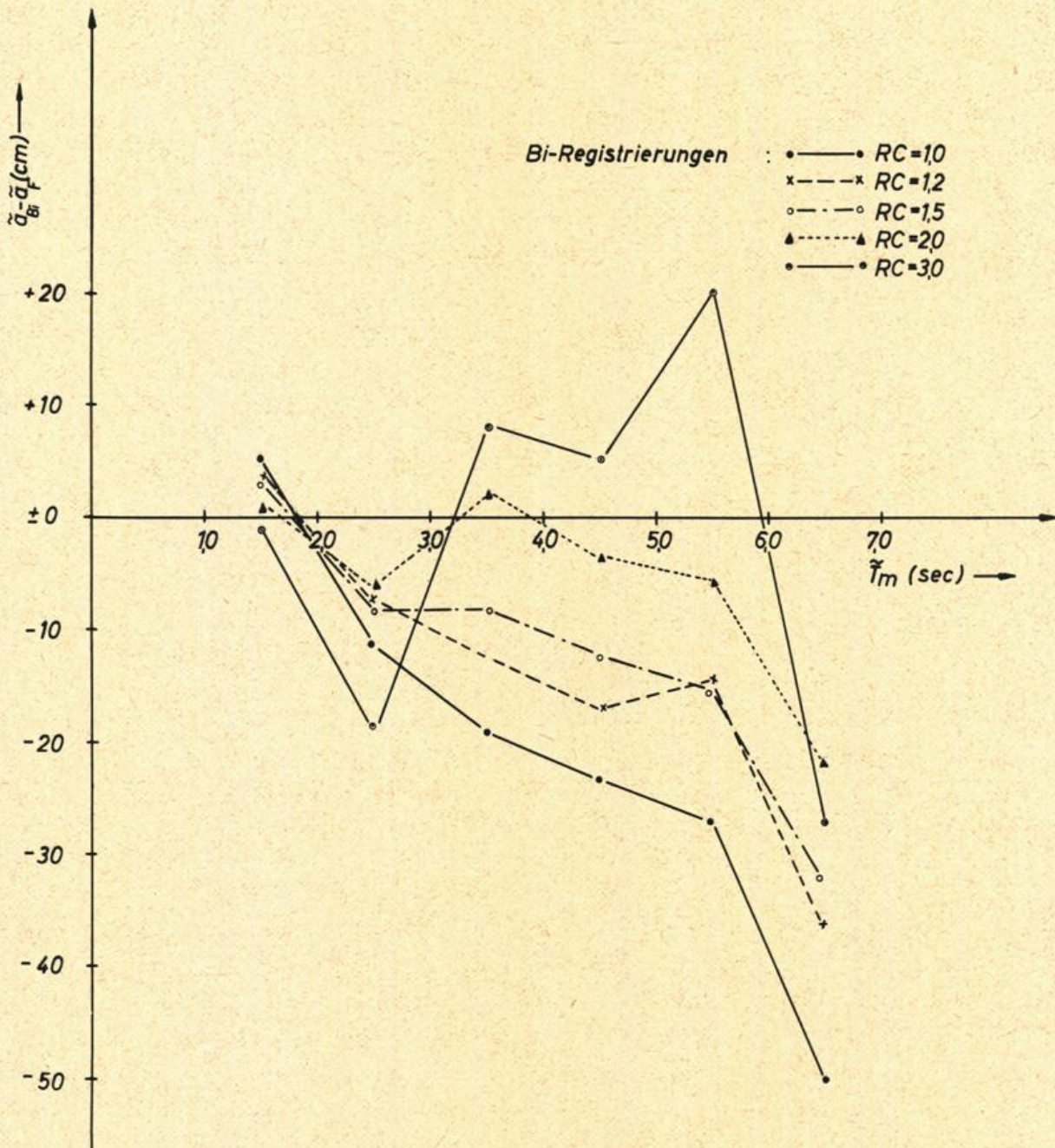


Abb.5 Testversuch im Instrumentenamt Hamburg:
 Differenz der Extremwertordinaten der integrierten
 Beschleunigungsregistrierungen, \tilde{a}_{Bi} , zu denjenigen
 der F-Registrierung, \tilde{a}_F , als Funktion der Perioden-
 Klassenmittelwerte \tilde{T}_m bei Anwendung verschiedener
 Integrations-Regelfilter

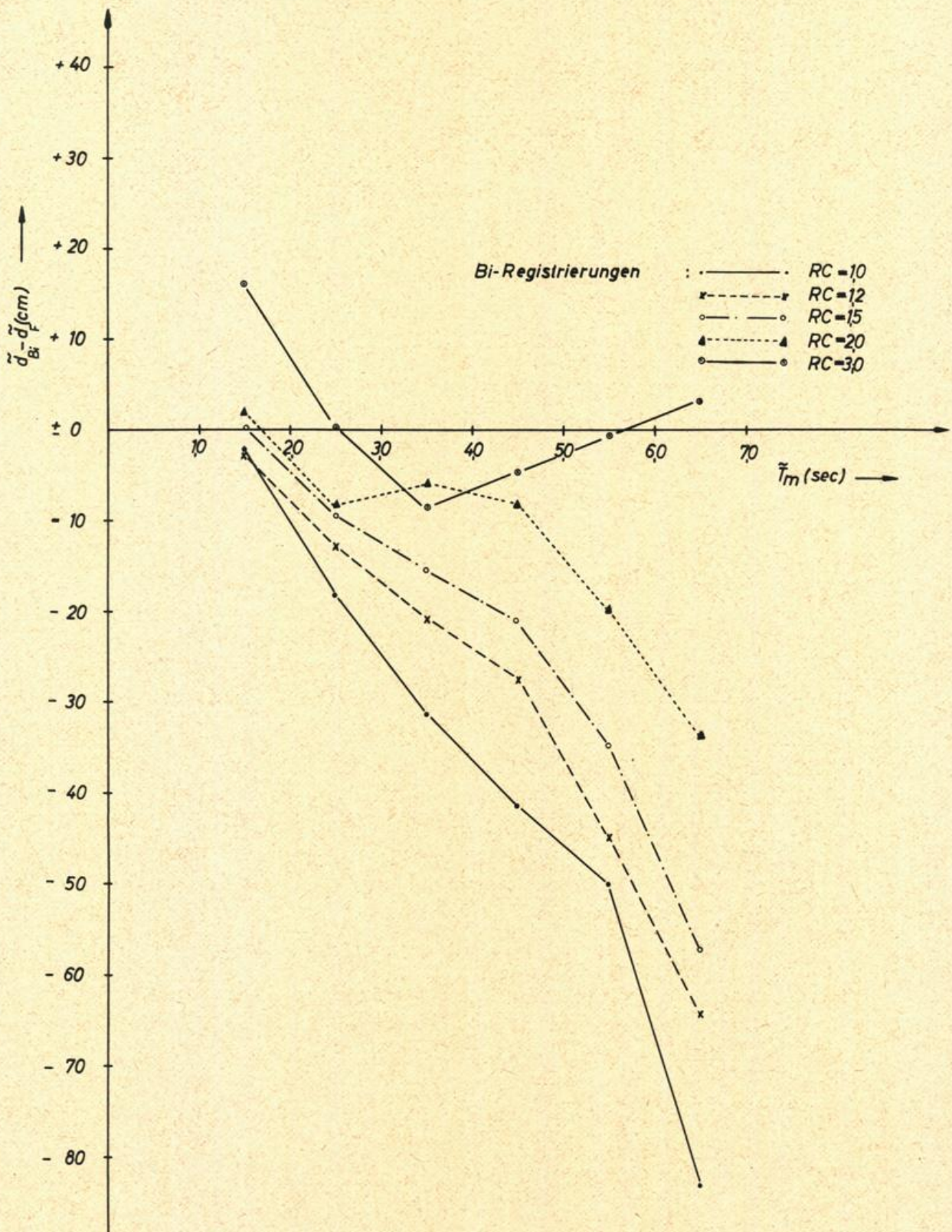


Abb.6 Testversuch im Instrumentenamt Hamburg:
 Differenz der Schwankungshöhen der integrierten
 Beschleunigungsregistrierungen, \tilde{d}_{Bi} , zu denjenigen
 der F-Registrierung, \tilde{d}_F , als Funktion der Perioden-
 Klassenmittelpunkte \tilde{T}_m bei Anwendung verschiedener
 Integrations-Regelfilter

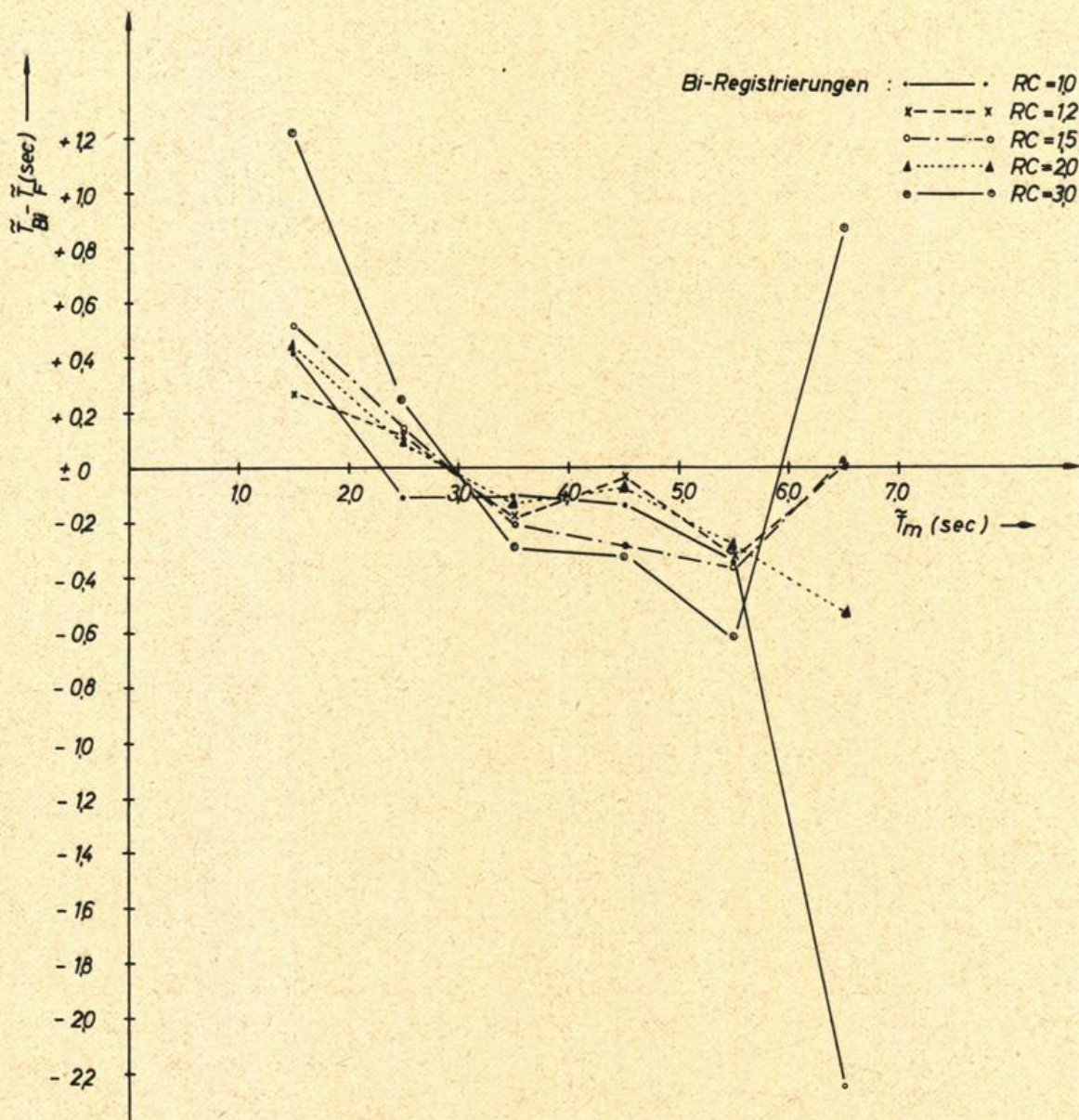


Abb.7 Testversuch im Instrumentenamt Hamburg:
 Differenz der Schwankungsperioden der integrierten
 Beschleunigungsregistrierungen, \bar{T}_{Bi} , zu denjenigen
 der F-Registrierung, \bar{T}_F , als Funktion der Perioden-
 Klassenmittelwerte \bar{T}_m bei Anwendung verschiedener
 Integrations-Regelfilter

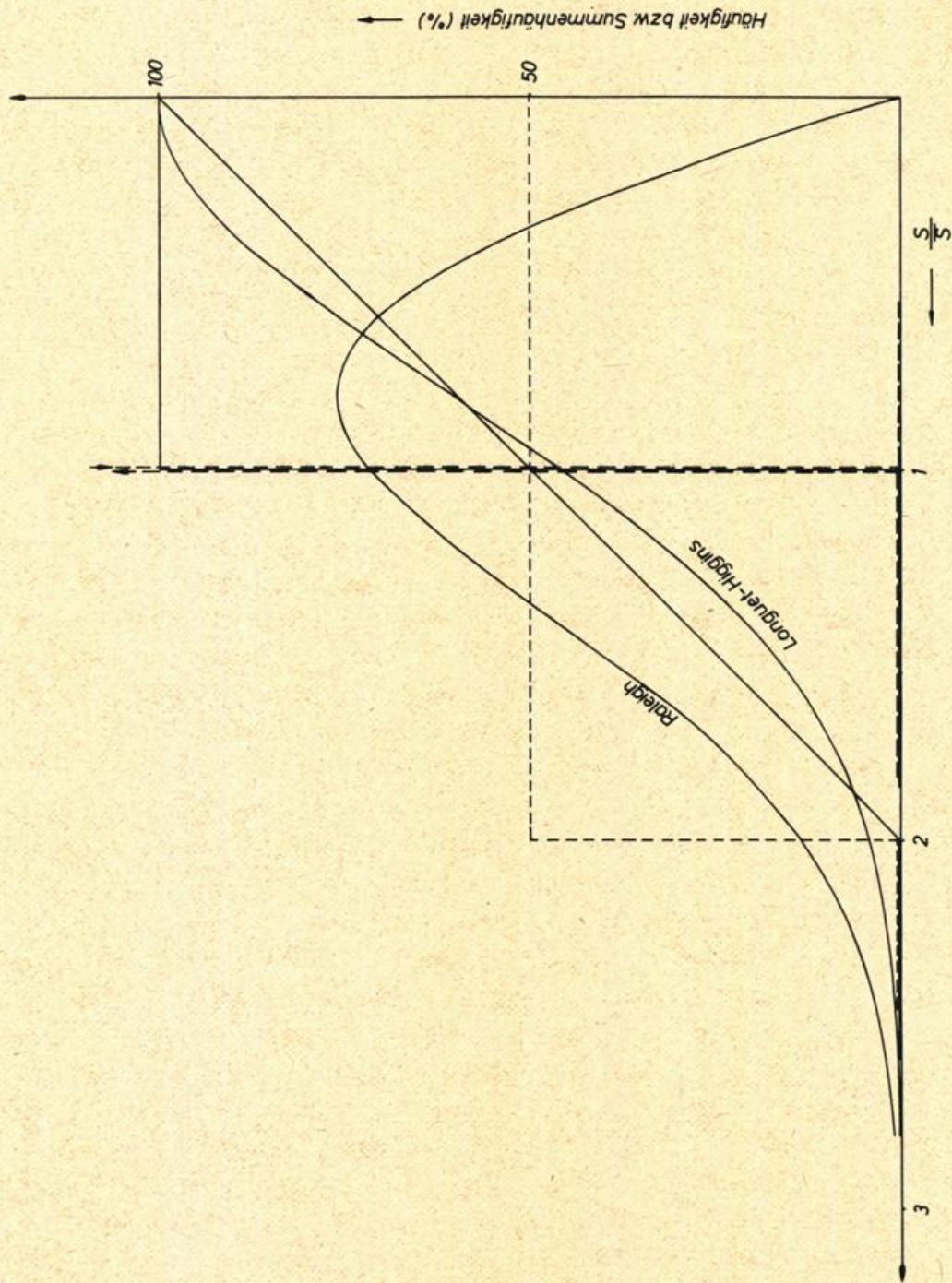


Abb.8 Zur Erläuterung der Bedeutung der charakteristischen Kurve

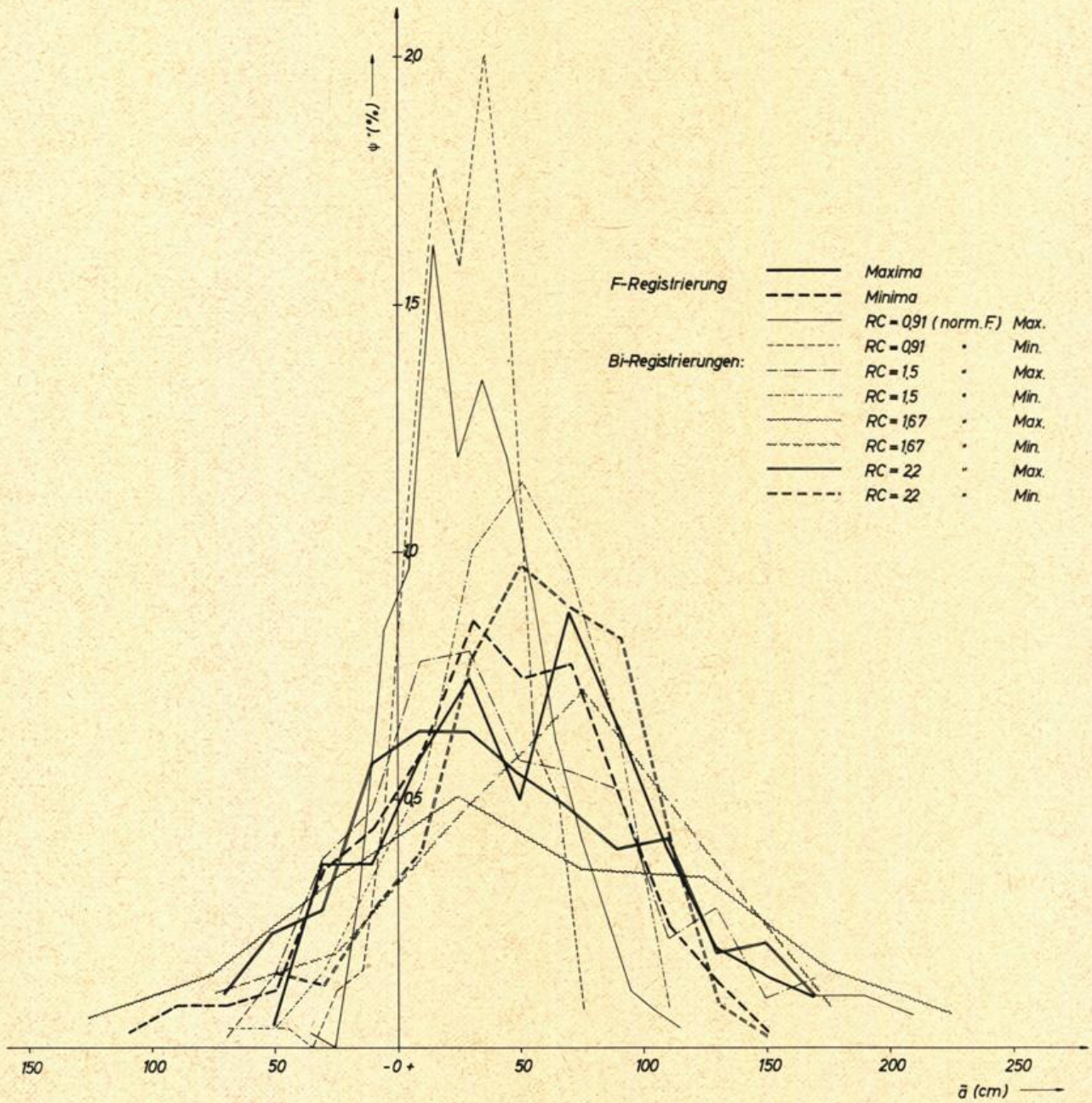


Abb.9 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, reduzierte relative Häufigkeitsverteilung ψ^* der Extremwertordinaten \bar{a}

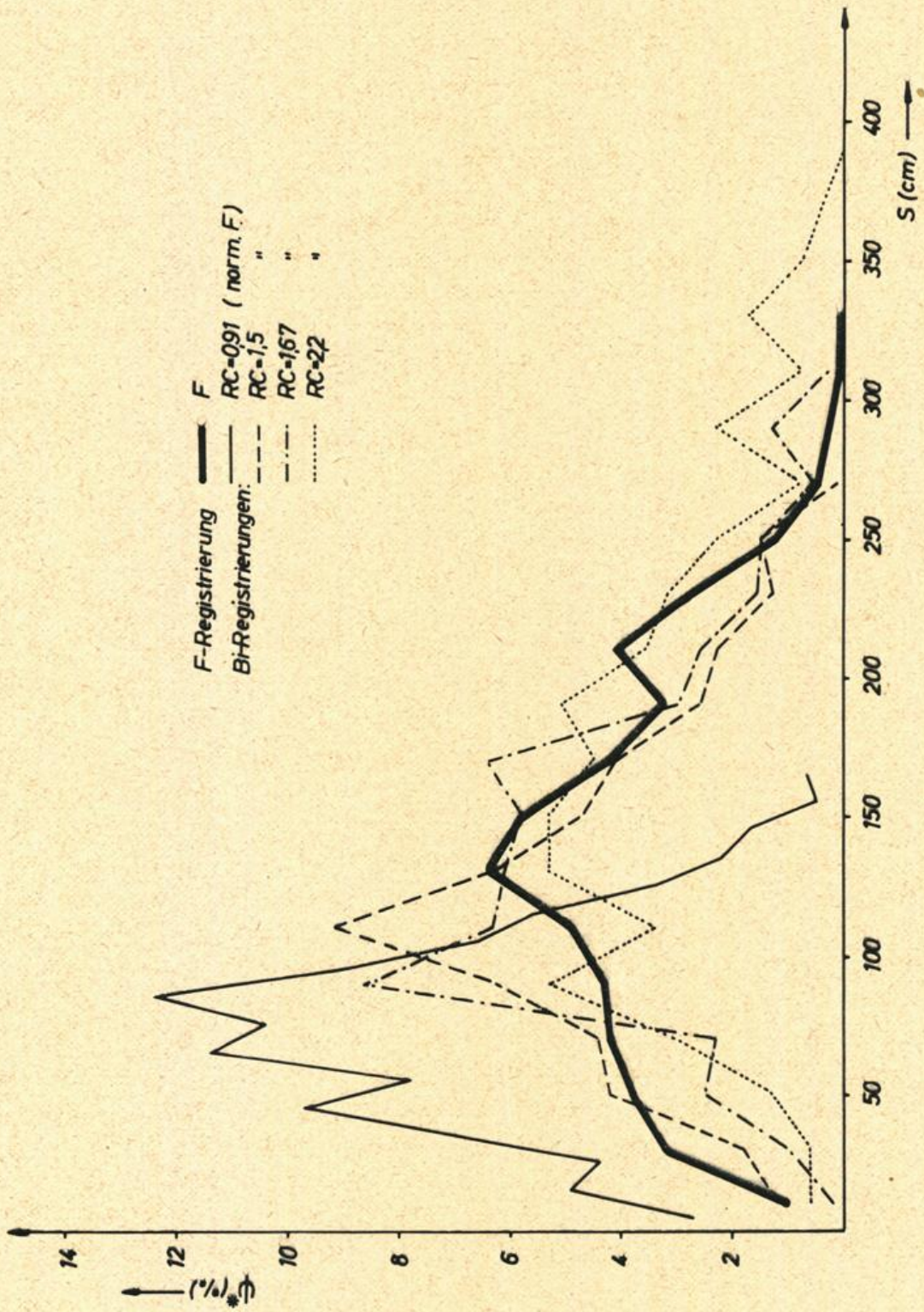


Abb. 10 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, reduzierte relative Häufigkeitsverteilung ψ^* der Null-Durchgangs-Schwankungshöhen S

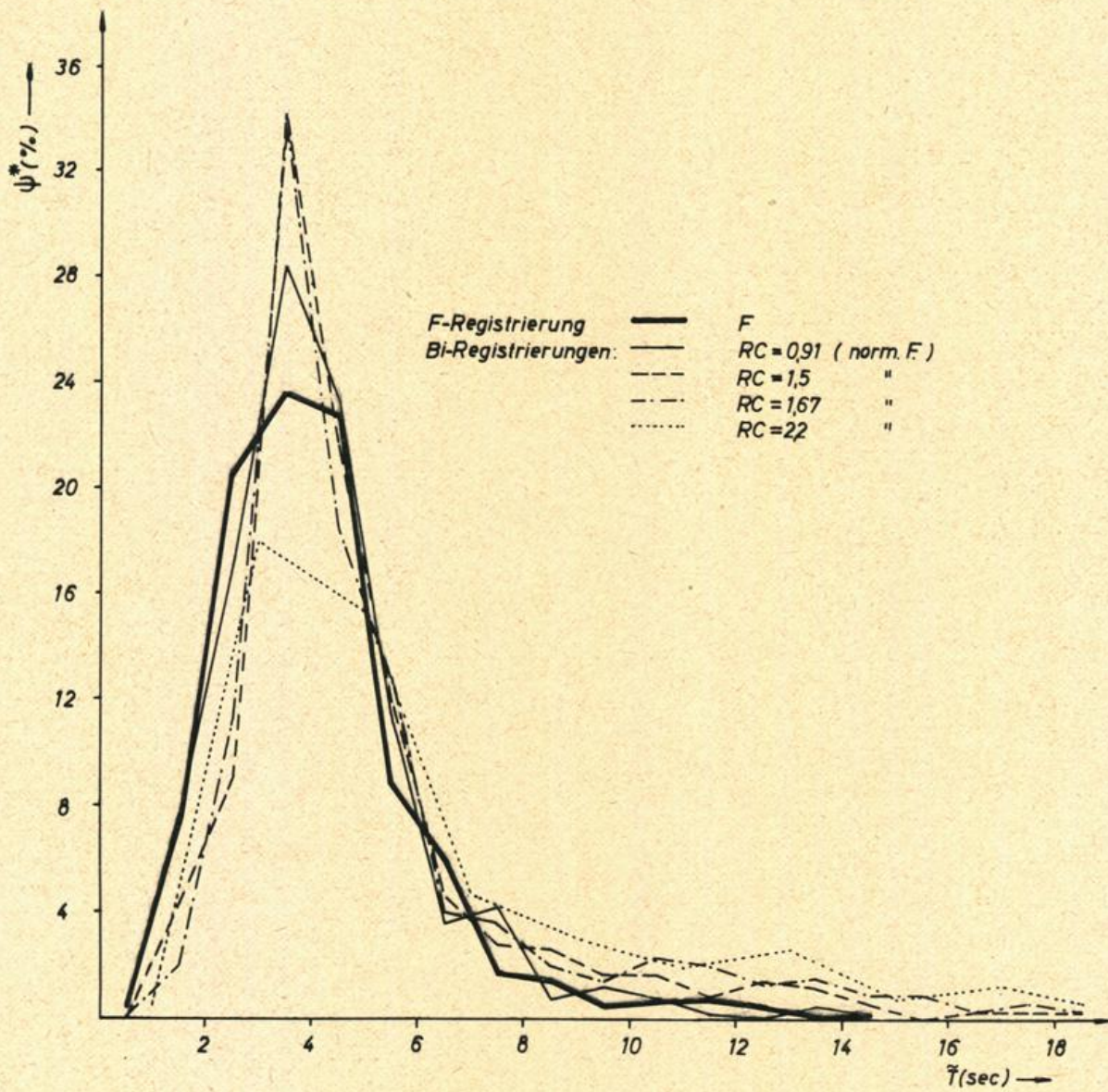


Abb.11 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, reduzierte relative Häufigkeitsverteilung ψ^* der Null-Durchgangs-Schwankungsperioden \bar{T}

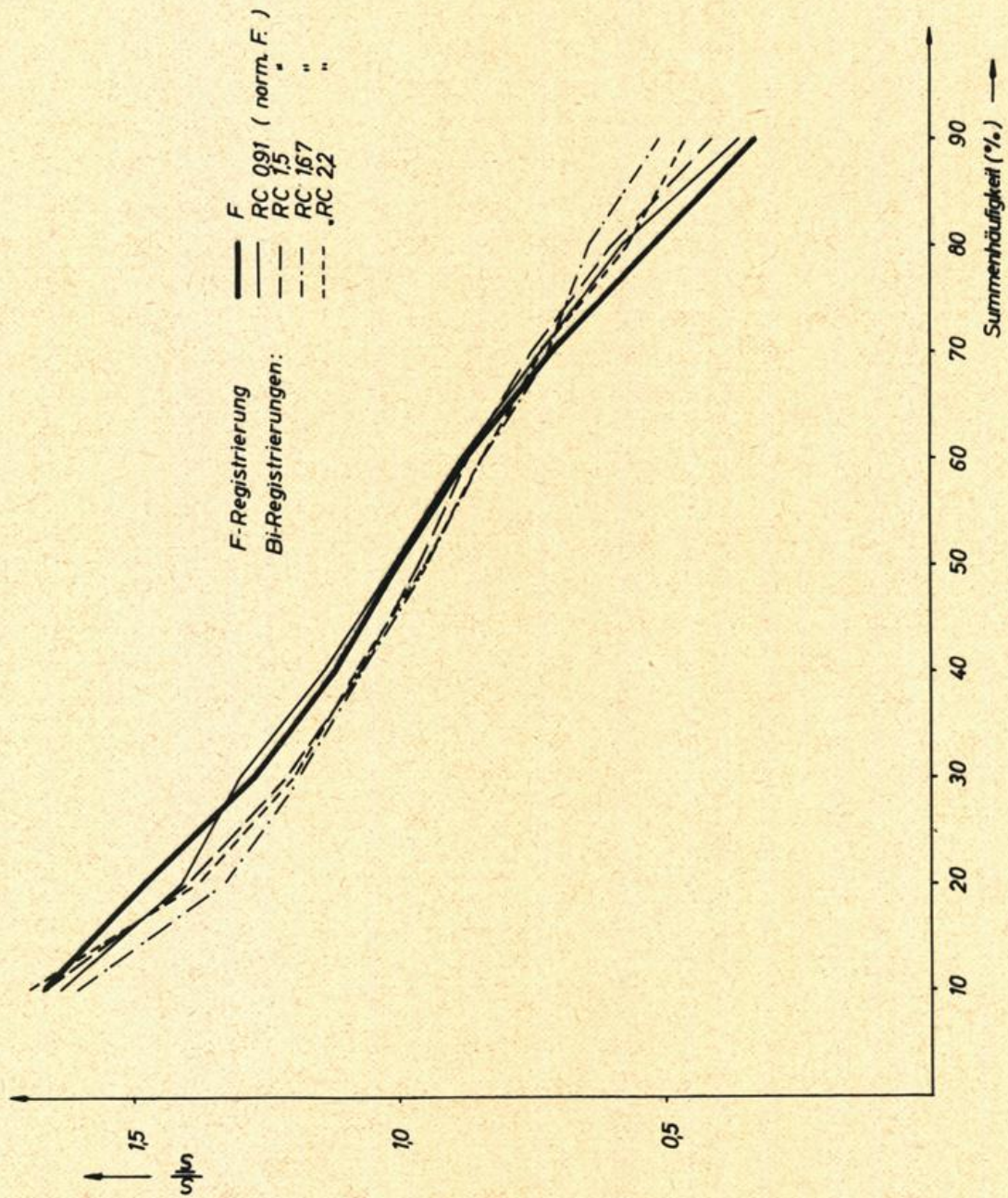


Abb. 12 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
 charakteristische Kurven

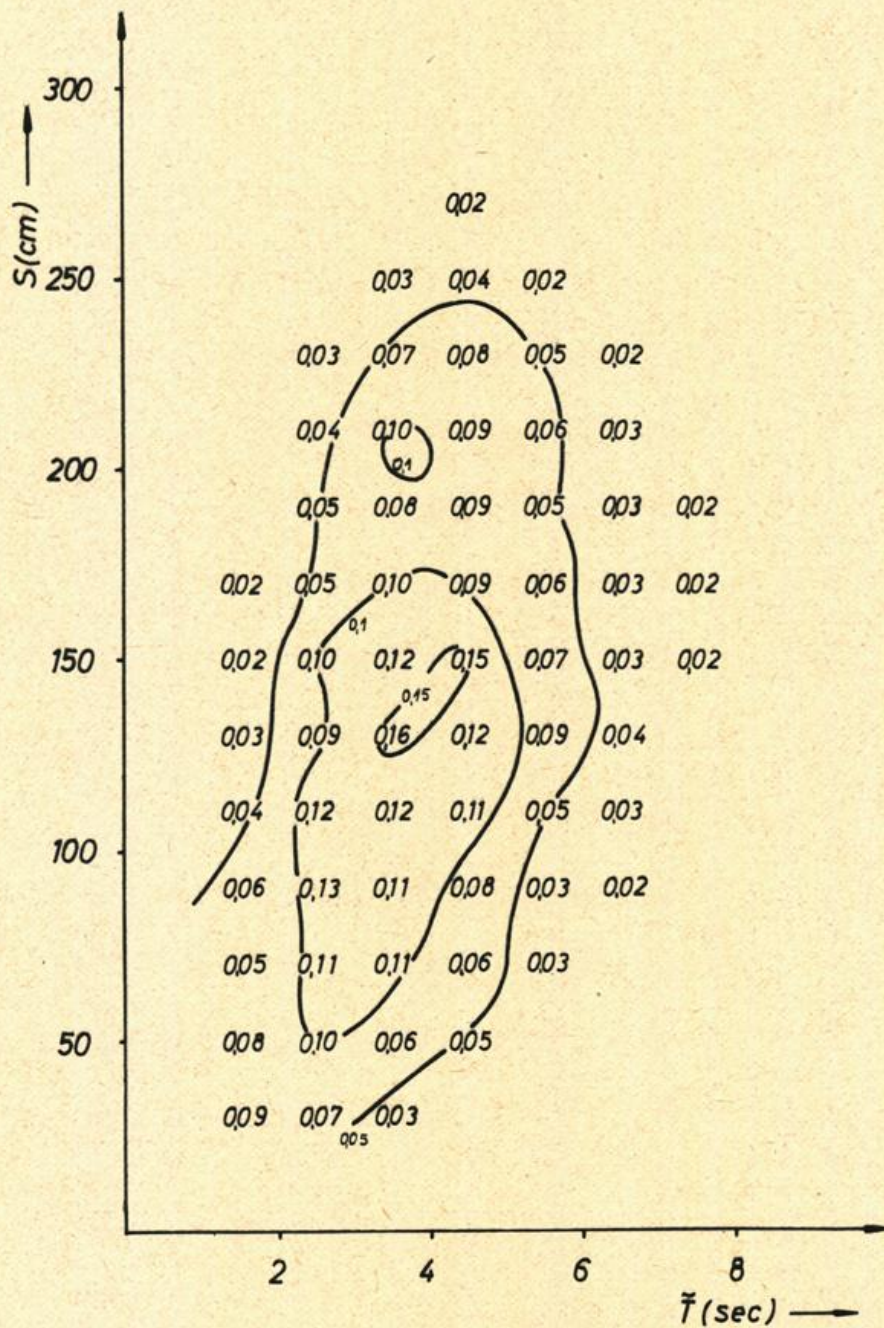


Abb.13 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, Kamera-Registrierung, zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilung ψ der Null-Durchgangs-Schwankungen als Funktion der Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \tilde{T}

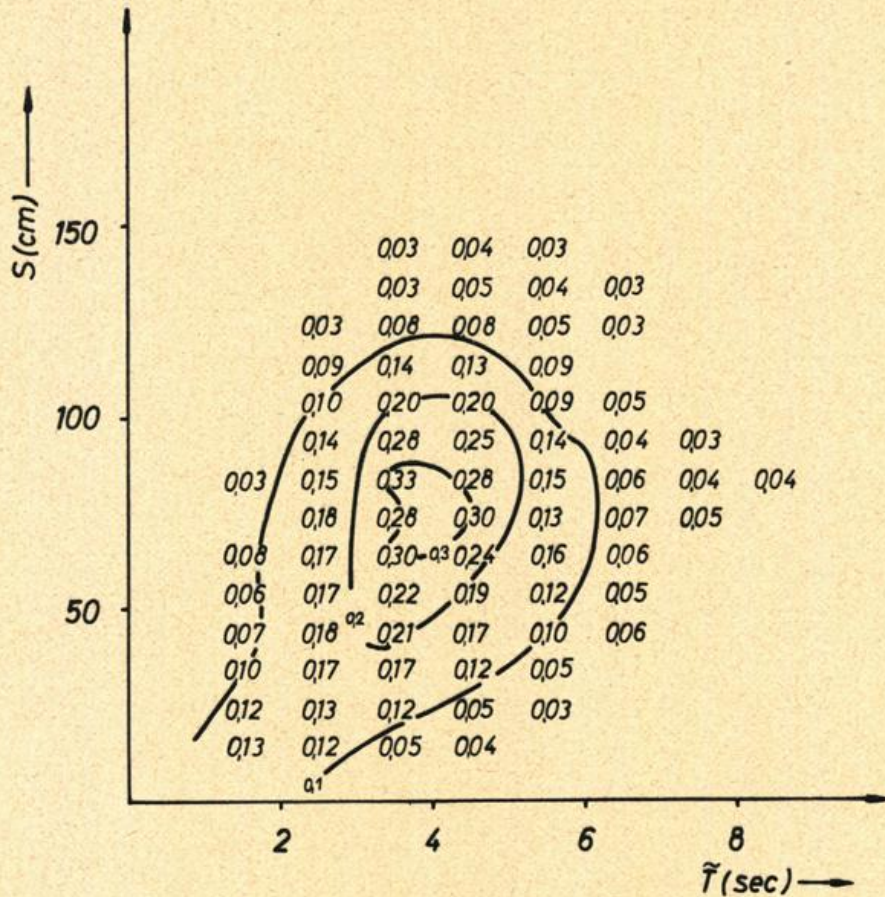


Abb.14 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC=0,91$; zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilung der Null-Durchgangs-Schwankungen als Funktion der Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \tilde{T}

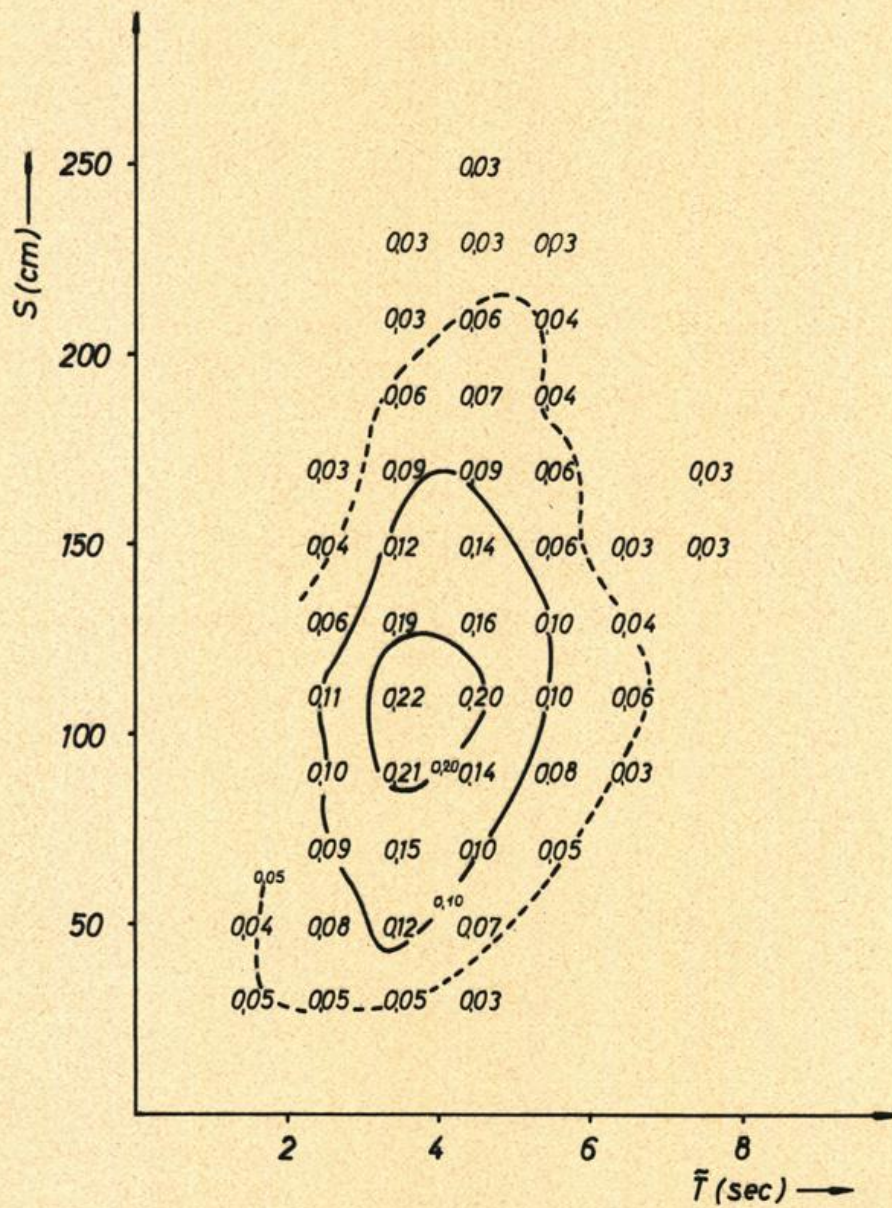


Abb.15 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC=1,5$; zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilung der Null-Durchgangs-Schwankungen als Funktion der Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \bar{T}

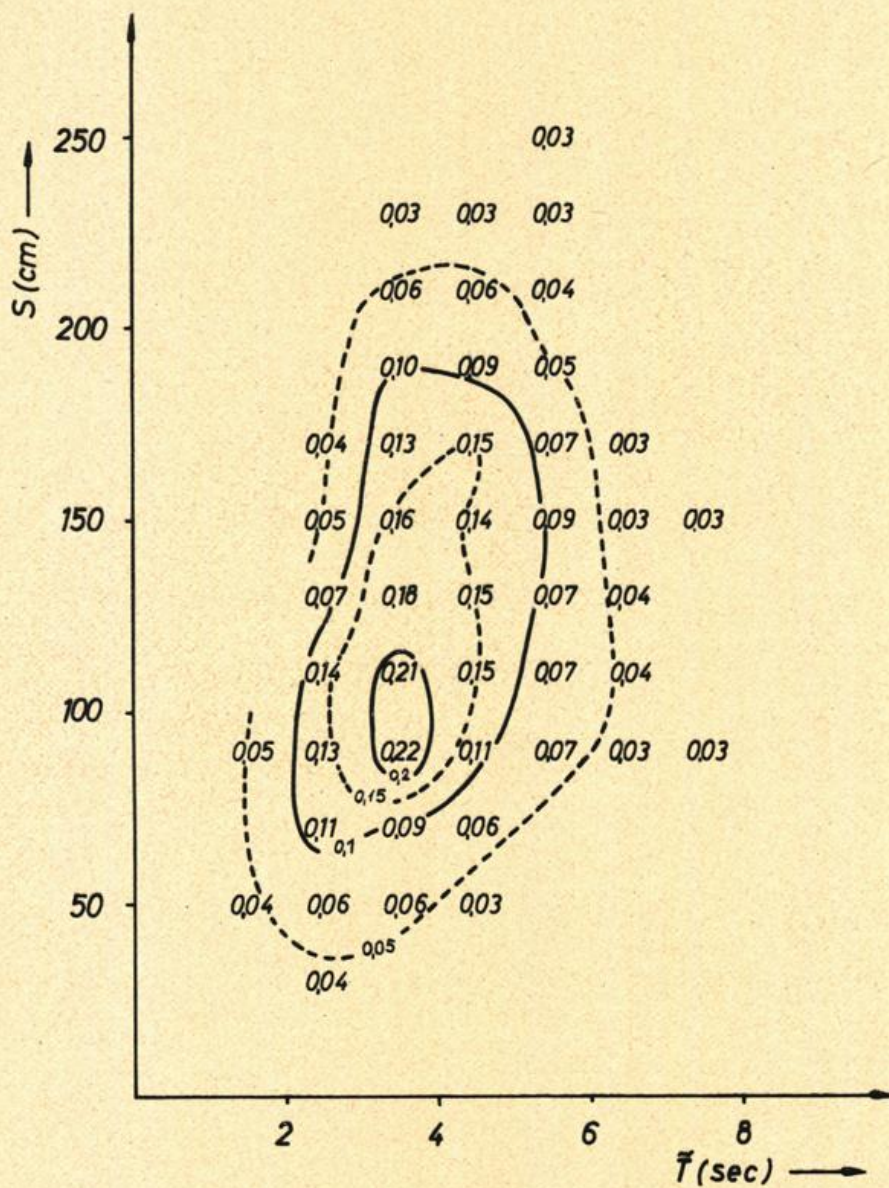


Abb.16 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC=1,67$; zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilung der Null-Durchgangs-Schwankungen als Funktion der Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \bar{T}

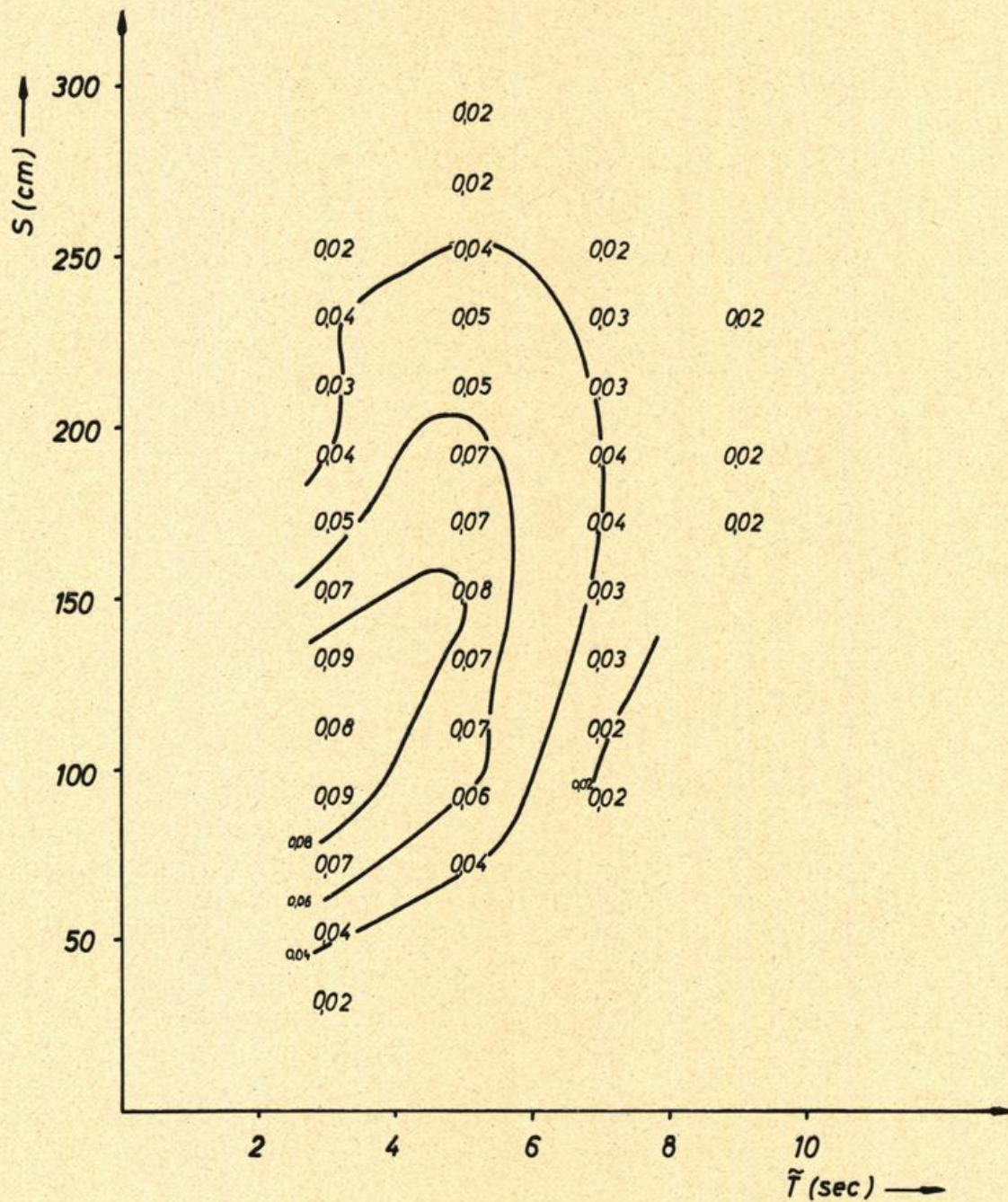


Abb.17 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter RC=2,2; zweidimensionale reduzierte relative Häufigkeitsverteilung der Null-Durchgangs-Schwankungen als Funktion der Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \tilde{T}

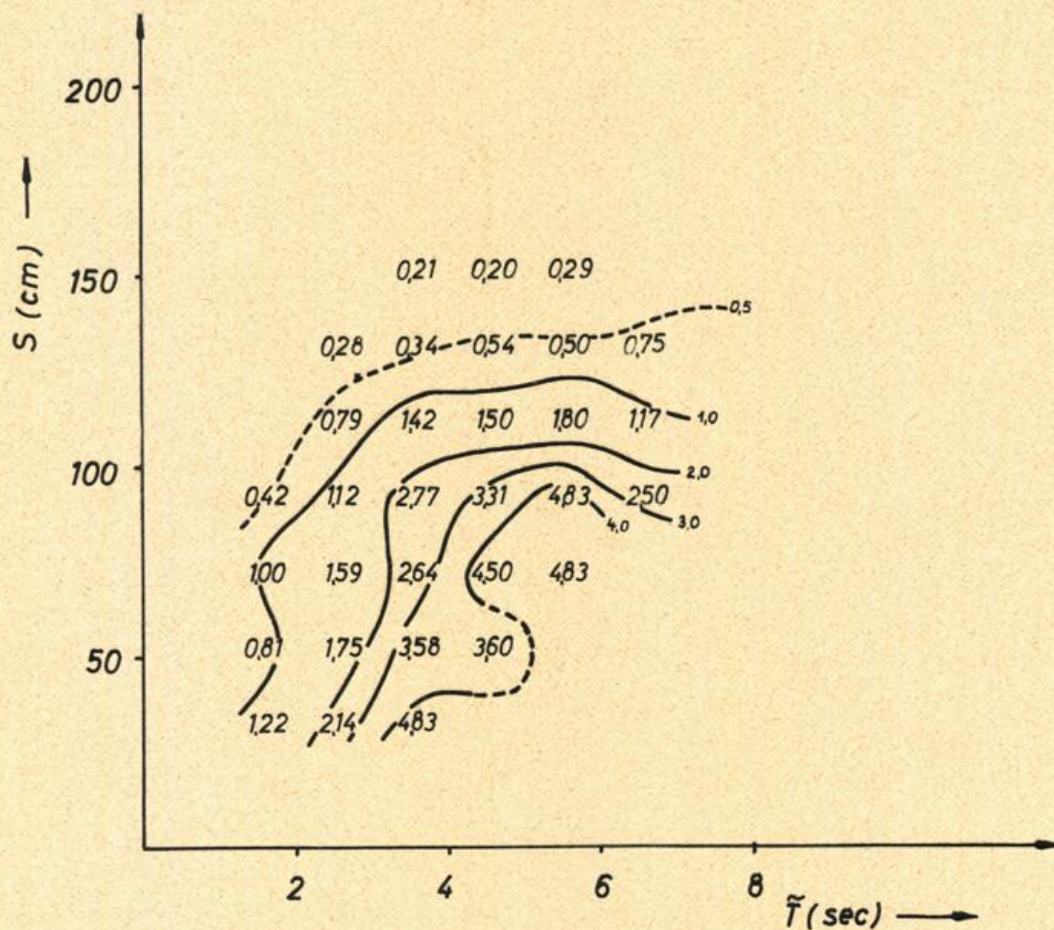


Abb.18 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC=0,91$; Umrechnungsfunktion für sichtbare Wellen σ_s als Funktion der Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \tilde{T}

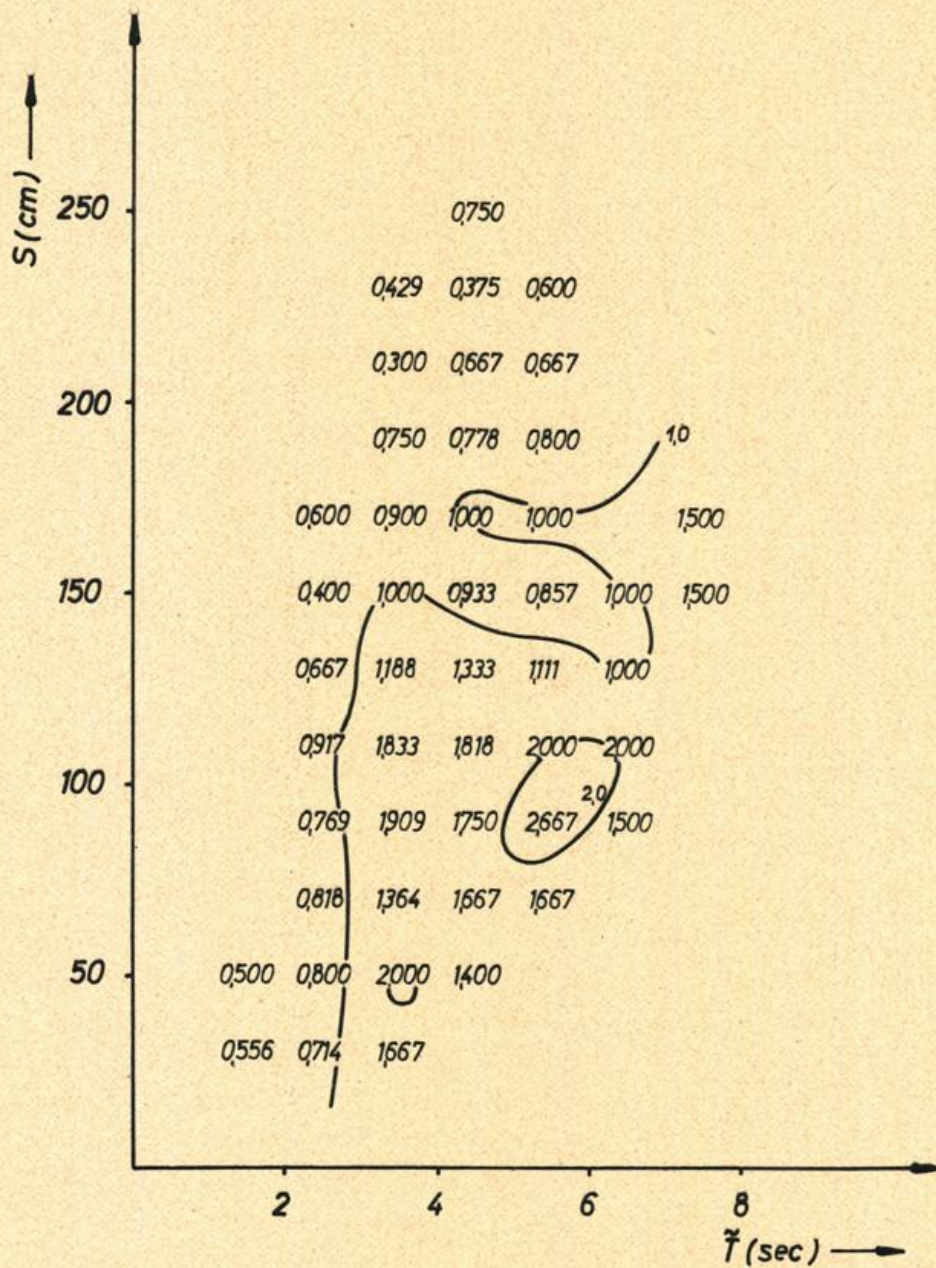


Abb.19 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter RC=1,5; Umrechnungsfunktion für sichtbare Wellen σ_g als Funktion der Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \tilde{T}

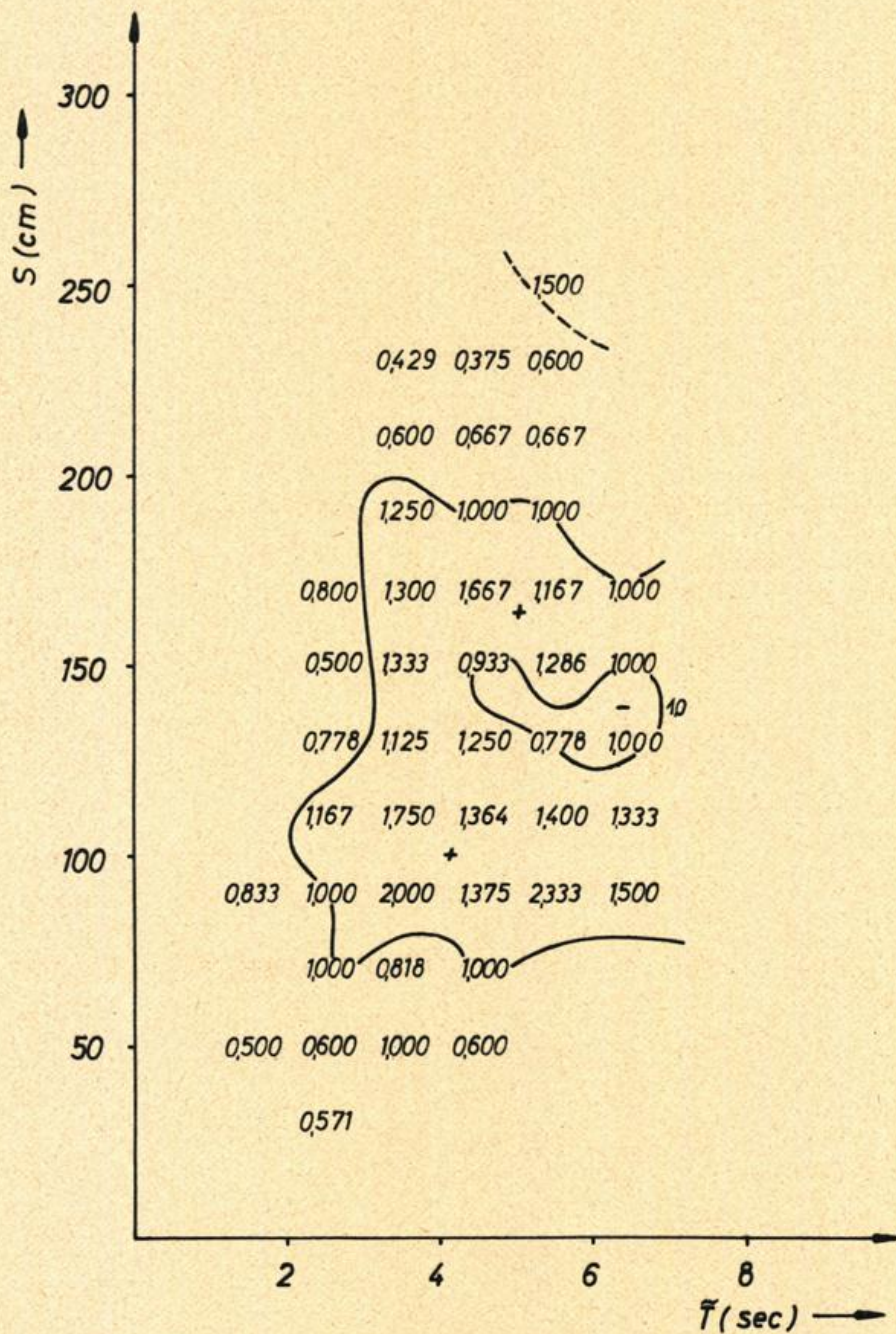


Abb.20 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC=1,67$; Umrechnungsfunktion für sichtbare Wellen σ_s als Funktion der Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \bar{T}

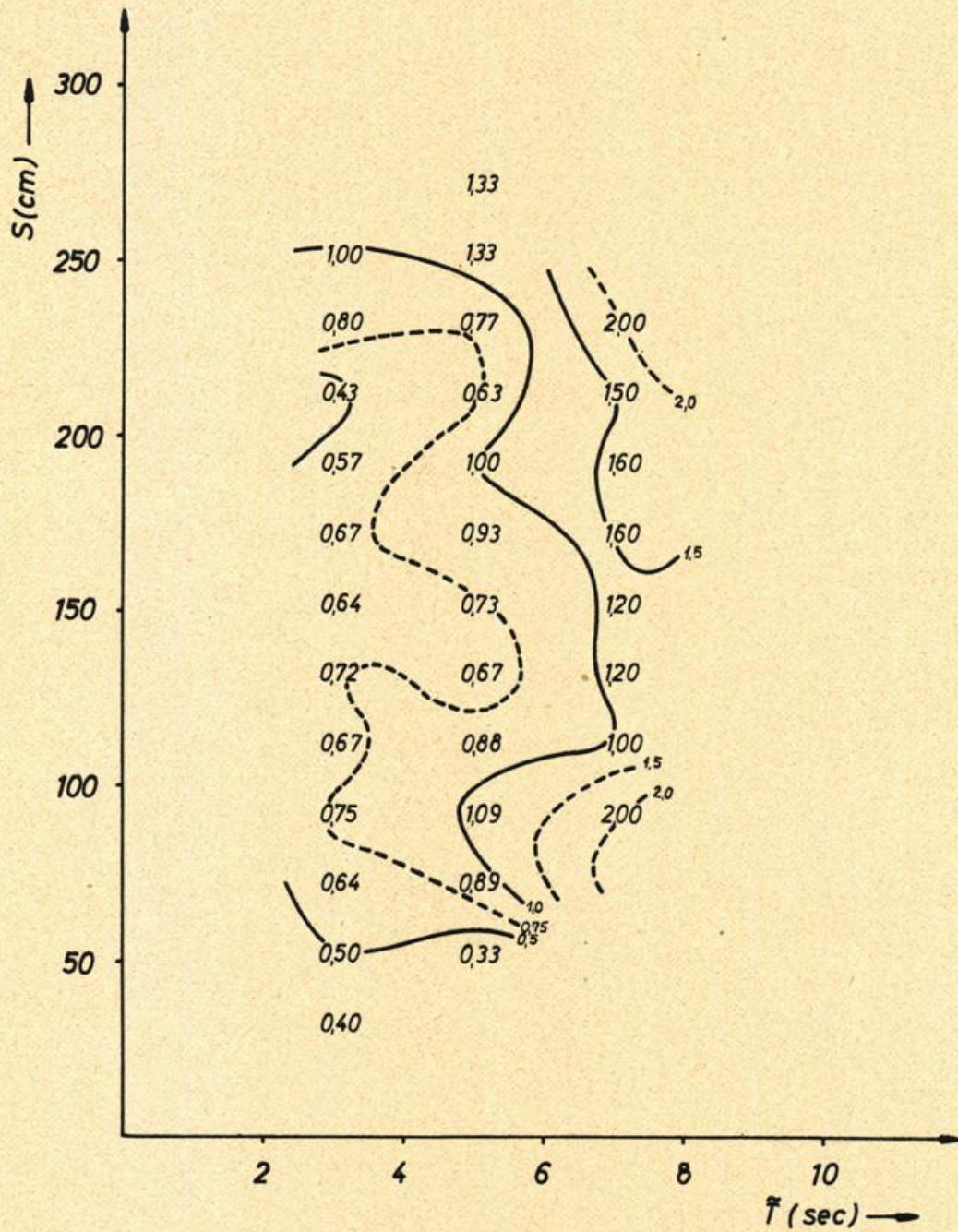


Abb.21 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, integrierte Beschleunigungsregistrierung Regelfilter $RC=2,2$; Umrechnungsfunktion für sichtbare Wellen σ_s als Funktion der Schwankungshöhe S und Schwankungsperiode \tilde{T}

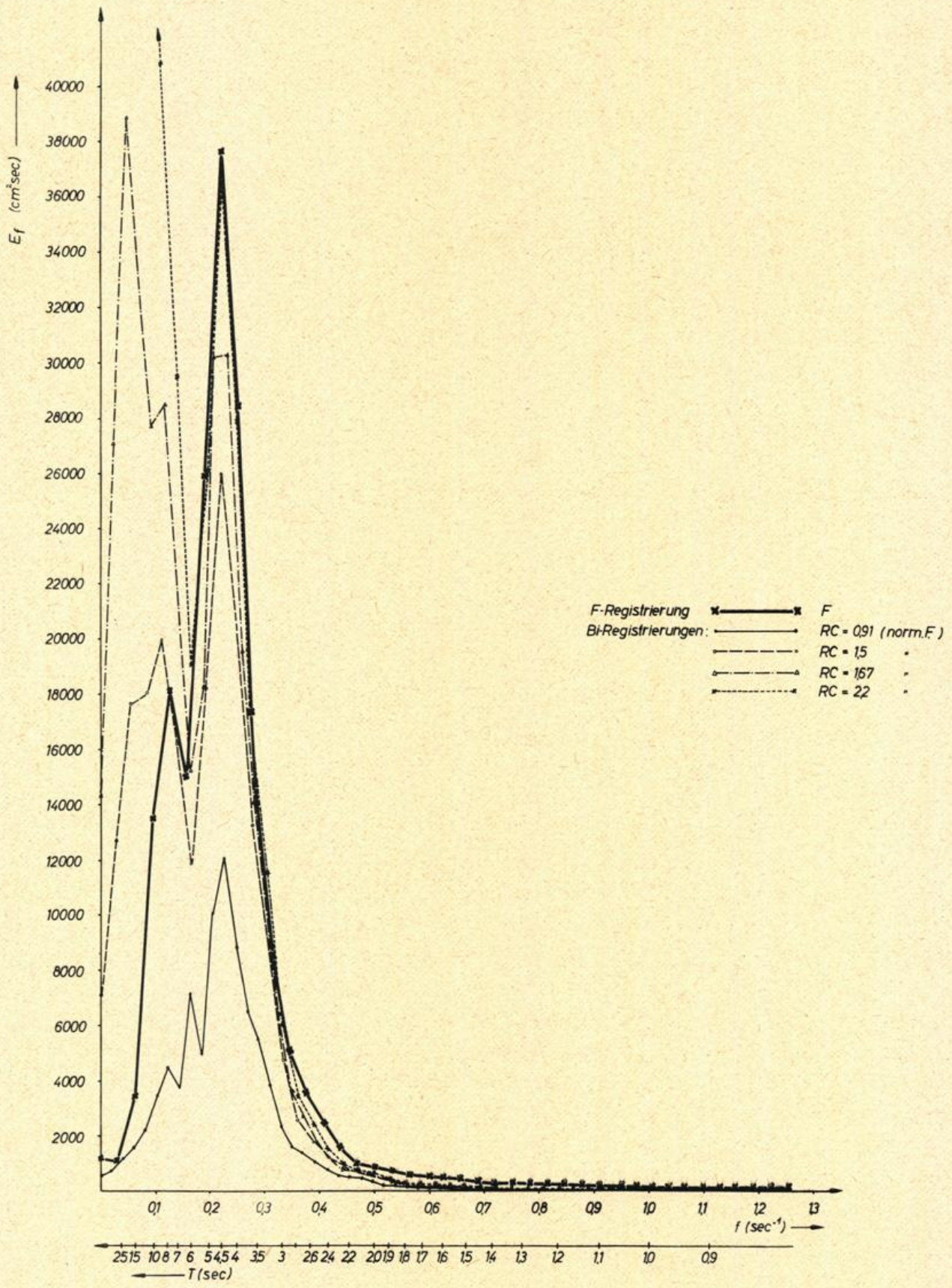


Abb.22 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960,
 Spektralverteilungen E_f als Funktion der
 Frequenz f

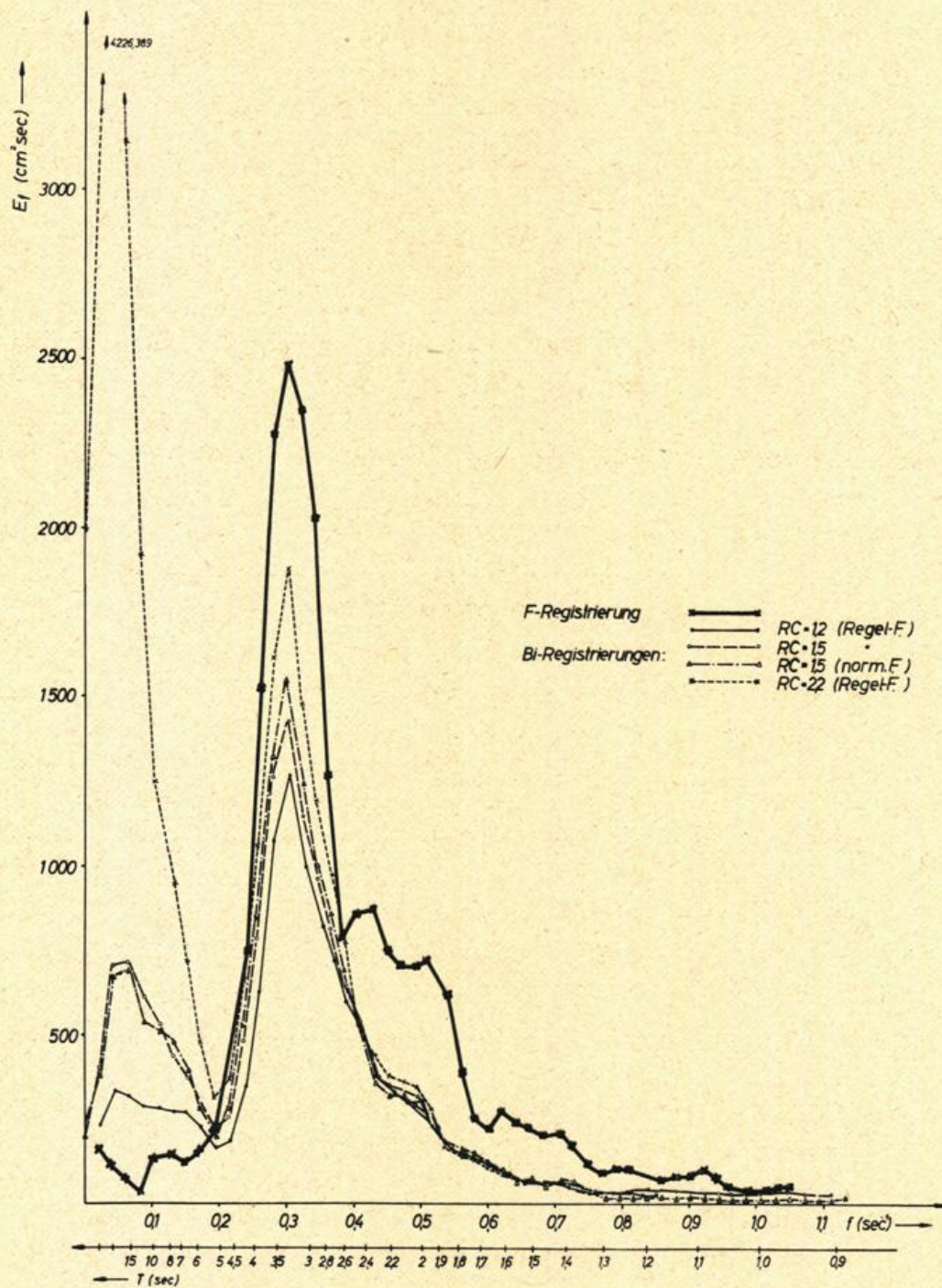


Abb.23 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 17.3.1959, Spektralverteilungen E_f als Funktion der Frequenz f

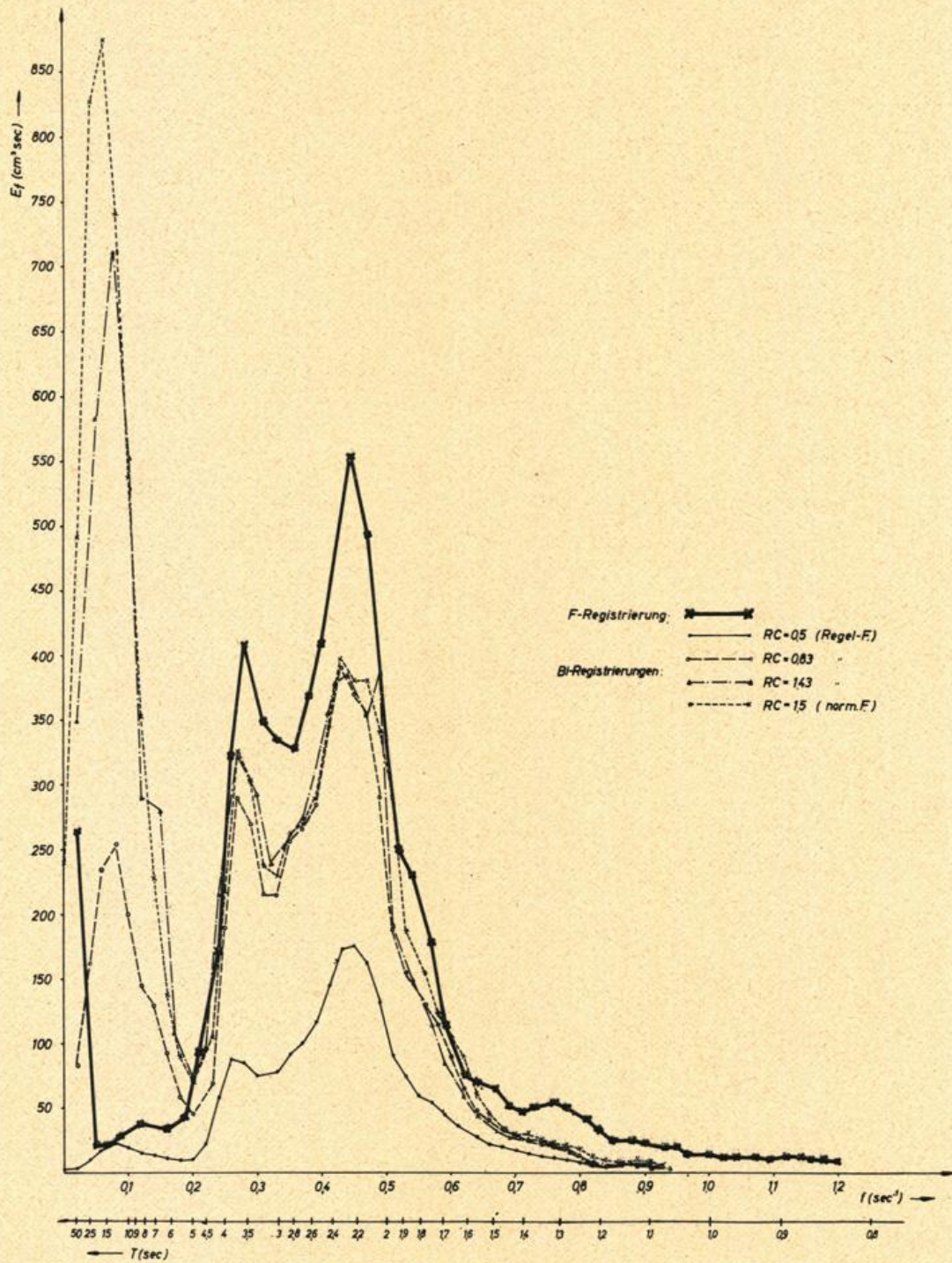


Abb.24 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 28.5.1960,
 Spektralverteilungen E_f als Funktion der
 Frequenz f

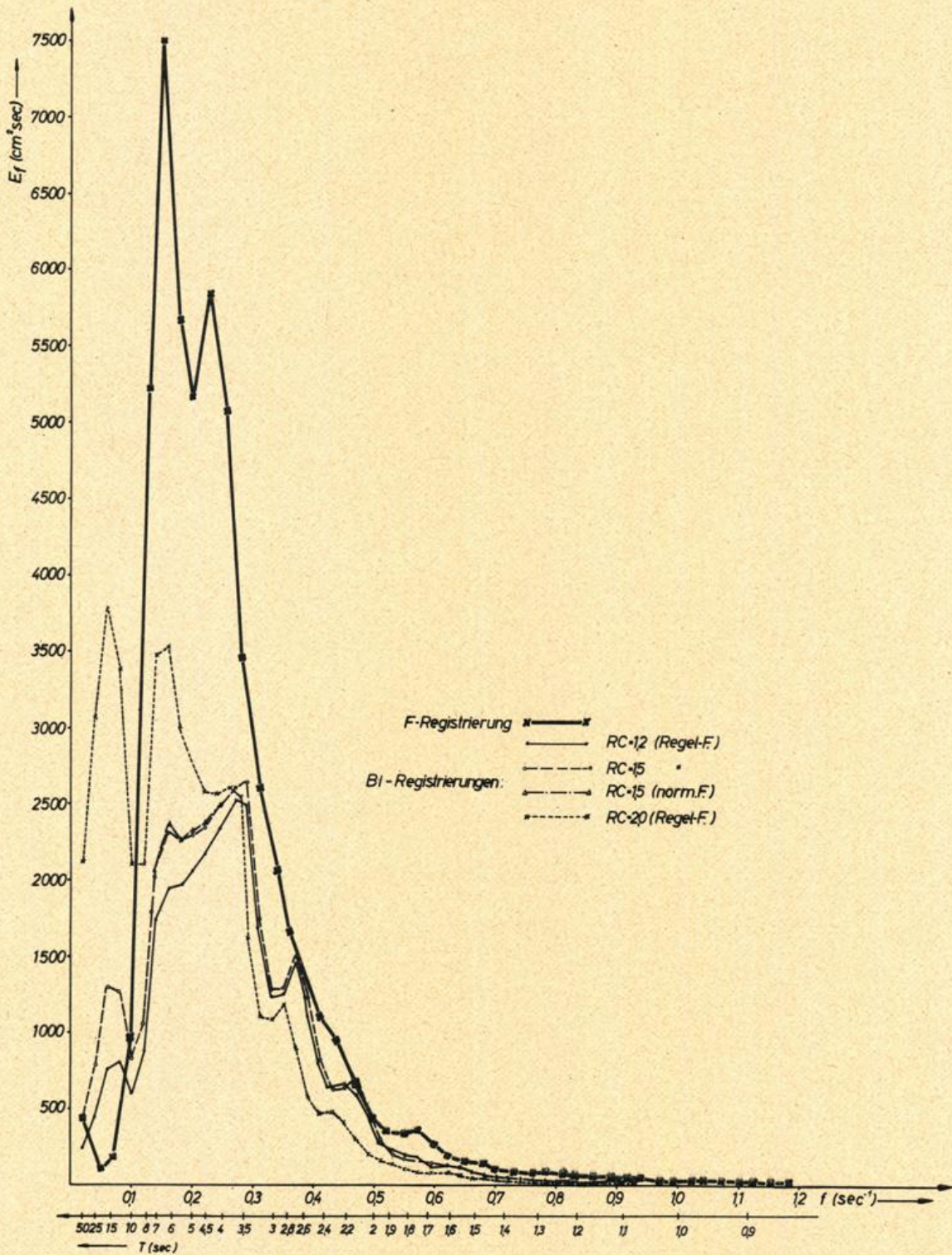


Abb.25 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 29.5.1960,
 Spektralverteilungen E_f als Funktion der
 Frequenz f

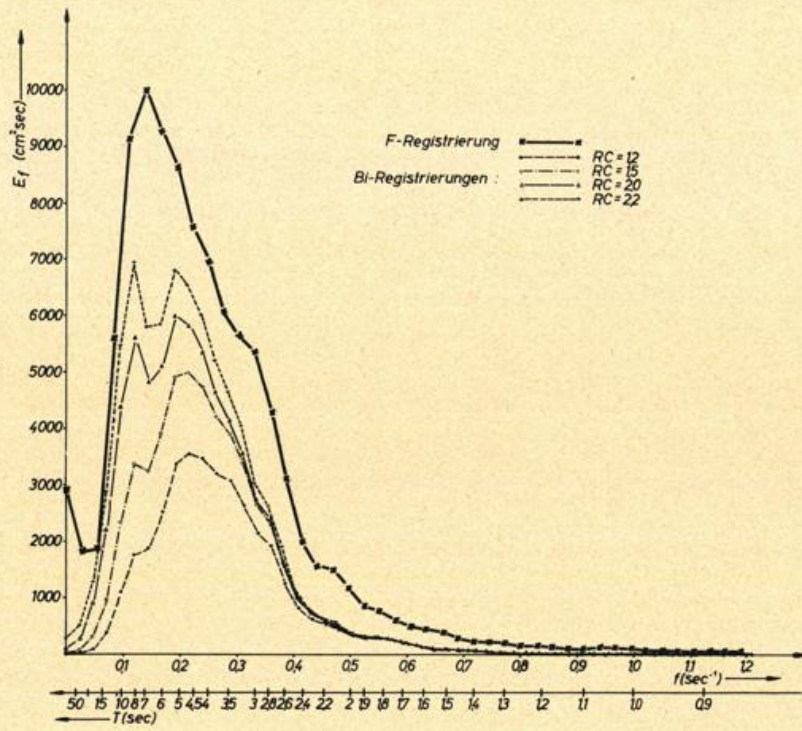


Abb.26 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 3.11.1961,
 Spektralverteilungen E_f als Funktion der
 Frequenz f

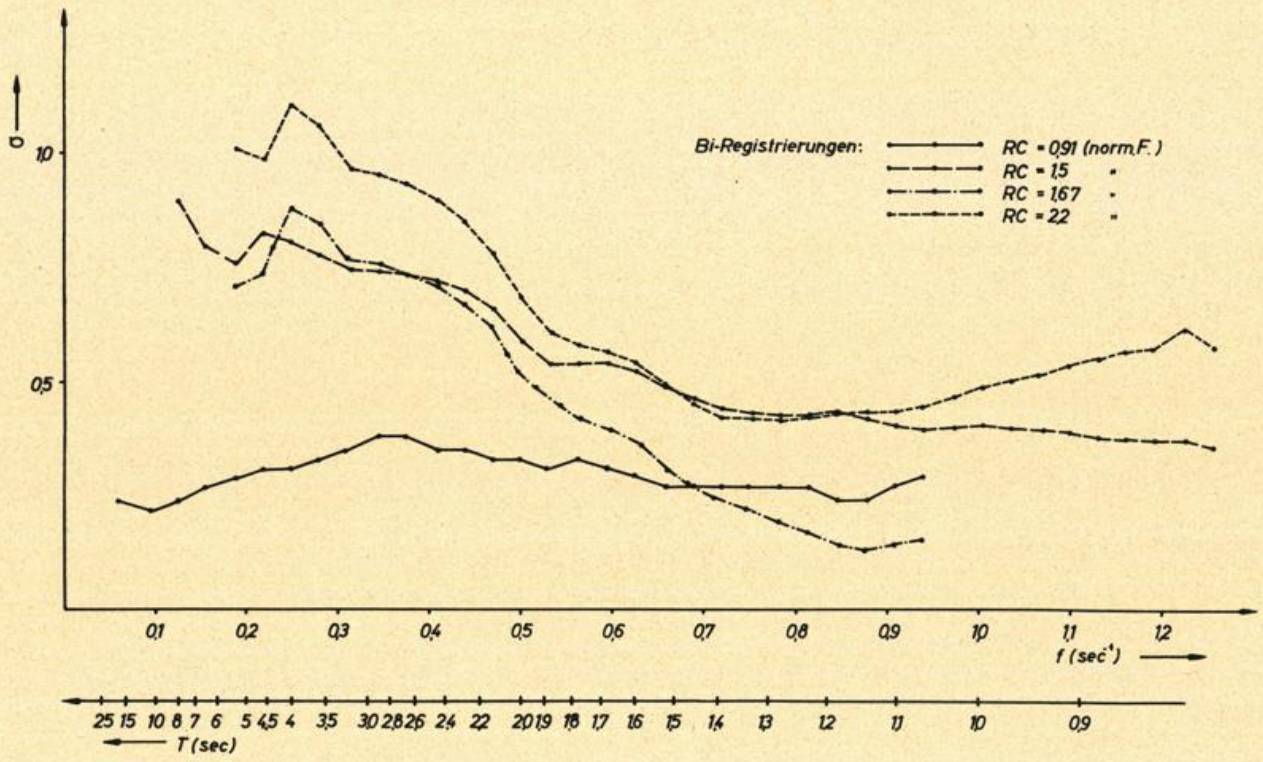


Abb.27 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 4.12.1960, spektrale Umrechnungsfunktion σ als Funktion der Frequenz f , geglättet durch übergreifende Mittel

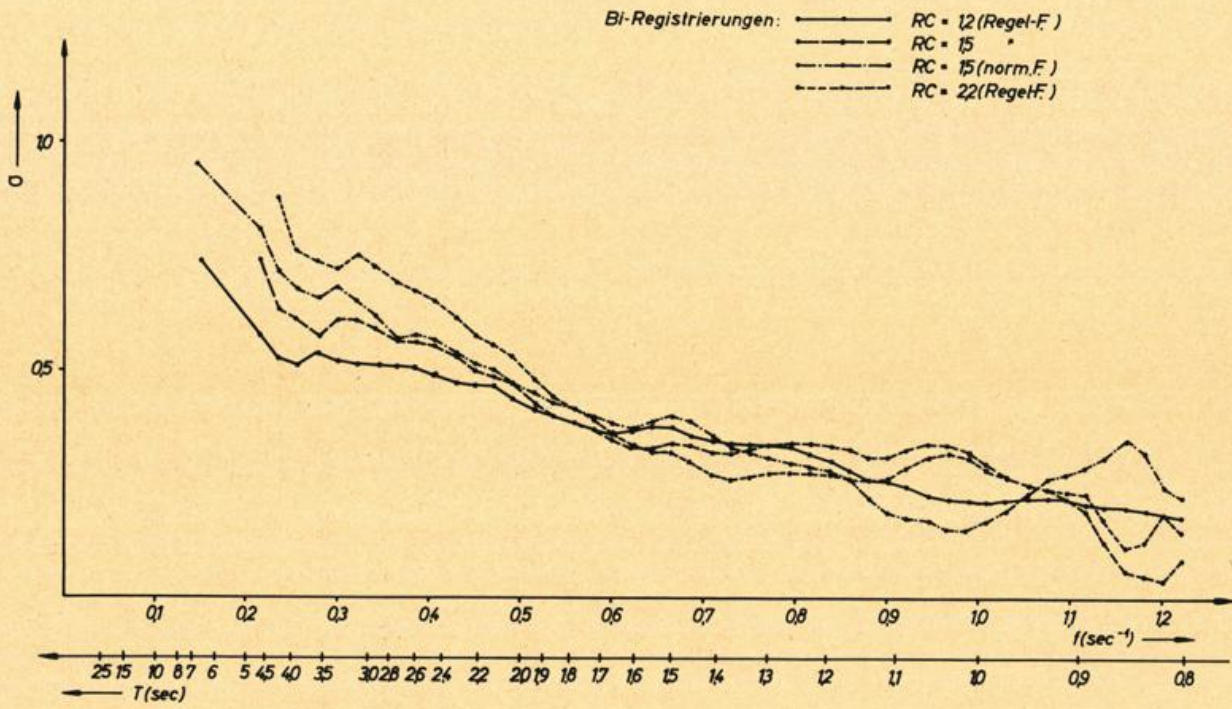


Abb.28 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 17.3.1959, spektrale Umrechnungsfunktion σ als Funktion der Frequenz f , geglättet durch übergreifende Mittel

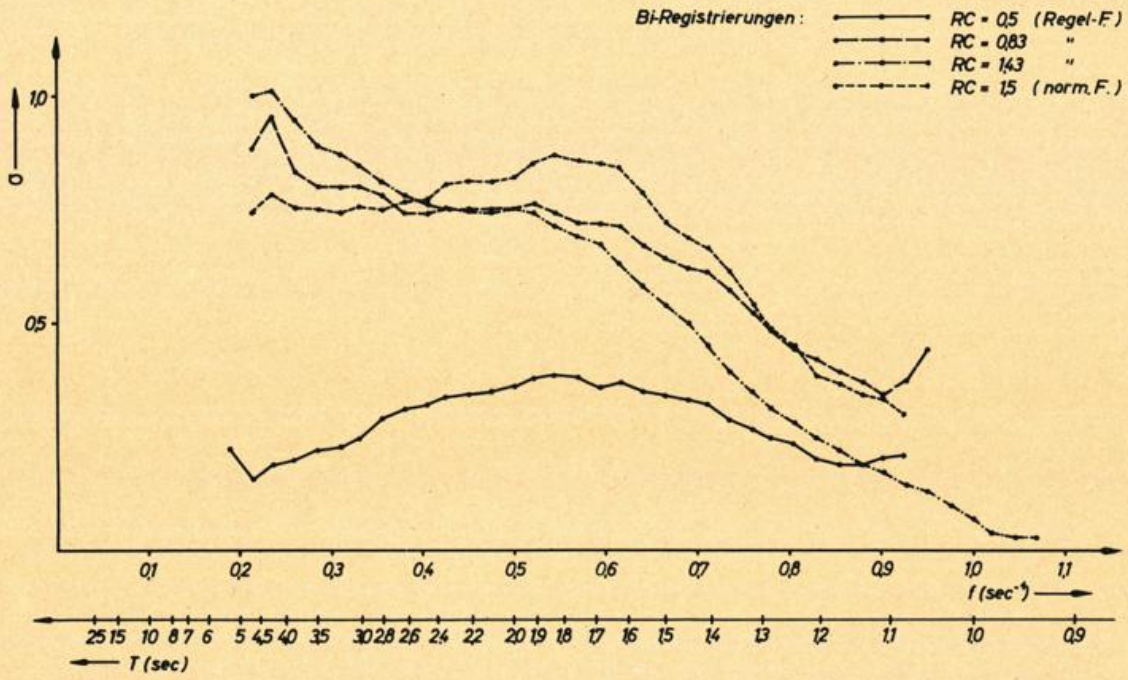


Abb.29 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 28.5.1960, spektrale Umrechnungsfunktion σ als Funktion der Frequenz f , geglättet durch übergreifende Mittel

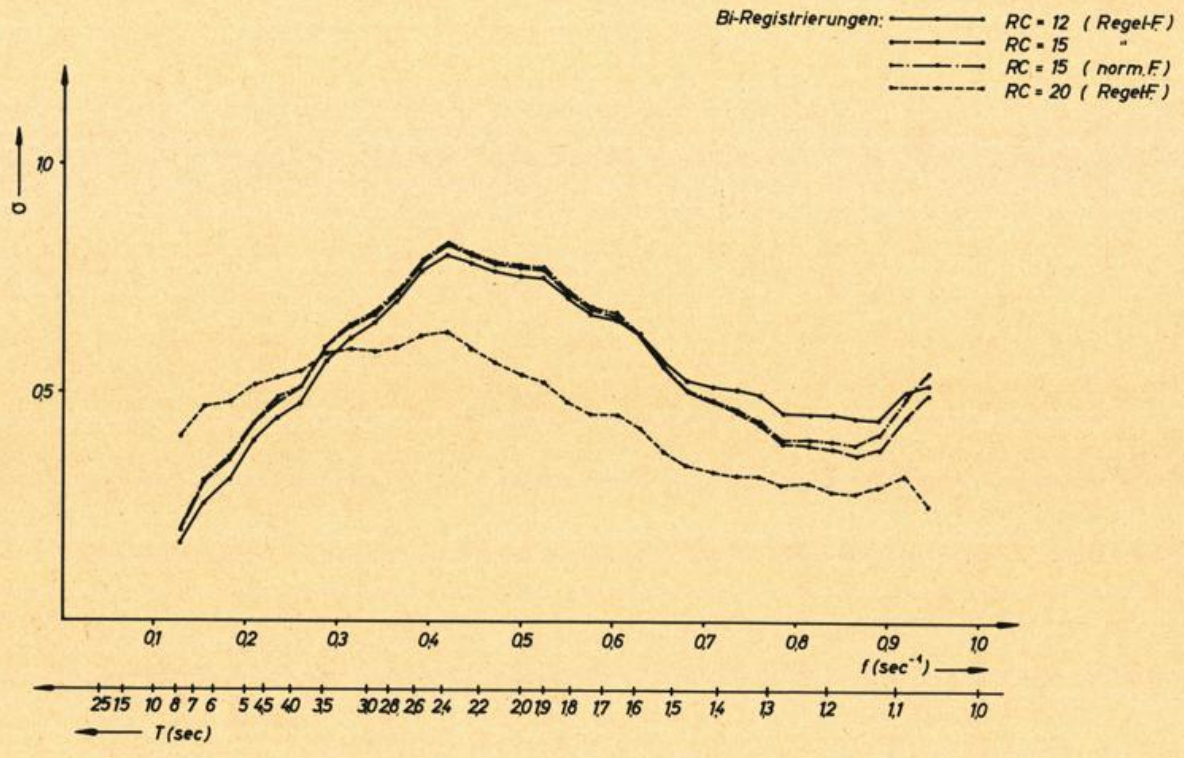


Abb.30 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 29.5.1960, spektrale Umrechnungsfunktion σ als Funktion der Frequenz f , geglättet durch übergreifende Mittel

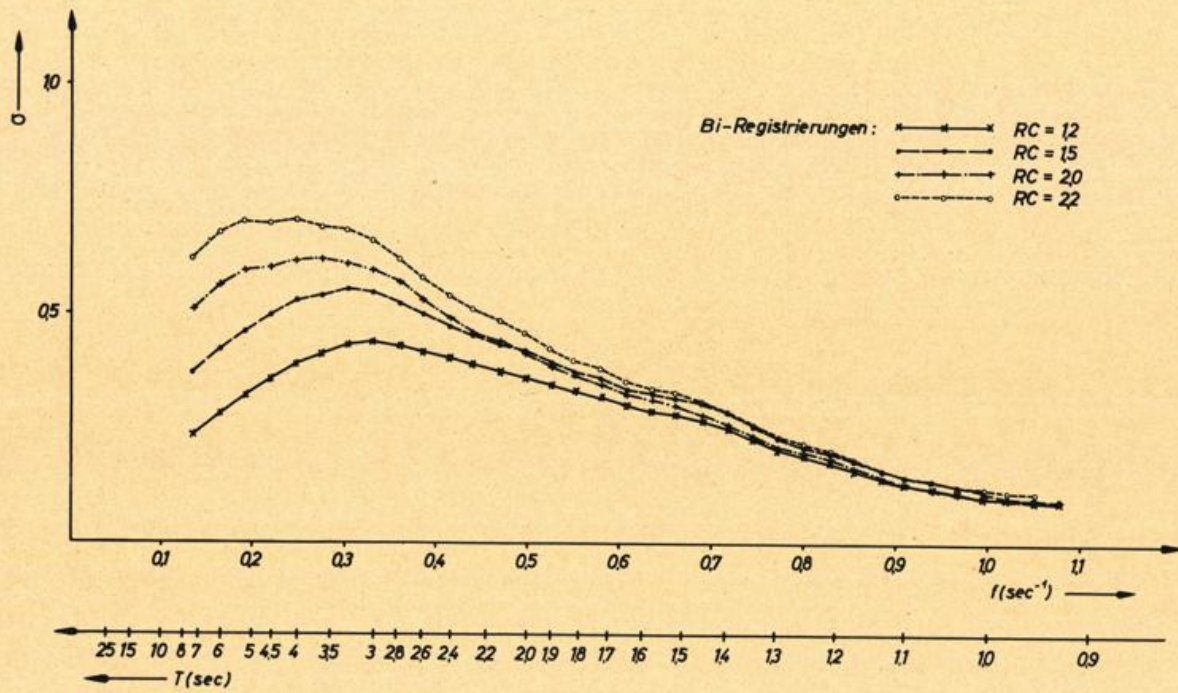


Abb.31 Vergleichsmessung Mellum Plate vom 3.11.1961, spektrale Umrechnungsfunktion σ als Funktion der Frequenz f , geglättet durch übergreifende Mittel

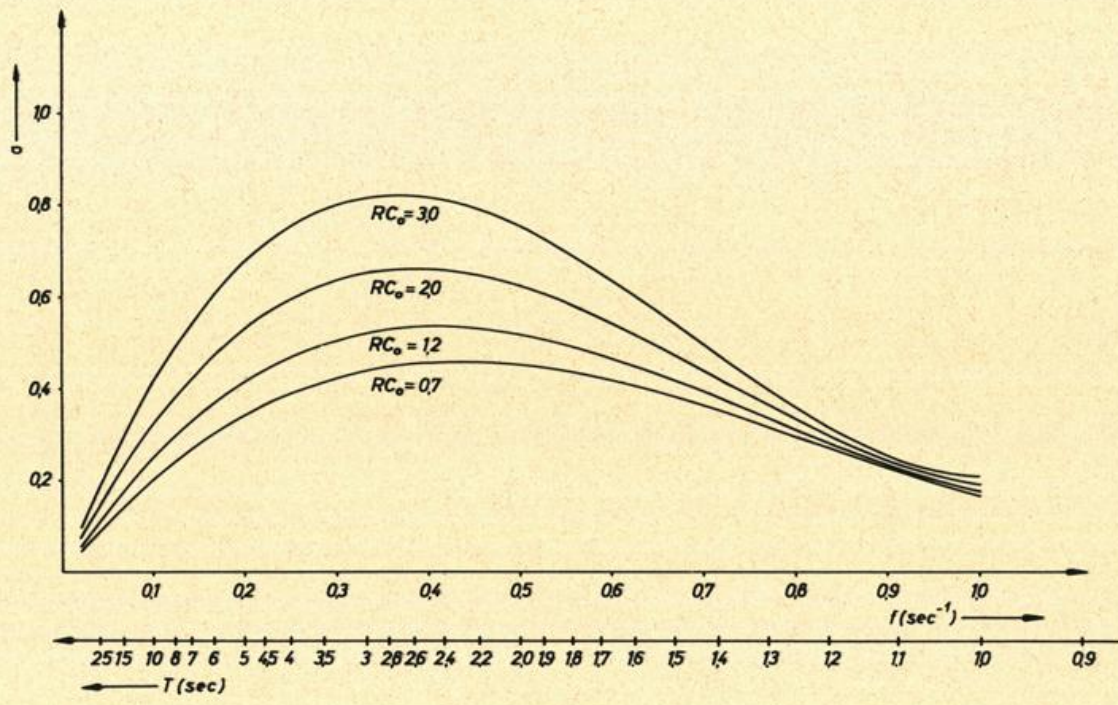


Abb.32 Umrechnungsfunktion σ in Abhängigkeit von der Frequenz f für $RC_0 = 0,7, RC_0 = 1,2, RC_0 = 2,0, RC_0 = 3,0$

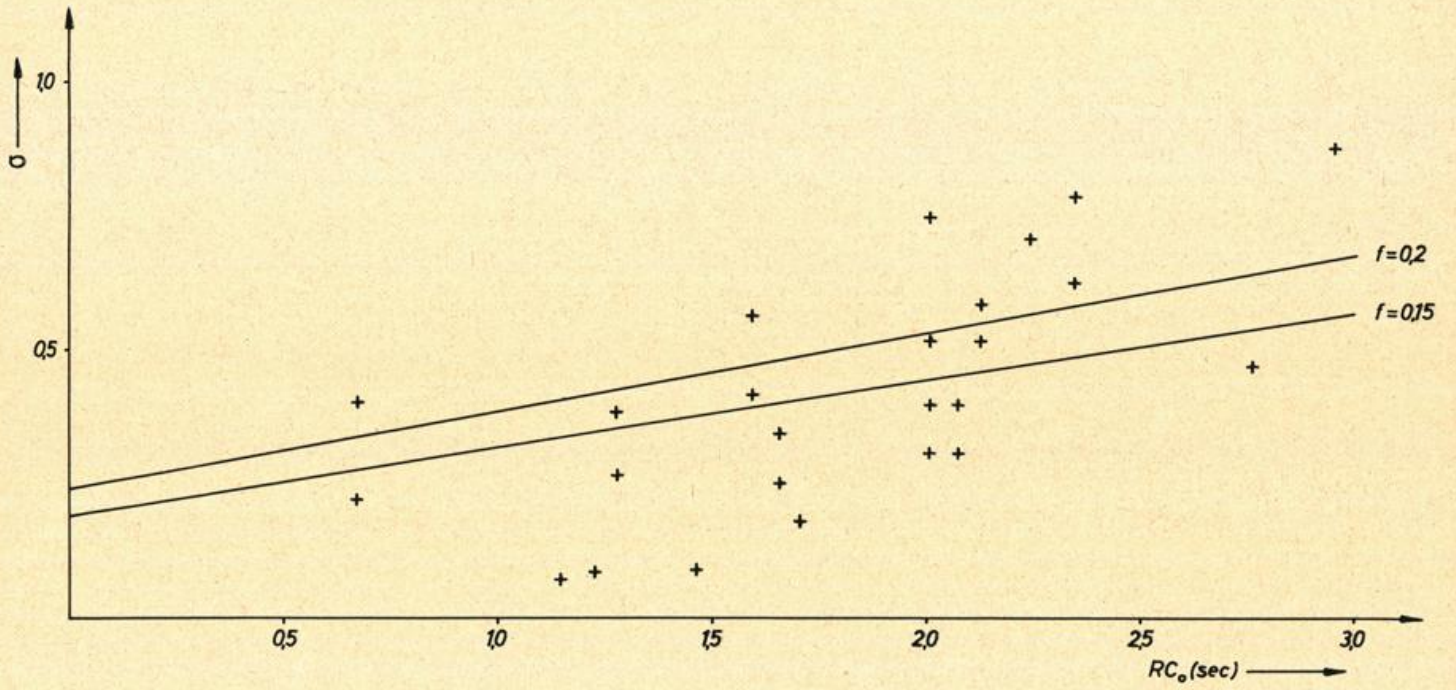


Abb.33 Empirische Umrechnungswerte für den Frequenzbereich $0,15 \leq f \leq 0,20$ sowie Umrechnungsfunktion σ in Abhängigkeit von RC_0 für $f = 0,15$ und $f = 0,20$

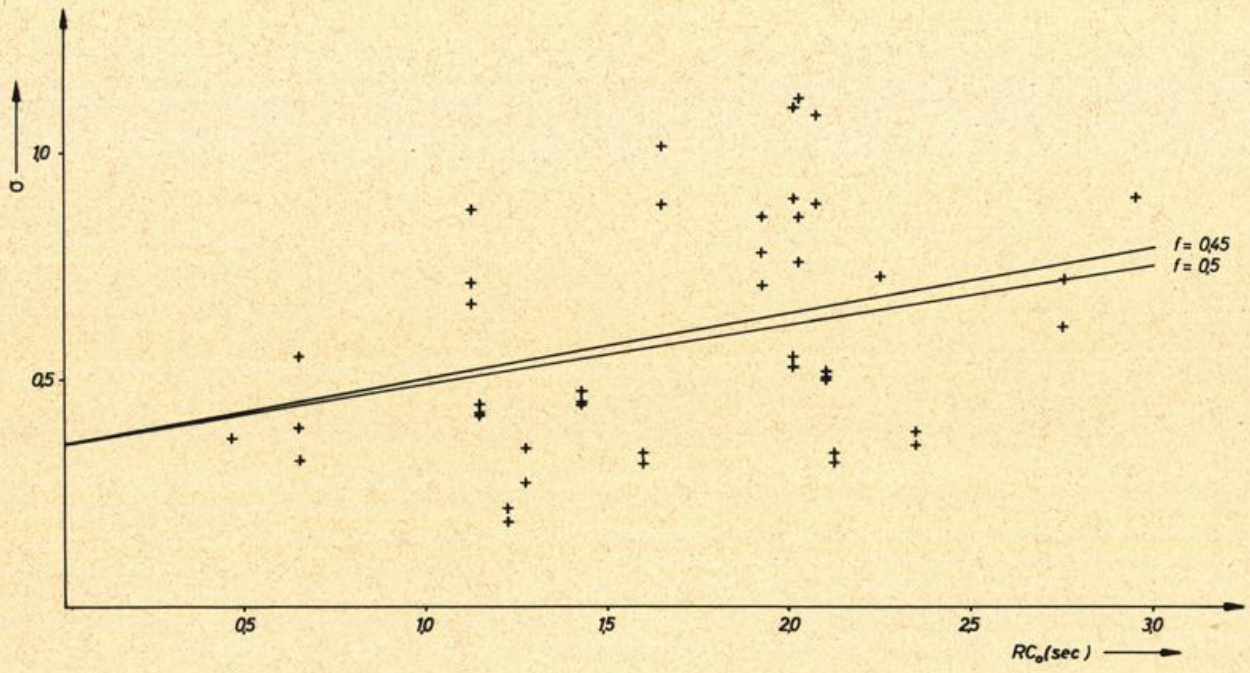


Abb. 34 Empirische Umrechnungswerte für den Frequenzbereich $0,45 \leq f \leq 0,50$ sowie Umrechnungsfunktion σ in Abhängigkeit von RC_0 für $f = 0,45$ und $f = 0,50$

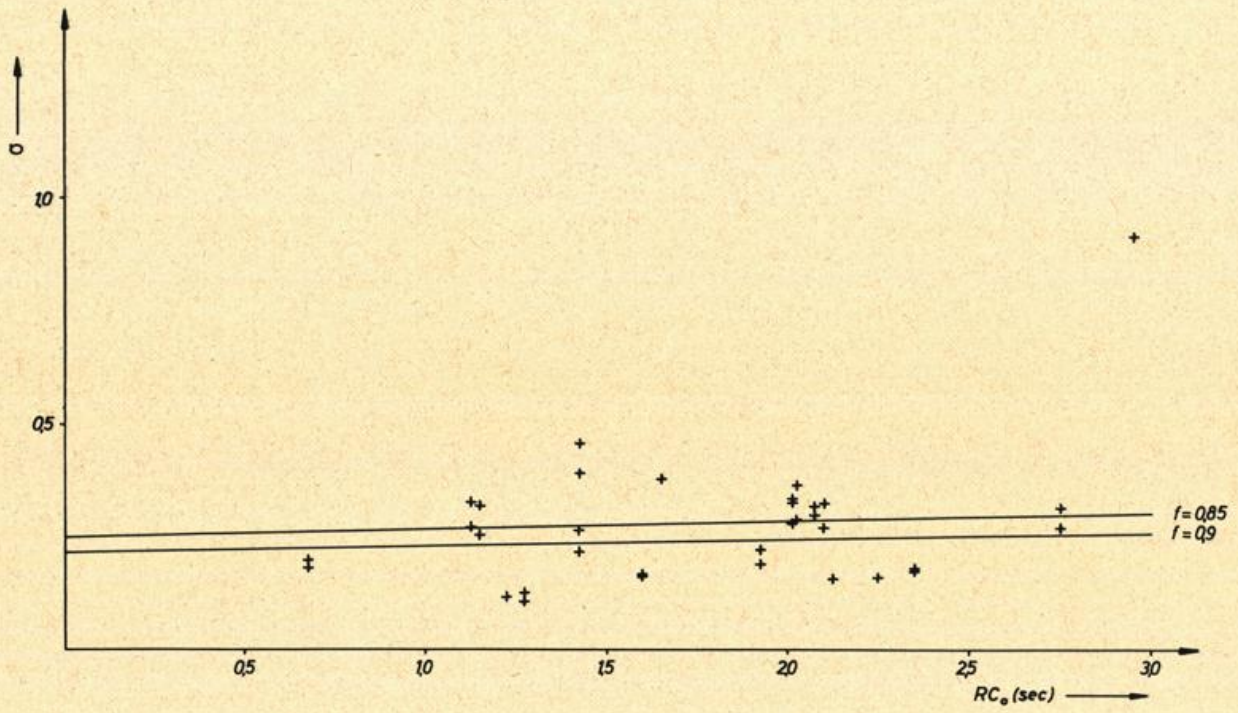


Abb.35 Empirische Umrechnungswerte für den Frequenzbereich $0,85 \leq f \leq 0,90$ sowie Umrechnungsfunktion σ in Abhängigkeit von RC_0 für $f = 0,85$ und $f = 0,90$

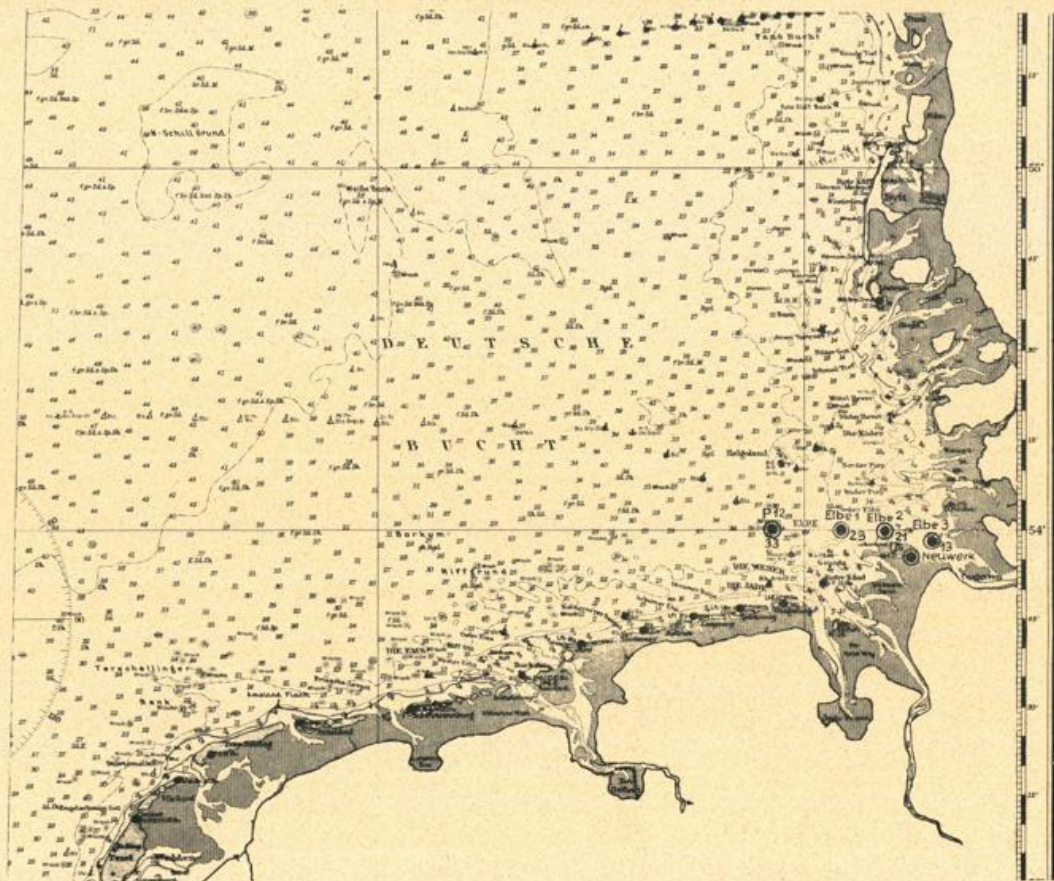


Abb.36 Seekartenausschnitt Deutsche Bucht; Lage der Meßstationen „P 12“, „Elbe 1“, „Elbe 2“, „Elbe 3“, Neuwerk

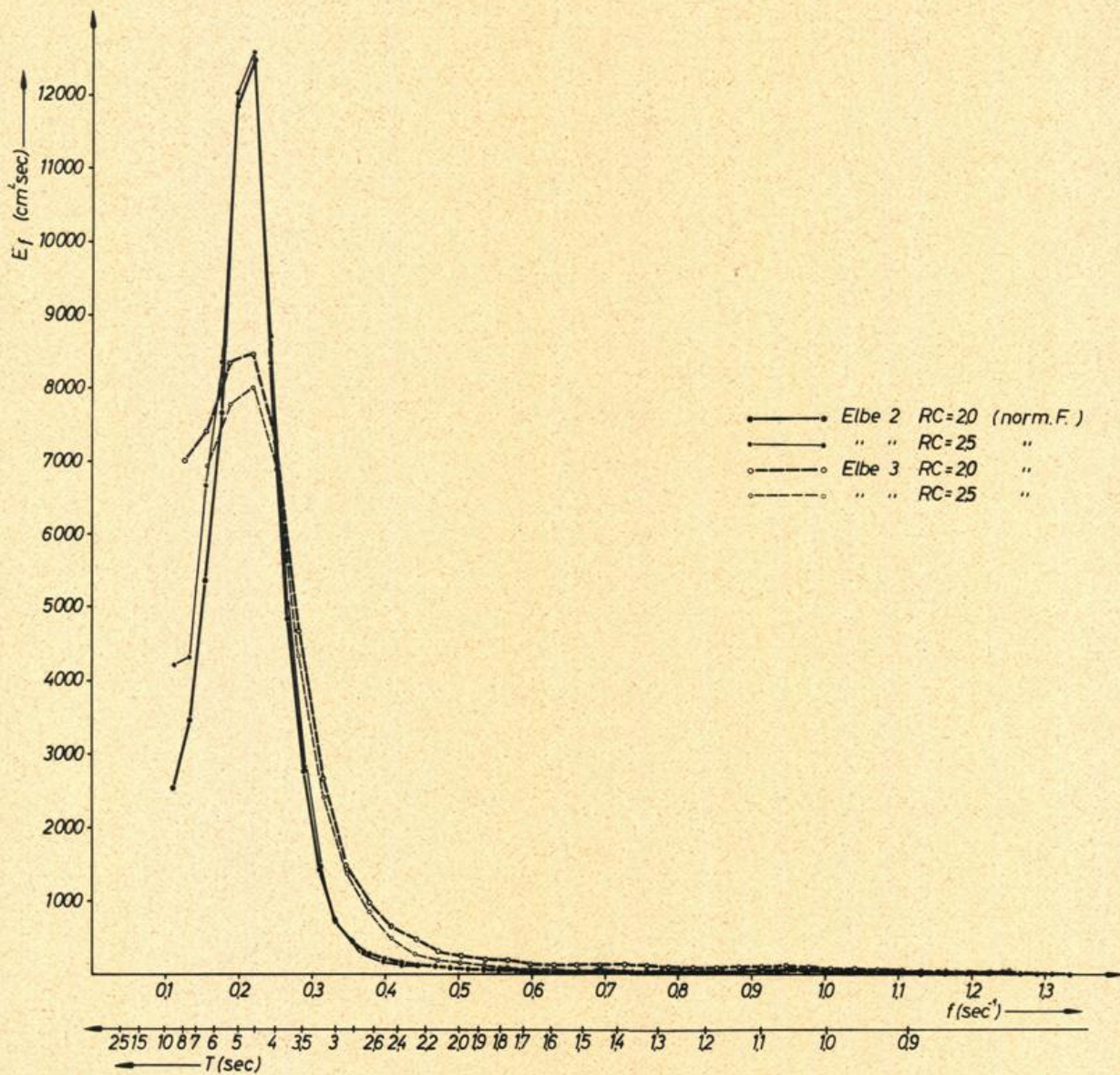


Abb.37 Simultanmessung vom 22.4.1960 (Wind WNW 6 Bft),
 Seegangsspektren von „Elbe 2“ und „Elbe 3“ unter
 Benutzung verschiedener Integrationsfilter.
 Frequenz-spektrale Intensitätsdichte E_f als
 Funktion der Frequenz f

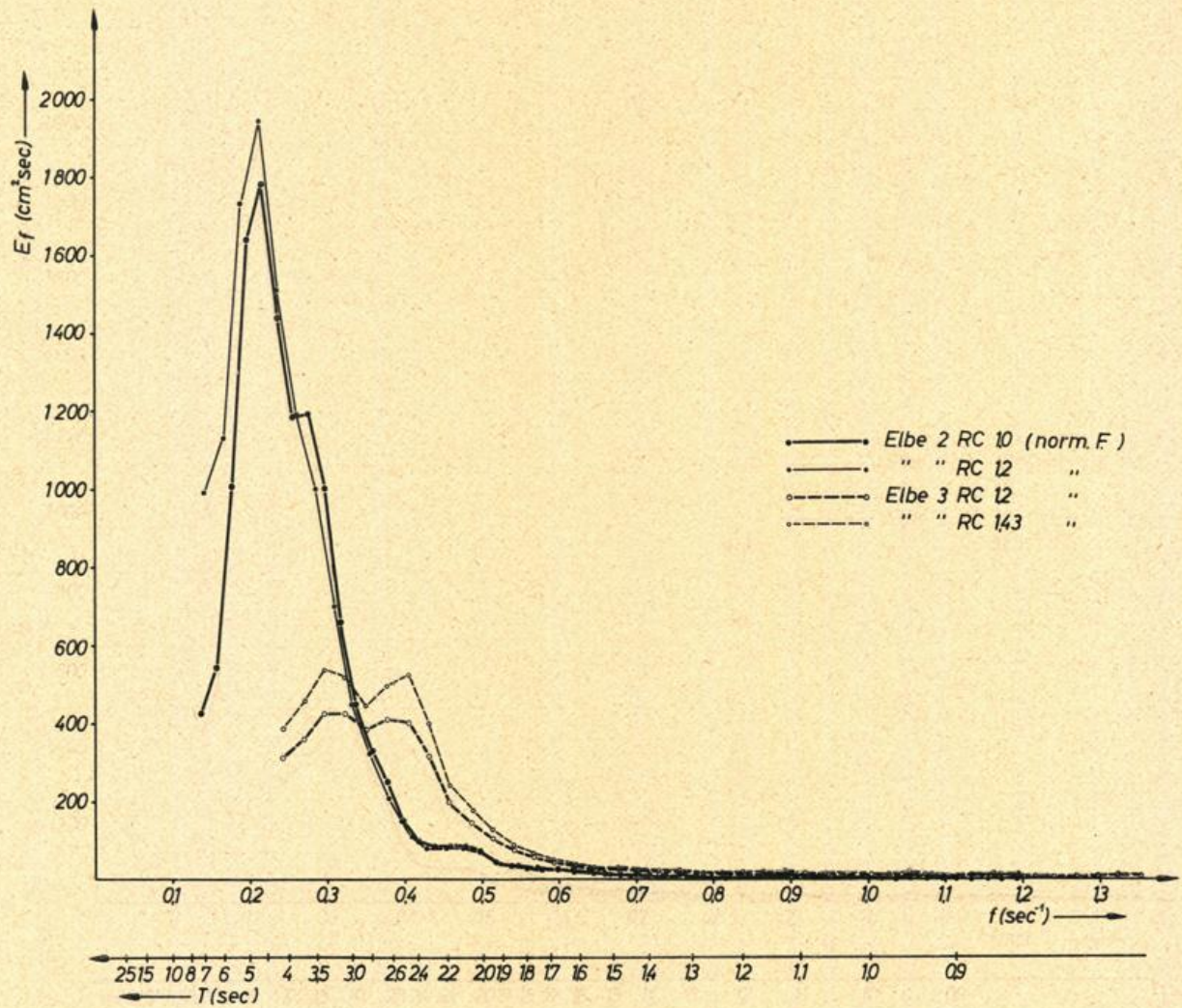


Abb.38 Simultanmessung vom 10.6.1960 (Wind NW 3 Bft),
 Seegangsspektren von „Elbe 2“ und „Elbe 3“ unter
 Benutzung von verschiedenen Integrationsfiltern.
 Frequenz-spektrale Intensitätsdichte E_f als
 Funktion der Frequenz f

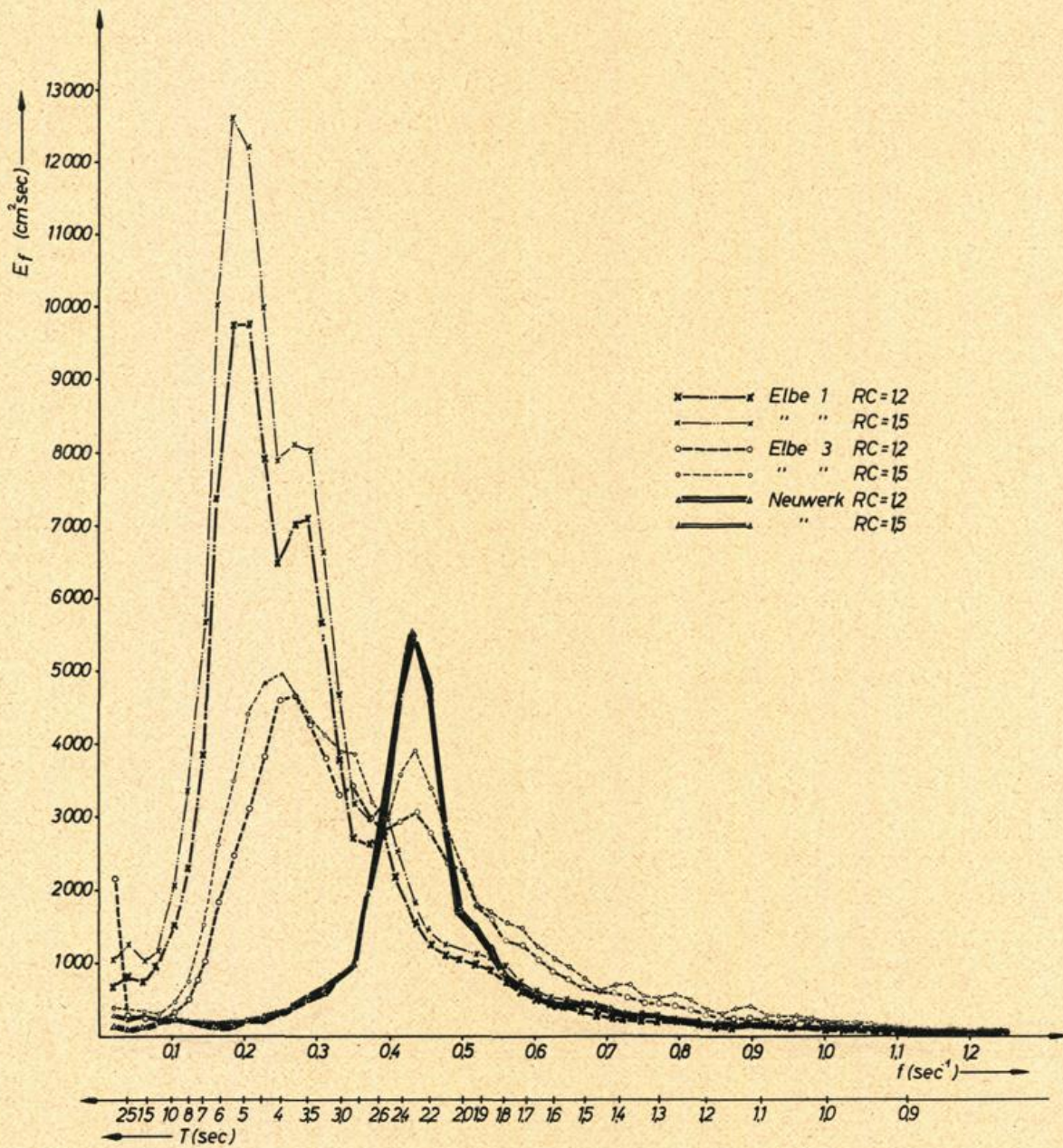


Abb.39 Simultanmessung vom 29.7.1961 (Wind WNW 5 Bft),
 Seegangsspektren von „Elbe 1“, „Elbe 3“ und Neuwerk
 unter Benutzung verschiedener Integrationsfilter.
 Frequenz-spektrale Intensitätsdichte E_f als Funk-
 tion der Frequenz f

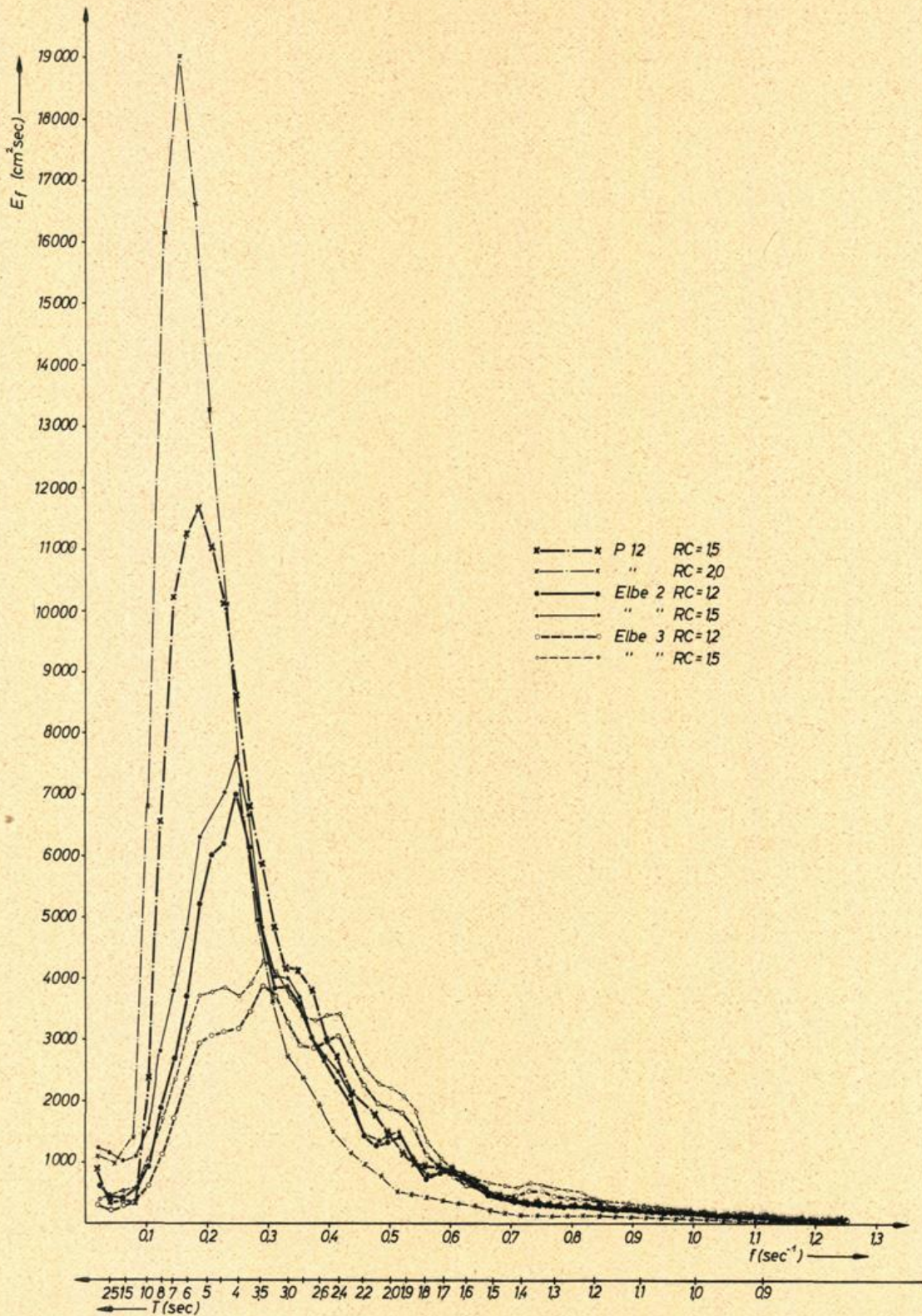
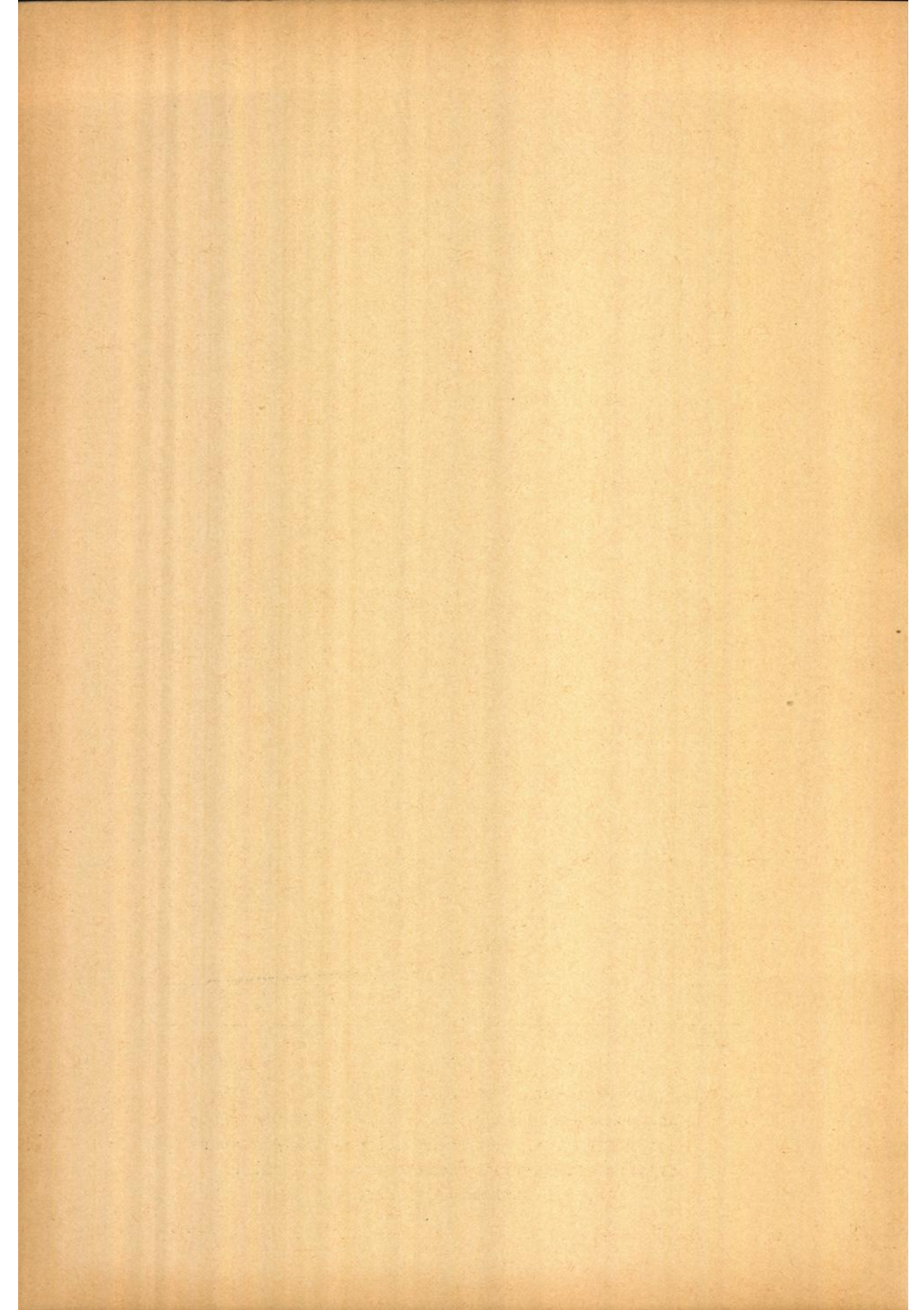


Abb.40 Simultanmessung vom 2.8.1961 (Wind N 2-3 Bft),
 Seegangsspektren von „P 12“, „Elbe 2“ und „Elbe 3“
 unter Benutzung von verschiedenen Integrations-
 filtern. Frequenz-spektrale Intensitätsdichte
 E_f als Funktion der Frequenz f



- Nr. 34 (1962) Über den Geländeeinfluß auf Windrichtung und Windgeschwindigkeit im Raum Hamburg (E. Franken)
- 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-Annen)
- 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 „Seengangsbeschleunigungsmessermitt photographischer Registrierung“ und ihre Auswertung zum Studium des Seegangs beim Einlaufen in das Wattenmeer (H. Walden, A. Lang u. J. Piest).

1. The first part of the report...

2. The second part of the report...

3. The third part of the report...

4. The fourth part of the report...

5. The fifth part of the report...

6. The sixth part of the report...

7. The seventh part of the report...

8. The eighth part of the report...

9. The ninth part of the report...

10. The tenth part of the report...

11. The eleventh part of the report...

12. The twelfth part of the report...

13. The thirteenth part of the report...

14. The fourteenth part of the report...

15. The fifteenth part of the report...

16. The sixteenth part of the report...

17. The seventeenth part of the report...

18. The eighteenth part of the report...

19. The nineteenth part of the report...

20. The twentieth part of the report...